

TNO-rapport**TNO 2017R10136****Meerjarenprogramma 2015-2018
Thema Energie
Voortgangsrapportage 2016****Energie**
Princetonlaan 6
3584 CB Utrecht
Postbus 80015
3508 TA Utrechtwww.tno.nlT +31 88 866 42 56
F +31 88 866 44 75

Datum	21 februari 2017
Auteur(s)	Ir. F.M. Braal/Dr. J. Veltin - Geo-Energie Prof. Dr. G.B. Huitema - Duurzame Energie Ir. R.S. Westerga - Systeemintegratie A.J.Kalkman - Energo Ir. J. de Koning - algemeen
Autorisatie	Dr. M.J. van Bracht Managing Director Energie
Aantal pagina's Aantal bijlagen	33
Projectnummer	

Alle rechten voorbehouden.

Niets uit deze uitgave mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook, zonder voorafgaande toestemming van TNO.

Indien dit rapport in opdracht werd uitgebracht, wordt voor de rechten en verplichtingen van opdrachtgever en opdrachtnemer verwezen naar de Algemene Voorwaarden voor opdrachten aan TNO, dan wel de betreffende terzake tussen de partijen gesloten overeenkomst.

Het ter inzage geven van het TNO-rapport aan direct belanghebbenden is toegestaan.

© 2017 TNO

Inhoudsopgave

1	Inleiding	5
2	Vraaggestuurd programma “Geo-energie”	7
3	Vraaggestuurde programma’s Roadmap Sustainable Energy: <i>Duurzame Energie, Systeemintegratie</i>	19
3.1	Vraaggestuurd Programma Systeemintegratie	20
3.2	Vraaggestuurd Programma Duurzame Energie	23
3.3	Publicaties Roadmap Sustainable Energy	27
4	Vraaggestuurd programma “Energio”	29
5	Ondertekening	33

1 Inleiding

De transitie van een op fossiele brandstoffen gebaseerd energiesysteem naar duurzame alternatieven, de energietransitie, is de komende decennia één van de grootste uitdagingen wereldwijd. Deze komt voort uit de afspraken die in internationaal verband zijn gemaakt om de klimaatverandering tegen te gaan. Doelstelling is een reductie van de uitstoot van broeikasgassen in 2050 met 80-95% ten opzichte van 1990. Voor 2020 heeft de EU de zogenaamde Europa 20-20-20 doelstelling ontwikkeld: 20% reductie van broeikasgassen, 20% energiebesparing en 20% duurzame energie in 2020.

In het Akkoord van Parijs (december 2015) is in internationaal verband de bindende afspraak gemaakt om de aarde met niet meer dan maximaal 2 graden Celsius te laten opwarmen ten opzichte van het pre-industriële tijdperk en ernaar te streven om die opwarming te beperken tot 1,5 graad. Dit kan internationaal tot een versnelde aanpak van CO₂-reductie leiden.

Genoemde ontwikkelingen bepalen in belangrijke mate het energiebeleid van Nederland. Belangrijke aspecten van dat beleid zijn:

1. Om aan de Europa 20-20-20 doelstelling te voldoen heeft Nederland in 2013 een nationaal Energieakkoord afgesloten: energiebesparing met gemiddeld 1,5% per jaar die leidt tot 100 PJ energiebesparing in 2020, en een aandeel van duurzame energie van 14% in 2020 met een verdere stijging naar 16% in 2023. Nederland wil deze doelen bereiken door een brede set aan acties, gericht op reductie van het energiegebruik en de introductie van duurzame energiebronnen zoals wind, zon, biomassa, aardwarmte. Afspraken zijn onder meer gemaakt voor de ontwikkeling van windparken op zee, het stimuleren van lokale energie-initiatieven en het sluiten van oude kolencentrales.
2. Het bewaken van de energievoorzieningszekerheid. Door de problematiek in Groningen neemt het aandeel aardgas in de energiemix af. Dit betekent dat alternatieven noodzakelijk zijn, zoals het vergroten van de efficiëntie van de winning in de Noordzee en/of het vinden van alternatieven voor aardgas zoals het benutten van restwarmte en elektrificatie van door gas gedomineerde processen bij de industrie.

Genoemd beleid impliceert dat de weg naar 2050 in het teken zal staan van hybride energiesystemen, waarbij we verschillende fossiele en duurzame bronnen gecombineerd inzetten en de rol van fossiele brandstoffen gestaag afneemt en verandert van dominant naar dienend. Dit vereist grote technische en sociale innovaties in de maatschappij met name in de sectoren (energie-intensieve) industrie, transport en gebouwde omgeving en in de energiesector zelf.

Het thema Energie van TNO levert een bijdrage aan het realiseren van het beleid. Haar kennis, van duurzame bronnen (met name geothermie en zonne-energie), van lokale duurzame energievoorzieningssystemen (smart grids, warmte systemen en smart sustainable energy systemen) én kennis met betrekking tot de volledige CCS keten en energiebesparing, is zeer relevant voor de realisatie van de onder 1) genoemde doelen. De TNO-kennis over de Nederlandse ondergrond in combinatie met kennis op het gebied van exploratie- en exploitatietechnieken, on- en offshore en de gasinfrastructuur, is van belang voor het onder 2) genoemde aspect.

Tevens beschikt TNO over een brede portfolio aan economische, gedrags- en sociale wetenschappen, die noodzakelijk zijn voor de niet-technische innovaties die voor de realisatie van het beleid noodzakelijk zijn.

Het thema werkt samen met partijen uit het bedrijfsleven, de overheid, universiteiten en kennisinstituten in zowel nationaal als internationaal verband, door het initiëren van samenwerkingsverbanden, het vormen van consortia en het (mede) zorg dragen voor een innovatieve, creatieve werkomgeving voor talentvolle onderzoekers en toepassingsgerichte ontwikkelaars.

Vraagsturing/Topsector

TNO Energie neemt in Nederland actief deel aan de Topsector Energie. Met als vertrekpunt de innovatieagenda's van de Topsector, de strategische kennisagenda's van de departementen en de specifieke deskundigheid van TNO zijn vraaggestuurde kennisontwikkelings-programma's afgesproken. Dit zijn (bij voorkeur) publiek-private meerjarige onderzoekprogramma's waarin de meerwaarde van onze rol tot uiting komt.

- **Geo Energie:**
Oplossingsrichtingen en nieuwe technologie voor het op een verantwoorde, veilige en milieuvriendelijke wijze winnen van fossiele energiebronnen, het produceren van geothermische energie en de scheiding en opslag in de ondergrond van CO₂.
- **Duurzame Energie:**
Het slechten van de technische, economische en sociale belemmeringen voor het realiseren van een adaptief en flexibel duurzaam energiesysteem, met als doel het maximaliseren van de inzet van vernieuwbare energie tegen minimale investeringskosten.
- **Systeemintegratie:**
Concepten voor inpassing van duurzame energie in het energiesysteem naar een multicommodity systeem (gas, elektriciteit en warmte in de combinatie fossiel en duurzaam) vanuit het perspectief van producenten, gebruikers en netbeheerders.
- **Urban Energy-Energo:**
Technologieën voor installaties en gebouwen met als doel de energieconsumptie in de gebouwde omgeving drastisch te verlagen.

De inhoud van de VP's wordt op hoofdlijnen vierjaarlijks vastgelegd in meerjarenplannen die jaarlijks in overleg met de overheid en de Topsector Energie worden geactualiseerd. Voorliggend rapport doet in de hoofdstukken 2 t/m 4 verslag van de resultaten van de betreffende kennisontwikkelingsactiviteiten van TNO over het jaar 2016, het tweede jaar van de meerjarenplannen 2015-2018¹.

In 2016 heeft TNO een **company-brede Energievisie** ontwikkeld met als scope de periode 2016 t/m 2030. Deze visie is volledig in lijn met de energieagenda van Nederland zoals deze in december 2016 door het Ministerie van EZ is gepubliceerd. Het implementeren van deze visie zal invloed hebben op de kennisprogrammering in 2017 e.v.

¹ Voor het programma 2016 van de VP's wordt verwezen naar het TNO rapport: "MeerjarenProgramma 2015-2018, bijstelling 2016" van het thema Energie (TNO 2015 R11211).

2 Vraaggestuurd programma “Geo-energie”

Topsector Energie
Contactpersoon TNO: Ir. F.M. Braal, Dr. J. Veltin

2.1 Summary

The demand-driven program Geo Energy (VP-GE) focuses on the development of applicable knowledge, new technologies and innovative solutions for the exploitation of the subsurface in the energy system.

Most of the knowledge developed in this program has a variety of applications. From the traditional focus on the needs of the gas industry and its infrastructure, a shift has been made this year toward more activities aiming to facilitate the energy transition, and more specifically the optimal use of the Dutch subsurface to enable this transition. The different application areas being worked on are:
Innovative Exploration & Production, in which the focus has been on efficient exploitation of current Dutch gas resources via enhanced recovery of maturing fields, with a focus on reliability of the system and the detection of yet unexploited reserves.

Induced seismicity of gas exploitation, with modeling activities focusing on direct application to the Groningen field, but also to Geothermal production and associated hydraulic or thermal fracturing and storage of CO₂.

Well integrity assessment, via new monitoring techniques and the definition of mitigation solutions. New generation of wells

Carbon capture, usage and storage, focusing on reducing the cost of technologies available to enable CCUS uptake, as well as developing appropriate risk assessment and mitigation measure for safe implementation

Geothermal Energy and energy storage, for which activities focused on the discovery and characterization of heat sources, as well as the development of technologies to enable and optimize operations.

Small scale LNG, with activities aiming at accelerating the acceptance of LNG as a transport fuel by increasing its safe usage.

Gas quality, with a focus on more efficient biogas processes and the development of required knowledge for the adaptation of the gas distribution network to these different sources.

Public concern, where dialogues have been organized to ensure a good connection between the work performed by TNO and all relevant stakeholders

In preparation for the establishment of the research program in 2017, there has been consultation with key stakeholders, and TKI Gas and EZ. On the basis of this consultation, it was concluded that an even stronger shift in emphasis toward alternative (to gas production) uses of the Dutch subsurface is needed, compared to 2016.

2.2 Overview

The demand-driven program Geo Energy (VP-GE) focuses on the development of applicable knowledge, new technologies and innovative solutions for the exploitation of the subsurface in the energy system.

Traditionally, these developments have been very much aligned with the needs of the gas industry and its infrastructure. However, with the pending energy transition, the Dutch subsurface (and possibly also the gas transport network) is foreseen to play a different role in the energy system. From the subsurface sole use as a source of gas, it is foreseen to evolve into a heat source, as well as a buffering system and a storage place, either for energy (for example in the form of heat or compressed gases) or for waste (for example CO₂). The technical challenges associated to these new roles need to be addressed, and TNO has been asked to do so by developing the adequate knowledge base to be able to support this burgeoning new industry.

Most of the knowledge developed in this program has a variety of applications. For example, knowledge built-up on the efficiency of radial drilling for tight gas fields is now used in a European project to apply it to increase the efficiency of geothermal energy production, same goes for knowledge on scaling buildup in gas wells, now applied for geothermal wells. Knowledge built up in the Geiser H2020 project on induced seismicity for geothermal fields, was used to advise on seismicity induced by depletion of gas fields such as the Groningen field and can later be applied to energy storage. With this in mind, key developments pursued this year are described in some details below. In addition to this and in preparation for the establishment of the research program in 2017, there has been consultation with key stakeholders, and TKI Gas and EZ. On the basis of this consultation, it was concluded that an even stronger shift in emphasis toward alternative (to gas production) uses of the Dutch subsurface is needed, compared to 2016.

	Gas	Clean/renewable gas/LNG	CCUS	Geothermal / Energy storage	Re-Use & Decommissioning
Identification and characterization of subsurface sources & sinks/buffers					
Prod. optimization					
Forward modelling flow/thermal/geo(chemistry) processes					
Dynamic network modelling					
Innovative chemistry (separation, gas treatment, etc)					
Conversion of gas / energy					
Subsurface / infrastructure integrity					
Integrity & production monitoring					
Economic / system concepts Risk assessment					
New materials					

Table 2.1 Knowledge development with multiple application areas relevant to the energy transition

Vision and ambition

The current plan period (2015-2018) is characterized by a rapidly growing realization that the energy system should become more sustainable as quickly as possible. There is currently no clear mature, reliable and affordable renewable technologies available that can adequately and fully replace fossil resources.

Therefore, we will still remain dependent on it for the coming years. To accelerate the transition, the focus should be on maximum insertion of renewable resources and optimal use of the available knowledge, experience and infrastructure from fossil energy systems. The role of fossil fuels thus changes from dominant to serving. However, the pace at which this is possible is not yet clear and is influenced by many societal, technological and political aspects.

The knowledge developed within the VP Geo Energy in 2015-2018 serves two purposes:

1. Along with private parties that are associated with the TKI Gas, innovative solutions are being developed which are directed to the use of gas as a transition energy source.
2. Investigate the capabilities of the underground to be used in alternative ways, as a source and buffer of energy and storage of waste (i.e. CO₂).

Because there is significant overlap between the knowledge relevant to the TKI Gas and the knowledge focused on the policy support, it is not possible to make a clear split in the VP. Therefore, this program is aligned with both EZ and the administration of the TKI Gas.

It should also be noted that while specific technologies have been developed and demonstrated for given application areas (for example production optimization for depleting gas wells), these technologies are mostly applicable across the spectrum of applications possible and enumerated as Program topic in the table below. See also Table 2.1 for insight in application of knowledge across geo-energy domains.

Table 2.2: Program topics and relative budgets for the VP Geo-Energy in 2016

TKI line	2016		
	Program topic	TNO budget (%)	
Upstream Gas	Innovative E&P	30	40
	Well integrity	6	
	Public concern	4	
Groen gas vergisting	Gas Quality		8
Groen gas vergassing	--		--
Small scale LNG	Small scale LNG		4
CCUS	CCUS		30
Miscellaneous	Induced seismicity	6	18
	Geothermie	10	
	Energy Storage	2	
Totaal			100

Finally, the knowledge developed in the program lines above have not been reached by TNO in isolation. On the contrary, whenever possible, cooperation with other knowledge institutes (ex: SINTEF, ECN), industrial partners (ex: NOGEP, NAM, EBN), universities (ex: TU Delft, Utrecht University) and seeking as much as possible alignment with other international programs (ex: CLIMIT, Horizon 2020). Examples of this will be mentioned in the brief description of the work performed per program line below.

2.3 R&D topics for the 2016 program

2.3.1 Innovative Exploration & Production

Investments within this topics have focused on efficient exploitation of gas resources in The Netherlands. New knowledge has been developed along three lines: (1) Detection of yet unexploited reserves, especially offshore, (2) enhanced recovery and production optimization for production from mature fields, and (3) the safety and reliability of production systems (onshore, offshore, subsea).

Ad 1: Activities relating to the discovery of new reserves has focused on developing new insights from the use of bundles of data previously unused for this purpose, such as fundamental geological, geo-physical and geo-biological research activities. This data was integrated with more typical basin modeling and proxy techniques, leading to new integrated concepts to improve reserve discovery and field appraisals. More specifically, the following capabilities were developed:

- Development of an integrated approach to improved prediction of reservoir architecture in fluvio-deltaic systems.
- Demonstration of the potential to use clumped isotope analysis to reconstruct the precipitation temperature of carbonate minerals. This has direct application to improve prediction and recovery of reservoirs
- Development and validation of a stratigraphic forward modeling technique that allows to link reservoir geometry and internal properties to the large scale geological setting.
- Demonstration of the use of sedimentological, stratigraphic and palynological data to develop deposition models, with direct applications to sandstones in the Dutch subsurface.

Most of these activities found direct interest from the industry and will be further pursued in separate TKI projects.

Ad 2: Knowledge on optimization of production and field development planning was developed mostly within the research consortium ISAPP (TNO, TU Delft, Statoil ENI, Petrobras) and within a TNO-Statoil cooperation on life-cycle optimization. Within the activities of this program, the models were further developed for applications that are relevant to sustainable energy production. Some main accomplishments are

- Development of a workflow for optimization of production of gas fields while minimizing expected induced seismicity (applied to a Dutch onshore gas field and relevant for production of the Groningen field).
- Demonstration of optimization of CO₂ water-alternating-gas optimization (i.e. combination of CO₂ storage and hydrocarbon production optimization).
- Development of a workflow that allows for optimization of complex well geometries, such as currently pursued in the Horizon2020 project SURE,

aimed at improving geothermal systems by jetting stimulation.

On a single production well level, the topic of liquid loading was also addressed specifically. Experiments have been conducted and analyzed to evaluate the liquid loading process in annulus flow in a well as well as to evaluate the effect of large diameter tubing on liquid loading. The work will be followed up in a TKI project.

Ad. 3. Safety and reliability aspects were addressed for maturing assets. Key developments include:

- The capability to assess damages caused by noise sources in wet gases, typical of maturing gas assets. The resulting knowledge can be used for customers and strengthened cooperation with universities.
- The capability to study damages caused by multiphase flow with CFD and simple mechanical models, rendering promising results. This can be leveraged to the cryogenic processing industry in the Netherlands and abroad (LNG, LH2).
- Model-based asset health monitoring, showing limited observability for complex systems but looking promising for studying local effects. This will materialize into a first pilot in 2017 together with a major O&G operator.
- Improvement of our toolbox used in B2B projects, especially to address the issue of compressor induced pulsations in small-bore branches.
- Experiment and modeling activities on dense gas compression (such as CO₂) to prepare a follow up to dense gas JIP consortium.

2.3.2 *Induced Seismicity*

The earthquake problem in Groningen has shown that knowledge of induced seismicity is not sufficiently developed to establish a relationship between gas production and the consequent risk of earthquakes. The research questions are diverse and in part also fundamental.

The main objective is still the development of models that can give a reliable quantitative estimate of seismicity which is a result of the exploitation or storage/buffering of energy carriers (such as gas production/storage or geothermal production) or CO₂ storage. The activities being addressed are:

- The relationship between the movements in the subsurface and the consequent movements of the surface. The work has focused on developing a workflow to estimate the stress conditions and seismic activity. The method has been validated as far as possible in a real case and could be applied to CO₂ injection or heat production among other applications areas.
- The impact of hydraulic fracturing. The H2020 project M4ShaleGas, together with partners BGS, GFZ Potsdam, IFPEN and SINTEF focuses on making an inventory of induced seismicity related to shale gas operations, providing the means to validate models.
- Development of fast 3D geomechanical models to predict the effects of injection and depletion of gas fields.
- Development of a new passive seismic monitoring system in which the calibration is obtained from natural micro seismic.

2.3.3 Well Integrity

The Well Integrity activities are dedicated to address specific key market challenges requiring a flexible strategy. The main topics to be addressed included integrity logging, intelligent plug monitoring with downhole fiber sensor technology, multi-physic degradation modelling and modelling the risk of failure.

For 2016, the activities contributed to the following 2 aspects:

- 1) Well Integrity: how to assess well integrity and how to mitigate for further use or use for another application (re-use, such as for geothermal).
- 2) Next Generation Well Construction: in order to reduce the total cost of ownership of a well, what are alternatives to the current well design and can a “proof of concept” be designed based on the functional requirements of a well.

The work resulted in the following:

- A roadmap on well integrity was defined including a list of issues to be addressed and associated research proposals.
- A well integrity assessment methodology was defined for the life cycle of a well, including mitigation measures to be taken.
- Ideas on building while drilling were investigated and a “proof of concept” was developed. The results are promising and more effort is required to determine its feasibility.

The knowledge developed resulted in a new TKI project “Plugging Wells by Enhanced Formation Ductility” and consultancy activities for NOGEP. Together with the industry TNO initiated based on the knowledge around natural formation sealing the construction of an industry consortium to work on Next Generation Well Constructions and Well Abandonment with Natural Formation Sealing. EU funding was requested and is under consideration among member countries.

2.3.4 Carbon Capture, Usage & Storage

CO₂ capture, transport, usage and storage (CCUS) plays a significant aspect in roadmaps to decrease CO₂ emissions in NL as well as in the rest of the world. Although the development of CCUS in Europe is still limited, it is expected to grow in the years to come. This perspective motivates energy producers (who produce large quantities of CO₂), industries (e.g., steel and cement industry), and oil and gas operators (who exploit fossil fuels and are regarded to be potential operators of future storage sites) to maintain or even enlarge their knowledge base in CCS and to engage in international research projects, in order to be prepared to start up large-scale CCS operations.

In 2016 investments on this topic have mainly focused on:

- Providing knowledge that will be critical to large CCS demonstration projects.
- Providing breakthrough technologies to reduce the cost of CCUS.

The first objective was mainly achieved via four European FP7 and H2020 projects which study various aspects of CCUS. Main activities in these projects include:

- The study and assessment of potential mitigation measures in the case of CO₂ leakage during storage operation (MiReCOL).
- The development of potential models to establish a CO₂ infrastructure in Europe (Gateway).
- The development of a risk data base for the assessment of a Underground Coal Gasification (UCG) demonstration project in collaboration with Romanian partners (Coal2Gas).

- Sharing of relevant knowledge among key CCS research institutions and industrial players in Europe. Through such networks, TNO is seeking to hold its and Netherlands international position and reputation on the topic of CCS (CCS Network).

Furthermore, TNO is also engaged in the DELPHI project, a collaboration with TU Delft, within which novel methodologies to assess and analyse seismic data in order to better detect CO₂ in the subsurface are studied.

The second objective focused on new technologies, including:

- Integrated CCU with algae, in which tests were successfully conducted in a reactor for controlled continuous feeding of algae with CO₂. The process was patented and will be demonstrated in a project in Aruba.
- Aerosol droplet generation. A setup was built and commissioned that reproduce the conditions of the flue gas in a power plant to be able to test in the lab current and new CO₂ capture technologies (e.g. with amines). This setup is unique and will be used in an ERA-ACT project entitled ALIGN-CCUS.
- Plurionics for CO₂ capture. Experiments were conducted to investigate the potential of plurionics to lower the cost of amine regeneration. The potential was demonstrated and quantification of the gain will take place in 2017 to determine the viability of the technology.

The acquired knowledge will be used in a number of follow-up research program, leveraging on consortia of industries and research partners (ERA-ACT, CLIMIT or H2020 initiatives).

2.3.5 Geothermal Energy and Energy storage

Geothermal energy is seen in the Netherlands as an important option for the transition to sustainable energy in the short term (2020). TNO is in an ideal technological position (eg integrated value chain approach, information base, oil and gas data assimilation, geosciences, fluid dynamics and integrity knowledge) to help companies and the government with the development of geothermal energy. In that optic, research topics were sought after with many of them starting in 2016.

An important aspect in the development of geothermal energy is to improve exploration methods (pre-drill risk reduction). This development is part of the EU partnership IMAGE. These are advanced methods of exploration (passive seismic imaging, thermal anomalies as predictor for fracture permeability, ultra-deep geothermal exploration in the Netherlands) evaluated based on data from several European geothermal sites. The project was finalized with a number of comparative studies showing the capability of a number of techniques to appraise and model geothermal sites.

A second line in the knowledge relates to technology for the optimization of the heat production. Different methods of stimulation are evaluated for potential effectiveness, among which Radial Jet Drilling. This is a technique from the oil & gas industries which is being studied in EU project SURE for its effectiveness in geothermal heat production.

A third important aspect is the reduction of the cost of developing and maintaining a geothermal site. In this context, research into the feasibility of composite casings has started in the EU project Geowell in particular with the ambition to achieve significant cost reduction for holes at depth of 1500 m or beyond. Research is also being conducted to demonstrate soft stimulation methods to maximize heat recovery within the EU project DESTRESS.

Finally, it is very important for the development of geothermal energy to understand the risks of induced seismicity. On this topic, there is some overlap with the activities described in 1.3.2.

With these activities, embedded in a European framework, TNO can bring knowledge at international level. On that basis, optimal support can be given to the development of many local (SME) initiatives and the large industrial / regional projects.

2.3.6 *Small Scale LNG*

LNG is getting increased attention as a transport fuel and many LNG fueling stations are already in operation, with many more planned to be built in the coming years. It is one of the pillars of the clean fuel strategy in Europe. LNG is particularly suited for long-distance road freight transport for which alternatives to diesel are limited. It enables meeting the stringent pollutant emission limits of future EURO VI standards, as well as the new limits for sulphur content in marine fuels.

The main goal of the LNG activities performed in 2016 has been to provide the knowledge require to improve its safe operation. For this purpose, computational models and experimental facilities have been developed.

The models developed allow to:

- Predict the pressure relief valve opening time of an LNG tank that is subjected to external fire. This is critical to determine a “safe approach time” for fire response teams in case an LNG tank is subjected to external fire.
- Model the behavior of composite tanks under low-velocity impact. This is very relevant for developing and certification of new pressure vessels. In the Netherlands there are many companies already active in composite tank manufacturing and investigating the potential for cryogenic composite tank manufacturing. If developed further, such impact model can assist them to reach their goal.

Complementary to these models, experimental setups were built that allow for:

- Testing of materials and small size assemblies at temperatures from +21 to as low as -196°C. It can also be used for sensor developments such as Fiber Bragg Gratings sensors to detect temperature variations.
- A multi-axial sensor to be used for LNG transfer hose testing at coupled motions (such as bending and twisting).

The models and setups are already used to answer industry questions. The impact model should be developed further and validated against other computational and/or experimental data.

2.3.7 Gas Quality

Technology development on gas quality has focused on three innovation lines:

- 1) Biogas upgrading: improving, i.e. more efficient and cheaper, and expanding (new, innovative) upgrading processes to meet the specifications of the biogas application (grid injection, transportation fuels, CHP generation).
- 2) Modeling activities for the dynamic transport of gases in a distribution network that is able handle new types of gases, with varying composition
- 3) Emission reduction and valorization: in general the reduction of all kind of emissions (H₂S, methane).

Some key results obtained in the related activities are:

- Based on experimental work, some insight has been gained on the performance of pluronic type of surfactants to remove terpenes and siloxanes from biogas. The results showed a good performance, and are actually very promising to continue the development of a terpene removal process based on this technology.
- A novel technology has been identified for the separation of nitrogen from methane, namely simulated moving adsorption bed technology (SMB). Nitrogen is one of the contaminants present in biomethane, whether it is produced in landfills or biodigesters. The separation between methane and nitrogen is typically not very efficient for relatively small scale applications such as biogas or small gas fields, and this new technology could fill that gap. Further development will take place in close cooperation with the industry
- The potential for various H₂S removal technologies for application in biogas production was also assessed. Biological methods and electrochemical methods were identified as most applicable and cheapest. The electrochemical process ('Mizuta') was selected for further research due to relative simplicity, minimized waste production and low OPEX. This process has a high potential for application on H₂S removal from biogas.

The knowledge acquired in these activities will be further developed with industrial partners. The grid modeling activities are also being performed in close discussion with Alliander.

2.3.8 Public concern

TNO wants to employ innovations, both technical and non-technical, to accelerate the transition to a fully sustainable energy supply and reduce CO₂ emissions. However, there is no proper forum for industry, science, NGOs and policy makers in the Netherlands where the debate on the role of fossil fuels in the light of the energy transition is being held. We see this as an Achilles heel for the smooth running of the transition. Being smarter with fossil sources and ultimately making this form of energy redundant is a mix of ideals, and economical and technological constraints. To highlight the(new) role of fossil fuels in the energy transition in the Netherlands, NW Europe and the rest of the world, position papers were written and discussion panels/information sessions are being organized by TNO for various stakeholders. These activities contribute to the national and international discussion on energy transition and positions TNO and The Netherlands as a key player in the transition, with the ambition to make the Dutch North Sea a showcase for implementation of new energy policies and emission reduction targets

2.4 Publications

In the table below, the most important output of the VP is summarized. An excerpt of the relevant peer review publications and thesis is also listed below the table for reference.

Table 2.3: *Output of the VP Geo Energy per category*

Type of publication	Number	Subjects
Peer reviewed Publications	10-15	Often in large collaborative projects.
Presentations/Conference Papers	~50	Presentation and publications often with international focus
Reports	~30	TNO reports and reports to specific stakeholders

Peer reviewed papers:

- B.F. Paap and T.P.H. Steeghs, 2016, Calibration of a local magnitude relationship for micro-seismic events using earthquake data, *Geophysics*
- Seyfang, B. · Aigner, T. · Munsterman, D.K. · Irmen, A., An integrated workflow to assess the remaining potential of mature hydrocarbon basins: a case study from Northwest Germany (Upper Jurassic/Lower Cretaceous, Lower Saxony Basin), *International Journal of Earth Sciences*, 1-31, 2016
- J.M. Verweij, T.A.P. Boxem, S. Nelskamp, 3D spatial variation in vertical stress in on- and offshore Netherlands; integration of density log measurements and basin modeling results, *Marine and Petroleum Geology*, Volume 78, December 2016, Pages 870–882
- Leeuwenburgh, O., Meekes, S., Vandeweyer, V., Brouwer, J., Stochastic history matching to time-lapse seismic of a CO₂-EOR project sector model, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 54, pp 441-453
- Juez-Larré, J., Remmelts, G., Breunese, J.N., van Gessel, S.F., Leeuwenburgh, O., Using underground gas storage to replace the swing capacity of the giant natural gas field of Groningen in the Netherlands. A reservoir performance feasibility study, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 145, pp. 34-53
- Stordal, A.S., Szklarz, S.P., Leeuwenburgh, O., A Theoretical look at Ensemble-Based Optimization in Reservoir Management, *Mathematical Geosciences*, 48 (4), pp. 399-417
- Waldmann, S., Hofstee, C., Koenen, M., Liebscher, A., Neele, F., Physicochemical effects of discrete CO₂-SO₂ mixtures on injection and storage in a sandstone aquifer, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 54, pp. 640-651
- Brunsvold, A., Jakobsen, J.P., Mazzetti, M.J., Eickhoff, C., Neele, F., Key findings and recommendations from the IMPACTS project, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 54, pp. 588-598
- Karas, D., Demić, I., Kultysheva, K., Neel F. Pluymaekers, M., Orlić, B., First field example of remediation of unwanted migration from a natural CO₂ reservoir: The Bečej Field, Serbia, *Energy Procedia*, 86, pp. 69-78
- Koenen, M., Griffioen, J., Characterisation of the geochemical heterogeneity of the Rupel Clay Member in the Netherlands, *Geologie en Mijnbouw/Netherlands Journal of Geosciences*, 95 (3), pp. 269-281
- Vis, G.-J., Verweij, H., Koenen, M., The Rupel Clay Member in the Netherlands: Towards a comprehensive understanding of its geometry and depositional environment, *Geologie en Mijnbouw/Netherlands Journal of Geosciences*, 95 (3), pp. 221-251

Thesis:

- Ankit Mittal, *Parallelization Of An Experimental Multiphase Flow Algorithm*, MSc Thesis, TU Delft Applied Mathematics, 2016
- Imran Ali, *Numerical Simulations to Reproduce Experiments on Capillary Liquid Uptake in Core Samples*, Master Thesis, Universität Stuttgart - Institut für Wasser- und

Umweltsystemmodellierung Lehrstuhl für Hydromechanik und Hydrosystemmodellierung,
11 August 2016

- F. Sanna. *Interaction between Flow Induced Pulsations and Multiphase Flows in Gas Liquid Systems*. PhD Thesis.
- Bos, E. Cyclic aspects of Paleocene coals from the Powder River Basin, Montana, USA. An Integrated approach using organic matter and stable isotope analysis, Msc Thesis, VU Amsterdam
- M. Benhsinat, Brine transport in sedimentary basin over geological time scales, Msc thesis, University of Göttingen, Germany

3 Vraaggestuurde programma's Roadmap Sustainable Energy: *Duurzame Energie, Systeemintegratie*

Inleiding

De Roadmap Sustainable Energy van TNO is gericht op de transitie van een fossiel naar een volledig duurzaam energiesysteem waarbij de transitie de benodigde systeemveranderingen omvat op basis van de wisselwerking tussen mens en systemen. Hiermee is de transitie een combinatie van technologie, economie en wet/regelgeving. Gestreefd wordt naar een optimalisatie van de toename van duurzame bronnen en een flexibele ontkoppeling van energiebron en energietoepassing. Voor deze roadmap heeft TNO de vraaggestuurde programma's 'Sustainable Energy' en 'System Integration' gedefinieerd. Deze programma's zijn met elkaar verweven.

Doel 2015 -2018

De vraaggestuurde programma's richten zich specifiek op de duurzame aspecten van de transitie van hybride energiesystemen, met name op de innovaties voor flexibele inzet van duurzame bronnen (o.a. zon PV in gebouwde omgeving), opslag en conversie, gecombineerd met sociale innovaties. Het gecombineerde programma ontwikkelt voor een breed scala aan belanghebbenden de middelen voor het faciliteren en stimuleren van de planning, ontwerp, uitrol en operationalisatie van hybride energiesystemen.

Benodigde stappen

Het programma onderkent als innovatiestap voor Hybride Energiesystemen het operationaliseren van hybride energiesystemen, in het bijzonder voor de componenten: productie, consumptie, opslag, transport, conversie, integratie en management van zowel elektriciteit, gas en warmte. Voor Integratie van gebouwde omgeving in het hybride energiesysteem is systeemoptimalisatie een beslissende innovatie. Ten slotte, voor Sociale innovatie en maatschappelijke inbedding zijn de interacties tussen beleid en technologie bepalend.

3.1 Vraaggestuurd Programma Systeemintegratie

Topsector Energie
Contactpersoon TNO: Ir. R.S. Westerga

3.1.1 Samenvatting

Het doel van dit programma is het ondersteunen van (investering) / beslisprocessen door belanghebbende partijen over regionale en nationale systeemtransities. Het programma ontwikkelt daarvoor middelen die de mogelijkheden, kansen en barrières in deze transities inzichtelijk maken. De aanpak is gericht op een integrale benadering van de ontwikkelingen en interacties van aanbod van energie, de behoefte aan energie en de infrastructuren met opslag en conversiefuncties. De aandacht ligt vooral bij de combinatie van innovaties in technologieën, wet- en regelgeving en economische aspecten en bijbehorende waardeketens. Naast deze planmatige aanpak ontwikkelt het programma ook operationeel gerichte middelen voor het beïnvloeden van energiestromen in het systeem.

Systeemintegratie bij TNO bestaat uit de volgende onderwerpen: (1) Ontwikkeling van beslis-ondersteunende tooling (agent based modelling, simulaties) en processen voor gebiedsanalyses (data verzameling, stappenplannen) in de lijn "Planning, Modellen en Simulaties", (2) Operationeel in te zetten technologieën voor het beïnvloeden van energiestromen in energiesystemen, zowel in een markt en handel gedreven uitwisselen van energie, alsook in fysieke energiestromen (lijn "Control Architectures & Deployment" voor warmte, elektriciteit en combinaties daarvan). In deze twee lijnen zijn in 2016 belangrijke stappen gezet in de doorontwikkeling van de instrumenten voor planmatige en modelmatige analyses van energiesystemen op regionaal gebied (DIDO agent based model). Daarnaast is in dit jaar aandacht besteed aan de doorontwikkeling van de operationele technologieën PowerMatcher en HeatMatcher en de onderliggende IT infrastructuur die nodig is voor het opschalen van deze technologie. Maar ook aan de marktmodellen is gewerkt, zowel op het vlak van regelgeving als op het vlak van energie handel. Het transitiepad en de manier waarop dat bewandeld kan worden met betrokken belanghebbenden is neergezet met de 'orchestration innovation' methodologie. Samenwerking is opgezocht met ECN en de Energy Academy, wat geresulteerd heeft in de oprichting van ESTRAC.

In 2017 zullen de ontwikkelingen van modellen en tools worden voortgezet, evenals de middelen voor orkestratie van energietransitie op regionale schaal. De digitalisering van energie is daarbij een rode draad voor het hele programma.

3.1.2 Highlights

In 2016 heeft het programma systeemintegratie de lijn doorgezet vanuit 2015, gericht op de energietransitie. De combinatie van trajecten die zowel technologisch als economisch en sociaal-maatschappelijk van aard zijn, is een lijn die sterk is doorgezet. In wezen is het programma samengesteld in twee hoofdlijnen: de 'laws of economics' gecombineerd met de 'law of physics'. De primaire aandacht is in 2016 van operationele technologie (PowerMatcher, HeatMatcher, Multi Commodity Matcher, EFI (Energie Flexibiliteits Interface)) gegaan naar de bredere invulling onder de vlag van de digitalisering van energie, en daarbij zijn ontwikkelingen toegevoegd die te maken hebben met de concepten en instrumenten voor

modelmatige en planmatige analyses van de transitie. Enkele noemenswaardige ontwikkelingen zijn de volgende:

- 1 Realisatie van de hybride systeemintegratie faciliteit (HESI) in Groningen. Vanaf 2017 wordt het mogelijk om de faciliteit in te zetten voor de opschaling van innovaties en technologieën die van belang zijn bij de energie transitie. Het hybride aspect komt naar voren in de combinatie van verschillende energiedragers en de combinatie met de digitalisering van energie. De HESI faciliteit is fysiek onderdeel van het EnTranCe terrein in Groningen, beheerd door de HanzeHogeschool.
- 2 Het oprichten van het samenwerkingsverband ESTRAC (Energy Systems Transition Centre), met ECN en de Energy Academy Europe. De governance structuur is neergezet door deze founding partners en de eerste voorstellen voor onderzoekstrajecten zijn gemaakt in overleg met de eerste associate partners.
- 3 Studies naar regels voor regulering in de energiesector worden steeds belangrijker. Programmaverantwoordelijkheid in de energiesector is hierbij onder de loep genomen. Deze studies zijn het voorbeeld voor de fase waarin de transitie nu zit: het wegnemen van barrières die niet technologisch van aard zijn. Ook is een zienswijze gemaakt op de metamorfose van het energiesysteem.
- 4 In samenwerking met GasUnie, GasTerra, Alliander en DNV-GL is een innovatief concept ontwikkeld voor het verhandelen en afhandelen van gelabelde energiestromen voor kleine en grote partijen: EN|Square
- 5 In 2016 is innovatief onderzoek gedaan naar de planmatige verkenning van energietransities en hoe de juiste stappen zijn te definiëren voor het transitiepad. Daarvoor is een vervolg gegeven aan de ontwikkeling van TNO's unieke agent based modellen voor energietransities. Deze modellen zullen de komende jaren verder worden ontwikkeld en toegepast op cases voor nationale en regionale overheden. Daarnaast zijn stappen gezet in het ontwikkelen van een methodische aanpak van energietransities in regio's: orchestration innovation for energy. In dezelfde lijn is gewerkt aan een beoordelingskader voor proeftuinen en pilots. Met dit instrument is vast te stellen waar kennis en kunde voor is ontwikkeld, en waar de blinde vlekken liggen. Al deze ontwikkelingen dragen bij aan beslisprocessen van externe partijen die betrekking hebben op regelgeving, beleid, technologie keuzes. Hieronder valt ook de maatschappelijke kant over de toegevoegde waarde bepaling van maatregelen in en door de energiesector.
- 6 De ontwikkeling van modellen en simulaties voor HeatMatcher toepassingen, met automatische configuraties en optimalisaties. Hieruit voortvloeiend zijn nieuwe potentiële standaarden ontwikkeld voor het identificeren van topologieën van warmtesystemen en configuraties van heatmatcher regelsystemen.
- 7 Eerste verkenningen naar de toepassing van blockchain technologieën in de energiesector.
- 8 Ontwikkeling van de TNO visie op energie. In acht speerpunten is de hele visie voor het thema energie neergezet. De lijn die daarin is neergezet is mede sturend voor de invulling van de roadmap sustainable energy bij TNO.

3.1.3 Actualisatie/dynamiek

In 2015 was de programmering binnen het VP Systeemintegratie gericht op specifieke technologieën en toepassing voor opslag en conversie, met daarnaast een aanbesteding voor specifieke onderwerpen van systeemintegratie. Op basis hiervan is het thema verder aan de slag gegaan om de lijn verder uit te zetten. In 2016 is er sprake van een voortzetting van de haalbaarheidsstudies voor opslag en conversie met daarnaast een aantal benoemde onderwerpen die het thema zal uitzetten in de markt voor beantwoording. De lijnen die TNO in 2015 heeft neergezet, en in 2016 zijn uitgevoerd, zullen worden doorgezet in 2017.

Tabel 3.1: TNO-VP Systeemintegratie: Onderwerpen 2016 m.b.t. TS Thema Systeemintegratie

TS Themalijn	2016			
	Programmaonderdeel	budget (%)	Realisatie 2016	Besteed (%)
Systeemintegratiestudies	Techno economische studies	8	Ontwikkeling technoeconomische modellen en methodieken voor orkestratie	11
Systeemintegratie onderwerpen	Systeemmodelontwikkelingen en simulaties van fysieke infrastructuren; realisatie van HESI (Hybrid Energy System Integration) faciliteit	92	Realisatie HESI faciliteit, oprichting ESTRAC en ontwikkelingen in planmatige en operationele aanpak van energie transities in regio's.	89
Totaal		100		100

3.2 Vraaggestuurd Programma Duurzame Energie

Topsector Energie
Contactpersoon TNO: Prof. Dr. G.B. Huitema

3.2.1 Samenvatting

In het TNO Vraaggestuurd Programma Duurzame Energie wordt gewerkt aan oplossingen die door middel van ontwikkelde energietechnologieën op grootschalige wijze en op een kostenefficiënte manier flexibiliteit in energiesystemen kunnen aanbrengen. Door voldoende beschikbare en aantrekkelijk geprijsde energieflexibiliteit is de transitie naar een duurzame energievoorziening te versnellen. Belangrijk naast het beschikbaar hebben van geschikte energieoplossingen is het als één systeem kunnen samenwerken van verschillende technologieën en toepassingen. Hierbij geldt een wisselwerking tussen een stap in grootschalige uitrol en kostenefficiëntie, gevolgd door een integrerende systeemstap. Deze doelstelling van een Smart Energy System als één geheel wordt benadrukt door een nauwe samenwerking met het VP Systeemintegratie binnen de TNO Roadmap Sustainable Energy.

Binnen de Topsector Energie werkt TNO intensief samen met de TKI Urban Energy. In het bijzonder wordt binnen dit VP bijgedragen aan de TKI programmalijnen: (1) Multifunctionele bouwdelen (energieneutraal maken van de gebouwde omgeving door grootschalige implementatie van duurzame energiesystemen), (2) Energieregelsystemen en –diensten (verhogen van de waarde van lokaal opgewekte duurzame energie met behulp van energieregelsystemen) en (3) Flexibele energie-infrastructuur (verhogen van de bijdrage van de energie-infrastructuur aan duurzaamheid door grotere flexibiliteit in het energiesysteem).

Langs bovengenoemde programmalijnen zijn in 2016 belangrijke ontwikkelingen gerealiseerd, in het bijzonder op het gebied van Digital Energy, wat een belangrijk aandeel heeft in de digitalisatie van de maatschappij. Zo is er onderzoek gedaan naar dynamische prijs- en verrekenmechanismen voor energielevering en flexibiliteitsdiensten. Verder is in internationaal verband gewerkt aan datamodellen voor een uniforme conditiebepaling van energievoorzieningen, naar het management van registratiemechanismen voor beschikbare, duurzame energiebronnen en naar het samengaan van telecom- en energie-infrastructuren. Maar ook is er gewerkt aan de socio-economische kant van nieuwe energieontwikkelingen. In het bijzonder valt hierbij het onderzoek te noemen naar ondersteuning van lokale energie-communities en de bepaling van de businesswaarde van flexibele energiesystemen. In het kader van standaardisatie, belangrijk voor grootschalige uitrol, is geparticipeerd in NEN normcommissies en is input geleverd aan IEC en ISO op gebied van interoperabiliteit van energieflexibiliteitsdiensten. Verder is de kennispositie op het terrein van zonne-energieopwekkende weginfrastructuur belangrijk uitgebouwd en is door de realisatie van de nieuwe TNO HESI faciliteit een belangrijke onderzoeksomgeving voor complexe, duurzame energieproblemen in gecontroleerde realistische omgevingen tot stand gekomen.

In 2017 zullen de ontwikkelingen op de diverse programmalijnen worden voortgezet. Specifiek zal de nadruk liggen op het integreren van verschillende energieregelsystemen en het brengen van deze systemen naar een hoger TRL niveau. Hierbij wordt er gewerkt aan het faciliteren van integrale gebiedsontwikkeling met behulp van hybride energieconfiguraties, waarin de vier dimensies centraal staan: technologie, economie, wet- en regelgeving en sociale acceptatie, door gebruik te maken van HESI-facility, standaarden en tooling (DiDo, PICo, etc).

3.2.2 Highlights

In 2016 heeft de programmalijn van het VP Duurzame Energie die zich richt op het realiseren van een open en competitieve markt van energiediensten door het ontsluiten van energieflexibiliteit, zich verder voortgezet. De realisatie van open energiemarkten maakt de levering van betaalbare energie mogelijk. Voor 2016 zijn de volgende hoogtepunten binnen het VP aan te geven:

- **Onderzoek op het gebied van Digital Energy.**
Digitalisatie van de maatschappij is op diverse gebieden zoals gezondheid, voeding, water en energie, in een stroomversnelling geraakt. Digitale energie technologieën zijn een noodzakelijke ingrediënt voor de transitie naar een 21e eeuwse emissieloze energievoorziening. In het VP is o.a. onderzoek gedaan naar dynamische prijs- en verrekenmechanismen voor energielevering en flexibiliteitsdiensten. Er is internationaal onderzoek gedaan naar resultaten van datamodellen voor een uniforme conditiebepaling van energievoorzieningen, naar het management van registratiemechanismen voor beschikbare, duurzame energiebronnen en naar het samengaan van telecom- en energie-infrastructuren.
- **Socio-technologische studie naar het ondersteunen van lokale energie-communities.** Onderzoek naar het potentieel van sociale netwerken en communities om significant bij te dragen aan het reduceren van energieverbruik en CO₂-emissie. Goede inzet van ICT kan het succes van communities vergroten door o.a. het verbeteren van de toegankelijkheid van informatie, vergroten van impact en voordelen.
- **Participatie in standaardisatieontwikkelingen van Smart Grids.**
TNO is gevraagd (met name door CEN/CENELEC) en werkt aan, oa. door participatie in een aantal NEN normcommissies, specifieke standaardisatie op het gebied van interoperabiliteit van energieflexibiliteitsdiensten. Dit middels EFI (Energy Flexibility Interface), vraag- / aanbodsturing en interoperabiliteit bij elektrisch laden. Het is voor TNO van belang op de hoogte te zijn van de state-of-the-art en invloed te kunnen uitoefenen op de standaardisatieprocessen met als doel de energietransitie te versnellen.
- **Ontwikkelen en testen van samenwerkende flexibiliteitsconcepten.**
In het VP is onderzoek gedaan naar de technische invulling van de samenwerking tussen het Universal Smart Energy Framework (USEF), dat zich richt op het verhandelen van energieflexibiliteit met netbeheerders en energieleveranciers, en de Energy Flexibility Interface (EFI), waarmee flexibiliteit van apparaten wordt ontsloten, van de Flexible power Alliance Network (FAN).
- **Versterking van de kennispositie van zonne-energieopwekkende weginfrastructuur.** TNO is een aantal jaren geleden met de ontwikkeling van SolaRoad gestart om PV te integreren in wegen. Achterliggende visie is dat

hiermee een groot areaal beschikbaar komt (2x zo groot als het dakoppervlak in Nederland) waarmee duurzame energie kan worden opgewekt. Deze ontwikkeling heeft geleid tot het living lab SolaRoad fietspaden in Krommenie (Noord-Holland). TNO heeft in 2016 haar leidende kennisontwikkeling versterkt door uit de SolaRoad pilot in Krommenie relevante informatie te halen over de prestaties van dergelijke oplossingen (zonne-energie producerende wegdekken) onder normale gebruiksomstandigheden.

- Operationalisatie van de interconnectivity van TNO's HESI Faciliteit op het EnTranCe terrein in Groningen. Hiermee is de HESI Faciliteit deel van een gedistribueerde onderzoekomgeving voor complexe, duurzame energieproblemen in gecontroleerde omgevingen. Er is een verbinding gerealiseerd met het Vlaamse energielab EnergyVille (case: Dropout Behaviour of VPP Flexibility) en met het Energy System Integration Facility lab (ESIF) van NREL in Denver (case: lablink met berichtenstructuur en netwerkconnectiviteit).
- Begeleiden van een promotieonderzoek op gebied van het inzichtelijk maken van de businesswaarde van een flexibel energiesysteem. Ontwikkeling van een conceptenkader om verschillende vormen van flexibiliteit te relateren en te kwantificeren. Bovendien wordt een integraal flexibiliteitsdienstenmodel ontwikkeld dat flexibiliteitsdiensten op een effectieve en rendabele manier in de markt kan zetten.

3.2.3 Actualisatie/dynamiek

Binnen de Topsector Energie werkt TNO intensief samen met de TKI Urban Energy. In het bijzonder wordt binnen het VP Duurzame Energie bijgedragen aan de TKI programmalijnen: *Multifunctionele bouwdelen* (energieneutraal maken van de gebouwde omgeving door grootschalige implementatie van duurzame energiesystemen), *Energieregelsystemen en –diensten* (verhogen van de waarde van lokaal opgewekte duurzame energie met behulp van energieregelsystemen) en *Flexibele energie-infrastructuur* (verhogen van de bijdrage van de energie-infrastructuur aan duurzaamheid door grotere flexibiliteit in het energiesysteem). We merken op dat er binnen TNO naast dit VP ook gewerkt aan onderwerpen van de TKI Urban Energy zoals conversie en opslag van energie. Het TKI overstijgende onderzoek op het gebied van sociale innovatie, STEM -nu MVI, Maatschappelijk Verantwoord Innoveren-, wordt mede vanuit het VP Duurzame Energie en het VP Systeem Integratie bediend. Hieronder staat de, in overleg met de contactpersonen van het TKI voorgestelde invulling van de vraagsturing 2016 en de gerealiseerde voortgang.

Tabel 3.2: VP Sustainable Energy: Onderwerpen 2016 m.b.t. TKI Urban Energy

TKI lijn	TNO-Onderwerpen 2016	Budg. (%)	Realisatie 2016	Best. (%)
3. Multifunctionele bouwdelen	Verdere ontwikkeling van SolaRoad: van fietspad naar busbaan; opschaling van 70 m naar 1000 m	5	Versterking kennispositie van zonne-energieopwekkende infrastructuur. Met name naar prestaties onder normale gebruikersomstandigheden.	14
4. Flexibele energie infrastructuur	Schaalbaarheid van energie technologieën en toekomstvastheid van standaarden en ICT-architecturen; algoritmiëk voor optimalisatie energie-infrastructuren (ook Power Control)	28	Ontwikkeling van methodieken en technologieën voor de conditiebepaling van de elektriciteitsvoorziening. Realisatie van gestandaardiseerde interconnectiviteit gedistribueerde energie-applicaties (cases: NREL, EnergyVille).	28
5. Energieregelsystemen en -diensten	Energiemanagementsystemen en op het gebied van Power Control en Heat Control. Energiemanagement elektrisch vervoer (vehicle to grid, grid to vehicle). Interoperabiliteit specificaties en technologie.	67	Realisatie van Billing Operator Platform & Businessmanagement portal voor dynamische verrekeningen van energieflexibiliteit. Beschrijving van test en conformance testmethoden voor internationale standardisatie scenario's voor EV.	58
Totaal		100		100

3.3 Publicaties Roadmap Sustainable Energy

In onderstaande tabel is een samenvatting van de belangrijkste output die direct gerelateerd is aan de VP's Systeemintegratie en Duurzame Energie. Onder de tabel zijn de details van de peer reviewed publicaties opgenomen.

Tabel 3.3: *Output van de roadmap Sustainable Energy per categorie*

Type Publicatie	Aantal	Onderwerp(en)
Peer reviewed Publicaties	8	Voortvloeiend uit Internationale onderzoeksprojecten.
Presentatie/Conference Papers	42	Presentaties en publicaties uit met name internationale projecten en samenwerking kenniscentra.
Professionele publicaties/rapporten	25	Eindrapportages en specifieke extern gerichte publicaties

Peer Reviewed Publicaties

- (hgl-schap) P. MacDougall, B. Ran, G.B. Huitema, G. Deconinck, "Predictive Control for Multi-Market Trade of Aggregated Demand Response using a Black Box Approach", IEEE ISGT EU 2106, Slovenia, October 2016.
- (hgl-schap) P. MacDougall, B. Ran, W. Wijbrandi et G.B. Huitema, " Value Determination for Aggregation Services by Characterization of Flexibility and Applications ", Submitted to IEEE PES.
- (hgl-schap) Arif, A., Babar, M., Ahamed, I., AlAmmar, E., Nguyen, H.P., Kamphuis, I.G. & Malik, N. (2016). Online scheduling of plug-in vehicles in dynamic pricing schemes. Sustainable Energy, Grids and Networks, 7, 25–36-25–36.
- (hgl-schap) Babar, M., Nguyen, H.P., Cuk, V., Kamphuis, I.G., Bongearts, M. & Hanzelka, Z. (2016). The rise of AGILE demand response. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 56, 686-693.
- (hgl-schap) Shi, H., Blaauwbroek, N., Nguyen, H.P. & Kamphuis, I.G. (2016). Energy management in multi-commodity smart energy systems with a greedy approach. Applied Energy, 167, 385-396.
- (hgl-schap) Hurtado Munoz, L.A., Barradas Berglind, J.D.J., Nguyen, H.P. & Kamphuis, I.G. (2016). Agent based demand flexibility management for wind power forecasting error mitigation using the SG-BEMS framework. Proceedings of the IEEE PES ISGT (Innovative Smart Grid Technologies) Europe 2016 Conference, Ljubljana (pp. 1-6).
- (hgl-schap) Austin D'Souza, Kathelijne Bouw, Hugo Velthuisen, George B. Huitema, Hans Wortmann, Designing viable multi-commodity energy business ecosystems: corroborating the business model design framework for viability; Submitted to Journal of Cleaner Production, 2016.
- (TKI FlexiForFuture) R.J. vd Burg, J.C. Wortmann, C. Ahaus, G.B. Huitema, Operationalization of Energy System Flexibility: a service management perspective, 2016.

4 Vraaggestuurd programma “Energio”.

Topsector Energie
Contactpersoon TNO: A.J. Kalkman

4.1 Samenvatting

Een batterij om warmte in op te slaan die de zon 's zomers levert om huizen en gebouwen in de winter te verwarmen. TNO is er, met Europese wetenschappelijke partners en bedrijven, als eerste in geslaagd een werkend prototype op te leveren. Over een aantal jaren moet deze duurzame oplossing een belangrijke bijdrage leveren aan energiebesparing en minder CO₂-uitstoot in de gebouwde omgeving.



Figuur 4.1: Veldtestopstelling met zonnecollectoren op het dak, waarbij de warmte van de collectoren wordt opgeslagen in een prototype warmtebatterij die zich in de container bevindt.

Het opwekken van duurzame warmte via zonnecollectoren kent één groot nadeel: op zonloze dagen is er juist veel vraag naar energie. En andersom produceert de zon op zonnige dagen meer energie dan op dát moment nodig is. In de zomer opgewekte zonnewarmte zou je het liefst opslaan in een batterij zonder dat er enig verlies optreedt en die gebruiken om je huis in de winter te verwarmen. Opslag van warmte betekent een belangrijke stap in het energieneutraal maken van woningen en het bevorderen van grootschalig gebruik van duurzame energie.

4.2 Korte omschrijving

Het VP Energio kent binnen TNO een brede programmering en heeft als doel om samen met ketenpartners energieleverende gebouwen in 2050 mogelijk te maken. Het VP richt zich op zowel nieuwe technologieontwikkeling als product-co ontwikkeling met bedrijven. De nadruk ligt op technologieontwikkeling voor warmte- en koude installaties, inclusief de ventilatiecomponent, voor toepassing in gebouwen. Compacte opslagtechnieken hebben daarbij bijzondere aandacht. Dit VP sluit aan op de programmaliijn 2: ‘warmte- en koude installaties’ van TKI Urban Energy.

Daarnaast is binnen dit VP gewerkt aan gebouwgeïntegreerde zonne-energie (BIPV en BIPVT), waarbij het thermische deel wordt gebruikt in combinatie met een warmteopslagsysteem of als bron voor een warmtepomp.

4.3 Highlights

Op het symposium 'Energieproducerende gebouwen' toonde TNO eind september 2016 het eerste prototype van de warmtebatterij, die in het Europese onderzoeksproject MERITS is gebouwd. We hebben een doorbraak bereikt door gebruik te maken van bepaalde zouten waarvan we de eigenschappen zodanig kunnen beïnvloeden dat ze geschikt zijn voor opslag van warmte. Dat is tot op heden nog geen enkele partij gelukt. We zijn hierin geslaagd dankzij samenwerking met universiteiten en kennisinstellingen in Nederland en andere Europese landen, grote industriële partners en enkele innovatieve mkb-bedrijven. Een Nederlands mkb-bedrijf heeft de batterij uiteindelijk gebouwd.



De technologie die de basis vormt van deze oplossing is thermochemische opslag. Zonthermische collectoren op het dak van een huis zetten zonlicht om in warmte. De opgevangen warmte gaat via een chemische reactie een systeem in waar het wordt opgeslagen. Dat bestaat uit een vat met een beetje water en vooral zout. De warmte bevindt zich in het zout en wanneer er warmte nodig is zorgt de omgekeerde chemische reactie dat de warmte vrijkomt. Het proces van hydratatie en dehydratatie, oftewel bevochtigen en drogen van zout, was allang bekend, maar de innovatie schuilt in een complexe combinatie van gebruikte materialen die op een bijzondere manier bewerkt worden. Daar is inmiddels ook patent op aangevraagd.

Figuur 4.2: Vier modules waarin warmte kan worden opgeslagen door middel van een thermochemische reactie.

4.4 Actualiteit/dynamiek

Nadat TNO met zijn partners een werkend systeem heeft opgeleverd in het Europese project MERITS, is nu het Horizon 2020 vervolgproject CREATE van start gegaan. MERITS had een grote wetenschappelijke component, maar in CREATE gaan de industriële doorontwikkeling de boventoon voeren. Samen met industriële partners wordt de warmtebatterij geoptimaliseerd en concreet in een demo-huis ingebouwd. Doordat beide projecten in 2016 overlappend waren, is dit jaar relatief veel budget besteed aan compacte warmteopslag. Hieronder staat de destijds geplande invulling van de vraagsturing 2016 en de gerealiseerde voortgang. In 2017 zal de verhouding tussen de programmalijnen weer worden genormaliseerd.

Tabel 4.1: VP Energo: Onderwerpen 2016 m.b.t. TKI Urban Energy

Plan 2016			Realisatie 2016	
TKI lijn	TNO Onderwerpen	Budget (%)	TNO Onderwerpen	Besteed (%)
2 Warmte- en koude installaties	Ontwikkeling compacte conversie- en opslagtechnieken, o.a. ontwikkeling compacte thermische opslag binnen nationale en Europese projecten en nieuwe technologieën om zeer efficiënt warmte of koude te kunnen produceren, bijvoorbeeld warmtepompen gebaseerd op magneto-calorische principes.	57	Zwaartepunt heeft dit jaar gelegen op afronding warmteopslag project FP7 MERITS en opstart warmteopslag project H2020 CREATE, waardoor in dit overlap jaar relatief veel budget in deze lijn is besteed. Enkele TKI projecten zijn gestart op het gebied van efficiënte warmte-koude systemen.	89
3 Multifunctionele bouwdelen	Integratie duurzame energiebronnen (BIPV) zo effectief mogelijk te integreren en ontwikkeling van een klimaat adaptieve gevel om de invloeden van het buitenklimaat op het binnenklimaat zo veel mogelijk te optimaliseren (<i>innovatieve bouwfysica</i>)	31	Verskillende projecten zijn gestart en lopen in 2017 nog door op het gebied van zowel BIPV als BIPVT(gebouw geïntegreerde PV-thermische panelen) met zowel PV opbrengst als laagwaardige warmteopbrengst, soms geïntegreerd met een warmtepomp.	11
5 Energieregelsystemen en -diensten	Energiemanagementsystemen op het gebied van Power Control en Heat Control. Energiemanagement elektrisch vervoer (vehicle to grid, grid to vehicle) Interoperabiliteit specificaties en technologie.	11	In 2016 is dit grotendeels belegd in aangrenzende VP's zoals Duurzaam Bouwen en Smart Grids. In 2017 zal hier verder op worden ingezet.	--
Totaal		100		100

4.5 Patenten en publicaties

Papers/oral presentations:

- R. Cuypers, A. Anastasopol, A.J. de Jong, H. Oversloot, L. van Vliet, P. Bodis, C. Hoegaerts: "A novel heat battery to save energy & reduce CO2 emission", , EuroSun Conference 11-14 October 2016, Palma de Mallorca, Spain, oral presentation, and *conference proceedings*, 2016
- A. Solé, R. Cuypers, C. Barreneche, J. Duim, H. de Beijer, R. Volmer, G. Fuedner, L.F. Cabeza: "A prototype compact heat storage system to cover heating and DHW demand from 100% renewables". 7th European Thermal-Sciences Conference, 19-23 June 2016, Krakow, Poland, oral presentation, and *conference proceedings*, 2016, 93.
- R. Cuypers, L. van Vliet, P. Bodis, B. Starosielec, M. Bujalski, H. de Beijer, M. Vos, G. Földner, J. Wapler, A. de Gracia, L.F. Cabeza, C. Hoegaerts: "Successful field test demonstration of seasonal solar thermochemical storage", 12th international conference for Solar Heating and Cooling 'Gleisdorf Solar', 7-10 June 2016, Gleisdorf, Austria, oral presentation, and *conference proceedings*, 2016, 140.
- W. van Helden, M. Yamaha, C. Rathgeber, A. Hauer, F. Huaylla, N. Le Pierrès, B. Stutz, B. Mette, P. Dolado, A. Lazaro, J. Mazo, M. Dannemand, S. Furbo, A. Campos-Celador, G. Diarce, R. Cuypers, A. König-Haagen, S. Höhle, D. Bruggemann, B. Fumey, R. Weber, R. Köll, X. Daguinet-Frick, P. Gantenbein, F. Kuznik: "IEA SHC Task 42 / ECES Annex 29 – Working Group B: Applications of Compact Thermal Energy Storage", 4th

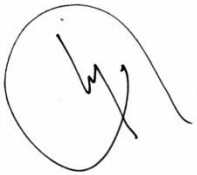
- International Conference on Solar Heating and Cooling for Buildings and Industry*, 2-4 December 2015, Istanbul, Turkey, oral presentation, and *Energy Procedia*, 2016, 91, 231-245, <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2016.06.210>.
- A.J. de Jong, L. van Vliet, C. Hoegaerts, M. Roelands, R. Cuypers: “Thermochemical heat storage – from reaction storage density to system storage density” *4th International Conference on Solar Heating and Cooling for Buildings and Industry*, 2-4 December 2015, Istanbul, Turkey, oral presentation, and *Energy Procedia*, 2016, 91, 128-137, <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2016.06.187>.

Patents:

PLT #2016056: “In-situ reactive absorption for equilibrium-shifting of non-condensable gases”, V.O. ref. P112652EP00; European patent application No. 16188405.1.

5 Ondertekening

Utrecht, 21 februari
2017

A handwritten signature in black ink, consisting of a large circle with a stylized 'M' and 'J' inside, followed by a long horizontal stroke.

Dr. M.J. van Bracht
Managing Director thema Energie