



WAELS; Woningen Als EnergieLeverend Systeem

W.G.J. van Helden

ECN-E--09-077

November 2009

Verantwoording

Dit rapport is het openbare eindrapport van het EOS-LT project WAELS (woningen als energieleverend systeem), dat is uitgevoerd door ECN, TNO en de TU/e.

Het project liep van 1 maart 2006 tot 1 september 2008, ECN had de penvoering van het project.

Abstract

The goal of the WAELS project is to lay the foundations for the development of houses that are energy supplying on an annual basis. The project is financed by the EOS-LT program and is carried out by ECN, TNO and the Eindhoven University of Technology. In the 2 ½ year in which the project ran some important steps have been set in the development of three important elements of a concept for the energy-supplying house of the future. These elements are: Development of a building system, Efficient use of sunshine and Heat storage.

The project part Development of a building system has developed a list of so-called strategic boundary conditions by means of interviews with different stakeholders in the building chain and by a scenario –analysis. The strategic boundary conditions describe those aspects that refer to the realisation of energy supplying houses on a large scale and that are important, independent of which future scenario for the building chain will become real. It became clear that a blueprint for the energy supplying house of the future cannot be made. From the interviews with professionals in the building chain it becomes clear that the influence of project developer and contractor in the realisation process of the energy supplying house has to increase.

For the project part Efficient use of sunlight new multifunctional materials for combined PV-solarthermal collectors have been studied and three concepts for these devices have been developed and analysed. The materials have been compared through different experiments on coatings with various methods for application and on PVT cells. With these, the feasibility of the three concepts is investigated and one concept is selected as the most feasible. A detailed numerical model was developed, with which cells and modules can be optimised. For the PVT systems of 2015 and 2030 an inventory and sketches are made of some promising concepts, leading to a price-winning Bachelor thesis. With the work on PVT ECN has given important input to the work of the IEA SHC Task 35 on PVT Systems.

In the project part Thermal Storage, research was done into new materials that can store heat in a compact way and into the principle designs of components with which these materials can be charged and discharged. The proof of principle of heat storage in a salt hydrate with high heat storage capacity was given. A lot of knowledge was generated about the specifications and possibilities of salt hydrates as compact thermal storage material. A list of demands for the design of a compact thermal storage system was made and a description of three PhD research topics, in which a further deepening of the knowledge on compact thermal energy storage can be done. Regarding the development of a suspension reactor, the material that was initially selected as compact storage material proved not to be suited and some experiments were performed with a new material in suspension. Based on these measurements the dimensions of a storage system were determined. The work on compact thermal storage materials and systems was effectively brought into the IEA SHC Task 32 on Advanced Storage Technologies by ECN and TNO. Also, with this input the basis was laid for the new IEA Task in the field of Compact Thermal Energy Storage Materials and Systems (Task 42/24).

Inhoud

Samenvatting	4
1. Inleiding	5
2. Doelstellingen WAELS	7
3. Werk en resultaten per werkpakket	8
3.1 Werkpakket A: Ontwikkeling en Bouwsystematiek	8
3.2 Randvoorwaarden aan markt en organisatie	9
3.3 Randvoorwaarden aan de techniek	9
3.4 Technieken	10
4. Werkpakket B: Efficiënte omzetting van zonlicht	11
4.1 Zonnecollector 2030	11
4.2 Hoogefficiënte opwekking met conventionele technologie (PVT)	11
5. Werkpakket C: Compacte warmteopslag	13
5.1 Materiaalkarakterisatie	13
5.2 Cyclering van het thermochemische materiaal: proof of principle	13
5.3 Thermochemisch Reactoronderzoek	14
6. Onderdeel C2: TCM systeem op basis van suspensies	15
7. Vervolgactiviteiten	18
8. Literatuurlijst	19

Samenvatting

Het WAELS project heeft als doelstelling om de basis te leggen voor de ontwikkeling van woningen die op jaarbasis gemiddeld energieleverend zijn.

Het is een EOS-LT gefinancierd project, uitgevoerd door ECN, TNO en de TU/e. In de twee-en-een-half jaar van het project hebben de uitvoerende partijen enkele belangrijke stappen gezet in de ontwikkeling van drie belangrijke elementen van een concept voor de energieleverende woning van de toekomst. Deze elementen zijn Ontwikkeling Bouwsystematiek, Efficiënte Benutting van Zonlicht en Warmteopslag. Het onderdeel Ontwikkeling bouwsystematiek heeft door middel van interviews met diverse partijen in de bouwkolom en een scenarioanalyse gewerkt aan een lijst van zogenaamde Strategische Elementen. Dit zijn die aspecten die betrekking hebben op de totstandkoming van energieleverende woningen op grote schaal, die in ieder geval slim zijn om te doen, onafhankelijk van welk toekomstig scenario er voor de bouw wordt aangenomen.

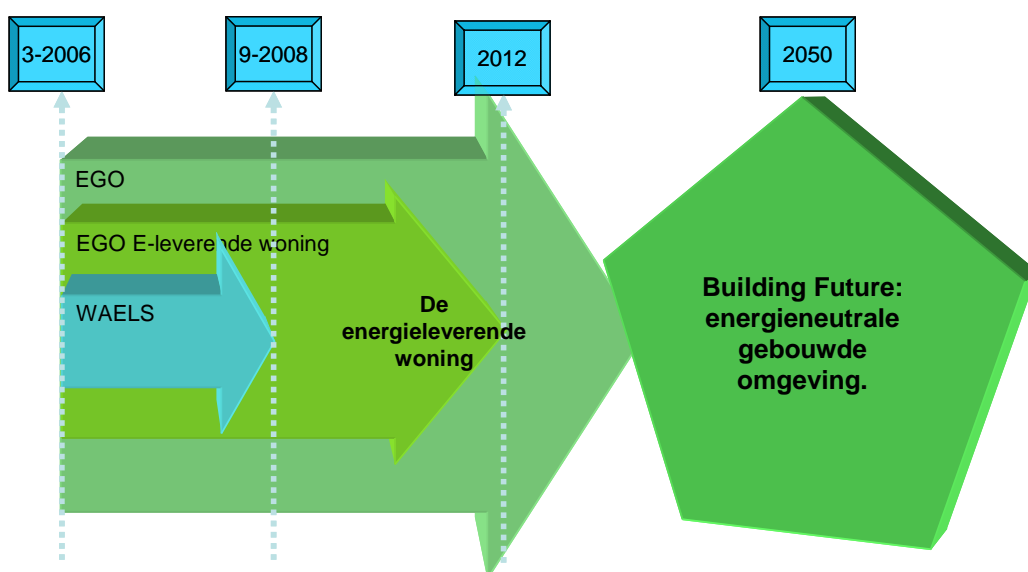
Voor Efficiënte Benutting van zonlicht is in het project gekeken naar nieuwe multifunctionele materialen voor gecombineerde PV-zonthermische collectoren en zijn enkele blauwdrukken uitgewerkt voor deze apparaten voor de nabije toekomst (2015) en de verdere toekomst (2030).

In het onderdeel Warmteopslag is onderzoek gedaan naar nieuwe materialen waarmee warmte op een zeer compacte manier kan worden opgeslagen en naar de principeontwerpen van de componenten waarmee deze materialen geladen en ontladen kunnen worden.

1. Inleiding

Binnen Building Future, het samenwerkingsverband van ECN en TNO op het gebied van energie in de gebouwde omgeving, is het doel voor de gebouwde omgeving in Nederland de halvering van de CO₂ emissie in 2030 en een energieneutraliteit in 2050. Het meerjarenprogramma is verbonden met het EOS-LT programma “Systeembenadering in de Gebouwde Omgeving” van Senternovem en het Platform energietransitie in de Gebouwde Omgeving (PeGO).

De maatregelen voor verbetering van de energieprestatie van gebouwen zijn moeilijker uitvoerbaar voor de bestaande bouw dan voor nieuwbouw. Om gemiddeld toch tot een energieneutrale gebouwde omgeving te komen, zal het energiegebruik van nieuwbouwwoningen sterker moeten dalen naar energieneutraliteit, gevolgd door energieleverend.



Het WAELS project werd uitgevoerd binnen dit meerjarenprogramma, als deel van de onderzoekslijn: proof of concept van een energieleverende woning.

Het uiteindelijke doel, een energieleverende woning, is niet het doel van het WAELS project. Wel worden met dit project de eerste stappen gezet richting dit uiteindelijke doel. Dit gebeurt in het project door werk aan drie verschillende pijlers:

- Ontwikkeling bouwsystematiek
- Efficiënte omzetting van zonlicht
- Compacte warmteopslag

Deze werkpakketten van het project zijn in onderstaande figuur weergegeven, samen met de onderverdelingen.



2. Doelstellingen WAELS

De doelstellingen van het WAELS project zijn:

1. Ontwikkeling van een innovatieve bouwsystematiek die uitgaat van de gebruikerswensen en de gewenste prestaties van het gebouw. Kenmerkende vernieuwingen van deze systematiek zijn geïntegreerd ontwerp, verregaande industrialisatie en kwaliteitsborging over de hele keten.
2. Ontwikkeling van een technologie voor het op een efficiënte manier omzetten van zonlicht. Dit gebeurt in twee parallelle trajecten: Voor de middellange termijn wordt een proof-of-principle van een hoogefficiënte module die zowel warmte als elektriciteit uit zonlicht opwekt volgens een integrale aanpak ontworpen. Voor de lange termijn wordt de ontwikkeling van de Zonnecollector 2030 gestart. Door toepassing van nieuwe materialen en productietechnologieën beschikt deze over een fundamenteel betere prijs/prestatie-verhouding die een grootschalige toepassing mogelijk maakt.
3. Ontwikkelen van oplossingen voor het op een compacte manier opslaan van duurzame warmte. Ook dit gebeurt in twee parallelle trajecten: Voor de middellange termijn wordt een proof-of-technology van compacte warmteopslag met gesuspendeerde hydraten uitgewerkt. Voor de lange termijn worden opslagprincipes uitgewerkt die gebruik maken van nieuwe thermochemische materialen, aan de hand van een proof-of-principle van compacte chemische warmteopslag voor seizoensopslag in een woning.

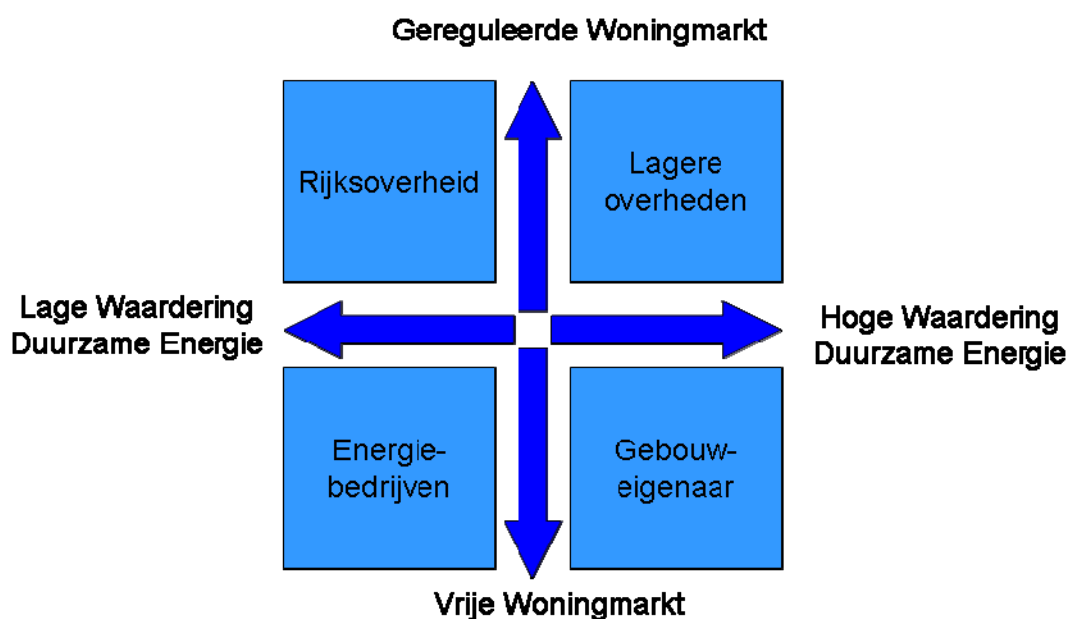
3. Werk en resultaten per werkpakket

3.1 Werkpakket A: Ontwikkeling en Bouwsystematiek

Startpunt voor het werk aan bouwsystematiek is een reeks interviews, afgenomen bij diverse relevante partijen, waarin kansen, randvoorwaarden en bedreigingen voor WAELS woningen worden onderzocht. Het grootste deel van de klankbordgroepleden van WAELS nam deel aan deze interviews.

De resultaten van de interviews zijn in het afstudeerwerk van door Tim van Twuijver, TUE, gebruikt voor het opzetten van een analyse naar de barrières en de kansen voor de grootschalige toepassing van energieleverende nieuwbouwwoningen. Er is een schets gemaakt van de sociotechnische omgeving en een processchema van het maatschappelijke inbeddingproces van WAELS-woningen. Deze zijn gebruikt voor de interviews. Het uiteindelijke resultaat is een schema met kernveranderingen die tot stand moeten gaan komen om te komen tot een grootschalige toepassing van energieleverende nieuwbouwwoningen.

In een volgende stap zijn de resultaten van de interviews zijn uitgewerkt naar vier scenario's (toekomstbeelden). In de scenario's zijn op basis van dominante onzekerheden twee assen gekozen. De ene as heeft betrekking op de waardering die er is voor duurzame energie (hoog of laag in het extreem), de andere heeft betrekking op de woningmarkt (gereguleerd dan wel vrij). De combinaties van de extremen op beide assen leveren vier scenario's. Voor deze scenario's is vastgesteld wie de dominante partij is die WAELS woningen gaat initiëren, en zullen ook de rollen van andere partijen in bouw- en energiesector worden vastgesteld.



Uit de beschrijving van de scenario's is geïdentificeerd welke sterktes en zwaktes van de woning als energieleverend systeem per scenario zichtbaar worden. Daarnaast zijn voor elk van de scenario's kansen en bedreigingen voor de WAELS woning vastgesteld. Verdere verwerking van deze SWOT analyse leverde kwesties c.q. strategische vragen op. Beantwoording van die vragen vormen randvoorwaarden voor een strategie. Randvoorwaarden die bij meerdere scenario's voorkomen zijn als robuust bestempeld. Ze geven aan wat in ieder geval slim is om te doen, welke elementen we vast kunnen voorbereiden of welke zaken geregeld moeten worden, bijvoorbeeld op het gebied van regelgeving of beleid. De randvoorwaarden zijn gegroepeerd naar markt en organisatie en naar techniek.

3.2 Randvoorwaarden aan markt en organisatie

- Vergroot de ontwerpvrijheid van de WAELS technologieën om de afzetmarkt uit te breiden. Dit kan door regels te stellen voor flexibiliteit binnen de WAELS woning. Dan kan de toeleverende industrie zich beter ontwikkelen.
- Vergroot het belang dat de aannemer heeft bij het leveren van meer flexibiliteit, uitbreidbaarheid, demonteerbaarheid, bijvoorbeeld door WAELS ook als exportproduct te vermarkten, en daarmee de afzetmarkt te vergroten.
- Stel een methode vast voor karakterisering en beoordeling van WAELS woningen, met direct hieraan gekoppeld een goed labellingsysteem voor de WAELS woning.
- Bedenk een mechanisme waardoor het terugleveren van elektriciteit en warmte in ieder geval financieel voordeel biedt voor de particulier, en maak de terugverdientijd van de WAELS-investering kort genoeg.
- Financieringsconstructies ontwikkelen die de controverse tussen lange termijn doel en korte termijn gewin doorbreken.
- Ontwikkeling van een verbindende visie en strategie tussen voorwaarden van de rijksoverheid en uitvoering door de gemeenten en woningbouwcorporaties.
- Energiebesparing omzetten in carbon credits, en onderzoeken welke mogelijkheden er zijn om dit van het niveau van de nationale en lokale overheid te vertalen naar het niveau van de eigenaren.
- Maak energiebeleid onafhankelijk van hypes en verbind het met andere lange termijn doelstellingen, zoals veiligheid, klimaat, comfort, binnenklimaat.
- De energiedistributeur gaat een belangrijke rol vervullen bij de teruglevering, en moet dus op een goede manier kunnen aanhaken en enthousiast blijven.
- Eigenaren van het energiesysteem kunnen het (regionale) energiebedrijf, een lokaal energiebedrijf (ESCO, bijvoorbeeld opgericht door de bewoners) of de particulieren zijn. Ontwikkel een stramien hoe hiermee omgegaan kan worden.
- Installatiebranche moet de banden aanhalen met de energiebedrijven en projectontwikkelaars, om tijdig in te kunnen spelen op deze nieuwe grote markt van energieleveringsystemen.
- Verander structuur, cultuur, en werkwijzen in de bouw zodanig dat het vraag-aanbodprincipe beter werkt, en de macht van de projectontwikkelaars en bouwers op een natuurlijke manier (door vraag-aanbodwerking) verminderd kan worden.
- Overheid zal naast het opstellen van regelgeving ook convenanten met de actoren stimuleren voor de ombuiging van de bouw en energiewereld richting WAELS.
- Gedrag van consumenten goed bestuderen om daarmee de introductie en techniek zo goed mogelijk daarbij aan te laten sluiten. Gedrag verander je namelijk niet zomaar. Ook is het belangrijk om de daadwerkelijke prestatie van de energieleverende systemen te toetsen aan de prestatie-eisen.
- Afstemming op (inter)regionaal niveau is nodig om optimale opzet van woning of wijk als energieleverend systeem te kunnen bereiken.
- Maak een WAELS communicatieplan voor alle partijen die van belang zijn voor realisatie en gebruik van WAELS.

3.3 Randvoorwaarden aan de techniek

- De WAELS woning kan zowel op woning als op wijkniveau energieleverend zijn. Zoek naar optimale afstemming van WAELS met andere energieopties, waarbij vraag/aanbod planning op regionaal, wijk- en woningniveau van belang zijn. Beschouw daarbij ook locaties (ver) buiten de woning als opslaglocatie. Zowel WAELS als andere bronnen (bijvoorbeeld afvalwarmte) kunnen daarvan gebruik maken om energiepieken op te vangen.
- Onderhoud aan de installatie onderdelen kan het beste plaatsvinden zonder dat de eindgebruiker daar hinder van ondervindt.

- Bij de realisatie van WAELS-woning zal de aansluiting van de producten van verschillende leveranciers optimaal moeten zijn.
- Systeem- en transportelementen van het energieopwekkings- en opslagsysteem moeten zoveel mogelijk onafhankelijk van de woning ontworpen worden. Onafhankelijk is zowel separaat als slimme integratie met aandacht voor onderhoud, vervanging en aanpassing. Standaardisatie is hierbij een sleutelwoord. Installaties hebben een andere levensduur dan bouwcomponenten.
- Ontwikkel technologieën die zoveel mogelijk ook stand-alone of doe-het-zelf (vergelijk met CV-ketel) toegepast kunnen worden. De installatiebranche zal nog steeds actief betrokken zijn bij een groot deel van de installaties, maar men kan het ook zelf.
- Ontwikkel WAELS bouwdelen waarin WAELS componenten in de fabriek met eenduidige kwaliteit zijn samengevoegd.
- Toepassing van technologieën in een consumentvriendelijke vorm met aandacht voor comfort biedt veel kans voor aanschaf en toepassing door consumenten. Daarbij spelen gebruiksgemak en gezondheid een belangrijke rol. De kosteneffectiviteit en de waardering daarvan kan per scenario verschillen. De weg daar naartoe vraagt wellicht meer dan bij andere energieconcepten het doorlopen van alle stappen van de introductie. extra aandacht is nodig bij veldexperimenten en demonstratieprojecten.
- Garantie van energielevering door inzet van nieuwe technieken en/of uitbreiding van het elektriciteitsnet, is van belang om ofwel de energiemaatschappijen blijvend hun energie kunnen leveren of om de consumenten hun energie te kunnen blijven leveren.

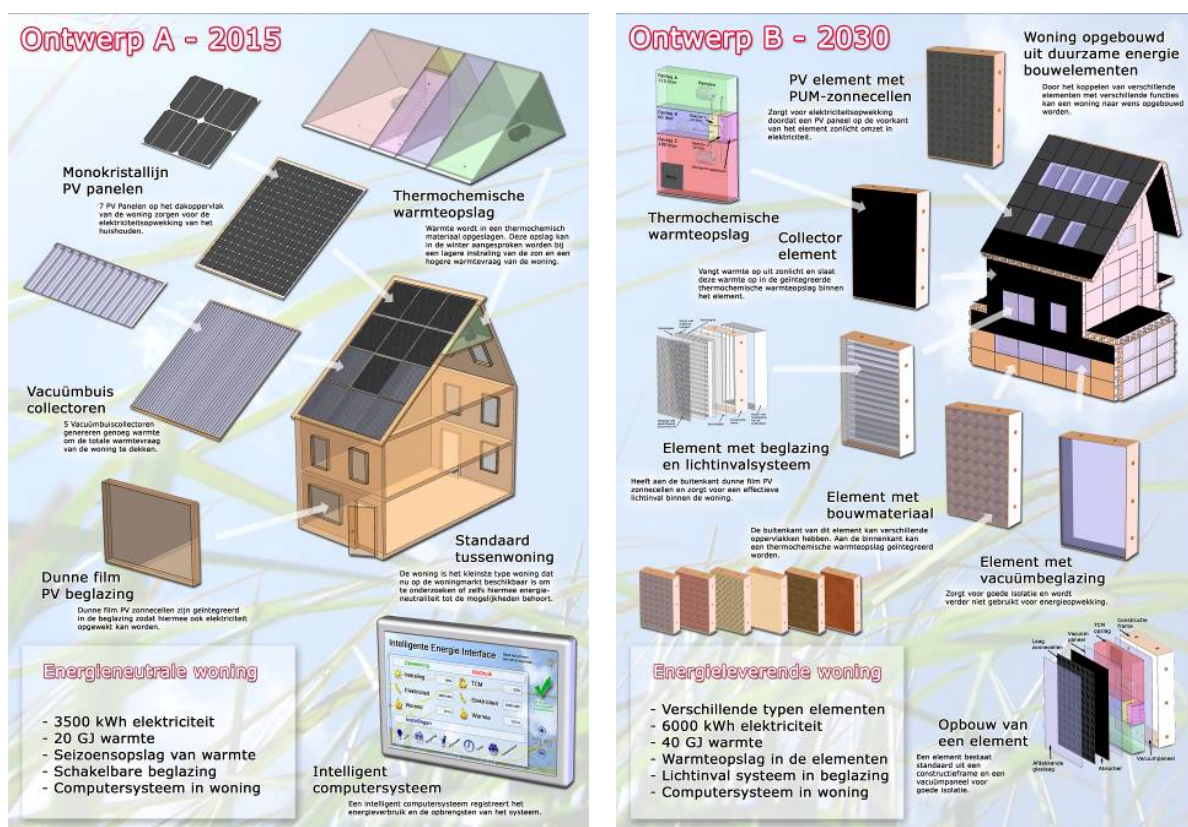
3.4 Technieken

In een aparte studie zijn per toekomstbeeld concrete kwantitatieve technische randvoorwaarden bepaald die gelden voor zonne-energie-opwekkingstechnieken op de gebouwschil (werkpakket B) en compacte warmteopslag (werkpakket C). Met specifieke technische randvoorwaarden worden prestatie-eisen bedoeld waaraan een energiesysteem in een scenario moet voldoen, zoals een gekwantificeerde maximale geluidsproductie. Op basis van deze eisen kunnen productontwikkelaars binnen de industrie en onderzoeksinstituten naar eigen inzicht producten gaan ontwikkelen.

4. Werkpakket B: Efficiënte omzetting van zonlicht

4.1 Zonnecollector 2030

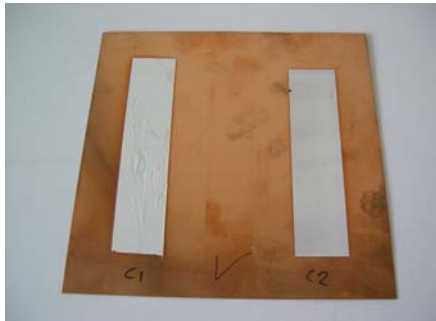
De basis voor de schets van de zonnecollector van de toekomst is gelegd in een workshop/brainstorm, met deelname van negen experts uit o.a. PV, zonthermie, ICT, vastestoffysica, chemie en beleid. Er zijn vele ideeën over onder andere installaties, architectuur, nieuwe materialen, en ICT geopperd en uitgewerkt tot drie visies op de Zonnecollector 2030. Deze visies zijn verder uitgewerkt en gebruikt in diverse publicaties ook ingebracht in de Roadmap Zonnewarmte van Holland Solar. Nadien zijn nog twee workshops georganiseerd. De resultaten van drie workshops zijn uitgewerkt tot twee visies op de zonnecollector van de toekomst. Dit is gedaan door Jochem Nijs, een stagiair Industrieel Ontwerp van de Universiteit Twente. Hij heeft de diverse trends en ideeën van de workshops gecombineerd tot twaalf concepten. Deze concepten heeft hij vervolgens d.m.v. een multicriteria analyse vergeleken. De twee best scorende concepten zijn uitgewerkt tot een visie, één gericht op de middellange termijn (rond 2015) en één op de lange termijn (rond 2030). Dit werk heeft de eerste prijs gewonnen in de KIVI-NIRIA scriptieprijsuitreiking 2008.



4.2 Hoogefficiënte opwekking met conventionele technologie (PVT)

Een effectieve technologie om een zo groot mogelijk deel van het zonlicht om te zetten in bruikbare energie is de photovoltaïsch-thermische of PVT technologie. Het basisconcept was al eerder door ECN en de TU/e ontwikkeld en heeft zijn weg naar de markt al gevonden. Binnen het WAELS project is enerzijds gewerkt aan het verbeteren van elementen van dit basisconcept en anderzijds aan het bestuderen van de mogelijkheden van een geoptimaliseerd PVT systeem, op basis van geoptimaliseerde fotovoltaiische cellen.

De verbetering van het basisconcept richt zich op het vinden van hechtingsmaterialen tussen het PV en het thermische gedeelte van de PVT collector. Deze coatings en materialen zouden de prestatie van een PVT collector kunnen verbeteren en tegelijkertijd de productiekosten verlagen. Deze experimenten omvatten o.a. meting van optische eigenschappen, warmtegeleiding en hechting. Drie klassen materialen zijn onderzocht: siliconen, polymeren, en keramische materialen.



Resultaat van warmtebestendigheidstest voor Useal 500 monster. (C1 = 240 μm en C2 = 60 μm laagdikte).

De bovengenoemde series van optische metingen zijn uitgevoerd met een integrerende bol-opstelling. Hiermee worden reflectie- en transmissiemetingen gedaan van het nabije UV tot het verre infrarood (300 nm tot 25 μm).

Naast de optische metingen zijn adhesietests (trekproeven), temperatuurtests en elektrische doorslagtests uitgevoerd. De tests hebben enkele geschikte kandidaat-coatingmaterialen opgeleverd.

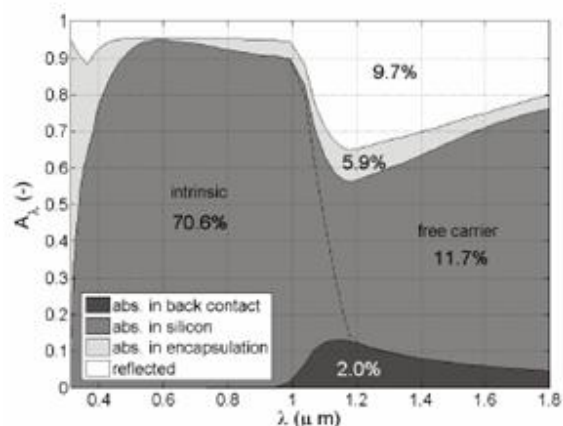
Het werk aan een geoptimaliseerd PVT-systeem op basis van aangepaste PV technologie is gebaseerd op een numeriek model voor de bepaling van de stralingshuishouding in een stapeling van dunne lagen. Dit ECN model is in een TU/e promotieonderzoek verder uitgebreid en geschikt gemaakt voor meerdere typen lagen.

Dit model is gevalideerd met enkele optische en thermische experimenten aan een serie speciaal vervaardigde samples van PV cellen. De voorspellingen van het model blijken bijzonder goed overeen te komen met de gemeten resultaten.

Met het gevalideerde model kan bepaald worden welke configuratie van celmateriaal, back coating, anti-reflectiecoating, oppervlakte ruwheid en eventueel warmtereflecterende coating de beste prestaties geeft voor PVT toepassing. De onderstaande figuur rechts geeft de resultaten voor een van de configuraties.



Sample van een siliconenlaag voor de meting van de thermische geleidbaarheid.



Absorptie van zonlicht in de verschillende lagen in een PVT-module als functie van golflengte.

5. Werkpakket C: Compacte warmteopslag

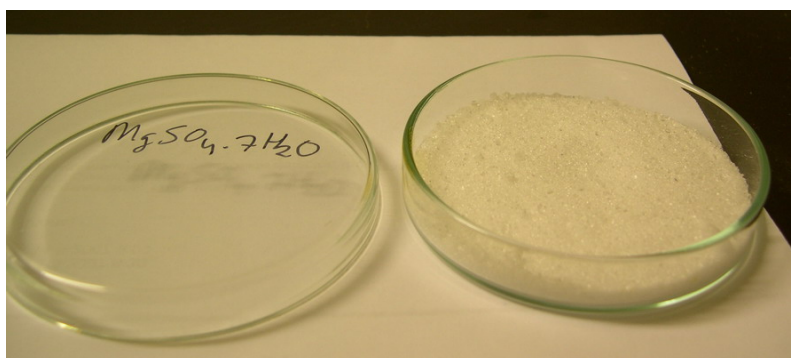
Dit werkpakket is onderverdeeld in twee hoofdstukken: ontwikkeling van een thermochemische opslag technologie op basis van zouthydraten (C1) en de ontwikkeling van een TCM systeem op basis van suspensies (C2).

Globaal gezien zijn de volgende werkzaamheden en doelen de voornaamste binnen het onderdeel WAELS C1:

- Materiaal karakterisatie van een zouthydraat (een thermochemisch materiaal)
- Proof of principle van de werking van TCM
- Aanzet voor een reactor ontwerp geschikt voor een TCM opslag systeem
- (PhD) projectvoorstel(len) opzetten voor fundamenteel vervolg onderzoek t.b.v. TCM opslag.
- Verwerven van een vooraanstaande positie in het internationale onderzoeksveld van warmteopslag.

5.1 Materiaalkarakterisatie

Magnesiumsulfaat is het zouthydraat op basis waarvan onderzoek wordt gedaan naar thermochemische warmteopslag binnen het WAELS project. Onderstaand is een foto van een monster van magnesiumsulfaat.

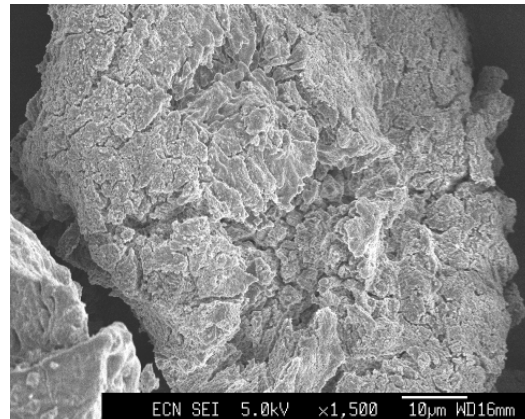


De onderstaande figuur geeft de resultaten van een van de karakterisatiemetingen aan magnesiumsulfaat. Een hoeveelheid van dit zout wordt langzaam verhit van kamertemperatuur tot 300 graden Celsius. Zowel de massa van het zout (linker as) als de hoeveelheid warmte die het zout opneemt of afstaat worden tijdens dit opwarmen gemeten. Uit deze en andere metingen blijkt dat het magnesiumsulfaat waaraan oorspronkelijk 7 watermoleculen zijn gebonden het water afstaat in drie stappen. De eerste twee stappen zijn endotherm (er moet warmte worden toegevoerd), terwijl de laatste stap bij ongeveer 270 graden Celsius exotherm is.

5.2 Cyclering van het thermochemische materiaal: proof of principle

$MgSO_4$ is de basis TCM waarmee gewerkt wordt in dit deel van het project. $MgSO_4$ is in een oven en een klimaatkamer meerdere malen gedroogd (met warmte geladen) en bevochtigd (warmte onttrokken). Hiermee is het principe van de werking aangetoond. De experimentele omstandigheden waaronder de cyclering is uitgevoerd, zijn niet optimaal geweest. Daarom is een opstelling ontworpen en gebouwd waarmee de experimenten nauwkeuriger en met meer kennis van het proces kunnen worden herhaald. Tijdens de werkzaamheden is gebleken dat het TC materiaal nog niet altijd even duidelijk in kaart is gebracht. $MgSO_4$ van verschillende fabrikanten geeft verschillende resultaten. Daarom zijn aanvullende elektronenmicroscopie foto's gemaakt en zijn aanvullende XRD metingen uitgevoerd.

In de onderstaande foto is de klimaatkamer te zien waarmee de basis cyclerings metingen zijn uitgevoerd. Ook is een elektronenmicroscopiefoto te zien van een korreltje $MgSO_4$.



5.3 Thermochemisch Reactoronderzoek

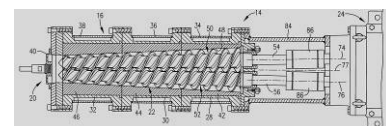
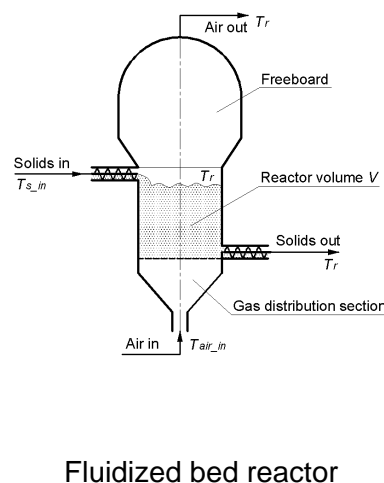
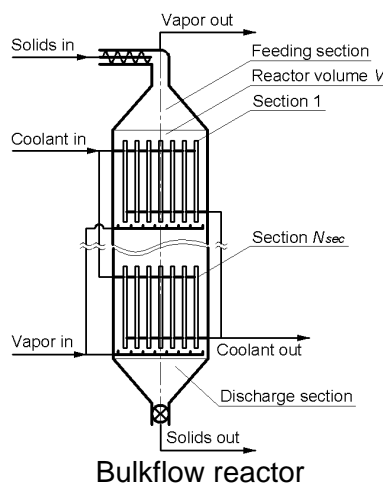
Voor het reactoronderzoek is gestart met een workshop waarin de eerste ideeën voor reactorconcepten zijn behandeld. Tijdens en na deze workshop zijn de randvoorwaarden voor een reactor vastgesteld. Bij de workshop zijn drie potentiële reactortypen bepaald die doorgerekend worden op de mogelijkheid om te dienen als thermochemische reactor in een woningconcept. Deze typen zijn: een bulkflow reactor, een extruder (vijzel), en een fluidized bed reactor.

De reactoren blijken aan de geëiste randvoorwaarden te kunnen voldoen met een acceptabel volume, voor zowel het laden als het ontladen. Het reactorvolume is niet groter dan 25 liter. De benodigde warmte voor een passiefwoning kan op basis van eerste berekeningen geleverd worden.

Uitdagingen voor verbetering zijn: warmtetransport, damptransport en het transport van het opslagmateriaal zelf. Dit alles komt voort uit de relatief langzame reactie voor het onttrekken van warmte uit magnesiumsulfaat.

Bovendien blijft het op systeemniveau een uitdaging om voldoende waterdamp te genereren zonder de warmteopslag uit te putten voor het laten reageren van droog magnesiumsulfaat.

Hieronder staan de drie soorten (potentiële) TC reactoren geschetst.



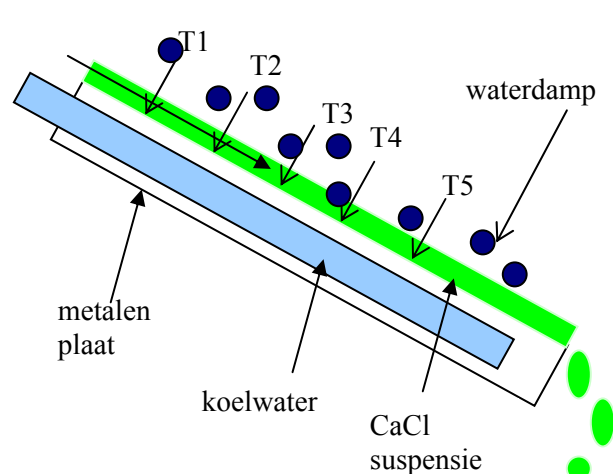
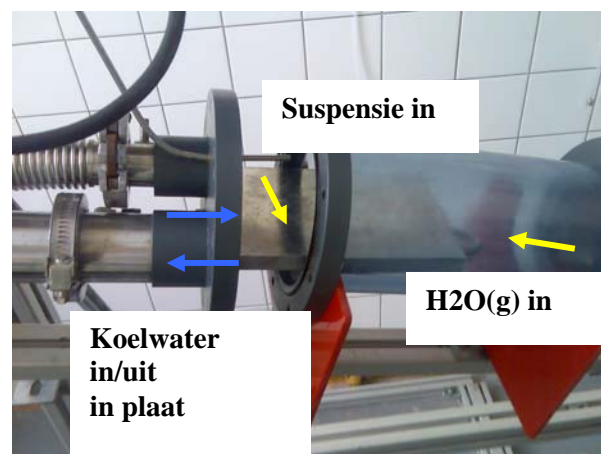
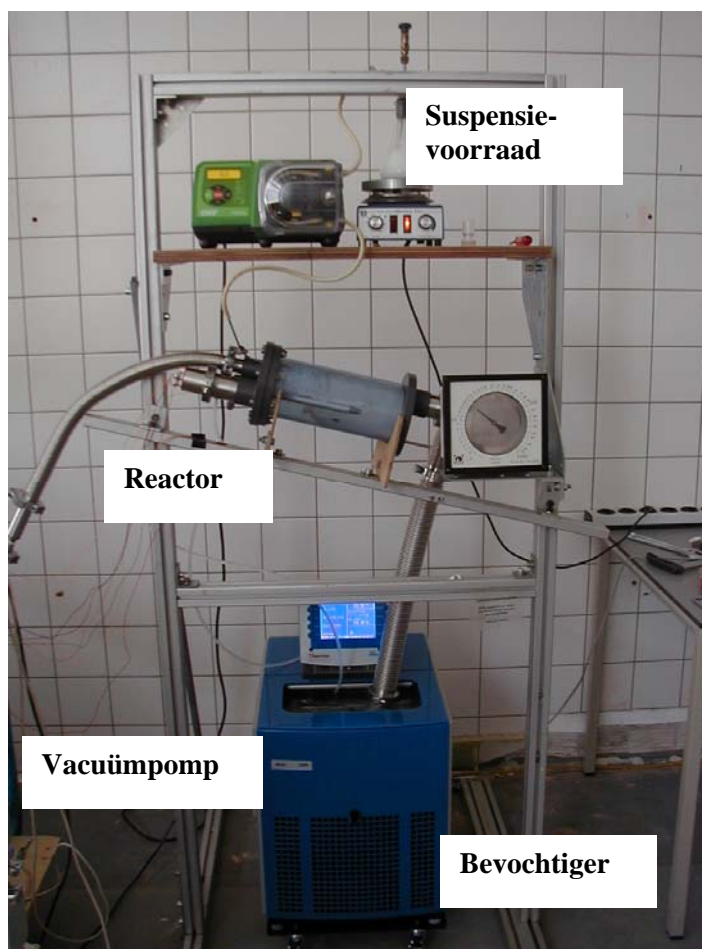
Extruder

6. Onderdeel C2: TCM systeem op basis van suspensies

Voor WAELS C2 is de doelstelling het uitwerken van een proof-of-technology van compacte warmteopslag met een gesuspendeerd hydraat. Dit omvat o.a.

1. Uitwerken van experimenten aan een prototype reactor voor thermochemische warmteopslag op laboratoriumschaal
2. Onderzoeken naar het gedrag van de reactor
3. Bepalen van de haalbaarheid van een dergelijke reactor in de gebouwde omgeving

Er is een reactor ontwikkeld waarin een suspensie van een hygroscopisch zout onder vacuüm blootgesteld kan worden aan waterdamp om warmte te genereren. Hierbij is gekozen voor het hygroscopische zout $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, in suspensie gebracht in een phtalaat. Dit zout kan hydrateren tot $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$. Figuur C2.1 toont de opstelling met centraal een reactorvat, waarin de suspensie gedoseerd wordt verspreid op een vlakke plaat. De suspensiefilm wordt hierbij blootgesteld aan de waterdamp.



Figuur C2.1 Opstelling vacuümreactor (generator)

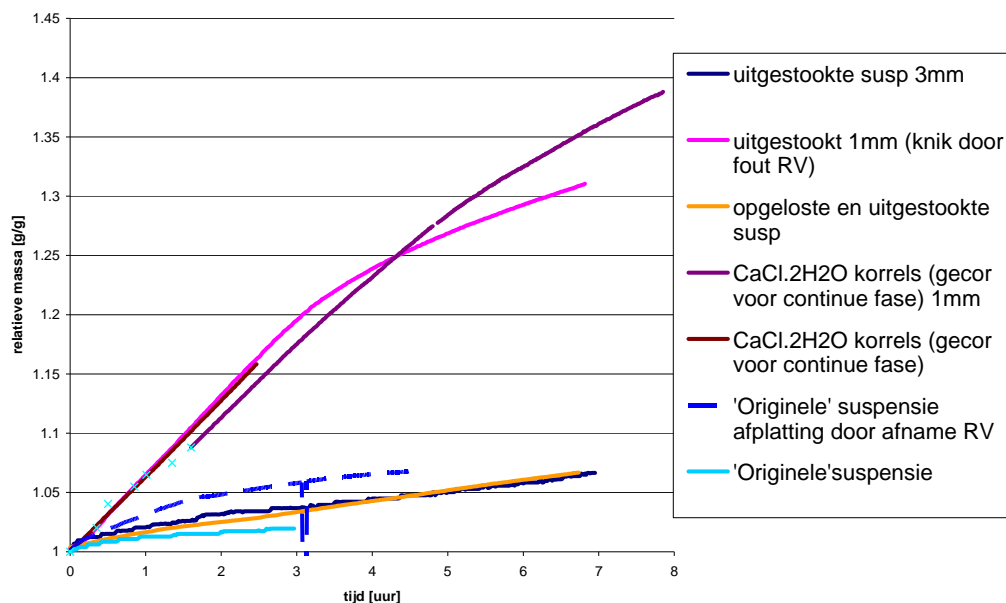
Op basis van de metingen bleek de reactiesnelheid van waterdamp met de suspensie bijzonder laag met als gevolg dat het temperatuurverschil tussen de ingaande en uitgaande koelwaterstroom niet waarneembaar was.

Om een beeld van het reactietempo in kaart te brengen zijn in de suspensiestroom 5 thermokoppels (T1-T5, fig. 1) geplaatst. Met behulp van deze sensoren was een temperatuurverhoging waarneembaar. Het experiment bevestigde het zeer lage reactietempo.

Een tweede opstelling is ingericht om meer begrip te krijgen met betrekking tot het tempo waarin waterdamp door de phtalaatfase heen naar de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ kan gaan. Door middel van een balans waaronder een petrischaaltje, gevuld met het te beschouwen sample, werd 20 °C lucht met een relatieve vochtigheid van 100% aangeboden, waarbij de massatoename van de hygroscopische suspensie als functie van de tijd werd gelogd.

Figuur C2.2 toont resultaten voor pure $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (geen suspensie) en voor $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ suspensies, variërend in volumepercentages van $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Hierbij vertoont de pure $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (bovenste donkerpaarse lijn) een veel hoger tempo dan de suspensie met relatieve lage volumepercentages $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (onderste set curven). Een suspensie met relatief hoog zout-volumepercentage vertoont echter reactietempo's vergelijkbaar met die van de pure calciumchloride-dihydraat.

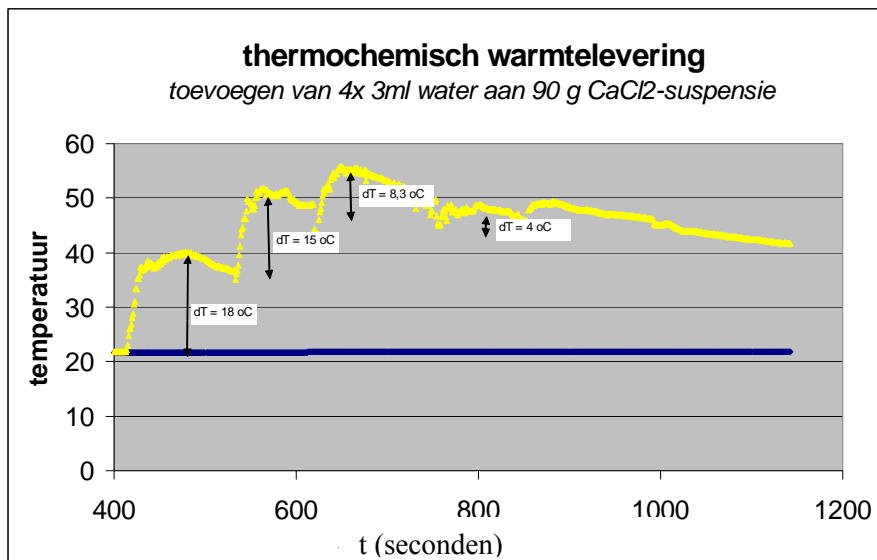
Figuur C2.2 Massatoename van de hygroscopische suspensies. Massa toename $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ suspensie vs korrels en laagdikte continue fase na uitzakken korrels



Ondanks deze potentiële optimalisatieslag is het reactietempo toch nog laag te noemen (de reactie is pas voltooid na meer dan 7 uur, overeenkomend met ~ 70 Watt per kg $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Dit vergt bijzonder grote oppervlakken in de reactor om voldoende thermisch vermogen te genereren.

Een belangrijke extreme situatie vertoont veel hogere reactiesnelheden: door in de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ suspensie water toe te voegen. Figuur C2.3 toont snelle temperatuurveranderingen in een bekersglas met 90g CaCl_2 suspensie, waarbij tot 4 x toe 3 ml water wordt toegevoegd. Het thermisch vermogen dat hierbij vrijkomt is typisch 4,5 kW / kg $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.

Een groot nadeel van het toepassen van vloeibaar water is dat de latente warmte van de condensatie van warmtedamp (normaal gesproken aanwezig in afvoerlucht van een woning) niet ten goede komt aan warmtegeneratie.



Figuur C2.3 Temperatuurverhogingen in geval de CaCl₂ suspensie wordt doorroerd met kleine hoeveelheden vloeibaar water.

Op basis van zowel de damp-suspensie en water-suspensie metingen zijn enkele reactorconcepten nader gedimensioneerd, waarbij met name de vacuümreactor een vlakke plaat nodig heeft van bijna 2 meter voor een 1 kW generator, terwijl de water-suspensiereactor met een reactor volume van minder dan 1 liter toekan.

7. Vervolgactiviteiten

Binnen het WAELS project zijn de eerste stappen gezet richting de energieleverende woning van de toekomst. De volgende stappen worden nu gezet in het kader van de lange termijn onderzoekprogramma's van ECN en TNO, binnen hun samenwerkingsverband Building Future en in nationale en internationale samenwerkingsprojecten.

De WAELS woning is een van de ontwikkelingspaden binnen Building Future. In de lange termijn visie van dit samenwerkingsverband zijn diverse paden geschetst die nodig zijn om de gebouwde omgeving energieneutraal te laten zijn in het midden van deze eeuw. Voor meer informatie over dit programma: www.buildingfuture.org

8. Literatuurlijst

Dit openbare eindrapport kan worden gedownload vanaf de website www.waels.nl of kan opgevraagd worden bij het secretariaat van de ECN unit Efficiency & Infrastructure, egon@ecn.nl. Op de website staan tevens andere openbare publicaties van dit project.

Publicaties in vakbladen:

Woningen als Energieleverend Systeem, Chris Geurts (TNO Bouw en Ondergrond), Roelof Schuitema en Marco Bakker (ECN) en Marcel Fuchs (afgestudeerd aan de TUDelft), BouwIQ (nr. 10, oktober 2008) (<http://www.aeneas.nl/bouwiq/Homepage.html>)

De Woning Als Energieleverend Systeem Intech K&S (september 2008) - [De woning als energieleverend systeem](#)

Opslag warmte via thermochemische reactie Artikel in Stroom (no 4, 29 februari 2008) - [Opslag warmte via thermochemische reactie](#)

Warmteopslag Onmisbaar Voor Duurzame Toekomst – Thermochemische Materialen als Opslagmedium, Marco Bakker en Wim van Helden, VV+ (september 2006) - [Warmteopslag onmisbaar voor duurzame toekomst](#)

Zonnewarmte heeft de toekomst in Nederland; M. Bakker, V.M. van Essen, W.G.J. van Helden, C. Geurts (TNO) en C. Rindt (TNO), Gepubliceerd in VV+, 2007, nummer 5

Woningen als energieleverend systeem; M. Bakker, V.M. van Essen, W.G.J. van Helden, C. Geurts (TNO) en C. Rindt (TNO), Gepubliceerd in VV+, 2007, nummer 10- [Woningen als energieleverend systeem](#)

Afstudeerverslagen

Concepten voor zonenergetische systemen in de toekomst. Jochem Nijs, s0090409, Juli 2007, Eindrapport Bacheloropdracht Universiteit Twente, Faculteit der Construerende Wetenschappen - [Energieneutraliteit in de Gebouwde Omgeving](#)

Characterization of a thermochemical storage material, I.M. van de Voort, Master Thesis, TU/e, report no. WET 2007.04 (2007)

Design of a TCM heat store cycle setup, Pim Goedhart, Internship report, TU/e, May 2007

Presentaties

Current ECN PVT research activity H.A.Zondag IEA SH&C task 35 expert meeting, Padova, Italy, 12-14 march, 2007.

R&D programma zonthermische systemen 2030. Marco Bakker, Wim van Helden, Huib Visser

Thermochemical storage – first simulations and experiments; H.A. Zondag, I.M. van de Voort (TUE), W.G.J. van Helden, C. Rindt (TUE), R. Schuitema, V.M. van Essen, M. Bakker, Presented at ESTEC 2007, 19-20 June 2007, Freiburg, Germany

Thermochemical materials for compact heat storage; first characteristics; W.G.J van Helden, M. Bakker, Presented at IEA task 32 Industry Day, 17-04-2007, Stuttgart, Germany

Magnesium Sulfate as Thermochemical Material for compact thermal energy storage; First systems studies and characterisation studies; H.A. Zondag, W.G.J. van Helden, R. Schuitema, M. Bakker, International Renewable Energy Storage Conference II, Bonn, Duitsland, 19-21 november 2007

Chemical Storage; H.A. Zondag, I.M. van de Voort, V.M. van Essen, W.G.J. van Helden,
Presented at PREHEAT symposium on Heat Storage, Intersolar, 21-22 June 2007,
Freiburg, Germany

Woningen als Energie Leverend Systeem (WAELS), Chris Geurts. EOS-LT Workshop ‘Sociaal
wetenschappelijk onderzoek in de gebouwde omgeving’, 20 november 2007, TU/e.

Posters

Comparison of Reactor Concepts for Thermochemical Storage of Solar Heat, Herbert Zondag,
Martijn van Essen, Lucas Bleijendaal, Jaume Cot, Wim van Helden (ECN), Wilko
Planje, Tjerk epema, Henk Oversloot (TNO), poster gepresenteerd op de conferentie
IRES III, Berlijn, 24 en 25 november 2008.

----- Dit project is uitgevoerd met subsidie van het Ministerie van Economische Zaken,
regeling EOS: Lange Termijn uitgevoerd door SenterNovem. -----