

TNO-rapport**TNO 2018 R11048****VP-plannen 2019, Thema Energie**

Datum	2018.09.20
Auteur(s)	H.L.J. Keizers M.C.A.M. Peters F.J. Verheij R.W. v.d. Brink P.J. Eecen A.W. Weeber J.H.A. Kiel S. v. Loo H. Jeeninga F.M. Braal J.H. Brouwer
Autorisatie	W. Boogaard Managing Director Energie
Aantal pagina's	65
Aantal bijlagen	
Projectnummer	002.00001/01.05

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.

Inhoudsopgave

1	Inleiding.....	4
1.1	Programmering 2019.....	5
1.2	Bijdrage door TNO aan maatschappelijk thema Energietransitie en CO ₂ emissiereductie	6
2	VP Solar Energy	7
2.1	Summary	7
2.2	Brief description program and objectives for 2022.....	8
2.3	Expected results 2019.....	9
2.4	Recent progress and external developments	13
3	VP Windenergie	14
3.1	Samenvatting	14
3.2	Korte omschrijving.....	15
3.3	Resultaten 2019	16
3.4	Dynamiek	20
4	VP Energietransitie	21
4.1	Samenvatting	21
4.2	Korte omschrijving.....	22
4.3	Resultaten 2019	22
4.4	Dynamiek	25
5	VP Energiesysteem	27
5.1	Samenvatting	27
5.2	Korte omschrijving.....	28
5.3	Resultaten 2019	29
5.4	Dynamiek	34
6	VP Energie in de gebouwde omgeving	36
6.1	Samenvatting	36
6.2	Korte omschrijving.....	37
6.3	Resultaten 2019	38
6.4	Dynamiek	43
7	VP Energo - Urban Energy	45
7.1	Samenvatting	45
7.2	Korte omschrijving.....	46
7.3	Beoogde resultaten voor 2019	47
7.4	Dynamiek	49
8	VP Naar CO₂-neutrale brand- en grondstoffen	50
8.1	Samenvatting	50
8.2	Korte omschrijving.....	51
8.3	Resultaten 2019	52
8.4	Dynamiek	55

9	VP Towards a CO2-neutral industry	57
9.1	Summary.....	57
9.2	Short description	58
9.3	Anticipated results 2019.....	59
9.4	Dynamics	63
10	Ondertekening.....	65

1 Inleiding

Voor u ligt het Vraaggestuurd programma 2019 van het thema Energie, met bijdragen van de Unit ECN part of TNO en de Unit BI&M. Het VP 2019 Energie is gebaseerd op de ambities, keuzes en uitgangspunten van het TNO Strategisch Plan 2018 – 2021, zoals dit is aangeboden aan de Nederlandse overheid¹.

Het VP wordt jaarlijks bijgesteld op basis van de onderzoeksresultaten in 2018 en vraagsturing door, en overleg met, de overheid, de Topsector Energie en relevante stakeholders. De programma's 2019 geven derhalve invulling aan de relevante TKI innovatiecontracten en de doelstellingen van de overheid.

Op 1 april 2018 zijn formeel de *Unit Energie* van TNO en de *afdeling Duurzame Energie* van ECN samengevoegd tot de *Unit ECN part of TNO*. Sinds 1 april 2018 vindt ook de financiering namens de overheid plaats middels de verstrekking van één rijksbijdrage aan deze nieuwe unit.

Voor 2019 is het VP Energie gebaseerd op de acht integrale Roadmaps van de Unit ECN part of TNO en worden de onderzoeksactiviteiten ook integraal vorm gegeven en uitgevoerd.

De transitie van een op fossiele brandstoffen gebaseerd energiesysteem naar een CO₂-vrije energiehuishouding, is de komende decennia één van de grootste uitdagingen wereldwijd. De krachtenbundeling met ECN Duurzaam geeft een sterke impuls aan het energieonderzoek naar een schone, betrouwbare en betaalbare energiehuishouding. Het portfolio van ECN part of TNO richt zich, conform het hierboven beschreven vraagsturingsproces, op de voor Nederland relevante speerpunten. Uitgangspunt is een energiehuishouding met significant gereduceerde CO₂-emissies in 2030 (48% – 55%) en in 2050 (80-95%). Om deze doelen te kunnen behalen is een aanzienlijke versnelling van de CO₂-reductie nodig. Dit betekent niet alleen een sterke verduurzaming van het aanbod (i.e. door wind, solar en schoon fossiel) maar ook een decarbonisatie van de energievraag door bijvoorbeeld overschakeling van aardgas naar CO₂-vrije energiedragers (elektriciteit, warmte, waterstof).

De kosten voor opwekking van duurzame elektriciteit door zon-pv en wind zijn de afgelopen jaren spectaculair gedaald en liggen op het niveau van fossiel energie. Een substantiële kostendaling (factor 2 tot 3) is niet alleen mogelijk maar ook noodzakelijk dit om de kosten voor de carbonisatie van de vraag te compenseren. Voor zowel de vergaande kostenreductie van aanbod als ook de decarbonisatie van de vraag geldt dat nieuwe concepten dienen te worden ontwikkeld en geïmplementeerd. Zonder publieke financiering zullen deze concepten niet dan wel sterk vertraagd worden ontwikkeld (marktfalen) en worden kansen voor het Nederlandse bedrijfsleven gemist.

¹ TNO Strategisch Plan 2018-2021 "Vliegwielen voor innovatie in Nederland"; www.tno.nl

In 2018 is in aanvulling op het bestaande SMO budget door de overheid een extra financiering van 19 MEuro toegekend voor TNO als additionele financiering voor toegepast onderzoek. Een deel van deze middelen (M€ 3) is rechtstreeks neergeslagen bij ECN part of TNO. In overleg met betrokken ministeries is voor wat betreft deze middelen ingezet op: Het VP 2019

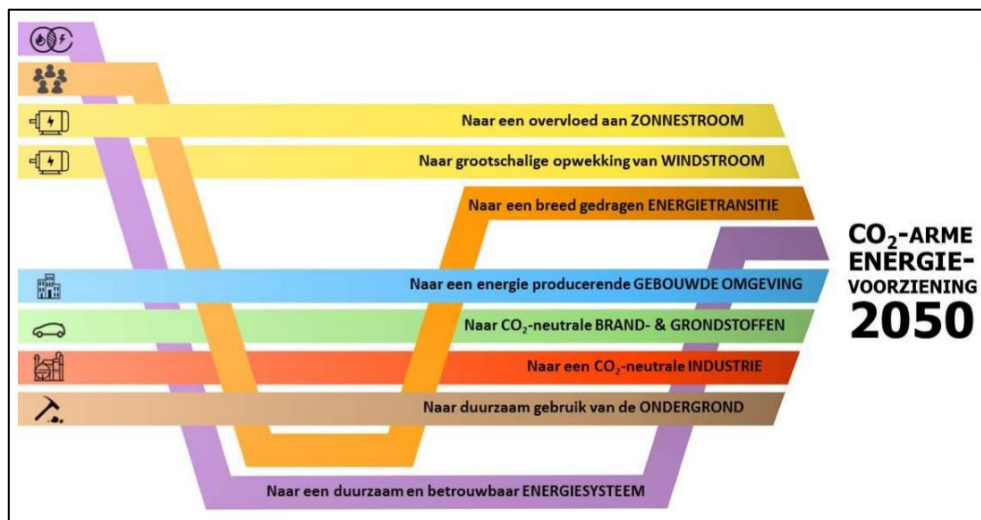
- De rol van waterstof, als versneller van de energietransitie in de industrie
- Het belang van systeemintegratie binnen de duurzame energievoorziening
- Industriële elektrificatie en CCUS
- Energie in de gebouwde omgeving.

In het VP 2019 is uitgegaan van continuering van de additionele inzet op bovengenoemde speerpunten. EZK heeft aangegeven dat voor TNO in 2019 M€ 6 aan additionele subsidie beschikbaar is. Nog niet bekend is welk deel hiervan neer zal slaan bij ECN part of TNO. Met de inzet van deze middelen is in dit VP geen rekening gehouden.

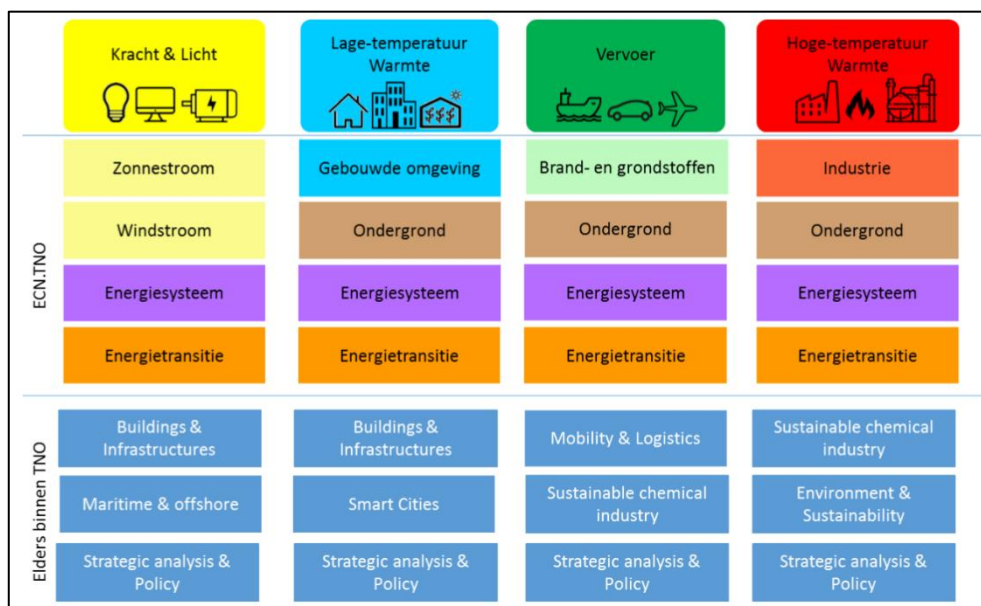
1.1 Programmering 2019

De Unit ECN part of TNO (EpoT) baseert zich in de programmering 2019 op de acht Roadmaps zoals deze zijn weergegeven in figuur 1. Vijf van de EpoT roadmaps zijn direct gekoppeld aan de energiefuncties. Hierbij is er naar gestreefd zoveel mogelijk de indeling van de TKI's onder de Topsector Energie aan te houden. Zo heeft het onderzoek naar bio-energie en –grondstoffen in zijn geheel een plaats gekregen binnen de roadmap *Naar CO2-neutrale **brand- en grondstoffen***. Daarnaast zijn er drie doorsnijdende roadmaps. Een over *duurzaam gebruik van de **ondergrond***, waarin onder andere de taakfunctie van TNO op dit gebied plaatsvindt. De roadmap *Naar een breed gedragen **Energietransitie*** richt zich op het socio-economisch onderzoek op het gebied van de Energietransitie. De roadmap *Naar een duurzaam en betrouwbaar **Energiesysteem*** kijkt naar de technische aspecten van de integratie van de energiedragers in het energiesysteem over de vier functies heen, zoals netwerken en opslag. Op de kruispunten van de roadmaps worden gemeenschappelijke onderzoeksonderwerpen gedefinieerd.

Aan elk van deze acht roadmaps is in de programmering 2019 een Vraaggestuurd programma gekoppeld. Het aan de roadmap *Naar een duurzaam gebruik van de **Ondergrond*** gekoppelde VP Karakterisering Grondwater (KarDySaG) wordt in de programmering onder het thema water meegenomen. Daarnaast wordt bijgedragen aan het thema Energie door de unit BI&M middels het VP Energie in de gebouwde omgeving (EnerGO).



Figuur 1. Roadmaps ECN part of TNO



Figuur 2. Bijdrage van de TNO Roadmaps aan de transitiepaden

1.2 Bijdrage door TNO aan maatschappelijk thema Energietransitie en CO₂ emissiereductie

De bijdrage aan de transitiepaden op de vier energiefuncties (figuur 2) komt voor een belangrijk deel vanuit het ECN part of TNO. Maar ook binnen andere onderdelen van TNO vindt onderzoek plaats dat zeer relevant is voor de energietransitie. Bovenstaand schema geeft de bijdrage van de nieuwe Roadmaps binnen TNO aan de transitiepaden weer.

2 VP Solar Energy

Algemene gegevens	
Titel VP/ERP	Solar Energy
ERP/Topsector/Maatschappelijk Thema	TKI Urban Energy / HTSM
Contactpersonen TNO (DM en VPM)	Harm Jeeninga
Contactpersoon overheid of topsector	

2.1 Summary

Our aim is to develop technologies and solutions that enable very large scale implementation of photovoltaic solar energy (PV) to generate electricity, which can be used for power applications, but also to produce low and high temperature heat as well as fuels, feedstocks and products. The technologies and knowledge required for this will be developed with academic and industrial partners. Our research program will contribute to:

- Reducing the generation cost of solar electricity and enhancing system performance;
- Broadening the applicability and increasing the social acceptance;
- Facilitating large scale integration of PV in the energy system.

Bankability of new technologies and solutions, and sustainability / circularity are an integral part of the program.

The main objectives for 2022 are:

- Development and industrialization of processes for high-efficiency solar cells and modules (crystalline silicon, CIGS, perovskites and tandems);
- Improvement of the stability of PV products;
- Development of technologies and demonstration of solutions to integrate PV in the built environment, infrastructure and landscape, and for floating PV.

For 2019 the main goals are described below and the R&D will be carried out with academic and industrial partners.

Crystalline silicon PV

- Development and industrialization of novel coatings that minimize the losses at the surfaces and interfaces;
- Development and demonstration of novel module technologies for products in which PV is integrated and for new applications

Thin-film PV

- Development of technologies for upscaling perovskite solar cells;
- Development and industrialization of customized PV modules and products.
- Improved stability of PV materials through study of degradation mechanisms

Tandems

- Optimization of the different component cells for tandem applications;
- Optimization of the tandems for rigid and flexible PV modules and demonstration of its stability.

Systems and Applications

- Performance analysis, including shading effects, of building integrated PV elements, PV integrated in infrastructure and in landscape, and floating PV.

2.2 Brief description program and objectives for 2022

Our R&D is carried out in two main program lines (PMC clusters):

- Development of PV technologies for novel cell and module designs based on wafer-based crystalline silicon, thin films with focus on perovskites and CIGS, and tandems with focus on a device with a perovskite top cell and a silicon bottom cell, and a proof of concept of an all-thin-film tandem;
- Research on PV systems and applications and demonstration of their feasibility, with focus on Building Integrated PV (BIPV), Infrastructure integrated PV (I2PV), PV integrated in the landscape and floating PV, and development of performance models and business models for innovative PV systems.



Example of floating PV concept



Example of a white PV module with minimized output loss and entirely new possibilities for integration in building and other objects.

Our main objectives for 2022 are:

- Development and industrialization of novel coating technologies for crystalline silicon solar cells that enable cell efficiencies of 25% and module efficiencies of 24% at low cost, including technology transfer (with partners);
- A process with late-stage customization for CIGS on flexible metal foil with 20% efficiency;
- An economically competitive perovskite PV manufacturing process on flexible substrates that can be industrially upscaled;
- A 15x15 cm² perovskite-silicon tandem module with an aperture area efficiency of 26% and demonstrated stability (<10% degradation after 1000 hr @ 85 °C / 85% relative humidity);
- A flexible perovskite-CIGS tandem module with aperture area efficiency of 25% with demonstrated stability;
- Quantification and analysis of degradation and failure mechanisms of PV modules and products in which PV is integrated, and development of technologies to mitigate degradation and failure for our focus areas;
- Develop and demonstrate a set of PV integration solutions for industry, by accumulating the know-how gained by a series of application cases jointly with industry. Specific cases are light-weight BIPV components for roofs and facades, semitransparent PV components and infrastructure integrated PV, and making use of the unique features and opportunities of the different technologies in our portfolio (silicon, thin films and tandems);
- Assess the impact of large-scale deployment of PV in sectors mentioned above (economical, ecological, societal, etc.).

2.3 Expected results 2019

Our R&D program mainly contributes to the TKI Urban Energy Program Lines:

- PV system components (Program Line 1) and physical integration (PL 3); and in the Top Sector HTSM to
- Roadmaps High Tech Materials, Photonics, and Nanotechnology, Smart Manufacturing and Components and Circuits

Furthermore it contributes to the so-called Knowledge Innovation Programs (in Dutch the so-called KIAs) and corresponding Multi-annual Mission-driven Innovation Programs (MMIPs), both under development, for the Climate Agreement tables (in Dutch “sector tafels”) Electricity and Built Environment.

2.3.1 *Wafer-based crystalline silicon PV technology*

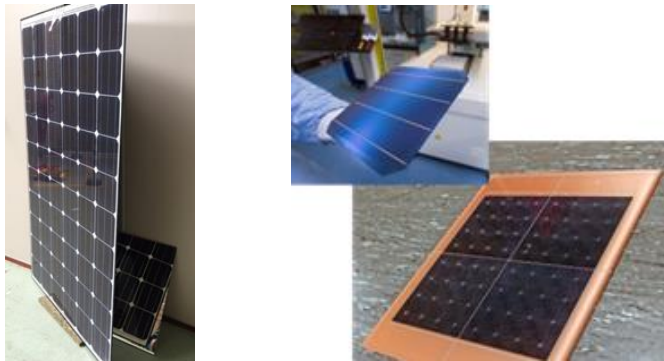
Our main objective is to develop technologies that will contribute to the TKI Urban Energy goals of 2030: a module cost <0.1 €/Wp, aperture area module efficiency >25%, module lifetime beyond 35 years and an energy yield of 1200 kWh/kWp in the Netherlands and by applying so-called bifacial PV technology. These developments are carried out with both academic and industry partners. In the Netherlands our main academic partners are AMOLF, TUD, TU/e, UvA and UT. Our Dutch industry partners are equipment manufacturers such as Tempres, Levitech, Solmates, material suppliers like DSM and Sabic, and module manufactures Exasun and Energyra. Examples of international partners are UNSW, SERIS, Yingli Solar and Jolywood Solar. The first two are academia and the latter two tier 1 manufactures. Material suppliers Dupont and Heraeus are important partners to develop novel contacting schemes.

Our focus within cell technology is on the development and industrialization of so-called carrier-selective and passivating contacts. These novel structures will minimize recombination losses at the cell's surface and at its interface with metal contacts and are key to reach efficiencies of 25%.

For module technology our aim for 2019 is together with industrial partners demonstration of upscaling of back-contact interconnection schemes by using Al foils combined with local Cu sprayed contacts to reduce material cost with respect to the conventional and full area Cu interconnection foil technology. Furthermore, enablers for module manufacturing for products in which PV is integrated will be developed (for example for BIPV products, floating PV, landscape integrated PV, infrastructure integrated PV). Together with Holst Centre detailed analysis of degradation and failure modes and mitigating technologies will be explored within TNO's ERP.

Main deliverables for 2019 are:

- Demonstrate industrial feasibility of bifacial cells with polySi rear by making a set of modules ready for field tests;
- Technology transfer of integration of polySi rear for bifacial cells to cell manufacturer (together with Tempres);
- Demonstrate 23% efficiency potential for MetOx carrier-selective and passivating contact schemes;
- Demonstrate scalability of interconnection process for back-contact cells using Al interconnection foil with local Cu spray contacts;
- Demonstrate novel module technologies and proof-of-principle demonstrators for products in which PV is integrated.



Bifacial crystalline silicon PV modules, solar cell and laminate with back-contact solar cells.

Thin-film PV Technology with focus on perovskites and CIGS

The thin-film PV research program is carried out within Solliance. Solliance is orchestrated by TNO and imec jointly. Four more academic partners participate: TU Eindhoven, TU Delft, University of Hasselt (BE) and Forschungszentrum Jülich (DE). University of Twente is in the process of joining. A set of about 10 industrial partners along the PV value chain is involved.

The activities in this Thin-Film PV technology program are carried out within the TKI Urban Energy of the Dutch Top Sector Energy (see general objectives in silicon paragraph) and is linked to several roadmaps of the Top Sector High Tech Systems and Materials (HTSM); primarily the roadmaps High Tech Materials and Photonics and Nanotechnology, and secondarily the roadmaps Smart Industry (linking with our *smart* manufacturing ambition) and Components and Circuits (connecting with our ambition towards *smart* devices).

The thin-film PV technologies have unique opportunities for special applications. Thin-film PV modules can be made flexible (for example by depositing the absorber layers on steel), translucent for window applications, and semi-transparent for window applications and as well as tandem structures. The Thin-Film PV program herewith also supports the 'Brainport Nationale Actieagenda 2018' (priority 10.2: Societal Innovations, Large scale integration of PV foils) Within the different sub-program lines we have the following objectives:

- CIGS module manufacturing: developing manufacturing technologies for customized modules on metal foil and on glass;
- Perovskite PV manufacturing: developing manufacturing technologies for glass-based single junction opaque modules for low-cost PV utility plants, translucent PV modules for architectural PV windows;
- Thin-film PV integration: development of technologies for integrated PV.

Main deliverables for 2019 are:

- Demonstration of shunt free back-end interconnection of CIGS on steel substrates;
- Flexible 30x30 cm² CIGS demonstrator;
- Upscaling translucent CIGS and Perovskite PV demonstrators;
- Stable semitransparent rigid perovskite module with >14% efficiency using industrially scalable processing (stable means <20% degradation after 1000 hr 85 °C / 85% relative humidity and under 1 sun equivalent illumination);
- Stable large area (15x15 cm²) flexible perovskite module on PET;
- Demonstrator of free form PV-integrated components.



Examples of semi-transparent and see-through thin-film PV products.

2.3.2 Tandem PV technology

To better utilize the energy of the solar spectrum and reach efficiencies beyond 30% tandem solar device are required. Within TKI Urban Energy PL1 the aim of this topic is described as very high efficiencies and beyond the limits of single junction silicon and thin-film PV. Our focus is on tandems with a thin-film perovskite top cell and a crystalline silicon bottom cell, resulting in a rigid module. For high-efficiency flexible PV devices a combination of perovskites and CIGS will be explored.

Our R&D partners to develop tandem technology are academia and industry a.o. Tempres, Exasun, Eternal Sun, TU/e, TUD, UvA, University Valencia and imec. Within this research program the perovskite top cell will be optimized for tandem, which means minimize the parasitic losses in the infra-red part of the spectrum and optimizing the band gap (meaning a wider band gap for the top cell to extract more energy from the UV part of the solar spectrum).

In 2019 our R&D will include development of large area tandem devices and the corresponding module technology for these larger areas progressing towards higher TRL.

The deliverables for 2019 are:

- Demonstrating 23% aperture area efficiency potential on 6x6 inch² devices;
- Towards 27% pixel efficiency (i.e. very small area);
- Assessment and test samples of all thin-film tandems on flexible substrates.

2.3.3 Systems and applications

The objective for the systems and application corresponds to that of TKI Urban Energy and to the Climate Agreement sectors Built Environment and Electricity.. R&D should result in innovative products and systems that:

- Contribute to the integration of systems and technologies that result in renewable energy generation and energy saving in the built environment;
- Result in an economically feasible and financially affordable product;
- Make use of the available surface areas in the Netherlands in an optimal way;
- Have a high degree of social acceptance.

In summary this means: 'Every surface generates (can generate) PV electricity' (re-phrased from a Challenge in the Route Energy Transition in the National Research Agenda).

Since surface area is a limiting factor in densely populated countries such as the Netherlands multiple use of that area will be key, which means we should be able to integrate PV everywhere: landscape integrated (e.g. agro-PV), building integrated, infrastructure integrated (noise barriers, etc.) and floating PV without major negative effects on the ecological system.

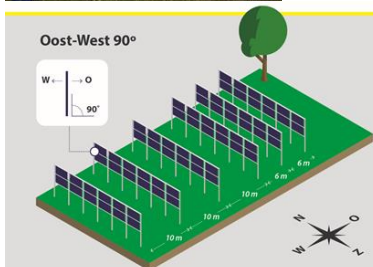
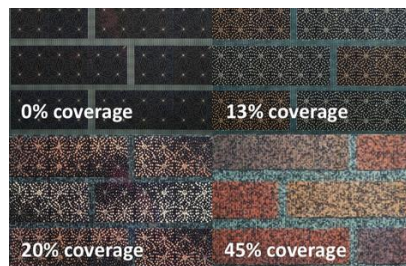
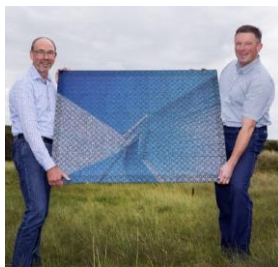
Since many aspects needed to integrate PV in those areas correspond to applications in other fields we will simultaneously develop technologies for a.o. vehicle integrated PV (curved, excellent aesthetics) and integration in greenhouses.

Since the R&D scope is broad we have many different partners: academic groups, module manufactures, installers, architects, end-users, etc. Examples are UU, UT, TUD, Exasun, UNStudio, Design Innovation Group, several Universities of Applied Sciences (Amsterdam, Hanze, Zuyd), Marin, SunFloat. ECN part of TNO is playing a key role in setting up national consortia for different application fields.

For the novel applications of PV mentioned above prediction of the annual energy output is very important to determine the financial attractiveness and value of PV. Advanced computer modelling software based on climatological data and suitable for novel module architectures (mainly bifacial) is being developed and will be validated with field data.

For building integrated PV proof of principle building elements will be demonstrated. These elements could be integrated in pre-fabricated larger building parts (for example roofs, façade elements) with excellent appearance. Examples of Dutch Solar Design are depicted below in which the losses are significantly less than would be expected from the coverage of the printed areas. Deliverables are:

- Set up first test fields (roof, agricultural land, water) with systems of bifacial modules and carry out a first assessment on energy output;
- First energy output estimated and evaluation of DSD modules;
- Investigations and solutions for dynamic shading in relevant environments like infrastructure integrate PV and mobile PV;
- Improved customization of mass manufactured products for integrated systems.



Different DSD modules / demonstrators, example of layout Agro-PV system, and modules with different color and texture

2.4 Recent progress and external developments

Currently we are working on the full integration of the former ECN and TNO groups active in solar energy R&D, and on defining our new strategy. Although this strategy is still under discussion the contours are already clear and described in this document.

First of all we need to take the objectives of the Ministry of Economic Affairs and Climate into account. The priority and approach has, in short, changed from industry (Top Sectors) to CO₂ reduction (Climate Agreement), with economic benefits through industrial activities as an important result or boundary condition. Some other trends that can affect our position:

- Several new module manufacturers are starting up in EU, and also in NL (e.g. Energyra, Elton); this is an opportunity of ECN part of TNO.
- The Chinese government recently cut subsidies for PV power fields and strives for technology independence. This is expected to have major effects on both R&D capacity and demand.

In 2018-2021, first of all the integration of ECN in TNO will be further shaped and consolidated. This is expected to accelerate R&D of tandem cells, combining thin-film PV (as pursued by Solliance) and silicon PV (as pursued by ECN in Petten). Secondly, the ECN integration in TNO will also enhance collaboration between ECN part of TNO with AMOLF and other academic partners. In the third place, the program line on PV Systems and Applications is expected to lead to new collaborations as this program line is reaching out to companies further down the PV value chain, such as companies integrating PV in building components, vehicles and other applications.

Because of the aspects described above we will change our focus towards technology development for PV products to be applied in four sectors: ground-based PV (for example bifacial PV systems), BIPV (customized PV products), I2PV and floating PV. Technology development should have direct impact on these application sectors. Therefore we will focus on:

- So-called transparent passivating contacts (for Si PV, but also important for thin-film PV) instead of optimizing and industrialization of full Si cell concepts;
- Bifacial PV cells, modules and systems for enhanced power output;
- Nanotechnologies to improve efficiency and better aesthetics (color);
- Flexible CIGS PV products (e.g. steel foil as substrate)
- Customized PV products (free shape, free color, flexible) for BIPV and I2PV;
- Upscaling perovskite PV (e.g. in its translucent version for PV windows as part of BIPV) for both rigid and flexible products;
- Tandem devices with perovskite top cell and Si bottom cell (rigid), but also flexible all thin-film;
- Components for ground-based PV, BIPV, I2PV and floating PV.

3 VP Windenergie

Algemene gegevens	
Titel VP/ERP	Wind
ERP/Topsector/Maatschappelijk Thema	Topsector Energie / Offshore Windenergie
Contactpersonen TNO (DM en VPM)	Harm Jeeninga, Peter Eecen
Contactpersoon overheid of topsector	Bob Meijer, directeur TKI WoZ

3.1 Samenvatting

In een energiesysteem dat nauwelijks CO₂ uitstoot, zal offshore windenergie het belangrijkste deel van de energie in Nederland leveren. De verwachting is dat in 2050 minstens 50GW aan offshore windenergie in gebruik zal zijn in Nederland. Ook in de komende jaren waarin we de overgang naar dit duurzame energiesysteem realiseren (de energietransitie) speelt offshore windenergie een belangrijke rol; in 2030 zal in Nederland zeker 11GW offshore windvermogen draaien.

Tot op heden is er bijna 1000MW offshore windvermogen gerealiseerd. Tot 2030 wordt er tien keer zoveel bijgebouwd. Dat betekent een enorme groei. Om dat efficiënt en effectief te doen zijn er volop kansen en uitdagingen.



ECN part of TNO ontwikkelt innovatieve producten en oplossingen voor offshore windparken zoals windparkregelingen en monitoring. Voor een optimaal onderhoud controleren meetsystemen de productie van de windturbines en bepalen de technische staat van de turbines. Samen met het bedrijfsleven leveren wij oplossingen voor nieuwe concepten zoals verticale-as windturbines en kite systemen. Innovaties voor de ontwikkeling van hele grote 15+MW windturbines zijn relevant op langere termijn. Met de Nederlandse offshore-industrie, die is betrokken bij 80% van alle offshore windparken in Noordwest Europa ontwikkelen wij innovaties in de logistieke keten, voor transport en voor installatie.

Het TNO R&D programma “Windenergie” richt zich op innovaties in offshore windenergie wat resulteert in:

- Reductie van de prijs van offshore windstroom
- Integratie in het energiesysteem door flexibiliteit, opslag en markt
- Ruimtelijke en sociale inpassing, multifunctioneel gebruik van ruimte
- Een competitieve positie voor de Nederlandse windindustrie

Dit leidt tot een gezonde offshore windsector met vele groene banen.

3.2 Korte omschrijving

Het langetermijndoel van het VP Windenergie van ECN part of TNO is de reductie van de ‘Levelized Cost of Energy’ van offshore windenergie en het inpassen van offshore windparken in het energiesysteem, in de maatschappij en in de natuur. Door kennisontwikkeling ondersteunt ECN part of TNO het Nederlandse bedrijfsleven met de technische innovaties om een windpark integraal te optimaliseren. Het is belangrijk dat de Nederlandse economie optimaal profiteert van de investeringen in de Nederlandse offshore windparken.

De kennisportfolio van dit VP is breed georiënteerd zodat ECN part of TNO een waardevolle partner is voor de integrale optimalisatie van offshore windenergie. De kennisontwikkeling en technologische innovaties die noodzakelijk zijn om bovenstaande doelen te realiseren, zijn:

- Ontwerp van grote 10+MW offshore windturbines – rotor aerodynamica, integraal dynamisch ontwerp, ontwerp van de windturbinecontroller;
- Ontwerp van toekomstige ondersteuningsconstructies – voor grote turbines, drijvend en vast in de bodem, corrosiebescherming;
- Ontwerp van grote, toekomstige windparken – zog aerodynamica, elektrische infrastructuur, windparkregelingen;
- Bouw van windparken – installatiemodellering en optimalisatie, toegangssystemen, veiligheid en risicobeheersing;
- Bedrijf van windparken – O&M modellering en optimalisatie, conditie monitoring, robotisering;
- Integratie van windenergie in het elektrische systeem - ontwerp elektrische systeem, connectie naar land, interconnectors en energie-eilanden;
- Integratie in het ecologische systeem – meten van de impact van windparken op ecologie en de ontwikkeling van technologie om ecologie te bevorderen;
- Verbeterde kennis wind op de Noordzee door het uitvoeren van een meetprogramma.

Specifieke ontwikkelingen moeten plaatsvinden op:

- Aerodynamica van grote rotoren (voor 10+MW windturbines)
- Dynamische zogmodellering voor optimalisatie van bedrijf en windparkregelingen
- Ontwerptools voor optimalisatie van O&M- en installatiestrategie

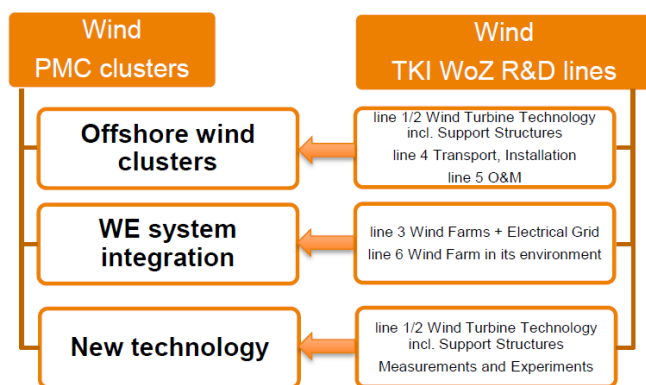
De samenvoeging van ECN met TNO heeft de brede basis van ECN duidelijk versterkt en biedt voor dit onderzoekprogramma veel kansen door de ontwikkeling van cross-overs. Op het gebied van marktmodellen, robotica, cybersecurity, energieopslag en conversie, sensorsystemen zoals fiber optica, digitalisering en

Internet of Things, duurzame mobiliteit zoals het vergroenen van O&M schepen, circulariteit en recycling en de ontwikkeling van een energie-eiland.

3.3 Resultaten 2019

Het onderzoek aan offshore windenergie is onderverdeeld in drie PMC-clusters:

- **Offshore windclusters**; Optimalisatie van clusters van windparken, het ontwerp, de installatie en het onderhoud
- **WE systeem integratie**; Integratie van windenergie (WE) in het energie systeem; energieopslag, energieconversie, transmissie en netten
- **Nieuwe technologie**; Toekomstige grote turbines (20+MW) en innovatieve concepten zoals drijvende turbines, verticale as en “high altitude” windsystemen. Het valideren van deze nieuwe technologieën.



De PMC clusters van ECN part of TNO Windenergie en de verbanden met het R&D programma van TKI Wind op Zee.

Offshore windclusters

Het resultaat van de onderzoekactiviteiten op het gebied van offshore windclusters (groepen windparken) is dat ECN part of TNO een relevante partner is voor verdere verbetering van de offshore windclusters die worden gebouwd tot 2030. Wij leveren in 2019 een verbeterde versie van integrale optimalisatie van windclusters. Wij koppelen zogmodellering met modellen voor elektrische infrastructuur tezamen met een optimalisatieroutine. Het ontwikkelde kostenmodel voor offshore windenergie wordt gekoppeld zodat we de meest kosteneffectieve optie te kunnen vinden. Voor de ontwikkeling van innovaties van ondersteuningsconstructies, monitoringsystemen, onderhouds- en installatiestrategieën ontwikkelen, valideren en leveren we de modellen voor een breed scala aan technologieën.

Windclusters

- Gevalideerde zogmodellen zijn beschikbaar.
- Ontwerp van windparkregelingen voor innovatieve toepassingen.

Windturbines

- Grote windturbines: voor het ontwerp van grote rotoren ontwikkelen wij de aerodynamica verder en stellen wij gevalideerde modellen beschikbaar.
- Ontwerpondersteuning voor grote windturbines en grote rotoren.
- Windturbिनeregelingen en windparkregelingen zijn de basis van innovaties.

Ondersteuningsconstructies

- State-of-the-art geïntegreerde ontwerptools voor ondersteuning van de industrie worden toegepast om innovatieve ontwerpen te maken en te analyseren.
- ECN part of TNO ontwikkelt effectieve en efficiënte monitoring voor ondersteuningsconstructies in een windpark en test deze in de praktijk.

Installatie

- Implementeren van een installatiekostenmodel om de strategie van installatie van een offshore windpark te optimaliseren.
- Ontwikkelen van tools om de impact te bepalen van ontwerpkeuzes op kostenreductie van installatie en logistiek.

O&M

- Wij implementeren het ECN part of TNO O&M systeem (data-acquisitie, fleet leader, beslissingsondersteuning) in een offshore windpark.
- Ontwikkelen van tools om de impact te bepalen van installatie en logistiek op kostenreductie van onderhoud en beheer.
- Ondersteuning van de optimalisatie van transportschepen, bijvoorbeeld door de menselijke factor mee te nemen in de ontwerpfase van schepen, zodat medewerkers de turbines zo veilig mogelijk kunnen onderhouden.

Systeemintegratie

The stormachtige ontwikkeling van offshore windenergie en de snelle integratie van grote hoeveelheden offshore windvermogen heeft grote gevolgen voor het energiesysteem en de omgeving. Dat raakt de maatschappij. Wij starten innovatieprogramma's inzake maatschappelijke acceptatie en inpassing in de ecologie.

Energiesysteem

- Ontwikkeling van innovatieve oplossingen voor kosteneffectieve inpassing van offshore windenergie in het elektriciteitsnet.
- Ontwikkeling van het elektriciteitsnet voor het inpassen van toekomstige grote offshore windparken.
- ECN part of TNO biedt unieke tools voor de integrale optimalisatie van offshore windcentrales met betrekking tot het ontwerp van het windpark, de controllers van de turbines en windpark, het interne elektrische netwerk, netaansluiting naar land en operations en maintenance.
- Ontwikkeling van innovatieve offshore elektriciteitsnetten, omdat bestaande oplossingen ontoereikend zijn voor de langere termijn.
- Ontwikkeling van windparkregelingen waarmee de offshore windcentrale beter kan inspelen op variaties in de elektriciteitsvraag.

Ecologische inpassing

- Interactie tussen windparken en de omgeving is direct gerelateerd aan kostenreductie en ruimte. Hierbij is acceptatie van offshore windenergie door de Nederlandse bevolking en interactie tussen windparken en natuur belangrijk.
- Wij presenteren een visie om in 2019 een Noordzee onderzoeksfaciliteit te creëren voor onderzoek naar vleermuizen.

- Onderzoek naar levensduurverlenging, vernieuwen van turbines en de economische en ecologische effecten van het al dan niet verwijderen van funderingen en kabels na het einde van de levensduur.
- Onderzoek naar verantwoorde oplossingen om zeeleven rondom windparken te stimuleren.
- Onderzoek naar methoden of systemen voor afschrikking van dieren die slachtoffer dreigen te worden van aanvaringen met windturbines. Onderzoek naar het voorkomen van aanvaringen door dieren, of om de schade van onderwatergeluid te beperken.
- Ontwikkeling van methoden of systemen voor mitigatie van impact zoals bijvoorbeeld het verminderen van onderwatergeluid.

Nieuwe technologie

Omdat windparken tot 2030 opgeschaalde versies zullen gebruiken van huidige horizontale as windturbines, richt de lijn 'nieuwe technologie' zich op ontwikkeling en experimentele validatie van disruptieve ontwikkelingen zoals:

- Drijvende ondersteuningsconstructies
- Ontwerpen van de volgende generatie, grote, robuuste turbines
- Robotica voor onderhoud
- Cybersecurity
- Verticale as windturbines en air-born systemen (kites of vliegtuigen)

Naar grote 20-30MW turbines

- Extreem grote rotoren vereisen compleet nieuwe technologie en modellen.
- Integraal ontwerp vereist vernieuwing in control technologie.
- Opschaling van huidige ondersteuningsconstructies biedt geen mogelijkheid tot robuust ontwerp. Dit vereist het ontwerp van nieuwe concepten.
- Installatie van zulke grote turbines vereisen een nieuwe kijk op installatieschepen en technologie.
- Introductie robotica om onderhoud op afstand te doen of autonoom.

Drijvende windturbines, verticale as, air-born wind

- Ontwerp van nieuwe concepten vereist nieuwe ontwerpen, nieuwe ontwerptools en controllers. Het onderzoeksprogramma omvat de ontwikkeling van nieuwe concepten die op langere termijn kunnen worden toegepast zoals VAWT en air-born windturbines.
- Het onderzoeksprogramma richt zich op het ontwerp van drijvende windturbines, de installatie en het onderhoud daarvan, de logistiek en de ontwikkeling van specifieke schepen en tools.

Doorbraken in meettechnologie

- Betere kennis van windcondities door metingen tot 500m hoogte voor grote rotoren.
- Remote sensing naar hele grote hoogtes voor air-born wind en windparkzog.
- Versnelde certificeringsmethodieken die meer inzicht geven in ontwerp en de faalmethodieken.
- Optimalisatie van logistiek, installatie, onderhoud en beheer voor verbeterde veiligheid, grotere opbrengst en hogere betrouwbaarheid.

Partners en faciliteiten

Wij voeren het onderzoek in nauwe samenwerking met andere disciplines uit en zoeken en vinden volop de samenwerking met:

- andere onderzoeksgroepen binnen TNO,
- kennisinstituten en universiteiten in Nederland: TU Delft, TU Twente, TU Eindhoven, MARIN, Deltares, WMC, KNMI, NLR, NHL
- kennisinstituten en universiteiten in Europa (de EERA partners): DTU, Fraunhofer, SINTEF, CENER, ORE Catapult
- kennisinstituten en universiteiten in de US: NREL en in Japan: FREA-AIST en University of Tokio.

Industriële partners voor belangrijke onderzoekclusters in 2019:

Nederland: GE / LM, Port of Rotterdam, Van Oord, NUON Vattenfall, Shell

In het bijzonder het GROW consortium: Boskalis, Deltares, DNV-GL, DOT, ECN part of TNO, Eneco, IHC, Innogy, Lagerwey, LM Windpower, MARIN, SHL, Royal Smit, SHELL, SIF, Tennet, TUDelft, Van Oord

Europa: GE / LM, Senvion, Enercon, Siemens, Ørsted, Equinor, Vattenfall, Shell

Taiwan: MIRDC, SOIC, TPC, CSC, TOWSC, NTU met lokale support van TSOT en de Nederlandse ambassade

De Nederlandse overheid blijft een belangrijke partner, zowel voor financiering als samenwerkingspartner voor de ontwikkeling van een gezonde windsector in Nederland. In dat kader wordt nauw met TKI Wind op Zee samengewerkt.

ECN part of TNO Windenergie biedt top testfaciliteiten in Wieringermeer:

- EWTW (R&D turbines + prototypes)
- Samenwerking met WMC/LM
- Long range scanning LiDAR systemen

Belangrijke ontwikkelingen zijn:

- GE 12MW @ Rotterdam
- Innovatie windturbine
- Offshore meetinfrastructuur
- Systeem integratie field lab
- Offshore tests
- Robotica faciliteit
- VR/AR field laboratorium

3.4 Dynamiek

De ontwikkeling van windenergie verloopt momenteel stormachtig; de turbines worden snel groter, de implementatie van windparken gaat steeds sneller en de industrie consolideert tot steeds grotere spelers die voldoende slagkracht hebben om miljardenrisico's te kunnen opvangen. Er is voldoende aanleiding om de structuur van het programma te wijzigen.

De kernexpertise "integrale analyses van offshore windparken" is de basis van het grootste deel van het windenergieonderzoek en blijft de basis van het onderzoekprogramma. Om hierin leidend te zijn en te blijven is het noodzakelijk dat we de verschillende deeltechnologieën goed beheersen en voor ieder van de deeltechnologieën state-of-the-art gevalideerde modellen beschikbaar hebben.

Veranderingen en vernieuwing

De kennisportfolio op windturbinegebied richt zich op hele grote turbines: daarvoor is het noodzakelijk nieuwe aerodynamica, nieuwe controllers en betere structurele modellering te ontwikkelen. Het ontwerp en de constructie van lange bladen en ondersteuningsconstructies vereisen steeds nieuwe innovaties om de LCOE laag te houden.

Wanneer grote offshore windparken gerealiseerd zijn, is het noodzakelijk de stroom gedurende 20 jaar voor een goede prijs te kunnen verkopen. Diversificatie van de afzet en het creëren van nieuwe afzetmarkten is noodzakelijk. Een vernieuwing in het programma is de systeemintegratie: oplossingen worden gezocht om het vermogen weg te zetten, te converteren of op te slaan. Daarnaast zijn integratie in het ecologische systeem en maatschappelijke acceptatie cross-overs die urgent moeten worden opgepakt.

Met de samenvoeging van ECN met TNO in 2018 zijn belangrijke toevoegingen aan het windenergie onderzoekprogramma de **cross-overs**:

- Marktmodellen: hoe gaat de markt veranderen en hoe kunnen we die sturen om voor offshore windparken gedurende 20 jaar een afzetmarkt te houden;
- Robotica: reduceren van de noodzaak om medewerkers naar offshore turbines te sturen door gebruik te maken van robotica en sensors;
- Cybersecurity: veiligheid van data, beveiliging van aansturing van windparken;
- Sensorsystemen: gebruik van kennis van technologie ontwikkeld voor defensie en glasvezeltechnologie voor de monitoring bladen;
- Digitalisering en Internet of Things: digital twin concept voor verbeterde monitoring en operationele beslissingsondersteuning;
- Duurzame mobiliteit zoals groene O&M schepen;
- Circulaire economie: Recycling van bladen en gebruik van nieuwe materialen.
- Materiaaltechnologie: gebruik van lichtgewicht constructies, Smart coatings;
- Mobiliteit: optimaliseren transport, installatie en vervoer over land en havens
- Human factor: optimalisatie van de organisatie en fysieke performance van de mens voor onderhoud en installatiewerkzaamheden in windparken.

4 VP Energietransitie

Algemene gegevens	
Titel VP	Naar een maatschappelijk gedragen ENERGIETRANSITIE
Topsector	Energie
Contactpersonen TNO	Ruud van den Brink, Adriaan Slob DM: Harm Jeeninga
Contactpersoon overheid of topsector	Marianne Zandstra, ministerie EZK

4.1 Samenvatting

Het Vraaggestuurd Programma (VP) *Naar een maatschappelijk gedragen energietransitie* heeft als doel:

- Inzicht bieden in de ontwikkeling van en de samenhang binnen de transitie naar een duurzame energiehuishouding met als doel beslissers (bij lokale, nationale en internationale overheden, in bedrijven en consumenten) in staat te stellen beter keuzes te maken: ordening van de meningen en feiten en het duiden van onzekerheden en dilemma's.
- Het ontwikkelen en onderzoeken van beleidsinstrumenten, marktmechanismen en sociale innovaties met als doel de energietransitie sneller te laten verlopen.

Vraagsturing komt o.a. vanuit een door EZK ingestelde klankbordgroep en vanuit de Topsector Energie. De belangrijkste afnemers van de kennis en methoden die ontwikkeld worden zijn overheden (zoals de belangrijkste bij de energietransitie betrokken ministeries EZK, BZK en I&W) en bedrijven (zoals consultancies die een belangrijke schakel vormen tussen onze kennis en de markt).

De belangrijkste onderzoeksvragen en -doelen voor 2019 zijn:

- Wat is de rol van financiële aspecten en kapitaalskosten in de energietransitie? Doel is om onze energietransitie-modellen te verbeteren en om innovatieve financieringsinstrumenten te ontwikkelen.
- Hoe kan de overgang van aardgas naar een duurzame warmtevoorziening plaatsvinden? Doel is om ontwikkelingen in vraag en verduurzaming in het aanbod te duiden en afhankelijkheden in kaart te brengen, met speciale aandacht voor seizoensafhankelijke en geografische aspecten.
- Hoe kan de Nederlandse industrie verduurzaamd worden en wat zijn de gevolgen voor het Nederlandse industrielandchap?
- Welke inrichting en regulering van energiemarkten past bij een duurzaam energiesysteem? Een belangrijke vraag in de overgang naar duurzame elektriciteit is hoe het voor investeerders op lange termijn aantrekkelijk blijft om te investeren in nieuwe duurzame capaciteit.
- Hoe werkt keuzegedrag van consumenten en bedrijven en hoe kunnen we de keuzes kwantificeren? Keuzes van consumenten en bedrijven bepalen

voor een belangrijk deel het welslagen van de energietransitie. Doel is te onderzoeken welke factoren doorslaggevend zijn bij het maken van keuzes.

- Hoe maken we van 'duurzaam het nieuwe normaal'? De energietransitie heeft grote gevolgen voor de inwoners van Nederland en het gedrag van de inwoners heeft grote invloed op de energietransitie. Wat zijn effectieve manieren om te communiceren over energie?
- Wat zijn de meest prangende juridische knelpunten in de energietransitie en wat zijn manieren om die op te lossen?

4.2 Korte omschrijving

Het VP Energietransitie bestaat uit vier onderzoekslijnen, met de volgende inhoud:

1. *Explorative studies transition and innovation*
Uitvoeren van technologieverkenningen en ontwikkelen van transitiepaden en scenario's voor een energievoorziening zonder CO₂-emissies op lokale, nationale en mondiale schaal. Ontwikkelen van effectieve en efficiënte beleidsstrategieën voor de energietransitie.
2. *Socio-economic aspects of sustainable energy systems*
Inzicht bieden op de interacties tussen verschillende aanbod- en vraagsectoren binnen een duurzaam energiesysteem. Ontwerp en regulering van duurzame energiemarkten en de energie-transportinfrastructuur.
3. *Social Innovation*
Motiveren, betrekken, beslissen en leren van alle betrokkenen bij de energietransitie (overheden, bedrijven en burgers). Effecten van de energietransitie op andere maatschappelijke ontwikkelingen en vice versa.
4. *Acceleration, implementation and upscaling*
Organiseren en bestuderen van samenwerkingsmodellen om innovatie en nieuwe business modellen te stimuleren die de energietransitie versnellen

Het VP Energietransitie is een doorsnijdend VP, wat betekent dat er veel interacties en samenwerkingen zijn met alle andere VP's van de unit ECN part of TNO en ook met andere units van TNO (bv. Traffic & Transport, Industrie).

4.3 Resultaten 2019

Het VP Energietransitie wordt het voor een belangrijk deel gefinancierd vanuit een geoormerkte subsidie onder regie van de Directie Klimaat van het ministerie van EZK. Deze is deels bedoeld voor het financieren van samenwerkingen (zoals TKI- en EU-projecten), maar ook in belangrijke mate voor met het ministerie afgestemde kennisopbouw-projecten en voor de verspreiding van die kennis bij relevante stakeholders in de overheid en daarbuiten via workshops en prikkelende publicaties. Belangrijk hierbij is dat het VP voldoende ruimte en flexibiliteit biedt om in te kunnen spelen op actuele kennisvragen, die in 2019 zeker zullen ontstaan na het sluiten van het Klimaatakkoord. Hiervoor zal een deel van de onderzoeksfinanciering gereserveerd worden.

4.3.1 *Lijn 1: Explorative studies transition and innovation*

De rol van financiële aspecten en kapitaalskosten in de energietransitie

Bij de grootschalige uitrol van duurzame energietechnologie spelen financiering en daarmee de risicoperceptie van financiers een belangrijke rol. Dit project richt zich op het beter begrijpen van die aspecten, met als doel innovatieve financieringsinstrumenten te ontwikkelen en onderzoeken.

De energietransitie in de industrie

Het verlagen van de CO₂-emissie in de Nederlandse industrie blijkt een weerbarstig en complex proces. Onderzoeksvragen voor 2019: wat zijn de mogelijkheden voor decarbonisatie, met speciale aandacht voor elektrificatie en voor CCS? Wat zijn de gevolgen van een industrie zonder CO₂-emissies voor het Nederlandse industrie-landschap: welke bedrijven zullen mogelijk wegtrekken en welke zich juist hier vestigen? Welke gedrags- en bedrijfscultuuraspecten spelen een rol bij de investeringsbeslissingen van de bedrijven? In 2019 zal de database met decarbonisatie-opties voor de Nederlandse industrie opgeleverd worden, (MIDDEN-project samen met PBL). Verder worden workshop-formats gemaakt en in de praktijk gebracht rond het stimuleren van duurzame keuzes in de industrie: o.a. voedingsmiddelen-industrie en duurzame procestechnologie.

Verduurzaming van vrachtvervoer, lucht- en scheepvaart

Welke opties zijn er om zwaar transport van vracht en personen te verduurzamen? Welke rol spelen koolstofhoudende brandstoffen daarbij en wat is het potentieel voor duurzame productie van koolwaterstoffen uit bijvoorbeeld biomassa of CO₂. In 2019 leveren we een scenario-studie voor een CO₂-arme energiehuishouding in Nederland (2030-2050), met inbegrip van alle aanbod- en vraagsectoren, inclusief bunker fuels voor lucht- en scheepvaart en grondstoffen ('feedstocks') voor de energie-intensieve industrie.

Technology factsheets

Veel partijen die het klimaatakkoord gaan uitvoeren hebben behoefte aan actuele en goed gedocumenteerde overzichten van energietechnologieën. In 2019 worden de factsheets in samenwerking met PBL opgesteld en op een website gepubliceerd. De gegevens in de factsheets vormen de input-parameters van de energiemodellen van ECN part of TNO.

4.3.2 *Lijn 2: Socio-economic aspects of sustainable energy systems*

Verduurzaming warmtevoorziening

De komende decennia moet aardgas als belangrijkste warmtebron voor gebouwde omgeving en industrie vervangen worden door duurzame alternatieven. Onderzoeksvragen zijn: is er voldoende aanbod van alternatieve warmtebronnen? Welke invloed heeft elektrificatie van de warmtevoorziening op de vraag naar duurzame elektriciteit? En matcht het aanbod zowel qua plaats als qua tijd met de vraag naar warmte? Hoe te voorzien in buffers voor pieken in de warmtevraag en wie gaat die buffers betalen? Hoeveel gas is er nog nodig en hoe verandert de overgang van 'oud gas' naar 'nieuw gas' de gasmarkt? Doel voor 2019 is een scenariostudie uit te voeren naar de verduurzaming van de warmtevoorziening. Een van de onderzoeksuitdagingen hierbij is hoe om te gaan met de benodigde geografische resolutie in de energiemodellen om dit goed te doen.

Afstemmen van nieuw aanbod en nieuwe vraag naar elektriciteit

Elektrisch rijden, elektrisch verwarmen en elektrificatie van industriële processen zullen de vraag naar elektriciteit doen toenemen en de vraagpatronen over een etmaal en over het jaar flink veranderen. Onderzoeksvragen zijn: hoe kunnen de nieuwe vraagsectoren een rol spelen in buffering van elektriciteit uit variabele duurzame bronnen? Welke rol kan waterstof spelen? Hoe blijft het voor investeerders op lange termijn aantrekkelijk om te investeren in nieuwe duurzame capaciteit? Welke marktmodellen dragen ertoe bij de stroomvoorziening betrouwbaar te houden?

Op deze gebieden zal in 2019 de kennis versterkt worden, zodat daarna voorstellen voor marktordening kunnen worden opgesteld en doorgerekend. Doel 2019: 'White paper' over regulering van de energiemarkt.

4.3.3 *Lijn 3: Social innovation*

Kwantificeren keuzegedrag

ECN heeft in het recente verleden het CODEC-model ontwikkeld waarin de verschillende factoren die de keuzes van consumenten voor de aanschaf van duurzame energietechnologieën (PV-panelen, elektrische auto's) worden afgewogen. In 2019 willen we CODEC uitbreiden met onder andere keuzegedrag in bedrijven en de koppeling leggen met economische energiemodellen zoals OPERA. Daarnaast zal worden gewerkt aan de theoretische onderbouwing van CODEC, zoals onderzoek naar *tipping points* waarop bepaalde technologieën doorbreken van de voorlopers naar de meerderheid van de consumenten. Hierbij wordt aangesloten bij een TNO-breed Early Research Project (Wise decision making) en is een consortium opgezet met onder andere de Universiteit Utrecht. In 2019 zal een artikel gepubliceerd worden over kwantificeren keuzegedrag en het CODEC-model.

Energierectvaardigheid

De energietransitie is een grote maatschappelijke verandering met grote financiële implicaties en mogelijke effecten op de verdeling van welvaart binnen landen en tussen landen. Over die implicaties en over andere rechtvaardigheidsvragen rond de energietransitie is in Nederland nog weinig bekend. Wat zijn bijvoorbeeld de effecten van het Klimaatakkoord op kwetsbare groepen in de samenleving? Wat zijn praktische beleidsinstrumenten die een oneerlijke verdeling van lusten en lasten van de energietransitie kunnen voorkomen? Een doel voor 2019 is een samenwerkingsproject op dit onderwerp op te zetten.

Communicatie en de Energietransitie: 'duurzaam is het nieuwe normaal'

In verschillende domeinen, met name veiligheid en gezondheid, hebben zich de afgelopen decennia grote veranderingen voltrokken in de perceptie van wat normaal is en wat uitzonderlijk is. Welke factoren en instrumenten kunnen helpen om van duurzaam gedrag het nieuwe normaal te maken? Daarnaast heeft veel nieuwe energietechnologie grote implicaties voor omwonenden en andere betrokkenen, zoals zonne-weides, windparken en ondergrondse opslag van energiedragers en van CO₂. Wat zijn afwegingsprocessen en communicatie-trajecten die werken om zorgvuldig beslissingen te nemen?

4.3.4 *Lijn 4: Acceleration, implementation and upscaling*

Juridische aspecten van de energietransitie

De energietransitie kent veel juridische aspecten, onder andere rond marktregulering en mededingingsrecht. Doel voor 2019 is deze systematisch in kaart te brengen, de meest prangende knelpunten te identificeren en suggesties doen voor oplossing daarvan.

Strategieën voor opschaling en uitrol van de energietransitie

In 2019 willen we onder ander het concept van Societal Embeddedness Levels verder ontwikkelen, waarbij parallel aan de technische ontwikkeling (TRLs) ook de maatschappelijke haalbaarheid in stappen zal worden omschreven. Verder zullen methodologieën opgezet worden voor de ontwikkeling van business modellen, die zullen worden toegepast in andere roadmaps (o.a. op gebied van waterstof en van elektrificatie van de industrie). Oplevering van een prototype van de Societal Embeddedness Levels methodologie en toepassing in twee case studies.

4.3.5 *Belangrijkste partners en afnemers van kennis*

- Overheden en internationale organisaties: Ministerie van EZK, BZK en I&W, PBL, CBS, RVO; provincies, gemeenten, VNG; Europese commissie, IEA.
- Topsector Energie: alle TKI's, MVI-programma
- Buitenlandse kennisinstellingen: in een aantal EU-projecten wordt samengewerkt met top-instituten op gebied van energiemodellering zoals FEEM / CMCC / EIEE (IT), Fraunhofer-ISI, KTH (SE), PSI (CH), ETH-Zurich (CH) en IAASA (AT).
- Nederlandse kennisinstellingen: structurele samenwerking met de Universiteit van Amsterdam via hoogleraarschappen Bob van der Zwaan en Annelies Huygen. Daarnaast met Universiteit Utrecht (o.a. Copernicus) en Erasmus Universiteit Rotterdam, Amsterdam Institute for Advanced Metropolitan Solutions, Wageningen University. Voor 2019 willen we de samenwerking met de TU Delft versterken.
- ESTRAC-samenwerkingsverband: ECN part of TNO, RUG, New Energy Coalition en PBL, ondersteund door bedrijven als Gasunie, GasTerra, NAM en EBN.
- Bedrijven: banken (er is een Europees consortium gevormd met o.a. BNP-Paribas en Triodos); branchorganisaties van verschillende industriële sectoren; netwerkbedrijven zoals Tennet, Alliander, Gasunie; MKB-aanbieders van energiediensten zoals Drebbl, De Energiebespaarders, Winst uit je Woning, Innax.
- Consultancies: DNV-GL, RH-DHV, Ecofys/Navigant, CE-Delft

4.4 **Dynamiek**

De niet-technische aspecten van de energietransitie staan sterk in de belangstelling. Dat komt tot uiting in de schetsen van de Kennis- en

Innovatieagenda's die binnen de onderhandelingen voor het Klimaatakkoord ontwikkeld zijn. De verwachting is dan ook dat deze aspecten een plek gaan krijgen binnen het innovatieinstrumentarium. Dat was in de Topsector-aanpak beperkt het geval. ECN part of TNO voert momenteel een aantal projecten binnen het MVI-programma uit, maar MVI is beperkt van omvang. Binnen de TKI's is weinig tot geen ruimte voor socio-economisch onderzoek. Dit heeft als gevolg dat binnen de roadmap er relatief weinig nationale PPS-projecten zitten. Wel participeren we in ca. 10 Europese PPS-projecten (Horizon2020). Wij verwachten dat er vanaf 2019 meer ruimte komt voor socio-economisch energieonderzoek in het Nederlandse innovatieinstrumentarium. Een van onze prioriteiten is om meer nationale consortia te vormen waarin we onze kennis ontwikkelen samen met universiteiten en bedrijven die de kennis gaan toepassen.

5 VP Energiesysteem

Algemene gegevens	
Titel VP/ERP	Naar een betrouwbaar duurzaam ENERGIESYSTEEM
Topsector	Energie
Contactpersonen TNO (DM en VPM)	DM: Harm Jeeninga VPM: Sjaak van Loo, Richard Beekhuis
Contactpersoon overheid of topsector	Mart van Bracht, Topsector Energie

De Roadmap 'Energiesysteem' is een 'doorsnijdende roadmap'. Dit betekent dat er raakvlakken zijn met alle andere roadmaps van ECN part of TNO. Deze worden benoemd in de laatste paragraaf van dit VP.

5.1 Samenvatting

Het Programma 'Naar een betrouwbaar duurzaam ENERGIESYSTEEM' heeft als doel de optimale samenwerking tussen energiedragers, infrastructuur en assets te bewerkstelligen bij integratie van grote hoeveelheden duurzame energie, zodat de verduurzaming van het energiesysteem efficiënt en toekomstgericht plaatsvindt terwijl de stabiliteit en betrouwbaarheid gewaarborgd blijft. In dit complexe speelveld van bestaande en nieuwe actoren richt het programma zich op de volgende vier onderzoekslijnen:

1. *Energy System Analysis & Design*
2. *Energy System Robustness & Resilience*
3. *Energy Conversion and Storage*
4. *Energy Transport Infrastructure*

Eén van de doelstellingen is te komen tot één samenhangende vergaand afgestemde suite van modellen waarmee het energiesysteem en haar onderdelen eenduidig en transparant kunnen worden beschreven en waarmee resultaten van verschillende tools en modellen uitwisselbaar worden. De modellen worden uitgebreid met onder andere geografische data en flexibiliteitsopties.

Geografisch gedetailleerde data omtrent energie-infrastructuur, het energieproductiepotentieel, de energievraag, het energiegebruik en aanwezige en potentiële flexibiliteitsopties worden vastgelegd in een Geografisch Energie Informatie Systeem.

Een actueel overzicht van (de rangorde van) flexibiliteitsopties in zowel de Gebouwde Omgeving als de Industrie zal inzicht geven in de rol, kansen, belemmeringen en het potentieel van deze opties. Voor de aansturing van de flexibiliteitsopties worden digitale technologieën ontwikkeld.

De ontwikkeling van elektrolyzers voor de conversie van duurzaam opgewekte elektriciteit in waterstof is gericht op substantiële kostenverlaging van PEM-technologie en opschaling van SOE-technologie. Voor de opslag van energie wordt technologie ontwikkeld voor zowel elektriciteitsopslag, hoge-temperatuur-warmteopslag als grootschalige opslag van energie in de ondergrond.

Low-cost sensoren en innovatieve materialen worden ontwikkeld voor (duurzaam)gas- en hybride-netwerken. Voor dynamische regeling van de gassamenstelling worden besturingsalgoritmen ontwikkeld.

5.2 Korte omschrijving

Het VP 'Naar een betrouwbaar duurzaam ENERGIESYSTEEM' heeft als doel mogelijkheden te scheppen voor de integratie van grote hoeveelheden duurzame energie en de robuustheid en de betrouwbaarheid van het energiesysteem tijdens de energietransitie te handhaven. Het VP Energiesysteem bestaat uit de volgende vier onderzoekslijnen, met hun doelen voor 2020:

1. *Energy System Analysis & Design*

De ontwikkeling van een samenhangende set van instrumenten die een op feiten gebaseerde, transparante integrale techno-economische analyse en ontwerp van energiesystemen mogelijk maakt en die besluitvorming tijdens de transitie van het energiesysteem ondersteunt.

De ontwikkeling is gebaseerd op vergaande afstemming tussen bestaande en te ontwikkelen modellen gericht op analyse en ontwerp van energie(sub)systemen. Het betreft modellen voor toekomstverkenningen, voor strategische en operationele doelen en modellen op verschillende geografische schalen en voor verschillende sectoren. Ontwerpalgoritmen worden ontwikkeld, die op basis van gedetailleerde energie-informatie, randvoorwaarden en doelstellingen, scenariosuggesties kunnen genereren;

2. *Energy System Robustness & Resilience*

Ontwikkeling van technologische innovaties gericht op het stabiel houden van een duurzame energievoorziening met intermitterende en duurzame bronnen waarin de stabiliserende functie van fossiele bronnen wordt afgebouwd.

Digitalisering is voor complexe duurzame decentrale (nieuwe) energiesystemen zowel een kans als een bedreiging: voor het managen en opschalen van geïntegreerde energiesystemen is digitalisering absoluut noodzakelijk, maar door digitale incompatibiliteit, onvoorspelbare algoritmen en kwade opzet kan het ook een bedreiging vormen.

De ontwikkeling richt zich op samenwerkingsmechanismen van opwek, consumptie en flexibiliteitsopties in hun potentiële toepassingssectoren, waaronder de gebouwde omgeving en de industrie. De ontwikkeling van concepten en technologie voor de grootschalige ontsluiting van flexibiliteitsopties is gebaseerd op kennis van geavanceerde controlearchitecturen, security-by-design en bijbehorende, op ICT-gebaseerde, technologieën;

3. *Energy Conversion and Storage*

Ontwikkeling van technologieën voor de conversie van elektriciteit naar waterstof en voor energieopslag (elektriciteit, warmte en 'moleculen') voor inpassing van grote hoeveelheden duurzame energie en voor de koppeling tussen verschillende sectoren (energiesector, industrie, gebouwde omgeving, mobiliteit, etc.).

De ontwikkeling is gebaseerd op systeemkennis van het energiesysteem en van de verschillende sectoren in combinatie met (proces technologische, elektrochemische en materiaalkundige) kennis van conversie- en

opslagtechnologieën en kennis van de ondergrond (grootschalige energieopslag in de bodem);

4. *Energy Transport Infrastructure*

Integratie van verschillende energiebronnen, -dragers en -gebruikers binnen één energiesysteem vraagt een integrale benadering van het ontwerp van de energietransport-infrastructuur. Ontwikkeling is gericht op technologische inpassing van grootschalige productie van duurzame energie (wind, zon, geothermie en biomassa) in de energietransport-infrastructuur door knelpuntanalyse, ontwerp, optimalisatie en controle van infrastructuur voor energietransport (stroom, warmte en gas).

De ontwikkeling is gebaseerd op technologische kennis van (de belemmeringen en het potentieel van) het bestaande en toekomstige energiesysteem. Ontwerp, optimalisatie en controle vraagt kennis op het gebied van procestechnologie, warmte- en stofoverdracht, vloeistof- en gasstroming, sensoren en meettechnologie.

5.3 Resultaten 2019

In onderstaande wordt voor de vier onderzoekslijnen op hoofdlijnen beschreven welke kennisontwikkelingsprojecten voorgesteld worden, wat de beoogde resultaten zijn en met welke partijen in kennisinvesteringsprojecten zal worden samengewerkt.

5.3.1 *Energy System Analysis & Design*

5.3.1.1 *Kennisontwikkeling 2019:*

- *Integrale techno-economische analyse van energiesystemen*

Er zijn verschillende tools en modellen in gebruik voor het beschrijven van het energiesysteem en voor analyse van verduurzamingsstrategieën binnen het energiesysteem. De resultaten van deze tools en modellen zijn sterk afhankelijk van gebruikte aannames en data-input en zijn daardoor beperkt vergelijkbaar en transparant.

Ook binnen ECN part of TNO zijn verschillende tools en modellen beschikbaar waarvan de onderlinge uitwisselbaarheid en vergelijkbaarheid niet gegarandeerd is. Integratie van de beschikbare tools en modellen tot een afgestemd instrumentarium voor integrale analyse van het energiesysteem verhoogt de bruikbaarheid hiervan voor onder andere de uitvoering van toekomstverkenningen en het analyseren van verduurzamingsstrategieën in het kader van de Regionale Energie Strategieën (RES).

Doelstelling is te komen tot één samenhangende vergaand afgestemde suite van modellen waarmee het energiesysteem en haar onderdelen eenduidig en transparant kunnen worden beschreven en waarmee resultaten van verschillende tools en modellen uitwisselbaar worden.¶

- *Ontwerpalgoritmen*

Het ontwikkelen van optimale verduurzamingsvarianten en systeemontwerpen is een steeds lastiger wordende opgave vanwege de toenemende diversiteit aan uitgangssituaties, randvoorwaarden, doelstellingen en verduurzamingsopties. Doelstelling is te komen tot ontwerp-algoritmen die in staat zijn bestendige variant-suggesties te genereren binnen een steeds complexer energielandschap.

5.3.1.2 *Beoogde resultaten 2019:*

- *Integrale techno-economische analyse van het energiesysteem:*
 - o Plan van aanpak vergaande integratie van (ECN>TNO) energiesysteemmodellen
 - o Verdere ontwikkeling van (ECN>TNO-)energiesysteemmodellen
- *Ontwerpalgoritmen*
 - o Eerste aanzet tot een algoritme dat in staat is bestendige variant-suggesties te genereren binnen een steeds complexer energielandschap.

5.3.1.3 *Belangrijkste partners en afnemers van kennis:*

- Structureel wordt samengewerkt met de Universiteit van Amsterdam, ESTRAC (samenwerkingsverband van ECN part of TNO, RUG, New Energy Coalition en PBL, ondersteund door bedrijven als Gasunie, GasTerra, NAM), John Hopkins University en universiteit van Bologna;
- In internationaal verband wordt samengewerkt met top-instituten op gebied van energiemodellering zoals FEEM (IT), KTH (SE), PSI (CH), ETH-Zurich (CH), IASSA (AT);
- De belangrijkste afnemers van de kennis en methoden die ontwikkeld worden zijn:
 - o Overheden:
 - Nationaal: bij de energietransitie betrokken ministeries EZK, BZK en I&W);
 - Regionaal en lokaal: initiatiefnemers en verantwoordelijken voor ontwikkeling en implementatie van duurzaamheidsstrategieën);
 - o Adviesorganen (PBL) en consultancy bedrijven die betrokken zijn bij analyse en ontwerp van energiesystemen (o.a. RES'n);
 - o Bedrijven in de energiesector (TSO, DSO, producenten van duurzame energie) en daarbuiten die een belangrijke schakel vormen tussen onze kennis en de markt.

5.3.2 *Energy System Robustness & Resilience*

5.3.2.1 *Kennisontwikkeling 2019:*

- *Flexibiliteit van het energiesysteem*
De flexibiliteit van het energiesysteem zal, bij het uitfasen van fossiele opwekking, deels worden ingevuld door speciaal daarvoor ingerichte systemen, en deels door daarvoor geschikte (bedrijfs)installaties. Om op het

juiste moment benodigde en beschikbare flexibiliteit aan te kunnen sturen zijn inzicht, vooruitzicht, control en monitoring noodzakelijk voor vraag, aanbod, netwerkbelasting en flexibiliteit. Inzicht in enerzijds de behoefte aan flexibiliteit en anderzijds in de mogelijkheden, beschikbaarheid en kosten is nodig om onderbouwde keuzes te maken bij het ontwerp van (systeemmechanismen voor) flexibiliteit.

Doelstelling is te komen tot een actueel overzicht van (de rangorde van) flexibiliteitsopties in de Gebouwde Omgeving, Industrie en Agrarische sector. Het overzicht dient inzicht te geven in de rol, kansen, belemmeringen en potentieel van de verschillende opties.

- *Digitalisering van het energiesysteem:*
Apparaten en installaties worden in steeds grotere mate op afstand bestuurd en gemonitord en gekoppeld via Internet. Daarnaast wordt bij het ontsluiten en aansturen van energieflexibiliteit steeds meer gebruikt gemaakt van IoT-technologieën. Hierdoor ontstaat een cyber-physical systeem, waarbij energie en digitalisering onlosmakelijk met elkaar zijn verbonden. Naast de mogelijkheden die dit biedt, liggen er grote uitdagingen in het stabiel houden van het systeem bij foutsituaties en de wijze waarop het systeem hiervan kan herstellen. Doelstelling is het ontwikkelen van ICT-architecturen, ontwerpcriteria en test- en validatiemethoden voor robuustheidsuitdagingen in een gedigitaliseerd energiesysteem.

5.3.2.2 *Beoogde resultaten 2019:*

- *Flexibiliteit van het energiesysteem*
 - o Technologiebeoordeling en gap-analyse voor flexibiliteitsoplossingen op verschillende tijdschalen, inclusief rangorde-analyse van flexibiliteitsopties;
- *Digitalisering*
 - o Innovatieprogramma 'Digitalisering van het energiesysteem';
 - o Opschalingstechnologieën voor het plug&play configureren en ontsluiten van grote aantallen devices/installaties

5.3.2.3 *Belangrijkste partners en afnemers van kennis:*

- Belangrijke afnemers van kennis op het gebied van flexibiliteit zijn o.a. programmamaverantwoordelijken, netwerkbedrijven, aggregators, installateurs, producenten en industrie als potentiële leverancier van flexibiliteit binnen het energiesysteem;
- Belangrijke afnemers van kennis op het gebied van digitalisering zijn Netbeheerders, laadinfraproviders, aggregators, grootverbruikers, datadienst leveranciers, telecom providers, OEM's

5.3.3 *Energy Conversion and Storage*

5.3.3.1 Kennisontwikkeling 2019:

- *Ketenbeoordeling toepassingsopties duurzame energie*
De efficiency van de inzet van duurzame energie is verschillend voor verschillende sectoren en toepassingen. De efficiency wordt hierbij bepaald door de aaneenschakeling van opwekking, transport, conversie, opslag en gebruik. Doelstelling is inzicht te verwerven in optimale (combinaties van) energieketens voor specifieke sectoren. Dit inzicht dient bij te dragen aan de optimale inzet van energiedragers.
- *Conversie van elektriciteit in waterstof*
Scenario's voor de vergaande verduurzaming van het energiesysteem geven allen aan dat waterstof een belangrijke systeemrol zal vervullen in het toekomstige energiesysteem. Het verlagen van de productiekosten van groene waterstof is hierbij cruciaal. Doelstelling is bij te dragen aan kostprijsverlaging (< 2 €/kg H₂) en verdere industrialisatie van elektrolyzers voor de productie van waterstof.

Energieopslag

Energieopslag is één van de belangrijke opties voor het balanceren van energie-aanbod en -vraag in perioden van onbalans en daarmee voor het bijdragen aan de flexibiliteit van het energiesysteem. Doelstelling is de ontwikkeling van kostenefficiënte technologie voor energieopslag voor de integratie van duurzame energie en de energetische koppeling tussen sectoren.

5.3.3.2 Beoogde resultaten 2019:

- *Conversie van elektriciteit voor verhoging van het ketenrendement*
 - o Techno-economische evaluatie van energieketens waarin conversie en opslag een bepalende rol spelen (NH₃, blauwe en groene waterstof, biogas, etc.)
- *Conversie van elektriciteit naar waterstof*
 - o Ontwikkeling van geharmoniseerde testprotocollen en 'accelerated stress tests' voor elektrolyser componenten;
 - o Op bench-scale gevalideerde nieuw ontwikkelde elektrolyser-componenten;
 - o Low-cost elektrolyser (< 300 k€/kW) concept en designstudie voor opschaling van elektrolyser-technologie tot 1 GW;
 - o Notitie met betrekking tot het potentieel van powerelectronics voor de vergroting van de flexibele inpassing van elektrolyzers in het energiesysteem.
- *Energieopslag*
 - o Ontwikkeling van elektrochemische opslag van elektriciteit (Redox-Flow):

- Verbeterde Li-ion batterijtechnologie op basis van Si-anode-technologie (in samenwerking met LeydenJar Technologies):
- Opschalingsstudie van opslagtechnologie van HT-warmte;
- Potentieel-studie grootschalige energieopslag in de ondergrond;
- Haalbaarheidsstudies hoge-temperatuur warmteopslag in de ondergrond.

5.3.3.3 *Belangrijkste partners en afnemers van kennis:*

- *Elektrolyse:*
UTwente, RUL, Erasmus University, Shell, Akzo, Yara, Dow, Arcelor Mittal, Hydron Energy, Frames, PTG/E, FujiFilm, ISPT, Voltachem, ECCM.
- *Elektriciteitsopslag:*
Wageningen research, TUDelft, LEI, Jenabatteries, LeydenJar Technologies, LEITAT, Pisga Software, ICM INGENIERIA, ENERGY TEAM, INSPIRALIA. Iltgrid, Energieopslag NL, IEA.
- *Warmte opslag:*
TU/e, TUDelft, VITO, Nyrstar, Metalot3C, Differ, ISPT, Group PSA, Shell, Hyvent, Elemetal, , Uniper, Reukema, UminCorp, SIMS Recycling
- *Energieopslag in de ondergrond:*
NAM, EBN, Shell, Gasunie, TenneT

5.3.4 *Energy Transport Infrastructure*

5.3.4.1 *Kennisontwikkeling 2019:*

- *Ontwerp, optimalisatie en controle*
Een toenemende productie van duurzaam gas (biogas, H₂) vraagt om systemen waarin netdrukken en stromingen beïnvloed kunnen worden en waarin de samenstelling van het gas op ieder punt bekend of te berekenen is. De combinatie van dynamische simulatieprogramma's, strategisch geplaatste meet- en regelapparatuur en het aanbrengen van autonome intelligentie in stations geven de mogelijkheid om het net als een intelligent geheel te laten functioneren met een minimum aan sensoren. Gasinfrastructuur is ook inzetbaar om flexibiliteit en balanceringsmogelijkheid te maken voor de elektriciteits- en warmte-infrastructuur. Integratie van verschillende energiebronnen, -dragers en -gebruikers binnen één energiesysteem vraagt een integrale benadering van het ontwerp van de energietransport-infrastructuur.
Doelstelling is de ontwikkeling van modellen voor integraal ontwerp en optimalisatie van nieuwe elektriciteits-, (bio)gas- en warmte-infrastructuur en voor assetmanagement van bestaande energie-infrastructuur.

Bij integratie van duurzaam gas (biogas, H₂, etc.) in het gasnetwerk zal de samenstelling van het gas aan wisselingen onderhevig zijn. Doelstelling is de ontwikkeling van technologie voor de monitoring en controle van de gassamenstelling.

5.3.4.2 Beoogde resultaten 2019:

- *Ontwerp, optimalisatie en controle*
 - Een set van besturingsalgoritmen voor dynamische regeling van gassamenstelling in gasnetwerken ter bepaling van de optimale inzet van sensoren (gericht op kostenverlaging en leveringszekerheid);
 - Doorontwikkeling van gassensoren;
 - Meta-studie met betrekking tot nieuwe materialen voor transport van duurzame gassen in bestaande en nieuwe gasinfrastructuur;
 - Eerste mathematisch model voor degradatie van materialen in gasnetwerken onder invloed van duurzame gassen.

5.3.4.3 Belangrijkste partners en afnemers van kennis:

- TUDelft, TU/e, Univ Bochum, VTT, Alliander, Enexis, Gasunie, Gas Natural, Reganosa, VSL, PTB, TU Braunschweig, NEL, , NPL, . Krohne, Hobre Instruments, HSH, Flexim

Bijdrage Topsector Energie

De roadmap is relevant voor het volledige programma van de Topsector Energie, maar zal vooral bijdragen aan programmalijnen van:

- Thema Systeemintegratie;
- TKI's Urban Energy, Wind op Zee, Energie & Industrie en Gas.

Medegefinancierd vanuit de Topsector Energie zijn in 2018 een aantal KIA's ontwikkeld ('robuust energiesysteem' en 'warmtesysteem') die momenteel als basis worden gebruikt voor programmering binnen een nieuw te vormen Missiegedreven Meerjaren Innovatie Programma (MMIP) Systeemintegratie. Met de Directeur Systeemintegratie van de Topsector Energie (Mart van Bracht) is reeds afgesteld dat het VP Energiesysteem voor een belangrijk deel in het genoemde MMIP zal worden geïntegreerd, hetgeen, na vaststelling, tot aanpassing van het VP kan leiden.

Aansluiting bij NWA routes

Het kennisinvesteringsprogramma sluit tevens aan bij de NWA routes Energietransitie (primair), Circulaire Economie en Grondstoffenefficiëntie, Logistiek en Transport

5.4 Dynamiek

Het VP Energiesysteem is een nieuw VP dat is opgebouwd uit verschillende kennisinvesteringsprogramma's van zowel ECN als TNO Energie. Per 1 september 2018 wordt de organisatie van beide onderdelen verder geïntegreerd. Het afstemmen van de programma's tot één samenhangend en effectief kennisinvesteringsprogramma is derhalve nog in volle gang. Onderdeel van deze herstructurering is de afstemming van de activiteiten op het Thema Systeemintegratie binnen de Topsector Energie, hetgeen, na vaststelling, tot aanpassing van het VP kan leiden.

De roadmap Energiesysteem, waar dit VP onderdeel van is, is een doorsnijdende roadmap waarin nauw samengewerkt wordt met de andere roadmaps binnen de unit ECN part of TNO. Een (niet uitputtend) overzicht in onderstaande tabel:

VP Onderzoeksactiviteiten

Energietransitie Modelontwikkeling analyse en design energiesysteem
 Merit-order energiedragers en flexibiliteitsopties
 Geografisch Energie Informatie Systeem (EIS)
 Interactie nieuwe vraag- en aanbod-opties
 Rol van technologie voor opslag en demand response
 Socio-economische aspecten in besluitvorming

Zon Integratie in energiesysteem (incl. lokale opslag)
 Forecasting (lokale) energieproductie

Wind Energy Integratie in het energiesysteem (incl. conversie en
 opslag)

**Fuels &
Feedstock** Power-to-hydrogen
 Integratie van waterstof in het energiesysteem
 Integratie van bio-energie in het energiesysteem

Industrie Rol van de industrie in het energiesysteem
 Decarbonisatie-opties binnen de industrie
 Hybridisering en elektrificatie van de industrie
 Power-to-integrate, Power-to-separate
 Flexibiliteitsopties binnen de industrie

**Gebouwde
omgeving** Warmtevoorziening (4^e generatie warmtenetten)

6 VP Energie in de gebouwde omgeving

Algemene gegevens	
Titel VP	Energie in de gebouwde omgeving
Topsector / Maatschappelijk Thema	Topsector Energie / Energietransitie
Contactpersonen TNO (DM en VPM)	Richard Braal (DM EpoT), Maurice Hanegraaf (VPM EpoT) + Frits Verheij (Coördinator Aardgasvrije Wijken)
Contactpersonen Overheid / Topsector	Ans van den Bosch (Min. EZK) + Jos van Dalen (Min. BZK) / Lianda Sjerps-Koomen (TKI Urban Energy) + Jörg Gigler (TKI Nieuw gas)

6.1 Samenvatting

De gebouwde omgeving in Nederland staat voor twee grote uitdagingen: een betaalbaar en betrouwbaar alternatief vinden voor aardgas als bron van warmte en de uitstoot van CO₂ in 2050 naar nul terugbrengen.

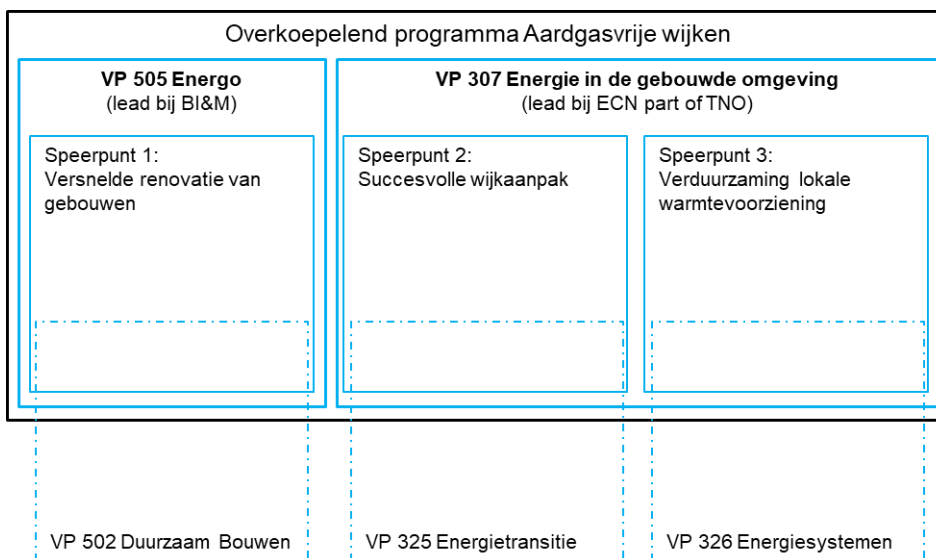
De meeste huishoudens (95%) gebruiken aardgas voor verwarming, warm water en koken. Het niet langer aansluiten van nieuwe woningen op het gasnet is een belangrijke stap in het aardgasvrij maken van ons land. Maar een CO₂-vrij alternatief realiseren in alle bestaande woningen en andere gebouwen, is een enorme opgave. Het betekent 1000 gebouwen per dag renoveren in plaats van de huidige 1000 per jaar, en dat ook nog eens tegen acceptabele maatschappelijke kosten. TNO, inclusief de unit ECN part of TNO, draagt op uiteenlopende gebieden bij aan het realiseren van een CO₂-neutrale toekomst: technologie voor energiepositieve gebouwen en renovatieconcepten, verduurzaming van lokale warmtevoorziening en succesvolle wijkaanpak.

Het VP Energie in de Gebouwde Omgeving is onderdeel van het overkoepelende programma Aardgasvrije Wijken dat bestaat uit drie speerpunten: 1) versnelde renovatie van gebouwen; 2) succesvolle wijkaanpak; en 3) verduurzaming van de lokale warmtevoorziening (zie ook onderstaand schema). De belangrijkste resultaten die TNO in 2019 beoogd te behalen, zijn:

- **Versnelde renovatie van gebouwen (VP Energo)**
 - Technologieontwikkeling ter digitalisering en industrialisering renovatieproces (BIM gedreven processen, robotisering, prefabricatie)
 - Analyse aanpak voor vooroorlogse woningen en monumenten in aardgasloze wijken.
 - Koppeling van monitoring data met modellen voor energieprestatie en binnenmilieukwaliteit, inclusief geluid.
 - Uitbreiding ontwikkelomgeving voor (complexe) warmtepomptesten en systeemdemonstratie van compacte, verliesvrije, thermische opslag.
- **Succesvolle wijkaanpak (dit VP)**
 - Betrokkenheid bij afwegingsprocessen rond het aardgasvrij maken van ten minste twee wijken en/of bedrijventerreinen
 - Opleveren van business modellen en financieringsconcepten voor energiepositieve bedrijventerreinen

- Eerste opzet monitoringsinstrument voor aardgasvrije wijken afgestemd met Rijksoverheid, RVO, VNG, PBL
- **Verduurzaming van de lokale warmtevoorziening (dit VP)**
 - Exploratie 'white spot area' door toepassing innovatieve exploratietechnieken, en realisatie innovatieve put met composite casing
 - Ontwikkeling praktijkrichtlijn geothermie (industrie-standaarden)
 - Realisatie HTO pilot gekoppeld aan een geothermische installatie
 - Ontwikkelen en testen van technologie voor het ontwerp en aansturing van slimme en duurzame warmtenetten.

VP P505 Energo en een deel van VP P502 Duurzaam Bouwen (BI&M is voor beide in de lead) en het VP P307 Energie in de Gebouwde Omgeving (EpoT in de lead) zijn integraal onderdeel van dit overkoepelende programma. Dit programma is nauw afgestemd en interacteert met de programma's P325 Energy Transition en P326 Energy Systems, zie onderstaand schema.



6.2 Korte omschrijving

Huis- en gebouweigenaren moeten de komende jaren op zoek naar een alternatief voor aardgas. Gemeenten, netbeheerders, woningbouwcorporaties en andere partijen zijn gestart met 'aardgasvrije wijken' of 'van gas los' beleid. Dat is een forse uitdaging, want verduurzaming van de warmtehuishouding in de gebouwde omgeving is complex; vanwege de heterogeniteit van de woningvoorraad, verschillen in warmte-infrastructuur, de noodzaak van maatschappelijk draagvlak en beperkingen van de wetgeving. Ook in de industrie ontstaat belangstelling voor alternatieve vormen van warmtelevering – met inzet van zowel hoge en lage temperaturen, elektriciteit en duurzaam gas. Elke oplossingsrichting kent echter beperkingen:

- Duurzame elektriciteit groeit snel (aandeel bijna 14% eind 2017), maar de noodzakelijke netverzwaring is duur en netbeheerders hebben nu al een tekort aan personeel.

- Duurzame warmte zal voor een belangrijk deel komen van geothermie (200+ PJ in 2050), ca. 20-25% van de totale warmtebehoefte in de gebouwde omgeving. In 2017 is dat echter nog maar 3 PJ.
- Duurzaam gas (biogas, groengas, waterstof), al is dat waarschijnlijk niet in voldoende mate beschikbaar om de gebouwde omgeving (en de industrie) van warmte te voorzien.

Dit VP richt zich met name op de inpassing van duurzame warmte; elektrificatie ligt bij VP Energiesystemen. Het VP heeft twee speerpunten: 1) succesvolle wijkaanpak; en 2) verduurzaming van de lokale warmtevoorziening. In samenhang met het speerpunt “versnelde renovatie van gebouwen” in de VP Energo resulteren deze in een basisconcept om te komen tot betrouwbare en betaalbare aardgasvrije wijken.

Doelstellingen 2022 voor het speerpunt **Succesvolle wijkaanpak**:

- Informatievoorziening en afwegingskader, in de praktijk bewezen in minimaal vijf wijken
- Monitoring-instrument in de praktijk toegepast
- Wijkaanpak op te schalen naar honderden wijken
- Blauwdruk marktordering voor warmtevoorziening in de gebouwde omgeving.

Doelstellingen 2022 voor het speerpunt **Verduurzaming van de lokale warmtevoorziening**:

- 20% kostenverlaging voor de productie van duurzame warmte via geothermie
- 25% kostenreductie aanleg en operatie van warmtenetten door innovatief ontwerp en aansturing
- Demonstreren van grootschalige seizoensopslag van warmte in de ondergrond.

6.3 Resultaten 2019

6.3.1 Speerpunt Succesvolle wijkaanpak.

Ontwikkelen kennis en methoden voor beslisondersteuning en monitoring

De overgang naar aardgasvrije verwarming van huizen en andere gebouwen vergt het nemen van besluiten in een complexe omgeving met veel verschillende belangen. Om goede besluiten te nemen is allereerst goede kennis nodig van technische en sociale mogelijkheden. Vervolgens moet die kennis optimaal ingezet worden om het beslisproces bij burgers, overheden en bedrijven te ondersteunen. TNO ontwikkelt in 2019 samen met experts van EUR en TUD een expertise centrum over complexe beslisprocessen (het Energy Policy Support Lab). Een belangrijk aspect hierbij is het onderzoeken van de praktijk in echte afwegingsprocessen rond het aardgasvrij maken van wijken. Vervolgens is de uitdaging succesvolle processen op te schalen naar een groot aantal wijken. Gezien de druk om snel meters te maken, is het belangrijk de voortgang van het aardgasvrij maken van wijken goed te monitoren. Dat betreft daadwerkelijke resultaten (CO₂-emissies, warmtegebruik), maar ook hoe de beslisprocessen verlopen en wat de betrokkenen (met name de bewoners) er van vinden en of ze

hun gedrag aanpassen. Hierbij zal nauw samengewerkt worden met PBL, VNG en RVO. In 2019 zullen o.a. de volgende resultaten worden behaald:

- Betrokkenheid bij afwegingsprocessen rond het aardgasvrij maken van ten minste twee wijken en/of bedrijventerreinen
- Samenwerkingsproject met EUR en TUD voor Energy Policy Support lab ingediend en goedgekeurd.
- Eerste opzet monitoringsinstrument voor aardgasvrije wijken afgestemd met Rijksoverheid, VNG, PBL.

Betrekken van bewoners bij en business modellen voor aardgasvrij wonen

De uitdaging om honderdduizenden woningen per jaar klaar te maken voor verwarmen zonder aardgas, is behalve technisch ook wat betreft financiering, business modellen en organisatie een grote uitdaging. Het grijpt direct in op het dagelijks leven van miljoenen Nederlanders. Een succesvolle wijkaanpak staat of valt bij betrokkenheid van de bewoners. Samen met het VP *Naar een maatschappelijk gedragen energietransitie* worden methodes ontwikkeld om burgers te betrekken bij de besluiten rond aardgasvrije wijken. We richten het onderzoek onder andere op het identificeren en ontwikkelen van drivers waar je verschillende doelgroepen echt mee in beweging krijgt. Dit maakt het voor aanbieders van producten en (advies)diensten rendabel om zich op alle doelgroepen (en niet alleen op de voorlopers) te richten. Ook worden oplossingen geboden waardoor deze aanbieders zich beter kunnen inleven in de doelgroepen (strategische empathie) en daardoor effectieve producten en (advies)diensten kunnen ontwikkelen. Daarnaast is het ontzorgen van bewoners belangrijk: TNO ontwikkelt samen met aanbieders integrale concepten voor renovatie en aardgasvrije warmtevoorziening van woningen. In 2019 zullen o.a. de volgende resultaten worden behaald:

- Publicatie van onderzoek naar business modellen en financieringsmodellen voor renovatie-concepten.
- Resultaten gepubliceerd van onderzoek naar effectiviteit van minstens twee diensten voor ontzorgen van bewoners.

Financieringsmodellen en businessmodellen voor bedrijventerreinen

Nederland kent vele honderden bedrijventerreinen, met daarop een grote variëteit aan warmtevraag en ook aanbod aan restwarmte. TNO ontwikkelt een dynamische energiescan waarin de terugverdientijd een belangrijke parameter is. Gestandaardiseerde oplossingen als alternatief voor gas voor verschillende type bedrijfsgebouwen zijn essentieel maar ontbreken nog. Ook nieuwe financieringsmodellen voor renovaties en business modellen voor de aanbieders daarvan zullen onderzocht worden.

- Opleveren financieringsconcepten voor energiepositieve bedrijventerreinen (resultaat van MVI-project).
- Samenwerking op gebied van de dynamische energiescan met minimaal vier nieuwe bedrijfsterreinen.

Matchen toekomstige vraag en aanbod en marktordening aardgasvrije wijken

De overgang naar aardgasvrije heeft grote consequenties voor de energievoorziening op regionaal en landelijk niveau. Als veel wijken kiezen voor elektrische verwarmen, kunnen we dan voldoende duurzame elektriciteit opwekken, ook op de momenten dat er een grote warmtevraag is? Welke zaken moeten op landelijk en welk op lokaal niveau geregeld worden? En wat moet er

gebeuren op het gebied van marktordening, met name voor warmte, om de te verwachte explosieve groei in geothermie en warmtenetten in de gebouwde omgeving mogelijk te maken? In 2019 zal – in samenwerking met het VP Energietransitie – het volgende resultaat worden opgeleverd:

- Publicatie van een modelleringsstudie over de gevolgen van het aardgasvrij maken van de gebouwde omgeving op de energiehuishouding in Nederland.

6.3.2 *Speerpunt Verduurzaming van lokale warmtevoorziening.* **Speerpunt Succesvolle wijkaanpak.**

Ontwikkelen kennis en methoden voor beslisondersteuning en monitoring

De overgang naar aardgasvrije verwarming van huizen en andere gebouwen vergt het nemen van besluiten in een complexe omgeving met veel verschillende belangen. Om goede besluiten te nemen is allereerst goede kennis nodig van technische en sociale mogelijkheden. Vervolgens moet die kennis optimaal ingezet worden om het beslisproces bij burgers, overheden en bedrijven te ondersteunen. TNO ontwikkelt in 2019 samen met experts van EUR en TUD een expertise centrum over complexe beslisprocessen (het Energy Policy Support Lab). Een belangrijk aspect hierbij is het onderzoeken van de praktijk in echte afwegingsprocessen rond het aardgasvrij maken van wijken. Vervolgens is de uitdaging succesvolle processen op te schalen naar een groot aantal wijken. Gezien de druk om snel meters te maken, is het belangrijk de voortgang van het aardgasvrij maken van wijken goed te monitoren. Dat betreft daadwerkelijke resultaten (CO₂-emissies, warmtegebruik), maar ook hoe de beslisprocessen verlopen en wat de betrokkenen (met name de bewoners) er van vinden en of ze hun gedrag aanpassen. Hierbij zal nauw samengewerkt worden met PBL, VNG en RVO. In 2019 zullen o.a. de volgende resultaten worden behaald:

- Betrokkenheid bij afwegingsprocessen rond het aardgasvrij maken van ten minste twee wijken en/of bedrijventerreinen
- Samenwerkingsproject met EUR en TUD voor Energy Policy Support lab ingediend en goedgekeurd.
- Eerste opzet monitoringsinstrument voor aardgasvrije wijken afgestemd met Rijksoverheid, VNG, PBL.

Betrekken van bewoners bij en business modellen voor aardgasvrij wonen

De uitdaging om honderdduizenden woningen per jaar klaar te maken voor verwarmen zonder aardgas, is behalve technisch ook wat betreft financiering, business modellen en organisatie een grote uitdaging. Het grijpt direct in op het dagelijks leven van miljoenen Nederlanders. Een succesvolle wijkaanpak staat of valt bij betrokkenheid van de bewoners. Samen met het VP *Naar een maatschappelijk gedragen energietransitie* worden methodes ontwikkeld om burgers te betrekken bij de besluiten rond aardgasvrije wijken. We richten het onderzoek onder andere op het identificeren en ontwikkelen van drivers waar je verschillende doelgroepen echt mee in beweging krijgt. Dit maakt het voor aanbieders van producten en (advies)diensten rendabel om zich op alle doelgroepen (en niet alleen op de voorlopers) te richten. Ook worden oplossingen geboden waardoor deze aanbieders zich beter kunnen inleven in de doelgroepen (strategische empathie) en daardoor effectieve producten en

(advies)diensten kunnen ontwikkelen. Daarnaast is het ontzorgen van bewoners belangrijk: TNO ontwikkelt samen met aanbieders integrale concepten voor renovatie en aardgasvrije warmtevoorziening van woningen. In 2019 zullen o.a. de volgende resultaten worden behaald:

- Publicatie van onderzoek naar business modellen en financieringsmodellen voor renovatie-concepten.
- Resultaten gepubliceerd van onderzoek naar effectiviteit van minstens twee diensten voor ontzorgen van bewoners.

Financieringsmodellen en businessmodellen voor bedrijventerreinen

Nederland kent vele honderden bedrijventerreinen, met daarop een grote variëteit aan warmtevraag en ook aanbod aan restwarmte. TNO ontwikkelt een dynamische energiescan waarin de terugverdientijd een belangrijke parameter is. Gestandaardiseerde oplossingen als alternatief voor gas voor verschillende type bedrijfsgebouwen zijn essentieel maar ontbreken nog. Ook nieuwe financieringsmodellen voor renovaties en business modellen voor de aanbieders daarvan zullen onderzocht worden.

- Opleveren financieringsconcepten voor energiepositieve bedrijventerreinen (resultaat van MVI-project).
- Samenwerking op gebied van de dynamische energiescan met minimaal vier nieuwe bedrijfsterreinen.

Matchen toekomstige vraag en aanbod en marktordening aardgasvrije wijken

De overgang naar aardgasvrije heeft grote consequenties voor de energievoorziening op regionaal en landelijk niveau. Als veel wijken kiezen voor elektrische verwarmen, kunnen we dan voldoende duurzame elektriciteit opwekken, ook op de momenten dat er een grote warmtevraag is? Welke zaken moeten op landelijk en welk op lokaal niveau geregeld worden? En wat moet er gebeuren op het gebied van marktordening, met name voor warmte, om de te verwachte explosieve groei in geothermie en warmtenetten in de gebouwde omgeving mogelijk te maken? In 2019 zal – in samenwerking met het VP Energietransitie – het volgende resultaat worden opgeleverd:

- Publicatie van een modelleringsstudie over de gevolgen van het aardgasvrij maken van de gebouwde omgeving op de energiehuishouding in Nederland.

6.3.3 Speerpunt Verduurzaming van lokale warmtevoorziening.

Dit speerpunt bestaat uit de onderwerpen geothermie, seizoensopslag van warmte en duurzame & slimme warmte netwerken.

Innovatieve exploratie & realisatie Geothermie

Doel is het verlagen van geologisch risico, en verlagen van investeringskosten. De grootse investeringskosten voor geothermie zitten in de boorkosten en realisatie van de putten. TNO zet in op de volgende technieken voor kostenverlaging voor putten en vermindering van het exploratierisico op een misboring:

- Ontwikkeling van innovatieve putconcepten
- Toepassen van nieuwe materialen
- Exploratie en performance analyse technieken die het risico op een misboring verkleinen

- Risicoreductie door collectieve aanpak 'geothermal plays'.

Dit moet in 2019 o.a. leiden tot het ontwerp en demonstratie van 'de put van de toekomst' met als doel de investeringskosten met 20% te verlagen.

Productie optimalisatie en veiligheid Geothermie

Het doel van dit onderwerp is een hogere effectiviteit van de productie. De onderzoeksactiviteiten zijn erop gericht om de productie met 20% te verhogen en de ondergrond effectiever en veilig uit te nutten. Door een hogere productie verbetert de business case van geothermie projecten en kan de SDE subsidie worden verlaagd. Tevens kan Geothermie worden ontwikkeld in gebieden waarvan het potentieel nu onvoldoende is. Een nevendoeel is (het vergroten van) veiligheid omdat continue monitoring en performance analyse van het geothermisch systeem integraal onderdeel uitmaakt van de voorgestelde aanpak. TNO zet in op ontwikkeling van de volgende technieken:

- Risicoreductie voor de ontwikkeling van geothermal plays
- Productiviteit/injectiviteits verbetering van putten door optimale integratie van slim design, materialen en stimulatie
- Verlenging levensduur van ondergrondse en bovengrondse installatie en borging veiligheid
- Performance verbetering met hybride oplossingen en warmteopslag
- Een praktijkrichtlijn voor industrie standaarden.

Dit moet o.a. leiden tot de exploratie van een 'white spot area' door toepassing innovatieve exploratietechnieken, en een praktijkrichtlijn geothermie (industrie-standaarden).

Grootschalige demonstratie seizoensopslag warmte

Het doel is om de toepassing van ondergrondse warmteopslag grootschalig mogelijk te maken. Hiertoe zijn grootschalige pilot projecten nodig 40 tot 90 graden in combinatie met uiteenlopende warmtebronnen: geothermisch, zonnewarmte, restwarmte, uit afvalverwerking. De warmte uit die bronnen moet worden opgeslagen in waterhoudende lagen, boorputten, lege mijnen of welke mogelijkheid ter plekke ook voorhanden is. Door het intelligent combineren van warmtebronnen en opslagtechnologieën moet het mogelijk zijn om met opgeslagen warmte een heel seizoen te overbruggen. Vraag van huishoudens en bedrijven matchen dan veel beter met het aanbod. Het overschot in de zomer wordt honderden meters diep opgeslagen in waterhoudende lagen (aquifers) om in de winter te leveren aan warmtenetten. De belangrijkste kennisvragen zijn gericht op verbeteren van het rendement voor warmteopslag en het opstellen van eisen omtrent veiligheid, milieu impact en monitoring.

In 2019 wil TNO een HTO pilot realiseren, gekoppeld aan een geothermische installatie.

Slimme en duurzame warmtenetten

Bestaande warmtenetten bestaan meestal uit één grote (fossiele) warmtebron gekoppeld aan een hoge temperatuur warmtenetwerk. Het warmtenetwerk van de toekomst bestaat uit een combinatie van duurzame warmtebronnen en verschillende type afnemers. Deze afnemers hebben verschillende behoeften ten aanzien van temperatuur. Hierdoor zal de complexiteit van het ontwerp en operatie van warmtenetwerken toenemen. Daarnaast kunnen warmtenetwerken worden gekoppeld aan het elektriciteitsnetwerk en overschotten aan elektriciteit

omzetten in duurzame warmte. TNO werkt aan de ontwikkeling van technologieën die deze complexe netwerken op een optimale manier kunnen ontwerpen en aansturen. Hierdoor kunnen de investeringskosten, en operationele kosten voor het ontwerp en aansturing worden verlaagd binnen de randvoorwaarden betrouwbaarheid en leveringszekerheid. In 2019 worden deze technologieën aan de hand van praktijk cases getest, samen met operators van warmtenetwerken.

6.3.4 *Belangrijkste partners*

TNO werkt samen met een groot aantal partijen. De **belangrijkste partners** en afnemers van kennis zijn:

- Kennispartners: 4TU, Erasmus Universiteit Rotterdam, TU Delft en ISOR.
- Bouw- en installatiebedrijven, zoals BAM, van Wijnen, Heijmans, Emergo, Itho Daalderop, Inventum, Brink, energiebedrijven, netbeheerders, EBN, warmteleveranciers zoals Engie en Hydreco, DAGO, ECW, Shell.
- VNG, Platform 31, gemeenten en branche-organisaties zoals Bouwend Nederland, UNETO VNI, en VLA.
- Rijksoverheid: ministeries BZK en EZK, PBL, RVO.
- Topsector Energie, met name TKI Urban Energy en TKI Nieuw Gas.
- Aanbieders van diensten op gebied van aardgasvrije gebouwde omgeving, bijv. Reimarkt. Consultants als CE Delft, Qing, IF Technology en KWR, beheerders bedrijventerreinen, financiers (OostNL, Rabobank).

6.4 **Dynamiek**

VP Energie in de gebouwde omgeving is nieuw. Onderdelen van het voormalige VP Geo Energie en VP Duurzame Energie zijn hierin opgenomen. Het betreft 'Innovative Production & Optimization', 'Geothermal Energy' en 'Grootschalige ondergrondse energieopslag' respectievelijk 'Duurzame (hybride) warmtenetten' en 'Interacties tussen sociale en institutionele innovatie en technologie' (alleen onderdelen op decentraal niveau).

In 2018 is een enorme dynamiek in Aardgasvrije Wijken ontstaan. Er zijn veel spelers, waarvan een groot aantal nog positie zoeken in dit speelveld. Op 10 juli 2018 is het Klimaatakkoord gepresenteerd. Om de lange-termijn ambitie van een klimaat-neutrale gebouwde omgeving te realiseren is een omvangrijk kennis- en innovatieprogramma nodig. Belangrijk uitgangspunt daarbij is dat de maatschappelijke kosten tot een zo laag mogelijk niveau zijn gedaald. De TKI Urban Energy stelt in samenwerking met TNO en andere partijen een kennis- en innovatieprogramma op voor een aardgasvrije gebouwde omgeving. Er worden meerjarige missie gedreven innovatieprogramma's (MMIP's) ingericht voor de periode 2019 tot en met 2025.

Bedrijven, kennisinstellingen en andere partijen worden gestimuleerd en gefaciliteerd om hun kennis, capaciteit en middelen meerjarig te bundelen in grootschalige consortia die (delen) van de MMIP's kunnen gaan uitvoeren. De Bouwagenda heeft hier samen met TNO, 4TU en andere partijen al op geanticipeerd met de aanstaande oprichting van het Bouw en Techniek Innovatiecentrum (BTIC). In 2018 is tevens – mede door TNO – het Dutch Heat

Center (DHC) opgericht dat in 2019 de basis kan vormen voor een tweede consortium voor de uitvoering van andere delen van deze MMIP's.

TNO zorgt voor aansluiting tussen het BTIC programma en het TKI Urban Energy programma, en tevens met het op te starten onderzoek in het kader van de meerjarige maatschappelijke innovatie programma's, MMIPs. Daarnaast ligt de focus op kennisontwikkeling die haar toepassing zal vinden in het Aardgasloze wijken programma van BZK. Voortgang en planning worden hierbij in samenhang met de relevante ministeries, BZK en EZK, gezamenlijk periodiek afgestemd.

TNO werkt binnen dit VP nauw samen met gemeentes, Platform31, bouw- en installatiebedrijven, woningcorporaties, energiebedrijven, netbeheerders, EBN, warmteleveranciers, brancheorganisaties in de bouw- en energiesector, en met universiteiten en adviesbureaus. Er is 3x per jaar een gezamenlijk overleg met de ministeries EZK en BZK, naast regelmatig overleg met vertegenwoordigers van beide ministeries, RVO, TKI Urban Energy en TKI Nieuw Gas. Er is een goede aansluiting met NWA routes zoals Energietransitie, Smart Liveable Cities, en Circulaire Economie en Grondstoffenefficiëntie.

TNO is dus goed gepositioneerd bij overheden en relevante organisaties in zowel de bouw- en installatiebranche en de energiesector. Daarnaast is TNO nationaal en internationaal actief betrokken bij het opzetten van consortia binnen het speelveld van aardgasvrije wijken.

7 VP Energo - Urban Energy

Algemene gegevens	
Titel VP/ERP	VP Energo - Urban Energy
ERP/Topsector/Maatschappelijk Thema	Energie
Contactpersonen TNO (DM en VPM)	Wim Boogaard, Arie Kalkman
Contactpersoon overheid of topsector	Lianda Sjerps-Koomen



7.1 Samenvatting

Het programma Energie in de Gebouwde Omgeving richt zich op de realisatie van een energieneutrale gebouwde omgeving in 2050 en heeft als doel de ambitie als bevestigd in het Klimaatakkoord om binnen een horizon van 5-8 jaar te komen tot een enorme opschaling van het aantal uit te voeren energierenovaties in de bestaande bouw, te helpen realiseren. De opgave om per jaar ca. 200.000 bestaande woningen van aardgas af te brengen en te voorzien van een duurzame warmtevoorziening is direct gekoppeld aan een vergelijkbaar grote opgave om al die woningen en gebouwen aan te passen aan een nieuwe norm die de bouwkundige transmissieverliezen begrenst. Technologie en processen om deze schaal mogelijk te maken moeten in de komende jaren uitontwikkeld worden, zodat ze vanaf 2022 breed toegepast kunnen worden.

Binnen het programma Energo wordt gewerkt aan technologieën voor opwekking, conversie en – opslag van duurzame energie en technologie en tools die deze ontwikkeling ondersteunen en het verbruik van energie reduceren (met behoud comfort en gezondheid). Speerpunten zijn onder meer compacte warmteopslag, warmtepompen, gebouwgeïntegreerde zonne-energie, BIPV(T), efficiënte HVAC installaties, systeemintegratie, slimme regelingen en monitoring.

In 2019 zal compacte thermisch opslag middels thermochemische opslag met een verhoogde opslagdichtheid van ca. 0.5 GJ/m³ op systeemniveau (~ TRL6) en een opslagmodule op basis van een metaal-redoxreactie (~ TRL4) worden gedemonstreerd. De ontwikkelomgeving voor (complexe) warmtepomptesten

wordt verder uitgebreid (o.a. PVT-warmtepompcombinatie, hybride warmtepompen, smart controls, dynamisch geluid) en zal resulteren in een Heat Pump Application Center. Op BIPV(T) gebied zullen hoge performance gekleurde zonnecollector façade elementen en gekleurd PV op gebouwniveau (field labs) gedemonstreerd worden en zal tevens technologie ontwikkeld worden om gerobotiseerde vervanging van bestaande (asbest) bouwdeelen en plaatsing van de PV elementen mogelijk te maken. Op basis van veldtesten aan praktijksituaties voor nieuwbouw en renovatie zal een validatieprocedure van prestaties op basis van (minimale) sensorset worden opgezet (energieprestaties, binnenluchtkwaliteit).

De activiteiten in dit deelprogramma worden in nauwe samenhang met de energie gerelateerde activiteiten binnen het VP Duurzaam Bouwen uitgevoerd. Innovaties in het renovatieketen (digitalisatie, industrialisatie, robotisering) en beleidsondersteunende modelontwikkeling (energieprestaties, binnenluchtkwaliteit) zijn in het VP Duurzaam Bouwen belegd. Het VP Energo is verder onderdeel van het overkoepelende thema Aardgasvrije Wijken dat bestaat uit drie speerpunten: 1) versnelde renovatie van gebouwen (VP P505 Energo en het VP P502 Duurzaam Bouwen), 2) succesvolle wijkaanpak en 3) verduurzaming van de lokale warmtevoorziening (beide onderdeel van het VP P307 Energie in de Gebouwde Omgeving, welke nauw zijn afgestemd met het VP P325 Energy Transition en het VP P326 Energy Systems).

7.2 Korte omschrijving

7.2.1 Warmtepomp.

Voor de verschillende warmtepomp concepten (lucht/water of water/water) zijn opgaven: Stille binnen en buiten unit, max 25 dB(A) in verblijfsruimten, optimalisatie van de plaatsingsmogelijkheden in verband met geluid, compactheid, uiteindelijk doel qua afmetingen vergelijkbaar met een cv-ketel, esthetiek van buitenunit, indien van toepassing, op systeemniveau optimaliseren van het seizoen rendement (SCOP), hogere afgifte temperatuur en inpassing in (lokaal) gelijkstroomnet op zonnestroom. Naast bestaande principes zijn voor sprongsgewijze verbetering ook (voor de gebouwde omgeving) nieuwe principes nodig. Behalve warmtepomp wordt ook gewerkt aan terugwinning van laagwaardige restwarmte als systeemcomponent. Er is de noodzaak om ook de installatie in de uitvoering te vereenvoudigen. Er zullen eenvoudig te hanteren rekenmodules moeten komen om een warmtepomp met de passende specificaties te selecteren voor een individuele situatie en om de keuze van de plaatsing te ondersteunen. Hierbij is mixed reality voor de installateur een veelbelovend richting.

7.2.2 Warmteopslag.

Voor compacte warmteopslag zijn twee principes in ontwikkeling met perspectief op dichtheden substantieel hoger dan water. Dit zijn (de)hydratatie van zouten en redoxreacties van bijvoorbeeld Cu. Van belang is de ontwikkeling te laten leiden door de eisen die de beoogde toepassing stelt en daarop scherp te sturen. Het kan bijvoorbeeld gaan om de combinatie met een warmtepomp, met zonnecollector of met een (lage temperatuur)warmtenet. De opslagtermijn zal afhankelijk van de toepassing uiteenlopen van enkele weken tot maanden. Op

basis van de beoogde toepassing worden ontwikkeldoelen gesteld als bijvoorbeeld: Verlies vrije opslag, conversie-efficiëntie van systeem met opslag over de hele keten van opwekking tot gebruik, stabiliteit, over het gewenste aantal cycli (afhankelijk van toepassing en verwachte technische levensduur), compactheid, 0.6-1 GJ/m³ op systeemniveau, robuustheid, met betrekking tot handling tijdens transport en installatie, vermogen, afgestemd op applicatie-eisen, LCOE-maximum, 100 €/MWh plus gemonetariseerde netvoordelen als onderdeel van de business case.

Streven is om op een termijn van 5 jaar voor een gekozen toepassing een opschaalbare batterij beschikbaar te hebben. Naast deze relatief snelle route naar de markt, wordt substantieel gewerkt aan fundamentele verbetering van (composiet) opslagmaterialen en reactorconcepten.

7.2.3 *Systeemintegratie, gebouwgeïntegreerd PV en zonthermie, regeling en monitoring.*

Op basis van techno-financiële analyses zullen totaalconcepten voor uiteenlopende situaties ontworpen en uitgewerkt worden en zullen daaruit ontwikkelingen worden afgeleid. Op basis hiervan worden per concept product-ontwikkel roadmaps opgesteld of geactualiseerd. Voor componenten en systeem worden deeltechnologieën en regelalgoritmes ontwikkeld. Aandachtpunten zijn anticiperen op vraag (weersvoorspelling, gebruikers-gedrag), maximalisatie energieopwekking aan de gebouwschil, intern communicatie tussen componenten en afstemming op vraag en aanbod via het energienet. Ook zal daarbij de inzet van zon-PV en elektrische (thuis) opslag als optie moeten worden betrokken. Om de vele variaties aan te kunnen zal de regeling zelflerend moeten zijn. Een emulator zal verder ontwikkeld worden om systemen in hun combinatie in het laboratorium onder dynamische omstandigheden op hun werkelijke prestatie te testen en optimaliseren. Hiervoor worden opstellingen in verschillende laboratoria via een hardware-in-the-loop principe verbonden. Voor de virtuele modelmatige context die hierbij voor de hardware nodig is, wordt een open-source ontwikkeling gestart waar partijen hun rekenmodules voor componenten bij kunnen aanhaken. Voor alle systemen is monitoring van de werkelijke prestatie van de componenten en van het systeem als geheel in de eerste fase van toepassing in het veld (field labs) van groot belang.

7.3 **Beoogde resultaten voor 2019**

- Warmtepompen / systeemintegratie
TNO richt een Heat Pump Application en knowledge Centre in om partijen in de gebouwde omgeving te ondersteunen bij de implementatie en ontwikkeling van warmtepompen in gebouwen. In 2019 worden de volgende activiteiten uitgevoerd:
 - Verdere uitbreiding van de testomgeving voor (complexe) warmtepomptesten (o.a. PVT-warmtepompcombinatie, hybride warmtepompen), doorontwikkeling emulator en inzet voor doorontwikkeling nieuwe duurzame verwarmingsconcepten (incl smart control voor hybride warmtepompen) en focus op werkelijke systeempowerformance.
 - Uitbreiding bestaande testomgeving voor lucht-water warmtepompen met een akoestische meetomgeving waarmee tijdens realistische, dynamische warmtepomp-bedrijfssituaties

- (gerealiseerd met de emulatoromgeving) het geluidbronvermogen van de warmtepomp gemeten kan worden.
 - In het kader van de ambitie om op termijn samen met Nederlandse marktpartijen betaalbare en compacte warmtepompen te ontwikkelen worden samenwerkingsverbanden gevormd en een onderzoeksagenda gedefinieerd. Onderdeel hiervan is de implementatie van alternatieve koudemiddelen met een lage GWP.
- Compacte warmteopslag:
 - Zowel onder het Europese Horizon 2020, EeB, programma als in het nationale TKI Urban Energy programma worden nieuwe prototypes van compacte warmteopslag met verhoogde energiedichtheid ontwikkeld. In voorgaande jaren is verliesvrije warmteopslag middels thermochemische materialen met een opslagdichtheid vergelijkbaar met een warmwatervat bereikt (0.15 – 0.18 GJ/m³) bereikt. In 2019 zal zowel een thermochemische opslag met een verhoogde opslagdichtheid van ca. 0.5 GJ/m³ op systeemniveau (~ TRL6) en een opslagmodule op basis van een metaal-redoxreactie worden gedemonstreerd (~ TRL4). Binnen de lopende projecten zal voor verschillende reactortypes inzicht verkregen worden over de optimale vormgeving, samenstelling en stabiliteitseisen van de reactormaterialen.
 - Doorontwikkeling portfolio van thermochemische materialen: alternatieve niet toxische materialen met een opslagdichtheid van 2-3 GJ/m³ op materiaalniveau, gebruik hybride materialen, thermochemische materialen die geschikt zijn voor het opslaan van warmte die is geproduceerd met een elektrische warmtepomp (ca. 45 °C) en een verkenning naar de mogelijke toepassing van alternatieve thermochemische materiaal- sorbant combinaties (ammoniak, alcoholen) voor de gebouwde omgeving.
- Energieopwekking aan de gebouwschil
 - Om grootschalige opwekking van duurzame energie aan de gebouwschil mogelijk te maken zullen de kosten verlaagd, esthetische kwaliteit verhoogd en gebouwintegratie verbeterd moeten worden. Zowel onder het Europese Horizon 2020, EeB, programma als onder het nationale TKI Urban Energy programma worden meerdere subsystemen en concepten uitontwikkeld en gedemonstreerd (zonthermie en elektriciteit). In 2019 zullen hoge performance gekleurde zonnecollector façade elementen (FITS, façade integrated thermal systems) en gekleurd PV op gebouwniveau (field labs) gedemonstreerd worden. Naast de ontwikkelingen aan de collector en PV elementen, wordt hierbij ook nadrukkelijk de integratie op systeemniveau, inclusief lokale warmte- en elektriciteitsopslag op gebouw- en/of buurniveau om het aandeel duurzame energieverbruik te vergroten, meegenomen.
 - Technologie wordt ontwikkeld om gerobotiseerde vervanging van bestaande (asbest) bouwdeelen en plaatsing van de PV elementen mogelijk te maken. Doorontwikkeling hiervan zal zijn plek vinden in toekomstige renovatietrajecten.

- Monitoring
 - Verhoogde complexiteit en integratie van nieuwe technologieën en het verder luchtdicht maken van gebouwen, maakt dat het waarborgen van de prestaties (o.a. energieverbruik en binnenluchtkwaliteit) sterk in belang toeneemt. Een validatieprocedure van prestaties zal op basis van (minimale) sensorset worden aangetoond voor nieuwbouw- en renovatietoepassingen. Naast de technische aspecten, wordt hierin ook het effect van gebruikersgedrag op de prestaties meegenomen.

De verschillende activiteiten zijn afgestemd en gelinkt met de KIA Gebouwde Omgeving en de gerelateerde MMIP('s) in wording.

7.4 Dynamiek

In samenhang met integratie met het BTIC programma zal zorggedragen worden voor de aansluiting bij het TKI Urban Energy programma en tevens met het VP Duurzaam bouwen -P502 (Energie gebouwde omgeving) en het te starten onderzoek in het kader van de meerjarige maatschappelijke innovatie programma's MMIPs.

Daarnaast zal de focus liggen op kennisontwikkeling die haar toepassing zal vinden in het Aardgasloze wijken programma van BZK. Voortgang en planning worden hierbij in samenhang met de relevante ministeries, BZK en EZK, periodiek afgestemd.

8 VP Naar CO₂-neutrale brand- en grondstoffen

Algemene gegevens	
Titel VP	Naar CO ₂ -neutrale brand- en grondstoffen
Topsector	Topsector Energie
Contactpersonen TNO (DM en VPM)	Richard Braal, René Peters, Jaap Kiel
Contactpersoon overheid of topsector	Kees de Gooijer (TKI-BBE), Jörg Gigler (TKI-Gas)

8.1 Samenvatting

De roadmap Naar CO₂-neutrale brand- en grondstoffen richt zich op een soepele, veilige en efficiënte transitie van traditionele energiebronnen naar hernieuwbare CO₂-neutrale brand- en grondstoffen in 2050. De roadmap omvat de volgende drie R&D lijnen:

- R&D lijn 1 – Traditionele brand- en grondstoffen richt zich op verantwoorde productie en efficiënt gebruik van traditionele bronnen en veilig (her)gebruik en ontmanteling van bestaande infrastructuur. De kosten voor ontmanteling van installaties voor olie en gaswinning wordt door EBN geschat op 7 miljard. R&D in deze programmalijn richt zich op het reduceren van deze kosten door mogelijkheden voor hergebruik van infrastructuur, bijvoorbeeld voor CO₂ transport en opslag of waterstof productie en transport te onderzoeken. Verder wordt gewerkt aan nieuwe methoden om veilig putten af te sluiten door middel van “natural sealing” of het gebruik van bentonite in plaats van cement. Voor bestaande gaswinning, -transport en -opslag is de focus op het veilig opereren van de energie infrastructuur en het optimaliseren van de productie en transport met behulp van slimme sensoren en model-gebaseerde en data gedreven optimalisatie technieken.
- R&D lijn 2 – Biomassa-gebaseerde brand- en grondstoffen richt zich op toepassing van duurzame biomassa binnen een circulaire biobased economy voor de vergroening van de chemie en energie sector, met speciale focus op het gas netwerk (geschatte omvang 10-20 BCM in 2030 = 350-700 PJ/a) en zwaar wegtransport, luchtvaart en scheepvaart met een verwachte omvang van respectievelijk 100, 170 and 580 PJ/a in 2030. De R&D focust op kostenreductie en versnelde marktintroductie van conversietechnologie voor duurzame biomassa en biomassa-reststromen, en op versterking van de competitieve positie voor de Nederlandse industrie. Speerpunten in het onderzoek betreffen biomassa opwerking naar hoogwaardige energiedragers, groen gas productie, biobrandstoffen en chemicaliën co-productie via vergassing en bioraffinage, verbranding van biomassa(residuen), lignine verwaarding via pyrolyse en biochar co-productie.
- R&D lijn 3 – Synthetische brand- en grondstoffen richt zich op de productie van waterstof en synthetische brandstoffen en chemische bouwstenen uit H₂,

CO en CO₂, waarbij de waterstof wordt geproduceerd via elektrolyse met gebruik van duurzame elektriciteit. De R&D focust op kostenreductie en versnelde marktintroductie van conversietechnologie (waaronder elektrolyse), en op versterking van de competitieve positie voor de Nederlandse industrie. Daarbij wordt in het experimentele onderzoek vooral aandacht besteed aan de ontwikkeling van electrolyzers en electrolyser-componenten.

- .

8.2 Korte omschrijving

De roadmap Naar CO₂-neutrale brand- en grondstoffen richt zich op een soepele, veilige en efficiënte transitie van traditionele energiebronnen naar hernieuwbare CO₂-neutrale brand- en grondstoffen in 2050. De roadmap omvat de volgende drie R&D lijnen:

R&D lijn 1 – Traditionele brand- en grondstoffen richt zich op verantwoorde productie en efficiënt gebruik van traditionele bronnen en veilig (her)gebruik en ontmanteling van bestaande infrastructuur. R&D in deze programmalijn richt zich op het reduceren van de kosten voor ontmanteling door mogelijkheden voor hergebruik van infrastructuur, bijvoorbeeld voor CO₂ transport en opslag of waterstof productie en transport te onderzoeken. Verder wordt gewerkt aan nieuwe methoden om veilig putten af te sluiten. Voor bestaande gaswinning, -transport en -opslag is de focus op het veilig opereren van de energie infrastructuur en het optimaliseren van de productie en transport. Belangrijke lange termijn doelen voor 2022 zijn:

- Extensie van de levensduur van oude velden in de Noordzee door ontwikkeling van intelligente proces monitoring en optimalisatie systemen.
- Ontwikkeling EVEREST tool voor reservoir monitoring en robuuste lange termijn optimalisatie van energiesystemen (gas productie en opslag, windenergie, geothermie).
- Verbeteren flexibiliteit van de gas infrastructuur (o.a. sensor platform ontwikkeling, dynamische modellering en indirect self learning modelling concept).
- Hergebruik van uitgeproduceerde platforms op de Noordzee ten behoeve van CO₂ opslag of waterstof productie (North Sea Energy programma).
- Toepassing natural sealing concept voor veilige putafsluiting.

R&D lijn 2 – Biomassa-gebaseerde brand- en grondstoffen richt zich op toepassing van duurzame biomassa binnen een circulaire biobased economy voor de vergroening van de chemie en energie sector, met speciale focus op het gas netwerk (geschatte omvang in 2030 = 350-700 PJ/a) en zwaar wegtransport, luchtvaart en scheepvaart met een verwachte omvang van respectievelijk 100, 170 and 580 PJ/a in 2030. De R&D focust op kostenreductie en versnelde marktintroductie van conversietechnologie voor duurzame biomassa en

biomassareststromen, en op versterking van de competitieve positie voor de Nederlandse industrie. Belangrijke langetermijndoelen voor 2022 zijn:

- Opschaling en demonstratie/validatie TORWASH technologie voor biomassa opwerking tot hoogwaardige energiedragers, MILENA/OLGA/ESME-gebaseerde Groen Gas productie, co-productie van aromatische chemische intermediates (selectieve benzeenafscheiding en etheen aromatisering), FABIOLA technologie voor biomassafractienering en technologie voor co-productie van energie en biochar
- Ontwikkeling van innovatieve biomassa-naar-biobrandstoffen+chemische intermediates waardeketens, gebaseerd op lignocellulose biomassavergassing of bioraffinage en/of op zeewier processing.
- Lignine valorisatie gebaseerd op pyrolyse en getrapte condensatie.
- Demonstratie van de conversie van kolen-gestookte E-centrales tot biomassa WKK's.
- Demonstratie geïntegreerde/ gecascadeerde aanpak om mest te verwaarden naar hernieuwbaar gas, chemicaliën en mineralen.

R&D lijn 3 – Synthetische brand- en grondstoffen richt zich op de productie van waterstof en synthetische brandstoffen en chemische bouwstenen uit H₂, CO en CO₂, waarbij de waterstof wordt geproduceerd via elektrolyse met gebruik van duurzame elektriciteit. De R&D focust op kostenreductie en versnelde marktintroductie van vooral electrolyzers en electrolyser-componenten, en op versterking van de competitieve positie voor de Nederlandse industrie. Belangrijke langetermijndoelen voor 2022:

- Ontwikkeling van een low-cost electrolyser (< 300 k€/kW) concept en bench-scale validatie van nieuwe electrolyser-componenten (samen met tenminste 10 NL bedrijven).
- Uitvoeren van meerdere pilots, o.a. voor water elektrolyse naar waterstof (TRL7) en offshore power to hydrogen – omzetting van windstroom naar waterstof.

8.3 Resultaten 2019

Binnen de kaders van het meerjarige onderzoekprogramma worden voor 2019 binnen de drie R&D lijnen de volgende resultaten en deliverables beoogd:

8.3.1 R&D lijn 1 – Traditionele brand- en grondstoffen

- Uitbouw North Sea Energy programma voor studie systeem integratie offshore energy naar 25 partners en lange termijn financiering (MMIP).
- Opzet eerste pilot voor offshore power to hydrogen op een platform.
- Eerste pilot voor demonstratie natural sealing techniek voor zout of schalie lagen.
- Tweede toepassing van smart gas grid modellering met regionale netbeheerder.
- Doorontwikkeling slimme gas compositie sensor voor waterstof bijmenging.
- Toepassing Everest tool voor een case van een tweede operator naast Equinor.

- Verbeterde modellen voor integriteit van installaties en systeem in interactie met (multiphase) stroming.
- Uitrol van eerste zelflerende numerieke model dat zich het dynamisch gedrag van een bestaande asset zal toe-eigenen om zijn structurele integriteit te analyseren. Hiermee kan worden bepaald of (en tot wanneer) de asset kan worden gebruikt voor geplande (veranderende) operationele condities. Eerste demonstratie case met big data toepassing voor productie optimalisatie.

Binnen de verschillende lopende en aankomende TKI-programma's worden de volgende resultaten verwacht:

- Data-based dynamische modellen voor optimaliseren intermitterend productie van olie-en gas putten.
- Verbeterde modellen voor de drukval van gas putten onder foam stimulatie.
- Verbeterde modellen voor de drukval en kritische productie voor meerfase stroming in annuli.
- Experimenteel gevalideerde modellen voor start/stop gedrag van gas putten onder liquid loading condities.

8.3.2 R&D lijn 2 – Biomassa-gebaseerde brand- en grondstoffen

- Succesvolle piloting TORWASH® technologie voor processing van rioolslib bij waterschap Zuiderzeeland in Almere en op basis daarvan plan voor verdere opschaling en marktintroductie i.s.m. marktpartijen.
- Realisatie en ingebruikname van het nieuw in te richten Sustainable Biofuels Technology lab, met de daarin opgenomen lab-/pilotschaal testfaciliteiten, voor de ontwikkeling van technologie voor biobrandstoffen-productie op basis van vergassing en bioraffinage, en initiatie van een nationaal onderzoekprogramma op dit gebied i.s.m. o.a. bedrijfsleven, TKI's en platform Duurzame Biobrandstoffen.
- In MOJI/AMBIGO-kader: detailontwerp en start bouw van de 4 MWth AMBIGO plant voor Groen Gas productie in Alkmaar, en daaraan gekoppeld verwerving eerste R&D projecten binnen InVesta.
- Gedetailleerde inzichten in de technisch-economische potentie van syngasfermentatie, o.a. binnen H2020 project AMBITION, en op basis daarvan plan voor vervolgvactiteiten.
- Proof of concept technologie voor co-productie van energie en biochar op basis van pilot-schaal experimenten, en validatie van tenminste 1 economisch-aantrekkelijke toepassing, i.s.m. o.a. WUR, DRT, Olam, potgrondbedrijven.
- Eerste resultaten van pilot-schaal experimentele verkenning van zeewier processing naar biobrandstoffen en chemische intermediates in het kader van H2020 projecten MacroFuels en MacroCascade.
- Nader inzicht in de potentie van thermochemische recycling van gemengde kunststoffen op basis van lab-schaal (5 kg/h) experimentele verkenningen.
- Technologie-concept voor de productie van waterstof op basis van gesmolten metaal technologie
- Proof of concept vergisting met geïntegreerde ammonia afscheiding.

- Proof of principle van alkanen-productie uit biogas-terpenen via kraakreacties en van terpeen-af scheiding via geavanceerde oxidatie.
- Proof of concept van een membraan reactor-scheidingsconcept voor productie van DME uit biogas.

8.3.3 R&D lijn 3 – Synthetische brand- en grondstoffen

- Realisatie en ingebruikname van het nieuw in te richten Faraday lab voor electrolyser ontwikkeling van lab- tot pilot-schaal (tot 1MW), met faciliteiten voor karakterisering en analyse, component- en cel-ontwikkeling, stackontwikkeling en –fabricage.
- Eerste resultaten van ontwikkeling en testen van electrolyzers en electrolyser componenten met gebruikmaking van het Faraday lab. In het bijzonder demonstratie van nieuwe polymeermembranen voor toepassing in water elektrolyse op TRL 4 (nodig voor een waterstof kostenniveau van < 2 €/kg).
- 50 kWe PEMWE systeem gedemonstreerd op TRL 5 met bedrijf onder realistische variabele condities.
- Geharmoniseerde testprotocollen en accelerated stress tests voor electrolyser componenten.
- Eerste resultaten van desk studies en screening experimenten op het gebied van:
 - Electrochemie-gebaseerde productie van ammonia
 - Directe productie van brand- en grondstoffen uit zonlicht en CO₂ (solar fuels, in nauwe samenwerking met organisaties voor fundamenteel onderzoek, e.g. Differ)

Betrokken partijen zijn:

Eindgebruikers (Shell, Akzo, Yara, Dow, Arcelor Mittal), technologieleveranciers (Hydron Energy, Frames, PTG/E, FujiFilm), platform organisaties (ISPT) en universiteiten (UT, RUL, Erasmus Universiteit).

Nb. De uitvoering van R&D lijn 3 vindt plaats in nauwe afstemming met aanpalende activiteiten binnen de roadmap “Naar een CO₂-neutrale industrie”.

8.3.4 Samenwerking

De roadmap draagt bij aan alle vier de programmalijnen van TKI-BBE (Thermische conversie van biomassa, Chemisch katalytische conversietechnologie, Biotechnologische conversietechnologie en Solar capturing en biomassa productie) en alle vijf de programmalijnen van TKI-Gas (Geo-energie, Groen gas, LNG, CCUS en Waterstof). Daarnaast zijn er verbindingen met de Topsectoren Chemie (elektrificatie, biomassa als chemische grondstof) en Agri&Food (cascadering, biomassa-residuen, multifunctioneel landgebruik). De aansluiting bij NWA routes betreft in het bijzonder:

- Energietransitie (primair)
- Circulaire economie en grondstoffenefficiëntie: Duurzame circulaire impact
- Duurzame productie van gezond en veilig voedsel

- Logistiek en Transport in een energieke, innovatieve en duurzame samenleving

Een deel van de biomassa-activiteiten vindt plaats binnen het BIORIZON programma, terwijl de electrolyser ontwikkelingen plaatsvinden in het kader van het VOLTACHEM programma.

8.4 Dynamiek

R&D lijn 1 – Traditionele brand en grondstoffen richtte zich tot 2018 op exploratie en productie van (offshore) gasvelden in NL. Het R&D programma is verschoven naar end-of-field technologie voor mature fields, en het slim hergebruiken en afsluiten van leeggeproduceerde velden en putten en andere infrastructuur. Er is aansluiting gezocht met de offshore wind sector en diepe geothermie voor innovaties in het kader van systeem integratie. Voor de gasinfrastructuur is de focus van het onderzoek verschoven naar de inpassing van nieuw gas, groen gas en waterstof en de impact op de integriteit van de installaties, maar blijft de veiligheid en integriteit van het huidig gebruik van de infrastructuur van belang.

Het onderzoekprogramma in 2019 binnen R&D lijn 2 – Biomassa-gebaseerde brand- en grondstoffen betreft op hoofdlijnen een continuering van het Biomassaprogramma zoals dat in 2018 bij ECN en TNO, en vanaf 1 april bij ECN part of TNO, wordt uitgevoerd. Wel is er een aantal accentverschuivingen c.q. wordt een aantal accentverschuivingen verder doorgezet. Dit betreft in het bijzonder:

- Een verdere intensivering van R&D gericht op technologieontwikkeling voor biobrandstoffenproductie (en chemicaliën co-productie) op basis van vergassing en bioraffinage, mogelijk gemaakt door de uitbreiding van de onderzoekinfrastructuur met het Sustainable Biofuels Technology lab.
- Deze infrastructuurinvestering maakt het ook mogelijk enkele mobiele, skid-mounted testunits te realiseren waarmee een aantal gerichte technologieontwikkelingstrajecten kunnen worden versneld (o.a. selectieve benzeenafscheiding, etheen aromatisering en lignine-verwaarding via pyrolyse).
- Met de toenemende aandacht voor circulariteit krijgt nu ook thermochemische recycling van kunststoffen via vergassing en pyrolyse steeds meer aandacht, o.a. gebruikmakend van de ontwikkelde concepten voor selectieve benzeenafscheiding en etheen aromatisering.
- Met de goedkeuring van het omvangrijke H2020 demoproject ARBAHEAT en de nadrukkelijke interesse van E-producten (o.a. ENGIE en RWE) zal de ontwikkeling van technologieconcepten voor de conversie van kolen-gestookte E-centrales tot biomassa WKK's in het onderzoekprogramma significant meer aandacht krijgen.

Voor R&D lijn 3 – Synthetische brand- en grondstoffen geldt net als binnen R&D lijn 2 dat de investering in de uitbreiding van de onderzoekinfrastructuur, hier in de vorm van het Faraday lab voor electrolyser ontwikkeling, een verdere intensivering van het onderzoek mogelijk maakt. Met betrekking tot de electrolyser ontwikkeling is er een goede afstemming met de roadmap "Naar een

CO₂-neutrale Industrie". In de onderhavige roadmap ligt de focus op het goedkoper maken van elektrolyzers voor waterstofproductie, terwijl in de Industrie roadmap de aandacht vooral uitgaat naar het goedkoper maken van industriële elektrificatieprocessen, waaronder de integratie en implementatie van elektrolyzers in midstream/downstream processen voor de productie van intermediates en eindproducten.

9 VP Towards a CO₂-neutral industry

Algemene gegevens	
Titel VP	Towards a CO ₂ -neutral industry
Topsector	Topsector Energie, TKI E&I, TKI-New Gas
Contactpersonen TNO (DM en VPM)	Richard Braal, Jaap Vente
Contactpersoon overheid of topsector	TSE Peter Alderliesten

9.1 Summary

The demand driven program “Towards a CO₂ neutral industry” responds to the societal need for a carbon neutral industry as formulated in the Sectortafel Industrie². Within this program, four solution pathways have been identified for the development of technologies that are robust towards various future energy scenarios for a society that has a net zero CO₂ emission have been defined: Heat, Efficiency and Circularity, Electrification and Products based on Renewable Electricity, and Carbon Capture Use and Storage for the Energy Intensive Industry. Combined these four challenges answer the themes detailed by the Sectortafel Industrie.

In 2022, ECN part of TNO strives

- to have **demonstrated technologies** up to TRL6, with a total summed CO₂ abatement potential of 15 Mt/y in the Netherlands, which is about $\frac{1}{3}$ of the current industrial emissions.
- to have **transferred market ready technologies** to the commercial entities, that function within aligned value chains to serve emerging markets,
- to have initiated and organized (inter)national **research and innovations programs** that play a steering role for the development and implementation of innovative solutions for the CO₂ - neutral industry.

A partial overview of the activities for 2019 includes

- the installation and commissioning of two new major in-house development infrastructures: one for industrial heat management, Carnot Lab, and one for electrolysis, Faraday Lab.
- the completion of a large scale demonstration at TRL6 of an advanced CO₂ capture technology in the steel industry
- the design and preparation for a field test of an advanced energy efficient distillation process

² Bijdrage van de Sectortafel Industrie aan het Voorstel voor hoofdlijnen van het Klimaatakkoord, 10 July 2018, <https://www.klimaatakkoord.nl/binaries/klimaatakkoord/documenten/publicaties/2018/07/10/bijdrage-industrie/180710+-+Bijdrage+Sectortafel+Industrie.pdf>

 STEPWISE advanced CO₂ capture pilot built and operated by ECN part of TNO	 In-house developed electrolyser test station (Faraday Lab)	 200kW compression heat pump test facility (Carnot Lab)
---	---	--

9.2 Short description

The current plan for the demand driven program ‘Towards a CO₂ neutral Industry’ is the first plan in this form after the merger between TNO and ECN. The topics described here originate from both previous organizations and the integration of the activities is in full swing at this moment. From ECN, the activities of the former Program Energy and Industry are fully integrated in here. From TNO, the activities in the fields of CO₂ capture and storage, the energy related sustainable process developments and deep geothermal heat are included.

The Sectortafel Industrie² has formulated a vision on how the industry will look like in 2050. Based on this expression of the societal demands, ECN part of TNO has formulated a vision in which the Dutch industry is fully circular, sustainable and economically robust, and has a zero net CO₂ emission by 2050. This will require major efforts from the industrial sector, as the current emissions are ~46 Mt of CO₂ per year, or roughly one quarter of the national emissions. ECN part of TNO provides solutions for the industry to respond proactively to the consequences of future climate regulations. This supports the industry with the required adaptations and transformations.

The mission of ECN part of TNO is to develop innovative technologies that reduce the annual industrial CO₂ emissions in line with the national reduction target of 20 Mton in 2030. ECN part of TNO organizes the six themes as identified by in the Sector tafel, see also the part ‘Dynamics’, in four R&D lines: About 80% of the industrial energy demand is the form of **Heat**. Renewable supply and more effective use, reuse of waste heat, as well as short term heat storage form an essential part for reducing the CO₂ emissions.

Efficiency and Circularity is a second important topic. Enhancing the energy efficiency, *i.e.* reduction of the energy demand, of industrial processes is

essential to reduce CO₂ emissions. This counts equally for existing fossil feedstock based processes as future process that rely on alternative feedstocks that contribute to a circular industrial ecosystem.

The role of renewable electricity in the total energy mix will grow dramatically in the coming decades. How this low carbon energy carrier can be used most effectively in the industrial sector is a new and fast growing area of investigations. ECN part of TNO is focusing on **Electrification and Products based on Renewable Electricity**. The essence is that conventional sources of energy, like fossil fuels, are being replaced by, renewable, electricity, and the fabrication of products using novel, often electrochemical, approaches in which the use of electricity is essential for an optimal process efficiency.

As a short term and early to be implemented CO₂ mitigation action, **Carbon Capture Use and Storage** for the Energy Intensive Industry will play a major role. Examples include the transition to low carbon hydrogen, and the production of steel with a low carbon footprint. It can also provide a sustainable solution for those industrial sectors that will remain dependent on fossil feedstocks beyond 2050. For the longer term, CO₂ originating from non-fossil sources is expected to play a significant role in supplying carbon to fulfill the societal demand for chemicals.

Through intensive collaborations, various industrial sectors will benefit from the technologies as developed by ECN part of TNO. The **energy intensive and CO₂ emitting sectors**, like iron and steel, refinery and chemistry, are served with reduced CO₂ capture costs, with enhanced energy efficiency and increased electrification options. The **emerging sectors** that fulfil societal demands at minimal societal costs i.e. biobased, circular etc. take advantage from tailored process solutions. The (Dutch) **equipment manufacturers and EPC firms** participate in and benefit from the design and construction of pilots, demonstration units and full size installations.

In 2022 ECN part of TNO strives

- to have **demonstrated technologies** up to TRL6, with a total summed CO₂ abatement potential of 15 Mton per year in the Netherlands,
- to have **transferred market ready technologies** to the commercial entities, that function within aligned value chains to serve emerging markets,
- to have initiated and organized (inter)national **research and innovations programs** that play a steering role for the development and implementation of innovative solutions for the CO₂ - neutral industry.

9.3 Anticipated results 2019

9.3.1 Line 1 Heat

About 80% of the industrial energy demand is the form of heat. A CO₂-neutral industry therefore requires a CO₂-neutral industrial heat system. This activity focuses on (i) the development of technology and concepts for the reuse of waste heat, (ii) the renewable supply of heat and (iii) the decoupling of supply and demand of heat. Technology developments relate to the R&D into different types of heat pump technologies for various applications and into temporarily heat storage technology. These technologies are cross-sectoral and can be

applied in most process industries (chemical, refining, food, paper). The total CO₂-emission reduction potential is ~10 Mt per year.

Key deliverables 2019

- Carnot lab facility commissioned: enabling the development of industrial heat pump and heat storage technology from lab to pilot scale;
- economically feasible 2 MW compression heat pump demonstrated: showing a COP > 3.5 and lifting waste heat from 40-80°C to process heat of 85-125°C, enabling the first market possibilities;
- compact thermoacoustic heat pump demonstrated: showing an efficiency > 50 % of Carnot for the converting waste heat of 50-100°C into medium pressure steam
- Phase Change Material – graphite composite designed: developing for industrial heat storage

Partners involved

End-users (Dow chemical, Tata, SmurfitKappa, DSM, LambWeston Meijer, Huhtamaki, EMMTEC, Royal Cosun, Cargill, Ardagh), **equipment manufacturers** (IBK Group, Heinen & Hopman, Bronswerk Heat Transfer, Howden, RGS), **consultancy firms** (BlueTerra Energy Experts, Recoy, Post & Dekker), and **platform organizations** (ISPT).

Fit with (inter)national agendas

The subject industrial heat is considered very important nowadays. The industrial transition towards net zero CO₂-emissions requires a focus on the supply and use of heat. Most of the current TKI Energy & Industry projects deal with the issue of heat. This is also recognized in the national climate agreement, where heat related issues, specifically the application of heat pumps, has been identified as an important solution.

9.3.2 Line 2 Efficiency and Circularity

Improving the efficiency and recycling of components boosts industrial processes and minimizes the losses. ECN part of TNO focuses on (i) efficient separations, (ii) process intensification and (iii) recovery of valuable chemicals from waste streams. Specific technologies include membrane and sorption based separation, often in combination with a chemical reaction, and advanced distillation. Focal point is on the process industry like (petro) chemical, food and pharma. The successful development of these technologies represents a reduction in CO₂ emissions of 2 Mt/y in the Netherlands. E.g. for membranes and modules only, a market size (sales, no membrane replacement) of 50 million Euro is anticipated.

Key deliverables 2019

- hollow fiber nanofiltration membranes tested: de-risking with real industrial streams (TRL 5).
- business case for HiDiC defined: financial prospects: key technological gaps and risks mitigated to proceed with pilot testing in 2020.
- structured packing heat exchanger scaled up: increasing the mass and heat transfer to increase the efficiency of CO₂ absorption and distillation processes.

- sorption-enhanced DME synthesis (SEDMES) process model developed: design of a continuous production process at TRL5 to be performed in 2020.

Partners involved

End-users: Shell, Huntsman, Dow, AkzoNobel, DSM, Sabic, Arcelor, Tata, **System builders/contractors:** TechnipFMC, Bronswerk, Wijbenga, Vahterus, Orelis-Environnement. **Membrane producers:** Pervatech, CTI (Alsys Group), CoorsTek NL., Solsep BV. **Universities, contract research organizations :** Univ. of Twente, KU Leuven, VITO, **platform organizations** ISPT.

Fit with (inter)national agendas

The activities are closely linked to the TKI Energy & Industry in the efficient process technology lines. Via the direct links with ISPT (the Institute for Sustainable Process Technology) the activities are connected with stakeholders from different sectors and disciplines to process technologies whereby process innovation is strengthened and expedited.

9.3.3 Line 3 Electrification and Products based on Renewable Electricity

The contribution of wind and solar electricity to the fuel mix in the Netherlands is expected to grow rapidly in the coming decades. However, competition for these renewable resources create an uncertainty about their availability for the industry. In addition, new technologies and business models are required to integrate renewable electricity in the industrial sector and to create sufficient flexibility for the operation of the electricity grid.

Within this framework, Power to Chemicals is a key enabling technology proposition to improve the sustainability of the chemical industry. ECN part of TNO will install an integrated electrochemical test facility suitable for process development for the direct and indirect, using hydrogen made via water electrolysis, electrochemical conversion of CO₂ and biomass derived starting materials to value added chemicals and fuels. This line will have a potential to reduce CO₂ emission with 5 Mt/y by 2030 and establish a new economic and environmental sustainable chemical industry in the Netherlands.

Key deliverables 2019

- Faraday laboratory installed: enabling the development of electrolyser and electrochemical separation technologies from lab scale to pilot scale (1 MW electrolyser test station);
- Novel polymer membranes for application in water electrolysis demonstrated at TRL 4: required for a H₂ cost level of < 2 €/kg;
- 50 kWe PEMWE system demonstrated at TRL 5: showing capabilities to operate under realistic variable conditions;
- Showcase paired electrosynthesis to chemicals demonstrated at TRL4.

Partners involved

End-users (Shell, Akzo, Yara, Dow, Arcelor Mittal), **equipment and component manufacturers** (Hydron Energy, Frames, PTG/E, FujiFilm), **platform organizations** (ISPT) and **academic partners** (UT, RUL, Erasmus University).

Fit with (inter)national agendas

The activities are performed within the VOLTACHEM program, in which a large number of chemical and energy related companies participate to steer the direction of the activities. The topics in this research line fit well with the statements of Mission Innovation⁶, where especially the integration of CO₂ capture with electrochemical conversion is highlighted. In addition, ECN part of TNO contributes an agenda setting industrially supported roadmap towards low cost electrolyser < 2 €/kg H₂.

9.3.4 Line 4: Carbon Capture Use and Storage for the Energy Intensive Industry

ECN part of TNO is developing and testing up to TRL6 approaches to capture and convert CO₂ from industrial sectors like the steel, cement, refineries, petrochemicals and waste incinerators. The focus areas are:

- the support and development of robust, reliable and low cost (CAPEX & OPEX) capture from industrial sources to reduce investment risk.
- the valorization of energy containing residual gases (in particular CO) in the steel industry. The philosophy is to convert the energy into value added chemicals while the remaining CO₂ is ready for storage.
- the production of blue hydrogen. ECN part of TNO develops solutions tailored towards the needs of specific end users using solvents, sorbents and membrane technologies. Key for the higher TRL activities is de-risking and improved reliability. A more recent lower TRL activity is the design and fabrication of three dimensional shaped sorbents for more compact installations and reduced capture costs. Development integrated capture and utilization technologies, like CO₂ capture from air for greenhouses, production of chemicals based on CO₂ (eg. DMC through use of UREA for fertilizer-industry, to formaldehyde and others).

Once the CO₂ has been captured, it has to be transported to the injection site and safely stored. This requires the de-risking of offshore storage sites and the development of a multi-user transport systems, that offers flexibility and security of storage capacity supply and that makes best use of existing infrastructure.

Key deliverables 2019

- STEPWISE pilot operations successfully completed: demonstrating the suitability, viability and reliability of the STEPWISE technology in a first industrial application at TRL6;
- technoeconomic viability of urea produced from residual steel gases shown: proving similar economic conditions as the conventional technologies using natural gas opening an early market;
- novel method for reducing solvent degradation by a factor of 5 demonstrated at TRL4;
- aerosol and amine based emission assessed: enabling CO₂ capture at three waste incinerators;
- Integrated CO₂ capture and electrochemical (direct/indirect) conversion shown at TRL 3/4: showing effective synthesis of selected products; selection of breakthrough capture technologies for the energy intensive industry;
- lay-out of planning instrument for a flexible CO₂ network defined: securing storage capacity;
- cooperation models along the CCS chain described: showing viability.

Partners involved

Iron and steel industry (Tata, ArcelorMittal, SSAB), **Waste incinerators** (Twence, AVR, HVC), **oil and gas companies** (BP, Shell), **chemical producers**: (Shell, Akzo, Yara, OCI, Dow), **EPC firms** (Amec Foster Wheeler, Stamicarbon, KT, Cato Engineering) **technology providers**: (Clean Carbon Solutions, iON, AltaIS, Carbonoro) **equipment manufacturers**: (Frames, Array industries), **component suppliers** (Kisuma, Johnson Matthey), **Distribution companies**: (EBN, Gasunie, Porthos consortium), **universities and contract research organizations**, (TU/e and UT, RUL, TUDelft, RU, BGS, Imperial College Swerea Mefos, Polimi, SINTEF, Plant One).

Fit with (inter)national agendas

The topic of CCUS has gained significant attention in recent years and the Netherlands is taking a leading position in this field. CCUS takes a prominent position in the national climate discussions contributing 7 Mt/y by 2030.

Within the top sector Energy, this topic is most hosted by the TKI-Nieuw Gas. Internationally it is incorporated in the European Energy Research Alliance³, in the Strategic Energy Technology Plan⁴ and by the Phoenix Initiative⁵. Worldwide it takes a prominent position in the Mission Innovation initiative⁶. The active participation and leadership of the Dutch government in these initiatives reflects the societal relevance and demand. ECN part of TNO is a contributor to all these initiatives and will continue in this role in the coming years.

Dynamics

9.4

National discussions along the 'Klimaat akkoord' are ongoing. The first tangible document published by the 'Sectortafel Industrie' six major routes. All the topics described are addressed by ECN part of TNO and an overview is presented in the cross table below. These discussions will continue in the second half of 2018. Anticipated outcomes include an 'Integral Knowledge and Innovation Agenda for Climate and Energy' (IKIA-CE), in which several 'Multiyear Mission driven Innovation Programs' (MMIP) will be defined. One of the important aspects is an anticipated transition from small projects to large consortia with long term commitments. ECN part of TNO will contribute together with other stakeholders in the formulation of the visions. The conclusions will be taken into account in an evaluation of the current strategic roadmap and subsequently in the Demand driven Program for 2020.

³ <http://www.eera-set.eu/eera-joint-programmes-jps/carbon-capture-and-storage>

⁴ The SET plan, 12 December 2017 <https://publications.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/771918e8-d3ee-11e7-a5b9-01aa75ed71a1/language-en/format-PDF/source-51344538>

⁵ <http://www.phoenix-co2-valorisation.eu/>

⁶ Accelerating Breakthrough Innovation in Carbon Capture ,Utilization, and Storage, September 2017, <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2018/05/f51/Accelerating%20Breakthrough%20Innovation%20in%20Carbon%20Capture%2C%20Utilization%2C%20and%20Storage%200.pdf>

Six themes in the 'Sectortafel Industrie'.	ECN part of TNO development line			
	Line 1 Heat	Line 2 Efficiency and Circularity	Line 3: Electrification ⁺ and Products	Line 4: CCUS ⁺
CO ₂ reduction target in 2030: 20 Mt/y	10 Mt/y	2 Mt/y	5 Mt/y	7 Mt/y
A. Reduction energy demand	Heat pump technology Heat storage	Separation technologies, e.g. membranes		
B. Heat supply	Ultra-Deep geothermal heat			
C. Electrification	Electrically driven heat pumps	Electrically driven separations	Power2chemicals Green hydrogen	
D. CCS				CO ₂ capture technologies Blue hydrogen Storage assessments
E. Circular feedstocks		Waste to chemical intermediates		Residual steel gases to chemicals
F. Bio based*		Fuels and chemicals		BECCS

+ Also addressed in the TNO-unit Industry

* Also addressed in the demand Driven program Towards CO₂ neutral Fuels and Chemicals

10 Ondertekening

Utrecht, september 2018

W. Boogaard
Managing Director thema Energie