

Zonneboiler voor wie de ruimte heeft

Kees van der Geer

April 23, 2011

Verwarmen met een zonnecollector kost niets en vervuult niets. Dit artikel beschrijft een verwarmingssysteem op zonne-energie bestaande uit een heel grote zonnecollector, geschikt voor het verwarmen van een huis het hele jaar door en een warmtereservoir zo groot dat daarmee een week bewolkt weer overbrugd kan worden. Beiden zijn gebouwd met eenvoudige goedkope materialen. Voor Nederland geldt de beperking dat met dit systeem de kachel moet blijven staan voor de periode van november tot maart.

1 Inleiding

Als we olie kopen voor onze kachel kopen we daarmee warmte voor ongeveer 5 cent per kWh. Bij een elektrische kachel is dat ongeveer 20 cent/kWh, veel duurder door de veel ingewikkelder weg: brandstof → warmte → electriciteit → warmte. Met de voorgestelde zonne verwarming hoeven we ons daar vanaf maart tot november niet druk over te maken en al helemaal niet in het mediterrane gebied. Dat zie je zo aan het gemiddeld aantal zonuren per dag (uitgedrukt in kWh/m²/dag) in fig. 1 als je daarbij bedenkt dat we per dag 37 kWh gebruiken voor verwarming¹. Deze hoeveelheid warmte straalt in maart al op 11 m².

In de praktijk hebben we ongeveer een vier maal zo grote oppervlakte nodig omdat we a) alle warmte 's winters gebruiken en b) het rendement altijd kleiner dan 100% is (ook van de cv-ketel) maar na een ramp zoals in Japan, is het dan zo gek om enkele tientallen m² van tuin of dak

¹Een huishouden gebruikt gemiddeld 1550 m³ aardgas per jaar en een m³ aargas heeft een verbrandingswaarde van 8.8 kWh.

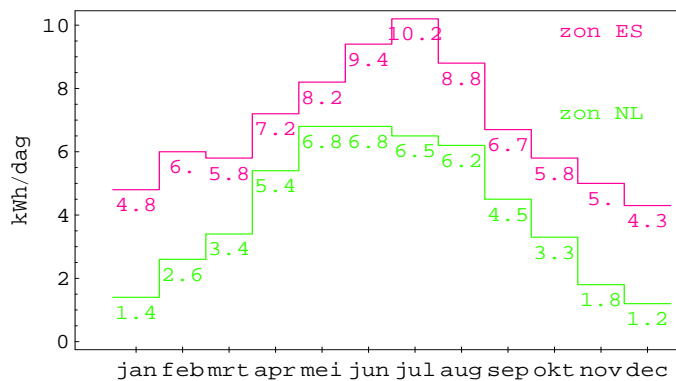


Figure 1: Gemiddeld aantal zonuren per dag voor Nederland en voor Spanje (costa del Azahar, N-O-Spanje). In Spanje begint het jaar al met zoveel zonuren als hier in April.

op te offeren voor het opvangen van zonnewarmte?²

Bij reclames voor energiebesparing wordt vaak gewezen op verspilling van warm water. Onzin! Wat we verspillen is de warmte die de zon ons geeft.

Mijn bedoeling met dit artikel is vooral te bereiken dat mensen zelf gaan experimenteren en dan gaan inzien dat het echt kan en niet veel hoeft te kosten. In tegenstelling tot de mobiele telefoon had dit altijd al gekunnen, ook in de middeleeuwen en misschien nog veel eerder. Isolatie kan altijd heel goed gemaakt worden met veel lagen van willekeurig materiaal, water laten stromen kon ook altijd al, zelfs kwik in china, en een doorzichtig materiaal, zoals glas bestaat ook al eeuwen.

Het beschreven systeem heeft niet alleen een zonnecol-

²De energie die de zon straalt op het nu verpeste gebied 10 km rond de kerncentrale is ruim 100 Gigawatt, dag in dag uit, gratis, zonder risico. Een flinke kerncentrale levert 10 GigaWatt

lector maar ook een warmtereservoir want het is wel gerieflijk als het ook werkt als de zon een week niet schijnt. Voor de aardigheid berekenen we ook de grootte van een warmtereservoir voor een half jaar. Dat is voor wie behalve gewone ruimte ook financiële ruimte heeft.

In het systeem wordt water met zijn grote warmtecapaciteit gebruikt voor transport en opslag van warmte. Het stroomt in gesloten circuits tussen de collector en het reservoir en tussen het reservoir en de radiatoren in huis. Het water dat wordt *verbruikt* in huis (drinkwater, waswater) mag niet direct uit het reservoir komen om redenen van hygiëne. Het moet uit een aparte bron komen en de warme leiding moet lopen via een warmtewisselaar. Dit kan een lange slang zijn die door het warmtereservoir naar de warmwater-tappunten loopt.

Het reservoir moet zeer goed geïsoleerd worden om maar weinig warmte te verliezen bij het overbruggen van een lange periode met weinig zon. De eisen aan de collector zijn minder hoog omdat die afgesloten kan worden als de zon weg is³.

De uitgangspunten voor het ontwerp zijn de benodigde warmte, de instraling van de zon, de overbruggingsperiode en ΔT , dat is de temperatuur in het systeem t.o.v. de omgevingstemperatuur. Uit de eerste twee volgt de vereiste oppervlakte van de collector. Uit dezelfde warmte consumptie, de lengte van de overbruggingsperiode en ΔT volgt de grootte van het reservoir en de dikte van de isolatie. Wat de keuze van ΔT betreft: Het gemak van verwarming en de warmtecapaciteit van het reservoir zijn evenredig met ΔT maar helaas, ook het warmteverlies is evenredig met ΔT . We houden het op een veilige $\Delta T = 50^\circ \text{C}$.

2 De collector

We gaan uit van een verbruik van 74 kWh/dag. Dat is tweemaal het jaargemiddelde omdat we zomers geen

³Het nadeel van een collector die tevens als reservoir dient ligt in de moeilijkheid de bovenkant, die transparant moet zijn, toch goed te isoleren

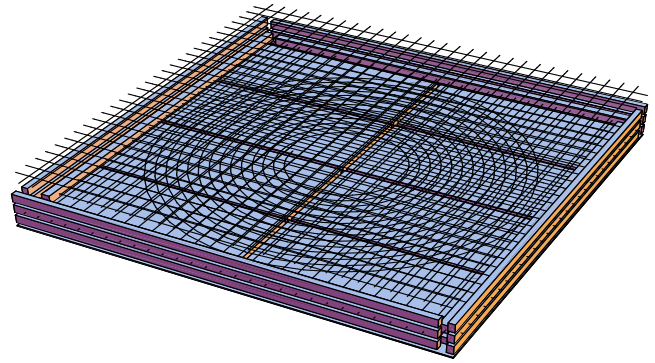


Figure 2: *Testversie van de zonnecollector van 2 x 2 m. De spiraal stelt voor 250 meter aansluitend gewonden zwarte PVC-slang. Het is deze slang die de warmte opvangt. Door de slang stroomt water. In en uitvoer zijn niet getekend. Boven de slang zijn twee lagen dun plastic folie gespannen en versterkt met gaas. Onder de slang zit een dikke laag polystyreenschuim. We zouden 12 van deze units nodig hebben om een groot huis 's winters warm te houden.*

warmte gebruiken en dus 's winters meer. In figuur 1 lezen we voor maart 3.4 kWh/dag dus hebben we al 22 m² nodig in het ideale verliesvrije geval.

We zullen zien in sectie 2.2 dat het rendement van een collector evenredig met ΔT daalt terwijl we ΔT wel hoog willen kiezen om het huis te verwarmen. ***Als compromis kiezen we voor een tweemaal grotere oppervlakte, 44 m².*** Een rendement van 50% is dan al voldoende.

2.1 De isolatie van de collector

De warmtestroom door een plaat materiaal is evenredig met $U = \lambda/d$ waarin λ de warmtegeleidingscoëfficiënt is en d de dikte van de laag. Dit is de wet van Fourier voor warmtestroom geheel in analogie met de wet van Ohm voor elektrische stroom. Natuurlijk is de warmtestroom ook evenredig met het temperatuurverschil en met de oppervlakte van de plaat. De warmtestroom, dus het verlies, wordt

$$Q = \frac{A \Delta T}{R_t} \quad (1)$$

$$\text{met } R_t = \frac{1}{U} = \frac{d}{\lambda} \quad (2)$$

Zo geschreven is beter te zien dat om de thermische weerstand R_t te verhogen moet men d vergroten en een materiaal kiezen met kleine λ . Wij hebben gekozen voor "piepschuim"⁴.

De bovenkant van de collector echter moet transparant zijn. We isoleren dit deel met twee spouwen van 10 cm met stilstaande lucht die we maken met behulp van dun plastic folie en gaas, b.v. kippengaas voor de stevigheid. Voor twee zulke spouwen in serie geldt $U \approx 3.5 W/(m^2K)$.⁵

Het onderste niet transparante deel is makkelijker te isoleren en dus kunnen we een veel kleiner verlies eisen. Met $0.5 W/(m^2K)$ komen we precies op een totaal verlies (onder plus boven) van $4 W/(m^2K)$. Dit komt overeen met een verlies van $200 W/m^2$ bij $\Delta T = 50^\circ$. Uit verg. 1 en 2 volgt: **De vereiste dikte van het polystyreemschuim is 8 cm** ($\lambda = 0.04$, $\lambda/0.5 = 0.08$).

2.2 Temperatuur en rendement

Merk op dat hoe hoger de verschiltemperatuur, hoe lager het rendement. In het extreme geval dat we helemaal geen warmte afvoeren - het rendement is dan nul - zou de collector bij een instraling van $1000 W/m^2$ op den duur $200^\circ C$ heter worden dan de omgeving⁶ Bij onze keuze, $\Delta T = 50^\circ C$, is het verlies $200 W/m^2$ en dus het rendement 80 % bij $1000 W$ instraling. ΔT wordt ingesteld door middel van het variëren van de hoeveelheid water door de spiraal,⁷.

De zonnestraling van $3.4 kWh/m^2/dag$ in maart is

⁴Geëxpandeerd polystyreenschuim(EPS) $\lambda = 0.033 \dots 0.042$ richtprijs 5.60 euro/ m^2 bij een dikte van 4 cm. bron: <http://huis-en-tuin.infonu.nl/wonen/17820-isolatiewaarde-k-waarde-u-waarde-lambda-waarde.html>

⁵bron: www.ekbouwadvies.nl/bouwbesluit

⁶Misschien zijn de getallen voor de spouw wat te optimistisch; Een reden temeer om eerst een experiment uit te voeren voordat aan de constructie van een enorme collector wordt begonnen.

⁷Bij een experiment liep de temperatuur op tot $120^\circ C$ waarbij het piepschuim smolt. Er was zelfs nog lichte bewolking. In de praktijk moet altijd voldoende warmte afgevoerd worden om schade te voorkomen. Zoals een standaard cv-installatie heeft ook dit systeem beveiliging nodig. Deze beveiliging kan tevens het rendement verhogen als het ook zorgt dat dat het water alleen stroomt als de temperatuur in de collector hoger is dan in het reservoir

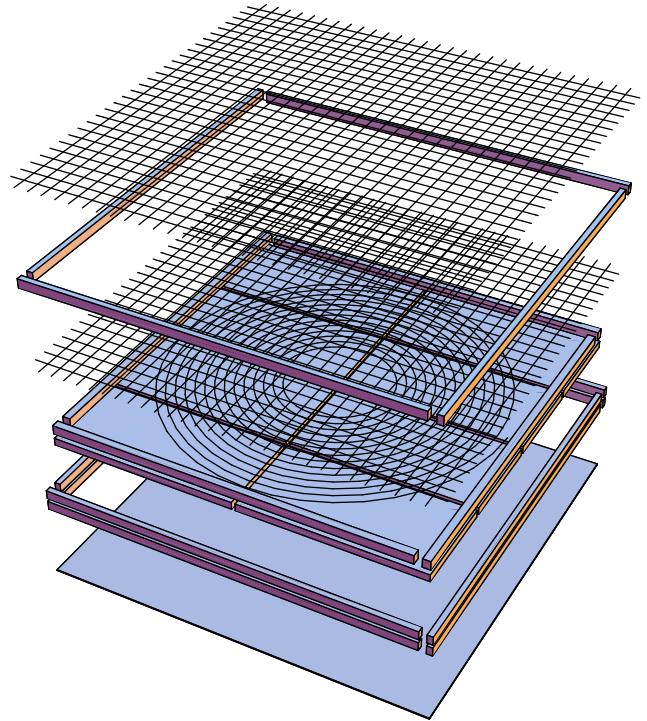


Figure 3: Exploded view van voorgestelde collector eenheid van $2 \times 2 m$ (de testversie). Van onder naar boven: bodemplaat, twee lagen zijkant, isolatieplaten plus zijkant isolatie met daarop de koelspiraal, nieuwe laag zijkant, met gaas versterkt folie, een laag balken, laatste laag versterkt folie.

verdeeld over ongeveer 6 uur. Onze collector, bij $\Delta T = 50^\circ$, verliest $1.2 kWh/m^2$ in die 6 uur en dus kunnen we $2.2 kWh/m^2/dag$ afvoeren. Dit wordt $8.8 kWh/dag$ voor de testversie van $2 \times 2 m$. Daarmee kan al 150 liter water 50° opgewarmd worden.

2.3 Warmteafvoer met water

Als we de onderste laag van de collector waar de spiraal in ligt dof zwart maken neemt die laag bijna alle warmte op. Echter als we de lucht opwarmen in deze laag en de warmte moet dan via de stilstaande lucht de waterslang in dan is er een veel te hoge temperatuurgradient nodig om de $1000 W/m^2$ de slang in te krijgen. De overgang van stilstaande lucht naar een wand geleidt slechts $11 W/(m^2K)$ dus daar zou daar een extra ΔT van bijna $100^\circ C$ ontstaan, funest voor het rendement. Een oploss-

ing is om een lange PVC slang van 16 mm diameter, die normaal voor irrigatie wordt gebruikt, in een rechthoekige "spiraal" met afgeronde hoeken te wikkelen en wel zo dat de windingen zo goed mogelijk aansluiten. De zon straalt dan via de spouwen van plastic folie op de slang waar water doorheenstroomt. Voor een unit van 2 m bij 2 m, een compromis tussen handelbaarheid en efficiency, hebben we dan 250 m slang nodig.

Om de 4 kW, die op zo'n unit valt, af te voeren met water ($C=4.2$ kJ/liter/graad) is een debiet van 1.1 liter/minuut al voldoende bij een ΔT van 50°C . Gelukkig is de warmtegeleiding van wand naar water vrij goed, $U = 50 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ en het binnenoppervlak van de slang vrij groot, 6.3 m^2 , zodat de extra ΔT van wand naar water maar 13°C bedraagt bij $1000 \text{ W}/\text{m}^2$ instraling. Niettegenstaande verhoogt dat het verlies van 20% naar 25%.

Dit extra verlies zou kunnen worden goedge maakt door gebruik te maken van het lage drukverschil per unit. Het drukverschil bij 1.1 liter/min in 250 m slang van 16 mm diameter is minder dan 0.5 Bar. Men kan sets van units in serie plaatsen met een hogere doorstroming, als er voldoende waterdruk beschikbaar is. De units aan de koude kant werken dan bij een kleinere ΔT en hebben dus een hoger rendement.

3 Het warmtereservoir

3.1 De vorm

Het reservoir moet de warmte lang kunnen vasthouden. De hoeveelheid warmte is evenredig met het volume V en het warmteverlies is evenredig met de oppervlakte A aan de buitenkant. De verhouding volume/oppervlakte, A/V , moet daarom zo klein mogelijk zijn. We beschouwen enkele gewone geometrische vormen.

- Bol met straal r

$$\left(\frac{A}{V}\right)_{bol} = \frac{4\pi r^2}{\frac{4}{3}\pi r^3} = \frac{3}{r} \quad (3)$$

- Kubus met ribbe a

$$\left(\frac{A}{V}\right)_{kub} = \frac{6a^2}{a^3} = \frac{6}{a} \quad (4)$$

- Cilinder met straal r en hoogte h

$$\left(\frac{A}{V}\right)_{cil} = \frac{2\pi r^2 + 2\pi r h}{\pi r^2 h} = \frac{2}{h} + \frac{2}{r} \quad (5)$$

Voor $h = r$ wordt de verhouding $4/r$ en voor $h = 2r$ wordt het $3r$, hetzelfde als voor een bol.

In zekere zin is A/V voor een kubus met ribbe a hetzelfde als voor een bol met straal $a/2$ want de een past in de ander. Alleen neemt een kubus meer ruimte in, maar de extra ruimte is "kromme ruimte" waar we meestal niet veel aan hebben. **We kiezen voor de (rechttopstaande) cilinder**^{8,9} vanwege de eenvoud van de constructie, immers de horizontale vlakken hoeven geen ondersteuning en het verticale vlak kan worden aangespannen met straaldraden om de hydrostatische druk op te vangen.

Fig. 4 (berekend met verg. 5) helpt bij kiezen van de afmetingen van een cilinder bij vaste inhoud. Langs de horizontale as staat de diameter. De rode lijn, gemerkt "h" geeft de corresponderende hoogte voor een volume van 12 m^3 (Dit volume is berekend in sectie 3.2) en de blauwe lijn geeft de verhouding A/V . In subsectie 3.3 zullen we zien dat het voordeel biedt om af te wijken van de optimale vorm en een kleinere hoogte te kiezen om de zijwaartse druk te verkleinen. Fig. 4 laat zien dat gelukkig A/V niet zeer gevoelig is voor een verandering van h , zelfs over een faktor 2.

3.2 Berekening van het vereiste volume

Het uitgangspunt in sectie 2 was een warmte consumptie van 270 MJ per dag. Als we een week slecht weer willen overbruggen moet de warmtecapaciteit van het reservoir dus 1890 MJ zijn. De soortelijke warmte van water is

⁸N.B. Voor alle vormen geldt: hoe groter hoe beter. Bij vergroten van het formaat wordt altijd het volume groter en de verhouding A/V kleiner

⁹Een afgeknotte pyramide van zand of klei is ook het overwegen waard vanwege het voordeel dat geen sterke wand nodig is

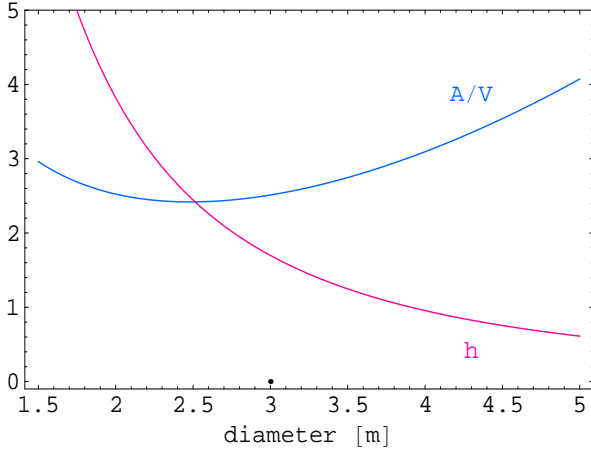


Figure 4: *Hoogte en Verhouding Oppervlakte/Inhoud (A/V) tegen de diameter voor een rechtopstaande cilinder met een vaste inhoud van 12 m^3 . De optimale vorm, (het minimum verlies) ligt bij $h = d = 2.45\text{ m}$ maar het luis-tert niet nauw. We kunnen rustig een grotere diameter en daarbij behorende lagere hoogte kiezen om de hydrostatische druk te verlagen zonder dat de verhouding A/V veel stijgt*

$C_h = 4.2\text{ MJ}/(\text{m}^3\text{K})$ dus met een temperatuurverschil $\Delta T = 25^\circ - 13^\circ$ (zie voetnoot ¹⁰) we hebben dus nodig $V = W_0/(C_h h \Delta T) = 12\text{ m}^3$ water. Verliezen zijn hierbij niet meegerekend maar evenmin dat dat zon zich in die tijd af en toe even laat zien. Laten we aannemen dat deze twee effecten elkaar minstens opheffen.

3.3 Zijwaartse druk

Als we de zijwanden met staaldraden willen verstevigen om de hydrostatische druk op te vangen moeten we weten hoe dik deze draden moeten zijn. De hydrostatische druk op de bodem van het vat is $P = h g \rho$ waarin h de hoogte, g de versnelling van de zwaartekracht en ρ de soortelijke massa van water is. Volgens de wet van Pascal is dit ook de druk in zijwaartse richting. De druk neemt naar boven toe evenredig met de hoogte af zodat de gemiddelde druk de helft is. Snij nu, in gedachte, de cilinder vertikaal doormid-

¹⁰We hebben geschat dat het in huis 13° warmer is dan buiten. Dit deel van ΔT kan niet gebruikt worden voor transport van warmte van het reservoir naar het huis

den in in twee gelijke delen. De kracht op een helft is gelijk aan de gemiddelde druk $h g \rho/2$ maal de oppervlakte van de doorsnede $2 r h$. De kracht wordt opgevangen door twee zijkanten dus per zijkant is de kracht¹¹.

$$F_{lat} = \frac{1}{2} g r h^2 \rho \quad (6)$$

Dit is ongeveer $5000 r h^2$ Newton

We zien hier het argument om de cilinder liever breed dan hoog te maken omdat de zijwaartse kracht omgekeerd evenredig is met r^{-3} . Vul daartoe in in formule 6 $h = V/(\pi r^2)$.

F_{lat} is bijna 15000 N voor een reservoir van 12 m^3 met $d = 3.4\text{ m}$ en $h = 1.32\text{ m}$. als we deze kracht verdel-
len over N draden op gelijke afstand dan is de kracht $2 \times 15000 / N$ op de onderste kabel en bijna nul op de bovenste. Voor staal ligt de vloeigrens bij $250\text{ N}/\text{mm}^2$ dus met 10 draden moet de onderste een doorsnede hebben van minstens $30000/10/250 = 12\text{ mm}^2$ wat overeenkomt met een diameter 3.5 mm .

3.4 De dikte van de laag isolatie

Laten we eisen dat zonder zon en ongebruikt het reservoir na een week nog 80% van zijn beginwaarde aan warmte bezit. Dus

$$W = W_0 e^{-\alpha N_d} = 0.80 W_0 \quad (7)$$

$$\rightarrow \alpha = \frac{0.223}{N_d} \quad (8)$$

waarbij $N_d = 7$ dagen de eenheid voor tijd "dag" is. Dit geldt ook voor de tijdconstante $1/\alpha$. Het verlies per dag is dan eenvoudig $\delta W/\Delta T = \alpha W_0$. De dikte d van de laag isolatie volgt uit het gelijkstellen van de warmtestroom door de laag per dag aan αW_0

$$\alpha W_0 = \frac{A \Delta T K s_{pd}}{d} \quad (9)$$

$$\rightarrow d = \frac{A \Delta T K s_{pd}}{W_0 \alpha} \quad (10)$$

¹¹Een elegantere manier om de kracht af te leiden gaat als volgt: De potentiële energie E van het reservoir is massa x hoogte van het zwaartepunt. E uitgedrukt in V (volume) en s (omtrek) is $E = 2 g \pi \rho V^2/s^2$, De kracht is $-\delta E/\delta s$, alsof de zijkant verticaal is doorgesneden en de uiteinden met een draad aan elkaar zitten. Substitueer V en s weer terug en we krijgen ook form. 6

waarin S_{pd} het aantal seconden per dag is en K de warmtegeleidingscoëfficiënt (0.04 voor polystyreen schuim). Met de eerder genoemde data wordt de vereiste dikte 9 cm.

3.5 Voor wie per sé het hele jaar door zonder kachel wil

In fig. 1 hebben we al gezien dat we in januari een factor 4 tekort komen. In de zomer darentegen is het hier helemaal zo slecht niet. Hier zijn drie opties om het probleem op te lossen, de eerste twee voor de koppige volhouder.

- Maak de collector twee maal zo breed en twee maal zo lang. Dat scheelt de factor vier die we tekort komen.
- Verdrievoudig alle maten van het warmtereservoir. Daarmee wordt het volume 27 maal zo groot en de oppervlakte 9 maal zo groot. Daarmee kunnen we dus 27 weken, ruim een half jaar, warmte opslaan als we tenminste ook de tijdconstante $1/\alpha$ aanpassen. Deze moet ook 27 maal kleiner, dat zien we in vergelijking 8. Gelukkig blijft αW_0 in eq. 10 gelijk omdat ook W_0 evenredig groter wordt. En zo zien we dat d 9 maal groter moet dus de isolatie laag wordt *bijna een meter dik*.
- De makkelijkste optie: Laat de kachel aan van november tot maart.

Het verhogen van de grootte van de collector lijkt nog de makkelijkste optie maar er kunnen nog adders onder het gras zitten. Een ervan is de het hier weleens langer dan een week heel donker is een ander is dat bij instraling minder dan 200 W/m^2 , de collector niet kan werken omdat dat ook het verlies is bij $\Delta T = 50^\circ\text{C}$. Het vergroten van het warmte magazijn tot "goed voor een half jaar" is een prachtige oplossing maar erg groot en duur.

4 Conclusie

In Nederland kan van maart tot november de kachel uit met een zonnecollector die een oppervlakte heeft van

44 m^2 . We stellen een testversie voor van 4 m^2 om te meten of we daar inderdaad $8.8 \times 31 \text{ kWh}$ uit kunnen halen in maart bij een water temperatuur in het systeem 50° hoger dan de omgevingstemperatuur. Als de test collector voldoet hebben we ongeveer een dozijn van dergelijke units nodig. Om te beginnen kunnen we daarmee alvast direkt het huis opwarmen. Huizen met dikke muren hebben al een aanzienlijke warmtecapaciteit zodat men mag verwachten dat als de zon weg is de temperatuur niet sneller zakt dan ongeveer vijf graden per etmaal.

Natuurlijk wordt het verwarmingssysteem veel aangenamer en beter regelbaar met een warmte reservoir. In het voorstel staat een cilindrisch reservoir van 3.4 m diameter en 1.32 m hoogte dat 12 m^3 water kan bevatten. De isolatie aan alle wanden is 9 cm dik en van een materiaal met $K \leq 0.04 \text{ W/(gr.m)}$. De verhouding A/V is 11 % hoger dan de optimale waarde (bij $h = \text{diam} = 2.45 \text{ m}$) maar de voordelen zijn: De zijkant mag veel minder sterk zijn, het reservoir kan gebruikt worden als zwembad¹² in de zomer voor de kinderen en het ziet er beter uit in de natuur.

Er zijn zeker mogelijkheden om ook in hartje winter alleen op zonne-energie te verwarmen maar die zijn niet eenvoudig en niet goedkoop. Het kan een goed vervolgproject zijn.

Waarschijnlijk is de terugverdientijd van de investering in het voorgestelde systeem maar enkele jaren, zeker is dat het gunstige effect op het milieu direct is.

¹²Mogelijk is een praktische oplossing uit te gaan van een oplaasbaar bad van 12 m^3 waaromheen een isolerende doos wordt gebouwd.