



---

## Openbaar Eindrapport SWeKOS2

(Sorptie Warmte en Koude Opslag Systeem 2)

---



### AUTEURS:

**AART DE GEUS**

**HENK DE BEIJER, TIM RUTTEN, ARNE SINNEMA**

**CAMILO RINDT, ÖZER BAĞCI "**

**ARIE KALKMAN, GUPTA PALAK**

**ARTENERGY BV, TE DELFT**

**DE BEIJER RTB BV, TE DUIVEN**

**TU EINDHOVEN**

**TNO. TE DELFT**

**DATUM: 1 JULI 2023**

Nadere informatie is te verkrijgen bij: A.C de Geus, [aart.degeus@artenergy.nl](mailto:aart.degeus@artenergy.nl).

Het project is uitgevoerd met subsidie van het Ministerie van Economische Zaken, Nationale regelingen EZ-subsidies, Topsector Energie uitgevoerd door Rijksdienst voor Ondernemend Nederland, onder projectnummer TGOM 120001.



## Samenvatting

### Aanleiding

Het wisselende aanbod van duurzame energie, de sterk wisselende energieprijzen, de steeds pregnanter worden noodzaak voor energietransitie en de congestie in het elektriciteitsnet vragen om effectieve en betaalbare vormen van energie opslag (zowel thermisch als elektrisch) Thermo-chemische energie-opslag wordt als een belangrijke oplossingsroute met veel potentie gezien, vooral ten behoeve van de effectieve inzet van duurzame energiebronnen voor warmte en koude. Met name de TCM Na<sub>2</sub>S heeft naast de vrijwel verliesvrije energie-opslag het voordeel van zijn grote opslagdichtheid. Er moeten nog een aantal belangrijke knelpunten worden opgelost, teneinde het Thermo Chemisch Energie-opslag Systeem als kosten effectief, duurzaam en volwaardig product in de markt te kunnen toepassen. Belangrijke hindernissen die nog genomen moeten worden zijn: stabiliteit, verwerking en optimalisatie van de eigenschappen van natriumsulfide en een, toegesneden industrieel en schaalbaar productieproces, lange levensduur en reductie van de totale systeemkosten. In voorgaande TKI projecten( Energypads [1] Energypads 2.0 [2] en SWeKOS) [3] is dat een modulaire TCES gaat leiden tot kostprijs daling en eenvoudiger productie. De projecten hebben ook tot het inzicht geleid dat voor een dampopen 3D structuur met grote warmtegeleiding noodzakelijk is, waarin de geschikte TCM wordt ingebracht. De resultaten zijn in 2021 ingebracht in het SWeKOS2 project. Een modulair SWeKOS2 systeem wordt ontworpen en zal worden beproefd met de TCM Na<sub>2</sub>S

### Doel van het project

Het SWeKOS2project heeft tot doel om een volwaardig sorptie warmte en koude en opslagsysteem met Na<sub>2</sub>S als werkzame stof als volwaardig product te maken en te testen. Het TCES product zal in de emulator van TNO worden beproefd onder relevante omstandigheden. De uiteindelijke hoofddoelstelling van het project is concreet uitzicht te hebben op de realisatie van een markt conform en industrieel te produceren compact warmte- en koude-opslagsysteem gebaseerd op Na<sub>2</sub>S. Het door de TU Eindhoven in ontwikkeling zijnde rekenmodel van een TCM opslag systeem wordt doorontwikkeld naar een systeem model geverifieerd aan de hand van metingen uitgevoerd in dit project aan het systeem uitgerust met Na<sub>2</sub>S

### Korte omschrijving van de activiteiten

Om te komen tot een warmte- en koude- opslagsysteem wordt het bijgestelde ontwerp uit het SWeKOS project een module op 100% schaal met als werkzame stof Na<sub>2</sub>S ontworpen, gebouwd en getest. In het bijgestelde ontwerp wordt uitgegaan van een rechthoekige module. Hierbij wordt de werkstof opgesloten tussen de vinnen van de warmtewisselaar. DE module wordt uitgebreid beproefd om de eigenschappen te optimaliseren. Op basis van deze module wordt het complete systeem samengesteld, inclusief regel en sturing, aansluiting op de installatie en dergelijke. Dit complete systeem zal worden getest bij bij RTB de Beijer als in de emulator bij TNO. Een gedetailleerd rekenmodel (COMSOL) van de reactor module wordt geverifieerd voor de nieuwe warmtewisselaar gevuld met Na<sub>2</sub>S. Hiermee zullen optimalisatie berekeningen voor het ontwerp worden uitgevoerd. De productiewijze, industrialisatie en opschaling wordt verder uitgewerkt. Het businessplan wordt geüpdatet en een vervolg pilot project wordt uitgewerkt.

### Resultaat

Als eerste resultaat is rechthoekige Sorptie Energie Module (SEM), gebaseerd op fin en tube warmtewisselaars ontworpen, gebouwd en getest. Tevens is Het numerieke rekenmodel van de TU/e is uitgebreid met en geverifieerd voor fin en tube warmtewisselaars. Uit de testen is geconcludeerd dat de beschikbare rechthoekige modules niet goed en langdurig vacuüm zijn te krijgen. In detail testen en berekeningen is aangetoond dat het natriumsulfide als werkstof opgesloten in een fin en tube warmtewisselaar aan de eisen kan voldoen. Een testprocedure voor TCES in de emulator van TNO is ontwikkeld. Op basis van de resultaten en de kennis en ervaring met de Solabcool is besloten een redesign uit te voeren (zie figuur 0). Het businessplan inclusief business case en industrialisatie plan is opgesteld. De conclusie van het businessplan is dat de kostprijs van een module van de TCES met een capaciteit van 5kWh en vermogen van 2,5 kW goed marktconform te produceren is. In een vervolg pilot project in het kader van het EU Geothermica programma worden de TCES systemen verder beproefd onder realistische condities in Nederland en Oostenrijk.

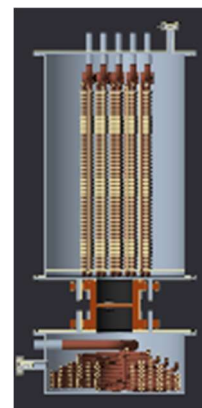


Fig 0 Module



## Inhoudsopgave

|                                                                |    |
|----------------------------------------------------------------|----|
| Samenvatting.....                                              | 2  |
| Lijst met afbeeldingen.....                                    | 5  |
| Lijst met tabellen.....                                        | 7  |
| 1. Inleiding.....                                              | 8  |
| 2. Doelstelling van het SWeKOS2 project.....                   | 9  |
| 3. Project aanpak en Werkwijze.....                            | 9  |
| 4. Resultaten.....                                             | 12 |
| 4.1 Freedom to Operate & IPR strategy.....                     | 12 |
| 4.2 Ontwerp, bouw en test reactor module.....                  | 13 |
| 4.2.1 Ontwikkeling reactor module.....                         | 13 |
| 4.2.2 Het concept ontwerp SWeKOS2 TCES.....                    | 14 |
| 4.2.2 Aanpassen COMSOL rekenmodel.....                         | 16 |
| 4.2.2.1 Inleiding.....                                         | 16 |
| 4.2.2.2 Model aanpassing.....                                  | 16 |
| 4.2.2.3 Een aantal voorbeelden van de berekeningen.....        | 17 |
| 4.2.2.3 Vergelijking berekening en metingen.....               | 18 |
| 4.2.2.4 Resultaten.....                                        | 19 |
| 4.2.2.5 Conclusie berekeningen.....                            | 23 |
| 4.2.3 Absorber/Condensor bijstelling ontwerp.....              | 24 |
| 4.2.4 Na <sub>2</sub> S werkgebied, selectie en productie..... | 26 |
| 4.2.4.1 Inleiding.....                                         | 26 |
| 4.2.4.2 Werkgebied Na <sub>2</sub> S.....                      | 27 |
| 4.2.4.3 Selectie Na <sub>2</sub> S.....                        | 27 |
| 4.2.4.4 Productie Na <sub>2</sub> S.....                       | 27 |
| 4.2.4.5 Het vullen van de reactoren met Na <sub>2</sub> S..... | 28 |
| 4.2.5 Regeling SWeKOS2 systeem.....                            | 29 |
| 4.2.6 Bouw en test TCES module.....                            | 30 |
| 4.2.7 Test TCM Module.....                                     | 34 |
| 4.2.7.1 Inleiding.....                                         | 34 |
| 4.2.7.2 Test resultaten.....                                   | 35 |
| 4.2.7.3 Verdiepend onderzoek.....                              | 37 |
| 4.2.8 Conclusies Ontwerp, Bouw en Test SEM module.....         | 40 |
| 4.3 Integraal systeem ontwerp.....                             | 42 |
| 4.4 Ontwerp en bouw marktconform model.....                    | 46 |
| 4.4.1 Integraal Ontwerp TCES.....                              | 46 |



|                                                                      |    |
|----------------------------------------------------------------------|----|
| 4.4.2 De regeling.....                                               | 49 |
| 4.4.3 Realisatie fase.....                                           | 50 |
| 4.4.4. Systeem studie .....                                          | 52 |
| 4.5 Testen full scale systeem .....                                  | 56 |
| 4.5.1 Compleet systeem.....                                          | 56 |
| 4.5.2 Regel en stuur systeem voor de emulator .....                  | 58 |
| 4.5.3 Beschrijving emulator.....                                     | 59 |
| 4.5.4 Testresultaten .....                                           | 61 |
| 4.5.4 Redesign .....                                                 | 62 |
| 4.6 Industrialisatie .....                                           | 64 |
| 4.6.1 Programma van eisen.....                                       | 64 |
| 4.6.2 Industrieel ontwerp en industrialisatie .....                  | 67 |
| 4.6.2.1 Inleiding.....                                               | 67 |
| 4.6.2.2 Blauwdruk: prototype Sorptie Energie Module (SEM).....       | 67 |
| 4.6.2.3 Blauwdruk initieel productie proces .....                    | 70 |
| 4.6.2.4 Conclusie .....                                              | 73 |
| 4.7 Business plan.....                                               | 74 |
| 4.7.1 Inleiding .....                                                | 74 |
| 4.7.2 Productdefinitie.....                                          | 74 |
| 4.7.3 Market .....                                                   | 75 |
| 4.7.4 Uitwerking Business Case warmtepomp met grondbron en TCES..... | 76 |
| 4.7.5 Strategy .....                                                 | 77 |
| 5 Conclusies en Aanbevelingen .....                                  | 79 |
| 5.1 Conclusies.....                                                  | 79 |
| 5.2 Aanbevelingen.....                                               | 80 |
| 6 Vervolg.....                                                       | 81 |
| Literatuur.....                                                      | 82 |
| Bijlage 1. Openbaar projectplan SWeKOS2 .....                        | 83 |
| 1 Deelnemers en derden.....                                          | 85 |
| 1.1 Overzicht van deelnemers.....                                    | 85 |
| 1.2 Beschrijving deelnemers en essentiële uitbestedingsrelaties..... | 85 |
| 2 Achtergrond met doelstelling en resultaat .....                    | 88 |
| 2.1 Aanleiding.....                                                  | 88 |
| 2.2 probleemstelling.....                                            | 89 |
| 2.3 Doelstelling .....                                               | 90 |
| 2.4 Aanpak.....                                                      | 90 |



|                         |    |
|-------------------------|----|
| 2.5 Resultaat.....      | 91 |
| 2.6 Vervolgproject..... | 91 |

## Lijst met afbeeldingen

|                                                                                                                              |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figuur 1 Energypad uit honeycombs.....                                                                                       | 8  |
| Figuur 2 Schematische weergave SEM.....                                                                                      | 8  |
| Figuur 3 Projectplanning van het SWeKOS2 project.....                                                                        | 10 |
| Figuur 4 Honeycomb gevuld met Na <sub>2</sub> S.....                                                                         | 13 |
| Figuur 5 TCM reactor met honeycomb.....                                                                                      | 13 |
| Figuur 6 Fin and Tube warmtewisselaar.....                                                                                   | 13 |
| Figuur 7 Het Flamco "pannetje".....                                                                                          | 14 |
| Figuur 8 Warmtewisselaar aangebracht.....                                                                                    | 14 |
| Figuur 9 Impressie van een SEM module als module voor het TCES systeem.....                                                  | 14 |
| Figuur 10 Modulaire opbouw van een SWeKOS met sorptie energie module. geplaatst in een rack..                                | 15 |
| Figuur 11 Voorbeeld fin en tube warmtewisselaar.....                                                                         | 16 |
| Figuur 12 Warmtewisselaar.....                                                                                               | 16 |
| Figuur 13 Doorsnede deel warmtewisselaar.....                                                                                | 16 |
| Figuur 14 Snelheidsverdeling na 5 minuten (waterdamp).....                                                                   | 17 |
| Figuur 15 Verdeling van de concentratie (mol.m <sup>3</sup> ).....                                                           | 17 |
| Figuur 16 Gemeten temperatuur in de gevulde warmte wisselaar op de aangegeven plaats gedurende het ontladen van de TCES..... | 18 |
| Figuur 17 Vergelijk berekening en meting aan een fin en tube heat exchanger gevuld met Na <sub>2</sub> S.....                | 18 |
| Figuur 18 De 3 hoofd typen warmtewisselaar voor de berekening.....                                                           | 20 |
| Figuur 19 Temperatuurverloop in het centrum van het TCM bed voor 7 verschillende ontwerpen warmtewisselaar.....              | 21 |
| Figuur 20 Vermogen gedurende 3 uur.....                                                                                      | 22 |
| Figuur 21 Vermogensdichtheid gedurende 3 uur.....                                                                            | 23 |
| Figuur 22 Schematische weergave rechthoekig TCM energie opslag systeem.....                                                  | 24 |
| Figuur 23 Test optelling voor verdampers inclusief visuele analyse met warmtewisselaar.....                                  | 24 |
| Figuur 24 Vergelijking meting en berekening van het vermogen van de condensor.....                                           | 25 |
| Figuur 25 Principe van laden van de modules.....                                                                             | 26 |
| Figuur 26 Principe van ontladen van het systeem.....                                                                         | 26 |
| Figuur 27 Het druk-temperatuur diagram voor Na <sub>2</sub> S.....                                                           | 27 |
| Figuur 28 Gemeten non-condensable gassen in Na <sub>2</sub> S.....                                                           | 27 |
| Figuur 29 Opstelling voor smelten Na <sub>2</sub> S.....                                                                     | 28 |
| Figuur 30 Korrels "geduwd" in de reactor (fin and tube warmtewisselaar).....                                                 | 28 |
| Figuur 31 Regeling voor het TCES systeem bij het testen in een testopstelling.....                                           | 29 |
| Figuur 32 Opstelling van de platte modules in een skid.....                                                                  | 30 |
| Figuur 33 Artist impression van het TCES systeem met versterkte bak.....                                                     | 30 |
| Figuur 34 Test met rechthoekige module met SiO <sub>2</sub> .....                                                            | 31 |
| Figuur 35 Gemeten vermogen van de rechthoekige module vergeleken met Solabcool en SWeKOS model.....                          | 32 |
| Figuur 36 TCES in testopstelling.....                                                                                        | 32 |
| Figuur 37 De test versie van de ontworpen TCES module.....                                                                   | 32 |
| Figuur 38 Koelcurve van test reactor.....                                                                                    | 33 |



|                                                                                                                                                                                                                      |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figuur 39 Zichtmodel voor Na <sub>2</sub> S testen .....                                                                                                                                                             | 34 |
| Figuur 40 Vermogen TCES bij laden/ontladen .....                                                                                                                                                                     | 36 |
| Figuur 41 capaciteit en vermogen van de TCES .....                                                                                                                                                                   | 37 |
| Figuur 42 Gemeten vermogen bij de 5 cycli.....                                                                                                                                                                       | 38 |
| Figuur 43 Foto van het Na <sub>2</sub> S in de doorgesneden rector.....                                                                                                                                              | 39 |
| Figuur 44 Test opstelling vacuüm klep.....                                                                                                                                                                           | 39 |
| Figuur 45 Vermogen en druk val: berekend en gemeten .....                                                                                                                                                            | 40 |
| Figuur 46 Markt segmentatie voor de TCES modules.....                                                                                                                                                                | 42 |
| Figuur 47 TCES module randvoorwaarden en eisen voor inpassing .....                                                                                                                                                  | 42 |
| Figuur 48 De ontworpen TCES. Als modulair systeem .....                                                                                                                                                              | 43 |
| Figuur 49 Systeem integratie water/water warmtepomp met grondbron en TCES.....                                                                                                                                       | 45 |
| Figuur 50 artist impressie Sem (onderdeel TCES) .....                                                                                                                                                                | 46 |
| Figuur 51 Dwarsdoorsnede Sorptie Energie Module van de TCES.....                                                                                                                                                     | 46 |
| Figuur 52 Warmtewisselaar verdamper/condensor .....                                                                                                                                                                  | 47 |
| Figuur 53 Onderste module met de absorber/condensor .....                                                                                                                                                            | 47 |
| Figuur 54 Warmtewisselaar voor de Na <sub>2</sub> S .....                                                                                                                                                            | 48 |
| Figuur 55 Bovenste module warmtewisselaar gevuld met Na <sub>2</sub> S en mesh .....                                                                                                                                 | 48 |
| Figuur 56 Het complete SWeKOS2 systeem, geplaatst in een skid. ....                                                                                                                                                  | 48 |
| Figuur 57 Het stroomschema van de regeling voor het SWeKOS 2 systeem.....                                                                                                                                            | 49 |
| Figuur 58 gecoate warmtewisselaar .....                                                                                                                                                                              | 50 |
| Figuur 59 Beschadiging.....                                                                                                                                                                                          | 50 |
| Figuur 60 Onderdelen lijst van gecoate onderdelen' .....                                                                                                                                                             | 50 |
| Figuur 61 Eindresultaat met Na <sub>2</sub> S gevuld .....                                                                                                                                                           | 51 |
| Figuur 62 Vullen warmtewisselaar .....                                                                                                                                                                               | 51 |
| Figuur 63 Warmtewisselaar met Na <sub>2</sub> S in de bovenste rechthoekige bak ingebracht .....                                                                                                                     | 51 |
| Figuur 64: Jaaropbrengst energie uit de warmtebatterij (blauw, linker as) en effectief aantal<br>laad/ontlaad cycli per jaar (oranje, rechteras) als functie van de grootte van de warmtebatterij in<br>kWh(th)..... | 53 |
| Figuur 65 Eenvoudige terugverdientijd van een warmtebatterij voor twee verschillende scenario's<br>van kapitaalinvestering. De optimale afmeting van de batterij is in dit scenario 12 -16 kWh. ....                 | 53 |
| Figuur 66 Aantal cycli per jaar van de warmtebatterij voor warmtapwater (blauw) en voor zowel<br>tapwater als ruimteverwarming (oranje).....                                                                         | 54 |
| Figuur 67: Kapitaalinvestering (blauw, linker as) van een pieklastbatterij, en effectieve GJ prijs<br>berekend als LCOE over een periode van 30 jaar (oranje, rechteras), als functie van het vermogen. ....         | 55 |
| Figuur 68 Samengebouwde module aangesloten op de vacuüm test installatie .....                                                                                                                                       | 56 |
| Figuur 69 Verdelingsheader, over meerdere modules .....                                                                                                                                                              | 56 |
| Figuur 70 Installatie voor de TCES.....                                                                                                                                                                              | 56 |
| Figuur 71 Voorzijde elektronica met HMI .....                                                                                                                                                                        | 57 |
| Figuur 72 Kast met regel en stuur elektronica .....                                                                                                                                                                  | 57 |
| Figuur 73 Interface voor de aansturing regeling modules .....                                                                                                                                                        | 57 |
| Figuur 74 Stroomschema ontladen van de TCES.....                                                                                                                                                                     | 58 |
| Figuur 75 Stroomschema laden van de TCES .....                                                                                                                                                                       | 58 |
| Figuur 76 Test opstelling bij TNO .....                                                                                                                                                                              | 59 |
| Figuur 77 Regelstrategie TCES in emulator .....                                                                                                                                                                      | 60 |
| Figuur 78 Set-up voor het dynamisch testen van het TCES systeem .....                                                                                                                                                | 60 |
| Figuur 79 Exploded view van de module .....                                                                                                                                                                          | 62 |
| Figuur 80 TCES module gebaseerd op Solabcool .....                                                                                                                                                                   | 62 |
| Figuur 81 Weergave werking absorptie .....                                                                                                                                                                           | 65 |



|                                                                        |    |
|------------------------------------------------------------------------|----|
| Figuur 82 De Sorptie energie module (SEM) in isometrisch aanzicht..... | 67 |
| Figuur 83 Overzicht van het productieproces van de SWeKOS module ..... | 70 |
| Figuur 84 Coating proces warmte batterij .....                         | 72 |
| Figuur 85 Vul proces warmtewisselaar met Na <sub>2</sub> S.....        | 72 |
| Figuur 86 Artist impression van een module van het TCES systeem .....  | 74 |
| Figuur 87 Business Canvas van TCES systeem.....                        | 77 |
| Figuur 88 Prognose verkochte TCES systemen .....                       | 78 |
| Figuur 89 Definitie TRL niveau.....                                    | 81 |

## Lijst met tabellen

|                                                                                                                                                                                                              |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabel 1 Eigenschappen 7 verschillende warmte wisselaars.....                                                                                                                                                 | 20 |
| Tabel 2 Materiaal eigenschappen Na <sub>2</sub> S.5H <sub>2</sub> O .....                                                                                                                                    | 26 |
| Tabel 3 Dimensies TCES systeem in de opstelling.....                                                                                                                                                         | 35 |
| Tabel 4 Testcondities bij uitvoeren testen met het zichtmodel.....                                                                                                                                           | 35 |
| Tabel 5 Test condities gedurende analyse werking Na <sub>2</sub> S in warmtewisselaar .....                                                                                                                  | 37 |
| Tabel 6 Overzicht van de hoofdcomponenten van de opslagmodule .....                                                                                                                                          | 72 |
| Tabel 7 De verschillende stakeholders, hun doelen, een waarde propositie voor hen, de obstakels die de voor SorpTES integratie met zich meebrengt en een uitleg van hun rollen en verantwoordelijkheden..... | 75 |



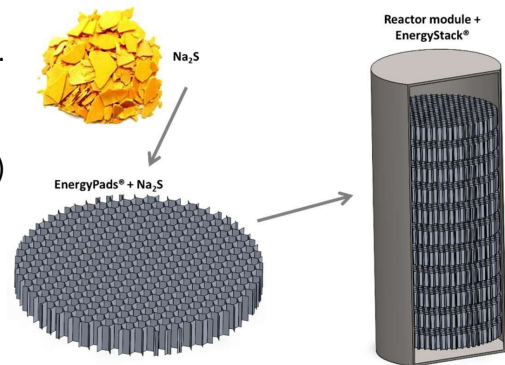


## 1. Inleiding

In het klimaatakkoord is een energieneutrale gebouwde omgeving een belangrijke pijler om de CO<sub>2</sub> doelstelling op korte en lange termijn te bereiken. In het MMIP4 (duurzame warmte en koude in de gebouwde omgeving (inclusief glastuinbouw)) wordt een belangrijke rol toegedicht aan energieopslag. Daarnaast is door de energiecrisis ten gevolge van de oorlog in Ukraine de urgentie van de energietransitie en vermindering afhankelijkheid aardgas erg groot geworden. Energie-opslag maakt het mogelijk om met een grillig duurzaam energie aanbod de variabele energievraag te kunnen voldoen. Een compact warmte/koude opslagsysteem dat een goede prestaties in de vorm van opslagcapaciteit, vermogen en efficiency koppelt aan kosteneffectiviteit en schaalbaarheid. Een oplossingsrichting waaraan door veel partijen wordt gewerkt is het inzetten van thermochemische opslag materialen (TCM). Dit project is een vervolg op de succesvolle projecten Energypad, Energypad 2.0 en SWeKOS.

In het TKI project Energypads (TEID 215048) [1] is aangetoond dat energypads en energystacks inderdaad tot kostprijs daling en eenvoudiger productie van de (modulaire) warmtebatterij gaan leiden. Het project heeft ook tot het inzicht geleid dat voor een goede energypad een dampopen 3D structuur met grote warmtegeleiding noodzakelijk is, waarin de geschikte TCM wordt ingebracht. In het Energypads 2.0 project zijn potentieel geschikte energypads verder onderzocht. Een veelbelovende mogelijkheid is een aluminium honeycomb structuur (Figuur 1). Met inzet van het ontwikkelde COMSOL rekenmodel zijn de optimale dimensies (dikte aluminium, diametercellen e.d.) van een honeycomb berekend. Omdat een dergelijke honeycomb structuur niet commercieel verkrijgbaar is en een toegesneden product erg kostbaar zou zijn is besloten om terug te gaan naar de bekende fin en tube warmtewisselaars. De uitkomsten van het Energypads 2 project [2] vormen de basis voor het eind 2020 gestarte SWeKOS project. De door de Radboud Universiteit Nijmegen uitgevoerde onderzoek naar een uitiem geschikte TCM heeft geleerd dat TCM's op basis van alcoholen of ammonia nog niet geschikt zijn. Daarom blijft de TCM Na<sub>2</sub>S de beste optie. Restgassen (H<sub>2</sub>S), verwerking en corrosie zijn de belangrijkste aandachtspunten voor toepassing van Na<sub>2</sub>S. De zogenaamde KTL coating is een goede coating om corrosie ten gevolge van Na<sub>2</sub>S te voorkomen. Ook is vastgesteld dat de stabiliteit van Na<sub>2</sub>S na verloop van jaren goed was en de productie van restgassen laag bleek te zijn. Het SWeKOS project [3] heeft geresulteerd in het ontwerp, bouw en testen van een Sorptie Energie Module (SEM).

In Figuur 2 is een schematische weergave gepresenteerd. De modulaire opbouw is de stapeling en koppeling van sorptie energie modules tot SWeKOS. De eerste testresultaten met silicagel hebben laten zien dat de SEM voldoet aan de energie specificaties. In dit vervolg project SWeKOS 2 wordt een Thermo Chemisch Energie Systeem (TCES) uitgaande van de SEM gevuld met de Na<sub>2</sub>S inclusief regeling en control gebouwd en getest. Dit op TCM gebaseerde thermische energie-opslagsysteem wordt dan veel compacter dan opslag in de bodem of in een boiler en energie kan gedurende langere tijd vrijwel verliesvrij opgeslagen worden. Binnen Europa is Nederland een van de forerunners op dit gebied. De consortiumpartners zijn bij de een groot deel van de lopende onderzoeksprojecten op dit gebied aangesloten



Figuur 1 Energypad uit honeycombs



Figuur 2 Schematische weergave SEM





## 2. Doelstelling van het SWeKOS2 project

Zoals in de inleiding is vermeld hebben de projectpartners een drietal aansluitende projecten uitgevoerd om te komen tot het concept van een sorptie warmte en koude opslag systeem. Hierbij is de goede werking onderzocht, maar ook de toepasbaarheid en de industriële maakbaarheid leidend tot een marktconforme prijs/ prestatie verhouding. In deze reeks van onderzoeken is aangetoond op lab schaal dat dit goed mogelijk moet zijn. De volgende stap wordt in SWeKOS2 uitgevoerd namelijk opschalen naar marktconforme grootte met inpassing in een systeem inclusief aansluitingen en regeling. Voor het realiseren van een compacte warmte en koude opslag systeem zijn er momenteel een aantal thermochemische materialen (TCM) bekend. Om de doelstelling van een compactere TCM opslag te kunnen realiseren is er in dit project gekozen voor de TCM Na<sub>2</sub>S. Naast een werkend systeem moet ook de technologie, maakbaarheid en industriële productie van een compleet opslagsysteem gebaseerd op een thermochemisch materiaal verder ontwikkeld worden. In het afgeronde SWeKOS project zijn zaken als de effectiviteit van een absorber en condensor, warmtewisselaar, regeling, kleppen in vacuüm, afmetingen en produceerbaarheid onderzocht gebaseerd op een adsorptie materiaal (silicagel) gerealiseerd. Nu moet dit doorgezet worden naar de lastig te verwerken en te gebruiken TCM Na<sub>2</sub>S. In dit project wordt de ontwikkeling tot een volwaardig markt conform systeem ingezet.

In dit voorstel worden drie essentiële technische hoofdvragen geadresseerd en opgelost:

- Hoe moet een SWeKOS2 TCES systeem worden opgebouwd/gemaakt om tot de beste energetische prestatie met betrekking tot warmte en koude opslag, warmte en koude productie, capaciteit en vermogen te komen? (dit natuurlijk onder de voorwaarden van prijs, duurzaamheid en veiligheid)
- Op welke wijze kan een op absorptie warmte- en koude-opslagsysteem kosteneffectief geproduceerd worden?
- Op welke wijze wordt een dergelijk SWeKOS2 TCES systeem effectief ingepast in de diverse warmte en koude systemen in de gebouwde omgeving?

Deze ontwikkelingen zijn nodig om tot een kosten effectief compact, verliesvrij warmte- en koude-opslagsysteem te komen die voldoet aan de eisen van de markt en zijn gebruikers en inpasbaar is in een brede range aan energiesystemen

In bijlage 1 is het openbare projectplan opgenomen.

## 3. Project aanpak en Werkwijze

Voor de uitvoering van het project is een projectplan opgesteld bestaande uit 6 werkpakketten.

Voor de beschrijving, de taakverdeling en output van de werkpakketten zie bijlage 1, het gedurende het project aangepaste projectplan en deliverables. Deze 6 werkpakketten omvatten de volgende activiteiten.

### **Werkpakketten SWeKOS2 project**

#### **Werkpakket 1: Werkpakket 1: Ontwerp, bouw en testen full scale reactor met TCM module.**

Doelstelling: Ontwerpen, bouwen en testen van reactor module gebaseerd op TCM

#### **Werkpakket 2: Integraal systeem ontwerp**

Doelstelling: Systeem ontwerp & toetsing



**Werkpakket 3: Ontwerp en bouw compleet concept marktsysteem met vier reactor modules.**

Doelstelling: Compleet systeem realiseren

**Werkpakket 4: Testen van het complete systeem.**

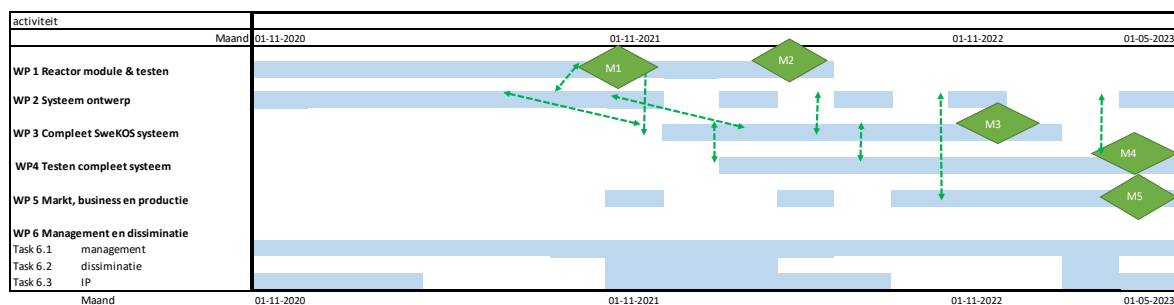
Doelstelling: Testen compleet systeem gevuld met de TCM

**Werkpakket 5: Industrialisatie.**

Doelstelling: Ontwikkeling integraal productie businessplan

**Werkpakket 6: Kennisoverdracht en projectmanagement.**

Doelstelling: Kennisoverdracht en management van het project



Figuur 3 Projectplanning van het SWeKOS2 project

De onderzoeks- en ontwikkelingsactiviteiten van dit project bestaan uit een aantal parallel lopende hoofdactiviteiten. In de ene hoofdlijn wordt een systeem gebaseerd op sortie met een TCM op volledige schaal ontworpen, gebouwd getest. Daarnaast wordt in een parallel traject de industriële productie (blauwdruk) onderzocht en de business case uitgewerkt. In de andere hoofdlijn wordt de uiteindelijke inpassing van het SWeKOS2 systeem in breed scala van energiesystemen ontwikkeld, in termen van hydraulische inpassing, regelstrategie, sturing, inzet en prioritering energiebronnen (warmte of koude). Daarnaast vindt in het project management het bewaken van de voortgang, resultaten, IP en disseminatie plaats.



## **Uitvoering**

Het project is in de geest van het originele projectplan uitgevoerd. In SWeKOS 2 is de focus op het produceren van een Na<sub>2</sub>S gevuld energy opslag systeem (als een chemische warmtepomp voor productie warmte en koude). In de projectuitvoering betekende dit dat er veel tijd, inspanningen en kosten zijn besteed aan het maken, beproeven en analyseren van deze concrete uitvoeringen van de systemen. De projectuitvoering vond plaats midden in de corona periode. Dit heeft veel voor het project betekend. De projectuitvoering ondervond vertraging doordat de fysieke projectmeetings in die periode niet door konden gaan. Achteraf is gebleken dat met de digitale teams meetings de vinger aan de pols werd gehouden, maar dat het daadwerkelijk bezoeken van testopstellingen en de discussie hierover minder effectief hebben plaats gevonden. Daarnaast was er veel concreet en fysiek lab werk gepland, wat lastig bleek te zijn in deze periode. En tenslotte is in de jaren 2021 en 2022 veel improvisatie werk uitgevoerd om aan de juiste onderdelen en elektronica te komen. Concreet heeft dit betekent dat er veel geïmproviseerd inzake de bouw en test van de TCES modules. Dit heeft to een andere volgorde van activiteiten geleid dan gepland. Met name in werkpakket 1 zijn de testen anders uitgevoerd dan gepland. Door gebrek aan materialen, elektronica en de corona maatregelen is een “zichtmodel” gebouwd en zijn daarna enkele modules gemaakt. Omdat het systeem modulair is, is toen besloten dat testen aan 1 module gevuld met Na<sub>2</sub>S voldoende zou zijn. Tijdens de bouw en testen is vastgesteld dat het “pannetje” niet bestand is tegen de krachten van het vacuüm. Er zijn toe naarstig naar oplossingen voor versteviging van de constructie gezocht. In 2023 is het projectplan bijgesteld omdat de productie van de verstevigde vacuüm “pannetjes” niet eenduidig en kwalitatief op grotere schaal uitvoerbaar bleek te zijn. Deze belangrijke en onvoorziene tegenvaller heeft tot aanpassing van de projectuitvoering en resultaten geleid. De focus in de eindfase van het SWeKOS2 project is enerzijds gericht op het zo goed mogelijk behalen van de aangegeven projectresultaten, en anderzijds erop gericht om in het reeds toegewezen pilot project SorpTES praktische voortgang te kunnen boeken, binnen de tijdsplanning. Het redesign van het SWeKOS2 product is daarom een belangrijk resultaat. Dit redesign wordt ingezet als product in het pilotproject.



## 4. Resultaten

### 4.1 Freedom to Operate & IPR strategy

Voor de business strategie van de ontwikkeling en productie van het TCES systeem is het nodig om een Intellectual Property Right strategie te ontwikkelen en de zogenaamde freedom-to-operate te kennen. Daartoe zijn de volgende activiteiten uitgevoerd:

- Aandacht besteden binnen de ontwikkeling van het SWeKOS 2 project om nieuwe ideeën of, concepten geheim te houden en na te gaan of er patent voor kan worden aangevraagd.
- Duidelijke afspraken te maken inzake hoe om te gaan met geheime kennis, bijvoorbeeld van productie, materialen of recepturen. Dit is vastgelegd in de samenwerkingsovereenkomst en binnen de project meetings wordt hieraan aandacht besteed.

De conclusie van de patenten analyse uit deze en diverse gerelateerde was dat er freedom-to-operate is voor de ontwikkeling van energypads in combinatie met toepassing van 3 D structuren met warmte geleidende (carbon) vezels en/of aluminium honeycombstructuren ten behoeve van thermo-chemische opslag. Een Intellectual Property Rights strategie is meer dan het ontwikkelen van patenten. Binnen het SWeKOS2 project bestaat de IPR-strategie uit de volgende onderdelen:

- Voor de projectdeelnemers is er een samenwerkingsovereenkomst opgesteld waarin de geheimhouding van geheime kennis is geregeld.
- De ontwikkelde geheime kennis komt ten goede aan de productontwikkeling van thermo chemische opslag bij de Beijer RTB. De Beijer RTB kan vrijelijk deze kennis en ervaring inzetten in de productontwikkeling van TCM opslagsystemen en het brengen van deze producten naar de markt.

Daar waar mogelijk en nuttig zullen patenten worden ontwikkeld, in overleg met de projectpartners. De kennis en ervaring ontwikkeld en opgedaan in het SWeKOS2 project wordt binnen het consortium geheimgehouden op basis van afspraken gemaakt tijdens de project overleggen.

Publicaties en presentaties worden voorgelegd aan de consortium partners en na hun toestemming openbaar gemaakt. Het eindrapport van dit project kent een publieke versie die door de consortium partners is goedgekeurd.

#### **Conclusie IP & Freedom to operate**

Uit patent onderzoek is gebleken dat er geen belemmeringen zijn om het sorptie warmte en koude energie opslag systeem verder te ontwikkelen. Daarnaast is de IP-strategie vast gelegd met garanties voor De Beijer RTB om het product verder te kunnen ontwikkelen.



## 4.2 Ontwerp, bouw en test reactor module

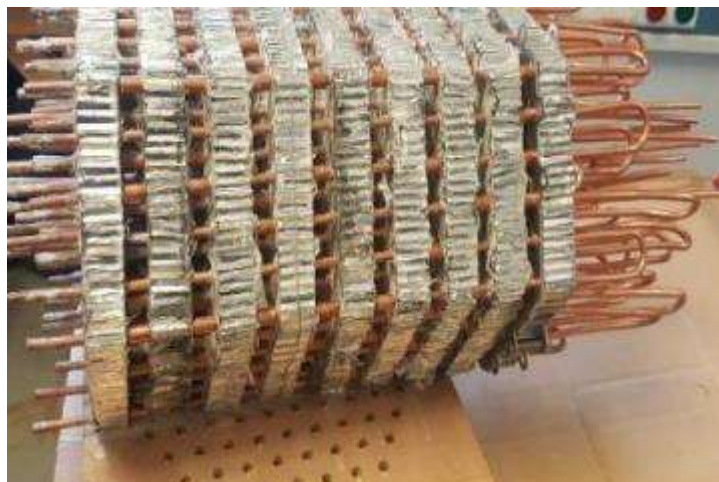
### 4.2.1 Ontwikkeling reactor module

Het SWeKOS project[3] heeft in de eindfase het inzicht opgeleverd dat een honeycomb module als energypad heel geschikt is voor gebruik in een TCM energie opslag systeem. De toegepaste honeycomb bleek bij analyse van de meet-en rekenresultaten niet de juiste materiaaldikte te hebben, waardoor de warmtegeleiding van en naar de TCM de beperkende factor bleek te zijn. In de markt zijn geen honeycomb structuren met de gewenste wanddikte tegen acceptabele kostprijs voorhanden. Geconcludeerd is dat energypads op basis van in de markt beschikbare aluminium honeycombs stacks geen SWeKOS systeem oplevert dat voldoet aan de vereiste prestaties met betrekking tot energie inhoud en vermogen.

In het SWeKOS project is duidelijk vast komen te staan dat de KTL lak als coating aangebracht op de warmtewisselaar goed bestand is tegen  $\text{Na}_2\text{S}$  als TCM.

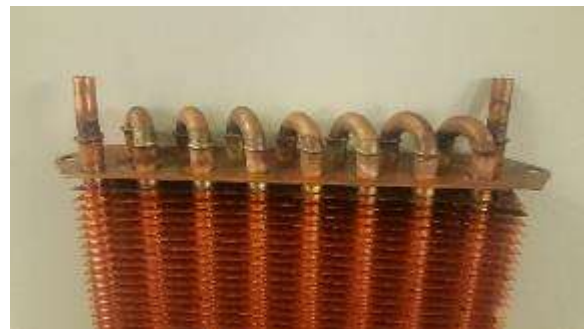


Figuur 4 Honeycomb gevuld met  $\text{Na}_2\text{S}$



Figuur 5 TCM reactor met honeycomb.

Daarom is in de verdere ontwikkeling van het SWeKOS project geconcludeerd dat er gebruik gemaakt zal worden van de warmtewisselaar zoals die in het Solabcool systeem worden gebruikt, de fin en tube opbouw.



Figuur 6 Fin and Tube warmtewisselaar



#### 4.2.2 Het concept ontwerp SWeKOS2 TCES

Zoals in hoofdstuk 4.2.1 geconcludeerd is, wordt er teruggevallen op de fin and tube warmtewisselaar. Daarnaast is er door de samenwerking met Flamco een zogenaamde rechthoekig Sorptie Energie Module ontworpen. Het plaatsen van warmtewisselaars in een rechthoekige module is wat betreft inhoud – oppervlakte benutting effectief. Op deze wijze kan op systeemniveau een hoog percentage TCM ten opzichte van de totale systeeminhoud bereikt worden. Dit ontwerp is afgeleid van een rechthoekige module (“pannetje”), die bij Flamco bv geproduceerd wordt. In onderstaande figuren is dit ontwerp weergegeven.



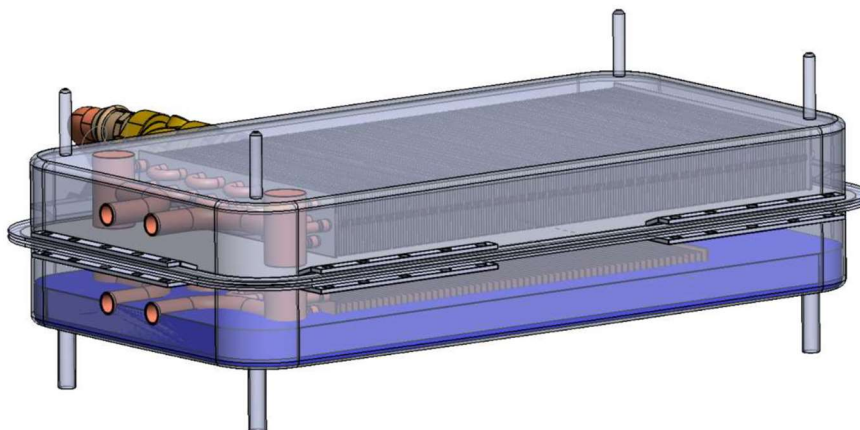
Figuur 7 Het Flamco “pannetje”



Figuur 8 Warmtewisselaar aangebracht

Deze sorptie energie module bestaat uit een behuizing, waarin de warmtewisselaar gevuld met TCM geplaatst zijn, vacuüm klep, condensor en verdampers, die langdurig een vacuüm in stand kan houden. Door de modulaire uitvoering kan het systeem worden opgebouwd.

Voor een impressie van de sorptie energie module, zie onderstaande [Figuur 9](#). Door de modulaire opbouw kan een systeem met de gewenste capaciteit en vermogen worden opgebouwd. In [Figuur 10](#) is deze modulaire opbouw gegeven. Plaatsing in het gebouw kan op allerlei plaatsen.



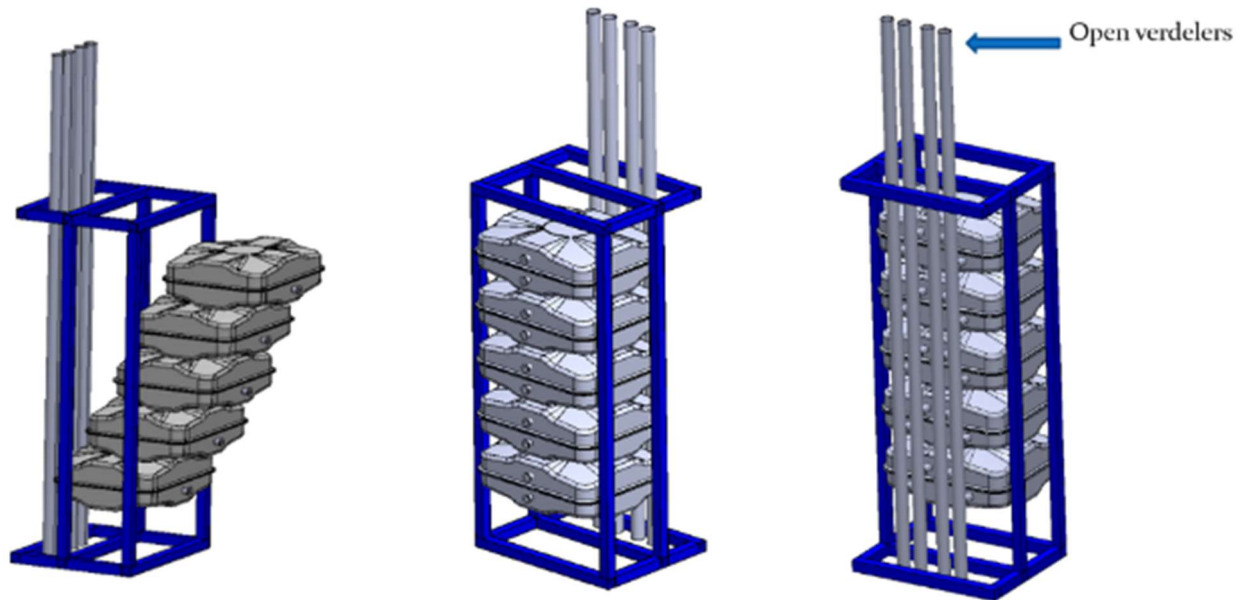
Figuur 9 Impressie van een SEM module als module voor het TCES systeem

De modulaire opbouw zorgt voor een eenvoudige plaatsing en installatie. De modules zijn een voor een in een rek met open verdeler te plaatsen.





Een belangrijk punt bij de uitvoering van een SWeKOS systeem is dat er een buiten unit nodig is voor het onttrekken of afgeven van energie, zodat het absorptie proces de gewenste energie kan leveren.



Figuur 10 Modulaire opbouw van een SWeKOS met sortie energie module. geplaatst in een rack

Het in dit hoofdstuk beschreven TCES systeem was de basis en start voor de verdere ontwikkeling binnen het SWEKOS2 project.

In de volgende hoofdstukken komt de uitwerking van de diverse componenten aan de orde alsmede de inzet van het gedetailleerde COMSOL rekenmodel.



## 4.2.2 Aanpassen COMSOL rekenmodel

### 4.2.2.1 Inleiding

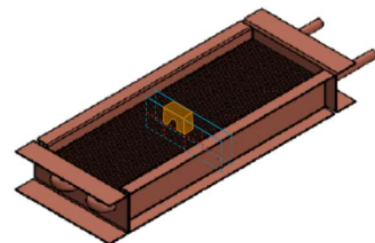
In de voorafgaande projecten Energypads[1], Energypads2[2] en SWeKOS [3] is aan de TU Eindhoven een rekenmodel betreffende thermochemische processen in COMSOL ontwikkeld. Met dit rekentool zijn modelstudies verricht om inzicht te verschaffen in het effectief functioneren van thermochemische materialen onder diverse omstandigheden. Hierbij zijn de warmtegeleiding van de TCM en de warmtewisselaar van groot belang, evenals de dampopen structuur van de TCM. Het dampdruk verschil tussen de absorber/condensor en de warmtewisselaar met TCM bepaalt het damptransport naar de TCM. De dampopen structuur bepaalt hoe de absorptie in de TCM verloopt. De warmtegeleiding van warmtewisselaar en TCM bepaalt hoe snel de gegenereerde warmte afgegeven wordt aan de watervoerende buizen in de warmtewisselaar. Zoals in hoofdstuk 4.1 is aangegeven is het ontwerp, vanwege een aantal praktische zaken, van het energie opslag systeem aangepast. Zo is er gekozen voor fin en tube warmtewisselaars waarin de TCM wordt aangebracht. Om hier modelberekeningen voor te kunnen uitvoeren met het COMSOL model is de geometrie voor de berekeningen aangepast. De berekeningen worden uitgevoerd om de dimensies van fin en tube warmtewisselaar te optimaliseren bepalen. In [Figuur 11](#) is een typische fin and tube warmtewisselaar gegeven. Het zal duidelijk zijn dat hier veel verschillende type voor leverbaar zijn. De volgende aspecten van een fin en tube warmtewisselaar kunnen (binnen productie grenzen) worden gekozen. Dit zijn onder andere het materiaal, de dikte van de vinnen, de (watervoerende)buis diameter en wanddikte, de afstand tussen de vinnen en de afstand van buis tot buis.



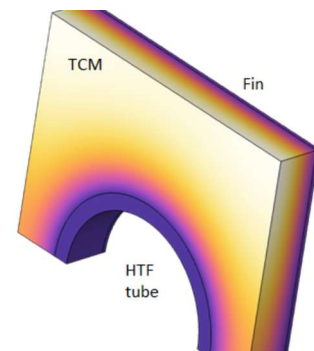
[Figuur 11](#) Voorbeeld fin en tube warmtewisselaar

### 4.2.2.2 Model aanpassing

In het COMSOL model wordt met de geometrie van de energypad gewerkt om de energieberekeningen voor laden en ontladen van een reactor gevuld met TCM uit te voeren. De eindige elementen berekeningen moeten nu uitgevoerd worden aan een nieuwe geometrie die van een fin and tube warmtewisselaar gevuld TCM beschrijft. In [Figuur 12](#) is de warmtewisselaar gegeven met daarbij een stukje van de doorsnede waar de berekeningen aan worden uitgevoerd. In [Figuur 13](#) is het element weergegeven dat in de berekeningen gebruikt wordt. Dit bestaat uit de warmte aanvoerende of afvoerende warmte transport vloeistof buis, de TCM en een vin. Een dergelijke doorsnede is de symmetrische representatie van de warmtewisselaar gevuld met TCM. Hiermee kunnen verschillende type warmtewisselaar me worden doorgerekend. Met het COMSOL model zijn berekeningen uitgevoerd inzake de temperatuur verdeling over de tijd, de snelheidsverdeling van de waterdamp, de drukverdeling van verschillende warmtewisselaars gevuld met silicagel en de TCM  $\text{Na}_2\text{S}$ .



[Figuur 12](#) Warmtewisselaar

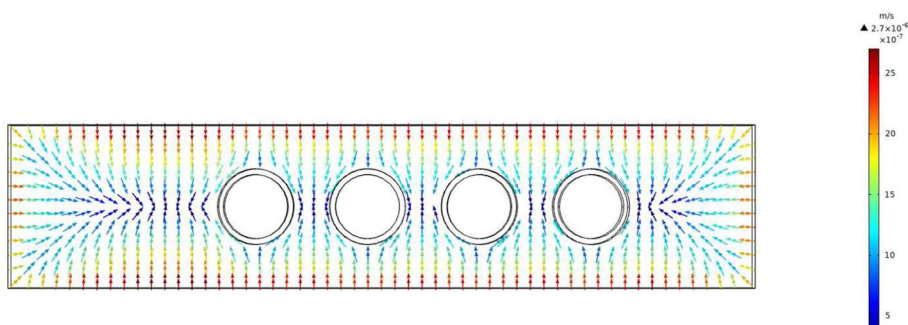


[Figuur 13](#) Doorsnede deel warmtewisselaar

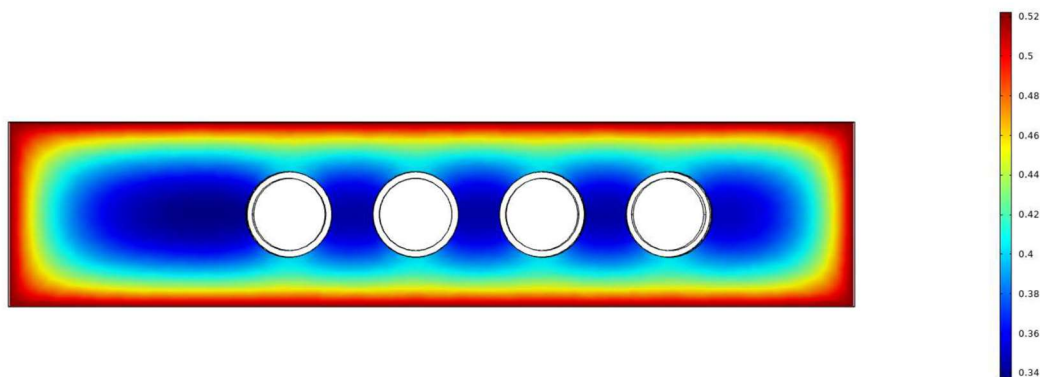


#### 4.2.2.3 Een aantal voorbeelden van de berekeningen

Nu de fin and tube warmtewisselaar gevuld met een TCM in het model is ingevoerd kunnen berekeningen aan verschillende uitvoeringen worden gedaan. Deze 3D simulatie berekening kosten veel tijd. Vandaar dat er maar gedetailleerde berekeningen zijn uitgevoerd voor een beperkt aantal configuraties. Vervolgens is onderzocht of er met eenvoudiger symmetrie in 2D kan worden gewerkt. Dit blijkt redelijk uitvoerbaar te zijn, maar informatie in derde dimensie ontbreekt dan. Voor snelle analyse is de 2d simulatie een goed hulpmiddel. Voor gedetailleerde informatie is echter tocht de 3d simulatie nodig, inzake 2d-as symmetrie gewerkt kan worden. Het 2D model is als ontwerphulpmiddel beschikbaar gekomen. Hier zijn een aantal karakteristieke plaatjes die inzicht geven in de fin en tube warmtewisselaar.



Figuur 14 Snelheidsverdeling na 5 minuten (waterdamp)



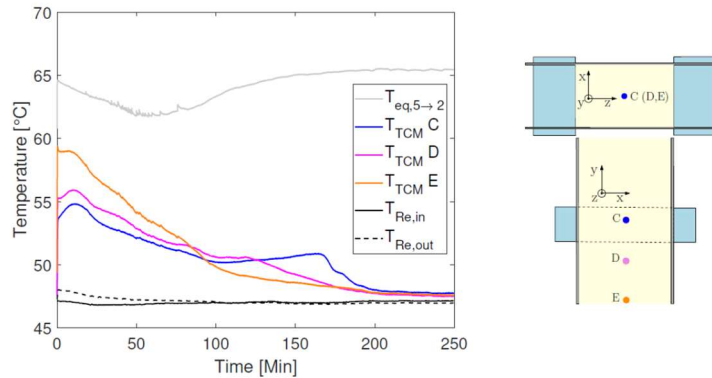
Figuur 15 Verdeling van de concentratie (mol.m3)

In Figuur 14 en Figuur 15 zijn enkele voorbeelden gegeven de van grafische output van het model. Op basis van analyse van de dampnelheid, druk, temperatuur en concentratie verloop over de tijd zijn verschillende uitvoeringsvormen te analyseren.



#### 4.2.2.3 Vergelijking berekening en metingen

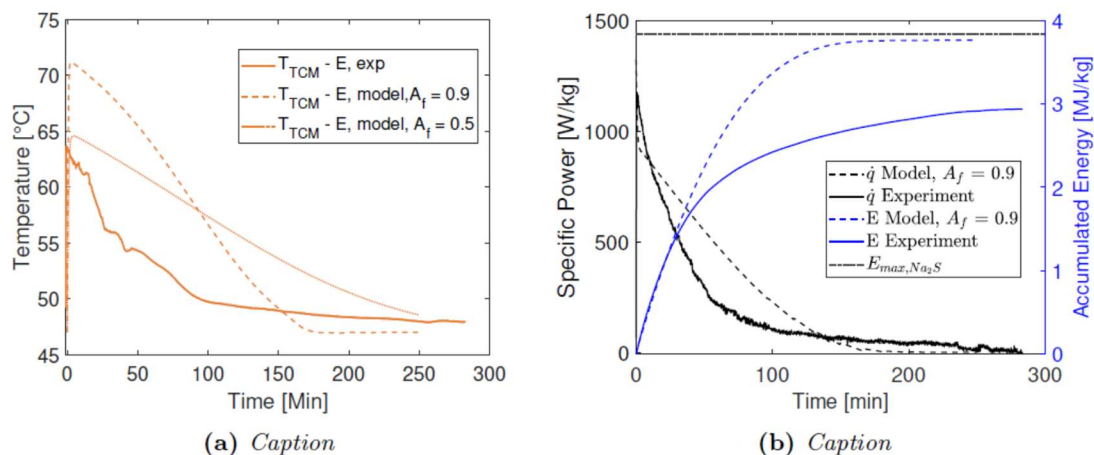
Verderop in hoofdstuk 4 wordt een transparant zicht model van de TCES beschreven. Met dit testmodel kunnen verschillende uitvoeringsvormen van de warmtewisselaar gevuld met  $\text{Na}_2\text{S}$  bemeten worden. Om de uitkomsten van het COMSOL rekenmodel te verifiëren zijn berekeningen uitgevoerd aan een fin en tube warmtewisselaar die beproefd is. Hierbij is de uitvoeringsvorm van de warmtewisselaar bij het testen in het rekenmodel ingevoerd. Daarnaast zijn de testen onder vaste omstandigheden uitgevoerd. In de geteste warmtewisselaar zijn een aantal gecoate micro thermokoppels aangebracht. In de [Figuur 16](#) is een metingen van temperatuur weergegeven.



Figuur 16 Gemeten temperatuur in de gevulde warmte wisselaar op de aangegeven plaats gedurende het ontladen van de TCES

Het meten van temperatuur in de TCM  $\text{Na}_2\text{S}$  is een uitdaging. Dit omdat de micro thermokoppels eigenlijk nog behoorlijk groot zijn ten opzichte van de korrels  $\text{Na}_2\text{S}$  en omdat de agressieve omgeving inwerkt op de thermokoppels. Op deze wijze is er dus op drie plaatsen in de vin gemeten. De gegeven temperaturen van  $T_{re, in}$  en  $T_{re, out}$  zijn de temperaturen in de watervoeren buisjes in de warmte wisselaar. De  $T_{eq5 \rightarrow 2}$  is de temperatuur die hoort bij transitie van  $\text{Na}_2\text{S} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  naar  $\text{Na}_2\text{S} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  gedurende het ontladen.

Vervolgens zijn er aan de warmtewisselaar metingen en berekeningen uitgevoerd waarbij de omstandigheden en randvoorwaarden zo als mogelijk identiek zijn. In [Figuur 17](#) zijn de resultaten te zien Het temperatuurverloop in [Figuur 17](#) is uitgezet voor twee waarden van een zogenaamde pre-exponentiële factor  $A_f$ . Deze is slecht bekend voor  $\text{Na}_2\text{S}$ . Daarom zijn de berekening voor 2 waarden uitgevoerd om de invloed op de rekenresultaten te zien.



Figuur 17 Vergelijk berekening en meting aan een fin en tube heat exchanger gevuld met  $\text{Na}_2\text{S}$



Het blijkt dat de resultaten zeer gevoelig zijn voor de waarde van deze parameter. Deze waarde is geschat. (zie ook del 1.4.3). De nauwkeurigheid van deze schatting is onzeker. Voor de berekening zijn een aantal parameters slecht bekend en worden daarom op basis van een best guess bepaald.

De piektemperatuur in sonde E is hoger voor het model dan de gemeten piekwaarde met de eerste gekozen Af waarde. De piektemperaturen komen bijna exact overeen wanneer Af is ingesteld op 0,5. Wanneer de piek is bereikt, dalen de temperaturen van alle lijnen door een daling van de temperatuur warmte productie. De temperatuurdaling van het experiment is echter aanzienlijk sneller dan het model, voor beide simulaties. Blijkbaar is ofwel de experimentele reactiesnelheid langzamer, of de snelheid van warmteoverdracht hoger. De snelheid van warmteoverdracht in het model wordt voornamelijk bepaald door de effectieve thermische geleidbaarheid  $k_{eff}$ .

**Figuur 17b** laat zien dat de vermogensontwikkeling van het  $\dot{q}_{model}$  en  $\dot{q}_{experiment}$  relatief dicht bij elkaar liggen.  $\dot{q}_{model}$  is hoger op  $t = 0$  min.. Gedurende de onlaadtijd is  $\dot{q}_{model}$  ook hoger dan  $\dot{q}_{experiment}$ . Dit is ook te zien in de lijnen die de geaccumuleerde Energie E uitzetten. Gedurende de eerste 50 minuten, gemodelleerde energie accumulatie is bijna gelijk aan de gemeten waarde.  $E_{model}$  benadert de theoretische limiet van  $E_{max}$  van  $Na_2S$  nauwkeurig, terwijl de experimentele waarde deze limiet niet bereikt. Het model houdt geen rekening met eventuele verliezen als gevolg van een onvolledige reactie of warmteoverdracht naar de omgeving. Ook houdt het model geen rekening met materiaaldegradatie door nevenreacties.

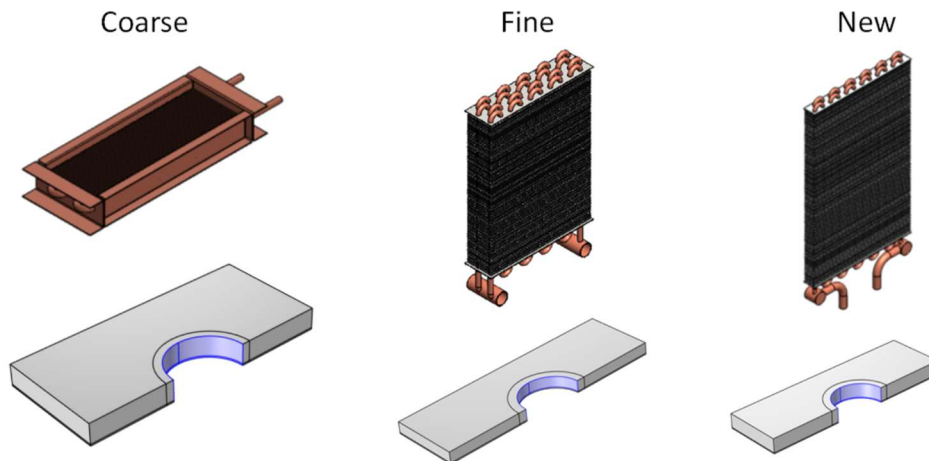
De conclusie van deze vergelijking berekening/meting is dat het rekenmodel goed aansluit bij de meting. Er is onzekerheid in een aantal fysische parameters voor  $Na_2S$ . Deze parameters zijn nodig in het rekenmodel. In de literatuur wordt zeer beperkt onderzoek gerapporteerd aan de stofconstanten van  $Na_2S$ . De agressieve reacties van  $Na_2S$  maken het zeer lastig deze te meten. Deze verificatie toont aan dat het model goed te gebruiken is voor een gevoeligheid analyse voor effectiviteit van een fin en tube warmtewisselaar gevuld met de TCM  $Na_2S$ . In het volgende hoofdstuk is dit beschreven.

#### 4.2.2.4 Resultaten

Een thermochemisch energieopslagsysteem met natriumsulfide als sorbens en water als sorbaat is gemodelleerd en bestudeerd in een driedimensionale cel die is geëxtraheerd uit een warmtewisselaar met platte vinnen en buizen. De waterzijdige kant van het rekendomein werd verondersteld een constante temperatuur te hebben die gelijk is aan die in de experimenten. Het model werd op een tijdsafhankelijke manier uitgevoerd totdat het zout volledig gehydrateerd was. Tijdens de uitvoering van de berekening is het mogelijk om lokaal het thermische gedrag te onderzoeken en ook de vermogensinformatie te extraheren.

Met het 3 D COMSOL model zijn voor 7 verschillende ontwerpen van de warmtewisselaar berekeningen uitgevoerd. In **Figuur 18** zijn 3 hoofdtypen weergegeven en in tabel 1 zijn de eigenschappen van de 7 doorgerekende warmtewisselaars gegeven.





Figuur 18 De 3 hoofd typen warmtewisselaar voor de berekening

| Values                   | New HX   | Fine HX    | Coarse HX | New HX-2  | New HX-3  | New HX-4  | New HX-5  |
|--------------------------|----------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| L (mm)                   | 401      | 276        | 370       | 401       | 401       | 401       | 401       |
| W (mm)                   | 260      | 175.8      | 128       | 260       | 260       | 260       | 260       |
| D (mm)                   | 25       | 50.8       | 28        | 25        | 25        | 25        | 37.5      |
| passes                   | 12       | 10         | 4         | 12        | 12        | 12        | 12        |
| parallel n               | 2        | 4          | 1         | 2         | 2         | 2         | 3         |
| HX number                | 2        | 1          | 1         | 2         | 2         | 2         | 2         |
| fin thickness            | 0.2      | 0.2        | 0.4       | 0.2       | 0.4       | 0.4       | 0.2       |
| fin pitch                | 3        | 2          | 5.25      | 2         | 2         | 3         | 3         |
| tube pitch W             | 21       | 21         | 32        | 21        | 21        | 21        | 21        |
| tube pitch D             | 12.63    | 12.7       | 0         | 12.63     | 12.63     | 12.63     | 12.63     |
| Do (mm)                  | 7        | 7          | 12        | 7         | 7         | 7         | 7         |
| Di (mm)                  | 6.3      | 6.3        | 10        | 6.3       | 6.3       | 6.3       | 6.3       |
| Total (mm <sup>3</sup> ) | 5213000  | 2464856.64 | 1326080   | 5213000   | 5213000   | 5213000   | 7819500   |
| number of fins           | 250      | 125        | 65        | 364       | 332       | 234       | 250       |
| fin volume               | 325000   | 223266     | 93184     | 473200    | 863200    | 608400    | 487500    |
| tube volume              | 740749.8 | 424869.0   | 167384.1  | 740749.8  | 740749.8  | 740749.8  | 1111124.8 |
| TCM Volume               | 4147250  | 1816722    | 1065512.0 | 3909050.2 | 3609050.1 | 3863850.1 | 8220875.2 |
| TCM mass                 | 3.86     | 1.69       | 0.99      | 3.72      | 3.36      | 3.59      | 5.78      |
| REV number               | 23808    | 19840      | 1024      | 34752     | 31680     | 22272     | 35712     |

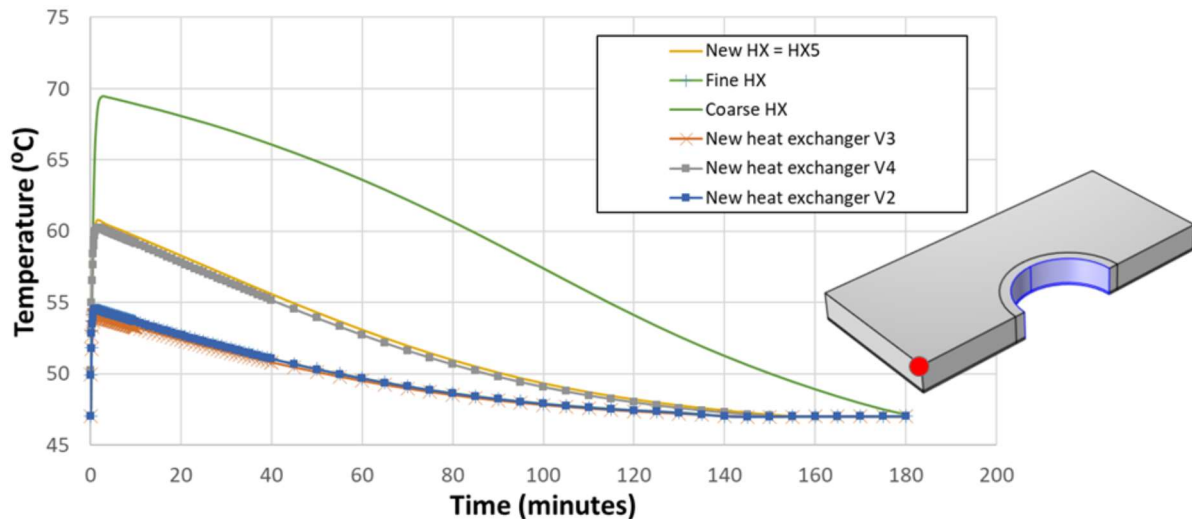
Tabel 1 Eigenschappen 7 verschillende warmte wisselaars

Omdat de 7 warmtewisselaars verschillende uitvoeringen kennen zijn de resultaten niet direct te vergelijken. De grove warmtewisselaar heeft de dikkere watervoerende kanalen (Di en Do) op grotere afstand stand (tube pitch), de vin dikte is groter en bevat ook minder TCM. Voor de anderen geldt iets dergelijks.

In de volgende figuren zijn de resultaten voor de berekeningen aan deze 7 warmtewisselaars, gevuld met de TCM Na<sub>2</sub>S te zien. Het temperatuur verloop in een doorsnede van de warmtewisselaar is berekend voor een punt in het centrum van het TCM bed. Zie ook in [Figuur 19](#). In [Figuur 20](#) is voor deze warmtewisselaar te zien dat het afgegeven vermogen van de Coarse warmtewisselaar (HX) laag is. De temperatuur in deze warmtewisselaar blijft lang hoog, omdat het afgeven van de warmte vanuit de TCM aan de vloeistof, die door de buisjes van de warmtewisselaar loopt, trager verloopt. Dit wordt veroorzaakt door het grotere bed TCM en de lage thermische geleidbaarheid.

De anderen 6 hebben een vergelijkbaar temperatuur verloop.





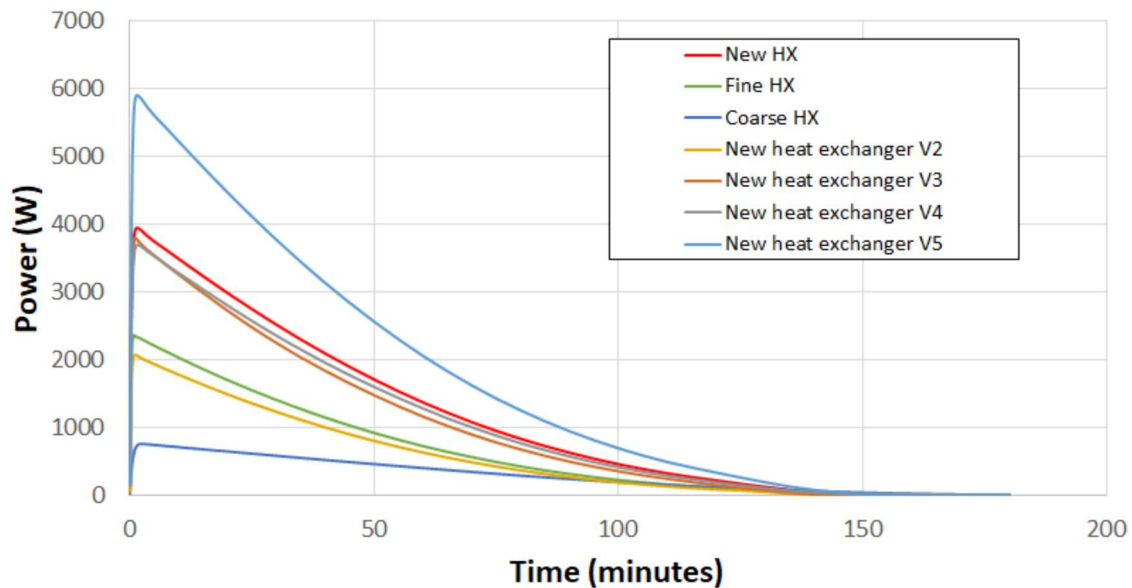
Figuur 19 Temperatuurverloop in het centrum van het TCM bed voor 7 verschillende ontwerpen warmtewisselaar

Naast het temperatuur verloop wordt het vermogen weergegeven en de vermogensdichtheid. In de vermogensdichtheid is rekening gehouden met de hoeveelheid TCM en het volume dat door de vinnen en buisjes wordt ingenomen. Daarom is dit de meest interessante figuur.

Zoals te zien is [Tabel 1](#) hierboven, zijn de cel afmetingen van het eerste en het vijfde ontwerp van de fin and tube warmtewisselaar identiek. Het enige verschil is de extra rij watervoerende buizen.

Het uitgangsvermogen van het energie opslag systeem wordt bepaald door de warmtestroom van de TCM werkstof naar de vloeistof te integreren over de tijd.

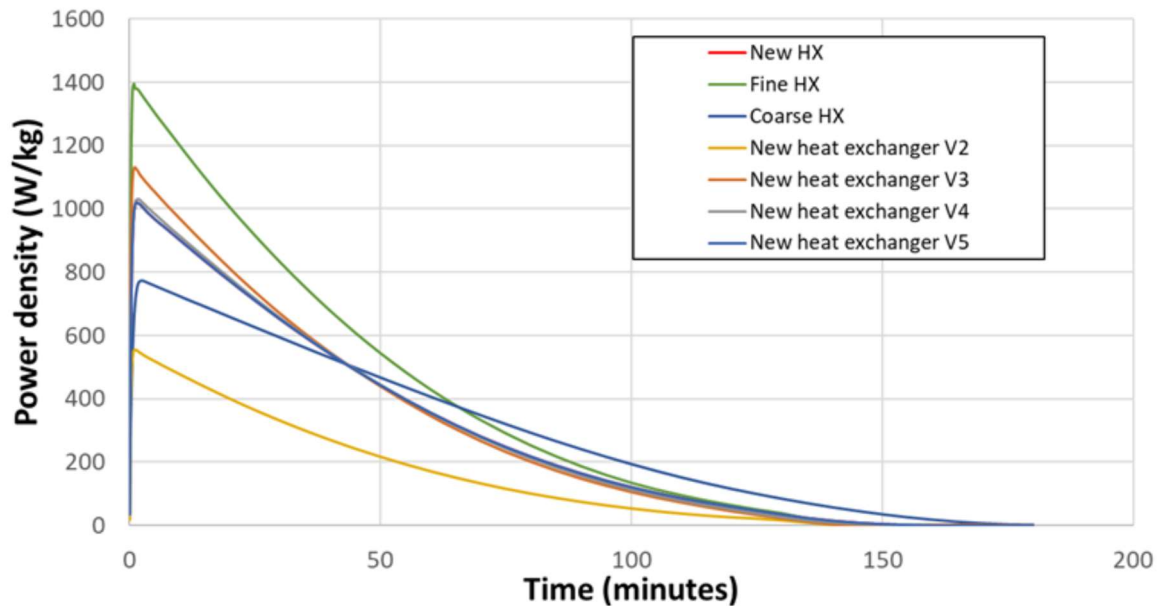
In [Figuur 20](#) is te zien dat het vijfde ontwerp het beste presteert. Dit wordt veroorzaakt door het grote aantal cellen in dit ontwerp. De meeste van de nieuw ontworpen warmtewisselaars functioneren nagenoeg identiek. Het enige nieuwe ontwerp dat slecht presteert, is het tweede ontwerp. Dit komt door de dunne vin dikte, waardoor de thermische geleidbaarheid afneemt. De Grove warmtewisselaar functioneert het minste. De reden hiervoor is de grote opening tussen de vinnen en van de vinnen, waardoor ook de overall kleiner wordt warmtegeleiding.



Figuur 20 Vermogen gedurende 3 uur

Zoals hierboven aangegeven vertekenen de resultaten in [Figuur 20](#). Dit omdat het vermogen wordt bepaald door het aantal cellen met het aantal stacks te vermenigvuldigen. Er vindt zodoende geen normalisatie plaats. Door naar de vermogensdichtheid (W/Kg) te kijken is de vergelijking tussen de verschillende warmtewisselaars nu correct.. De vermogensdichtheid wordt bepaald door het totale uitgangsvermogen te delen door de TCM-massa berekend zoals gegeven in tabel 1.

Zoals in [Figuur 21](#) te zien is, is de fijne warmtewisselaar theoretisch de best ontworpen reactor. De grove warmtewisselaar passeert qua totaal en genormaliseerd afgegeven vermogen zelfs een van de nieuwe ontwerpen. De trend van de grove warmtewisselaar in vermogensdichtheid is meer horizontaal in vergelijking met de andere ontwerpen vanwege de lage warmteafgifte aan de warmteoverdrachtsvloeistof. De oorzaak voor de lage prestatie van het tweede nieuwe ontwerp is dat de combinatie van vin opening en vin dikte klein is in vergelijking met de andere ontwerpen en produceert daarom niet zoveel warmte.



Figuur 21 Vermogensdichtheid gedurende 3 uur

De rekenresultaten voor deze warmtewisselaars geven inzicht in het functioneren van de diverse warmtewisselaars gevuld met de TCM  $\text{Na}_2\text{S}$ . Op basis hiervan zijn conclusies te trekken inzake het ontwerp van de warmtewisselaar met de TCM.

#### 4.2.2.5 Conclusie berekeningen

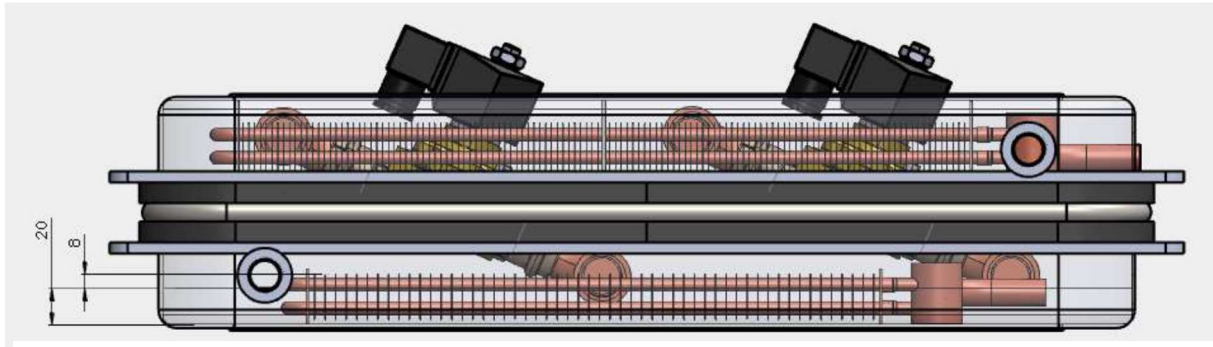
De ontwerpparameters van RTB de Beijer voor praktische warmtewisselaars zijn gebruikt voor een parametrische reeks simulaties. De genormaliseerde vermogens output op basis van de TCM-massa, geeft het beste inzicht in het functioneren van het systeem. De belangrijkste uitdagingen in deze modelleringsstudie waren het gebrek aan chemische informatie met betrekking tot het  $\text{Na}_2\text{S}$ , en de beperkte dehydratatie theorie voor  $\text{Na}_2\text{S}$ , die gebruikt moet worden om de simulatie vergelijkingen op te stellen. stap ook. Verificatie van het COMSOL rekenmodel is behoorlijk lastig. Naast het feit dat een deel fysische/chemische informatie over  $\text{Na}_2\text{S}$  ontbreekt is het uitvoeren van experimenten aan de werkstof  $\text{Na}_2\text{S}$  en het gevulde systeem door de corrosieve impact en giftige dampen erg lastig.

De thermische geleidbaarheid van TCM's is een belangrijk aandachtspunt bij de ontwikkeling van een TCM energie opslag systeem. Er wordt onder andere bij RTB de Beijer en ARES bv gewerkt aan het toevoegen van warmtegeleiding verbeterende stoffen zoals bijvoorbeeld grafiet of koolstof om de thermische geleidbaarheid te verhogen.



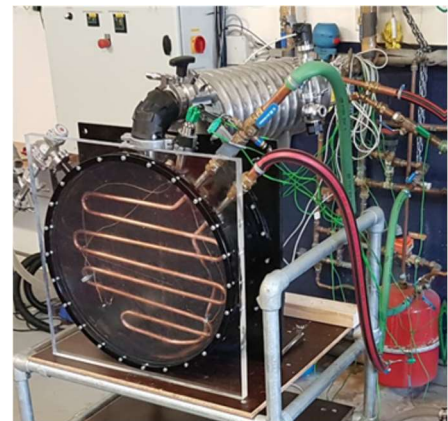
### 4.2.3 Absorber/Condensor bijstelling ontwerp

In hoofdstuk 4.2.2 is de fin en tube warmtewisselaar die voor de TCM gebruikt wordt behandeld. Met het COMSOL rekenmodel en het afgeleide ontwerpmodel is de effectiviteit van in de markt verkrijgbare fin en tube warmtewisselaars te beoordelen. De absorber/condensor is een belangrijk aspect van het TCES systeem, Immers, het laden en ontladen van een TCM energie opslagsysteem is volledig afhankelijk van de verdamper/absorptie prestaties van de warmtewisselaar in de vloeistof (water). In [Figuur 22](#) is het rechthoekige systeem ("pannetje") weergegeven. In de onderste schaal zit de absorber/condensor verwerkt. In de bovenste schaal de fin and tube warmtewisselaar met de TCM. De twee schalen zijn volledig afgescheiden door een luchtdichte plaat. Het geheel zit onder lage druk. Het damptransport voor het laden of ontladen wordt geregeld met de 2 vacuüm kleppen.



[Figuur 22](#) Schematische weergave rechthoekig TCM energie opslag systeem

Onder vacuüm (of zeer lage druk) omstandigheden creëert een vloeistofkolom een hydrostatische druk die een drukgradiënt in de vloeistof induceert. De invloed van de hydrostatische druk op verdampingsprestaties van water in een TCM energie opslag systeem is onderzocht, teneinde een effectieve absorber/condensor te kunnen ontwerpen. Dit onderzoek is uitgevoerd met behulp van een experimentele opstelling. Deze opstelling bestond uit een transparante vacuümkamer waarin twee verschillende warmtewisselaars werden getest op hun kookprestaties voor verschillende initiële waterhoogtes. In [Figuur 23](#) is deze gegeven. Er is een experimentele opstelling gemaakt om het verdampingsgedrag bij lage drukken te observeren en te meten voor verschillende waterhoogtes. De zijkant van de verdamper vat is afgedekt met een transparant deksel waardoor het verdamperwater te zien is en de warmtewisselaar. Er zijn verschillende experimenten uitgevoerd met twee verschillende warmtewisselaars.



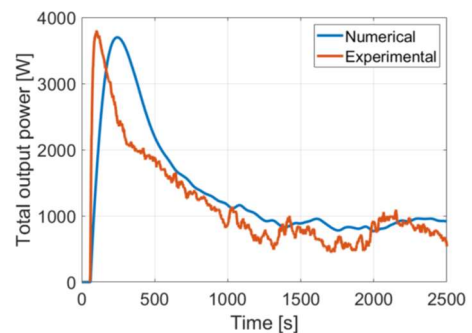
[Figuur 23](#) Test opstelling voor verdamper inclusief visuele analyse met warmtewisselaar



Hierbij stond de totale verdampers effectiviteit centraal. Onderzocht is naast het effect van de fysieke warmtewisselaar, de hoogte van het te verdampen water in combinatie met de ondergedompelde verdampers. En belangrijk warmteoverdrachtseffect is het “koken” van het water onder lage druk. Als er zogenaamde pool boiling is de warmteoverdracht vele malen hoger dan bij convectie koken. Bij de eerste geteste warmtewisselaar bleek pool boiling weinig op te treden. In voorgaand onderzoek bij energypads 2 en SWeKOS is destijds vastgesteld dat het met opruwen van de warmtewisselaar een verhoogde warmteoverdracht oplevert omdat er meer kernen zijn voor het pool-koken. Op basis van deze ervaring en de visuele en data analyse van warmtewisselaar 1, is warmtewisselaar 2 ontworpen.

Het is zaak om ervoor te zorgen dat het waterbad in de condensor/verdampers zo ondiep mogelijk is zodat de condensor/verdampers niet diep in het water steekt.

Er werd een analytisch model gebouwd om het verdampersgedrag van een absorber/condensator beter te beschrijven in een bestaand numeriek reactormodel. Het analytisch model voldoet redelijk voor het modelleren van het uitgangsvermogen, de verdampersdruk en verdampersdampstemperatuur, maar slaagt er niet in om de condensordruk nauwkeurig te modelleren en verdampers vloeistof temperatuur. Zie [Figuur 24](#) voor deze vergelijking van de gemeten en berekende resultaten



Figuur 24 Vergelijking meting en berekening van het vermogen van de condensator

Met dit model worden ontwerpen van absorber/condensators getoetst alvorens deze in de productie te realiseren. De uitkomst van het onderzoek draagt bij aan een effectief ontwerp van een absorber condensator. Met het ontwerp van een goede absorber condensator is het zoeken naar de praktische optimalisatie voor de effectieve werking.

Onder praktisch wordt hier naar de goede fysieke werking, ook de maakbaarheid en kostprijs van de warmtewisselaar bedoeld. Tijdens de industriële productie is ook het inpassen en doorvoeren van de absorber/condensator door de wand van het vacuüm vat van belang. Met dit onderzoek en een numeriek model van de warmtewisselaar in een lage druk waterreactor is deze optimalisatie goed uit te voeren.

Voor de absorber condensator in de rechthoekige SWeKOS uitvoering is gekozen voor een fin and tube warmtewisselaar. Dit type warmtewisselers wordt industrieel vervaardigd en is direct te koop bij toeleveranciers.

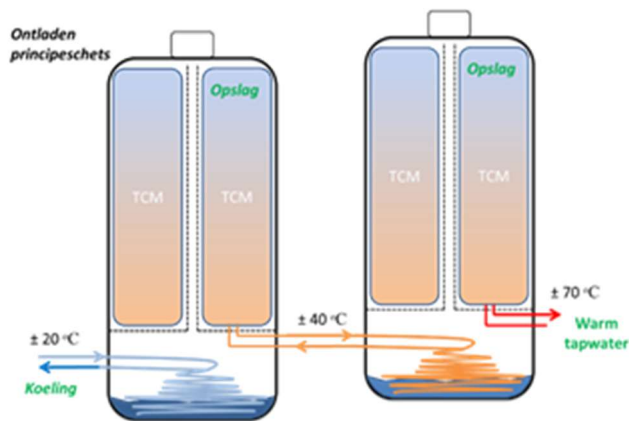
Het hier verkregen inzicht en het ontwikkelde rekenmodel worden ingezet bij het detail ontwerp van de absorber/condensator bestaande uit de fin and tube warmtewisselaar. Het ontwerp betreft dan het aantal water voerende buisjes in de warmtewisselaar, de vin afstanden, de vind dikte en de plaatsing van de warmtewisselaar in de rechthoekige doos met de juiste water hoogte.



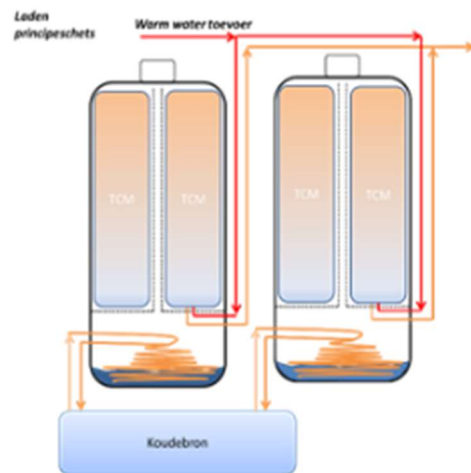
## 4.2.4 Na<sub>2</sub>S werkgebied, selectie en productie

### 4.2.4.1 Inleiding

In dit project wordt een TCES systeem ontwikkeld en beproefd. Een compleet sorptie systeem zal bestaan uit een aantal reactor modules met regeling, kleppen, sturing, elektronica en installatietechnische aansluitingen. Het werkzame sorptie materiaal is hierbij Na<sub>2</sub>S. De energie technische eisen betreft het volgende: een energie inhoud van 30 kWh voldoende om een periode van een aantal dagen tot weken energie te leveren en een vermogen van ongeveer 5kW. Het temperatuur niveau waarop de energie vrijgegeven wordt is 40-50°C voor LT verwarming en circa 15°C voor koeling. De tapwater temperatuur moet hoger dan 60°C zijn (legionella preventie). De aanvoertemperatuur voor het opladen ligt tussen de 60°C en 90°C. In de [Figuur 26](#) en [Figuur 25](#) is schematisch het laden en ontladen van het systeem weergegeven.



Figuur 26 Principe van ontladen van het systeem. De drie leveringen van warmte/koude zijn hier gegeven. Koeling, lage temperatuurverwarming of in cascade schakeling warmtapwater



Figuur 25 Principe van laden van de modules. De koude bron is hier koeling met buitenlucht.

Zoals aangegeven is er voor Na<sub>2</sub>S gekozen. De belangrijkste materiaaleigenschappen staan in [Tabel 2](#)

|                                     | Warmte capaciteit    | Desorptie temperatuur | warmte per kg adsorbens | Dichtheid            |
|-------------------------------------|----------------------|-----------------------|-------------------------|----------------------|
|                                     | [GJ/m <sup>3</sup> ] | [°C]                  | [kJ/kg]                 | [kg/m <sup>3</sup> ] |
| Na <sub>2</sub> S·5H <sub>2</sub> O | 2,4                  | 80                    | 1685                    | 1430                 |

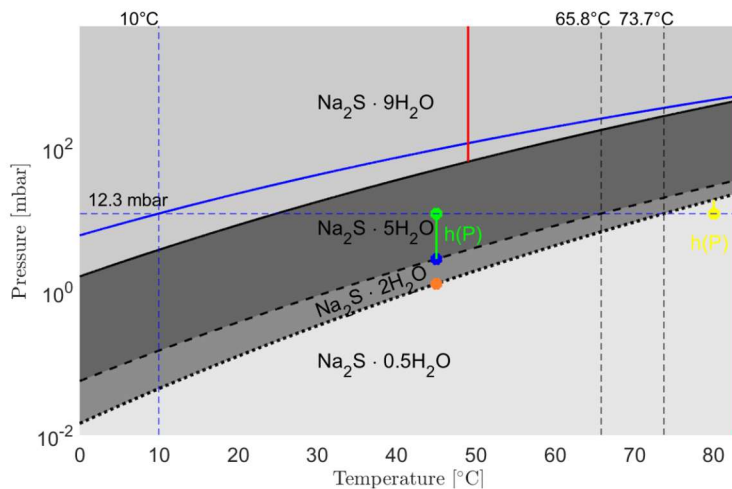
Tabel 2 Materiaal eigenschappen Na<sub>2</sub>S·5H<sub>2</sub>O





#### 4.2.4.2 Werkgebied $\text{Na}_2\text{S}$

In de inleiding van dit hoofdstuk zijn de randvoorwaarden voor gebruik  $\text{Na}_2\text{S}$  aangegeven.  $\text{Na}_2\text{S}$  kan binding hebben met verschillende hoeveelheid water.

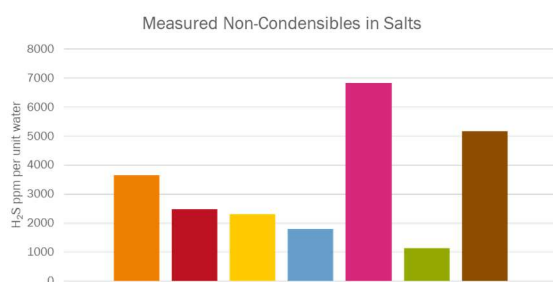


Figuur 27 Het druk-temperatuur diagram voor  $\text{Na}_2\text{S}$

Voor toepassing van de werkstof  $\text{Na}_2\text{S}$  is het noodzakelijk om de absorptie reactie te beperken. Dat betekent dat de absorptie van  $\text{Na}_2\text{S} \cdot 0,5 \text{H}_2\text{O}$  gaat tot maximaal  $\text{Na}_2\text{S} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ . De reden hiervoor is dat  $\text{Na}_2\text{S} \cdot 9\text{H}_2\text{O}$  een vloeibare oplossing worden en als zodanig uit de vinnen van de warmtewisselaar gaat lopen. De hierbij behoren maximale temperatuur is  $83^\circ\text{C}$ .

#### 4.2.4.3 Selectie $\text{Na}_2\text{S}$

Onderzoek bij TNO in een EU project heeft geleid tot de ontwikkeling van een additief voor  $\text{Na}_2\text{S}$  waarmee de productie van restgassen (zoals) sterk wordt gereduceerd. Binnen het SWeKOS2 project zijn daarom testen uitgevoerd met  $\text{Na}_2\text{S}$  van een aantal verschillende fabrikanten en al dan niet de toevoeging van het TNO additief. De experimenten zijn een aantal keren uitgevoerd en de gemiddelde waarde is hier gegeven. Het  $\text{Na}_2\text{S}$  van de producent heeft zonder toevoegingen een hele lage productie van restgassen. Omdat de additieven ook behoorlijk duur zijn is uiteindelijk gekozen voor het inkopen van  $\text{Na}_2\text{S}$  bij een bedrijf. Dit bedrijf levert zeer zuivere  $\text{Na}_2\text{S} \cdot 9\text{H}_2\text{O}$  kristallen.



Figuur 28 Gemeten non-condensable gassen in  $\text{Na}_2\text{S}$

#### 4.2.4.4 Productie $\text{Na}_2\text{S}$ .

De fin and tube warmtewisselaars van Sorptie Energie modules worden gevuld met de werkstof  $\text{Na}_2\text{S}$ . Vanwege de eigenschappen van  $\text{Na}_2\text{S}$  is het noodzakelijk om bij het vullen van de warmtewisselaar voorzichtig in een gecontroleerde te werk te gaan. Een samenvatting van de veiligheidsvoorschriften is:



- Minimaliseer contact tussen  $\text{Na}_2\text{S}\cdot 9\text{H}_2\text{O}$  en het menselijk lichaam; vermijd inademen, doorslikken, contact met ogen en huid
- Open  $\text{Na}_2\text{S}\cdot 9\text{H}_2\text{O}$  moet verwerkt worden in een geventileerde ruimte, zoals een zuurkast
- Er moeten altijd minstens 2 personen bij de bereiding aanwezig zijn
- Je moet altijd gezichtsbescherming dragen, een lab jas met lange mouwen, chemisch bestendige handschoenen en een  $\text{H}_2\text{S}$  sensor
- Nooit eten, drinken of roken gedurende de productie
- Zorg ervoor dat  $\text{Na}_2\text{S}\cdot 9\text{H}_2\text{O}$  nooit in contact is met lucht
- In geval van contact tussen  $\text{Na}_2\text{S}\cdot 9\text{H}_2\text{O}$  en het menselijk lichaam direct de eerste hulp maatregelen raadplegen



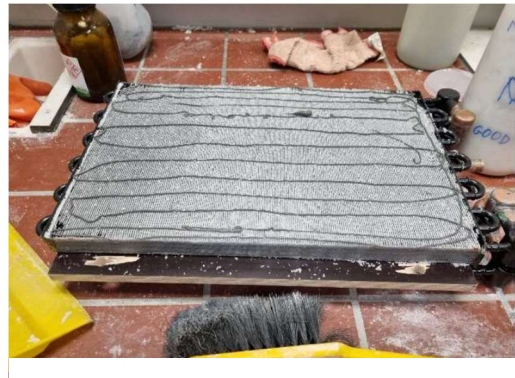
Figuur 29 Opstelling voor smelten  $\text{Na}_2\text{S}$

Voor het productierijp maken  $\text{Na}_2\text{S}\cdot 9\text{H}_2\text{O}$  worden de volgende stappen gevolgd:

- Het prepareren van  $\text{Na}_2\text{S}\cdot 9\text{H}_2\text{O}$
- Het smelten van  $\text{Na}_2\text{S}\cdot 9\text{H}_2\text{O}$
- Het eventueel toevoegen van grafiet of cellulose aan de gesmolten  $\text{Na}_2\text{S}\cdot 9\text{H}_2\text{O}$
- Het laten kristalliseren van  $\text{Na}_2\text{S}$  tot korrels of in-situ

#### 4.3.4.5 Het vullen van de reactoren met $\text{Na}_2\text{S}$

Met de aldus verkregen werkstof  $\text{Na}_2\text{S}\cdot 9\text{H}_2\text{O}$  worden de reactoren gevuld. Het strooien van de korrels op de reactor en vervolgens in de reactor duwen. Hierdoor bleek het niet mogelijk om een hogere vulling graad dan 30% te krijgen. Aan de ene zijde van de warmtewisselaar is een mesh aangebracht om te voorkomen dat de korrels er door heen vallen. Analyse toont aan dat het vullen van de reactoren met  $\text{Na}_2\text{S}\cdot 9\text{H}_2\text{O}$  niet goed uitvoerbaar is en niet tot de gewenste dichtheid lijdt. Daarom is besloten om naar  $\text{Na}_2\text{S}\cdot 5\text{H}_2\text{O}$  over te stappen bij het vullen van de reactoren. Dit zogenaamde pentyhydraat is droger en kan daardoor beter in de reactoren gestort worden.

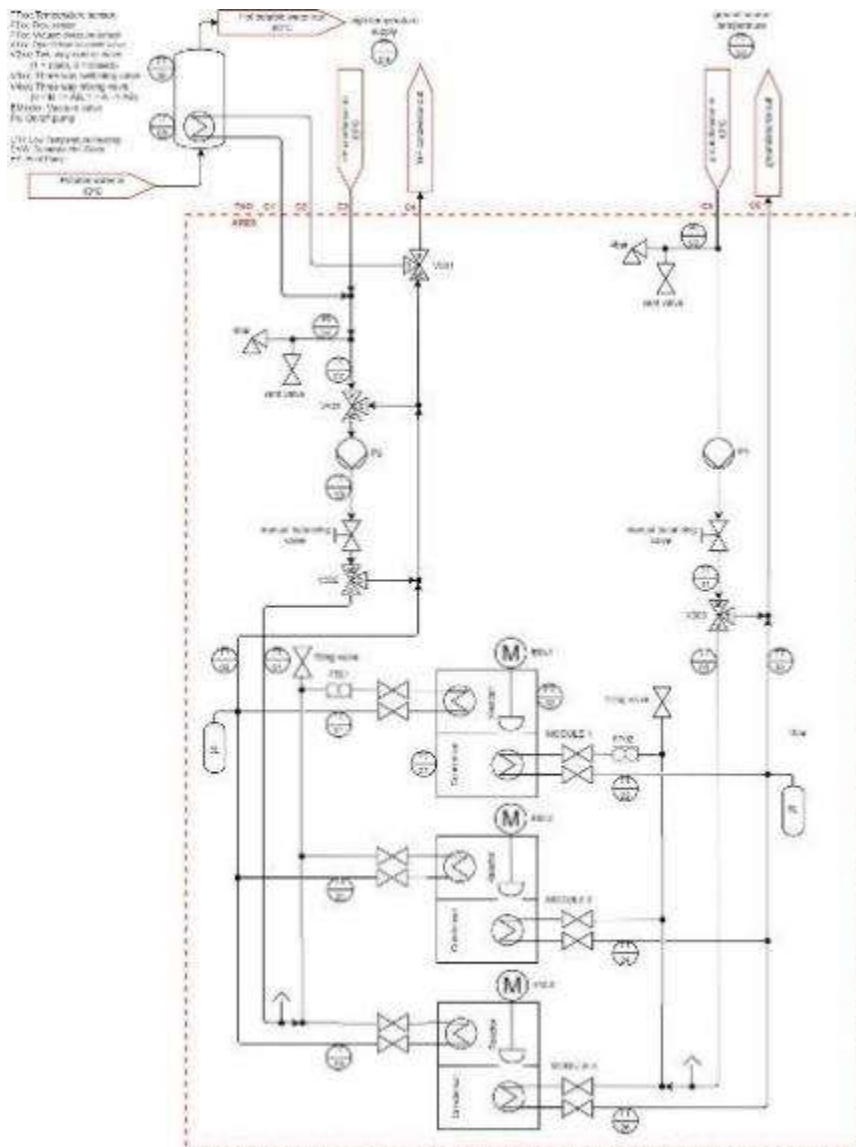


Figuur 30 Korrels "geduwd" in de reactor (fin and tube warmtewisselaar)



#### 4.2.5 Regeling SweKOS2 systeem

Er is een versimpelde testopstelling en regelstrategie uitgedacht waarmee een Na<sub>2</sub>S TCES systeem kan worden getest. Het TCES systeem kan hierbij worden geladen en ontladen. Bij het ontladen wordt de TCES gebruikt om een water buffertank op te laden. Bij de beproeving wordt ervan uitgegaan dat er een warmtebron is die constant water op 80°C kan leveren. Daarnaast wordt ervan uitgegaan dat er een grondbron aanwezig is die water op 10°C kan leveren.



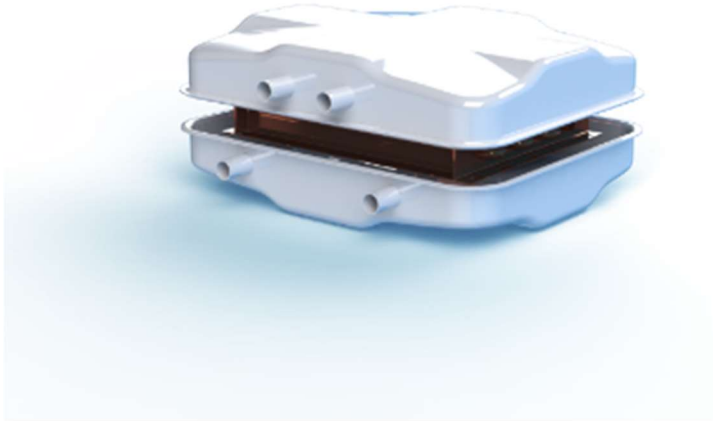
Figuur 31 Regeling voor het TCES systeem bij het testen in een testopstelling

De hier gegeven regeling wordt gebruikt in de testopstelling om vast te stellen de TCES over langere tijd correct kan worden geladen en ontladen. Daartoe worden de 3 modules bemeaten en kunnen ingeschakeld worden om te laden of te ontladen. De modules staan in serie en worden een voor een opgeladen of ontladen.



#### 4.2.6 Bouw en test TCES module

Op basis van de meetresultaten aan het zichtmodel en de verdiepende analyses is het ontwerp van de SWeKOS2 TCES module bestaande uit de rechthoekige bak (pannetje) gemaakt en vervolgens gebouwd. In [Figuur 33](#) is een artist impression van ontwerp gegeven. Om de vacuüm druk te kunnen weerstaan zijn versterkingsribben aangebracht. In [Figuur 32](#) is de modulaire opbouw weergegeven



Figuur 33 Artist impression van het TCES systeem met versterkte bak



Figuur 32 Opstelling van de platte modules in een skid

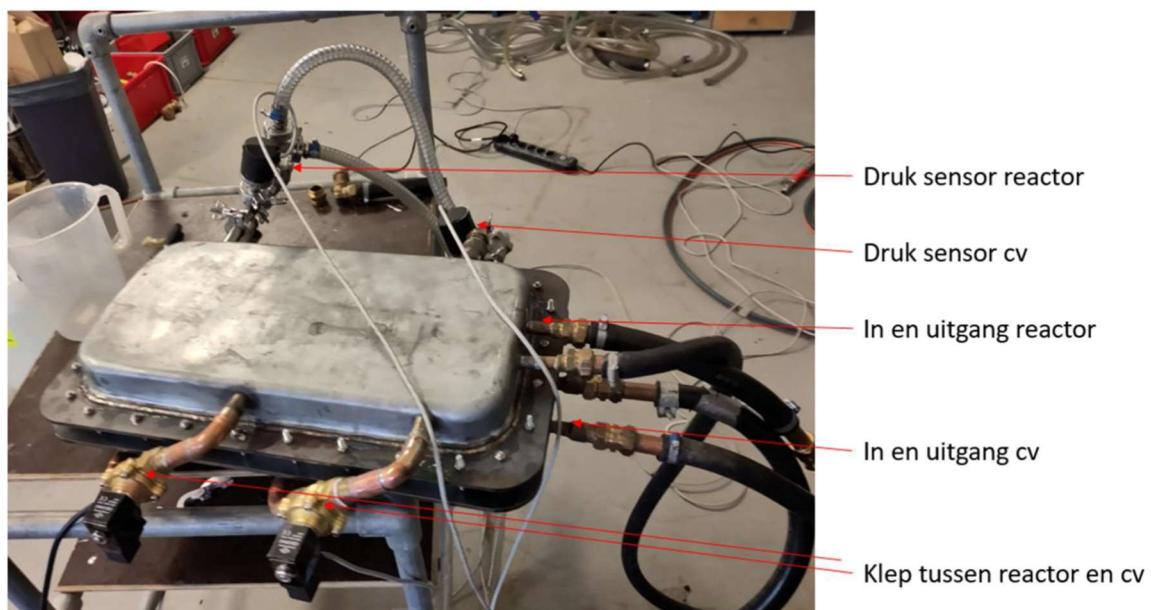
Aan de bovenzijde van de bak komen een tweetal warmtewisselaars gevuld met  $\text{Na}_2\text{S}$ . Aan de onderzijde de verdamper/condensator ook opgebouwd uit een warmtewisselaar. Tussen de onderzijde en bovenzijde wordt een metalen plaat aangebracht teneinde de energieopslag te scheiden van de absorptievloeistof (water). Aan de buiten zijde zijn zowel boven als onder ronde doorvoeren gemaakt met afsluitklep om de waterdam te kunnen toevoeren of voeren en aft te sluiten. Tussen de bovenste en onderste bak is ook een butylrubber band aangebracht, om voldoende afstand tussen boven en onder te creëren.. Er is onderzoek aan het uitgassen van de butyl tussenrand verricht. Hieruit is geconcludeerd dat er geen significante o ontgassing optreedt en deze band toegepast kan worden.



De karakteristieke eigenschappen van 1 SWeKOS2 module (TCES) zijn:

- Totale volume voor  $\text{Na}_2\text{S}$ : 3,9 liter
- Dichtheid bij het vullen: 750 kg.m<sup>3</sup>
- Ratio tussen de actuele vulling en theoretische vulgraad: 75%
- Totaal gewicht droog  $\text{Na}_2\text{S}$ : 1,36 kg
- Totaal gewicht water als absorbens: 1,06 kg
- Energie opslag capaciteit TCES: 1,08kWh
- Vulgraad system: 17,7%

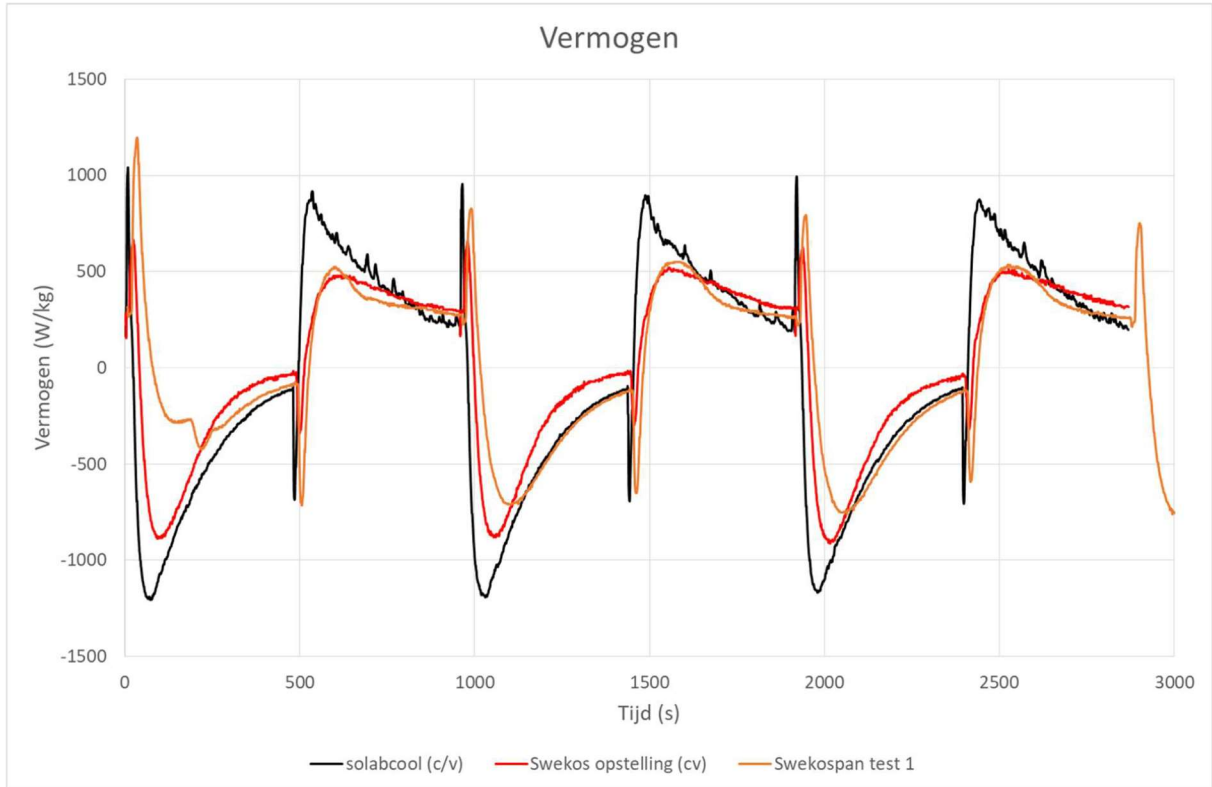
Alvorens de rechthoekige module te testen met  $\text{Na}_2\text{S}$  worden commissioning testen met  $\text{SiO}_2$  uitgevoerd. Het doel van deze testen is controleren of het piek vermogen, gemiddeld vermogen en druk van de pan overeenkomen met de  $\text{SiO}_2$  testen van de SolabCool en SWeKOS 2 opstelling.. Ook wordt er gekeken naar onverwachtse bijwerkingen vermelden.



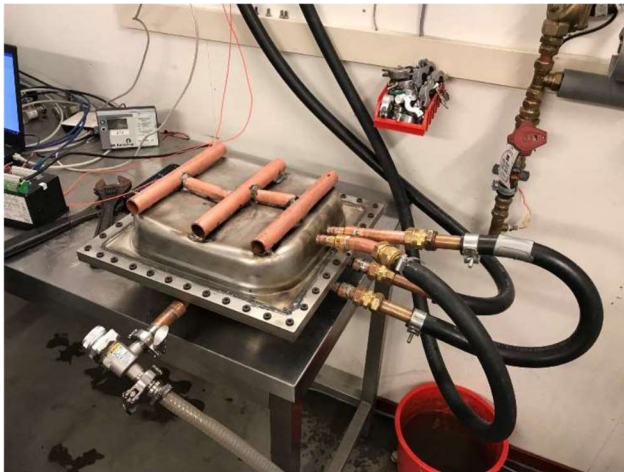
**Figuur 34** Test met rechthoekige module met  $\text{SiO}_2$

Er zijn diverse laad en ontladtesten met dit model uitgevoerd. In **Figuur 35** is het koelvermogen van dit ontwerp vergeleken met de Solabcool en de SWeKOS uitvoering.





Figuur 35 Gemeten vermogen van de rechthoekige module vergeleken met Solabcool en SWeKOS model

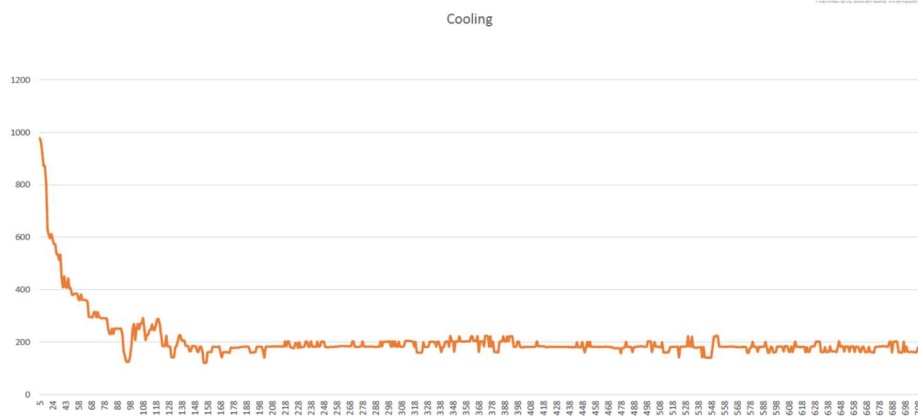


Figuur 37 De test versie van de ontworpen TCES module



Figuur 36 TCES in testopstelling





**Figuur 38** Koelcurve van test reactor

In **Figuur 38** is het gemeten koelvermogen van deze TCES gevuld met SiO<sub>2</sub> gegeven. Deze test voldeed niet aan de verwachting. Er was een koelvermogen van 450 W verwacht en er is ca 200 W gehaald. Het gemeten gemiddelde en piekvermogen is lager dan verwacht. Er zijn een aantal extra beproevingen uitgevoerd om te onderzoeken wat de oorzaak hiervan is. Analyse van de werking van de rechthoekige module gevuld met SiO<sub>2</sub> toonde aan dat de drukval voor de waterdamp groter was dan voorzien. De smalle doorgang voor de waterdamp bleek hier de limiterende factor te zijn. Het testen van de rechthoekige constructie met onder de absorber/condensor en boven een dubbele warmtewisselaar gevuld met SiO<sub>2</sub> heeft aangetoond dat deze uitvoering in principe goed moet kunnen werken. Op basis van deze is besloten om de leidingen die de waterdamp transporteren (inclusief vacuüm klep) te vergroten. Deze aanpassing voor de leidingen van dampdoorvoer is eenvoudig uit te voeren. Dus is het nu tijd om de TCES met Na<sub>2</sub>S te beproeven.

Daarvoor moeten nieuwe modules gebouwd worden. En hiervoor zijn ook een aantal (12) gecoate warmtewisselaars nodig om tegen de Na<sub>2</sub>S damp bestand te zijn. Ten gevolge van de Corona crises bleken de levertijden voor de onderdelen en het coaten ontzettend lang te zijn. Voor nieuwe warmtewisselaar werd een levertijd van meer dan 6 maanden aangegeven.

Om voortgang te boeken in het project is besloten om een transparant zicht model te maken, waar op eenvoudige wijze warmtewisselaars gevuld met Na<sub>2</sub>S in kunnen worden verwisseld. In deze zicht module moet dan met Na<sub>2</sub>S gewerkt worden. De warmtewisselaar met Na<sub>2</sub>S worden onder diverse omstandigheden getest, bemeten en visueel geïnspecteerd. Zie het volgende hoofdstuk 4.2.7. Dit zichtmodel is ook gebruikt voor het testen van de absorber/condensor (hoofdstuk 4.2.3)

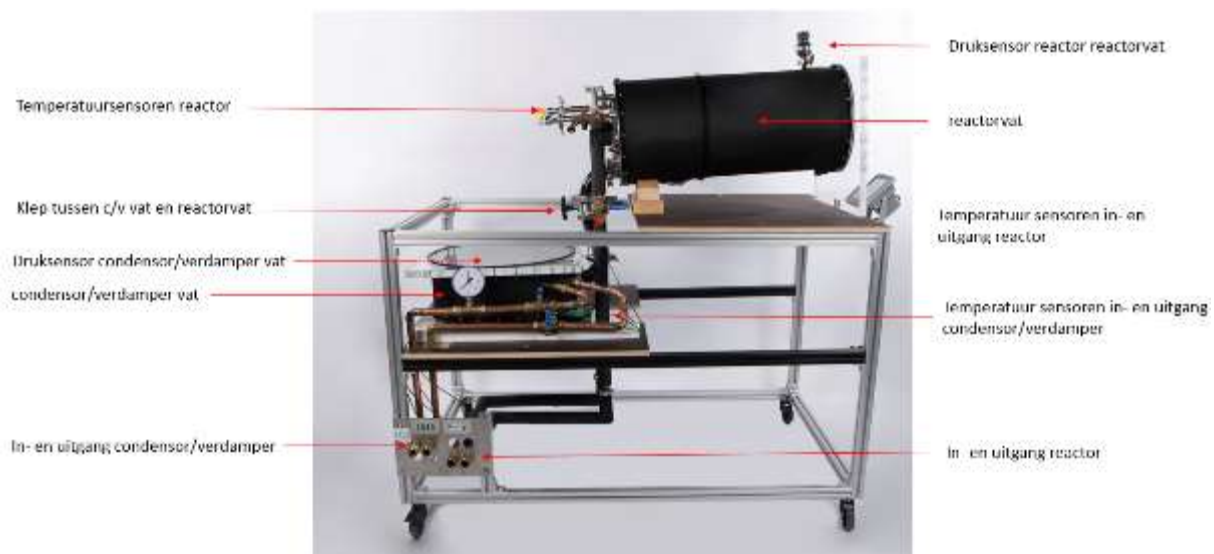


## 4.2.7 Test TCM Module

### 4.2.7.1 Inleiding

Zoals in hoofdstuk 4.2.6 beschreven is werkt het rechthoekige TCES systeem in principe prima. Teneinde voortgang in het project te maken en de lange levertijden te omzeilen is er een gedeeltelijk transparant “zichtmodel” gemaakt . Dit “zichtmodel” is geschikt om diverse warmtewisselaars gevuld met  $\text{Na}_2\text{S}$  te kunnen testen. De warmtewisselaars kunnen worden vervangen en visuele inspectie van het proces kan plaats vinden. Zie Figuur 39 voor de afbeelding van dit model.

Belangrijk hierbij is dat het vullen van de warmtewisselaars met  $\text{Na}_2\text{S}$  leidt tot de verwachte energie opslag capaciteit en het verwachte vermogen. Tijdens de uitvoering van het project is het testen van de warmtewisselaars met  $\text{Na}_2\text{S}$  onder de vacuüm condities en juiste temperaturen een lastige opgave gebleken. In de voorgaande projecten is met silicagel gewerkt omdat dit een stof is waar de eigenschappen heel goed van bekend zijn en die relatief eenvoudig ge produceren en testen is. Dat is anders voor  $\text{Na}_2\text{S}$ . Voor vullen warmtewisselaars en uitvoeren testen zijn goede veiligheidsmaatregelen noodzakelijk. Daarnaast is  $\text{Na}_2\text{S}$  een agressieve stof die gemakkelijk schade kan aanbrengen aan de module en componenten. Mede hierom is in de projectuitvoering ervoor gekozen om een “zichtmodel” te maken. Met dit transparant model is het ook mogelijk om visuele inspectie ten aanzien van dampstromingen en absorptie of desorptie van damp in de  $\text{Na}_2\text{S}$  structuren te volgen. Het zicht model is uitgerust met een absorber/condensor die over gedimensioneerd is, zodat toevoer of afvoer van de waterdamp (absorbens) niet beperkt wordt door deze capaciteit.



Figuur 39 Zichtmodel voor  $\text{Na}_2\text{S}$  testen



#### 4.2.7.2 Test resultaten

Om de werking van een Na<sub>2</sub>S warmtebatterij beter te kunnen testen is er een zicht reactor en proefopstelling gemaakt. Deze reactor zal getest worden bij optimale temperaturen voor een reactie van Na<sub>2</sub>S\*0,5H<sub>2</sub>O naar Na<sub>2</sub>S\*5H<sub>2</sub>O. De resultaten van de test zullen vergeleken worden met de systeem eisen.. Het is de bedoeling om het systeem te reguleren tussen de 600 W en 5 kW.

De opstelling bestaat uit een reactor vat en een condensor/verdamer (c/v) vat verbonden met een doorvoer en een klep zodat de 2 vacuüm kamers van elkaar afgesloten kunnen worden. De dimensies van de testopstelling en de componenten kunnen gevonden worden in [Tabel 3](#).

Er worden druk en temperaturen gemeten.

| Parameters              | Waarde | Eenheid |
|-------------------------|--------|---------|
| Massa Na <sub>2</sub> S | 0,9    | Kg      |
| Fin afstand             | 0,2    | Mm      |
| Doorvoer diameter       | 39     | mm      |
| Diameter c/v            | 470    | mm      |
| Massa water c/v         | 4,7    | L       |

Tabel 3 Dimensies TCES systeem in de opstelling.

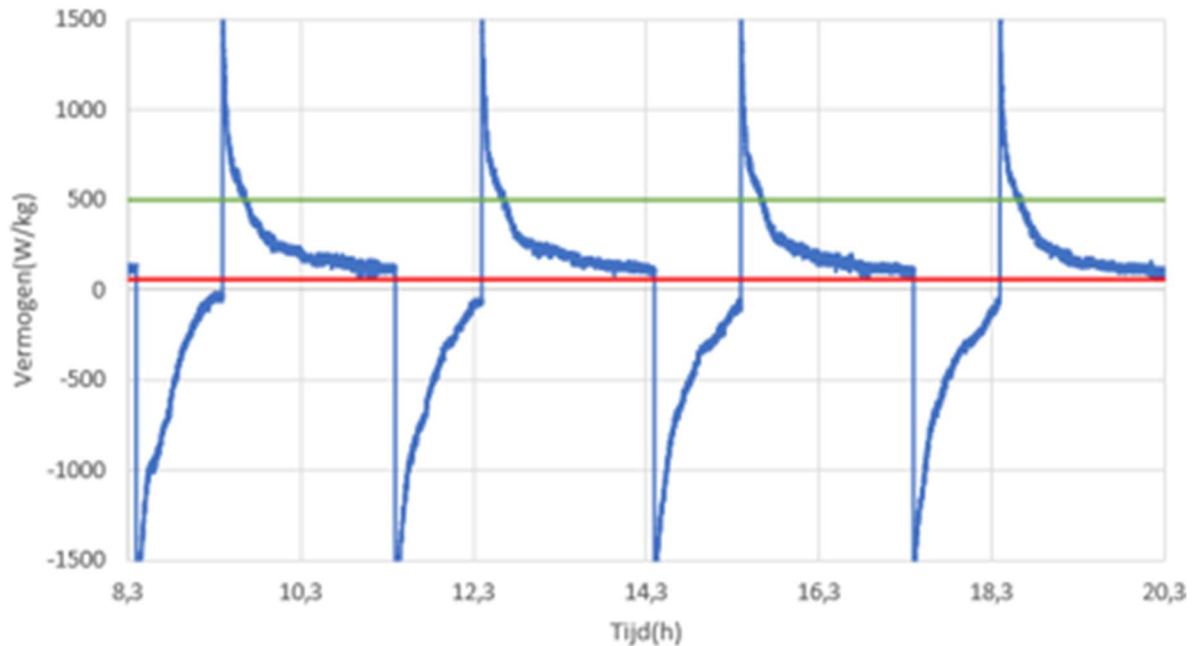
In de zichtopstelling zijn diverse metingen aan de het TCES test systeem uitgevoerd, onder verschillende gedefinieerde test condities.

| Test                  | HT/MT/LT [°C] | Flow [l/min] | Laadtijd/ontlaadtijd[h] | Aantal cycli |
|-----------------------|---------------|--------------|-------------------------|--------------|
| 1: optimale condities | 80/45/10      | 8            | 1 / 2                   | 3            |
| 2: begin zomer        | 70/59/10      | 2            | 3 / 2                   | 3            |
| 3: begin winter       | 75/48/15      | 2            | 3 / 2                   | 3            |
| 4: eind winter        | 79/58/10      | 2            | 3 / 2                   | 3            |

Tabel 4 Testcondities bij uitvoeren testen met het zichtmodel

In de reactor bevindt zich de warmtewisselaar met de Na<sub>2</sub>S. De watervoerende buizen zijn aangesloten op een thermostaatbad waarmee de warmtewisselaar verwarmd wordt of energie wordt afgenomen. De verdamer/condensor is ook aangesloten op een thermostaatbad. Hiermee kan de verdamping of condensatie geregeld worden. Tussen de 2 behuizingen bevindt zich een afsluiter om de dampstroom te regelen. In de warmtewisselaar met Na<sub>2</sub>S zijn micro thermokoppels aangebracht om de temperatuur in het Na<sub>2</sub>S te kunnen meten tijdens het proces. Er zijn voorzieningen aangebracht om het geheel op zeer lage druk te brengen. Dit wordt met de drukmeters bewaakt.

In [Figuur 40](#) is de oplaad/ontlaad cyclus voor de TCES weergegeven.



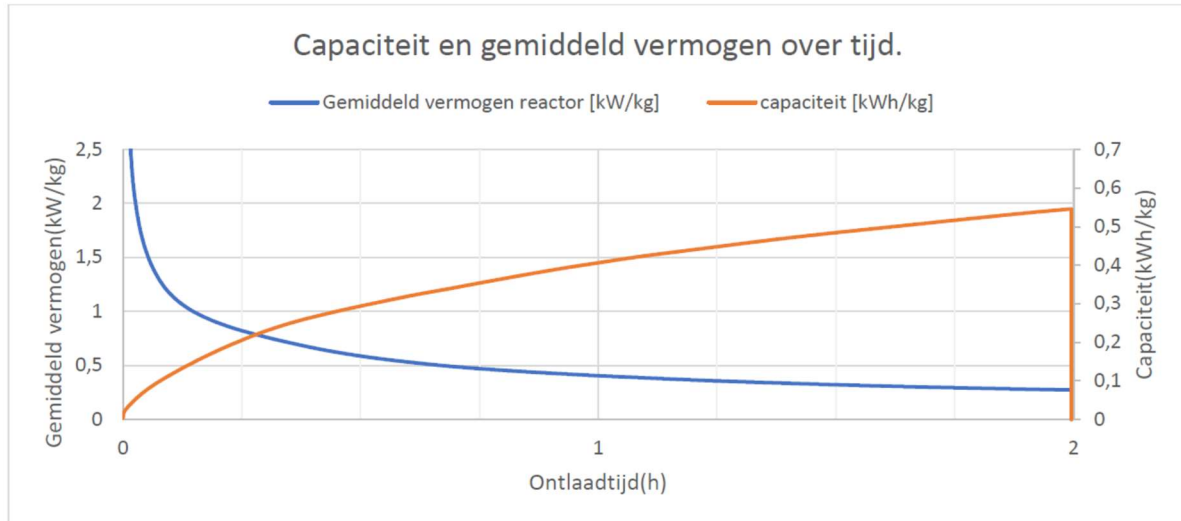
Figuur 40 Vermogen TCES bij laden/ontladen

Er is een maximale rendement van 50 % gehaald bij temperaturen 80/45/10. Bij de andere testen is er minder rendement gehaald. Uit de testen is gebleken dat er nog maar weinig vermogen wordt gehaald als het drukverschil tussen de reactor en saturatiedruk van de lage temperatuur onder de 1 mBar komt tijdens het laden en onder de 2 mBar tijdens het ontladen. Er zijn verschillende manieren om het drukverschil groter te maken.

Uit de testen is gebleken dat een lagere midden temperatuur een groter drukverschil en rendement haalt. Er is een maximale drukverschil van 4 mBar gemeten, terwijl er theoretisch een drukverschil van 11 mBar te halen is. Manieren om het drukverschil te verhogen zijn:

- MT – LT zo laag mogelijk
- Betere warmtegeleding van Na<sub>2</sub>S in de reactor
- Betere dampdoorlaat
- Klep gebruiken

In [Figuur 41](#) staat een voorbeeld van de output van de TCES. Het geleverde vermogen daalt van 2,5 kW redelijk snel naar 0,5 kW. Er wordt gedurende de onlaadtijd circa 0,5 kWh/kg uit het systeem gehaald.



Figuur 41 capaciteit en vermogen van de TCES

#### 4.2.7.3 Verdiepend onderzoek

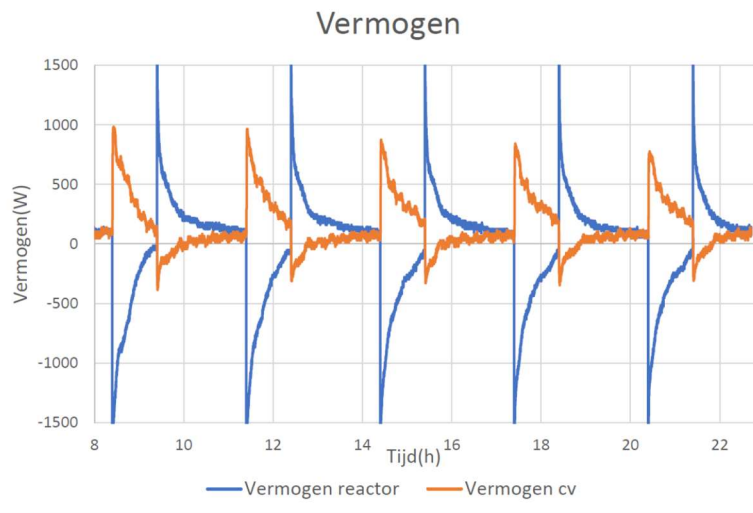
Vervolgens zijn er testen uitgevoerd met een aantal cycli achter elkaar. In de volgende tabel staat de testomstandigheden gegeven. Deze test cyclus is uitgevoerd om te bepalen of het  $\text{Na}_2\text{S}$  zwelt, het vermogen en capaciteit van het systeem..

| Test instellingen           | $\text{Na}_2\text{S}$ |
|-----------------------------|-----------------------|
| T_ontladen_Reactor          | 55 °C                 |
| T_ontladen_Verdamper        | 10 °C                 |
| T_laden_Reactor             | 80 °C                 |
| T_laden_Condensor           | 10 °C                 |
| MassFlow verdamper          | 5 L/min               |
| MassFlow Reactor            | 8 L/min               |
| V_Water                     | 4.77 l                |
| Laad tijd                   | 60 minuten            |
| Ontlaad tijd met klep dicht | 10 minuten            |
| Ontlaad tijd met klep open  | 60 minuten            |
| Aantal cycli                | 5                     |

Tabel 5 Test condities gedurende analyse werking  $\text{Na}_2\text{S}$  in warmtewisselaar



In [Figuur 42](#) is het gemeten vermogen van de reactor (warmtewisselaar gevuld met  $\text{Na}_2\text{S}$ ) en het vermogen gemeten aan de condensor/verdampers weergegeven.



[Figuur 42](#) Gemeten vermogen bij de 5 cycli

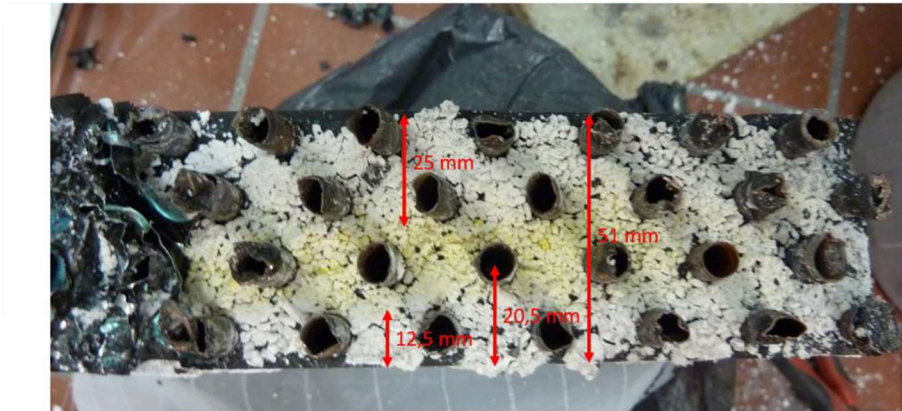
Uit is af te lezen dat de capaciteit met ongeveer 0,2 kWh per cyclus daalt. Er kunnen een aantal oorzaken zijn voor deze afname. Zoals productie van restgassen, lekkage van het vacuüm, zwellen van de  $\text{Na}_2\text{S}$  korrels tussen de warmtewisselaar vin. Analyse leert dat de belangrijkste oorzaak waarschijnlijk zit in het functioneren van het  $\text{Na}_2\text{S}$ . Daarom wordt dit nader onderzocht.

#### 4.2.7.3a $\text{Na}_2\text{S}$ functioneren

De reactor is verwijderd uit de testopstelling en doorgeslepen. Dit om de  $\text{Na}_2\text{S}$  korrels visueel te kunnen inspecteren. In [Figuur 43](#) is het  $\text{Na}_2\text{S}$  in de vin en tube warmtewisselaar te zien. Hier volgt een samenvatting van de resultaten en conclusies. Er is een groot verschil in de korrels aan de zijkanten van de vinnen en korrels in het midden. De korrels in het midden zijn geel en hebben een diameter  $< 2\text{mm}$ . De gele kleur wijst erop dat het  $\text{Na}_2\text{S} \cdot x\text{H}_2\text{O}$  is. Er zijn verschillende tinten geel wat erop wijst dat er verschillende hydratatie statussen zijn. De korrels aan de zijkanten zijn wit en veel van de korrels zijn samengeklonterd. Dit kan komen omdat er nauwelijks damptoetreding is naar het midden van de reactor. De korrels in het midden van de reactor zijn nauwelijks vervormd, terwijl de korrels aan de buitenkant van de reactor zijn ge-expandeert en samengeklonterd. Hieruit wordt geconcludeerd dat tijdens het cycleren  $\text{Na}_2\text{S}$  eerst aan de buitenkant reageert en dan expandeert.

Verder wordt geconcludeerd dat het dampdruk verschil in de reactor belangrijk is als drijvende kracht voor de absorptie. Het vermijden van extra stromingsweerstand in de reactor is noodzakelijk. Daarom wordt de stromingsweerstand van de vacuüm klep nader onderzocht.





Figuur 43 Foto van het  $\text{Na}_2\text{S}$  in de doorgesneden reactor

#### 4.2.7.3b Damptransport

In het ontwerp met de rechthoekige pannetjes is voorzien dat de het damptransport tussen absorber/condensator en de reactor via externe leidingen loopt. Deze leiding wordt voorzien van een vacuüm klep om het damptransport te regelen (aan/uit). Voor het ontwerp is het nog een vraag welke diameter de leiding moet hebben en of er 1 of meer verbindingen nodig zijn. Om dit uit te werken zijn testen met de vacuüm klep uit gevoerd aan een test reactor.

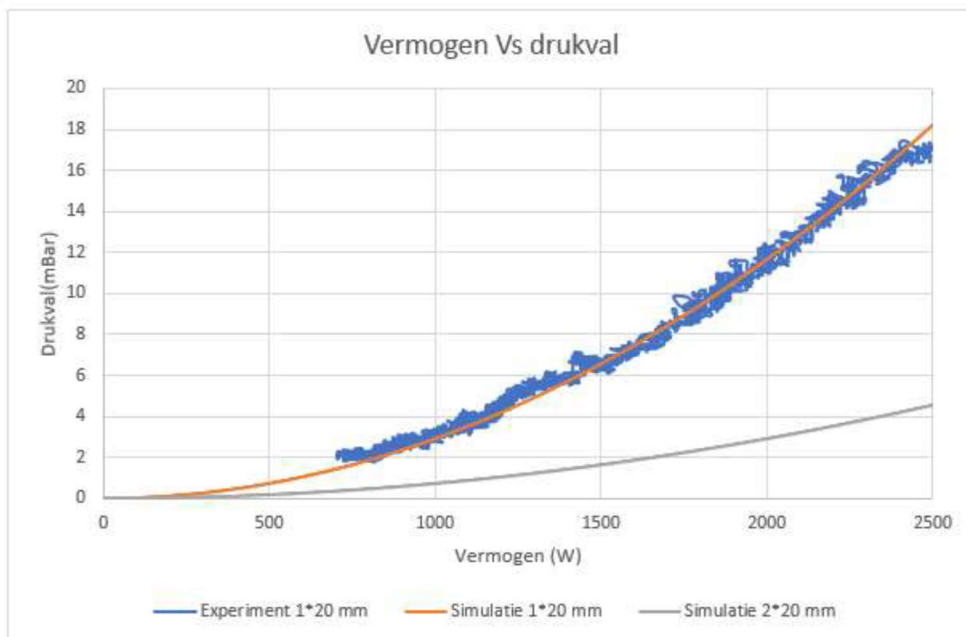


Figuur 44 Test opstelling vacuüm klep



Er is een rekenmodel opgesteld die de druk val over de klep en leidingen berekend bij het debiet. Hiervoor is de druk val over de vacuüm klep een invoer parameter. Uit de eerste vergelijking tussen metingen en berekeningen is gebleken dat stromingsweerstand van de vacuüm klep veel hoger is dan de gehanteerde uitgangswaarde.

In [Figuur 45](#) zijn de metingen en berekening uitgezet. Via de metingen is het model geverifieerd. Dit heeft geleid tot een nieuw design om minder dan 1 mbar druk val te krijgen tussen de verdamper/condensor en de reactor. Er worden nu 2 doorgangen van 20 mm tussen de reactor en condensor/verdampers geplaatst, zodat het debiet gedeeld wordt. Ook wordt het verwachte gemiddeld vermogen naar 1000 W verlaagd. Een nieuwe simulatie voorspelt een druk val lager dan 1 mBar blijft.



Figuur 45 Vermogen en druk val: berekend en gemeten



#### 4.2.8 Conclusies Ontwerp, Bouw en Test SEM module

In hoofdstuk 4.2 zijn de ervaringen en resultaten beschreven van het ontwerp, bouw en testen van de rechthoekige SEM module.

Tijdens de uitvoering van dit onderdeel van het project (WP1) zijn ervaringen opgedaan en is veel geleerd van dit traject. Een lastige factor bij de uitvoering van WP1 zijn de sociaal maatschappelijke en economische omstandigheden geweest. De impact van de corona epidemie met bijbehorende maatregelen in 2021 en 2022 hebben de projectuitvoering behoorlijk verstoord. Allerlei onderdelen bleken lastig en veel later verkrijgbaar. Daarnaast was de project voortgang lastig omdat de fysieke meetings niet of zeer beperkt mogelijk waren. Dit heeft er toe geleid dat de geplande projectactiviteiten op een geïmproviseerde wijze, in andere volgorden hebben plaats moeten vinden. In hoofdstuk 4.2 (WP1) is dit terug te zien in de opbouw van de activiteiten. Getracht is zo goed mogelijk de hoofdlijn van het project te volgen.

Ten aanzien van de SEM module gevuld met  $\text{Na}_2\text{S}$  zijn de volgende hoofdconclusies te trekken.

1. Het inzicht in het functioneren van de absorber/condensor is door toepassing van het transparante zichtmodel en inzet van de COMSOL rekentool sterk vergroot. Om effectieve warmteoverdracht te krijgen bij verdampen en condenseren is het noodzakelijk de absorber condensor slechts voor deel 2-3 cm onderwater staat. Een fin en tube warmtewisselaar kan hier goed worden gebruikt evenals een opgerolde koperbuis met voldoende diameter en lengte. Met een afgeleid ontwerpmodel zijn deze componenten te dimensioneren
2. Het COMSOL rekenmodel werkt ook goed voor de fin en tube warmtewisselaar gevuld met  $\text{Na}_2\text{S}$ . Verificatie tussen meten en berekenen heeft laten zien dat het model goed geschikt is voor een gevoeligheidsanalyse. Het berekenen van het realistisch gedrag van  $\text{Na}_2\text{S}$  korrels tussen de warmtewisselaar vinnen is slecht gelukt. Er is grote onzekerheid in de fysische en chemische parameters uit de formules die het gedrag beschrijven,  $\text{Na}_2\text{S}$  is een lastige stof om detailexperiment aan uit te voeren.
3. Voor de werkzame TCM  $\text{Na}_2\text{S}$  is een leverancier gevonden die hoge kwaliteit levert. Het vullen van de met KTL lak gecoate warmtewisselaars is complex. Naast de werkomstandigheden en veiligheid, is ook de korrelgrootte een belangrijk punt van aandacht. Een opzet voor een productie methode is gemaakt.
4. De geproduceerde rechthoekige module gebaseerd op de standard vormen van Flamco bleek niet bestand tegen het drukverschil tussen de binnenzijde (vacuüm) en de buitenlucht. Aangebrachte Versterkingsribben hebben uiteindelijk iet het gewenste resultaat opgeleverd, Met deze module zijn slecht enkele testen uitgevoerd. De vervorming en lekkage verstoorden de metingen.
5. Het transparante zichtmodel is succesvol gebruikt. Met deze opstelling zijn diverse absorber/condensor uitvoeringen getest. Tevens zijn hier verschillende fin en tube warmtewisselaars gevuld met  $\text{Na}_2\text{S}$  getest. De visuele observatie heeft inzicht opgeleverd inzake de stromingen van de waterdamp. Op basis van deze testen is de doorvoer van de module zijde waar de absorber/condensor zich bevinden naar de module zijde met de  $\text{Na}_2\text{S}$  warmtewisselaar vergroot. Er wordt nu uitgegaan van 2 doorvoeren met beide een vacuüm klep.
6. Uit de analyse van de testen is geconcludeerd dat het vullen van de warmtewisselaars met  $\text{Na}_2\text{S}$  veel beter moet worden uitgevoerd. Dit om de dampopen structuur te realiseren en het effectief gebruik van de energieopslag beter te benutten. De dimensionering van de warmtewisselaar is hierop aangepast en gedimensioneerd. Het productie proces van de korrels en het vullen wordt nader onderzocht

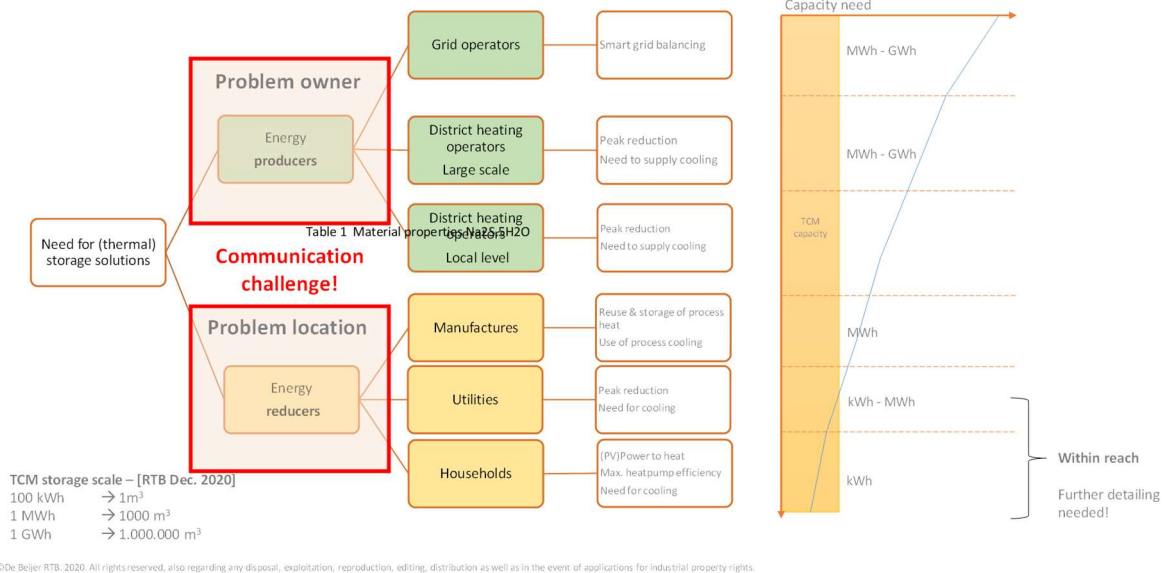


### 4.3 Integraal systeem ontwerp

Het TCES systeem dat in dit project verder wordt ontwikkeld dient ingepast te worden in de installatie van een woning of gebouw. De conceptuele inpassing in marktconforme systemen verder onderzocht. Dat heeft geleid tot de segmentatie zoals in **Figuur 46** is aangegeven.

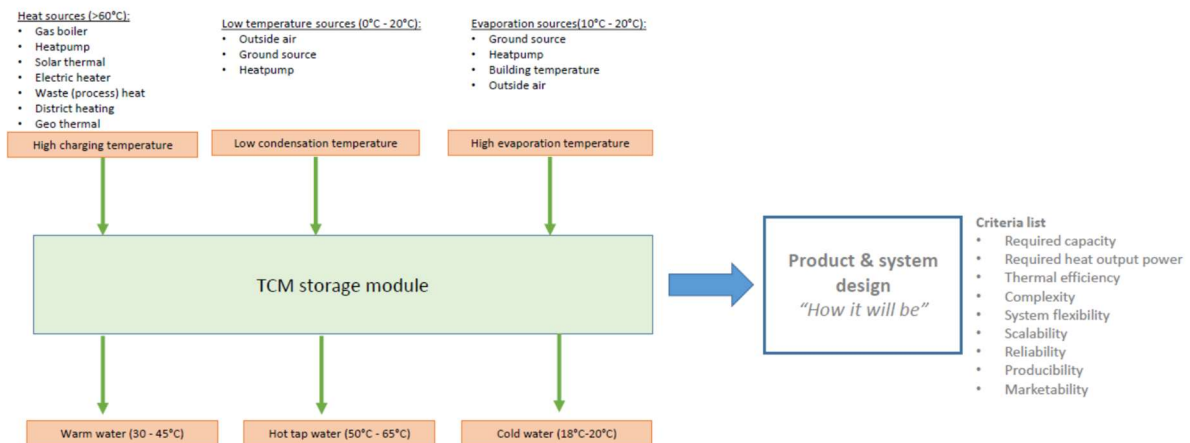
#### Market outline

“What is demanded”



**Figuur 46** Markt segmentatie voor de TCES modules

Uit de analyse is geconcludeerd dat het TCES systeem zich op de markt van woningen, utiliteitsgebouwen en kleine industrie richt. In **Figuur 47** zijn de randvoorwaarden voor toepassing van de TCES gegeven



**Figuur 47** TCES module randvoorwaarden en eisen voor inpassing

Uitgewerkt is de vraag In welke stedelijke omgevingen en systeemconfiguraties voegt de TCES het meest toe (energiek, maatschappelijk en financiële). Geconcludeerd wordt dat het TCES-systeem in ongeveer de helft van de Nederlandse woningvoorraad kan worden ingezet als deze worden opgewaardeerd naar minimaal energielabel B.. Om de Nederlandse gebouwde omgeving weer te geven, zijn drie verschillende scenario’s gecreëerd. Namelijk :Vrijstaand onafhankelijk, geschakeld



wijk (100 woningen) en een appartementencomplex (30 woningen). In elk van deze scenario's zijn varianten van verwarming/koeling systemen doorgerekend. Door middel van iteratieve modellering is de ideale TCES-systeemgrootte bepaald op circa 33 kWh voor de vrijstaande woning en circa 20 kWh voor rijwoningen en appartementencomplexen. Er wordt uitgegaan van een ontladvermogen van 9 kW en een koelvermogen van 3 kW. Een uitgangspunt hierbij is dat er voldoende oppervlakte beschikbaar is voor zonne energie en/of een andere vorm van goedkope variabele warmte beschikbaar is om het TCES-systeem op te laden.

Dit heeft geleid tot de technische omschrijving waaraan de TCES moet voldoen en hoe in te passen in een installatie. Vervolgens is basis hiervan een conceptueel ontwerp van het TCES systeem vorm gegeven. In [Figuur 48](#) is de modulaire opbouw van het TCES systeem te zien.

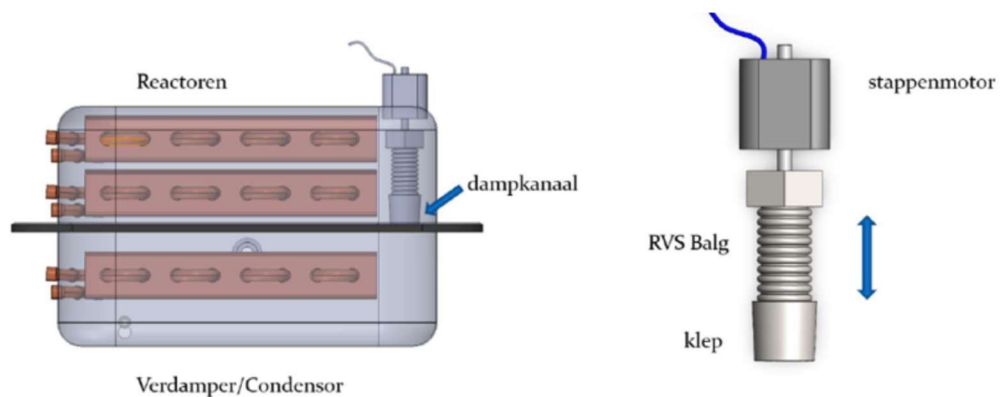
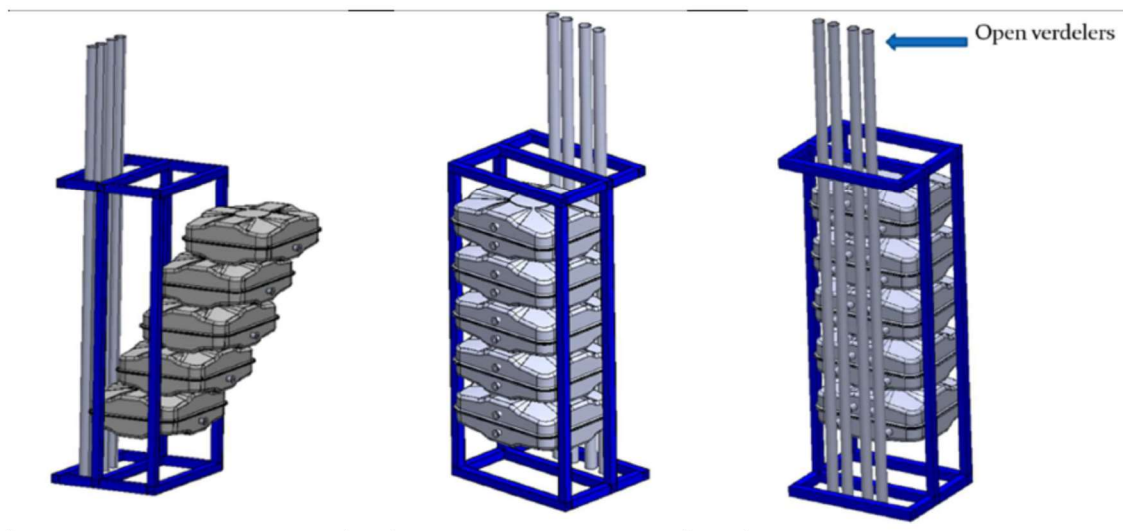


Figure 5.1 The modular heat battery.



Figuur 48 De ontworpen TCES. Als modulair systeem

De volgende systeem integraties zijn verder ontwikkeld in de vorm van integratie schema en de bijbehorende regelstrategieën:





#### Systeem functies van het TCES systeem

- Laden van systeem met diverse hulpbronnen
- Ontladen: Ruimte verwarming
- Ontladen: Tap water verwarming
- Ontladen: Koeling

De TCES wordt ingepast in de volgende systeem configuraties:

Installaties voor woningen, utiliteitsgebouwen en kleine industrie:

- Water/water warmtepomp + drycooler
- Water/water warmtepomp + grondbron
- Water/lucht warmtepomp + WTW + drycooler
- Water/lucht warmtepomp + WTW + grondbron
- Warmtenet + drycooler
- Warmtenet + grondbron

Het TCES systeem wordt aangesloten op een grondbron of drycooler om de absorber/condensor te voeden. Voor deze verschillende systemen zijn de diverse van toepassing zijnde PI&D regeling ontworpen. De belangrijkste parameters bij de regeling zijn de volgende.

Bij het laden van de TCES zijn de volgende randvoorwaarden in de systeem regeling ingevoerd. De evenwichtstemperatuur voor opladen tot  $\text{Na}_2\text{S} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  is gelijk aan  $55,8^\circ\text{C}$ , de evenwicht temperatuur voor opladen tot  $\text{Na}_2\text{S} \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$  is  $63,4^\circ\text{C}$ . Met een inlaattemperatuur van de condensor/evaporator van  $10^\circ\text{C}$  en een inlaattemperatuur voor de TCES module van  $80^\circ\text{C}$  kan het systeem geladen tot  $\text{Na}_2\text{S} \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ . Om een goed laadvermogen te hebben is de  $80^\circ\text{C}$  nodig. Echter hoger dan  $80^\circ\text{C}$  wordt door de regeling voorkomen om ervoor te zorgen dat de  $\text{Na}_2\text{S}$  niet vloeibaar wordt en uit de warmtewisselaar loopt. Als het temperatuurverschil tussen de inlaad temperatuur van de reactor en condensor/evaporator kleiner wordt dan stopt de reactie van het “drogen” van de  $\text{Na}_2\text{S}$  heel gemakkelijk. Bij het ontladen van TCES spelen de volgende aspecten. Om de juiste temperatuur voor ruimteverwarming of tapwaterverwarming met een TCES te verkrijgen, moet er warmte worden geleverd aan de condensor/evaporator. De minimale inlaattemperatuur hiervoor is circa  $7,5^\circ\text{C}$ . De maximaal bereikbare output temperatuur van de reactor temperatuur voor ruimte- of tapwateropwarming is maximaal de inlaattemperatuur van de condensor/evaporator plus  $55,8^\circ\text{C}$ .

Het SWEKOS 2 systeem zal bestaan uit 5 modules en bevat  $7,5\text{kg Na}_2\text{S}$  en heeft een theoretische energiec capaciteit van  $7,95\text{kWh}$ . Het gemiddelde vermogen aan de reactorzijde is  $3750\text{W}$ , terwijl de gemiddeld condensor/evaporator-vermogen  $2500\text{W}$  is. Het totale SWEKOS 2-systeem kan er maar één functie tegelijkertijd uitvoeren: laden, ruimteverwarming, tapwaterverwarming of ruimtekoeling. De afmetingen van een TCES-module zijn  $1000\text{ mm} \cdot 1200\text{ mm} \cdot 1000\text{ mm}$ .

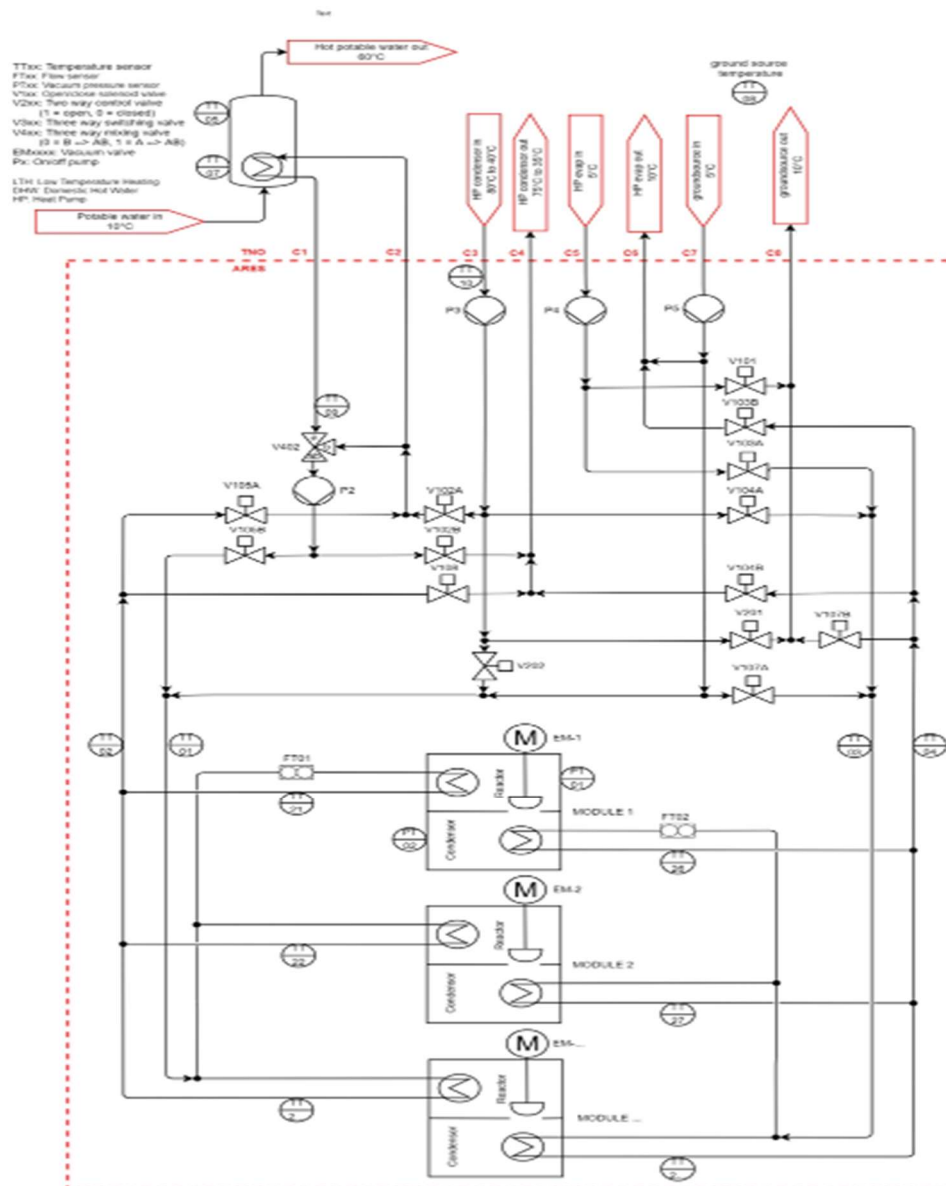




De volgende mogelijke scenario's voor integratie van een Na<sub>2</sub>S-sorptiesysteem in een huis/gebouw verwarming en koeling zijn beschreven. Er wordt gekeken naar de volgende systemen:

- Systeem 1A: Na<sub>2</sub>S-sorptiesysteem, verwarmingsnet en droge koeler.
- Systeem 1B: Na<sub>2</sub>S-sorptiesysteem, verwarmingsnet en bodembron.
- Systeem 2A: Na<sub>2</sub>S-sorptiesysteem, water/water-warmtepomp en droge koeler.
- Systeem 2B: Na<sub>2</sub>S sorptiesysteem, water/water warmtepomp en warmte/koude opslag.

Het systeem 2B: Na<sub>2</sub>S sorptiesysteem, water/water warmtepomp en warmte/koude opslag is economisch en technisch meest haalbaar geacht. Het systeem maakt gebruik van een op de grond gebaseerd warmte/koude opslag die het hele jaar door temperaturen rond de 10°C kan leveren. De warmtepomp kan betrouwbaar temperaturen leveren aan de reactor van 80°C met 10°C aan de verdamper. In [Figuur 49](#) is de systeem integratie weergegeven.



Figuur 49 Systeem integratie water/water warmtepomp met grondbron en TCES



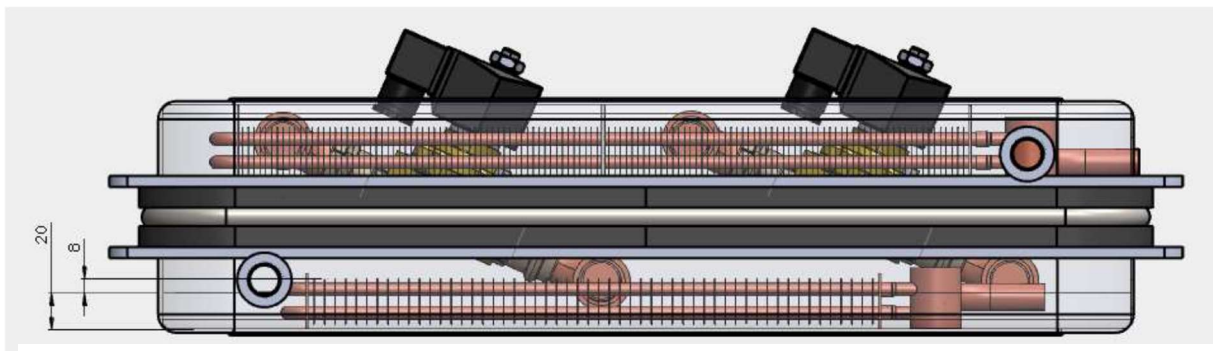
## 4.4 Ontwerp en bouw marktconform model

### 4.4.1 Integraal Ontwerp TCES

Op basis van de resultaten zoals gegeven in hoofdstuk 4.2 is het ontwerp van de sorptie energie module bijgesteld. In [Figuur 50](#) is de uitgewerkte artist impressie te zien en in [Figuur 51](#) de doorsnede van de module met de dubbel warmtewisselaars gevuld met  $\text{Na}_2\text{S}$  in het bovenste deel en absorber condensor in het onderste deel.



Figuur 50 artist impressie Sem (onderdeel TCES)



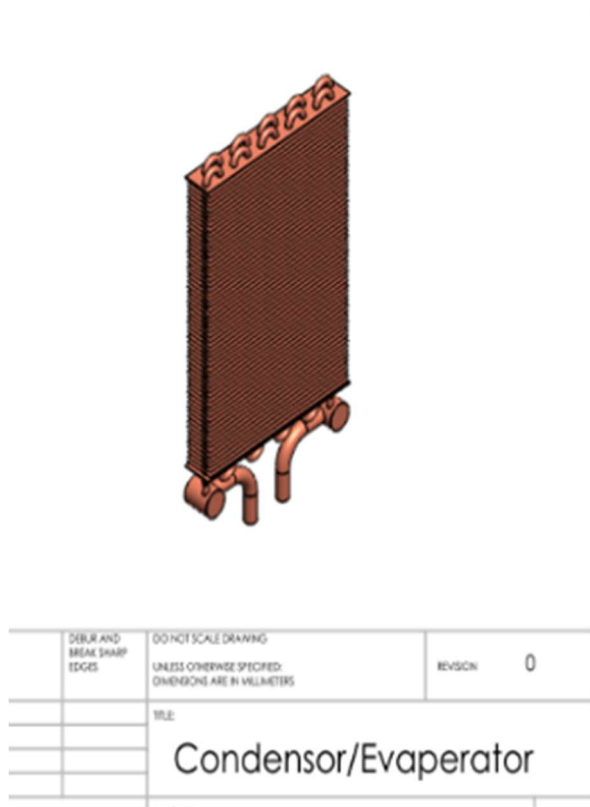
Figuur 51 Dwarsdoorsnede Sorptie Energie Module van de TCES

De testresultaten aan de test reactor zoals in hoofdstuk 4.2 zijn vermeld hebben tot aanpassingen in het ontwerp geleid. De warmtewisselaars voor de absorber/condensor en de warmtewisselaars voor het opsluiten van de werkstof  $\text{Na}_2\text{S}$  zijn anders gedimensioneerd.

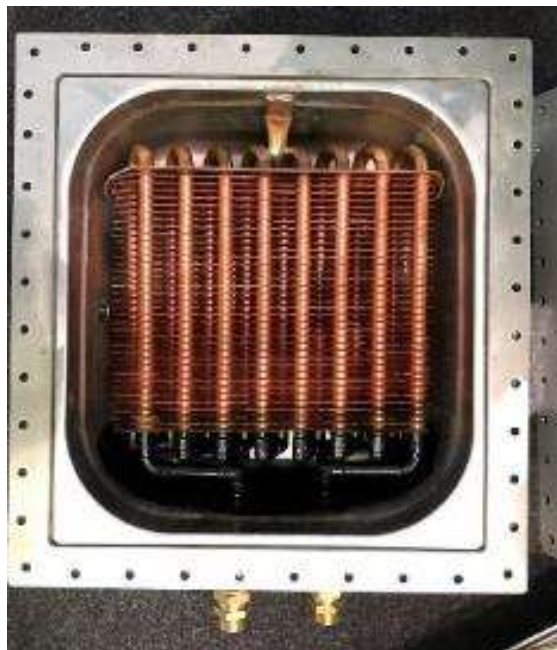
Dit heeft geleid tot het ontwerp van de absorber/condensor gebaseerd op de fin en tube warmtewisselaar die commercieel verkrijgbaar zijn.



In [Figuur 53](#) is de onderste helft van de module weergegeven. De warmtewisselaar voor de absorber/condensator heeft twee doorvoeren naar buiten voor aansluiting op de installatie.



[Figuur 52](#) Warmtewisselaar verdamper/condensator

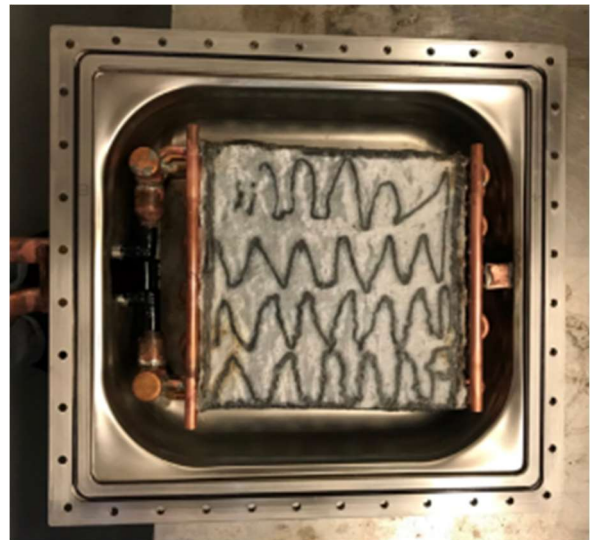


[Figuur 53](#) Onderste module met de absorber/condensator

Uit de testen is geleerd dat de zogenaamde penetratiediepte van de absorbens (waterdamp) in de  $\text{Na}_2\text{S}$  tussen de vinnen in de warmtewisselaar niet groot genoeg was. Hierdoor wordt de energie opslag capaciteit maar voor een beperkt deel benut. Daarom is de zogenaamde bedhoogte in het nieuwe ontwerp gehalveerd. Dat leidt tot de commercieel verkrijgbare warmtewisselaar zoals die wordt weergegeven in [Figuur 52](#).



Figuur 54 Warmtewisselaar voor de Na<sub>2</sub>S

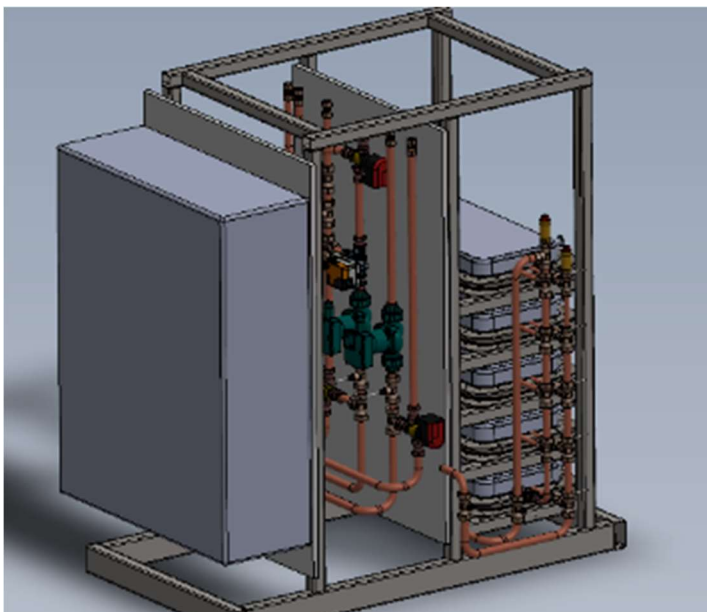


Figuur 55 Bovenste module warmtewisselaar gevuld met Na<sub>2</sub>S en mesh

In [Figuur 55](#) is de bovenste helft van de SWeKOS module uitgerust met de warmtewisselaar gevuld met Na<sub>2</sub>S te zien. Rondom de buitenkant van de warmtewisselaar is een mesh aangebracht om te voorkomen dat de korrels Na<sub>2</sub>S er uit vallen.

De twee helften van de module worden met een rubber afdichtring gemonteerd. Tussen de onderste helft en bovenste helft zit een dampdichte metalen plaat. Er worden twee verbindingen tussen de onderste helft en de bovenste helft gemaakt, uitgerust met 2 vacuüm kleppen. Hiermee kan het laden en ontladen worden geregeld. Bij dichtzetten van de kleppen kan de opgeslagen energie nagenoeg zonder verliezen worden bewaard.

Voor de besturing van de TCES is een P&ID regeling ontworpen, gebouwd en getest.



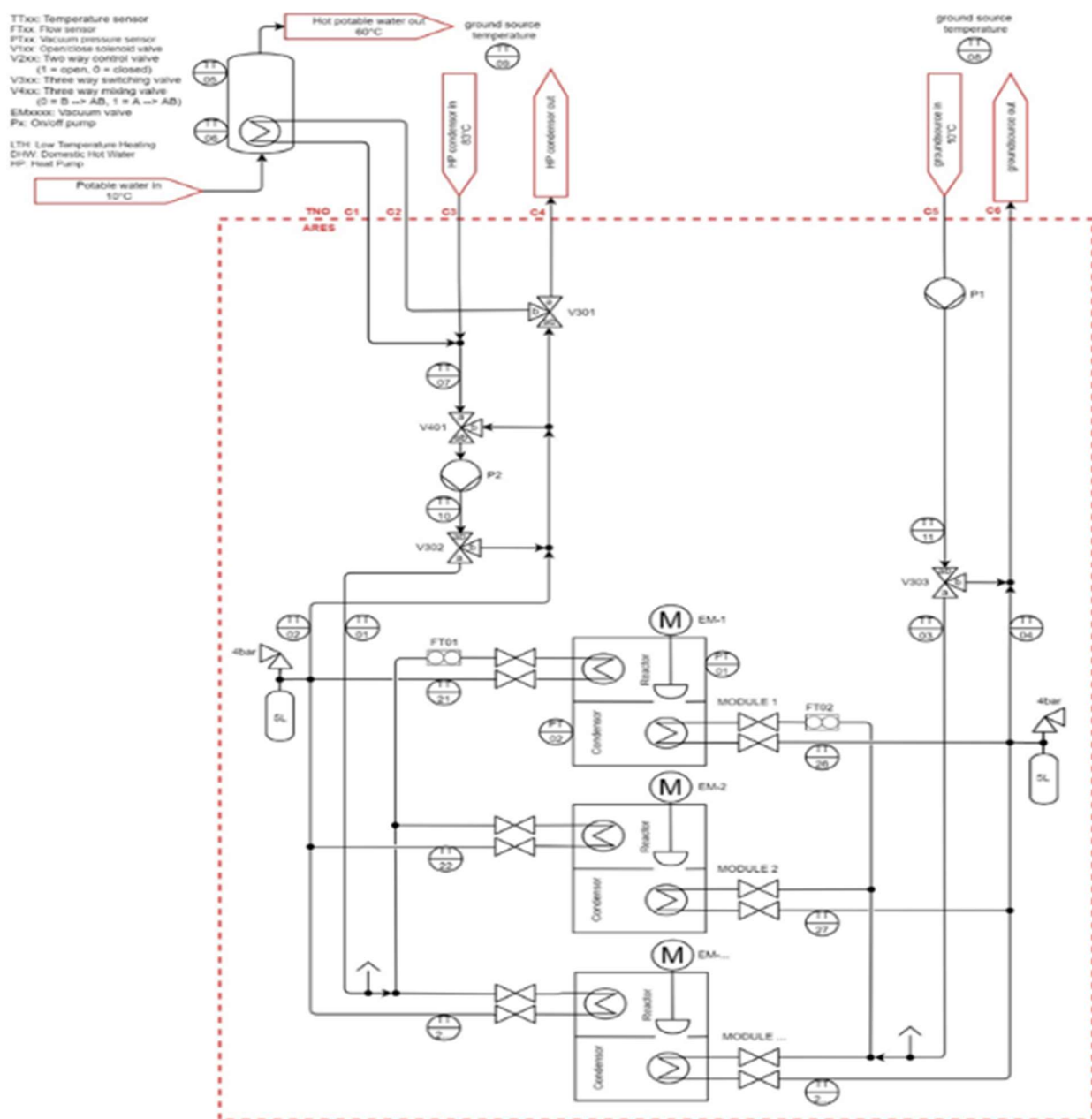
Figuur 56 Het complete SWeKOS2 systeem, geplaatst in een skid.

Van de aldus ontworpen modules zullen een aantal (3-5) worden geproduceerd. Dit voor het beproeven in de testopstelling bij RTB de Beijer en het testen in de emulator bij TNO. Hier volgen een aantal foto's van het produceren van de modules. Het totale systeem ontwerp is in [Figuur 56](#) te zien. In deze figuur is aan de linkerzijde de kast met regeling en sturing te zien. In het midden de kleppen, leidingen en appendages (met open verdeler) en aan de rechterzijde de modules. Door deze opbouw in een skid kunnen 1-10 modules worden geplaatst. Dit zorgt voor de flexibiliteit van de energie opslag capaciteit.



#### 4.4.2 De regeling

Op basis van de toepassing en gebruik van het TCES systeem is het stroomschema uit figuur xx opgesteld. In de test wordt uitgegaan van de functies verwarming, koeling en warm tapwater. De energiebronnen hiervoor zijn de warmtepomp en bronkoeling. De modules zijn via de open verdeler parallel geschakeld. Op basis van vraag en aanbod wordt het TCES systeem geladen of ontladen. Bij het ontbreken hiervan (dus geen vraag of aanbod wordt de vacuüm klep gesloten om de energie te bewaren. Deze regelstrategie in combinatie met de gewenste en maximale temperatuur niveau is in een P&ID regeling ingebouwd. In is de opzet en uitwerking van het controle en regelsysteem uitgebreid beschreven



Figuur 57 Het stroomschema van de regeling voor het SWeKOS 2 systeem





#### 4.4.3 Realisatie fase

Zoals in de voorgaande hoofdstukken is beschreven is het ontwerp nu in detail gereed.

De volgende processtappen worden doorlopen

- Stap 1. Lassen staaldelen
- Stap 2. Proef monteren delen en lekdichtheid testen
- Stap 3. Demonteren en opsturen naar coaten.

Resultaat coating proces:

- Sommige delen zijn beschadigd
- Sommige delen zijn niet goed gecoat door slechte kwaliteit pan (roest) en silicone vet)
- Tijdens de handling zijn delen van de warmtewisselaar beschadigd.
- : lijst met delen die zijn gecoat

| naam                                   | aanvraag op      | type |
|----------------------------------------|------------------|------|
| 25mm Heat Exchanger 3mm- 0.2mm         | 28-6-2022 16:00  | PDF- |
| Aluminium tussenplaat                  | 15-12-2022 12:06 | PDF- |
| Binnenring                             | 15-12-2022 12:06 | PDF- |
| Buitenring                             | 15-12-2022 12:06 | PDF- |
| CV vanafstand 5.00 V2-samengevoegd (1) | 28-6-2022 16:00  | PDF- |
| Flamo pan tussenplaat                  | 15-12-2022 12:06 | PDF- |
| Knie Coating 4x                        | 28-6-2022 16:00  | PDF- |
| Pan Flens samenstelling                | 15-12-2022 13:22 | PDF- |
| Schroefdraad koppeling 4x              | 28-6-2022 16:00  | PDF- |



Figuur 58 gecoate warmtewisselaar



Figuur 59 Beschadiging

Figuur 60 Onderdelen lijst van gecoate onderdelen'

De warmtewisselaars zijn ingekocht en worden van een de KTL coating voorzien door een externe leverancier. Ook de andere onderdelen die aan Na<sub>2</sub>S blootgesteld kunnen worden van een KTL coating voorzien, zie de onderdelenlijst in [Figuur 60](#).

De beschadiging worden achteraf bijgewerkt.

Vervolgens worden de 2 warmtewisselaars gevuld met de Na<sub>2</sub>S korrels.



De gevulde warmtewisselaars met  $\text{Na}_2\text{S}$  in [Figuur 61](#) en [Figuur 62](#) weergegeven



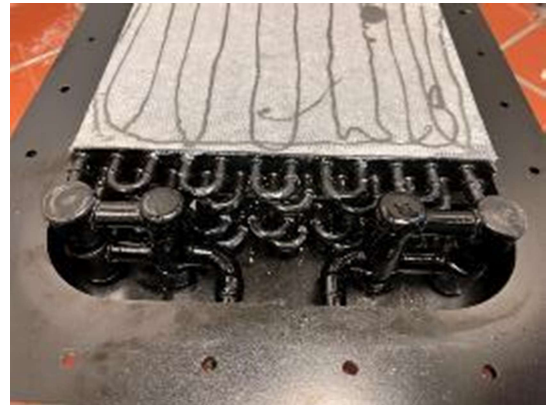
Figuur 62 Vullen warmtewisselaar



Figuur 61 Eindresultaat met  $\text{Na}_2\text{S}$  gevuld

De absorber/condensor en de gevulde warmtewisselaars worden vervolgens in de respectievelijk de onderste en bovenste module ingebracht. In [Figuur 63](#) zijn de 2 warmtewisselaar met  $\text{Na}_2\text{S}$  duidelijk te zien. Ook zijn de verbonden headers van de warmtewisselaar goed zichtbaar evenals de 2 buizen die naar buiten worden gevoerd.

Vervolgens zijn de twee rechthoekig bakken met tussen plaat en rubber afdichtring samengebouwd. Nu kan het systeem gevacumeerd worden.



Figuur 63 Warmtewisselaar met  $\text{Na}_2\text{S}$  in de bovenste rechthoekige bak ingebracht



#### 4.4.4. Systeem studie

Binnen de scope van het Swecos-2 project wordt een thermochemische warmteopslag ontwikkeld voor toepassing in de gebouwde omgeving. In Systeemstudie warmteopslag worden twee gebruikstoepassingen (use cases) van energieopslag in de residentiële gebouwde omgeving uitgewerkt, die richting dienen te geven aan de uit te voeren dynamische systeemtesten en ontwikkeling van het markt systeem.

Er worden 2 use case uitgewerkt in deze samenvatting,

##### **Use case 1: zelfconsumptie van PV overschot**

##### **Use case 2: Het leveren van piekvermogen in een stadsverwarmingssituatie**

Beide use-cases zijn op hoofdlijnen onderzocht op de rol van warmteopslag. Het doel van het onderzoek is om trends en hoofdlijnen te onderzoeken om een uitspraak te kunnen doen over de rol van opslag in een verliesvrije warmtebatterij (thermochemische batterij) voor de genoemde use-case, en om op basis hiervan een keuze te kunnen maken voor de uit te voeren dynamische systeemtesten.

##### **Onderzoek Use case 1**

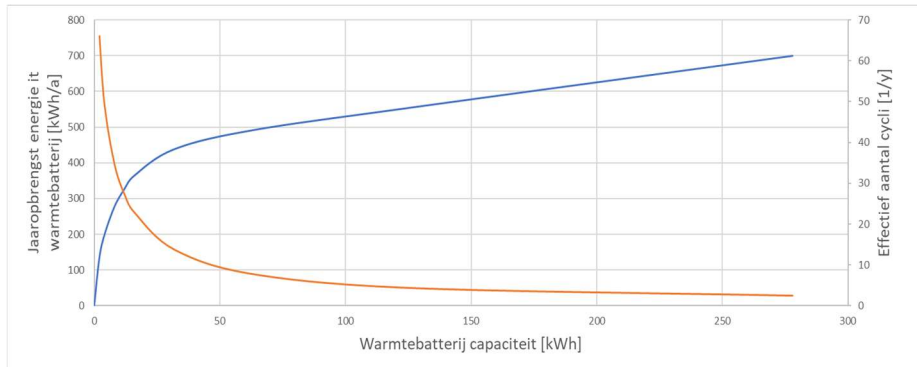
Het onderzoek naar de verliesvrije warmtebatterij (thermochemische batterij) is uitgevoerd op basis van de volgende aanpak:

- eigen opgewekte PV stroom wordt eerst ingezet voor eigen gebruik voor elektra
- -wanneer er hierna nog PV stroom over is, wordt hiermee (extra) warmte gegenereerd met de warmtepomp, die wordt opgeslagen in de warmtebatterij. Omdat dit altijd op hogere temperatuur zal gebeuren (ca. 55 °C – 80 C) is hiervoor een COP van 2 aangehouden, net als voor tapwaterproductie.
- wanneer er warmtevraag is, wordt eerst gekeken of er PV stroom beschikbaar is. Wanneer deze er niet is, wordt eerst de warmte uit de warmtebatterij gebruikt. Wanneer deze leeg is, wordt elektriciteit uit het net gebruikt. Omdat de warmte is opgewekt met een COP van 2, wordt de warmtebatterij primair ingezet voor het leveren van warmtapwater.
- Tevens is aangenomen dat een warmwaterboilervat van 200 liter aanwezig is, dat altijd éérst wordt geladen voordat de warmtebatterij wordt geladen.

De beschikbaarheid van PV stroom, de elektriciteitsbehoefte van de woning en het warmtapwatergebruik worden vervolgens uurlijks berekend, en op basis van de uitkomst wordt de batterij geladen of ontladen.

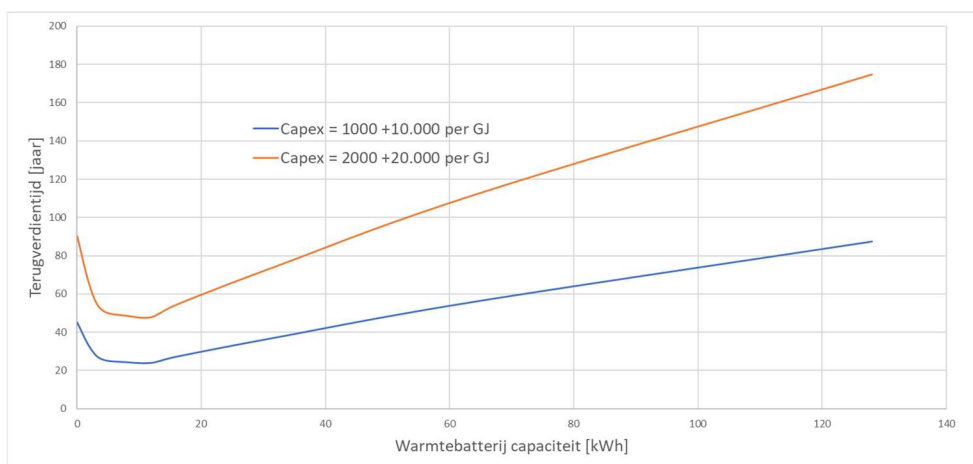


In **Figuur 65** wordt de impact van de inzet van de warmtebatterij getoond afhankelijk van de grootte van de batterij. **Figuur 65** toont hoe de energieopbrengst uit de batterij sterk afhangt van de opslagcapaciteit. Tot ongeveer 16 à 25 kWh neemt de opbrengst snel toe met groter wordende batterij, daarna neemt de opbrengst nog maar langzaam toe. Dit uit zich ook in het aantal keer dat de batterij effectief geladen en ontladen wordt: 34 x bij een batterij van 8 kWh, bij een batterij van 16 kWh is dat nog 23 x per jaar, afnemend tot ongeveer 2x per jaar voor een batterij van 278 kWh (1 GJ). Dit heeft gevolgen voor de economische haalbaarheid: hoe minder cycli per jaar een opslagsysteem maakt, hoe minder rendabel het systeem is.



**Figuur 65** Eenvoudige terugverdientijd van een warmtebatterij voor twee verschillende scenario's van kapitaalinvestering. De optimale afmeting van de batterij is in dit scenario 12 -16 kWh.

Dit verband wordt weergegeven in **Figuur 64**, waarin de eenvoudige terugverdientijd van een warmtebatterij is gegeven als functie van de opslagcapaciteit. Omdat de kapitaalinvestering in een warmtebatterij nog niet nauwkeurig bekend is, is de berekening is gemaakt voor twee varianten. Uitgegaan is van het scenario dat er geen terugleververgoeding aan het elektriciteitsnet wordt verkregen, en dat alle extra PV opbrengst die via het warmtebatterijsysteem wordt opgeslagen en gebruikt een netto opbrengst is. Er is gerekend met een tarief van EUR 0,40 per kWh voor de afgenomen warmte uit de warmtebatterij. In is te zien dat er een optimum is in de afmeting van de warmtebatterij. Dit optimum ligt bij de gekozen uitgangspunten bij 12 – 16 kWh.

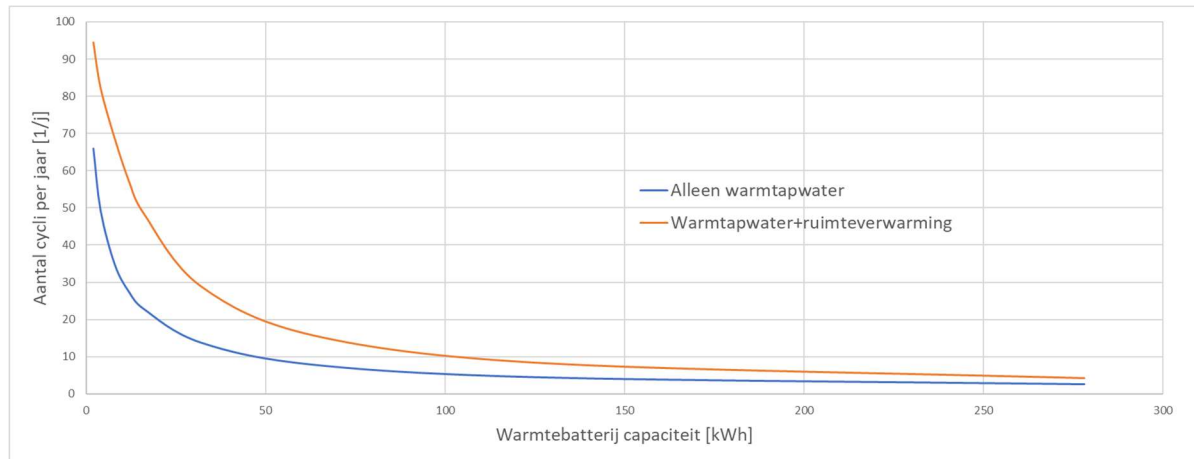


**Figuur 64:** Jaaropbrengst energie uit de warmtebatterij (blauw, linker as) en effectief aantal laad/ontlaad cycli per jaar (oranje, rechteras) als functie van de grootte van de warmtebatterij in kWh(th).



### Impact van levering van ruimteverwarming bij use case 1

De werking van de batterij is in eerste instantie onderzocht voor gebruik voor warmtapwaterverwarming, omdat deze behoefte gedurende het gehele jaar aanwezig is. De invloed van het tevens leveren van ruimteverwarming is onderzocht door dezelfde berekeningen uit te voeren met een gecombineerd vraagprofiel ruimteverwarming + warm water



Figuur 66 Aantal cycli per jaar van de warmtebatterij voor warmtapwater (blauw) en voor zowel tapwater als ruimteverwarming (oranje).

Door het toegenomen aantal cycli verbetert ook de economische haalbaarheid van het systeem.

De eenvoudige terugverdientijd wordt met ruim een factor 2 verkort als ook ruimteverwarming wordt geleverd. Het optimum ligt bij een opslagcapaciteit van ca. 16 kWh.

### Onderzoek Use case 2

Het onderzoek naar de toepassing van een verliesvrije warmtebatterij (thermochemische batterij) voor stadsverwarming is uitgevoerd op basis van de volgende aanpak:

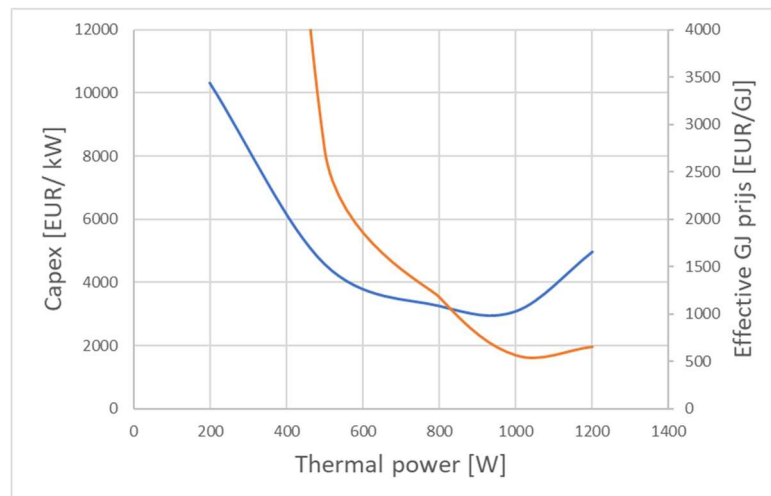
Er is een piekvraag van 3,3 kW per woning. Vervolgens is een warmtebatterij vermogen gedefinieerd en onderzocht op toepassing.

De batterij moet enerzijds groot genoeg zijn om gedurende een voldoende tijdsduur het batterijvermogen te leveren, anderzijds moet er ook tijd zijn om de batterij te laden. Bij elk onderzocht vermogen van de batterij (in de range van 200 – 1200 Watt) is met het model onderzocht wat de opslagcapaciteit van de batterij moet zijn om dit vermogen ook daadwerkelijk te kunnen leveren tijdens het aantal uren dat dit vermogen wordt gevraagd. Uit de analyse volgt dat bij een batterij groter dan 1000 Watt de benodigde energieopslagcapaciteit snel toeneemt. Het aantal keer dat de batterij wordt ingezet ligt afhankelijk van de grootte van de batterij tussen de 1 en 4 keer per jaar. De batterij levert dus maar een beperkte hoeveelheid energie. Er is een optimum bij een afmeting van 1 kW/ 15 kWh per woning.

Use case 2 richt zich op uitsluitend pieklastlevering voor ruimteverwarming, omdat bij warmtenetten de pieklastvraag voor ruimteverwarming groter is dan voor warmtapwater (bij warmtenetten met meer dan 40 woningaansluitingen).



Een indicatieve economische verkenning is uitgevoerd op basis van een raming van een investering in een warmtebatterij van EUR 20.000 per GJ en vaste installatiekosten van EUR 2.000. **Figuur 67** toont de berekende prijs per kW en per GJ, waarbij voor de GJ prijsberekening een levensduur van 30 jaar is aangenomen.



**Figuur 67:** Kapitaalinvestering (blauw, linkeras) van een pieklastbatterij, en effectieve GJ prijs berekend als LCOE over een periode van 30 jaar (oranje, rechteras), als functie van het vermogen.

De kapitaalinvestering van de batterij bedraagt minimaal 3.000 EUR/kW. Ter vergelijking, voor een pieklastketel is dit ca. EUR 100 /kW. De effectieve prijs van de geleverde warmte (LCOE) bedraagt tenminste EUR 560 / GJ, onder de aanname dat er geen kosten verbonden zijn aan de geladen warmte en onder de aanname dat de levensduur van de batterij 30 jaar is. Op dit moment bedraagt de GJ prijs voor een consument ca. EUR 50 per GJ geleverde warmte. Dit betekent dat deze vorm van pieklastvoorziening economisch niet haalbaar is. Voor de toepassing van een TCES bij stadsverwarming zijn kansen als de TCES in de zomer als thermochemische warmtepomp wordt ingezet om koude te leveren. Op deze wijze kan de TCES voor pieklasten in de winter worden ingezet en voor comfort koeling in de zomer

De use-case met de beste economische haalbaarheid is opslag van zelf-opgewekte PV stroom in een situatie dat daar geen terugleververgoeding voor wordt ontvangen. Een warmtebatterij van ca. 16 kWh is economisch optimaal. Hiermee wordt ca. 400 kWh/a aan PV stroom opgeslagen, welke dus niet wordt terug geleverd aan het net. Deze energie wordt ingezet op dagen met te weinig zon-PV aanbod, waardoor de inzet van de warmtepomp wordt beperkt. Deze batterij maakt ongeveer 20 -25 equivalente laad/ ontladcycli per jaar. Dit scenario zal worden ingezet voor de dynamische systeemtesten van het SWeKOS systeem.





## 4.5 Testen full scale systeem

### 4.5.1 Compleet systeem

Op hoofdstuk 4.4.3 zijn de onderdelen van de SWeKOS2 module beschreven, Nu de componenten gereed zijn wordt het systeem geassembleerd. De leidingen van de warmtewisselaars worden gesoldeerd en de doorvoer door de schalen wordt gelast. In [Figuur 68](#) is de complete module gepresenteerd. De geproduceerde module wordt vervolgens in de vacuüm test opstelling gecontroleerd op het langdurig in stand houden van het vacuüm. Hiervoor wordt een helium lektester gebruikt.



Figuur 68 Samengebouwde module aangesloten op de vacuüm test installatie

De testopstelling voor het beproeven de TCM module wordt bij RTB de Beijer gebouwd. Deze bestaat uit:

- Hydraulische circuit met aansluitingen voor laden, ontladen en afname warmte en/of koude
- Regel elektronica met flexibel instelling voor de setpoints
- Regel interface (HMI), waar de instellingen kunnen worden ingevoerd.

In [Figuur 70](#) zijn de regelcircuits voor het testen van de TCM-energie opslag gepresenteerd en



Figuur 70 Installatie voor de TCES



Figuur 69 Verdelingsheader, over meerdere modules



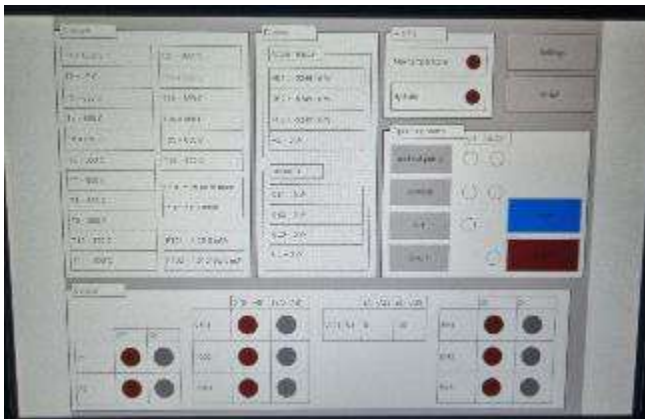
In [Figuur 69](#) zijn de details van de zogenaamde verdelingsheader te zien. Via deze verdelingsheader worden verschillende modules aangestuurd. In [Figuur 72](#) is de kast met de regelektronica afgebeeld en in [Figuur 71](#) is de voorzijde van de regelkast te zien inclusief de user interface (HMI). Tenslotte is in [Figuur 73](#) is het user interface goed zichtbaar.



[Figuur 72](#) Kast met regel en stuur elektronica



[Figuur 71](#) Voorzijde elektronica met HMI



[Figuur 73](#) Interface voor de aansturing regeling modules

Een aantal modules zijn nu gereed en zullen als eerste in het eigen lab worden getest. Bij positieve commissioning zullen de modules in de emulator bij TNO geplaatst worden. De regelstrategie in combinatie met de regelinstallatie zijn geschikt gemaakt om in de emulator aan de geformuleerde testen te worden onderworpen. Het regelsysteem voor het testen van het TCES systeem in de emulator is beschreven. Dit is samengevat in hoofdstuk 4.5.2. De opzet en werking van de emulator staat in hoofdstuk 4.5.3 beschreven.



#### 4.5.2 Regel en stuur systeem voor de emulator

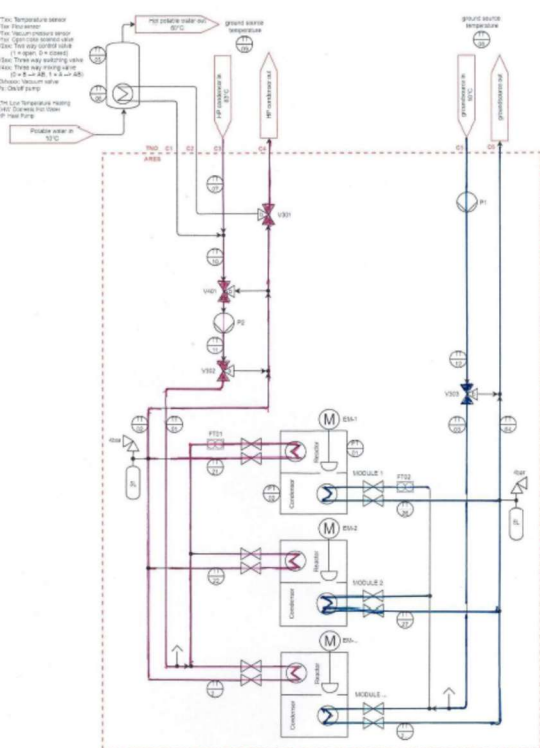
Het regel en stuursysteem voor de TCESIS uitvoerig en gedetailleerd beschreven. Dit regel en stuursysteem is toegesneden voor de testen in de emulator i

Het TCES systeem wordt gevoed door een warmwaterbron van circa 80°C en een koud waterbron van circa 10°C. Er is een buffervat toegevoegd voor warm tapwater. Het TCES systeem warmtebatterij bestaat uit drie modules die gevuld zijn met natriumsulfide. Verder zijn er de extra leidingen en andere componenten zoals pompen, kleppen en sensoren toegevoegd. De vacuümventielen voor de module 1, 2 of 3 regelen of water damp kan worden getransporteerd van de condensor/verdamper naar de met Na<sub>2</sub>S gevulde warmtewisselaar of vice versa. Als het systeem in rust is, worden de vacuüm kleppen niet aangedreven en zijn in een gesloten positie.

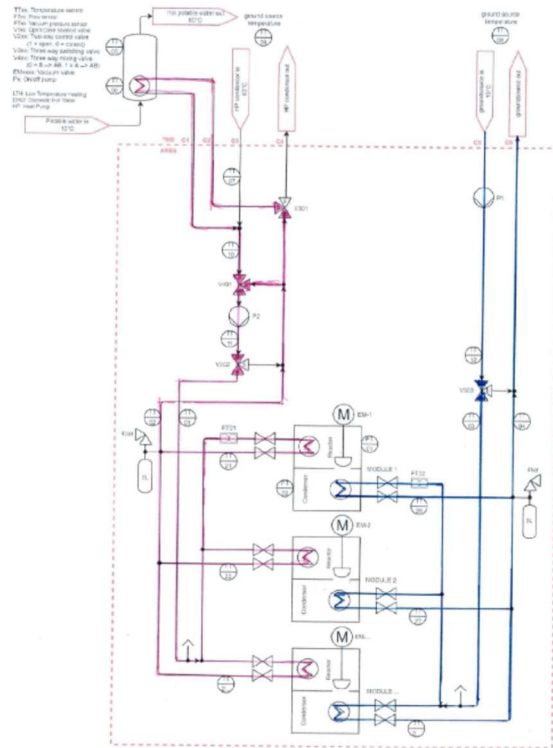
Er wordt gewerkt met drie evenwichtstemperatuurverschillen die zijn 16,4°C, 55,8°C en 63,7°C. De betekenis en de berekening van deze waarden staat beschreven in bijlage C van D4.1.2.

Voor deze regeling wordt ervan uitgegaan dat de TCES modules altijd volledig opgeladen zijn tot het 0,5-hydraat (Na<sub>2</sub>S \* 0,5H<sub>2</sub>O) en volledig ontladen worden naar het 5-hydraat. Dit zal in werkelijkheid echter niet altijd het geval zijn. In werkelijkheid kan het systeem soms maar gedeeltelijk worden opgeladen of ontladen naar het 2-hydraat.

In [Figuur 75](#) is het stroomschema voor het opladen van de TCS warmtebatterij gegeven en in [Figuur 74](#) het stroomschema voor het ontladen van de TCES



Figuur 75 Stroomschema laden van de TCES



Figuur 74 Stroomschema ontladen van de TCES



#### 4.5.3 Beschrijving emulator

TNO heeft een zogenaamde emulator voor het testen van warmte/koude leverende systemen. De emulator brengt testen in het lab samen met het simuleren van de applicatie. Als onderdeel van het SWeKOS2 project is de emulator geschikt gemaakt voor het dynamisch testen van een thermochemisch energie opslag systeem in een woning,



Figuur 76 Test opstelling bij TNO

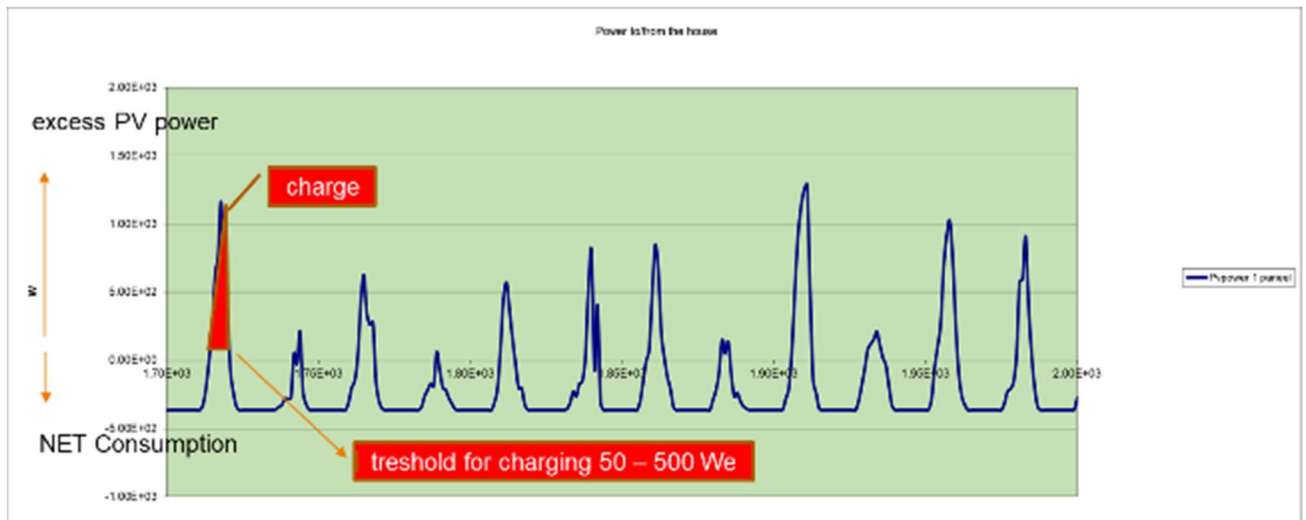
In [Figuur 76](#) is het test opstelling waar de TCES in wordt opgenomen gegeven. De TCES kan met behulp van deze opstelling dynamisch worden getest. Hiervoor gebruikt TNO een rekenmodel om de energievraag momentaan te berekenen, Hiervoor wordt de jaarlijkse weerdata van NEN5050 gebruikt. Voor de toepassing van het TCES systeem is een referentiewoning 2013 gekozen. De waarden van deze woning worden gebruikt in het simulatiemodel. Om de SWeKOS modules te kunnen testen is een testplan opgesteld. De test omgeving wordt ingesteld om een TCES module met een capaciteit van 5 kWh en vermogen van 3,25 kW te kunnen testen voor verwarming en warm tapwater bereiding.

Voor het testprogramma worden de volgende systemen van een Near Zero Energy Building ingevoerd:

- elektrische warmtepomp voor de warmte en koude vraag
- een pv systeem bestaande uit 12 panelen met 4440 Wp, georiënteerd op het zuiden
- vraag naar elektriciteit van de 1000kWh per jaar voor de warmtepomp en 3000 kWh voor de andere elektrische apparaten
- energy nul, maar netto energievraag in de winter en overschot in de zomer tapwater profiel 24 uur, volgens Europese standaard

Naar de warmtepomp wordt een signaal gestuurd om de TCES op te laden. In [Figuur 77](#) is een voorbeeld van een dynamisch regelsignaal afgebeeld.

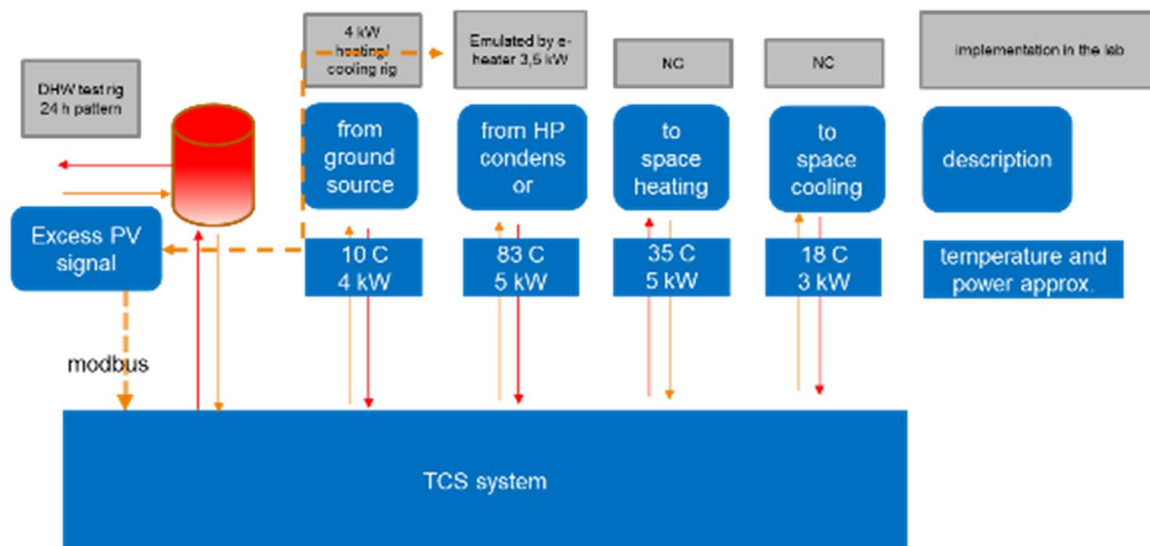




Figuur 77 Regelstrategie TCES in emulator

In de volgende [Figuur 78](#) is de schematische weergaven voor het testen van TCES systeem gepresenteerd

## LAB SETUP FOR TCS SYSTEM TESTING



Figuur 78 Set-up voor het dynamisch testen van het TCES systeem

TNO heeft een testfaciliteit gebouwd en in gebruik genomen om TCS-batterijen in een realistische omgeving te onderzoeken. • De opstelling is gereed en beschikbaar om de TCES van SWEKOS2 onder realistische en dynamische condities te testen. De duur van een dynamische test is vrij lang: planning is belangrijk. Ter voorbereiding op de emulatie testen zijn er simulaties gedaan, om de meest geschikte use case en testperiode te vinden. Uiteindelijk is de TNO emulator niet gebruikt in dit project omdat de full scale testmodule niet goed op de vacuüm condities te houden bleek.



#### 4.5.4 Testresultaten

De modules worden met de hand gemaakt. De warmtewisselaars worden in de behuizingen geplaatst. De doorvoeren voor het laden en ontladen van de warmtewisselaars met Na<sub>2</sub>S en de doorvoeren van de absorber/condensor worden gelast aan de behuizing. Dit wordt uitgevoerd op het moment dat alle onderdelen van een KTL coating zijn voorzien.

De schalen met metalen tussen laag en rubber afdichtingsring worden aan elkaar bevestigd.

De aldus geproduceerde modules worden onderworpen aan de vacuüm lek testen. Het vacuüm moet voor lange duur gehandhaafd kunnen blijven. Met de helium lektester kunnen zeer kleine lekkage gedetecteerd worden.

Bij de eerste testen bleek het vacuüm niet in orde. Vervolgens is geanalyseerd waar de lekkage zit. In de uitvoering is gebleken er op een aantal essentieel plekken lekkage optreedt.

De eerste gedetecteerde lekkage is gesignaleerd bij de doorvoeren door de rechthoekige modules.

Herhaaldelijk opnieuw solderen loste het probleem tijdelijk op. De uitgaande leidingen moeten vast gemaakt worden aan de installatie. Bij monteren bleek de verbinding telkens erg kwetsbaar. Daarom werd besloten om deze modules niet bij TNO in de emulator te testen maar in de testopstelling bij RTB de Beijer. Het opnieuw maken van het vacuüm in de reactoren kon hier ter plekke uitgevoerd worden. Daarnaast is hier alle apparatuur en kennis aanwezig om eventuele lekke verbindingen te solderen, te lassen of te kitten.

Bij verdere analyse van het niet vacuüm dichtzijn, bleek dat de gesoldeerde headers van de warmtewisselaar met Na<sub>2</sub>S niet vacuüm proof waren. Er zijn veel soldeer verbindingen in een hele beperkte ruimte.

Bij het repareren van deze verbindingen in de kleine ruimte bleek het eigenlijk onmogelijk om deze header aansluitingen dicht te krijgen. Er is erg veel tijd besteed aan de diverse modules om ze vacuüm dicht te krijgen.

Daarnaast is ook tijdens het vacuüm testen gebleken dat de rechthoekige modules vervormen, ondanks een versterkte uitvoering en een rubber afdichtingsrand, trad er lekkage van het vacuüm op. Na veel pogingen om vacuüm dichte modules of zelfs maar 1 goede module te produceren is besloten om dit op te geven en geen tijd en geld meer aan te besteden. Besloten is op basis van alle ervaringen opgedaan in dit project een compleet redesign te maken gestoeld op de bewezen technologie van de Solabcool.



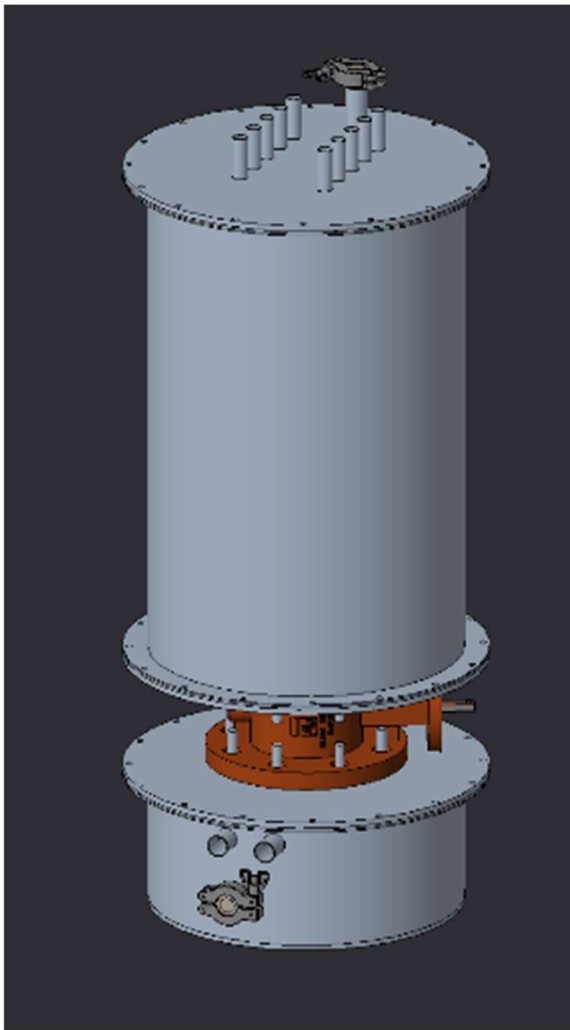


#### 4.5.4 Redesign

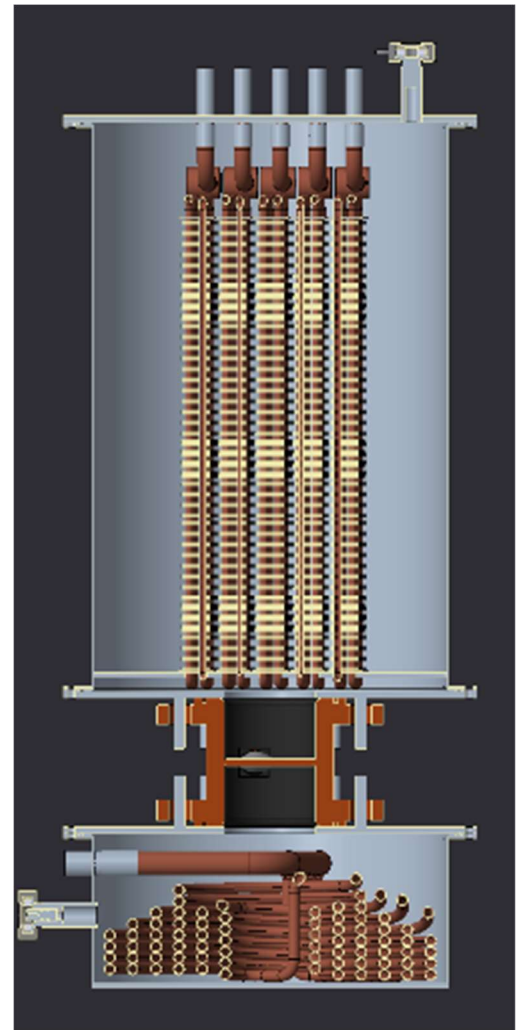
Na uitgebreide analyse van de rechthoekige modules is geconstateerd dat de schalen niet stijf en stevig genoeg zijn. Om nieuwe rechthoekige schalen te produceren die aan de vereisten van sterkte en stijfheid zouden voldoen waren tijd en investeringen nodig. Omdat het project in de eindfase was, was deze oplossing niet uitvoerbaar. Dit wordt in het vervolg Geothermica project verder onderzocht.

Daarom is besloten tot een redesign. Hierbij is de kennis en ervaring uit de voorgaande TKI projecten gebruikt, de binnen RTB de Beijer beschikbare kennis en ervaring inzake TCM systemen en de kennis en ervaring met de productie van de Solabcool. Daarom is teruggevallen op de aanpak met In [Figuur 80](#) en [Figuur 79](#) zijn van het redesign het ontwerp gegeven.

kostprijs



Figuur 80 TCES module gebaseerd op Solabcool



Figuur 79 Exploded view van de module



In het onderste RVS deel is de absorber condensor aangebracht.

In de bovenste module is de fin en tube warmtewisselaar geplaatst, gevuld met Na<sub>2</sub>S.

Er worden een viertal warmtewisselaars geplaatst. De header buizen van de warmtewisselaars worden door de RVS deksel naar buiten gevoerd en hier met elkaar verbonden. Dit maakt de verbinding stabiel en steviger. Daarnaast zijn eventuele lekkages van de warmtewisselaars nu eenvoudig buiten het vacuüm te repareren.

Tussen de onderste cilinder en de bovenste cilinder is een ruime doorvoer voor de waterdamp. Deze ruime doorvoer reduceert het druk verlies sterk. Een vacuüm klep regelt het damptransport. Deze vacuüm vlinderklep wordt in kunststof uitgevoerd, dat inert is voor Na<sub>2</sub>S, De binnen zijde van de rvs cilinders en afdekplaten worden gecoat met KTL. Ook de absorber/condensor wordt met KLT gecoat. De warmtewisselaars worden voorafgaande aan de vulling met Na<sub>2</sub>S met KTL gecoat.

De deksels worden op de cilinder gelast. De doorvoeren door de deksel en zijwand zijn op een speciale wijze gemaakt. Dit is een RVS-koper verbinden die gelast wordt aan de RVS module.

Zowel in de onderzijde als bovenzij van de cilinder zijn aansluitingen om het systeem te vacumeren en om via deze opening de juiste hoeveelheid water (als absorbens) in te brengen.

Het geassembleerde systeem wordt getest op lekdichtheid met een helium lekdichtheids testopstelling. De absorber/condensor worden ook getest op lekdichtheid.



## 4.6 Industrialisatie

### 4.6.1 Programma van eisen

In de voorgaande studies zoals Energypad, Energypad2.0 en SWeKOS zijn de randvoorwaarden voor een thermochemisch energie opslag systeem aan de orde gekomen. Voortgaande studie van de kosten, toepassing en inpassing van een TCES systeem leiden tot verder bijstelling van dit programma van eisen. Hier worden de belangrijkste eisen aan het SWeKOS2 systeem gegeven.

Het programma van eisen wordt opgesteld vanuit het stakeholders perspectief en is de input voor de engineers en ontwerper. Een programma van eisen wordt gebruikt om het ontwerp en de prototypes te toetsen. Een programma van eisen is een levend document dat wordt ge-update tijdens de ontwikkeling van SWeKOS2. Daarom wordt het eisenpakket uit SWeKOS 1 gebruikt als basis, en waar nodig herzien en verdiept.

#### Waarde levering

- Het systeem dient lokale waarde te leveren in de vorm van warmte voor verwarming, warmte voor douchen & koeling voor in de zomer. Daarnaast dient het een algehele waarde te leveren van energieopslag die voornamelijk als stabilisator van het elektriciteitsnet (hoog/midden/laagspanning) zal moeten gelden. De levering van de warmte en koude zal niet tegelijkertijd plaats vinden, hetgeen het ontwerp, aansluiting en regelstrategie van het systeem sterk vereenvoudigd.
- Het systeem zal aantrekkelijk genoeg gemaakt moeten worden, zowel financieel als functioneel, om de gewenste adoptiemogelijkheid, adoptiesnelheid en marktpositie te waarborgen. Deze eis blijft ongewijzigd.

#### Toepasbaar voor verschillende verwarmingssystemen en energiebronnen

- Het systeem moet toepasbaar zijn voor lage temperatuur warmte die het systeem kan leveren heeft een aanvoertemperatuur van  $\geq 30^{\circ}\text{C} \leq 50^{\circ}\text{C}$ . Daarnaast moet de warmte zich in de ruimte kunnen afstaan aan de lucht doormiddel van radiatoren, vloerverwarming of combinatie van beide.
- Indien er een overschot aan energie beschikbaar is (zon, stadsverwarming, geothermie) in de winter dan kan het systeem worden geladen, maar is er geen behoefte aan ontladen. Want de energie kan direct worden ingezet om een huis te verwarmen.
- Indien er een overschot aan energie beschikbaar is in de zomer dan kan het systeem worden ingezet voor koeling of warmtapwater verwarming. Afhankelijk van de warmtelast van het te koelen object zijn er verschillende opties om koeling te leveren.
- Indien er een tekort is aan energie (dus geen zon, stadsverwarming, geothermie) zal er energie aan het apparaat worden onttrokken. Bij goed geïsoleerde woningen is een verwarmingsvraag van 5kW voldoende om 99% van de warmtevraag te kunnen voorzien. Hierbij kunnen meerdere modules tegelijkertijd worden ingeschakeld om deze piekvragen te dempen. In de perioden april tot oktober is er nauwelijks een verwarmingsvraag. In deze periodes kan het systeem worden gebruikt om hoge temperatuur verwarming te maken. Het opwarmen van warm water vaten gebeurt met een vermogen van twee tot drie kW. Als SWeKOS gemiddeld één kW kan leveren dan wordt de elektriciteitsvraag voor het laden van een warm water buffervat met 50% gereduceerd.



### Competitie & markt positie

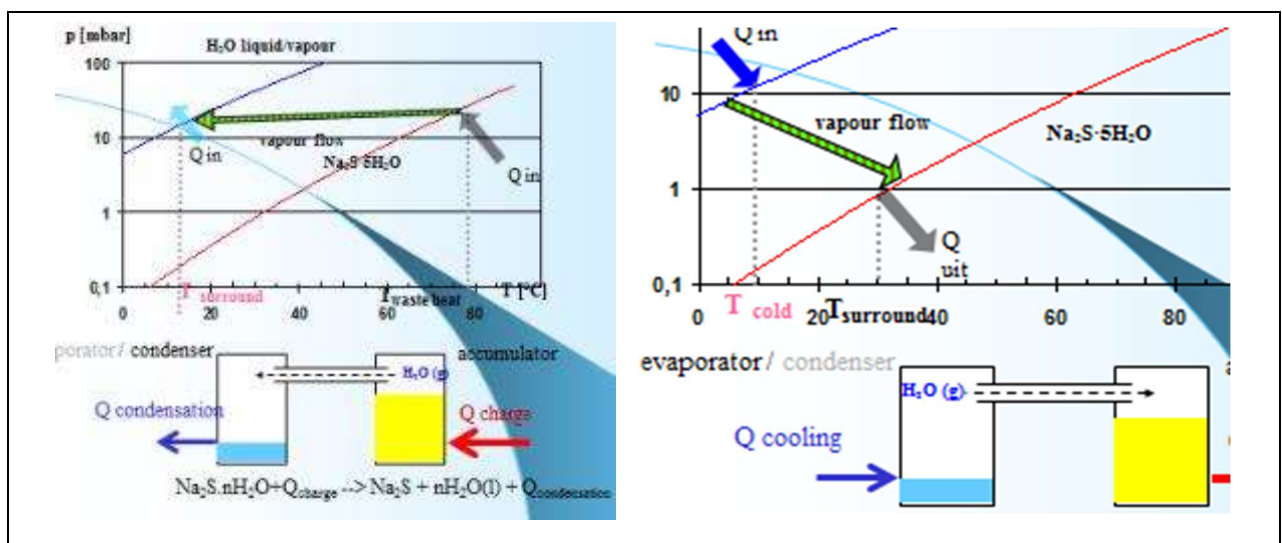
- Het systeem zal aantrekkelijk genoeg gemaakt moeten worden, zowel financieel als functioneel, om de gewenste uitrol in de markt mogelijk te maken. Op basis van diverse bronnen (routekaart energieopslag; actuele verkoopprijzen [charged.nu](https://charged.nu); [energietransitieland.nl](https://energietransitieland.nl); en wetenschappelijke publicaties (Journal Applied energy <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.04.001>; is een eis opgesteld voor de prijs/kWh. Op dit moment wordt voor elektrochemische opslag (Li-ion batterij) gerekend met €400-€800 /kWh. Dit is exclusief randapparatuur (omvormer, omzetting van elektriciteit naar warmte, latente warmteopslag om piekwarmtevraag te kunnen overbruggen) en installatiekosten.
- Binnen het marktsegment (kleinschalige warmteopslag in bebouwde omgeving) kan thermochemische warmteopslag competitief zijn indien de prijs van dit prototype <400€/kWh is. Door middel van opschaling, kostprijs engineering en standaardisering van productieprocessen de prijs verder worden verlaagd.

### Module(s)

- Er wordt naar gestreefd een energie opslag capaciteit van 15-30 kWh te realiseren met een vermogen van 5 kW. De afmetingen van het skid voor het TCES systeem zijn geprognosticeerd op ca 1m\*1m\*1,2m. en zal bestaan uit 5 rechthoekige modules, aangesloten op een openverdeler. Er wordt nu uitgegaan van de fin and tube warmtewisselaar zoals die in de Solabcool wordt gebruikt en waar ruime ervaring mee is bij RTB de Beijer. De modulariteit is nu gedefinieerd per sorptie energie module. In het volgende hoofdstuk wordt dit systeem beschreven. Door stapeling in een rek van deze sorptie energie modules wordt een flexibele capaciteit bereikt. Het ontwerp uitgangspunt is een sorptie energie module met een capaciteit van 5 kWh en een vermogen van 2,5 kW. Door stapeling wordt zo de gewenste capaciteit en vermogen bereikt.

### Lage temperatuur warmte

- Lage temperatuur warm water wordt geleverd door de interne vacuümklep te openen en een duurzame warmtebron, zoals buitenlucht temperatuur (dry cooler), op de verdamper te zetten. Door het verdampingsproces zal het waterdamp op het Na<sub>2</sub>S gaan condenseren, en zal er condensatiewarmte vrijkomen in de reactor. Dit levert een temperatuurverhoging op dat in de range zit van lage temperatuur warmte (>30°C ≤50°C).(zie [Figuur 81](#))



Figuur 81 Weergave werking absorptie

**Aansturing**

- De aansturing van het systeem zal met een zelf ontwikkelde elektronische die aansluit op de kamerthermostaat plaats vinden. De aansturing zal de kleppen sturen in de modules teneinde de capaciteit en vermogen te leveren bij het ontladen. In de laad fase zal de sturing er zorg voor dragen dat de modules sequentieel geladen worden.

**Aansluitingen**

- Omdat het SWeKOS systeem niet gelijktijdig warmte voor verwarming of tapwater en/of koude voor koeling gaat leveren wordt de hydraulische aansluiting eenvoudig. De sorptie energie module wordt het rek geplaatst. De aanvoer en afvoer leidingen van het rek werken als een open verdeler. Zodoende zal er op eenvoudige wijze koppeling met het bestaande verwarmingssysteem kunnen plaats vinden.

**Non-functionele eisen**

- De modules dienen een gewicht te hebben zodat deze eenvoudig naar hun plaats in het gebouw kunnen worden gebracht. Het ontwerp gewicht is 20 kg. Door de modulaire opbouw van het systeem, plaatsing van modules in het rek, wordt grote flexibiliteit met betrekking tot plaatsing in het gebouw bereikt.

**Bijstelling ontwerp**

- Er is een herontwerp gemaakt van het SWEKOS2 TCES systeem. Voor de eenvoudige en snelle uitvoering is gekozen om terug te vallen op de systemen van de Solabcool maar dan gebruik te maken van de TCM Na<sub>2</sub>S. Op de iets langere termijn wordt gekeken of het ontwerp weer gebaseerd op de rechthoekige pannetje die dan vacuüm bestendig zullen zijn. Door industriële productie van deze drukbestendige rechthoekige modules zal de kost prijs op het niveau komen zoals bij het SWeKOS project is berekend . Indien een rechthoekige module toch te kostbaar wordt zal de ontwikkeling van de constructie zoals gebruikt en ontwikkeld voor de Solabcool geoptimaliseerd worden voor de TCES
- Deze industrialisatie kan pas daadwerkelijk worden uitgevoerd na een succesvolle pilot project met de het TCES systeem gebaseerd op de Solabcool elementen en bij een proef om op automatische en industriële wijze een rechthoekige module te maken. Dat betekent testen van fabricage “pannetje”, testen lasverbindingen op vacuüm, testen doorvoeren van warmtewisselaar leidingen en connecties op vacuüm, testen vacuüm klep, testen absorber/condensator doorvoeren en aansluitingen.



## 4.6.2 Industrieel ontwerp en industrialisatie

### 4.6.2.1 Inleiding

Binnen het SWeKOS 1 project is er een blauwdruk voor de industriële productie van rechthoekige modules gegeven. In het herontwerp bij het SWeKOS2 project wordt nu uitgegaan van de modules zoals deze bij de Solabcool worden gebruikt. Het systeem wordt geschikt gemaakt voor gebruik van  $\text{Na}_2\text{S}$ . Hiervoor zijn extra stappen in de productie nodig.

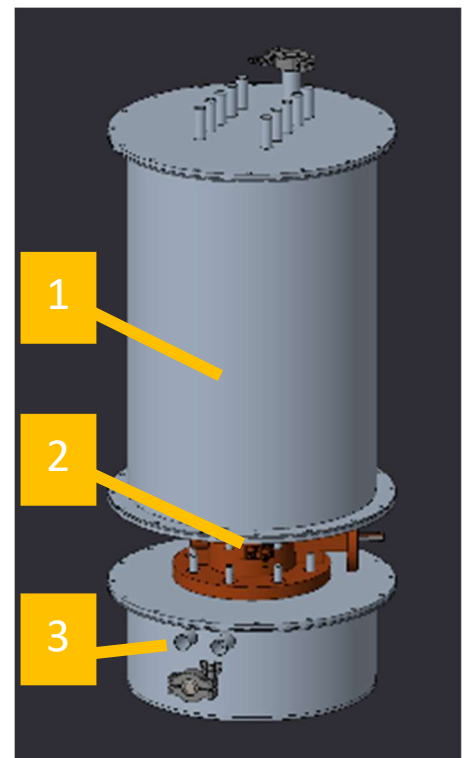
In de door ontwikkeling zal er gebruik gemaakt gaan worden van de warmtewisselaar zoals die in het Solabcool systeem worden gebruikt, de fin en tube opbouw. Omdat de rechthoekige pannetje niet goed vacuüm dicht zijn te krijgen is teruggeschakeld naar de cilindrische vaten van de SolabCool. Deze bewezen technologie maakt het mogelijk het vacuüm langdurig in stand te houden. In dit document wordt het herontwerp van het SWeKOS2 TCES concept met het opzetten van de industrialisatie productie in combinatie met kostprijs beschreven.

### 4.6.2.2 Blauwdruk: prototype Sorptie Energie Module (SEM)

#### Eindproduct

De SEM bestaat uit drie hoofcomponenten. De reactorkamer (1), de klep (2), en de condensor/verdamperkamer (3). In [Figuur 82](#) is dit weergegeven

De reactorkamer bestaat uit een RVS mantel en een RVS deksel. De deksels worden in dit prototype met een flens gemonteerd. Op het deksel zit een vacuümaansluiting en hydraulische aansluitingen. De vacuümaansluiting heeft twee functie, ten eerste wordt de kamer op onderdruk gebracht en ten tweede is dit de doorvoer voor de sensoren die op de flens worden gemonteerd. De hydraulische aansluitingen hebben de functie om water naar de reactor te transporteren. In de reactorkamer bevindt zich de reactor met het natriumsulfide. De reactor bestaat uit een warmtewisselaar, diverse ophangbeugels, een gaas om het natriumsulfide te fixeren, en de hydraulische aansluitingen. Kritische punten bij de reactorkamer zijn het vacuüm dicht aansluiten van de hydraulische leidingen, en het vullen van het natriumsulfide in de warmtewisselaar.



Figuur 82 De Sorptie energie module (SEM) in isometrisch aanzicht





De vacuüm klep is geselecteerd op basis van de toepassing, in dit geval een warmtebatterij. Aandachtspunt bij de klep is de doorlaat, de materialen, en de afdichtingen. Omdat er een onderdruk (5mbar tot 200 mbar) in de kamer heerst is de keuze in materialen zeer beperkt. RVS 304 of bepaalde kunststoffen zijn geschikt. Ten tweede mag er geen reactie zijn tussen het materiaal van de klep en natriumsulfide. Hierdoor kan alleen RVS worden gebruikt dat voorzien is van een KTL coating, of een kunststof. Na overleg met verschillende experts is gekozen voor een vlinderklep die aan alle criteria voldoet. De klep wordt met een flensverbinding vastgezet aan de reactorkamer en de condensor/verdamper kamer.

De condensor/verdamper kamer bestaat uit een RVS mantel met een eindplaat. De eindplaat wordt gelast op de mantel. Op de mantel zitten drie aansluitingen. De vacuüm aansluiting wordt gebruikt om de kamer te vacumeren en sensoren aan te sluiten. De overige twee aansluitingen worden gebruikt om water naar de condensor en verdamper te transporteren. In de kamer bevindt zich een helix vormige koperen warmtewisselaar, diverse beugels, een spatplaat, en een kookmat. De beugel fixeert alle componenten. De spatplaat zorgt ervoor dat er geen water opspat tijdens het kookproces, en de kookmat verbeterd de efficiëntie van de condensor/verdamper.

### Inkoopdelen

Voor het produceren van de module wordt gebruik gemaakt van standaard producten in de markt. Door de combinatie van materialen wordt waarde gecreëerd.

RVS vacuüm kamer wordt geproduceerd door een metaalbewerkingsbedrijf in de regio. De warmtewisselaar die als reactor zal gaan dienen wordt ingekocht bij een internationale leverancier. De afmetingen van de reactoren zijn bepaald in diverse onderzoeken en experimenten. De condensor/verdamper spiraal wordt ingekocht bij een Europese fabrikant. Het natriumsulfide wordt ingekocht bij een groothandel in chemicaliën. Het gedemineraliseerde water is op grote schaal beschikbaar.



## Assemblage stappen

In deze paragraaf wordt het assemblage proces beschreven. Hieruit ontstaat een workflow chart. De volgende stappen worden onderscheiden:

- I. Controle inkomende goederen. De maatvoering van de inkomende goederen wordt gecontroleerd. Op de tekening zijn de kritische maten aangegeven. De gecontroleerde onderdelen krijgen een sticker of markering indien ze voldoen aan de maatvoering.
- II. De warmtewisselaar hardsoldeer verbindingen (reactor) worden gecontroleerd op lektheid met een heliumlektst detector
- III. De condensor verdamper spiraal wordt samen met de kookmat, de beugels en de spatplaat in de condensor/verdamperkamer gemonteerd;
- IV. De gesoldeerde en gelaste verbindingen in de condensor/verdamperkamer worden gecontroleerd op lektheid;
- V. De vlinderklep wordt gemonteerd op de deksels.
- VI. De vlinderklep, de condensor/verdamperkamer en de reactorkamer worden gemonteerd en gecontroleerd op lektheid.
- VII. De reactor kamer hydraulische doorvoeren worden gemonteerd op de deksel;
- VIII. De ophangbeugels en reactorwarmtewisselaar wordt passend gemaakt op de leidingdoorvoeren en de ophangbeugels (interface delen);
- IX. De reactoren worden aan drie zijden voorzien van gaas;
- X. Het TCM wordt geprepareerd in de juiste hydraatfase en korrelgrootte;
- XI. De reactoren met gaas wordt gevuld met TCM;
- XII. De reactoren met gaas en TCM wordt aan de vierde zijde voorzien van gaas;
- XIII. De reactoren worden aan de flens met de hydraulische aansluitingen gemonteerd;
- XIV. De flens met daaraan de reactoren wordt in de module gemonteerd;
- XV. De reactor wordt uitgestookt om alle non-condensables te verwijderen;
- XVI. De condensor/verdamper wordt gevuld met gedemineraliseerd water;
- XVII. De module wordt getest om de prestaties te meten (capaciteit en vermogen).
- XVIII. De module wordt opgeslagen in het magazijn voor montage in het systeem.

## Borging van de kwaliteit

In deze paragraaf worden de testen beschreven die de kwaliteit van de producten borgen.

Alle maten van de ingekochte zijn gekozen om een bepaalde opslagcapaciteit, verwarmend vermogen en levensduur te halen. Sommige maatvoeringen zijn kritisch en komen voort uit handmatige bewerkingen. Andere maatvoeringen zijn kritisch, maar komen voort uit machinale bewerkingen. Ten slotte zijn er nog maatvoeringen die niet kritisch zijn.

De ingekochte delen met kritische maatvoeringen die voortkomen uit handmatige bewerkingen worden 100% gecontroleerd. De ingekochte delen met kritische maatvoeringen die voortkomen uit machinale bewerkingen worden steekproefsgewijs per geleverde batch gecontroleerd.

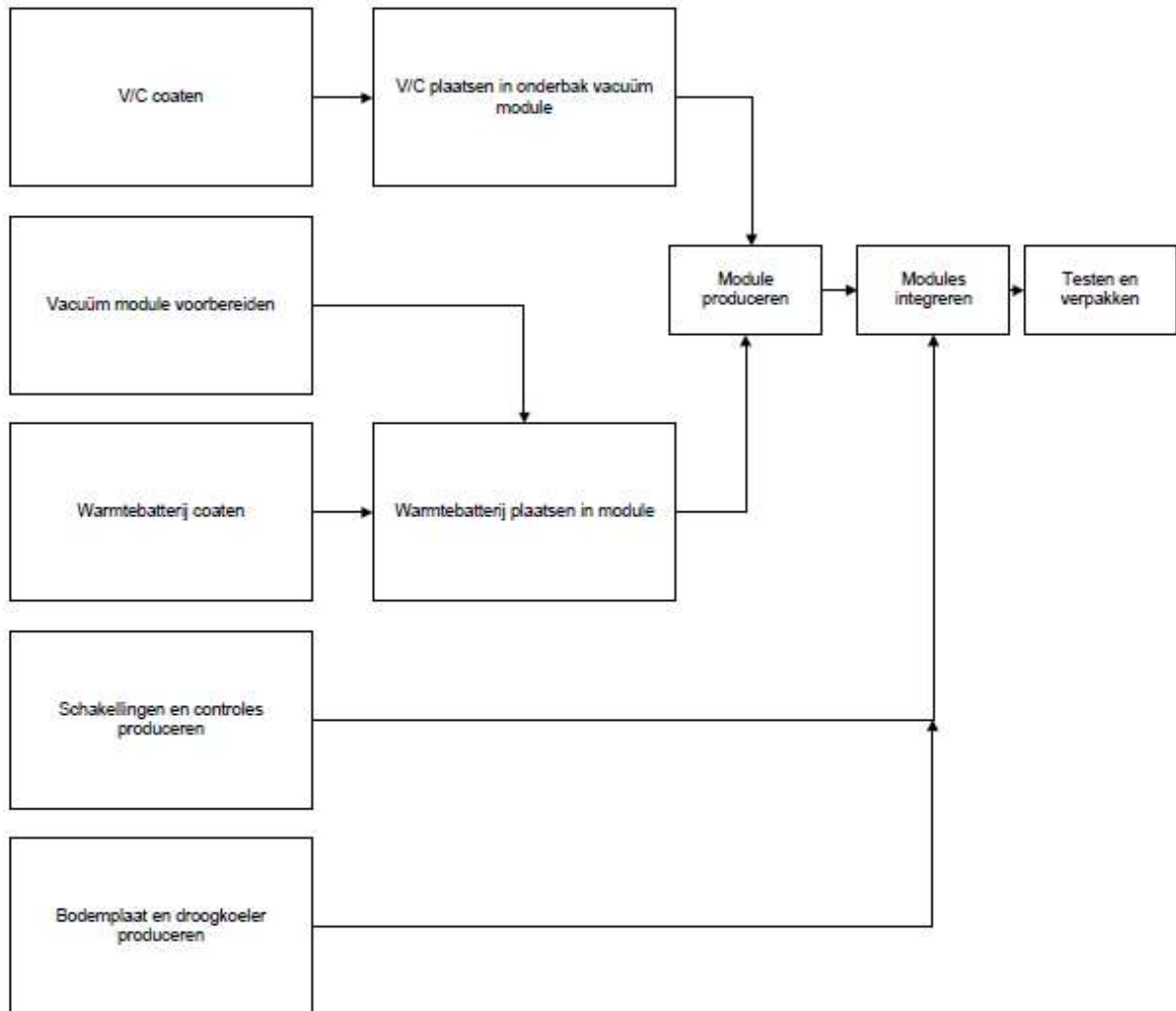
Sommige delen bevatten kritische verbindingen die niet op maatvoeringen kunnen worden gecontroleerd. Dit zijn de delen die lekdicht moeten zijn. De warmtewisselaar die als reactor gaat dienen, de lasverbindingen in de RVS kamers zijn hiervan voorbeelden. Deze onderdelen worden 100% gecontroleerd.

De hoeveelheid natriumsulfide in de reactor is een directe maat voor de opslag capaciteit en het vermogen. Elke reactor wordt gewogen om de massa natriumsulfide te bepalen. Ten slotte wordt na het assembleren van elke module de capaciteit en het vermogen bepaald.



#### 4.6.2.3 Blauwdruk initieel productie proces





Het initieel productieproces maakt onderscheid tussen het produceren van de gevacumeerde opslagvaten en het samenstellen van het complete systeem. In [Figuur 83](#) is dit schematisch weergegeven.



[Figuur 83](#) Overzicht van het productieproces van de SWeKOS module

In eerste instantie is ervoor gekozen om de deel-samenstellingen parallel te assembleren. Hiervoor is gekozen op basis van de geprognostiseerde verkoop aantallen, de productvarianten en de specificaties van de onderdelen, zie [Tabel 6](#). Als dit product succesvol in de markt is geïntroduceerd en er meerdere varianten nodig zijn zal een andere logistieke doorloop optimaal zijn. In een vervolgproject zal worden gekeken naar de samenstelling van de overige componenten van het energieopslag systeem.

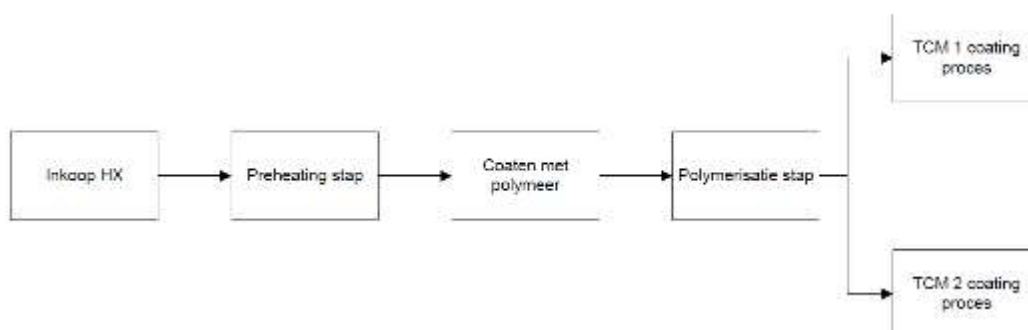


|                                                                                    |                                                                                     |                                                                                    |
|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
|   |                                                                                     | Verdamper /<br>condensor                                                           |
|   |                                                                                     | Tussenplaat met<br>doorvoer voor de<br>klep, Vacuüm klep<br>met controller.        |
|  |  | Een gecoate fin and<br>tube<br>warmtewisselaar<br>geschikt voor Na <sub>2</sub> S. |



Tabel 6 Overzicht van de hoofdcomponenten van de opslagmodule

De overige productiestappen zijn bekend bij De Beijer RTB. In onderstaande afbeelding is het productieproces van de warmtebatterij weergegeven.



Figuur 84 Coating proces warmte batterij

Figuur 85 Vul proces warmtewisselaar met Na<sub>2</sub>S



Na de samenstelling van een warmtebatterij wordt de module “uitgestookt”. Het TCM wordt gedroogd en alle verontreinigingen worden uit de warmtebatterij gereinigd. Vervolgens wordt de werkstof (gedemineraliseerd water) toegevoegd. Ten slotte wordt een test uitgevoerd om de functionele prestaties van de warmtebatterij te bepalen. Er is een blauwdruk gemaakt van de installatie voor het uitstoken en testen van modules. Testen zijn productiestappen die geen waarde toevoegen. Door in een eerdere productiestap te voorkomen dat er verontreinigingen in de module komen kan deze worden geëlimineerd uit het productieproces. Dat zou ten goede komen van de fabricage kostprijs.

#### *4.6.2.4 Conclusie*

De initiële stappen van een productie proces zijn als blauwdruk beschreven. In het productieproces zijn de meest kritische stappen het vacuüm dicht rond lassen van het opslagvat met de diverse compartimenten. Vervolgens is het uitstoken en test op luchtdichtheid een belangrijke stap.

De andere productie stappen zijn min of meer standaard handelingen waar geen speciale apparatuur voor nodig is. Wel is het van belang goed aandacht te besteden aan het vacuüm dicht zijn het totale opslagvat. Speciale controle stappen zijn hier voor nodig.





## 4.7 Business plan

### 4.7.1 Inleiding

De ontwikkelingen in het SWeKOS2 project hebben geleid tot een redesign van het SWekos2 systeem. In eerste instantie wordt er teruggevallen op een cilindrisch systeem, gebaseerd op de technologie van de Solabcool. Hiermee is ervaring met het langdurig in stand houden van vacuüm. In hoofdstuk 4.5.4 is dit redesign beschreven. Tevens is in samenspraak met de industrie besproken of er naar vierkant drukvaten kan worden overgegaan. De eerste verkenning is positief, zowel in industriële maakbaarheid als in kostprijs. De marktstudie heeft aangegeven dat TCES systemen met een opslagcapaciteit tussen de 15 en 30 kWh met een vermogen van 5kW een groot potentieel hebben. In dit hoofdstuk wordt het businessplan en business case verder toegelicht. In dit hoofdstuk volgt hier een samenvatting

### 4.7.2 Productdefinitie

In hoofdstuk 4.4.1 is het TCES systeem beschreven inclusief de belangrijkste elementen van het productie proces zoals materialen, kosten en investeringen. In het concept businessplan is dit verder uitgewerkt voor de positionering en uitrol in de markt. In eerste instantie zal de uitrol van het product plaats vinden in de Nederlandse markt en Oostenrijkse markt. Vervolgens wordt het product in de overige EU markt geïntroduceerd.

Een SWeKOS2 systeem is voor de business analyse hierbij als volgt gedefinieerd:

- Opslag capaciteit 15-30 kWh,
- vermogen 5 kW
- opgebouwd uit gemiddeld 6 SEM modules
- geplaatst in een rek met openverdeler en regeling
- uitgerust met een buitenkoeler
- aangesloten op de installatie.



Figuur 86 Foto van een module van het TCES systeem

Door de flexibiliteit van het rek met openverdeler kan een TCES systeem met meer of minder modules geleverd worden. In dit hoofdstuk is uitgegaan van het gemiddelde systeem. De geprognosticeerde ontwikkeling is in de volgende paragrafen weergegeven.



### 4.7.3 Market

Het SWeKOS2 concept wordt nu modulair opgebouwd uit de zogenaamde de SEM modules en in een rek met openverdelers opgebouwd tot het systeem met gewenste capaciteit en vermogen. DE SEM module zal uit een rechthoekige bak bestaan en fin en tube warmtewisselaars.. In hoofdstuk 4.6 is de industrialisatie beschreven, inclusief blauwdruk productie en kostprijs.

Om de doelgroepen voor de toepassing van het SorpTES-systeem te beschrijven, worden eerst de belangrijkste stakeholders in tabel 8 gegeven.

| Stakeholder                                             | Goals                                                           | Value proposition                                                      | Obstacles                                                                                        | Roles and responsibilities                                                                  |
|---------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|
| Home owner                                              | Low costs<br>Sustainable<br>lifestyle<br>Comfort<br>Convenience | Reduce annual costs<br>Increased home<br>value<br>Comfort<br>(cooling) | Additional investment<br>Extra system<br>Radiators are<br>limited<br>Heating network<br>required | Purchase system                                                                             |
| Housing corporation                                     | Increase revenue<br>Provide good<br>service                     | Increase (rent) revenue<br>Comfort (cooling)                           | (same as home owner)                                                                             | Purchase system<br>Coördinate installation                                                  |
| Tenants                                                 | Low costs<br>Comfort                                            | Comfort (cooling)                                                      | Can veto                                                                                         | Don't veto                                                                                  |
| System distributors                                     | Increase revenue                                                | Increase revenue                                                       | System must be<br>understood                                                                     | Sell system                                                                                 |
| Maintenance/<br>installation<br>(Micro)grid<br>operator | Increase revenue<br>Reduce costs<br>Reliable grid               | Increase revenue<br>Peak shaving<br>Increase grid capacity             | System must be<br>understood<br>Possibly more complex                                            | Install system<br>Maintain system<br>Connect residents to<br>(heating) grid<br>Operate grid |
| Government                                              | Sustainable goals<br>Stimulate<br>economy                       | Meet sustainable goals                                                 | Competing incentives<br>Not part of gov.<br>toolbox                                              | Financial (dis)incentives:<br>Fees,<br>charges, Subsidies, Tax<br>difference                |

Tabel 7 De verschillende stakeholders, hun doelen, een waarde propositie voor hen, de obstakels die de voor SorpTES integratie met zich meebrengt en een uitleg van hun rollen en verantwoordelijkheden.

#### Nederland

Om de stakeholders te bereiken en aan hun behoeften te voldoen, moeten de volgende commerciële marktpartijen geïnteresseerd zijn om het SorpTES-product op de markt te verkopen.

Energiedistributiebedrijven: Mogelijkheid om gedecentraliseerde vraag en aanbod van energie te stabiliseren. Versterking van de mogelijkheid om duurzame bronnen te gebruiken. Verlaging van de kosten voor uitbreiding van de netcapaciteit en mogelijkheid tot het balanceren van het net,

Installateurs Het vergroten van het assortiment, het verder ontzorgen van haar klanten en het vergroten van de omzetmogelijkheden.

Consumenten Onafhankelijkheid van fluctuerende energieprijzen, veranderende regelgeving en vermindering van het energieverbruik.

#### Internationaal

Voor Europa zijn de stakeholders en doelgroepen identiek. Daarom is samenwerking nodig met internationale OEM-bedrijven en nationale, lokale bedrijven. Door samenwerking binnen het Geothermica-project met Oostenrijkse bedrijven wordt de Oostenrijkse markt als eerste internationale markt aangesproken. Op basis van de samenwerking, resultaten en ervaring zullen de markten in Europa en daarbuiten worden ontsloten.



### Addressable Market

De Nederlandse markt voor de Gebouwde Omgeving omvat ruim 8 miljoen woningen en 160 miljoen m<sup>2</sup> BVO voor bedrijfsgebouwen. In 2020 bedroeg de markt voor vervanging van gas cv ketels in Nederland ongeveer 450.000 stuks per jaar. Vanwege het feit dat aardgas wordt uit gefaseerd, zal dit aantal dalen. Het aantal warmtepompen dat jaarlijks op de markt voor de gebouwde omgeving wordt geplaatst, zal de komende jaren echter stijgen, net als de markt voor stadsverwarming. Het potentieel voor thermische energieopslag is dus enorm. De totale adresseerbare markt in Nederland wordt geschat op 500.000 eenheden à 10.000 euro. Dit is 5 miljard euro per jaar. Voor Europa is dit een factor 15 groter.

### Trends en ontwikkelingen

Voor Europa en Nederland zijn doelen gesteld voor de energietransitie van de gebouwde omgeving. Het algemene doel voor deze sector is om in 2050 energieneutraal te zijn. Belangrijke incentives zijn reeds aanwezig en in ontwikkeling. Om er een paar te noemen:

- Wet- en regelgeving voor nieuwbouw en bestaande bouw, tijdig verlagen van het energieverbruik
- Subsidieregeling duurzame installaties en oplossing
- Verplichtingen voor bedrijfsgebouwen
- Nederlands beleid om aardgas uit te faseren, stimuleren warmtepompen
- Beleid om de energietransitie te versnellen
- Lokaal energiebeleid voor forse energiereducties
- Lokale regeling voor stimulering duurzame energie

De nationale en internationale overheid, bedrijven en burgers zijn zich in toenemende mate bewust van de CO<sub>2</sub>-problematiek. Dit zal de komende jaren zeker een impuls geven aan de implementatie van nieuwe energiesystemen inclusief flexibiliteit voor het systeem door onder meer energieopslag.

#### **4.7.4 Uitwerking Business Case warmtepomp met grondbron en TCES**

De businesscase voor woning gebonden energieopslag (achter de meter) in combinatie met een elektrische combiwarmtepomp en PV modules is hier verder uitgewerkt. De woningen zijn op jaarbasis ongeveer energieneutraal. Deze woningen hebben een energiebehoefte van ca. 5.000 – 6000 kWh op jaarbasis. Op de zomermaanden vindt het grootste gedeelte van elektriciteit opwek met eigen pv panelen plaats en wordt terug geleverd aan het net. In de winter wordt netto elektra uit het net wordt afgenomen. Hierdoor is er in de zomer een congestierisico van het elektriciteitsnet, terwijl er in de winter een grote piekvraag. In het ideale geval zou de woningeigenaar zijn productieoverschot in de zomer opslaan voor eigen gebruik in de winter. Daarnaast speelt door de net congestie dat de kosten voor een kWh in perioden van overschot nul of zelfs negatief worden. Het beschikken over een energie opslag systeem maakt het mogelijk om gebruik te maken van de fluctuerende (zelfs negatieve) elektriciteitsprijzen.

Uitgangspunt voor de businesscase is een grondgebonden ééngezinwoning die voldoet aan de eisen uit het Bouwbesluit van 2022. De woning beschikt hiermee over een uitstekend isolatiepakket, energiezuinige ventilatie en is voorzien van een elektrische combiwarmtepomp voor ruimteverwarming en warmtapwater en een PV systeem op het dak dat is berekend op een nul-op-de-meter situatie in een gemiddeld jaar. De woning heeft een energiebehoefte voor ruimteverwarming van 20 GJ/jaar bij een COP van 4 en voor warmtapwater van 9 GJ/jaar bij een COP van 2. De jaarlijkse elektrabehoefte voor niet-verwarmingstoepassing bedraagt 4.000 kWh. De jaarlijkse elektrabehoefte voor de warmtepomp bedraagt 2.600 kWh. Het PV-systeem is zo gedimensioneerd dat jaarlijks 6.600 kWh wordt opgewekt. Het onderzoek naar de verliesvrije warmtebatterij (thermochemische batterij) is uitgevoerd op basis van de volgende aanpak:

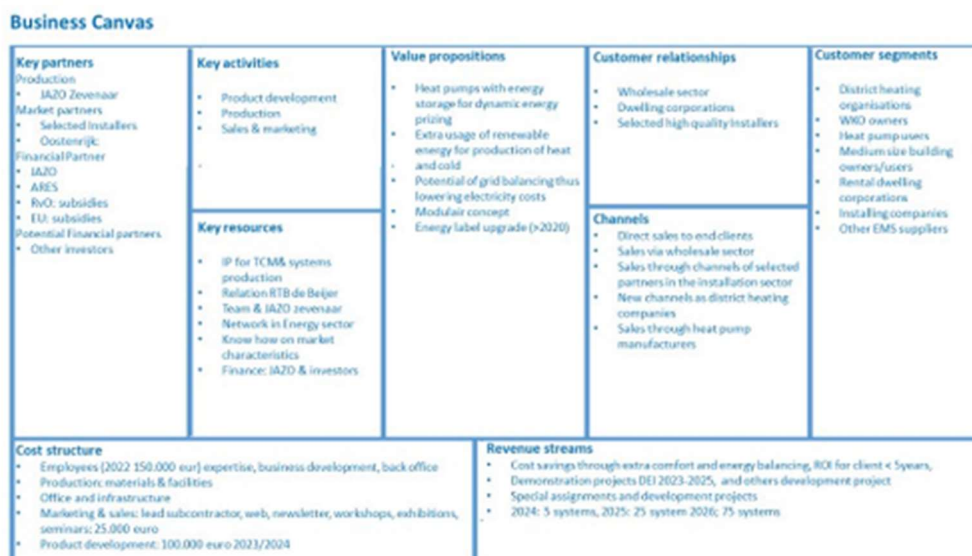


- eigen opgewekte PV stroom wordt eerst ingezet voor eigen gebruik voor elektra
- -wanneer er hierna nog PV stroom over is, wordt hiermee (extra) warmte gegenereerd met de warmtepomp, die wordt opgeslagen in de warmtebatterij
- wanneer er warmtevraag is, wordt eerst gekeken of er PV stroom beschikbaar is. Wanneer deze er niet is, wordt eerst de warmte uit de warmtebatterij gebruikt. Wanneer deze leeg is, wordt elektriciteit uit het net gebruikt.

Een warmtebatterij van ca. 15-30 kWh is economisch optimaal. Deze range hangt af van de elektriciteitsprijs en de terugleververgoeding. Beiden zijn sterk aan verandering onderhevig. ontwikkeling. Door toepassing van de TCES wordt de PV stroom en/of goedkope stroom gebruikt voor aandrijven van de warmtepomp. Zodoende kan hiermee tussen de 700 en 1500 kWh worden opgeslagen. Deze energie wordt ingezet op dagen met te weinig zon-PV aanbod of hoge elektriciteitsprijzen, waardoor de inzet van de warmtepomp wordt beperkt. Deze batterij maakt ongeveer 20 -50 equivalente laad/ ontlaadcycli per jaar. Zonder ondersteunende fiscale of subsidie maatregelen wordt de terugverdientijd van een TCES rond de 15 jaar. Gezien de zich sterk ontwikkelende nationale en internationale energiemarkt is de TCES een uitstekend product om de energietransitie te faciliteren.

#### 4.7.5 Strategy

In de loop van het project is duidelijk geworden dat er twee belangrijke zaken zijn die voor het productiebedrijf (ASES & JAZO) van groot belang zijn voor de strategie om de markt te betreden. Ten eerste wordt bepaald of en hoe het eindproduct industrieel vervaardigd kan worden en tegen welke prijs, en ten tweede wordt bepaald of het SWeKOS2 TCES systeem kan voldoen aan het programma van eisen. Als het vervolg pilotproject SorpTES succesvol wordt afgerond, is de vervolg stap om de demonstratie in de markt vorm te geven. Productie en marktintroductie worden dan parallel opgezet. Binnen 5 jaar na voltooiing van het project moet er een nieuwe industriële productielijn gerealiseerd worden om door te groeien naar 10.000 systemen per jaar. Het kopiëren van deze productielijn maakt het vervolgens mogelijk om verder op te schalen, ook internationaal.



Figuur 87 Business Canvas van TCES systeem

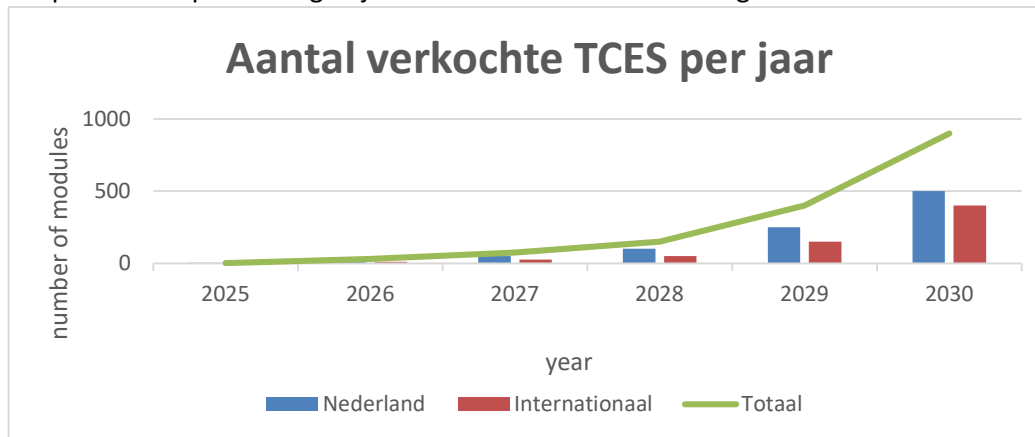


## Doelstellingen

Binnen vijf jaar 5.000 modules geproduceerd en verkocht.

Het SorpTES-product kan op 3 verschillende Europese markten worden geleverd

Het product SorpTES draagt bij aan de flexibiliteit van de energiemarkt



Figuur 88 Prognose verkochte TCES systemen

Stappen na voltooiing van het Geothermica SorpTES project:

- Het stabiel maken van de productie
- Uitbreiding organisatie naar 100 fte, met versterking van marketing, sales en nazorg tie- en verkoopprocessen voor 10.000 nieuwe TCES producten per jaar
- Opschalen netwerkorganisatie met professionals, installateurs en leveranciers
- Optimalisatie van de ketenefficiency, leidend tot 25% lagere kosten voor het product bij grote aantallen

## Mijlpalen

2023: Afronding SWeKOS2 project en verdere uitrol pilotproject SorpTES

2025: Oplevering SorpTES-project met markt gevalideerde systemen, systeemintegratie in bestaande energie-installaties en eerste productielijn en realistische kostprijs. Productie tot 2000 SorpTES-eenheden per jaar. (Elk SorpTES-systeem bevat gemiddeld 6 sorptie-energiemodules)

2025: Start pilotproductie warmte-koudeopslagsysteem en start marketing

2028: Opschaling naar industriële productie

### **Conclusie Business case**

Op basis van de inschattingen van de materialen, loonkosten en productie wordt een marktconforme kostprijs voor een TCES systeem berekend. Een voorzichtige marktintroductie via Nederlandse en Oostenrijkse demo projecten is voorzien in 2025 en 2026. Hierna vindt uitrol in de markt en opschaling van de productie plaats. Het businessmodel laat zien dat op basis van deze behoudende inschattingen break-even wordt bereikt na 2,5 tot 3 jaar. Gebaseerd op dit concept businessplan zijn de vooruitzichten voor uitrol in de markt, bij een succesvolle door ontwikkeling van het product, zonder meer goed.



## 5 Conclusies en Aanbevelingen

### 5.1 Conclusies

De doelstelling van SWeKOS 2.0 project was een volwaardig sorptie warmte en koude en opslagsysteem met een thermochemisch materiaal als werkzame stof als volwaardig, marktconform product te maken en te testen. Volwaardig is hier gedefinieerd als kosteneffectief, flexibel inzetbaar, industrieel te produceren, met een hoge betrouwbaarheid en een lange levensduur

Het uiteindelijke doel is te komen tot een de realisatie van een marktconform en industrieel te produceren compact warmte- en koude-opslagsysteem.

Het SWEKOS 2 project heeft deze doelstelling in belangrijke mate gerealiseerd. Een module van het thermochemisch energie opslag systeem is gebouwd en getest. Met de werkzame stof  $\text{Na}_2\text{S}$  zijn de experimenten uitgevoerd, is de productiemethode ontwikkeld en is kleinschalige industriële productie uitgevoerd. De betrouwbaarheid en levensduur van met name het vacuüm is onderzocht en bleek een kritische factor te zijn. Op basis hiervan is een redesign uitgevoerd, waarbij gebruik is gemaakt van de expertise en ervaring bij de productie van de Solabcool. Er is een industrieel te produceren TCES systeem opgeleverd, dat voldoet aan de markt wensen en eigen en dat industrieel te produceren is. Op dit moment is het complete systeem nog niet getest.

Specifieke conclusies zijn:

- Met de uitvoering van het SWeKOS2 project is de modulaire warmtebatterij als product weer een stap dichterbij productie en marktintroductie gekomen. Het bereikte TRL-niveau is 5+
- Er is gekozen voor de TCM  $\text{Na}_2\text{S}$  op basis van de voorgaande projecten en op basis van het feit dat deze werkstof verreweg de grootste energiedichtheid heeft.
- Het onderzoek bij TNO naar effectieve additieven om de stabiliteit, het uitgasen en het verwerken te verbeteren, heeft geleid tot het inzicht dat de producten van de producent BOOM nagenoeg hieraan voldoen zonder allerlei toevoegingen.
- In het SWeKOS2 project is overgeschakeld naar standaard fin en tube warmtewisselaars voor zowel de absorber/condensor als voor het bevatten van de  $\text{Na}_2\text{S}$ . De zogenaamde KTL-coating op systeemonderdelen is goed bestand tegen de inwerking van  $\text{Na}_2\text{S}$ .
- Voor de verwerking van  $\text{Na}_2\text{S}$  is een werkbaar protocol en productiemethode opgesteld. Het inbrengen van de  $\text{Na}_2\text{S}$  korrels tussen de vinnen van de warmtewisselaar verdient aandacht. Dit moet beter en effectiever uitgevoerd worden.
- Het numeriek rekenmodel in COMSOL van de TU/e is een belangrijk hulpmiddel om ontwerpvarianten van de warmtewisselaars mee door te rekenen. Voor het doorrekenen van warmtewisselaars gevuld met  $\text{Na}_2\text{S}$  blijkt dat belangrijke informatie inzake een aantal fysische en chemische parameters ontbreekt of onnauwkeurig bekend is, Dit komt omdat de TCM  $\text{Na}_2\text{S}$  een zeer lastige stof is om deel experimenten mee uit te voeren. Uit de verificatie analyse is wel gebleken dat het model goed voldoet om gevoeligheidsanalyses voor varianten van absorber/condensor en warmtewisselaars mee uit te voeren.
- In samenspraak met de industrie is het ontwerp van SWeKOS vereenvoudigd tot de modulaire opbouw door middel van Sorptie Energie Modules. Deze SEM is ontworpen en getest. De modulaire opbouw wordt gerealiseerd door de SEM in een rek met openverdelers te plaatsen. Het testen van de SEM heeft wederom laten zien dat realistische testen van full-scale systemen noodzakelijk is. Het ontwerp van de SEM is bijgesteld met verstevigingsribben om het vacuüm te kunnen weerstaan. Het numerieke rekenmodel is een belangrijk tool voor het begrijpen van de fysische fenomenen tijdens het proces van absorptie en desorptie.
- Een belangrijk resultaat was dat de nu beschikbare rechthoekige pannetjes niet goed vacuüm dicht te krijgen waren. De krachten bij zeer lage druk (dus groot drukverschil tussen binnen





en buiten) beïnvloeden met name de doorvoeren voor de aansluiting van de warmtewisselaar en absorber/condensor. Dit leidt tot een gevoelige en instabiele verbinding, die niet duurzaam vacuüm dicht te krijgen is. Op dit moment zijn het rechthoekige pannetje niet haalbaar. Daarom is een redesign uitgevoerd.

- Het redesign van de SWeKOS2 TCES maakt gebruik van de cilindrische vaten die bij de SolabCool gebruikt worden. Voor de pilotprojecten voor het Geothermica SorpTES project wordt hier fase 1 naar teruggeschakeld. In samenwerking met de industrie wordt de rechthoekige pannetje vorm van voldoende sterkte verder onderzocht om in fase 2 van het SorpTES project te kunnen gebruiken
- Het businessplan met business case business case inclusief eerste blauwdruk voor productie voor een SWeKOS2 systeem is uitgewerkt. Het lijkt goed mogelijk om een SWeKOS2 systeem tegen marktconforme prijs te produceren en in de markt te zetten, waarbij op termijn voldoende rendement wordt gerealiseerd om de investeringen in productie en marktontwikkeling terug te verdienen.

## 5.2 Aanbevelingen

Op basis van de resultaten van dit project wordt aanbevolen om de warmtebatterij (TCES) opgebouwd uit SEM's verder te ontwikkelen als een modulair systeem. Uit de marktanalyse blijkt dat een energieopslag capaciteit tussen de 15 en 30 kWh voor de residentiële sector een prima waarde is. Modulaire opbouw geeft ook de mogelijkheid om de utiliteitsector en de kleine industrie te bedienen.

De werkstof Na<sub>2</sub>S biedt voordelen door de grote energieopslag capaciteit. Goede vulling van de warmtewisselaar en optimaliseren van het aantal warmtewisselaars per volume-eenheid is noodzakelijk om dit voordeel goed te benutten.

Voor de effectieve productie van Na<sub>2</sub>S en het vullen van de warmtewisselaar met de Na<sub>2</sub>S kristallen verdient het aanbeveling om dit proces verder (grootschaliger) te industrialiseren. Het is noodzakelijk om stabiele Na<sub>2</sub>S te gebruiken en een constante en effectieve vulling van de vinnen van de warmtewisselaars uit te voeren,

Het numerieke rekenmodel (in COMSOL) is verder ontwikkeld en met metingen aan het systeem geverifieerd. Het rekenmodel is erg waardevol voor de dimensionering van een TCES-systeem. Op basis hiervan zijn vereenvoudigde optimalisatie modellen voor de warmtewisselaar en de absorber/condensor beschikbaar. Met een dergelijk ontwerp hulpmiddelen is de dimensionering van deze energie opslagsystemen in relatie tot de thermochemisch materiaal, afmetingen, gebruik en performance goed uit te voeren.

Het TCES-systeem als uitkomst van het SWeKOS2 project is nu gebaseerd op de vaten van het Solabcool product. Het verdient aanbeveling om de rechthoekige vacuüm bestendige pannetjes industrieel verder te onderzoeken. Toegesneden "pannetjes" bieden voordelen in de handling, de opslagcapaciteit en het modulair opbouwen van een TCES-systeem. Hiervoor is het gewenst om een goede industriële partner te betrekken

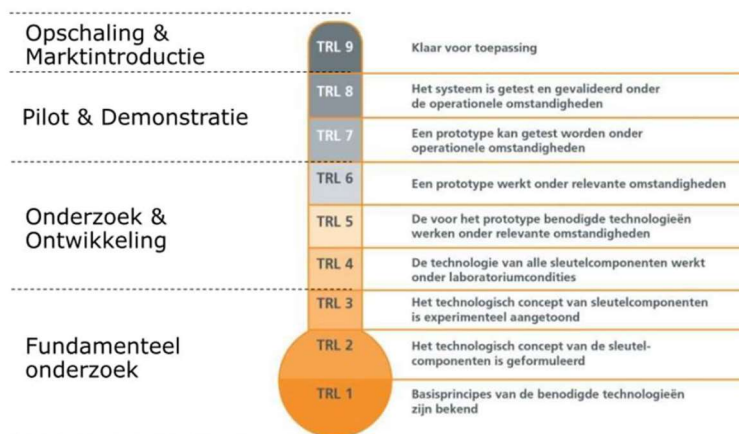
Nu het SWeKOS2 project is afgerond met een systeem met als TRL 5+ wordt het vervolg Geothermica project SorpTES in de vorm van 2 achtereenvolgende pilottrajecten de bouwsteen om TRL8 te bereiken. Hierna is het noodzakelijk om demonstratie in de markt te laten plaats vinden voor diverse markttoepassingen en in verschillende EU-landen,



## 6 Vervolg

Een volledig en compleet systeem is een belangrijke stap om zicht te krijgen op praktische zaken zoals afmetingen van het totale systeem, aansluiting en inpassing in de energie infrastructuur in een woning of kantoor, zicht te krijgen op de regel componenten en de regeling. In het SWeKOS2 project is aan het einde van het project een complete redesign van het SWeKOS2 TCES module gerealiseerd.

Binnen de looptijd van het SWeKOS2 project is TRL5+ gerealiseerd; de voor het prototype benodigde technologieën werken onder relevante omstandigheden. Het redesign is in belangrijke mate gebaseerd op de onderzoeksresultaten behaald in de serie TKI projecten en op de kennis en ervaring met het Solabcool systeem. Er wordt hierbij gebruik gemaakt van de kennis en ervaring van de door



Figuur 89 Definitie TRL niveau

ontwikkeling van de Solabcool, marktontwikkeling en productie.

De uiteindelijke doelstelling van het SWeKOS 2 project, als sluitstuk van de voorafgaande succesvolle projecten, was te komen tot een werkzaam, kosteneffectief en industrieel te produceren SWeKOS systeem. Na afloop van het SWeKOS 2 project moet dit duidelijk zijn. Het project is minder ver gekomen dan verwacht. TRL 6 is niet gehaald, TRL5 gepasseerd. Het vervolg project SorpTES in het kader van het EU programma Geothermica is eind 2022 gestart. Het Sorptes project zal de ontwikkeling van de TCES doortrekken naar TRL 7/8. In 2023 zal het systeem in pilottesten fase 1, worden beproefd als prototype onder relevante omstandigheden. Deze beproevingen vinden plaats in Oostenrijk bij de testloop hardware in the loop (university van Innbruck), bij ARES bv en bij een markttoepassing in Nederland.

In fase 2 van het Geothermica project zullen systemen getest worden onder operationele omstandigheden (TRL7).

Daarna kan bij positief resultaat, de demonstratie in de markt plaats vinden (TRL8). Demonstratie in de markt is belangrijk om en de markt te activeren voor interesse in dit product en de toegevoegde waarde te demonstreren en vervolgens de industrie de opschaling te kunnen laten verzorgen.



## Literatuur

- [1] Openbaar eindrapport energypads (TEID21504882), Henk de Beijer (RTB de Beijer), Camilo Rindt (TU/e) en Aart de Geus (Artenergy), afgerond TKI Urban Energy project, 21 maart 2018
- [2] Openbaar eindrapport energypads2.0 (TEUE 218001), Henk de Beijer & Janick Elferink (RTB de Beijer), Camilo Rindt & Karunesh Kant (TU/e), , Arie Kalkman& Ruud Cuypers (TNO) en Aart de Geus (Artenergy), afgerond TKI Urban Energy project, November 2020
- [3] Openbaar eindrapport SWeKOS (TEUE 117062), Henk de Beijer (RTB de Beijer), Jan Cnossen (Flamco bv) Camilo Rindt (TU/e), Elias Vlieg (Radboud Universiteit Nijmegen), Arie Kalkman& Ruud Cuypers (TNO) en Aart de Geus (Artenergy), afgerond TKI Urban Energy project, April 2021
- [4] Numeriek rekenmodel in COMSOL model TCM energie opslag systeem TCM bij de TU/e
- [5] GEOTHERMICA en DEI+ project voorstel SorpTES
- [6] Design of an evaporator/condenser for a thermochemical storage system, N.J. Laumen, master thesis TU/e, Department of Mechanical Engineering, May 20th 2021
- [7] integration of a thermochemical heat storage system into the Dutch built environment, C.de Nijs, master thesis TU Twente, June 2021
- [8] Experimental study into the performance of 18a tube-fin reactor including sodium sulfide as a thermochemical heat storage material, H.C. Leliveld, master thesis TU/e, Department of Mechanical Engineering, April 29th 2022,
- [9] De Solabcool, zie [www.solabcool.nl](http://www.solabcool.nl)
- [10] SWEAT vaste stof warmtepomp: [www.ares-rtb.nl/nl/referenties/sweat](http://www.ares-rtb.nl/nl/referenties/sweat) of [www.SWEATBV.nl](http://www.SWEATBV.nl)
- [11] MERITS, FP7 project agreement number: 295983, More Effective use of Renewables Including compact seasonal Thermal energy Storage, Coordinator: TNO , 2016. (confidential) [www.merits.eu](http://www.merits.eu)
- [12] Donkers, P.A.J., et al., A review of salt hydrates for seasonal heat storage in domestic applications. Applied Energy, 2017. 199: p. 45-68.



## Bijlage 1. Openbaar projectplan SWeKOS2

### Model projectplan TSE Gebouwde omgeving

#### Sorptie Warmte en Koude Opslag systeem 2 (SWeKOS – 2)

|                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|-------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Project titel                             | Sorptie Warmte- en koude-opslagsysteem - 2                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| Afkorting                                 | SWeKOS - 2                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| Mini samenvatting                         | <p>Om tot een compacte en verliesvrij warmte- en koude-opslagsysteem te komen als product is het noodzakelijk dat het systeem industrieel en kosten effectief te produceren is en dat het werkzame thermochemische materiaal (TCM) goed verwerkbaar is, de juiste energetische dichtheid haalt en stabiel is. Dit is een vervolgproject op TKI projecten SWeKOS en Energypad 2 waar het concept succesvol is getest met silicagel. Een marktconform systeem wordt in dit project op basis van een TCM ontworpen, gebouwd en beproefd. Er wordt gekozen uit een gemodificeerde Na<sub>2</sub>S en CaCl<sub>2</sub> en/of K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>. Deze keuze voor de TCM wordt uitgevoerd op basis van de prestaties in een full scale test reactor. Vervolgens wordt een compleet SWeKOS systeem ontworpen, gebouwd en getest.</p> <p>Het gedetailleerd rekenmodel voor een complete reactor module met TCM wordt geverifieerd en een ontwerphulpmiddel wordt opgeleverd. Tevens wordt de industriële productie in de vorm van een blauwdruk voor het productieplan opgesteld. De inpassing van het SWeKOS systeem voor een aantal verschillende (duurzame) energie installatie van woningen en gebouwen wordt in dit project onderzocht en voor een aantal varianten uitgewerkt. De business case wordt ontwikkeld waarmee investeerders kunnen worden benaderd. Het project resultaat omvat de aangetoonde maakbaarheid van een marktrijp absorptie warmte- en koude-opslagsysteem met als werkzame stof een TCM.</p> |
| Penvoerder                                | ArtEnergy bv                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| Contactpersoon                            | Aart de Geus<br>Tel: +31 6 22933237<br>Email: aart.degeus@artenergy.nl                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| Project partners                          | De Beijer RTB TNO<br>TU Eindhoven ArtEnergy                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| Subsidiabele thema                        | Doorontwikkeling van aardgasvrije arrangementen en ondersteunende processen/diensten, innovatie thema: 1 Ontwikkeling van integrale arrangementen voor renovatie                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| Locatie waar het project wordt uitgevoerd | Nederland, Duiven, Delft, Eindhoven                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| Totale project kosten                     | € 679.302                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| Gevraagde subsidie                        | € 477.402                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |



## Openbare samenvatting

### Aanleiding

Al geruime tijd wordt thermochemische opslag als een oplossingsroute met veel potentie gezien, vooral voor de inzet van duurzame energiebronnen. De voordelen zijn grote opslagdichtheid en vrijwel verliesvrij en met een groot energie besparend effect. Echter belangrijke hindernissen die nog genomen moeten worden om grootschalig toe te passen als volwaardig product zijn: stabiliteit, verwerkbaarheid en optimalisatie eigenschappen van een thermo chemisch materiaal, toegesneden industrieel en schaalbaar productieproces, lange levensduur en te hoge systeemkosten.

### Doel van het project

De TKI SWeKOS en Energypad 2.0 projecten zijn succesvol verlopen zodat een compleet systeem gebaseerd op een TCM nu gebouwd en beproef kan worden. De conclusie uit deze 2 projecten is dat een vervolgtraject kan worden ingezet waarbij de werkzame stof een thermo chemische materiaal (TCM) is (gebaseerd op absorptie) dat leidt tot een systeem dat een marktconforme kostprijs heeft, goed te produceren is en de gewenste energie-opslag parameters heeft (compact, 5 \* meer opslag dan water en verliesvrij op lange termijn). Tijdens deze projecten is ook gebleken dat een coating die bestand is tegen de werking van  $\text{Na}_2\text{S}$  goed is aan te brengen en over een langere tijd voldoende stabiel blijft. De productie van het rest gas  $\text{H}_2\text{S}$  van de TCM  $\text{Na}_2\text{S}$  vraagt een andere aanpak. Bij onderzoek bij TNO is een werkzame variant van  $\text{Na}_2\text{S}$  ontwikkeld die minder  $\text{H}_2\text{S}$  produceert. Deze gemodificeerde TCM wordt toegepast, evenals  $\text{CaCl}_2$  en/of  $\text{K}_2\text{CO}_3$ .

Het complete SWeKOS systeem met TCM wordt ontworpen, gebouwd en getest. Optimalisatie van het systeem en de productie wordt verder onderzocht zodat er een marktconform product met betrekking tot kostprijs, functionaliteit, duurzaamheid en productie kan worden gemaakt.

Ook wordt de inpassing van het SWeKOS systeem voor een aantal verschillende warmte en koude installaties van een woning en kantoor uitgewerkt inclusief hydraulische inpassing en verbindingen, regeling en sturing.

### Korte omschrijving van de activiteiten

- -Reactor module met TCM: testen met betrekking tot functionaliteit en prestatie Uitgerust met de energypad, coating en regeling
  - Uitgerust met gemodificeerd  $\text{Na}_2\text{S}$  (TNO) en  $\text{CaCl}_2$  of  $\text{K}_2\text{CO}_3$
  - Testen in lab met cyclus voor productie tapwater, verwarming en koeling: dus capaciteit en vermogen.
  - Rekenmodel verifiëren
- Optimalisatie van de inpassing van het SWeKOS systeem in een energie installatie in woningen en gebouwen
- Compleet SWeKOS systeem gemaakt, en beproefd in test opstelling bij RTB
  - Toegesneden beproeving bij TNO met focus op de functionele eigenschappen en prestaties van het SWeKOS systeem onder gedefinieerde omstandigheden. Testprotocol ontwikkeld.
  - Meetresultaten
- Industrialisatie: productie onderzoek, positionering en business case

### Resultaat

Een compleet sorptie warmte- en koude-opslagsysteem, inclusief regeling, sturing en besturing, wordt ontworpen, gebouwd en lab getest. Dit SWeKOS systeem wordt uitgerust met een werkzame TCM. Hiervan wordt 1 lab prototype gebouwd bestaande uit 1 module en 1 compleet systeem.

De test resultaten worden gebruikt om een gedetailleerd rekenmodel te verifiëren. Dit model wordt gebruikt om de optimalisatie uit te voeren en een compleet prototype te ontwerpen.

Er worden technische ontwerp en inpassing richtlijnen uitgewerkt zodat het SWeKOS systeem goed ingepast kan worden in een installatie van een woning of kantoor

Inzicht in productie proces, kostprijs, marktpositionering en duurzaamheid wordt verkregen.

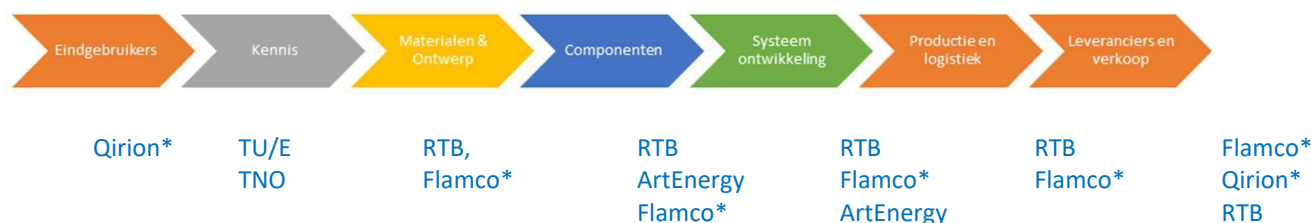


## 1 Deelnemers en derden

### 1.1 Overzicht van deelnemers

| Naam deelnemer                    | Type organisatie                                      | Rol in project                                                                                                                                                                                                                  |
|-----------------------------------|-------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ArtEnergy                         | Klein bedrijf                                         | Project Management, inbreng kennis fysica energie-opslag, analyse en modellering, regel strategie en inpassing in energiesysteem bijdrage productieproces en business plan                                                      |
| De Beijer RTB                     | Klein bedrijf                                         | Ontwikkelaar ,ontwerp van TCM sorptie reactoren en systemen en gebouw integratie. Ontwerpen en bouwen regelsystemen en Inpassing in Energiesystemen. Produceren opslagsystemen en prototypes, inbrengen thermo chemische kennis |
| Technische Universiteit Eindhoven | Onderzoeksorganisatie (niet-economische activiteiten) | Modellering reactor en validatie, opstellen ontwerpregels                                                                                                                                                                       |
| TNO                               | Onderzoeksorganisatie (niet-economische activiteiten) | Zorgen voor gemodificeerd Na <sub>2</sub> S. Kennis met betrekking thermo chemische materialen en inpassing van SWeKOS systeem in gebouw installaties.<br>Toegesneden systeemtesten SWeKOS systeem met dedicated testprotocol.  |

De hele keten is betrokken:



#### \*Betrokken keten partners

Flamco en Qirion (dochter van Alliander) zijn supporters van dit project en hebben beiden 200 uur aan personeels inspanningen toegezegd. In de bijlage zijn hun ondersteunings- en bijdrage brieven opgenomen.

### 1.2 Beschrijving deelnemers en essentiële uitbestedingsrelaties

#### De Beijer RTB B.V.



De Beijer Raadgevend Technisch Bureau B.V., gevestigd in Duiven en opgericht in 1982 door Henk A. de Beijer. De Beijer RTB is gespecialiseerd in innovatieonderzoek en het ontwikkelen van nieuwe product/markt combinaties. De Beijer RTB bestaat uit een groep technisch specialisten van





## TKI-project SWeKOS2 TGOM 120001

verschillende vakdisciplines met hoogwaardige kennis op het gebied van o.a. thermodynamica, energietechniek, productietechniek en industriële. Vooral op het gebied van duurzame energie heeft De Beijer RTB talrijke studies, onderzoekprojecten en productontwikkelingen en productie uitgevoerd. Enkele voorbeelden van succesvolle productontwikkelingen zijn de warmtepomp van Atag en Vaillant, en SunRidge (nokcollector) Monier Group, de Solabcool en de ClimateBooster die in eigen beheer geproduceerd en vermarkt worden, inclusief de opbouw van productie faciliteiten. RTB beschikt over eigen laboratoria en testfaciliteiten gespecialiseerd op thermodynamische en thermochemische producten. ([www.ClimateBooster.com](http://www.ClimateBooster.com), [www.SolabCool.nl](http://www.SolabCool.nl), [www.ares-rtb.nl](http://www.ares-rtb.nl))

De Beijer RTB heeft ruime ervaring met thermochemische warmteopslag en omzettingmaterialen door onder andere de volgende projecten SWEAT (ECN/NUON), TESSEL (TKI Energo), MERITS (FP7 EU), en de ontwikkeling en productie van SolabCool en is partner in MJP-CCO (TKI Energo) en TKI EnergyPad-2, SWeKOS en TKI Compas project.

Dit project versterkt de kennispositie van De Beijer RTB op het gebied van adsorptie en absorptie processen en producten. Het maken van een aantal producten op marktconforme schaal verrijkt de beschikbare kennis inzake het functioneren en geeft inzicht in de kritische punten bij het produceren van dergelijke producten.

De bijdrage van De Beijer RTB bestaat uit het ontwikkelen en bouwen van de reactor en systeem gebaseerd op TCM inclusief het productieproces. Specifiek worden hiervoor de componenten voor de reactor namelijk de absorber en condensor, de regelklep, het regelsysteem en de warmtewisselaar ontwikkeld.

De betrokken personen vanuit De Beijer RTB omvatten: een projectleider, product specialisten thermochemie (absorptie en adsorptie kennis) en een productie engineer. Daarnaast zullen de in-home lab faciliteiten worden ingezet.

## Artenergy BV



Artenergy B.V., gevestigd in Delft en opgericht door Aart de Geus in 2013.

Artenergy is werkzaam op het gebied van energie in de gebouwde omgeving en richt zich op het opzetten en uitvoeren van onderzoek, ontwikkeling en innovatie. Dit samen met vernieuwende kleine en grote Europese bedrijven. Specifiek op het gebied van energie-opslag wordt hier kennis en kunde ingezet. Het leiden van dergelijke innovatieprojecten wordt gecombineerd met gedegen kennis van het werkveld, de markt en de technologie.

Artenergy initieert en begeleidt nieuwe bedrijven op het gebied van energiebesparing en duurzame energie. Artenergy voert het projectmanagement uit, en voegt bovendien technisch-wetenschappelijke knowhow toe. Van energiesystemen, zonne-energie tot nieuwe businessmodellen.

Binnen het project richt Artenergy zich op het samenbrengen en evalueren van de componenten tot een compleet systeem inclusief regeling. Hierbij staat de praktische werkwijze voorop. Het systeem wordt in project een volwaardig TCM warmte opslagsysteem dat marktconforme specificaties (prijs, prestatie, levensduur, installatiegemak) heeft goed te produceren is past bij de eindgebruiker.



## Technische Universiteit Eindhoven

Technische Universiteit Eindhoven: EnergyTechnology (ET)



## TKI-project SWeKOS2 TGOM 120001

De groep ET van de TU/e heeft diverse projecten lopen op het gebied van energieopslag (o.a. via de TKI (CCO), Energy Pads, Energypads 2.0 en SWeKOS). Tevens wordt binnen de groep actief aan Europese projecten op het gebied van energieopslag deelgenomen. De groepen ET en TPM hebben recent gezamenlijk een geavanceerd lab geopend (het Darcy Lab) voor karakterisering en visualisatie van o.a. TCM materialen en reactoren. Tevens beschikt de groep over uitgebreide kennis en ervaring op het gebied van multi-scale modelering van opslag materialen. De universiteit heeft als doel om kennis te ontwikkelen die nodig is voor technologische doorbraken op lange termijn.

Metingen aan de reactor worden gebruikt om detail modellen te toetsen en door te ontwikkelen. Het betreft de doorontwikkeling van detail modellen voor het warmte- en stoftransport die gebruikt kunnen worden voor het vergroten van het fysisch inzicht op de kleine schaal en voor het ontwerp van een efficiënte reactor op grotere schaal.

Vanuit de TU/e zullen prof David Smeulders en associate prof. Camilo Rindt deelnemen. Zij zullen masterstudenten en postdocs inzetten ter ondersteuning van de toolontwikkeling, verificatie van het COMSOL-model van een reactor en het ontwikkelen van een ontwerp en systeem model



## TNO

Nederlandse organisatie voor Toegepast Natuurwetenschappelijk Onderzoek TNO (TNO, [www.tno.nl](http://www.tno.nl))

In lijn met de doelstelling van de Europese en Nationale overheid werkt TNO aan de thema's 'Urbanisatie' en 'Energie'. Binnen dit kader werkt TNO al ruim 15 jaar aan warmteopslag materialen, systemen en warmte- optimalisatietechnieken. TNO heeft samen met andere partijen verschillende testmodules voor thermochemische opslag ontwikkeld en het gebruik hiervan gemodelleerd en gedemonstreerd, onder andere in de volgende projecten: E-hub (EU), EINSTEIN (EU), TESSEL (TKI EnerGO), Icoon (nationaal), MERITS (EU), LOCOSTO (TKI JIP EBI), MJP CCO (TKI EnerGO) en CREATE (EU). Deze aanpak zal binnen dit project worden toegepast. TNO heeft ruime ervaring met thermochemische warmteopslag materialen en systemen in diverse projecten. Dit project past binnen de in samenwerking met TKI Urban Energy gepresenteerde roadmap en draagt bij aan een versterkte kennispositie van TNO op het gebied van warmteopslag, systeemintegratie, demonstratie, en een versnelling van het op de markt introduceren van compacte warmte-opslag systemen en heeft daardoor directe raakvlakken met het TKI Meerjarenprogramma Compacte Conversie en Opslag.

De bijdrage aan het project is dat TNO de gemodificeerde Na<sub>2</sub>S voor de reactor en het complete systeem zal laten produceren en leveren, een toegesneden testmethode voor het complete systeemopzet en performance testen aan het systeem zal uitvoeren. Op basis van deze testen zal TNO de meetresultaten analyseren en systeem studie uitvoeren.

De betrokken medewerkers zijn wetenschappelijk medewerkers op het gebied van energiesystemen en experts voor het uitvoeren van de testen met de emulator.

## **SUPPORTERS van het Project**



### **Flamco bv (betrokken supporter van het project)**

De Flamco Groep is onderdeel van Aalberts Industries N.V. en richt zich op de ontwikkeling, productie en verkoop van kwaliteitscomponenten voor HVAC-toepassingen. In meer dan 70 landen bieden wij succesvolle en innovatieve oplossingen voor o.a. woningbouw, utiliteitsbouw en duurzame energie. Het aanbod van de Flamco Groep bestaat onder andere uit:



Buffervaten, boilers en expansievaten voor warmwatersystemen.

T-plus koppelingen voor snelle uitbreiding van bestaande systemen.

Appendages en montagemateriaal voor zonne-energie systemen.

Rail, consoles en ander montagemateriaal voor het bevestigen en ophangen van buizen. Naast het hoofdkantoor in Nederland heeft Flamco wereldwijd nog twaalf verkoopkantoren. De productie vindt plaats in Europa en China.

Innoveren met het oog op duurzaamheid. Flamco denkt al meer dan vijftig jaar continu na over mogelijkheden om producten efficiënter, gebruiksvriendelijker, energiezuiniger en duurzamer te maken. De compacte warmtebatterij is een logische aanvulling en doorontwikkeling van het bestaande productportfolio. Dit geldt met name voor de buffervaten en boilers voor warmwater systemen.

Ontwikkeling van nieuwe kennis en inzichten met betrekking tot warmte opslagsystemen staan voor Flamco voorop en daarom wordt er in kind circa 200 manuur bijgedragen aan dit project. Flamco zal product engineers en productie engineers inzetten om tot goede werkzame en toepasbare producten te komen die op kosten effectieve wijze zijn te produceren. Daarnaast zal Flamco de wensen en eisen van hun klanten en de markt inbrengen.

# Qirion

## Qirion (betrokken supporter van het project)

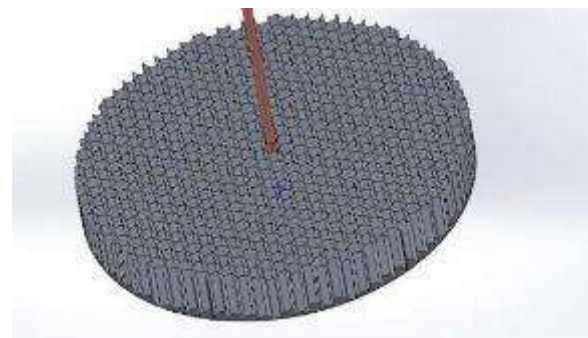
Voor de toekomstige energievoorziening is flexibiliteit noodzakelijk, terwijl dat bij aanleg van onze netten geen ontwerpvereiste was. Daarom investeert Alliander, oa via hun dochter Qirion, veel in onderzoek naar en experimenten met smartgrids en energie-opslag, waaronder thermische energie-opslag. Verschillende schaalniveaus worden hierin meegenomen, van home Energy- tot regionale gebieden. Uitgangspunt hierbij is het eindverbruik van zakelijke en particuliere gebruikers: warmte, koeling, verlichting, etc.

Qirion heeft aangegeven compacte en betaalbare warmtopslag systemen te zien als een belangrijke schakel om een betrouwbare energievoorziening te kunnen blijven garanderen, bij een verdere toename van duurzame energie in de energiemix. Om te borgen dat de wensen van eindgebruikers zoals Liander continue worden meegenomen in de productontwikkeling, zal Qirion een in kind inzet hebben in het project van 200 uren (

## 2 Achtergrond met doelstelling en resultaat

### 2.1 Aanleiding

In het klimaatakkoord is een energieneutrale gebouwde omgeving een belangrijke pijler om de CO2 doelstelling op korte en lange termijn te bereiken. In het MMIP4 (duurzame warmte en koude in de gebouwde omgeving(inclusief glastuinbouw)) wordt een belangrijke rol toegedicht aan energie opslag. Energie-opslag maakt het mogelijk om met een grillig duurzaam energie aanbod de variabele energievraag te kunnen voldoen. Een compact warmte/koude opslagsysteem dat een goede prestaties in de vorm van opslagcapaciteit, vermogen en efficiency koppelt aan kosten effectiviteit en schaalbaarheid. Zoals beschreven in het MMIP4 is het zeer gewenst om tot een warmtebatterij te komen. Nieuwe inzichten leiden ertoe dat de



Figuur 1 Energypad uit honeycombs



## TKI-project SWeKOS2 TGOM 120001

thermochemische opslag uitgebreid moet worden met de optie koelen en dat de optie seizoensopslag wordt vervangen door een opslag periode van enkele dagen tot weken. Een oplossingsrichting waaraan door veel partijen wordt gewerkt is het inzetten van thermochemische opslag materialen. Dit project is een vervolg op de succesvolle projecten Energypad, Energypad 2.0 en SWeKOS. Het SWeKOS project is succesvol afgerond en daarom wordt in deze vervolgfase een warmte/koude opslagsysteem gemaakt worden dat een TCM als werkstof heeft en voldoende opslagcapaciteit en vermogen heeft voor toepassing in een gebouw om op basis van het fluctuerend aanbod van duurzame warmte en een fluctuerende vraag van warmte en koude het gewenste comfort te bieden. In dit SWeKOS 2.0 project wordt een marktconform op TCM gebaseerd warmte en koude opslag systeem gemaakt inclusief regeling en sturing zodat inpassing in energie systemen eenvoudig mogelijk wordt. Dit op TCM gebaseerde thermische energie-opslagsysteem wordt dan veel compacter dan opslag in de bodem of in een boiler en energie kan gedurende langere tijd vrijwel verliesvrij opgeslagen worden. Binnen Europa is Nederland een van de forerunners op dit gebied. De consortiumpartners zijn bij de een groot deel van de lopende onderzoeksprojecten op dit gebied aangesloten.

### 2.2 probleemstelling

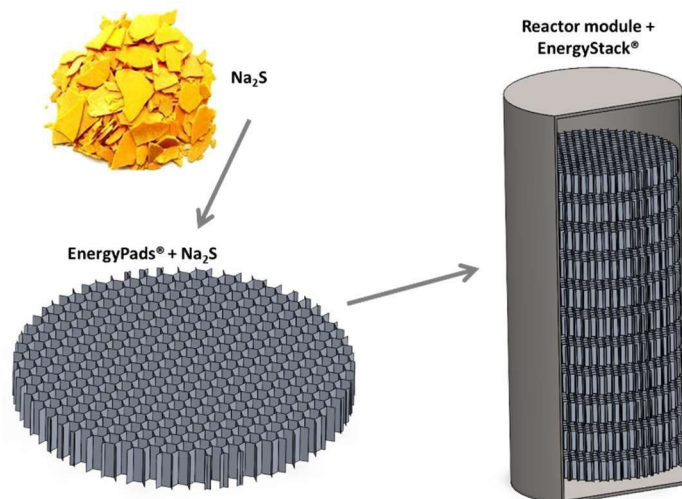
Voor het realiseren van een compacte warmte en koude opslag systeem zijn er momenteel een aantal thermochemische materialen (TCM) bekend en in ontwikkeling. Daarnaast moet ook echter de technologie, maakbaarheid en industriële productie van een compleet opslagsysteem gebaseerd op een thermochemisch materiaal verder ontwikkeld worden. In het per 1-11-2020 af te ronden SWeKOS project zijn zaken als een effectieve absorber en condensor, warmtewisselaar, regeling, kleppen in vacuüm, afmetingen en produceerbaarheid gebaseerd op een adsorptie materiaal (silicagel) gerealiseerd. In het per 1-11-2020 af te ronden Energypads 2.0 project zijn op basis van honeycombs energypads en stacks ontwikkeld. Nu moeten deze

ontwikkelingen voortgezet worden met

en werkzaam thermochemisch materiaal en op de schaal van een volwaardig markt conform product.

In dit voorstel worden drie essentiële technische hoofdvragen geadresseerd en opgelost:

- Hoe moet een SWeKOS systeem worden opgebouwd/gemaakt om tot de beste energetische prestatie met betrekking tot warmte en koude opslag, warmte en koude productie, capaciteit en vermogen te komen? (dit natuurlijk onder de voorwaarden van prijs, duurzaamheid en veiligheid)
- Op welke wijze kan een op absorptie warmte- en koude-opslagsysteem kosteneffectief geproduceerd worden?
- Op welke wijze wordt een dergelijk SWeKOS systeem effectief ingepast in de diverse warmte en koude systemen in de gebouwde omgeving?



Figuur 2 Reactormodule met honeycombstack en TCM



## TKI-project SWeKOS2 TGOM 120001

Deze ontwikkelingen zijn nodig om tot een kosten effectief compact, verliesvrij warmte- en koude-opslagsysteem te komen die voldoet aan de eisen van de markt en zijn gebruikers en inpasbaar is in een brede range aan energiesystemen.

### 2.3 Doelstelling

---

*Doelstelling van SWeKOS 2.0 project is:*

- *Een volwaardig sorptie warmte en koude en opslagsysteem met een thermochemisch materiaal als werkzame stof als volwaardig, marktconform product te maken en te testen. Volwaardig is hier gedefinieerd als kosteneffectief, flexibel inzetbaar, industrieel te produceren, met een hoge betrouwbaarheid en een lange levensduur*

*Het uiteindelijke doel is te komen tot een de realisatie van een markt conform en industrieel te produceren compact warmte- en koude-opslagsysteem.*

---

### 2.4 Aanpak

Om aan de doelstelling van het project te voldoen wordt op commerciële grootte een compleet op absorptie gebaseerd warmte- en koude-opslagsysteem met een TCM ( $\text{Na}_2\text{S}$ ,  $\text{CaCl}_2$  of  $\text{K}_2\text{CO}_3$ ) gerealiseerd. Het complete TCM systeem bestaat uit een aantal reactor modules met regeling, kleppen, sturing, elektronica en installatietechnische aansluitingen. Het werkzame absorptie materiaal is hierbij zal  $\text{Na}_2\text{S}$ ,  $\text{CaCl}_2$  of  $\text{K}_2\text{CO}_3$  zijn. Keuze wordt na werkpakket 1 gemaakt. Belangrijke randvoorwaarden zijn de afmetingen van het concrete systeem. Dit moet plaatsbaar zijn in of bij een woning of gebouw. Daarom moeten de afmetingen globaal 1 m hoog zijn bij 1,2 m. bij 1m., met een volume van circa  $1\text{m}^3$ . De energie technische eisen die binnen deze afmetingen voldaan moeten betreft het volgende: een energie inhoud van 60 kWh voldoende om een periode van een aantal dagen tot weken energie te leveren en een vermogen van ongeveer 5 kW. Het temperatuur niveau waarop de energie vrijgegeven wordt is  $60^\circ\text{C}$  voor tapwater,  $45^\circ\text{C}$  voor LT verwarming en  $15^\circ\text{C}$  voor koeling.

De aanvoertemperatuur voor het opladen van het SWeKOS systeem ligt tussen de  $60^\circ\text{C}$  en  $85^\circ\text{C}$ . Inpassing in warmte/koude installaties die in de gebouwde omgeving worden gebruikt moet voor een grote variëteit mogelijk zijn. Hierbij wordt gedacht aan inpassing in stadsverwarming, zon thermische systemen, warmtepomp en opwekking van warmte door PV stroom.

Het realiseren van een werkend systeem op ware grootte is dan ook bedoeld om aan te tonen dat een SWeKOS systeem met een TCM als werkzame stof technologische en productietechnisch haalbaar is, de laatste stap naar een systeem dat industrieel gemaakt wordt.

Dit project is het vervolg op het succesvolle SWeKOS project. Nu wordt in dit project de volgende stap in de ontwikkeling van een compacte verliesvrije warmte en koude opslag systeem gezet namelijk de ontwikkeling van een absorptie warmte- en koude-opslagsysteem op ware grootte met een geschikte TCM als werkstof



## 2.5 Resultaat

In het gedetailleerde projectplan staan per werk pakket de project resultaten vermeld. De belangrijkste resultaten worden hier vermeld.

- Reactor module met een TCM als werkzame stof, afgestemd op de markt en doelgroep getest.
- Gedetailleerd en gevalideerd rekenmodel voor reactor module met TCM en energypad.
- Doorontwikkeling deelcomponenten voor het systeem met een TCM als werkzame stof: coating, absorber/condensor, warmtewisselaar, regeling sturing en elektronica.
- Testen van SWeKOS 2, met de gemeten prestatie van het systeem onder verschillende test condities
- Vereenvoudigd ontwerptool complete systeem
- Concepten met sturing en regeling om SWeKOS in diverse energieleverende systemen van gebouwen in te passen
- Uitgewerkt businessplan met onderbouwing kostprijs, eindgebruikers wensen, markt, investering en productieproces

## 2.6 Vervolgproject

Bij een succesvol SWeKOS 2 project zijn nagenoeg alle ingrediënten aanwezig om met een compact en verliesvrij energieopslag systeem de markt op te gaan. De inpassing, regeling en sturing zijn dan getest en koppeling met energiesystemen is uitvoerbaar. Een nog belangrijk aspect is de werkzame TCM. De huidige geïdentificeerde TCM's hebben allen hun beperking. Het is belangrijk dat de zoektocht naar een optimaal TCM materiaal blijft doorgaan. Dit betreft aspecten als energiedichtheid, verwerkbaarheid, lange duur gedrag en corrosiviteit.

Na afronding van dit project is er een TRL7 systeem beschikbaar. In een pilot project kan dit systeem worden uitgetest onder verschillende product-markt condities.

Hierbij wordt bijvoorbeeld gedacht aan:

| Object                      | Warmtebron      | Functie    |
|-----------------------------|-----------------|------------|
| Zeer energie zuinige woning | stadsverwarming | verwarming |
| Energie zuinige woning      | warmtepomp      | koeling    |
| Monument                    | WP + zon        | tapwater   |
| Klein kantoor               |                 | ventilatie |
| Commercieel gebouw          |                 |            |

In een pilot project kan dan ervaring opgedaan worden met het installeren, functioneren en gebruik van een tiental systemen.