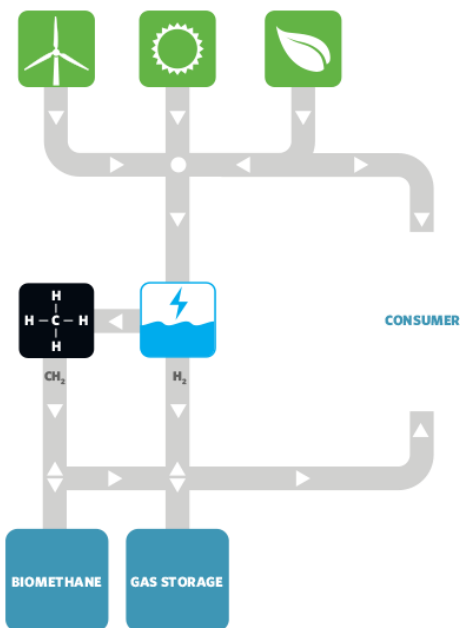




van hall
larenstein
university of applied sciences



De rol van grootschalige energieopslag in de Nederlandse energietransitie



Leeuwarden, juni 2016
Robert Leemburg
Studentnummer 680821242
robert.leemburg@hvhl.nl

De rol van grootschalige energieopslag in de Nederlandse energietransitie

“It always seems impossible until it’s done.” – Nelson Mandela

Opdrachtgever:

EFM energie- & subsidiepartners b.v.

Begeleidende docenten:

Mevrouw Pia Sloots

De heer Jos Theunissen

Bron foto titelblad:

Stedin Netbeheer

Bron figuur titelblad:

DEOdrive, Developing Energy Opportunities

Leeuwarden, juni 2016

Robert Leemburg

Studentnummer 680821242

robert.leemburg@hvhl.nl

Voorwoord

Al sinds ik voor het eerst gefascineerd en geënthousiasmeerd werd door duurzaamheid in het algemeen en duurzame energie in het bijzonder, heeft opslag van energie en hergebruik van CO₂, met name om er weer energie van te maken, mijn aandacht getrokken. Met veel plezier en enthousiasme heb ik dan ook de rol van opslag van energie in de toekomstige Nederlandse energievoorziening, in opdracht van mijn werkgever EFM energie- & subsidiepartners b.v., onderzocht. Dit onderzoek is niet in opdracht van één van de cliënten van EFM uitgevoerd. Er is inmiddels veel onderzocht en geschreven over de energietransitie en de rol van opslag daarin. Veelal zijn dit studies naar één bepaald onderwerp, een allesomvattende visie ontbreekt nog te veel. EFM beoogt met dit onderzoek, naast haar dagelijkse werkzaamheden, bij te dragen aan de energietransitie. Ik wil daarom ook op deze plaats mijn leidinggevende bij EFM, Harry Klein, bedanken voor deze kans, het door hem getoonde enthousiasme en zijn waardevolle feedback.

Om dit onderzoek vorm en inhoud te kunnen geven heb ik diverse experts geïnterviewd en geraadpleegd. Speciale dank gaat dan ook uit naar de geïnterviewden, de heer prof. dr. mr. Catrinus Jepma (RUG), de heer Erik van der Hoofd MSc. (TenneT), de heer ir. ing. Albert van der Molen (Stedin Netbeheer), de heer drs. ing. Frank Pierie, PhD onderzoeker (Hanze Hogeschool Groningen) en de heer prof. dr. Fokko M. Mulder (TU Delft).

Graag wil ik hier ook mijn begeleidende docenten Pia Sloots en Jos Theunissen bedanken voor hun enthousiasme, inspanningen, geduld en waardevolle feedback. Ook een aantal van mijn docenten en studiegenoten heeft mij zeker gemotiveerd en geïnspireerd mijn studie voort te zetten en te voltooien. Het zou teveel zijn om deze hier allemaal te noemen. Toch wil ik enkele van de docenten hier noemen omdat zij mij niet alleen bovenmatig geënthousiasmeerd hebben maar ook veel van hun kennis aan mij over hebben gedragen. Pia Sloots, Jos Theunissen, Klaas Halbesma, Gerrie Koopman, Casper Zoete, Wim Hilbrants, Erik Leunissen, Karin Brouwer en Sietze Bottema, bedankt!

Als laatste wil ik natuurlijk mijn familie en in het bijzonder mijn gezin bedanken voor hun geduld en stimulans. Een man en vader in huis die naast zijn werk weinig tijd over heeft, behalve dan voor zijn studie, en dat 5 jaar lang, is geen pretje. Toch ben ik in die 5 jaar veelal ontzien, werd ik gestimuleerd en gemotiveerd, ontving ik begrip en daar waar nodig ook hulp. Ik durf dan ook te zeggen dat ik, mede dankzij jullie allen, mijn studie en dit rapport succesvol heb kunnen afronden.

Ik wens u veel leesplezier!

Juni 2016,
Robert Leemburg, Nieuwerbrug

Samenvatting

In dit onderzoek staat de vraag centraal welke grootschalige energieopslagtechnieken in aanmerking komen voor een faciliterende rol in de Nederlandse energietransitie en onder welke voorwaarden deze daarin kunnen bijdragen. Om deze vraag te beantwoorden, is een uitgebreide literatuurstudie gedaan naar de Nederlandse energietransitie, opslag van energie en de rol van opslag van energie in Nederland en buitenlandse situaties. Bovendien zijn relevante vakspecialisten geïnterviewd en zijn eigen berekeningen als onderbouwing toegevoegd.

De winning van elektriciteit uit duurzame bronnen is in Nederland grotendeels afhankelijk van meteorologische omstandigheden en daardoor variabel en onzeker. Om duurzame energiesystemen toekomstbestendig te maken dienen vraag en aanbod flexibel op elkaar afgestemd te worden. Een voor de hand liggende oplossing is de opslag van (duurzaam opgewekte) energie. Er is nu nog geen directe noodzaak tot opslag van energie voor de Nederlandse energievoorziening, maar dat zal in de komende jaren gaan veranderen. Na invoering van het Energieakkoord 2013 onderneemt Nederland serieuze stappen om de energievoorziening te verduurzamen. In 2014 werd 10,03% van de totaal gebruikte elektriciteit duurzaam opgewekt, het aandeel duurzame energie in 2014 was 5,6%. De huidige maatschappelijke en politieke discussies over kolencentrales, het meestoken daarin en gebruiken van biomassa voor de energievoorziening en de rol van CO₂ afvang en (ondergrondse) opslag (CCS) zijn van invloed op de voorwaarden waaronder de energietransitie kan plaatsvinden. Ook het gebruik van aardgas als transitiebrandstof staat ter discussie.

Opslag van elektriciteit vraagt om een conversie, waardoor een gedeelte van de energie niet meer nuttig toegepast kan worden (verloren gaat). Alvorens over te gaan tot opslag van elektriciteit is het daarom noodzakelijk te bepalen of er geen alternatieven zijn. Mogelijke alternatieven voor opslag van elektriciteit zijn vraag en aanbod beter op elkaar afstemmen met behulp van slimme transportnetwerken (Smart Grids), regionale, nationale en internationale (Europese) koppelingen van transportnetwerken, gasverbruik voor verwarming vervangen door elektriciteit (Power to Heat), transportbrandstoffen vervangen door elektriciteit en het terugregelen van duurzaam opwekvermogen (bv. windmolens stil zetten) bij teveel aanbod.

Er is momenteel alleen een inschatting te maken van wanneer en bij welke hoeveelheid duurzaam opgewekte elektriciteit opslag benodigd is. Duidelijk is dat er langdurige (seizoens)opslag benodigd is om pieken die voornamelijk 's zomers optreden op te slaan om in de winter te kunnen gebruiken. Bij een penetratiegraad van 70% duurzaam opgewekte elektriciteit is opslag voor Nederland tussen 2030 en 2050 noodzakelijk. Voor de hoeveelheid benodigde opslag is een berekening gemaakt, uitgaande van diverse inschattingen van de benodigde opslagduur.

Voor grootschalige seizoensopslag komen in Nederland alleen de Power to Gas technieken in aanmerking. Andere opslagtechnieken zijn alleen geschikt voor kortstondige opslag (balancerend van het elektriciteitsnetwerk), zijn in Nederland niet of nauwelijks toepasbaar of zijn financieel niet haalbaar. Er worden op diverse schaalgroottes inmiddels succesvolle Power to Gas pilotprojecten ontplooid, zowel in Nederland als het buitenland. Het toepassingspotentieel is groot.

Opslag van energie met de Power to Gas varianten is in Nederland door de bestaande aardgasinfrastructuur en gasopslagfaciliteiten extra interessant. Het synthetische gas kan daardoor worden bijgemengd en er is minder ruimte benodigd. Het doel daarbij is niet om het aardgasverbruik te verduurzamen. Voor een verdere verduurzaming is het noodzakelijk het aardgasverbruik af te bouwen en overtollige elektriciteit op te slaan om dit bij een tekort weer te gebruiken.

Tijdens dit onderzoek zijn diverse aannames gedaan. Nader onderzoek zal moeten uitwijzen of deze aannames juist zijn. Dit onderzoek is dan ook in hoofdlijnen bedoeld om een allesomvattende visie op de energietransitie en de rol van grootschalige opslag daarin te geven. Zo zijn er aannames gedaan over de hoeveelheid benodigde opslag, de opslagduur, energiebesparingen, de verduurzaming van de energievoorziening en de wijze waarop dit wordt ingevuld. Nader onderzoek is tevens noodzakelijk naar de Power to Gas variant met ammoniak.

Bij een goed doordacht en uitgebreid Europees netwerk kan slim gebruik worden gemaakt van verschillende opwekmethoden van duurzame energie. Bijvoorbeeld van waterkracht in Scandinavië en de Alpen, elektriciteitsopwekking met geothermie in Italië en IJsland, windenergie in Noord- West Europa en zonne-energie in Zuid Europa. Daardoor neemt de afhankelijkheid van één of enkele soorten opwekmethoden af en ook de afhankelijkheid van seizoenen en dag- en nachtpatronen, waardoor de noodzaak tot opslag minder groot wordt. Er dient wel rekening gehouden te worden met aanzienlijke transportverliezen over grote afstanden. Onder de huidige (markt)omstandigheden is opslag van energie financieel niet rendabel te exploiteren. Technisch gezien zijn de opslagmethoden geschikt om de benodigde diensten te leveren. Er zullen nieuwe marktmodellen ontstaan, gebaseerd op flexibiliteit en opslag, wellicht in de toekomst gefaciliteerd of zelfs geëxploiteerd door de overheid. Omdat veel aspecten, die niet direct de haalbaarheid van opslag van energie beïnvloeden (ook) van publiek belang zijn. Bijvoorbeeld CO₂-reducties, het voorkomen van aanpassingen van de netwerkinfrastructuur, het minimaliseren van subsidies, adaptie aan klimaatgevolgen, minder kosten voor gezondheidszorg en het betaalbaar en betrouwbaar houden van de energievoorziening. De overheid kan dan de regie houden over de energietransitie en de te behalen doelstellingen. Het is noodzakelijk om de huidige pilotprojecten te evalueren, daar waar mogelijk op te schalen en nieuwe projecten te initiëren en te faciliteren. De opgave waarvoor we staan is aanzienlijk, zowel technisch als financieel, we mogen daarom vooralsnog geen enkele mogelijkheid en techniek onbenut laten.

Summary

The central question in this study is what largescale energy storage technologies are eligible for a facilitating role in the Dutch energy transition and under which conditions they can be of assistance. To answer this question, professional literature about the Dutch energy transition, energy storage and the role of energy storage in the Netherlands and foreign situations was examined. In addition, specialists in various fields were interviewed and our own calculations are included.

The production of electricity from renewable sources in the Netherlands depends largely on the weather conditions and therefore variable and uncertain. To be certain the energy system is viable for the future, the energy supply and the demand must be adapted to each other. An obvious solution is the storage of (renewable) energy. There is no immediate need for energy storage in the Dutch energy supply, but that will change in the coming years. After the introduction of the “Energieakkoord 2013” the Netherlands is taking serious steps to sustain the energy supply. In 2014, 10.03% of the total electricity used was generated with renewable sources, and in 2014 the amount of energy produced was 5.6%. The current social and political debate over coal plants and the use of biomass for energy production and the role of CO₂, and the (underground) storage (CCS) affect the conditions under which the energy transition can take place. The use of natural gas as a transition fuel is debatable.

Storage of electricity requires a conversion, so energy is lost. Before proceeding to store electricity, it is therefore necessary to determine whether there are no alternatives. Possible alternatives for storing electricity are a better balance between the supply and demand with the help of Smart Grids, regional, national as well as international (European) links of transportation networks, replacing gas consumption for heating with electricity (Power to Heat), replacing transport fuels with electricity and regulating the production (for example: stopping the windmills) in case of oversupply.

Currently, it is only possible to estimate when storage will be needed and what amount of storage capacity will be necessary. It is obvious that long-term (seasonal) storage is required for peaks in the summer to use in the winter. With a penetration rate of 70 % renewable electricity, storage will be necessary in the Netherlands between 2030 and 2050. For the amount of required storage, based on various estimates of the required storage time, is a calculation presented.

For large-scale seasonal storage in the Netherlands is Power to Gas the only feasible one. Other storage technologies are only suitable for short-term storage (to equalize the supply and demand of the electricity grid), are not applicable in the Netherlands or financially not feasible. Therefore is Power to Gas the most promising technique to provide large-scale seasonal storage.

There are already successful Power to Gas pilot projects, on a number of scales, both in the Netherlands and abroad. Therefore is there a realistic potential for application.

In the Netherlands, is the storage of energy using the Power to Gas variant even more interesting because of the existing gas infrastructure and the gas storage facilities. The synthetic gas can be mixed and therefore is less space required. The goal here is not to preserve the natural gas consumption. For further preservation is it necessary to reduce the natural gas consumption and to store excess electricity to use it in case of shortages.

During this study, several assumptions were made. Further research is needed to determine whether these assumptions are correct. This research is meant to provide a comprehensive view of the energy transition and the role of large-scale storage here in. There are assumptions made about the amount of required storage, storage duration, energy savings, sustainable energy and how this is accomplished. Further research is also needed for the Power to Gas variant with ammonia.

A well-designed and extensive European network using various methods of generating renewable energy will help to achieve development goals. For example, hydropower in Scandinavia and the Alps, geothermal electricity production in Italy and Iceland, wind energy in North West Europe and solar energy in southern Europe. This increases the dependence on one or a few types of generating methods and also the dependence on seasonal patterns, reducing the need for storage. Significant energy loss because of the long distances has to be taken in account.

Under the current (market) circumstances, the exploitation of energy storage is not financially viable. Technically, the storage methods are suitable to provide the required services. New market models will emerge, based on flexibility and storage facilitated or even operated by the government. Because many aspects that do not directly influence the feasibility for energy storage, are also of public interest. For example, CO₂-reductions, preventing changes to the network infrastructure, minimizing subsidies, adaptation to climate changes, reduced health care costs and keeping energy affordable and reliable. The government can keep control over the energy transition and desired goals. It is necessary to evaluate the current pilot projects, when possible, to upgrade and to initiate and facilitate new projects. The challenges we face are considerable, both technically and financially. Therefore, all techniques or possibilities should be researched.

Inhoudsopgave

1. Inleiding, aanleiding en doelstelling.....	15
1.1 Inleiding en aanleiding onderzoek	15
1.2 Doel onderzoek	16
1.3 Afbakening	16
1.4 Onderzoeksvraag en deelvragen.....	17
1.5 Leeswijzer	17
2. Methodiek van onderzoek	19
2.1 Beantwoording deelonderzoeksvragen	19
2.2 Beantwoording hoofdonderzoeksvraag	22
3. De Nederlandse energievoorziening.....	23
3.1 De huidige Nederlandse energievoorziening.....	23
3.2 De transitie naar een duurzame energievoorziening	26
3.3 CCS (CO ₂ -afvang en opslag).....	29
3.4 De rol van aardgas in de toekomstige energievoorziening	32
3.5 De rol van biomassa in de toekomstige energievoorziening.....	34
3.6 Verduurzamingsopgave	37
4. Opslag van energie, technische haalbaarheid	39
4.1 Waarom opslag van energie?	39
4.2 Wanneer wordt energieopslag noodzakelijk?	42
4.3 Kortstondige opslag en langdurige opslag.....	47
4.4 Opslagtechnieken.....	48
4.5 Technische criteria voor toepassing van opslag van energie	50
4.6 Technische toepasbaarheid in Nederland	56
5. Opslag van energie, financiële haalbaarheid en toepasbaarheid.....	59
5.1 Financiële haalbaarheid	59
5.2 Toepassingspotentieel in Nederland	65
5.3 Toepassingsvarianten.....	67
5.4 Succesbepalende factor, een rol van de overheid?.....	73
6. Discussie	75

7. Conclusie	79
8. Aanbevelingen en suggesties voor verder onderzoek	83
Epiloog.....	85
Bibliografie	87
Bijlagen	93
Bijlage I Energiestromen in Nederland 2013	93
Bijlage II Power to Gas technieken.....	95
Power to Hydrogen	95
Power to Methane	98
Power to Ammonia	99
Bijlage III Succesvolle initiatieven.....	101
Bijlage IV Uitwerking Interviews	107
Uitwerking interview 1 de heer prof. dr. mr. C.J. Jepma	107
Uitwerking interview 2 de heer E. van der Hoofd MSc.....	111
Uitwerking interview 3 de heer ir. ing. A. van der Molen.....	113
Schriftelijke vragen aan de heer prof. dr. F.M. Mulder	117

Begrippenlijst

Back-upvermogen / centrales elektriciteitscentrales die zorgen voor afstemming van vraag en aanbod.

Biogas mengsel van methaangas en koolstofdioxide, ontstaan door vergisting van organisch materiaal.

Biomassa de biologisch afbreekbare fractie van producten, afvalstoffen en residuen van de landbouw (met inbegrip van plantaardige en dierlijke stoffen), de bosbouw en aanverwante bedrijfstakken, alsmede de biologisch afbreekbare fractie van industrieel en huishoudelijk afval.

Biomassa bijstook het mee verbranden van voornamelijk houtachtige soorten bij elektriciteitscentrales die gestookt worden op steenkool.

Bio-raffinage technologie waarbij biomassa en plantaardige grondstoffen in fracties worden gescheiden om zo bio-brandstoffen of andere producten te produceren.

Brandstofcel elektrochemisch toestel die chemische energie van een doorgaande reactie direct omzet in elektrische energie.

CAES Compressed Air Energy Storage, opslagtechniek waarbij lucht wordt gecomprimeerd en opgeslagen in ondergrondse cavernes.

CCS Carbon Capture and Storage, het afvangen van CO₂ wat vrijkomt bij verbranding en het opslaan daarvan, meestal in ondergrondse opslagplaatsen.

CO₂-opslag opslag van CO₂ (in plaats van emissie in het milieu), veelal ondergronds.

COP Conference of Parties, hierbij komen alle partijen die onderdeel uitmaken van het klimaatverdrag van de Verenigde Naties, bijeen.

Corrosief bijtende, invretende werking van stoffen op andere stoffen waardoor materiaal wordt aangetast.

CSP Concentrated Solar Plant, elektriciteitscentrale waarbij elektriciteit wordt opgewekt vanuit opgeslagen warmte door middel van zonne-energie.

Diffusie vermenging van twee ongelijksoortige vloeistoffen of gassen.

Duurzaam opgewekte elektriciteit elektriciteit opgewekt met zo min mogelijk grondstoffen verbruik, gebruikmakend van hernieuwbare bronnen (zon, wind, water, biomassa).

Elektrolyse / electrolyser ontleding van chemische verbindingen (in opgeloste of gesmolten toestand) in hun bestanddelen d.m.v. elektriciteit / toestel voor elektrolyse.

Elektrolyt stof die in waterige oplossing of in gesmolten toestand de elektrische stroom geleidt en daarbij ontleed wordt.

Energiedrager grondstof als bron van energie.

ETS-systeem Emission Trading System, systeem voor uitgifte van emissierechten, waarmee landen of bedrijven rechten krijgen of kopen om bepaalde broeikasgassen of andere schadelijke gassen uit te stoten.

Finaal energieverbruik het totaal nuttige deel van de aangewende energie, dus minus verliezen door transport of omzetting.

Flexibele opwekmethode methode om op een snel reagerende wijze eventuele tekorten in de elektriciteitsvoorziening aan te vullen.

Gasmotor d.m.v. verbrandend gas in beweging gebrachte motor.

Gasturbine schoepenrad dat door een mengsel van warme lucht en verbrandingsgassen van (aard)gas aangedreven wordt.

Groen gas opgewaardeerd biogas met dezelfde kwaliteit als aardgas.

Hybride bastaard, in dit geval tussenvorm.

ICE Endex transparant beursplatform voor (internationale) handel in aardgas en stroom.

Inslagriscio terugslaan van de vlam in de brander van een verbrandingstoestel op gas.

Interconnector internationale verbinding van elektriciteitsnetwerken op hoogspanningsniveau.

Meteorologische omstandigheden / systeem weerkundige omstandigheden / systeem.

Multi Criteria Analyse (MCA) evaluatiemethode om tussen diverse discrete alternatieven een rationele keuze te maken op basis van meer dan één onderscheidingscriterium.

NGO Non-Governmental Organization of in Nederlands een Niet-Gouvernementele Organisatie.

Opslag van energie het opslaan van energie met als doel dit later weer te gebruiken.

P2G afkorting voor Power to Gas.

PEM electrolyser Proton Exchange Membrane electrolyser, toestel om waterstof te vervaardigen op basis van een techniek die gebruik maakt van een membraan.

Penetratiegraad De mate waarin een goed of dienst (in deze situatie duurzaam opgewekte elektriciteit) is doorgedrongen, het aandeel op het totaal.

PHS Pumped Hydroelectric energy Storage, energie opslag waarbij energie gewonnen of opgeslagen wordt door middel van een hoogteverschil tussen twee waterbassins.

Power to Ammonia het opslaan van energie, na conversie, in de vorm van ammoniak.

Power to Gas verzamelnaam voor het opslaan van energie, in de vorm van gas.

Power to Hydrogen het opslaan van energie, na conversie, in de vorm van waterstof.

Power to Methane het opslaan van energie, na conversie, in de vorm van methaan.

Primaire energie / primair energieverbruik totale hoeveelheid energie die gebruikt wordt, dus inclusief transport- en omzettingsverliezen.

PV Photo Voltaic (fotovoltaïsch), een PV-paneel bestaat uit een groot aantal zonnecellen die uit (zon)licht elektriciteit genereren.

Smart Grid elektriciteitsnetwerk aangevuld met informatie en communicatie technologieën die zorgt voor afstemming van vraag en aanbod.

SMES Superconducting Magnetic Energy Storage opslagsysteem waarbij elektriciteit wordt opgeslagen in een supergeleidende spoel.

SOEC Solid Oxide Electrolyser Cell, toestel om waterstof te vervaardigen op basis van een techniek die gebruik maakt van een vast oxide of keramiek elektrolyt.

Stroomdichtheid hoeveelheid stroom die door een oppervlakte-eenheid loodrecht op de stroomrichting vloeit.

Synthetisch gas kunstmatig vervaardigd gas.

Transitie overgang.

Volatiel wisselvallig, onstabiel.

Windenergie door windkracht opgewekte energie.

WKK Warmte Kracht Koppeling, toestel waarbij door verbranding van gas, warmte en elektriciteit wordt opgewekt.

Wobbe-index grootte die het verbrandingsgedrag van het gas karakteriseert en afhangt van de verbrandingswaarde en de relatieve dichtheid van het gas.

Zonne-energie van de zon afkomstige energie die is omgezet in elektriciteit of nuttig aangewende warmte.

Zoutcavernes met water uitgeloopte zoutkoepels, gebruikt als opslagplaats.

Eenheden

Joule	SI-eenheid van energie
Watt	SI-eenheid van vermogen
Wattuur	Eenheid van energie die vaak wordt gebruikt voor elektrische energie

SI-voorvoegsels

kilo	10^3
Mega	10^6
Giga	10^9
Tera	10^{12}
Peta	10^{15}

Stoffen

CH ₄	Methaan
CO	Koolstofmonoxide
CO ₂	Koolstofdioxide
H ₂	Waterstof
H ₂ O	Water
N ₂	Stikstof
NH ₃	Ammoniak

1. Inleiding, aanleiding en doelstelling

1.1 Inleiding en aanleiding onderzoek

Nederland is een land in transitie, veel systemen zijn onderhevig aan verandering. Ons energiesysteem is daarvan een duidelijk voorbeeld. Steeds meer energie wordt duurzaam opgewekt. In Nederland groeien vooral zonne- en windenergie gestaag. Binnen het Energieakkoord uit 2013 neemt windenergie een prominente plaats in (SER, 2013). De winning van elektriciteit uit deze duurzame bronnen is echter afhankelijk van meteorologische omstandigheden en daardoor variabel en onzeker. Om duurzame energiesystemen toekomstbestendig te maken dienen vraag en aanbod flexibel op elkaar afgestemd te zijn. Een voor de hand liggende oplossing is de opslag van (duurzaam opgewekte) energie. Opslag van energie in combinatie met een flexibele opwekmethode voor elektriciteit, waarmee vraag en aanbod beter op elkaar afgestemd kunnen worden, kan de transitie naar een geheel duurzame energievoorziening faciliteren en versterken.

Duurzame energie kan bestaan of opgewekt worden in verscheidene vormen, denk daarbij aan warmte, biogas, biomassa en elektriciteit. Een groot deel van de duurzaam opgewekte energie bestaat uit elektriciteit. Dat is te verklaren doordat veel duurzame productiemiddelen elektriciteit opwekken, waaronder windmolens, zonne-energie, getijdenenergie, waterkracht en vaak ook geothermie. Maar er is ook een duidelijke trend zichtbaar in een verandering van (secundaire) energiedragers. Veel warmteopwekking en transport wordt geëlektrificeerd, denk daarbij aan steeds meer gebruik van warmtepompen, elektrische verwarming en elektrisch vervoer, waardoor de behoefte aan elektriciteit, de vraag, steeds verder toeneemt.

Momenteel is er veel aandacht in de media voor opslag van energie in huishoudens. Onder andere de Powerwall van Tesla (opslag voor thuis opgewekte zonne-energie) is veelvuldig in het nieuws. Dit soort kleinschalige opslagmogelijkheden zal geen grote rol van betekenis kunnen spelen in de Nederlandse gecentraliseerde energievoorziening, omdat het elektriciteitsverbruik in Nederlandse huishoudens circa 2,5% van de primaire energie in 2013 was, 83 PJ van de 3.219 PJ primair energieverbruik (CBS (1), 2015). Juist voor de industrie en (elektrisch) transport is een gecentraliseerde energievoorziening en daarmee ook gecentraliseerde opslag van energie noodzakelijk. Er is nu nog geen directe noodzaak tot opslag van energie voor de Nederlandse energievoorziening, maar dat zal mogelijk in de komende jaren gaan veranderen. Om een robuuste, betaalbare, betrouwbare en veilige energievoorziening in de toekomst te kunnen garanderen is onderzoek, onder andere naar de voorwaarden waaronder opslagtechnieken kunnen worden ingezet, noodzakelijk.

1.2 Doel onderzoek

Opslag van energie in combinatie met een flexibele opwekmethode voor elektriciteit, waarmee vraag en aanbod beter op elkaar afgestemd kunnen worden, kan de transitie naar een geheel duurzame energievoorziening faciliteren en versterken.

Het doel van dit onderzoek is inzichtelijk te maken of opslag van duurzame energie noodzakelijk is, wat de voor- en nadelen zijn van verschillende vormen van opslag van duurzame energie en welke technieken daarvoor het beste in aanmerking komen. Daardoor kunnen vanuit deze inzichten ook keuzes gemaakt worden over het type opwekvermogen dat, op de momenten dat er niet voldoende duurzame energie geproduceerd wordt, in de toekomst kan worden ingezet, het zogenaamde back-upvermogen. Dit back-upvermogen dient bij voorkeur te bestaan uit productiemiddelen die een brandstof gebruiken zonder CO₂-uitstoot of met een gesloten koolstofkringloop, dit om de emissie van CO₂ zoveel mogelijk te beperken.

De resultaten van dit onderzoek zullen inzicht bieden in welke opslagtechnieken daarvoor eventueel in aanmerking komen en onder welke voorwaarden (financieel en technisch) deze technieken een rol kunnen spelen in de Nederlandse energietransitie. Voorwaarde daarbij is dat de energievoorziening betaalbaar en betrouwbaar blijft.

Bovenstaande doelstelling is in paragraaf 1.4 verder uitgewerkt in hoofd- en deelonderzoeksvragen.

1.3 Afbakening

De (energie)transitie omvat het gehele energiesysteem en betreft innovaties van technologische, sociale, economische en financiële aspecten en de maatschappelijke impact daarvan. Dit onderzoek is uitsluitend gericht op de technologische en financiële aspecten van het Nederlandse energiesysteem en dan vooral op de elektriciteitsvoorziening en de daarbij behorende opslagtechnieken. Hoewel de energietransitie de gehele wereld aangaat ligt de focus van dit onderzoek op de Nederlandse energievoorziening. Daarbij mag niet uit het oog verloren worden dat de ingezette energietransitie zich niet alleen afspeelt binnen de Nederlandse grenzen. Oplossingen en mogelijkheden dienen daarom altijd in internationale context, Europees of zelfs de Europese grenzen overschrijdend, beoordeeld te worden. De bevindingen en conclusies uit dit rapport, kunnen doorvertaald worden naar buitenlandse markten, er dient dan wel rekening te worden gehouden met de werking en financiële parameters van deze buitenlandse markten.

1.4 Onderzoeksvraag en deelvragen

Voor dit onderzoek is de hoofdonderzoeksvraag opgesteld vanuit de doelstelling.

Hoofdonderzoeksvraag:

Welke grootschalige energieopslagtechnieken komen in aanmerking voor een faciliterende rol in de Nederlandse energietransitie en onder welke voorwaarden kunnen deze daarin bijdragen?

Om deze vraag te kunnen beantwoorden is de hoofdonderzoeksvraag vertaald in zes deelonderzoeksvragen. De antwoorden op deze deelonderzoeksvragen leiden tot het antwoord op de hoofdonderzoeksvraag.

Deelonderzoeksvragen:

1. Bij welk percentage duurzaam opgewekte elektriciteit wordt opslag van energie (electriciteit) noodzakelijk en waarom?
2. Welke opslagtechnieken voor elektriciteit zijn er beschikbaar?
3. Wat zijn de voor- en nadelen van deze opslagtechnieken?
4. Welke opslagtechnieken komen in aanmerking voor grootschalige opslag?
5. Welke grootschalige opslagtechnieken zijn technisch toepasbaar in Nederland?
6. Onder welke voorwaarden kunnen grootschalige opslagtechnieken bijdragen aan de Nederlandse energietransitie? Hierbij wordt vervolgens ingegaan op:
 - a) Welke grootschalige opslagtechnieken zijn in Nederland financieel haalbaar?
 - b) Wat zijn in Nederland, op basis van de technische en financiële haalbaarheid, de meest kansrijke technieken voor de opslag van energie?
 - c) In welke toepassing kunnen deze opslagtechnieken bijdragen aan de Nederlandse energietransitie?
 - d) Is een centrale en innovatieve rol van de overheid een vereiste om te slagen?

1.5 Leeswijzer

In hoofdstuk 2 is de methodiek voor de uitvoering van dit onderzoek beschreven en per onderzoeksvraag aangegeven hoe dit onderzoek heeft geleid tot antwoorden op bovenstaande onderzoeksvragen. In hoofdstuk 3 is de Nederlandse energievoorziening beschreven en een visie op de toekomst daarvan. Vervolgens zijn de technische aspecten van de verschillende opslagtechnieken beschreven en beoordeeld in hoofdstuk 4. In hoofdstuk 5 zijn de financiële aspecten, de voorwaarden waaronder grootschalige opslagtechnieken toegepast kunnen worden in Nederland en de manier waarop deze bij kunnen dragen aan de Nederlandse energietransitie beschreven. In hoofdstuk 6 volgt de discussie, in hoofdstuk 7 de conclusie en in hoofdstuk 8 zijn aanbevelingen en suggesties gedaan voor nader onderzoek. Tot slot volgt er een epiloog.

2. Methodiek van onderzoek

Informatie is verzameld door bureau- en literatuuronderzoek en tevens door het afnemen van interviews. Voor het beantwoorden van de deelonderzoeksvragen, die moeten leiden tot een antwoord op de hoofdonderzoeksvraag, is de onderstaande aanpak gehanteerd.

Allereerst is literatuur bestudeerd over de Nederlandse energievoorziening, de duurzaamheidsdoelstellingen, de progressie met betrekking tot realisatie van de duurzaamheidsdoelstellingen en de factoren die daar invloed op hebben. Aan de hand van deze informatie is een berekening gemaakt van de energievraag in 2050. Het jaar 2050 is gekozen omdat in dit jaar onze gehele energievoorziening verduurzaamd moet zijn.

2.1 Beantwoording deelonderzoeksvragen

Onderzoeksmethode voor beantwoording deelonderzoeksvraag 1

Bij welk percentage duurzaam opgewekte elektriciteit wordt opslag van energie (electriciteit) noodzakelijk en waarom?

Methode:

Op basis van bestudering van literatuur en onderzoeksrapporten is onderzoek gedaan naar wanneer opslag van energie noodzakelijk is. Hiervoor zijn geen onderzoeksrapporten beschikbaar betreffende de Nederlandse situatie. Na een telefonisch interview met de heer Erik van der Hoofd MSc. business developer bij TenneT (netbeheerder van het landelijke hoogspanningsnet), bleek dat ook TenneT nog niet beschikt over deze informatie. Er is daarom literatuuronderzoek gedaan naar de situatie in Duitsland. Duitsland is evenals Nederland qua verduurzaming van elektriciteit grotendeels afhankelijk van de toepassing van zonne- en windenergie. Van daaruit is een vergelijking gemaakt voor de Nederlandse situatie. Voordat een conclusie getrokken is, zijn op basis van de onderzoeksresultaten uit Duitsland berekeningen gemaakt voor de Nederlandse situatie. Dit aan de hand van de huidige opwekkingsprofielen en vraag en het toekomstige aanbod in 2020, op basis van het Energieakkoord 2013. Daarna is een conclusie getrokken over bij welk percentage duurzaam opgewekte elektriciteit opslag in Nederland noodzakelijk wordt.

Resultaat:

Op basis van het aandeel van duurzaam opgewekte elektriciteit kan worden aangegeven wanneer opslag van energie noodzakelijk wordt.

Onderzoeksmethode voor beantwoording deelonderzoeksvraag 2

Welke opslagtechnieken voor elektriciteit zijn er beschikbaar?

Methode:

Door bestudering van literatuur en onderzoeksrapporten is inzicht verkregen welke opslagtechnieken er bestaan voor het opslaan van energie. Vanuit deze bevindingen en aan de hand van de technische aspecten zijn de opslagtechnieken bepaald die geschikt zijn voor de opslag van elektriciteit.

Resultaat:

Een opsomming van opslagtechnieken voor elektriciteit.

Onderzoeksmethode voor beantwoording deelonderzoeksvraag 3

Wat zijn de voor- en nadelen van deze opslagtechnieken?

Methode:

Op basis van technische criteria is inzichtelijk gemaakt wat de specifieke technische eigenschappen zijn van de diverse opslagtechnieken. In het in opdracht van Netbeheer Nederland opgestelde onderzoeksrapport "Energieopslaglabel" (Pierie & van Someren, 2015), dat een methode biedt voor het vergelijken van energieopslagsystemen, is een Multi Criteria Analyse (MCA) gepresenteerd betreffende de technische parameters van de diverse opslagtechnieken. Om de betrouwbaarheid van deze MCA te toetsen, zijn de uitkomsten getoetst aan de onderzoeken waarnaar gerefereerd wordt en vergeleken met andere onderzoeken. Deze MCA is voor dit onderzoek uitgebreid met de Power to Gas opslag variant voor ammoniak en aangepast voor de methode opslag van energie met gesmolten zouten. Hierdoor ontstaat een compleet en eenduidig overzicht van de technische aspecten van de beschikbare opslagtechnieken.

Resultaat:

Inzicht in de technische toepasbaarheid van de opslagtechnieken.

Onderzoeksmethode voor beantwoording deelonderzoeksvraag 4

Welke opslagtechnieken komen in aanmerking voor grootschalige opslag?

Methode:

Op basis van de technische aspecten is een selectie gemaakt van welke opslagtechnieken geschikt zijn voor integratie van duurzame energie en daarbij voor grootschalige en langdurige (seizoens)opslag.

Resultaat:

Inzicht in de opslagtechnieken die op basis van technische aspecten toepasbaar zijn voor grootschalige en langdurige opslag van energie.

Onderzoeksmethode voor beantwoording deelonderzoeksvraag 5

Welke grootschalige opslagtechnieken zijn technisch toepasbaar in Nederland?

Methode:

Vanuit de technische aspecten zijn de opslagtechnieken die grootschalig kunnen worden toegepast beoordeeld op toepasbaarheid in Nederland. Daartoe is beoordeeld of en op welke manier de betreffende technieken in Nederland toe te passen zijn.

Resultaat:

Een beschrijving van de in Nederland toepasbare grootschalige opslagtechnieken.

Onderzoeksmethode voor beantwoording deelonderzoeksvraag 6

Onder welke voorwaarden kunnen grootschalige opslagtechnieken bijdragen aan de Nederlandse energietransitie?

Methode:

De in Nederland toepasbare technieken zijn verder beoordeeld op financiële haalbaarheid. Op basis van een berekening van de hoeveelheid benodigde energie in 2050 is een schatting gedaan voor de capaciteit van de benodigde energieopslag. Daarvoor zijn verschillende bronnen gebruikt, o.a. uit een onderzoeksrapport van de heer prof. dr. Fokko M. Mulder (TU Delft). Eenduidige berekeningen van de opslagduur zijn niet beschikbaar en verschillende aannames lopen ver uit elkaar. Daarom zijn schriftelijk vragen gesteld aan de heer Mulder. Op basis van de beschikbare informatie en de antwoorden van de heer Mulder is een inschatting gemaakt van de hoeveelheid energie die opgeslagen moet worden in 2050. Deze inschatting is gebruikt als uitgangspunt voor verdere berekeningen. Om alle facetten te belichten die met de haalbaarheid te maken hebben is een interview afgenomen met de heer prof. dr. mr. Catrinus Jepma, hoogleraar Energie en Duurzaamheid aan de Rijksuniversiteit Groningen. De heer Jepma is specialist op het gebied van haalbaarheidsberekeningen over opslag van energie. Op basis van de opslagduur en de benodigde hoeveelheid energie zijn financiële haalbaarheidsberekeningen gemaakt voor het jaar 2015 en 2050. De financiële kentallen zijn grotendeels afkomstig uit het door Netbeheer Nederland opgestelde onderzoeksrapport "Energieopslaglabel" (Pierie & van Someren, 2015).

De opgestelde berekeningen zijn ter verificatie voorgelegd aan de heer drs. ing. Frank Pierie, PhD onderzoeker bij Hanzehogeschool Groningen en medeauteur van onderzoeksrapport “Energieopslaglabel”. Op basis van de financiële haalbaarheid en het aantal benodigde installaties, is bepaald welke technieken voor de Nederlandse situatie het grootste toepassingspotentieel hebben. Vervolgens zijn de mogelijke toepassingen beschreven en onder welke voorwaarden deze technieken toepasbaar zijn in Nederland. Daarvoor is literatuur onderzocht en is een interview afgenomen met de heer Ir. Ing. Albert van der Molen, projectleider van het Stedin energieopslag proefproject te Rozenburg. De heer van der Molen is deskundige op het gebied van Power to Gas en de toepassingsmogelijkheden en varianten daarvan. Als laatste is vanuit verschillende visies uit diverse onderzoeken het toekomstperspectief geschetst over de betreffende technieken.

Resultaat:

Een opsomming van opslagtechnieken die technisch en financieel haalbaar en toepasbaar zijn in Nederland en de (rand)voorwaarden en de omstandigheden waaronder opslag van energie in de toekomst in Nederland haalbaar kan zijn.

Interviews

Bij de diverse interviews is de geïnterviewden ook gevraagd naar hun professionele meningen over opslag van energie en de rol daarvan in de Nederlandse energietransitie in het bijzonder. Daar waar gerefereerd wordt aan deze uitspraken in dit onderzoeksrapport is dit ook als dusdanig aangegeven, inclusief bronvermelding. Per interview is, afgestemd op persoon, organisatie en onderwerp een vragenlijst opgesteld. Deze vragenlijsten, inclusief de uitgewerkte antwoorden zijn als bijlage IV bij dit rapport opgenomen.

2.2 Beantwoording hoofdonderzoeksvraag

Na beantwoording van iedere deelvraag is per deelvraag een conclusie geformuleerd. Door het samenvatten van deze deelconclusies is een onderbouwde eindconclusie geformuleerd, die antwoord geeft op de hoofdonderzoeksvraag: *“Welke grootschalige energieopslagtechnieken komen in aanmerking voor een faciliterende rol in de Nederlandse energietransitie en onder welke voorwaarden kunnen deze daarin bijdragen?”*

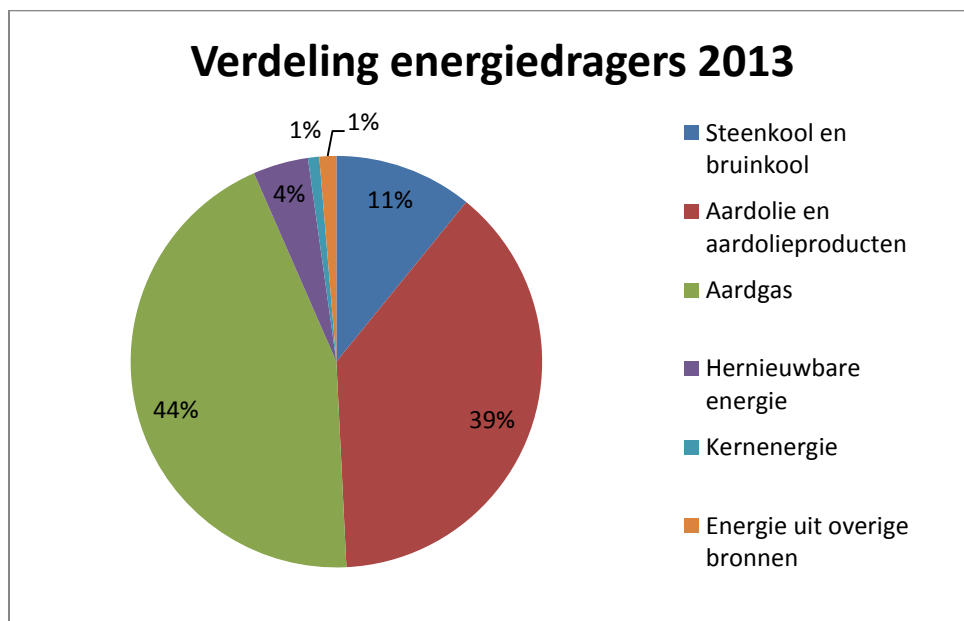
3. De Nederlandse energievoorziening

In dit hoofdstuk zijn de huidige Nederlandse energievoorziening, de doelstellingen en de resultaten met betrekking tot de verduurzaming tot nu toe beschreven. Bovendien wordt een blik op de toekomstige Nederlandse energievoorziening geworpen. Daarnaast zijn de verschillende facetten, die een belangrijke rol spelen in de Nederlandse energievoorziening en een directe of indirecte relatie hebben met de opslag van energie, omschreven en toegelicht, waaronder politieke besluitvorming, meningen van NGO's¹, de discutabele rollen van het gebruik van CO₂-opslag en biomassa, het eventueel sluiten van kolencentrales en het gebruik van (Nederlands) aardgas.

3.1 De huidige Nederlandse energievoorziening

In deze paragraaf zijn de energiestromen in Nederland inzichtelijk gemaakt. Daarvoor is gebruik gemaakt van de door CBS en Compendium voor de Leefomgeving gepubliceerde cijfers. In bijlage I is een compleet overzicht van alle energiestromen in Nederland van 2013 opgenomen (Compendium voor de Leefomgeving (1), 2014). Ten tijde van de publicatie van dit onderzoeksrapport was er nog geen of geen definitieve informatie over het energieverbruik in 2014 en 2015 beschikbaar.

In 2013 werd in Nederland 3.219 PJ (Petajoule)² aan energie verbruikt uit kolen, aardolie, aardgas, hernieuwbare energie, kernenergie en energie uit overige bronnen, zie figuur 1.

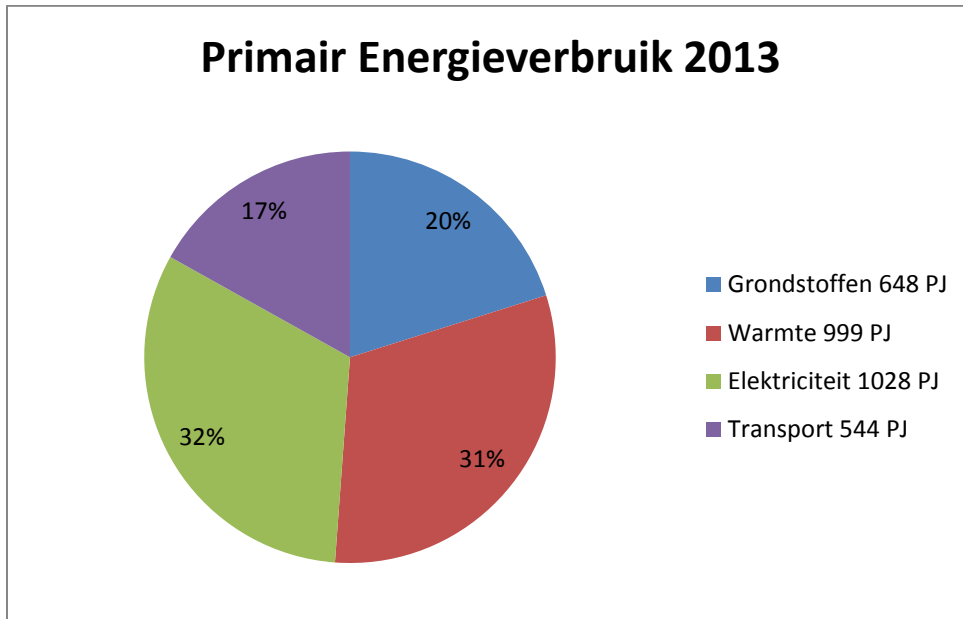


Figuur 1 Verdeling energiedragers over primair energieverbruik in 2013 (CBS (1), 2015).

¹ NGO staat voor non-governmental organization of in Nederlands een Niet-gouvernementele organisatie.

² 1 Petajoule staat voor 10¹⁵ Joule (de eenheid van energie).

Deze energiedragers worden gebruikt voor de productie van elektriciteit en warmte, als brandstof voor transport en als grondstof, in de chemie. In figuur 2 is de procentuele verdeling weergegeven over deze sectoren.

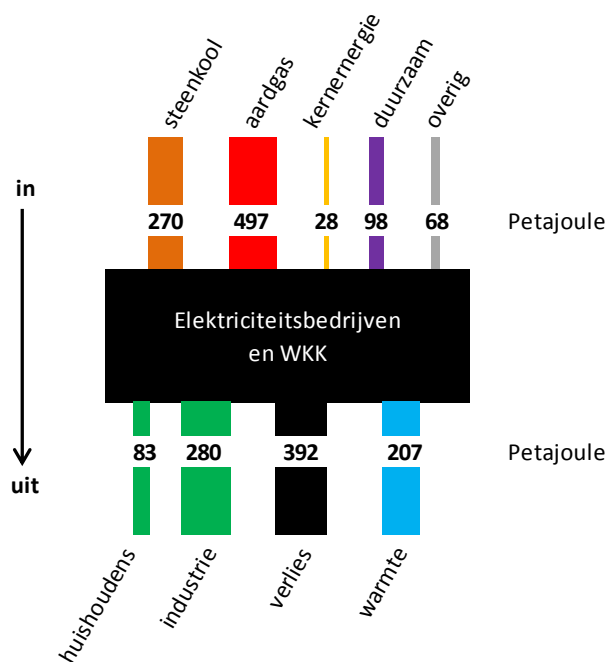


Figuur 2 Primair energieverbruik in 2013 over de verschillende sectoren (Compendium voor de Leefomgeving (1), 2014).

Primair en finaal energieverbruik

Men spreekt over primair energieverbruik omdat dit inclusief de omzettings- en transportverliezen is, zoals deze optreden in elektriciteitscentrales, transformatoren en kabels. Van de 3.219 PJ aan primaire energie is 1.028 PJ bestemd voor elektriciteitsproductie (32%). De nuttige Nederlandse energiebehoefte (primaire energie minus omzettings- en transportverliezen) wordt finaal energieverbruik genoemd en bedraagt 2.524 PJ in 2013. Deze 2.524 PJ bestaat in 2013 voor 429 PJ (17%) uit elektriciteit, 83% van de energie wordt besteed aan transport, warmte en (verwerking van - tot) grondstoffen (Compendium voor de Leefomgeving (1), 2014).

In figuur 3 is dit voor het gebruik van elektriciteit versimpeld weergegeven. Het verschil tussen de bovengenoemde 429 PJ en de 363 PJ (83 + 280) in figuur 3 wordt verklaard doordat er ook een deel elektriciteit geïmporteerd (120 PJ) en geëxporteerd (54 PJ) werd. De in Nederland opgewekte elektriciteit werd in 2013 voor 53% opgewekt met aardgas.



Figuur 3 Primair en finaal energieverbruik voor elektriciteit (Nationaal Kritisch Platform Windenergie, 2015, aangepast door auteur)

In 2013 werd bijna 4,8% van het totale primaire energieverbruik hernieuwbaar opgewekt (energie uit wind, waterkracht, zon, bodem en biomassa). In 2014 is het aandeel duurzame energie gestegen van 4,8% naar 5,6%, deze stijging is voor 0,3 procentpunt veroorzaakt door een toename van het opwekken van duurzame energie en voor 0,5 procentpunt als gevolg van een daling van het totale energieverbruik (CBS (1), 2015). In 2013 is circa 11.970 GWh (miljoen kilowattuur) aan duurzame elektriciteit opgewekt, ongeveer gelijk aan 2014³. Het procentuele aandeel van de totaal geproduceerde elektriciteit (119.112 GWh) bedroeg daarmee 10,07% (CBS (1), 2015). In 2014 bedroeg dat aandeel 10,03%. Deze afname heeft voornamelijk te maken met minder gebruik van biomassa als bijstook in kolencentrales en een toename van wind- en zonne-energie. Windenergie is in 2014 voor het eerst de belangrijkste energiebron voor duurzame elektriciteit (CBS (1), 2015). De bijdrage van zonne-energie is nog steeds kleiner dan 1%, zie ook tabel 1. Het aandeel duurzaam opgewekte elektriciteit is daarmee 1,97% van het totale primaire energieverbruik in 2013 (2,13% in 2014).

Tabel 1 Aandeel duurzame elektriciteit van het geheel in 2013 en 2014 (CBS (1), 2015)

Aandeel duurzaam geproduceerde elektriciteit	2013	2014
Zon (PV)	0,41%	0,61%
Wind	4,51%	4,98%
Water	0,10%	0,10%
Biomassa	5,05%	4,34%
Totaal aandeel	10,07%	10,03%

³ CBS heeft over 2014 alleen voorlopige cijfers gepubliceerd.

3.2 De transitie naar een duurzame energievoorziening

Er bestaat een brede door de maatschappij, politiek en wetenschap gedragen wens tot verduurzaming van de maatschappij en energievoorziening. De noodzaak tot verduurzamen van de energievoorziening is gebaseerd op onder andere de volgende factoren:

- fossiele brandstoffen zijn eindig en raken een keer op;
- het opraken van de gasvoorraad en terugdraaien van de gasproductie in Groningen;
- geopolitieke afhankelijkheid van instabiele regio's is ongewenst;
- er is een forse uitstoot bij toepassing van fossiele brandstoffen van milieuschadelijke stoffen waaronder CO₂ en
- het leefmilieu en de mogelijkheden voor toekomstige generaties mogen niet worden benadeeld.

Toch blijkt het door economische, politieke, maatschappelijke en sociale aspecten niet eenvoudig om een doortastend en duidelijk beleid te formuleren voor de noodzakelijke verduurzaming. Ook is er maatschappelijk gezien vaak veel verzet tegen windmolens, opslag van CO₂, schaliegas, kolencentrales en kernenergie. Vooral na invoering van het Energieakkoord in 2013, neemt Nederland maatregelen om de Europese doelstellingen, waaronder 14% hernieuwbare energieopwekking, in 2020 te halen (16% in 2023). Deze 14% moet volgens het Energieakkoord bestaan uit diverse opwekmethode, waaronder opschaling naar 4.450 Megawatt windvermogen op zee, 6.000 MW op land en maximaal 25 PJ aan bijstook van biomassa in kolencentrales (SER, 2013). In 2014 is daarvan 228 MW op zee gerealiseerd en 2.637 MW op land (CBS (2), 2016).

De eind 2015 uitgevoerde Nationale Energie Verkenning geeft echter een pessimistisch beeld over het halen van de Nederlandse doelstellingen (ECN (2), 2015). Dit omdat de nog te realiseren opgave te groot lijkt te zijn voor de resterende tijd tot 2020. Het verduurzamen van de (Nederlandse) energievoorziening vereist een grote politieke en sociale daadkracht en een gedragen visie om de gestelde doelstellingen te halen, zowel in 2020, 2030 als in 2050. Nederland zal aan de Europese doelstellingen moeten voldoen, waaronder 14% hernieuwbare energieopwekking in 2020, ondanks het feit dat daar geen sanctiebeleid op staat.

Greenpeace schreef in 2013 het plan "energy [r]evolution", waarbij voor Nederland een scenario wordt geschetst, waarin in 2050 "Olie en gas zijn vervangen door zon, wind, water en schone biomassa. De keuze voor slimmer energiegebruik en schone energiebronnen is haalbaar en betaalbaar" (Greenpeace, 2013)⁴.

⁴ Greenpeace schreef in 2009 dit plan voor de hele wereld (update 2015) en in 2012 voor Europa.

Urgenda kwam in 2014 met een nog ambitieuzer plan “Nederland 100% duurzame energie in 2030, het kan als je het wilt” waarin een mogelijke transitie naar 100% duurzaam geschetst wordt (Urgenda, 2014). Ook heeft Urgenda in juni 2015 namens 900 bezorgde burgers en onder aanvoering van de “duurzaamste” advocaat van Nederland Roger Cox, een rechtszaak gevoerd en gewonnen tegen de Nederlandse Staat. De uitspraak was een reductiebevel van de rechter om 25% CO₂-uitstoot te reduceren in 2020 (ten opzichte van 1990) in plaats van het bestaande doel 20% CO₂-uitstootreductie. Ondanks dat het Kabinet tegen het vonnis in beroep is gegaan, blijft de nieuwe doelstelling staan, tot er een nieuwe uitspraak is.

Energierapport 2015

In juli 2015 kwam Minister Kamp met het volgende bericht aan de Tweede Kamer. “Het kabinet wil een volledig duurzame energiehuishouding in 2050 realiseren. Met het Energieakkoord is een onomkeerbare stap gezet in de energietransitie die nodig is om dit te bereiken. Het Energieakkoord is gericht op de periode tot en met 2023. Om de volgende stappen na het Energieakkoord richting te geven, werk ik aan het Energierapport 2015, dat ik uw Kamer aan het einde van dit jaar (2015) zal toezenden” (Kamp, 2015).

De Raad voor de leefomgeving en infrastructuur (Rli) heeft in september 2015 op verzoek van Minister Kamp een studie gedaan welke als input gaat dienen voor het Energierapport 2015 (gepubliceerd januari 2016). “De raad stelt voor om de energietransitie te richten op een helder doel, dat onomstotelijk vastligt en op zichzelf geen onderwerp is van discussie. Voor Nederland moet het doel zijn dat de emissie van broeikasgassen in 2050 80 tot 95% lager zal zijn dan in 1990. Voor de Nederlandse energievoorziening betekent dit dat de energetische CO₂-emissies in 2050 82 tot 102%⁵ lager moeten zijn dan de emissies van de energievoorziening in 1990. De raad adviseert om dit reductiedoel wettelijk vast te leggen. Een wettelijke borging geeft urgentie aan. Ook zorgt wettelijke verankering voor een helder perspectief aan de samenleving en voor zelfbinding voor politiek en bestuur.

Het doel van CO₂-emissiereductie staat voorop, ook al leidt dat in Nederland tot grote economische en maatschappelijke veranderingen, tot (her-) verdelingsvraagstukken of tot grote kosten van verandering. Omdat de Nederlandse economie in internationaal perspectief relatief energie-intensief is en bovendien grotendeels op fossiele energie gebaseerd, zal de benodigde energietransitie naar een CO₂-emissiearme energievoorziening juist in Nederland leiden tot relatief grote veranderingen” (Raad voor de leefomgeving en infrastructuur, 2015).

⁵ Rli relateert dit aan de CO₂-equivalenten, die voor de productie van energie beschikbaar blijven bij een (totaal) reductiedoelstelling voor Nederland van 95%. Vandaar dat een groter percentage dan 100% mogelijk is (Raad voor de leefomgeving en infrastructuur, 2015).

Medio januari 2016 verscheen het Energierapport 2015 onder de titel “Energierapport Transitie naar duurzaam”. In dit energierapport is de vermindering van CO₂-uitstoot de drijfveer achter het toekomstige energiebeleid. Alle opties om ons energiesysteem te verduurzamen worden opengehouden en er wordt opnieuw een dialoog aangegaan met alle stakeholders.

De prijs van de emissierechten voor CO₂ is een belangrijke parameter om een groei in de verduurzaming van de energievoorziening te kunnen realiseren. In het rapport is een belangrijke rol voor gas weggelegd in de transitie. Het gaat dan om aardgas dat in toenemende mate wordt vervangen door groengas (synthetisch of biogas). Daarentegen zal het totaalaandeel van gas in de energiemix afnemen, waarbij wel een steeds belangrijkere rol voor toepassingen waar nog geen duurzame energiebronnen voor beschikbaar zijn, zoals de warmtevoorziening in de industrie en zwaar transport. Ook nieuwe vormen van nucleaire energie en schaliegas worden niet uitgesloten (Ministerie van Economische Zaken, 2016). De inhoudelijke reacties over het Energierapport zijn erg verdeeld.

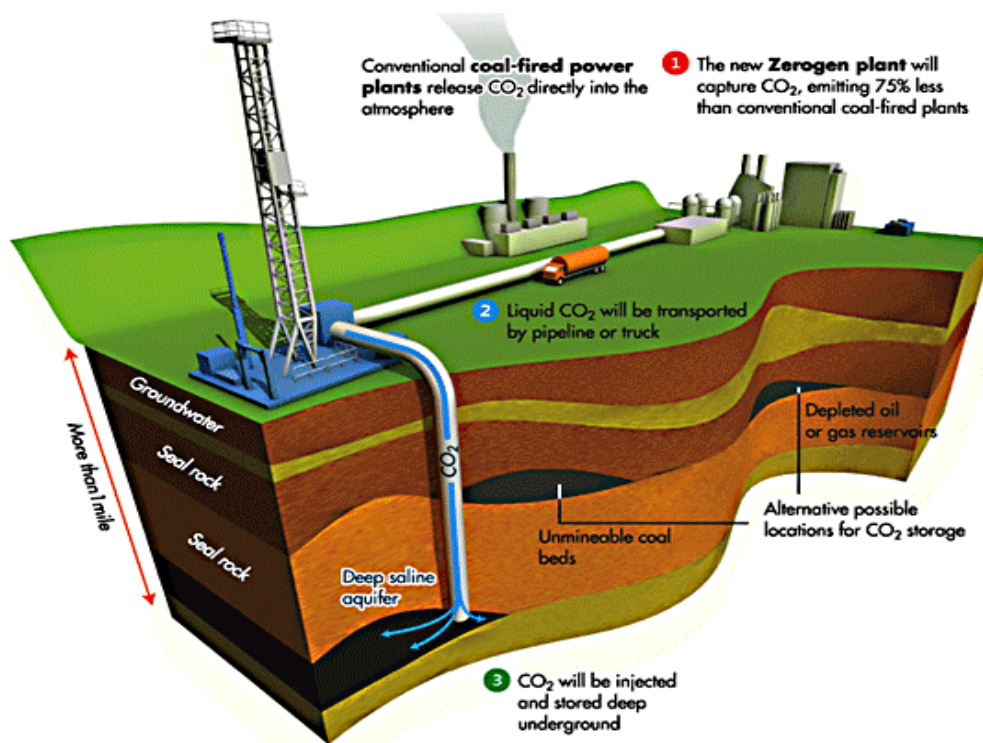
Klimaattop Parijs (COP21)

Van 30 november tot en met 11 december 2015 vond in Parijs de eenentwintigste jaarlijkse klimaatconferentie van de Verenigde Naties plaats, de zogenaamde COP21. COP staat voor de Conference of Parties, hierbij komen alle partijen die onderdeel uitmaken van het klimaatverdrag van de Verenigde Naties, bijeen.

Tijdens deze conferentie is een nieuw klimaatverdrag ondertekend door 195 landen. De Parijse Klimaattop begon met een stevig fundament, doordat 186 landen in een bijdrage een nationaal klimaatdoel hadden ingediend. Deze 186 landen zijn goed voor 96,5 procent uitstoot van de wereld. Het resultaat wordt een juridisch bindend en ambitieus akkoord met een verantwoordelijkheid voor alle landen om opwarming tegen te gaan. Het doel is de opwarming van de aarde beperken tot ruim onder 2 graden Celsius, met een duidelijk zicht op 1,5 graden Celsius. Het akkoord betreft de periode vanaf 2020. Het EU-pad naar een reductie van 80 tot 95 procent CO₂-uitstoot in 2050 is daarmee niet veranderd. Een belangrijk winstpunt is een mondiaal vijfjarig revisiesysteem dat alle landen aan hun verantwoordelijkheid moet houden om te blijven werken aan het verbeteren van het klimaat en aan het tegengaan van opwarming (Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2015).

3.3 CCS (CO₂-afvang en opslag)

In het Nederlandse Energieakkoord en in het Energierapport 2015 is voor de transitie een prominente rol weggelegd voor de afvang, opslag en gebruik van CO₂, ook wel CCS (Carbon Capture and Storage), voor het principe zie figuur 4. Letterlijk staat er: “Om op de lange termijn te komen tot een volledig duurzame energievoorziening zal afvang, gebruik en opslag van CO₂ (CCS) onvermijdelijk zijn. CCS kan worden toegepast bij de industrie en ook bij gas- en kolencentrales. De rijksoverheid zal het initiatief nemen om te komen tot een lange termijn visie op de positie van CCS in de transitie naar een volledig duurzame energievoorziening” (SER, 2013).



Figuur 4 Principe CCS (Shell, 2012)

Nederland telt in 2015 elf kolencentrales⁶, zie figuur 5. In het Energieakkoord 2013 is opgenomen dat de oude centrales uit de jaren 80 per 2016/2017 sluiten, dat zijn er 5 stuks⁷. De overige 6 kolencentrales⁵ zijn 2 bestaande en 4 nieuwe centrales, die in 2015 in gebruik zijn genomen. Voorwaarde voor het verlenen van de vergunningen voor de nieuwe 4 kolencentrales is de toepassing van CCS. Het blijkt echter met de huidige prijs van de CO₂-emissierechten (financieel) niet haalbaar om ook daadwerkelijk CCS toe te passen (Biesta, 2015). De huidige lage prijs van € 8,00 per ton CO₂ (september 2015) maakt het onmogelijk om CCS financieel rendabel toe te passen. Bij de start van het Europese ETS-systeem was de richtprijs € 30,00 per ton CO₂. Voor de toepassing van CCS op kolencentrales is een prijs benodigd van € 40,00 per ton CO₂ (Biesta, 2015). Toepassing van CCS bij deze prijs van € 40,00 per ton heeft als consequentie dat de prijs van één kilowattuur uit een kolencentrale met ongeveer € 0,08 zal stijgen. Voor gascentrales wordt CCS pas interessant bij een prijs van € 80,00 per ton (Biesta, 2015). Op dit moment is daarnaast een brede politieke discussie gaande over het (gesubsidieerd) meestoken van biomassa in kolencentrales en het eventueel geheel sluiten van alle kolencentrales.



Figuur 5 Overzicht kolencentrales in Nederland 2014 (Wij stoppen steenkool, 2015)

⁶ Van de elf (zes) kolencentrales is er 1 van Nuon bij de Eemshaven hybride en geschikt om elektriciteit te produceren uit gas, kolen en biomassa. In deze centrale wordt nu elektriciteit geproduceerd met aardgas. De plannen van Nuon voor een tweede centrale die elektriciteit produceert uit kolen (vergassing) zijn uitgesteld tot minimaal 2020.

⁷ De eerste centrale in Borselè (van Delta) stopte in november 2015 vervroegd na drie ernstige ongevallen, waarvan één dodelijk. De twee centrales die conform het Energieakkoord op 1 januari 2016 moesten sluiten, de 'Gelderland 13' in Nijmegen (GDF Suez) en de 'Amer 8' in Geertruidenberg (Essent), zijn vlak voor de kerstdagen van 2015 stilgelegd. Medio 2017 moeten twee centrales op de Maasvlakte sluiten, ook conform het Energieakkoord. De centrale in Buggenum is al vanaf 1 april 2013 gestopt.

“De huidige lage CO₂-prijs en de verwachting dat die prijs laag zal blijven, geven nauwelijks stimulans voor investeringen in koolstofarme technologieën. Deze zijn echter noodzakelijk om op langere termijn tot een verdergaande emissiereductie te komen. Het feit dat er nog steeds een CO₂-prijs is, laat echter ook zien dat de markt, ondanks de ruime beschikbaarheid van emissierechten, de onzekerheid over de economische ontwikkeling en de onzekerheid over het beleid, nog steeds bereid is te betalen voor emissierechten. De verwachting is dat de prijs enigszins zal gaan toenemen, doordat in de toekomst wel schaarste ontstaat” (ECN (1), 2014). Relevant zijn daarbij de uitkomsten van de klimaattop in Parijs. Het gesloten verdrag zal een nieuwe impuls geven aan het systeem voor CO₂ emissierechten.

Een positief signaal is ook de introductie van het Chinese ETS systeem, dat naar verwachting in 2017 van kracht zal zijn. Mocht dit Chinese ETS systeem er daadwerkelijk komen dan zal dat mogelijk ook een verdergaande impuls geven aan het Europese ETS systeem.

Conclusie

Of CCS daadwerkelijk een rol van betekenis gaat spelen in de toekomstige Nederlandse energievoorziening is zeer de vraag. Buiten het feit dat deze techniek financieel (nog) niet haalbaar is, door onder andere (te) lage prijzen voor emissierechten, spelen ook sociale aspecten een rol. Er is maatschappelijk gezien veel weerstand tegen kolencentrales, het meestoken van biomassa daarin en ook tegen ondergrondse opslag van CO₂. Meestoken van biomassa is alleen mogelijk bij steenkoolverbranding, dat op haar beurt weer één van de vervuilendste manieren is om elektriciteit op te wekken. Toepassen van CCS zou een oplossing kunnen zijn voor het beperken van de CO₂-uitstoot. De maatschappelijke weerstand is voornamelijk gebaseerd op de opinies dat stoppen met opwekken van elektriciteit met steenkool een veel grotere positieve milieu impact heeft dan CCS en dat opgeslagen CO₂ schadelijk kan zijn voor de volksgezondheid indien het in grote hoeveelheden zou ontsnappen.

3.4 De rol van aardgas in de toekomstige energievoorziening

Veel hernieuwbare energiebronnen wekken elektriciteit op, maar zoals eerder beschreven betreft het energieverbruik door elektriciteit slechts 17% van de totale energiebehoefte van Nederland (Compendium voor de Leefomgeving (1), 2014). Ondanks een steeds verdere elektrificering van technieken en maatschappij (zoals elektrisch vervoer, warmtepompen etc.) blijft aardgas voorlopig nog een prominente plaats in de energievoorziening innemen, onder andere voor de opwekking van elektriciteit en voor verwarmingsdoeleinden.

Nederland is een echt “gasland”. Aardgas wordt gebruikt voor de opwekking van elektriciteit en warmte. Door de recente ontwikkelingen in Groningen (het langzaam dichtdraaien van de gaskraan in verband met de aardbevingen) wordt Nederland langzaam maar zeker een gas importerend land in plaats van een gas exporterend land. Dit zal echter niet resulteren in een directe afname van het Nederlandse gasverbruik. De goedkope steenkolenprijs in combinatie met steeds meer duurzame opwekcapaciteit hebben wel gevolgen voor het Nederlandse aardgasverbruik, dit neemt af. Nederland telt momenteel 40 aardgas gestookte elektriciteitscentrales met een opgesteld vermogen van 100 MW of meer (TenneT TSO B.V. (1), 2016).

Steeds meer gascentrales worden stilgelegd of zelfs ontmanteld, waardoor het aandeel elektriciteit opgewekt met steenkool toeneemt, zie tabel 2 (CBS (1), 2015).

Tabel 2 Gebruik aardgas en steenkool voor elektriciteitsproductie 2012 t/m 2014 (CBS (1), 2015)

Energiedragers	2012	2013	2014
Aardgas (PJ)	511	497	455
Steenkool (PJ)	211	221	255

Ondanks dat er steeds meer energie duurzaam opgewekt wordt, is door de toename van het verbruik van steenkool voor elektriciteitsopwekking (ten koste van aardgas), de klimaatimpact negatief, omdat het gebruik van steenkolen meer vervuilend is dan dat van aardgas.

“De voorgenomen investeringen in grote hoeveelheden gesubsidieerde, duurzame elektriciteitsproductiemiddelen, de slechte marktpositie voor gascentrales, de overcapaciteit in Nederland en de ontwikkeling van capaciteitsmarkten in België, Frankrijk en het Verenigd Koninkrijk zorgen voor grote onzekerheid als het om investeringen in thermisch vermogen gaat. Daarmee is er geen zekerheid of, en op welk moment, de bestaande nog resterende plannen voor nieuw thermisch vermogen zullen worden gerealiseerd.

Het zou kunnen dat de komende jaren meer vermogen tijdelijk of zelfs definitief wordt stilgelegd. Door de toename van duurzaam productievermogen op de Noordwest-Europese energiemarkt neemt de bedrijfstijd van bestaand productievermogen – vooral gasgestookt – af en zorgt voor afname van het rendement van conventionele elektriciteitscentrales” (TenneT TSO B.V. (2), 2014). Inherent aan de afname van het rendement van conventionele elektriciteitscentrales heeft dit uiteindelijk ook consequenties voor de prijs van de energievoorziening, de prijs per kilowattuur.

Er zijn ook kansen voor de aardgas gestookte elektriciteitscentrales. Door de toename van duurzaam opwekvermogen, zal er een steeds grotere behoefte aan flexibiliteit aan de aanbodzijde ontstaan. Vooral gascentrales kunnen die flexibiliteit leveren. Door een sterk fluctuerend aanbod zullen de prijzen steeds volatieler worden. “Een gunstige ontwikkeling voor flexibele conventionele elektriciteitscentrales in Nederland zoals gascentrales, die overigens niet alleen in de flexibiliteitsbehoefte binnen Nederland kunnen voorzien, maar ook in de vraag naar flexibiliteit in omliggende landen” (ECN (1), 2014).

Ook is in de begroting van de BV Nederland een prominente rol weggelegd voor aardgas, dit betreft zowel de inkomsten uit de exploitatie als de op aardgasverbruik geheven energiebelasting.

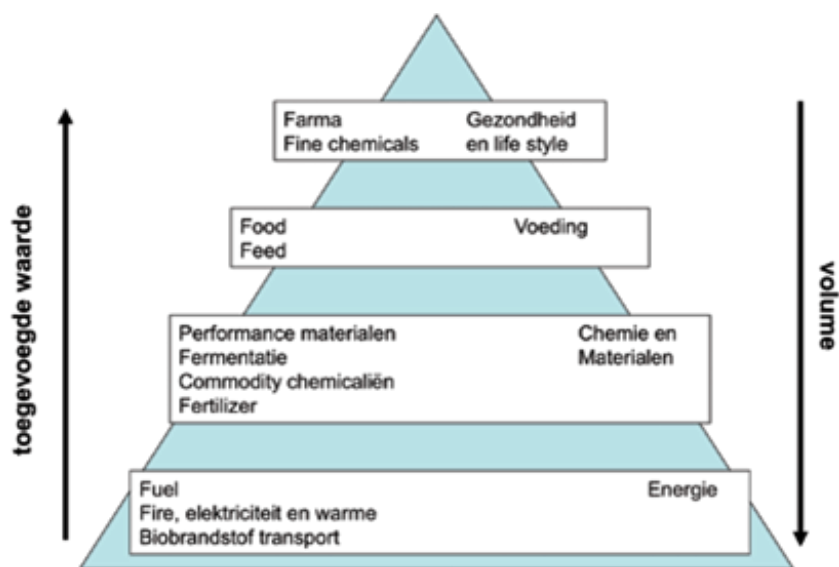
Conclusie

Aardgas is de minst vervuilende fossiele brandstof en gasgestookte elektriciteitscentrales zijn het meest geschikt om flexibiliteit te kunnen leveren. Ondanks dat aan (aard)gas een grote rol wordt toegedicht in de toekomstige energievoorziening (Ministerie van Economische Zaken, 2016), is de actuele realiteit dat de Nederlandse elektriciteitsvoorziening steeds meer afhankelijk wordt van steenkolen. Omdat gascentrales niet meer rendabel te exploiteren zijn, mede door goedkope steenkolen, wordt er minder aardgas gebruikt. Dit kan, naast een ongewenste ontwikkeling op het gebied van verduurzaming, gevolgen hebben voor de benodigde flexibiliteit in energielevering. Flexibiliteit is een kernbegrip van de toekomstige energievoorziening, zeker door een toenemend duurzaam aanbod van energieopwekking (als de wind niet waait en/of zon niet schijnt) en is noodzakelijk om vraag en aanbod op elkaar aan te laten sluiten.

3.5 De rol van biomassa in de toekomstige energievoorziening

Het gebruik van biomassa in de (toekomstige) energievoorziening is discutabel. In het plan van Urgenda “Nederland 100% duurzame energie in 2030, het kan als je het wilt” (Urgenda, 2014) is er een grote rol voor biomassa opgenomen⁸. De vraag of een biomassa-voetafdruk van 2,9 keer Nederland, zoals in het Urgenda plan opgenomen, verantwoord is, kan terecht gesteld worden.

De waardepiramide, zie figuur 6, laat een duidelijk beeld zien over biomassagebruik voor de energievoorziening. De toegevoegde waarde is klein, terwijl er een groot volume voor nodig is. Energie is op basis van deze waardepiramide laagwaardig gebruik van biomassa. Het is daarom noodzakelijk eerst hoogwaardig gebruik te maken van biomassa, bijvoorbeeld voor het vervaardigen van medicijnen, voedsel of als biobased grondstof. Biomassa die daarvoor niet geschikt is, overblijft of de reststromen kunnen prima als energiebron fungeren. Deze indeling van hoog- naar laagwaardig gebruik is in de waardepiramide weergegeven en wordt ook wel cascadering genoemd.



Figuur 6 Waardepiramide Biomassa (BioBased Economy, 2015)

Naar de mening van de heer prof. dr. Hans Derksen (Lector biobased economy Hogeschool Van Hall Larenstein) is er in de energievoorziening voor biomassa geen rol in de toekomst weggelegd, omdat alle beschikbare biomassa hoogwaardig kan worden toegepast (Derksen, 2014).

⁸ Biomassa wordt in dit plan gebruikt als back-up voor duurzame energie zolang opslag van energie nog niet rendabel is.

De Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen (KNAW) heeft daar ook een duidelijke visie op. “Nu wordt waardevolle biomassa gesubsidieerd verbrand in auto’s en energiecentrales, wat de transitie naar slimme en efficiënte bio-raffinage tegenhoudt. Tegelijkertijd moeten we concluderen dat het nut van bio-energie onzeker is. Biomassa is (wetenschappelijk feit) inefficiënt gebruik van zonne-energie. Bio-energie heeft bovendien onduidelijke effecten op de reductie van broeikasgassen en richt schade aan door grootschalige verdringing van landbouw en natuurgebieden, alsmede door vernietiging van organisch materiaal. Bio-energie leidt bovendien niet tot echte innovatie, in tegenstelling tot het gebruik van biomassa als grondstof voor hoogwaardige toepassingen” (KNAW, 2015).

Ook de studie van de Raad voor de leefomgeving en infrastructuur (Rli) “Rijk zonder CO₂: Naar een duurzame energievoorziening in 2050” dat op verzoek van Minister Kamp is opgesteld als bouwsteen voor het Energierapport 2015, stelt dat “Biomassa beperkt beschikbaar is (vanwege duurzaamheidscriteria) en zal daarom met name worden ingezet op plekken in de economie waar andere hernieuwbare bronnen relatief moeilijk zijn in te zetten (met name in de luchtvaart en zwaar transport over lange afstanden)” (Raad voor de leefomgeving en infrastructuur, 2015).

De visies op het gebruik van biomassa, voor het opwekken van energie, zijn erg verdeeld. Volgens de IEA (International Energy Agency) kan biomassa voorzien in een kwart tot een derde van de energiebehoefte. Prof. dr. A.P.C. (André) Faaij, wetenschappelijk directeur van de Energy Academy Europe en hoogleraar Energy System Analysis aan de Rijksuniversiteit Groningen (expertise biobased economy) heeft duidelijk een andere mening dan de KNAW. Faaij betitelt het rapport van de KNAW als amateuristisch en is van mening dat er voldoende biomassa beschikbaar kan komen als er geïnvesteerd wordt in de landbouw, bijvoorbeeld door het gebruik van bestaand areaal door middel van meststoffen en goede zaden te stimuleren. Daardoor kan de welvaart toenemen in derde wereld landen en zal gebruik van biomassa niet concurreren met de voedselvoorziening (Geijp, 2015).

In het Energierapport 2015 wordt de rol van biomassa ook onzeker genoemd. Het Nederlandse potentieel van biomassa wordt geschat op 200 PJ, waardoor Nederland al snel is aangewezen op import. Het wereldwijde potentieel is wel groot maar door diverse factoren ook behoorlijk onzeker (Ministerie van Economische Zaken, 2016).

Conclusie

Of biomassa ingezet kan worden als CO₂-neutrale brandstof voor energieopwekking is zeer de vraag en bovendien discutabel. Prijzen voor biomassa zijn zeer volatiel door wisselend aanbod, dit bemoeilijkt de inzet op financiële gronden. Daarnaast is de beschikbaarheid van voldoende biomassa een (geo)politiek én maatschappelijk vraagstuk. Er is in de energievoorziening wel een rol weggelegd voor biomassa, zeker als het gaat om reststromen, maar concurrentie met voedsel dient vermeden te worden en levering van biomassa uit politiek (instabiele) regio's is niet wenselijk. De beperkte beschikbare biomassa zal daarom vooral ingezet moeten worden als brandstof voor doeleinden die niet eenvoudig te verduurzamen zijn, zoals bijvoorbeeld (zwaar) transport.

3.6 Verduurzamingsopgave

De ingezette energietransitie betreft niet alleen een verduurzaming van ons energieverbruik maar ook een verschuiving van het energieverbruik. Er vindt een steeds verdergaande elektrificering van techniek en maatschappij plaats. Dat is enerzijds te verklaren doordat steeds meer processen geëlektrificeerd worden (bijvoorbeeld elektrisch vervoer en verwarming met warmtepompen) maar ook doordat veel duurzame opwekmethoden elektriciteit produceren. Zeker in Nederland waar de toepassing van wind- en zonne-energie koplopers zijn in duurzame opwekking. Om de gehele Nederlandse energievoorziening te verduurzamen is nog een verdergaande elektrificatie van ons energieverbruik noodzakelijk, zeker om het gebruik van aardgas geleidelijk uit te kunnen faseren. Het elektrificeren van een groot deel van de Nederlandse energievoorziening is een omvangrijke opgave.

Voor het elektriciteitsverbruik in 2013 van 363 PJ (119.112 GWh) is ruim 20 GW aan opgesteld thermisch vermogen beschikbaar. Dat is voldoende om 480 GWh per dag te leveren, terwijl het gemiddelde dagelijkse gebruik 326 GWh is. Het huidig opgestelde vermogen dekt ruim 120% van de piekvraag (TenneT TSO B.V. (1), 2016). In 2014 was het totaal opgestelde vermogen van windmolens 2,9 GW, goed voor een productie van circa 5.400 GWh (4,98% van de totaal geproduceerde elektriciteit). Effectief betekent dit dat een windmolen ongeveer 20% van de tijd (ongeveer 1.800 van de 8760 uur per jaar) op nominaal vermogen energie opwekt. Het in 2014 aan zonne-energie opgestelde vermogen van 1 GW is goed voor een productie van 800 GWh en produceert daarmee ongeveer 9% van de tijd op nominaal vermogen energie.

Het primair energieverbruik in Nederland in 2013 bedroeg, exclusief grondstoffen, 2.571 PJ, dus uitsluitend voor elektriciteit, warmte en transport (CBS (1), 2015). Van deze 2.571 PJ werd 544 PJ gebruikt voor transportdoeleinden (Compendium voor de Leefomgeving (2), 2015). Voor zwaar transport, waaronder zware bedrijfsvoertuigen, zeescheepvaart, visserij, luchtvaart en railverkeer werd 198 PJ gebruikt, zie tabel 3. Het primair energieverbruik exclusief grondstoffen en zwaar transport in 2013 bedroeg daardoor 2.373 PJ.

Tabel 3 Energieverbruik door verkeer en vervoer 2013 (Compendium voor de Leefomgeving (2), 2015)

Energieverbruik door verkeer en vervoer 2013			
Wegverkeer			
	personenauto's		
w.v.		benzine	174,2
		diesel	75,8
		LPG	9,0
	lichte bedrijfsvoertuigen		54,0
	zware bedrijfsvoertuigen		84,0
	motor- en bromfietsen		7,0
	Totaal wegverkeer		404,0 PJ
Overig verkeer			
w.v.	binnenscheepvaart ¹⁾		26,0
	zeescheepvaart ²⁾		62,0
	visserij ²⁾		3,8
	luchtvaart ³⁾		10,0
	railverkeer ⁴⁾		1,2
			37,0
	Totaal overig verkeer		140,0 PJ
	Totaal		544,0 PJ
Bron: CBS; TNO-MEP; LEI.			
1) Inclusief recreatievaart.			
2) Binnengaats en op het NCP			
3) Bij starts, landingen en taxiën van vliegtuigen en het gebruik van interne transportmiddelen op vliegvelden.			
4) Dieseltractie.			

Om dit energieverbruik van 2.373 PJ te elektrificeren is ruim 659.000 GWh nodig. In Europees verband is afgesproken om 1,5% energie per jaar te besparen, dit betekent in 2050 een totale besparing van ruim 42% op het huidige verbruik. Voor het geëlektrificeerde energiegebruik van 2013 minus de besparingen tot en met 2050 zou dan circa 376.800 GWh (1.356 PJ) benodigd zijn. Deze 1.356 PJ is bijna 10 keer de hoeveelheid duurzame energie die in 2013 opgewekt werd (137 PJ) of bijna 32 keer de hoeveelheid duurzaam geproduceerde elektriciteit in 2013 (42,5 PJ).

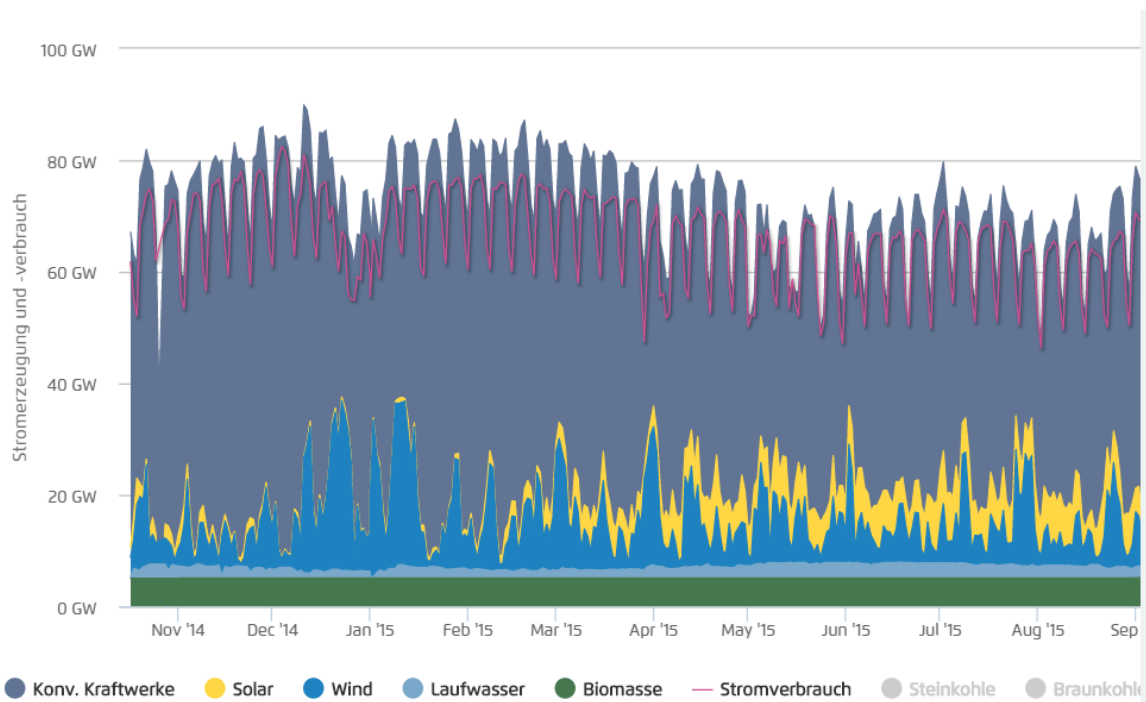
Daarbij is dan nog geen rekening gehouden met de piekvraag en meteorologische omstandigheden. Ook zullen er nog voor een aanzienlijke tijd back-up centrales benodigd zijn, die voornamelijk stand-by staan voor situaties waarin er door omstandigheden onvoldoende aanbod is van duurzame energie. Deze vorm van flexibiliteit zal (gezien de weinige draaiuren) een aanzienlijke kostenpost gaan vormen in de energievoorziening.

4. Opslag van energie, technische haalbaarheid

In dit hoofdstuk is het nut en de noodzaak beschreven van opslag van energie. Welke technieken komen wanneer in aanmerking? In dit hoofdstuk worden de antwoorden gegeven op de deelonderzoeksvragen 1 t/m 5.

4.1 Waarom opslag van energie?

Buiten de als normaal beschouwde dagelijkse variaties in vraag en aanbod van elektriciteit, wordt het door het intermitterend⁹ karakter van duurzaam opgewekte elektriciteit, steeds moeilijker om vraag en aanbod op elkaar af te stemmen. Bij een bewolkte en windloze dag zal de productie uit duurzame opwekeenheden nihil zijn en de elektriciteitsvoorziening (bijna) geheel afhankelijk zijn van fossiel opwekvermogen, zie figuur 7. Andersom kan bij zonnige dagen met veel wind, simultaan met een lage energievraag, een overschot aan elektriciteit ontstaan. Het onvoorspelbare karakter van zon en wind op korte termijn, zorgt voor fluctuaties in het aanbod van (bijna) nul tot maximaal in enkele minuten. In Nederland levert dit nu op landelijk niveau geen noemenswaardige problemen op, omdat in 2014 maar 10,03% duurzaam werd opgewekt, waarvan 5,69% met windmolens en PV (zonnepanelen) (CBS (1), 2015).



Figuur 7 Stroomopwekking versus stroomgebruik in Duitsland oktober 2014 t/m september 2015 (Agora Energiewende (1), 2015)

⁹ Intermitterend betekent met onderbrekingen.

Zodra het aandeel duurzaam opgewekte elektriciteit toeneemt, kunnen dit soort pieken wel voor problemen zorgen. Dit zoals nu al het geval is in Duitsland, waar in 2014 26,2% (BDEW, 2015) van de elektriciteit duurzaam opgewekt werd.

Bij overschotten in Duitsland wordt elektriciteit nu gratis of tegen betaling (negatieve prijs) aan het buitenland geleverd (DNV GL Energy - KEMA, 2015). Daarbij dient opgemerkt te worden dat dit “dumpen van energie” door Duitsland voornamelijk te wijten is aan het ontbreken van een goede noord-zuid verbinding in het elektriciteitstransport-netwerk. Aan een goede noord-zuid verbinding wordt momenteel hard gewerkt (TenneT TSO B.V. (3), 2015).

Door een (wereldwijde) toename van duurzame energie opwekking wordt het steeds moeilijker om deze overschotten aan energie kwijt te raken, zeker ook aan buurlanden waar de kans groot is dat door meteorologische omstandigheden simultaan overschotten aan duurzaam opgewekte energie optreden. Tevens hebben lage of zelfs negatieve prijzen ongewenste economische gevolgen, niet alleen voor de exploitanten van thermisch vermogen maar ook voor exploitanten van duurzaam opwekvermogen. Opslag van energie zou daar een oplossing voor kunnen zijn, doordat overschotten opgeslagen kunnen worden en daarmee een negatieve prijs voorkomen wordt en bij eventuele tekorten deze aangevuld kunnen worden vanuit de opslag.

Ondertussen vinden er diverse discussies plaats over het nut en de noodzaak van opslag van energie. De meningen zijn ernstig verdeeld. Enerzijds is er een beweging die pleit voor decentralisering en opslag van energie (elektriciteit) om de transitie te kunnen vormgeven, waaronder Jan Rotmans en Ewoud van der Koogh (Ensoc, 2015). Anderzijds wordt beweerd dat deze ontwikkelingen de transitie juist remmen en er gefocust moet worden op centralisering en grotere (Europese) netwerken, eventueel aangevuld met Smart Grids (slimme netwerken) waardoor de noodzaak tot opslag van energie minimaal of zelfs overbodig is (Agora Energiewende (2), 2013).

Opslag van energie is geen doel maar een middel. Er zijn veel alternatieven denkbaar. Veel energie kan immers al opgeslagen worden, of opgeslagen blijven (bv. in de vorm van fossiele brandstoffen). Opslag is pas noodzakelijk bij overschotten die direct gebruikt moeten worden. Dat is veelal bij elektriciteit. Overschotten aan warmte worden al opgeslagen (bv. met boilers of bij warmte- en koude opslag (WKO)) of op andere plaatsen gebruikt (warmtenetten). Opslag van elektriciteit vraagt om een conversie, waardoor een gedeelte van de energie niet meer nuttig kan worden toegepast (verloren gaat). Alvorens over te gaan tot opslag van elektriciteit is het daarom noodzakelijk te bepalen of er geen alternatieven zijn.

Mogelijke alternatieven voor opslag van elektriciteit zijn:

- Vraag en aanbod beter op elkaar afstemmen (Smart Grids), regionaal, nationaal maar ook internationaal (Europees bijvoorbeeld);
- Gasverbruik voor verwarming vervangen door elektriciteit (Power to Heat¹⁰);
- Transportbrandstoffen vervangen door elektriciteit en
- Het terugregelen van duurzaam opwekvermogen (bv. windmolens stil zetten), zeker als de prijzen te laag of negatief worden.

¹⁰ Bij deze techniek wordt aardgasverbruik voor warmteproductie vervangen door (overschotten aan) elektriciteit (dus elektrisch verwarmen). Op momenten dat er simultaan geen latente behoefte is aan warmte, maar wel een overschot aan (goedkope) elektriciteit, kan de warmte eenvoudig opgeslagen worden voor later gebruik.

4.2 Wanneer wordt energieopslag noodzakelijk?

In deze paragraaf wordt deelonderzoeksvraag 1 *“Bij welk percentage duurzaam opgewekte elektriciteit wordt opslag van energie (electriciteit) noodzakelijk en waarom?”* beantwoord.

“Flexibiliteit is een kernbegrip van de toekomstige stroomvoorziening. Het begrip flexibiliteit staat hier voor het vermogen van marktpartijen om zo snel als nodig in te spelen op fluctuaties in aanbod en/of vraag naar elektriciteit. Het tijdig en effectief voorzien in de groeiende behoefte aan flexibiliteit van ons energiesysteem wordt wel gezien als een van de grootste uitdagingen in de energietransitie. Hierin zijn uiteraard technische aspecten van belang: fysieke bronnen van flexibiliteit, hun technische karakteristieken en functionele toepassing. Maar niet minder belangrijk zijn de financieel economische aspecten: de economische waarde van flexibiliteit en de inrichting van de energiemarkten, zodat die waarde ook verzilverd kan worden” (TNO innovation for life, 2013).

Om de opslag van energie in het juiste perspectief te plaatsen is het belangrijk te onderkennen dat een flexibel back-upvermogen, als de wind niet waait en/of zon niet schijnt, minstens zo belangrijk is als het opslaan van energie. Met andere woorden, er dient niet alleen een oplossing te komen voor het opslaan van boventallige pieken, maar ook een flexibele en duurzame opwekmethode bedacht te worden voor de zogenaamde dalen in duurzame energieopwekking (zonder zon en/of wind).

De vastgestelde doelstellingen met betrekking tot energie en duurzaamheid (en CO₂-emissiereductie) zijn helder geformuleerd en bieden een redelijk toekomstperspectief. De klimaatop in Parijs eind 2015 heeft de doelstellingen voor in de toekomst verder geformaliseerd. De weg er naartoe is zeker nog niet duidelijk en vast omkaderd. De keuzes die gemaakt moeten worden zijn afhankelijk van vele factoren, zowel financiële en maatschappelijke maar in zekere zin ook technische. De technische factoren betreffen vooral mogelijke nieuwe uitvindingen en de snelheid tot (markt)volwassenheid van reeds bestaande maar nog niet commerciële toegepaste of toepasbare technieken.

Het doel daarbij is de overgang van een fossiel systeem naar een systeem met vooral hernieuwbare energie, tegen de laagst mogelijke kosten en zonder afbreuk te doen aan de hoge betrouwbaarheid van het systeem.

De meest concrete inschatting voor wanneer opslag noodzakelijk wordt is afkomstig van onderzoeksinstituut Agora Energiewende. In haar onderzoeksrapport “12 Insights on Germany’s Energiewende” concludeert zij: “Voorlopig zal de uitbreiding van het nationale en internationale elektriciteitsnetwerk, de goedkopere optie blijven voor de integratie van hernieuwbare energie, in vergelijking met opslagtechnieken. Vanuit dit perspectief kunnen opslagtechnieken, zoals batterijen, perslucht opslag en Power to Gas pas op lange termijn worden ingezet. Momenteel zijn de kosten voor opslagtechnieken enorm hoog en dat zal ook op de middellange termijn zo blijven. Om de totale systeemkosten te kunnen beheersen kunnen opslagtechnieken pas worden gebruikt na gebruik van meer kosteneffectieve andere flexibiliteitsopties. Daarbij moeten twee kanttekeningen worden gemaakt, de eerste is dat opslag sneller rendabel wordt als het (Europese) elektriciteitsnetwerk vertraagd of beperkt wordt uitgebreid. De tweede is als er doorbraken plaatsvinden in de fabricagekosten van opslagtechnieken. In Duitsland zal opslag pas interessant worden bij een penetratiegraad van 70% duurzaam opgewekte elektriciteit”. (Agora Energiewende (2), 2013).

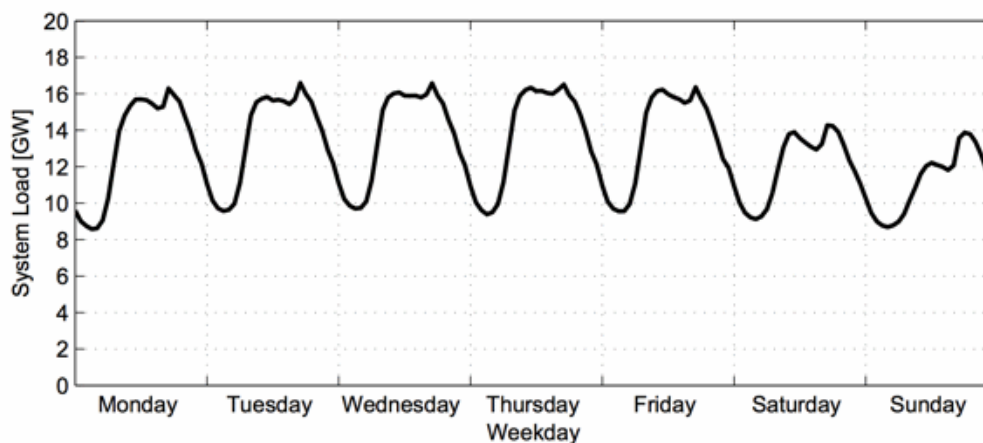
Agora betitelt deze 70% als een grove schatting (Agora Energiewende (2), 2013) omdat niet te berekenen is wanneer er een omslagpunt komt om energie op te slaan. Dit omslagpunt is niet alleen afhankelijk van het aandeel duurzame energie in de totale opwekking, maar ook van het procentuele aandeel daarin van wind- en zonne-energie en meteorologische omstandigheden. Daarnaast is het afhankelijk van vele andere factoren, zoals uitbreidingen van transmissie- en distributienetten (waaronder Smart Grids), interconnectors (internationale verbindingen), de mogelijkheden om overtollige energie te verkopen aan het buitenland (bijvoorbeeld aan Scandinavië om het aldaar op te slaan in valmeren), de mogelijkheden weer in te kopen van buurlanden bij eventuele tekorten, besparingen op energiegebruik, decentrale opwekking en opslag, Power to Heat toepassingen maar ook de technische hoedanigheid van fossiel back-up vermogen.

Ook voor Nederland valt er weinig over te zeggen, zo beaamt ook Erik van der Hoofd MSc, Business developer bij TenneT Arnhem. Dat komt in eerste instantie doordat het niet eenvoudig is de huidige productie van duurzame energiebronnen te extrapoleren naar toekomstige situaties waarbij een groter aandeel van de energie duurzaam wordt opgewekt. Daarnaast zijn er diverse factoren die een rol spelen, waaronder economisch meer rendabelere technieken, omdat opslag van energie een dure oplossing is (van der Hoofd, 2015).

In 2014 was het totaal opgestelde vermogen van windmolens 2,9 GW en aan PV 1 GW (CBS (2), 2016). Het doel vanuit het Energieakkoord is om in 2020 10,5 GW vermogen aan windmolens op te stellen en 5 GW aan PV (SER, 2013).

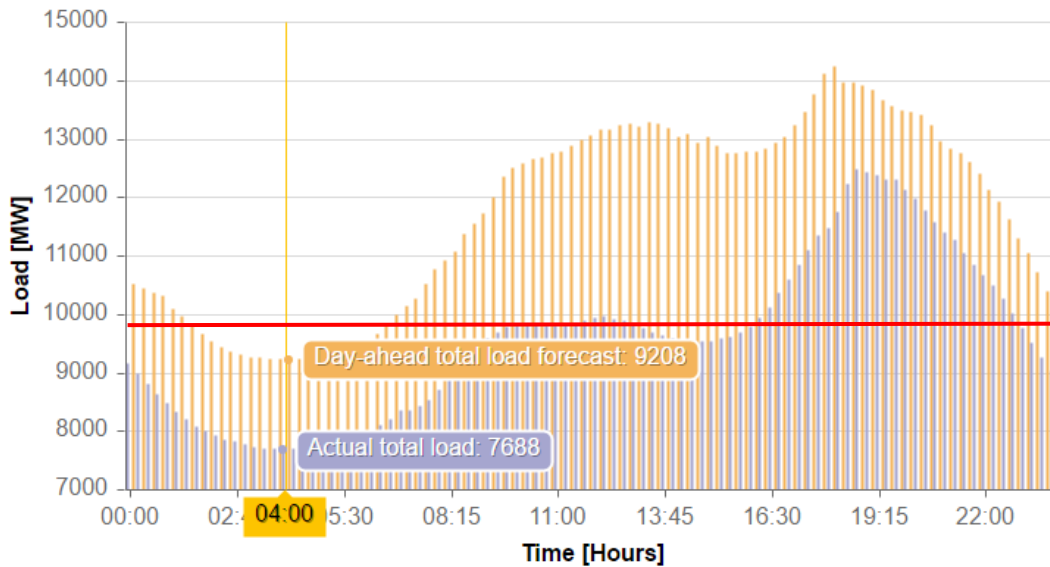
In 2015 was, bij een opgesteld vermogen van 5.070 MW (circa 5 GW) aan zonne- en windenergie, de hoogst gemeten kwartierwaarde (het vermogen dat op dat moment in enig kwartier werd opgewekt) 3.236 MW. Dat was op 9 juni 2015 (ensoe Transparency Platform, 2016). Hieruit is te veronderstellen dat het optimale maximum uit de combinatie wind en zon, met een spreiding over heel Nederland circa 64% van het opgestelde vermogen is. Als we dit extrapoleren naar 2020 waarin 15,5 GW aan zonne- en windenergie is opgesteld, dan is het maximaal gelijktijdige vermogen 9,9 GW.

De Nederlandse vraag naar elektriciteit volgt een typisch weekpatroon zoals afgebeeld in figuur 8.



Figuur 8 Typisch belastingsprofiel van de Nederlandse elektriciteitsvraag in een week (Ummels, 2009)

Duidelijk zichtbaar is het dag- en nachtpatroon en het patroon in de weekenden. Zondag is een typische dag met een zeer lage vraag zowel rond 4:00 uur 's nachts als rond 15:00 uur 's middags, zie figuur 9. De blauwe lijn in deze figuur geeft de belasting aan voor zondag 28 februari 2016 en de oranje de verwachting voor de volgende dag. Deze zondag 28 februari is bewust gekozen als voorbeeld omdat de belasting op deze dag het laagste van het jaar 2016 was (ensoe Transparency Platform, 2016).



Figuur 9 Belastingsprofiel zondag 28 februari 2016 van de Nederlandse elektriciteitsvraag (ensoe Transparency Platform, 2016)

In deze hypothetische situatie zou er dan in 2020 's nachts en soms op zondagmiddag een overschot kunnen ontstaan. Daarbij dient opgemerkt te worden dat er bij deze aanname voorbij is gegaan aan:

- de verwachte toename in de elektriciteitsvraag door verdere elektrificering van technieken;
- exportmogelijkheden voor teveel geproduceerde elektriciteit;
- kleinschalige opslag en de tot dan toe al gerealiseerde opslagvoorzieningen;
- gebruik van Smart Grids en daarmee een betere afstemming van vraag en aanbod en
- Power to Heat toepassingen.

Bij de inschatting van Agora dient verder nog opgemerkt te worden dat de rol van een Europees netwerk niet overschat mag worden. Een dergelijk netwerk is uitermate geschikt om tijdelijke overschotten kwijt te kunnen naar regio's met meer vraag. Maar Europees gezien zijn de seizoenen en dag- en nachtpatronen gelijk. Ook meteorologische systemen zijn dusdanig groot dat overschotten en tekorten simultaan kunnen en zullen optreden. Daarentegen kan bij een goed doordacht en uitgebreid Europees netwerk wel slim gebruik worden gemaakt van verschillende opwekmethode van duurzame energie. Bijvoorbeeld van waterkracht in Scandinavië en de Alpen, elektriciteitsopwekking met geothermie in Italië en IJsland, windenergie in Noord- West Europa en zonne-energie in Zuid Europa.

Daardoor neemt de afhankelijkheid van één of enkele soorten opwekmethode af en bij enkele opwekmethode ook de afhankelijkheid van seizoenen en dag- en nachtpatronen. Er dient wel rekening gehouden te worden met aanzienlijke transportverliezen over grote afstanden¹¹.

Ook de World Energy Council Netherlands trekt die conclusie op basis van het rapport “Tackling the trilemma through coordination” dat tot stand kwam in samenwerking met DNV GL, ECN, PwC, Shell, Siemens en Vattenfall.

“Europa is een lappendeken aan energiestructuren met een even zo bonte lappendeken aan energiebeleid eromheen. Daardoor werken nationale energiedoelstellingen tegen elkaar in en hebben overheden moeite een antwoord te vinden op het zogenoemde energietrilemma. Het trio duurzaamheid, leveringszekerheid en betaalbaarheid kan alleen in evenwicht komen als nationale overheden gaan samenwerken en stoppen met apart energiebeleid” (PWC, 2016).

Een snelle(re) noodzaak tot opslag kan nodig zijn als (Europees) beleid en investeringen in het (Europese) elektriciteitsnetwerk achterwege blijven. Als de investeringskosten voor energieopslag dalen, kan er ook sneller een aantrekkelijk businessmodel ontstaan, waardoor opslag van energie ook eerder ingezet kan worden.

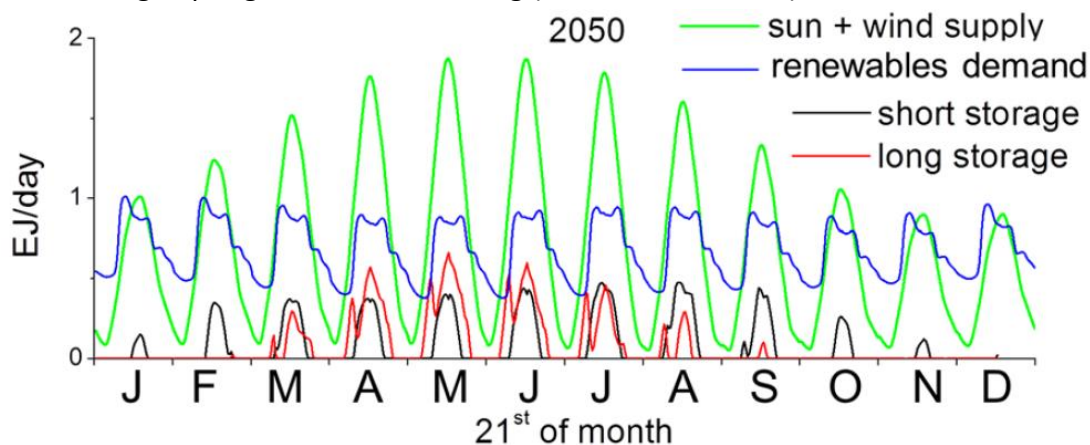
Conclusie

Aangezien Nederland evenals Duitsland, op het gebied van duurzame energieopwekking voor het grootste deel afhankelijk is van zonne- en windenergie, is de inschatting van Agora ook voor Nederland representatief. Dat wil zeggen dat energieopslag noodzakelijk wordt indien meer dan 70% van de elektriciteit duurzaam wordt opgewekt. Bovendien geldt daarbij de voorwaarde dat eerst van andere kosteneffectieve flexibiliteitsopties gebruik wordt gemaakt. De Nationale Energieverkenning 2015 schat dat 50% van de in Nederland opgewekte stroom in 2030 afkomstig is van hernieuwbare bronnen (ECN (2), 2015). Een andere bekende doelstelling is het volledig duurzaam energie opwekken in 2050. Volgens de (huidige) Nederlandse doelstellingen zal dus tussen 2030 en 2050 grootschalige opslag van energie noodzakelijk zijn.

¹¹ Transportverliezen zijn afhankelijk van de lengte en diameter van de verbinding evenals het daarover getransporteerde vermogen. Een grove inschatting is 1,5% verlies per 100 kilometer bij wisselspanning (AC) en 0,5% verlies per 100 kilometer bij gelijkspanning (DC) (Royal Haskoning DHV, 2014).

4.3 Kortstondige opslag en langdurige opslag

Globaal gezien wordt zonne-energie in lange termijn prognoses als dominant gezien, omdat de opbrengst per vierkante meter het grootst is (Mulder, F.; Postma, H.; Klop, E.; Visser, H.J., 2015). In Europees verband is het potentieel van zonne-energie in Zuid Europa (en Noord Afrika) het grootst. In dit gebied vallen seizoenen samen (met een verschil van een factor 3-4 in opbrengst tussen zomer en winter) en is het ook overall gelijktijdig nacht. Windenergie heeft ook een groot potentieel maar kent ook een duidelijke variatie in zomer en winter en dag en nacht. Door opwarming van de dampkring, bodem en water is over het algemeen de wind overdag sterker dan 's nachts en in de winter ongeveer 2 keer sterker dan in de zomer (Mulder, et.al, 2015). In figuur 10 is een prognose voor het jaar 2050 weergegeven (Mulder, et.al, 2015), met de aanname dat 95% van de energie duurzaam wordt opgewekt. In de grafiek is voor iedere maand de 21^e dag weergegeven van energieopwekking, -vraag en -opslag. De groene lijn geeft de (duurzame) energieopwekking weer en de blauwe lijn de energievraag. Duidelijk zichtbaar is de mismatch tussen dag en nacht (zwarte lijn) en zomer en winter (rode lijn). Overschotten in de zomer worden gebruikt voor langdurige opslag (seizoensopslag), de variaties in dag en nacht worden gebruikt voor kortstondige opslag oftewel balancering (Mulder, et.al, 2015).



Figuur 10 Model voor 2050 van de opbrengst van zon en wind voor EU en een deel van Noord Afrika, weergave op iedere 21^e dag van de maand (Mulder et. al, 2015)

Conclusie

Voor een verdergaande transitie naar een duurzame energievoorziening is seizoensopslag noodzakelijk. Overschotten die in de zomer ontstaan kunnen in de winter gebruikt worden. Daarbij dient niet alleen de situatie in Nederland in ogenschouw te worden genomen, maar zal de verduurzaming ook Europees (of Europa's grenzen overschrijdend) moeten worden gezien. Kortstondige opslag betreft de opslag van enkele seconden tot enkele uren als balanceringsmogelijkheid voor het elektriciteitsnetwerk. Met balancering van het elektriciteitsnetwerk is al veel ervaring opgedaan en de hoeveelheden energie die opgeslagen moeten worden zijn minder groot dan bij seizoensopslag. De economische en technische impact van grootschalige opslag van energie is vanzelfsprekend dan ook veel groter.

4.4 Opslagtechnieken

In deze paragraaf wordt deelonderzoeksvraag 2 “*Welke opslagtechnieken voor elektriciteit zijn er beschikbaar?*” beantwoord.

Opslag van energie staat qua toepassing nog in de kinderschoenen, daarmee wordt bedoeld dat het nog niet zeer frequent wordt toegepast. De technieken zijn voorhanden, maar zowel logistiek als financieel, is een deel van de technieken nog niet of nauwelijks toepasbaar en sommige technieken nog niet marktvolwassen. Er wordt veel onderzoek gedaan naar een diversiteit aan opslagmogelijkheden.

Kansrijke opslagtechnieken zijn: vliegwielen, pompcentrales, gecomprimeerde lucht, accu's en batterijen, condensatoren, magnetische opslag, Power to Gas (waterstof, methaan en ammoniak), gesmolten zouten en thermische opslag (Power to Heat). Zie voor een compleet overzicht, met een korte toelichting op deze technieken, tabel 4 (Pierie & van Someren, 2015). Er zijn nog meer vormen van energieopslag, maar zij hebben geen (directe) relatie met het elektriciteitsverbruik en zijn daarom hier buiten beschouwing gelaten.

Tabel 4 Overzicht van beschikbare energieopslagtechnieken (Pierie & van Someren, 2015)

Nr.	Technologienaam	Categorie	Toelichting
1	Vliegwiel	Mechanisch	Een vliegwiel is een roterende massa die met het elektriciteitsnet is verbonden via een motor/generator. Door het versnellen en vertragen van de rotatiesnelheid wordt energie opgeslagen en teruggewonnen.
2	Pompcentrale (PHS)	Mechanisch	In een pompcentrale wordt energie gewonnen of opgeslagen door middel van een hoogteverschil tussen twee waterbassins. Met een overschot aan energie kan water van het lager gelegen reservoir worden opgepompt naar het hoger gelegen reservoir. Wanneer de vraag naar energie zich voordoet, wordt water vrijgelaten van het bovenste bassin dat een turbine in beweging zet waardoor elektriciteit wordt gegenereerd.
3	Gecomprimeerde lucht (CAES)	Mechanisch	Lucht wordt gecomprimeerd en opgeslagen in ondergrondse cavernes vaak met behulp van overtollige energie. Deze gecomprimeerde lucht wordt later geëxpandeerd door een conventionele gasturbine om elektriciteit op te wekken.
4	Loodzuurbatterijen	Elektrochemisch	Loodzuurbatterijen slaan elektriciteit op door een elektrochemische cel op te laden die bestaat uit een sponsachtige loodanode, een looddioxide kathode en zwavelzuuroplossing in water als elektrolyt. Meerdere cellen kunnen zowel parallel als in serie geschakeld worden om de stroomuitvoer, het voltage en de energieopslagcapaciteit flink te laten toenemen.
5	Lithium-batterijen	Elektrochemisch	Lithiumbatterijen slaan elektriciteit op door een elektrochemische cel op te laden die bestaat uit een grafietkathode en een lithiummetaalanode. Meerdere cellen kunnen zowel parallel als in serie geschakeld worden om de stroomuitvoer, het voltage en de energieopslagcapaciteit aanzienlijk te laten toenemen.
6	Vanadium Redox Flow Batterijen	Elektrochemisch	Flow-batterijen maken enerzijds gebruik van een omkeerbare brandstofcel en anderzijds van een elektrolyt bestaande uit vanadium opgelost in water. Het systeem wordt opgeladen door een ladingsverschil te creëren tussen twee stromen van het elektrolyt met behulp van de omkeerbare brandstofcel.
7	Supercondensatoren	Electronisch	Door elektriciteit op te slaan in grote elektrostatische velden tussen twee geleidende platen, kunnen supercondensatoren elektriciteit snel opslaan en vrijlaten om zo korte, krachtige vermogenspulsen te leveren.
8	Supergeleidende magnetische energieopslag (SMES)	Magnetisch	In het geval van SMES wordt elektrische stroom opgeslagen in een supergeleidende spoel. Deze technologie is geschikt voor het op effectieve wijze beheren van stroomkwaliteit in het elektriciteitsnet en het leveren van een ononderbroken stroomtoevoer op de korte termijn.
9	Power to Hydrogen	Chemisch	Door gebruik te maken van overtollige duurzame elektriciteit, kan waterstof worden opgewekt door middel van elektrolyse. Waterstof kan gebruikt worden voor bijmenging in het aardgasnet, als brand- of grondstof of voor het opwekken van elektriciteit (brandstofcel).
10	Power to Methane	Chemisch	Door gebruik te maken van overtollige duurzame elektriciteit, kan waterstof worden opgewekt door middel van elektrolyse. Waterstof kan vervolgens verder verwerkt worden tot methaangas door het te laten reageren met koolstofdioxide in een methaniseringsproces. Methaan kan gebruikt worden voor vervanging van aardgas of voor het opwekken van elektriciteit.
11	Power to Ammonia	Chemisch	Door gebruik te maken van overtollige duurzame elektriciteit, kan waterstof worden opgewekt door middel van elektrolyse. Waterstof kan vervolgens verder verwerkt worden tot ammoniak door het te laten reageren met stikstof. Ammoniak kan gebruikt worden als grondstof of als brandstof voor het opwekken van elektriciteit.
12	Gesmolten zouten	Thermisch	Thermische energie wordt opgeslagen in vloeibare zouten, zo wordt thermische energie afkomstig van zonne-energiecentrales (CSP) opgeslagen. Vervolgens wordt door middel van een stoomgenerator elektriciteit geproduceerd. Door de hoge warmtecapaciteit kan 24 uur per dag energie worden geproduceerd.
13	Power to Heat	Thermisch	Het vervangen van aardgas door elektriciteit, op momenten dat er een overschot is aan elektriciteit, om warmte op te wekken en/of op te slaan. De hierop aangesloten apparatuur kan op marktsignalen bepalen of er met aardgas of elektriciteit wordt verwarmd.

In paragraaf 4.5 en 4.6 wordt ingegaan op de technische criteria voor de toepassing van de diverse technieken in relatie tot de (Nederlandse) transitie naar een duurzame energievoorziening.

4.5 Technische criteria voor toepassing van opslag van energie

In deze paragraaf worden deelonderzoeksvraag 3 *“Wat zijn de voor- en nadelen van deze opslagtechnieken?”* en deelonderzoeksvraag 4 *“Welke opslagtechnieken komen in aanmerking voor grootschalige opslag?”* beantwoord.

Technisch gezien zijn alle in paragraaf 4.4 genoemde technieken reeds beschikbaar en dus haalbaar. Vanzelfsprekend hebben deze opslagtechnieken allemaal hun eigen specifieke eigenschappen, waardoor deze niet voor iedere toepassing inzetbaar zijn. Allereerst zijn de technische aspecten beoordeeld. Van daaruit is een verdeling gemaakt in technieken die in aanmerking komen voor kortstondige opslag (balanceren van het net) en langdurige opslag (seizoensopslag).

Uiteraard zijn er nog andere criteria die een rol spelen en onder haalbaarheid geschaald kunnen worden, maar niet per se technisch van aard zijn. Daarbij is te denken aan veiligheid, beschikbaarheid van grondstoffen, ruimtebeslag en publieke draagkracht voor toepassing. Ook spelen de financiële aspecten natuurlijk een rol. Bij een kostprijs van elektriciteit van € 0,02554 (Baseload) en € 0,03157 (Peakload) per kilowattuur (ICE Endex, 2016) is de vraag legitiem wat de eventuele opslag van elektriciteit mag kosten.

In het in opdracht van Netbeheer Nederland opgestelde onderzoeksrapport *“Energieopslaglabel, een methode voor het vergelijken van het volledige spectrum van opslagsystemen”* (Pierie & van Someren, 2015) is een Multi Criteria Analyse (MCA) opgenomen om de verschillende opslagtechnieken technisch met elkaar te vergelijken. Deze MCA is deels weergegeven in tabel 5. Tijdens dit onderzoek zijn de uitkomsten uit het onderzoeksrapport, met betrekking tot de technische geschiktheid, onderzocht en beoordeeld. De informatie is gecontroleerd aan de hand van de opgegeven bronnen en vergelijkbare onderzoeken. Er zijn geen uitkomsten geconstateerd die niet kloppen of discutabel zijn.

Notabene: de originele tabel bevat ook de geschiktheid van warmteopslag, dat valt buiten de scope van dit onderzoek en is daarom weggelaten.

Tabel 5 Multi criteria analyse opslagsystemen (Pierie & van Someren, 2015)

Technologienaam	Toepassing												
	Frequentie- controle	Uurlijkse regulering	Dagelijkse regulering	Regulering per seizoen	T&D Net- ontlasting	Black Start	Off-grid / Micro-grid	Piekvraag- regulering	Vraag-/ Aanbod- regulering	Prijs-gestuurd reguleren	Reactief vermogen	On- onderbroken stroomtoevoer	Geschikt voor transport
Vliegwiel	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	●	○	○
PHS	●	●	●	○	○	●	●	○	○	●	●	○	○
CAES	●	●	●	○	○	●	●	○	○	●	●	○	○
Loodzuurbatterij	○	●	○	○	●	●	●	○	○	○	○	●	●
Lithium-batterij	○	●	○	○	●	●	●	○	○	○	○	●	●
Vd Redox	○	●	○	○	●	●	●	○	○	○	○	●	○
Supercondensatoren	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	●
SMES	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	●	○
Power to Hydrogen	●	●	●	●	●	○	●	○	○	●	●	○	●
Power to Methane	●	●	●	●	●	○	●	○	○	●	●	○	●
Gesmolten zouten	○	○	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
●	Indicator voor volledige geschiktheid												
●	Indicator voor potentiële of gedeeltelijke geschiktheid												
○	Indicator voor ongeschiktheid												

Er is één opslagmethode in het onderzoek van Netbeheer Nederland beoordeeld op opslag van warmte, terwijl deze optie ook veelvuldig wordt toegepast voor opslag van energie om er weer elektriciteit van te maken. Dit betreft de toepassing van gesmolten zouten. Gesmolten zouten worden ook gebruikt in zogenaamde Concentrated Solar Power (CSP) plants, waar zonne-energie wordt opgeslagen als warmte, waaruit vervolgens weer 24 uur per dag elektriciteit kan worden opgewekt. Op deze manier wordt in een redelijke stabiele vorm van zonne-energie voorzien die 24 uur per dag elektriciteit levert.

Momenteel doen NUON en de TU Delft onderzoek naar de opslag van energie met behulp van ammoniak (Nuon, 2016). Ook deze methode is niet onderzocht in het onderzoek van Netbeheer Nederland. De technologische parameters die beoordeeld zijn in de MCA zijn voor opslag van energie in de vorm van ammoniak gelijk aan de andere Power to Gas technieken.

In tabel 6 zijn nogmaals de uitkomsten van de MCA weergegeven maar dan met een beoordeling van de opslagmethode gesmolten zouten voor de “opslag” van elektriciteit en opslag van energie in de vorm van ammoniak.

Tabel 6 Multi criteria analyse opslagsystemen (Pierie & van Someren, 2015 aangepast voor gesmolten zouten en uitgebreid met Power to Ammonia door auteur)

Technologienaam	Toepassing												
	Frequentie- controle	Uurlijkse regulering	Dagelijkse regulering	Regulering per seizoen	T&D Net- ontlasting	Black Start	Off-grid/ Micro-grid	Piekvraag- regulering	Vraag-/ Aanbod- regulering	Prijs-gestuurd reguleren	Reactief vermogen	On- onderbroken stroomtoevoer	Geschikt voor transport
Vliegwiel	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	●	●	○
PHS	●	●	●	○	○	●	●	○	○	●	●	○	○
CAES	●	●	●	○	○	●	●	○	○	●	●	○	○
Loodzuurbatterij	○	●	○	○	●	●	●	○	○	○	○	●	●
Lithium-batterij	○	●	○	○	●	●	●	○	○	○	○	●	●
Vd Redox	○	●	○	○	●	●	●	○	○	○	○	●	○
Supercondensatoren	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	●
SMES	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	●	○
Power to Hydrogen	●	●	●	●	●	○	●	○	○	●	●	○	●
Power to Methane	●	●	●	●	●	○	●	○	○	●	●	○	●
Power to Ammonia	●	●	●	●	●	○	●	○	○	●	●	○	●
Gesmolten zouten	●	●	●	○	○	○	●	○	○	●	●	○	○

●	Indicator voor volledige geschiktheid
●	Indicator voor potentiële of gedeeltelijke geschiktheid
○	Indicator voor ongeschiktheid

In tabel 7 zijn indicatief de meest belangrijke technische parameters weergegeven. Dit betreft uitsluitend de huidige parameters; eventuele toekomstige ontwikkelingen zijn hierbij buiten beschouwing gelaten. Het weergegeven rendement betreft alleen de energetische rendementen, waarbij opgemerkt dient te worden dat bij de Power to Gas technieken het rendement nog aanzienlijk afneemt als er van het betreffende gas weer elektriciteit wordt gemaakt. Het totale energetische rendement bij waterstof (elektriciteit=> waterstof => elektriciteit) ligt tussen de 34 en 51%, voor synthetisch methaan tussen de 30 en 41% en voor ammoniak tussen de 27 en 42%, mede afhankelijk van de laatste processtap, zijnde de opwekmethode voor elektriciteit (Sternier, Thema, Eckert, Lenck, & Götz, 2015).

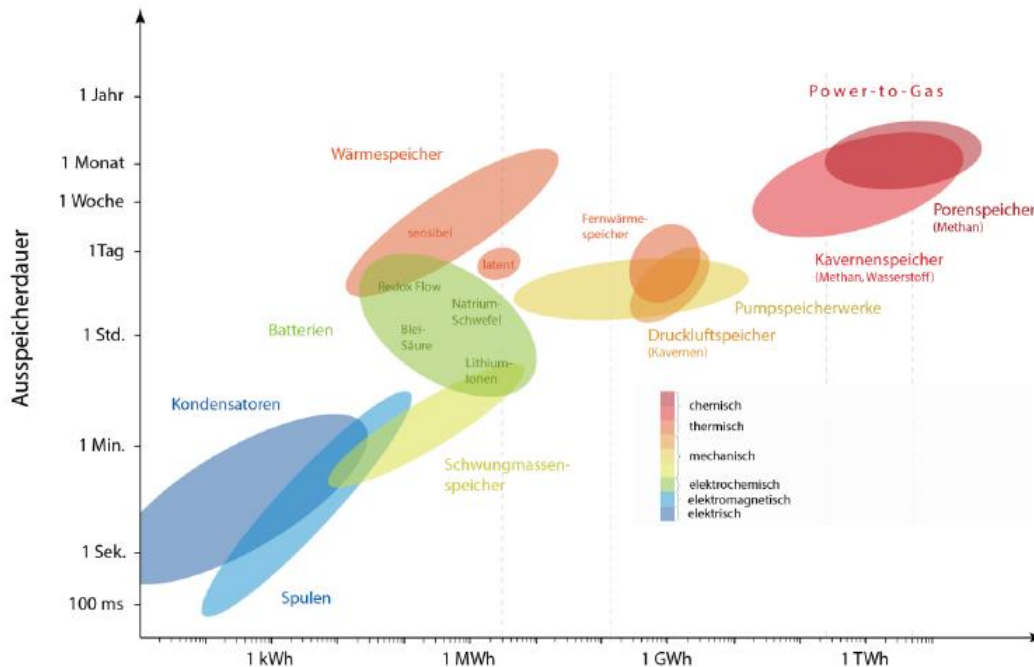
Tabel 7 Technische parameters opslagtechnieken (Pierie & van Someren, 2015)

Techniek	Maximaal op te slaan vermogen (MW)	Gemiddelde bedrijfstijd (uren)	Rendement (%)	Energiedichtheid (kWh/m ³)	Levensduur (jaren)	Toepassing
Vliegwiel	2	0,25	90%	-	25	3-4
PHS (pompcentrale)	5000	100	80%	1,5	50	1-2-4
CAES (perslucht)	320	40	80%	-	40	1-4
Loodzuurbatterij	50	10	90%	80	10	3-4
Lithium-batterij	5	15	95%	500	15	3-4
Vd Redox	10	10	85%	30	20	1
Supercondensatoren	1	1	98%	15	20	2-4
SMES (magnetische geleiding)	10	0,08	95%	2,5	30	2
Gesmolten zouten	50	15	93%	465	-	1-4
Power to Hydrogen	50	>100	64%	1560	15	1-2-4
Power to Methane	50	>100	52%	2590	15	1-2-4
Power to Ammonia	50	>100	47%	-	-	1-2-4

Toepassing:	
1	Levering van energie (100 MW – 100 GW)
2	Transmissie en distributie (10 kW – 100 MW)
3	Consument / Vraag (<10 kW)
4	Integratie duurzame energie (kW – MW)
-	Niet bekend

Binnen het energietransitie-vraagstuk is een discussie gaande over centralisering en decentralisering. Centralisering gaat uit van grote opwekeenheden die gecentraliseerd zijn, zoals de huidige energiecentrales. Decentralisering vraagt om meer lokale oplossingen en off grid toepassingen (zonder aansluiting op een elektriciteitsnet). Bij decentralisering is opslag een must. Voor de energievoorziening van energie-extensieve processen, waaronder de gebouwde omgeving (woningen) en kleinschalige mobiliteit is decentralisering een prima alternatief. Voor energie-intensieve processen (denk aan (petro)chemische processen, industrie en land- en tuinbouw) is een lokale, gedecentraliseerde energievoorziening geen optie en komt alleen gecentraliseerde opwekking in aanmerking. Daardoor zal ook de eventuele opslag van energie grootschalig voorzien moeten worden.

In figuur 11 zijn de verschillende technieken qua toepasbaarheid op opslagduur en omvang weergegeven. Uit tabel 7 (toepassing 1 en 4) en figuur 11 blijkt dat opslagtechnieken die geschikt zijn voor integratie van duurzame energie, langere perioden kunnen overbruggen en grootschalig energie op kunnen slaan beperkt zijn tot PHS (pompcentrales), CAES (perslucht), gesmolten zouten en Power to Gas.



Figuur 11 Toepasbaarheid qua opslagduur en omvang (Sterner et. al, 2015).

Conclusie

PHS (pompcentrales), CAES (perslucht), gesmolten zouten en Power to Gas zijn opslagtechnieken die geschikt zijn voor integratie van duurzame energie en kunnen daarbij langere perioden overbruggen en zijn daarmee geschikt voor grootschalige (seizoens) energieopslag.

Vliegwielen, accu's, condensatoren en SMES zijn geschikte opslagtechnieken voor kortstondige opslag van enkele seconden tot enkele uren (balancing van het net). De focus van dit onderzoek ligt op grootschalige seizoensopslag. Daarom worden de technieken voor kortstondige opslag in dit onderzoeksrapport verder buiten beschouwing gelaten.

4.6 Technische toepasbaarheid in Nederland

In deze paragraaf wordt deelonderzoeksvraag 5 “*Welke grootschalige opslagtechnieken zijn technisch toepasbaar in Nederland?*” beantwoord.

Omdat dit onderzoek zich focust op grootschalige seizoensopslag voor de Nederlandse situatie is in deze paragraaf een afweging gemaakt welke technieken toepasbaar zijn in Nederland en welke niet. Dat is gedaan door de functionele toepasbaarheid voor de Nederlandse situatie te onderzoeken.

Pompcentrales (PHS) worden wereldwijd al veelvuldig toegepast, door de lange levensduur en de beperktere investeringskosten. PHS vraagt om (natuurlijk) verval, bijvoorbeeld stuwmeren of putten. In een groot deel van Nederland is de ondergrond niet geschikt voor deze techniek en er is behoorlijk veel water voor nodig, waardoor de impact op het milieu groot is. In Nederland, maar ook in België wordt nagedacht over energie-eilanden in zee, voor toepassing van deze techniek. In landen waar wel natuurlijk verval is (in Scandinavië en de Alpen bijvoorbeeld) is het potentieel wel groot en kan deze opslagtechniek een rol van betekenis spelen, ook voor Nederland, bijvoorbeeld door koppeling van de Europese transportnetwerken.

Bij toepassing van perslucht (CAES) komt veel warmte vrij bij het comprimeren van de lucht. Evenzogoed is er warmte nodig zodra de gecomprimeerde lucht weer geëxpandeerd wordt. “Dit gebeurt in de regel door de verbranding van aardgas, waardoor de efficiëntie van de technologie in zijn totaliteit aanzienlijk vermindert. Het vinden van een geschikte opslaglocatie voor de gecomprimeerde lucht is ook nog een hele opgave, gelet op de fysieke vereisten die nodig zijn voor het onder hoge druk opslaan van grote hoeveelheden lucht” (Pierie & van Someren, 2015). De Nederlandse bodem biedt wat dat betreft niet veel perspectieven. Ook deze opslagmethode kan door een Europese koppeling van netten wel een rol van betekenis spelen in de toekomst, doordat het potentieel in andere delen van Europa wel groot is.

Gesmolten zouten zijn goed toepasbaar voor warmteopslag. Daar waar veel warmte aanwezig is, wordt opgewekt of als overschot aanwezig is, kan deze warmte in zouten worden opgeslagen. Warmte-opslag met behulp van gesmolten zouten is in Nederland zeer goed mogelijk. Voor het opwekken van elektriciteit uit de opgeslagen warmte in gesmolten zouten, is hoogwaardige warmte benodigd (> 500 °C). Dit is alleen mogelijk in gebieden dicht bij de evenaar met behulp van de zogenaamde Concentrated Solar Power (CSP) plants, waar zonne-energie wordt opgeslagen als warmte, waaruit vervolgens weer 24 uur per dag elektriciteit wordt opgewekt.

Op deze manier wordt in een redelijke stabiele vorm van zonne-energie voorzien die 24 uur per dag elektriciteit levert. In Nederland is het gebruik van gesmolten zouten voor productie van elektriciteit niet toepasbaar. Daarom is deze techniek in het vervolg van dit onderzoek buiten beschouwing gelaten. Daarentegen kan ook deze methode, door een Europese koppeling van netten, wel een rol van betekenis spelen in de toekomst.

Power to Gas, zowel in de vorm van waterstof als synthetisch methaan (en mogelijk in de toekomst ook in de vorm van ammoniak), is een opslagtechniek die al ver ontwikkeld is en in de praktijk inmiddels al succesvol wordt toegepast (Jansen, 2015). Met behulp van deze techniek worden overschotten aan elektriciteit omgezet in waterstof, synthetisch methaan of ammoniak. Omdat gas makkelijker op te slaan is dan elektriciteit en Nederland een echt "gasland" is, is de Power to Gas opslagtechniek, zeker voor de optie met waterstof en methaan interessant. Denk daarbij niet alleen aan het gebruik van de bestaande (aard)gasinfrastructuren, maar ook in de toepassing als transportbrandstoffen, en voor verwarmingsdoeleinden zowel in de industrie als in de gebouwde omgeving (cv-ketels).

Conclusie

Op basis van de technologische aspecten komen alleen pompcentrales (PHS), perslucht (CAES) en Power to Gas technieken in aanmerking voor de Nederlandse situatie. Gesmolten zouten zijn zeker toepasbaar voor de opslag van warmte, maar niet op een manier waarbij door zonne-energie elektriciteit opgewekt kan worden.

5. Opslag van energie, financiële haalbaarheid en toepasbaarheid

In dit hoofdstuk is beschreven onder welke voorwaarden en hoe grootschalige opslagtechnieken in Nederland kunnen worden toegepast en daarmee een rol kunnen vervullen in de Nederlandse energietransitie. Daarmee wordt antwoord gegeven op deelonderzoeksvraag 6 *“Onder welke voorwaarden kunnen grootschalige opslagtechnieken bijdragen aan de Nederlandse energietransitie?”*.

Daartoe is eerst onderzocht of de technieken die technisch haalbaar zijn, ook financieel haalbaar zijn. Vervolgens is het toepassingspotentieel onderzocht en zijn mogelijke toepassingsvarianten weergegeven. Tot slot zijn de (rand)voorwaarden weergegeven waaronder opslag van energie toepasbaar kan worden.

5.1 Financiële haalbaarheid

In deze paragraaf wordt deelonderzoeksvraag 6a *“Welke grootschalige opslagtechnieken zijn in Nederland financieel haalbaar?”* beantwoord.

Technisch haalbaar wil nog niet zeggen dat een techniek ook financieel haalbaar is. Financiële haalbaarheid van opslag van energie is uiteraard te kwantificeren met behulp van de benodigde investering en terugverdientijd. Volgens prof. dr. mr. C.J. Jepma, hoogleraar Energie en Duurzaamheid aan de Rijksuniversiteit Groningen, is opslag van energie op dit moment voor een exploitant niet rendabel, de prijzen van elektriciteit, gas en CO₂-emissierechten zijn daarvoor te laag en de investeringen te hoog. Maar opslag van energie resulteert ook in “kostenbesparingen” die niet (direct) in de businesscase van de exploitant tot uiting komen (Jepma, 2015). Te denken valt aan:

- minder kosten voor uitbreidingen aan infrastructuur / het leidingnetwerk;
- minder kosten voor subsidies (bijvoorbeeld SDE+ subsidie) door minder volatiliteit op de elektriciteitsmarkt;
- minder kosten voor de gezondheidszorg door milieuschadelijke uitstoot;
- minder kosten voor het terugdringen van CO₂-uitstoot en mitigatie en
- minder kosten voor klimaatadaptie, bijvoorbeeld dijkverhogingen.

Deze zogeheten externaliteiten zijn van algemeen en publiekelijk belang en komen dus niet in uiting in de financiële onderbouwing in de businesscase voor een exploitant van opslag van energie. Daarbij dient opgemerkt te worden dat een deel van deze kosten nu ook niet doorberekend worden in de prijzen van energie, zoals bij aardgas, elektriciteit, warmte en transportbrandstoffen (Jepma, 2015).

In tabel 8 zijn de huidige rendementen en kapitaalkosten (de totale investeringskosten) voor de installaties per vermogenseenheid kilowatt (kW) en de opslagfaciliteiten per energie-eenheid kilowattuur (kWh) weergegeven van PHS, CAES en Power to Gas voor waterstof en synthetisch methaan.

Dit geeft een indicatie van de benodigde investeringen. Voor ammoniak zijn deze kentallen nog niet beschikbaar, hiervoor is nader onderzoek benodigd.

Tabel 8 Benodigde investeringskosten per kW en kWh en rendementen (Sternner et. al, 2015) en (Pierie & van Someren, 2015)

Techniek	Rendement	Investeringskosten per kW (min)	Investeringskosten per kW (max)	Investeringskosten per kWh (min)	Investeringskosten per kWh (max)
Pompcentrale (PHS)	80%	€ 950,00	€ 1.100,00	€ 10,00	€ 50,00
Gecomprimeerde lucht (CAES)	80%	€ 400,00	€ 1.150,00	€ 10,00	€ 120,00
Power to Hydrogen	64%	€ 1.000,00	€ 3.000,00	€ 0,30	€ 0,60
Power to Methane	52%	€ 2.000,00	€ 4.000,00	€ 0,10	€ 0,20

Om een indicatie te geven van de benodigde investeringen, aantallen installaties en de kostprijs per kilowattuur (uit de opslag) zijn de onderstaande uitgangspunten gehanteerd en berekeningen gemaakt.

Energieverbruik

Voor het energieverbruik is in deze berekening het elektriciteitsverbruik uit 2013 gebruikt van 363 PJ en het geprognosticeerde (geëlektrificeerde) energieverbruik voor 2050, zoals in paragraaf 3.6 berekend, van 1.356 PJ. Vanuit deze verbruiken is een gemiddeld verbruik per dag berekend.

Opslagduur

De benodigde opslagduur (het aantal uren of dagen dat energie opgeslagen moet kunnen worden) is niet eenvoudig te bepalen. Er is wel onderzoek naar gedaan, maar niet specifiek voor de Nederlandse of beter nog voor de Europese energievoorziening. Veel publicaties berusten op aannames, schattingen, onderzoek uit de Verenigde Staten of op wereldwijde beschouwingen. Het Amerikaanse Journal of Power Sources publiceerde een peer-reviewed onderzoeksrapport dat aangeeft dat 9 tot 72 uur opslag voldoende zou moeten zijn om een duurzame energievoorziening met een betrouwbaarheid van 99,9% mogelijk te maken (Budischak, Sewell, Thomson, Mach, Veron, & Kempton, 2013). Hierbij dient wel opgemerkt te worden dat deze studie geografisch een groot deel van Amerika betreft, waardoor er zowel klimatologisch als technisch een enorme spreiding is door de afmetingen in dit betreffende gebied. Daardoor kan ook gebruik gemaakt worden van een grote verscheidenheid aan opwekmethoden zoals wind- en zonne-energie, geothermie en waterkracht.

Door gebruik te maken van verscheidene duurzame opwektechnieken, die daarnaast ook niet allemaal afhankelijk zijn van klimatologische omstandigheden, ontstaat inderdaad een stabiele(re) energievoorziening in vergelijking tot een voorziening die praktisch alleen afhankelijk is van wind- en zonne-energie (Budischak et. al, 2013).

Klimaatsceptici en tegenstanders van duurzame energie Climategate.nl rekenen met een opslagduur van 21 dagen, om aan te kunnen tonen dat doelstellingen groter dan 25% duurzame energie niet haalbaar zijn (Wolters, 2014).

NL Ingenieurs gaat uit van een jaarlijkse benodigde opslag van 50.000 GWh in 2050 (Mulder et. al, 2015), dat is gebaseerd op de studie “Implications of diurnal and seasonal variations in renewable energy generation for large scale energy storage” van prof. dr. F.M. Mulder (TU Delft) in het Journal of Renewable and Sustainable Energy (Mulder, 2014). Dit onderzoek betreft het wereldwijde energieverbruik en de daarvoor benodigde opslag. De betreffende 50.000 GWh is een afgeleide voor Nederland, zie ook bijlage IV Schriftelijke vragen aan prof. dr. F.M. Mulder. Deze 50.000 GWh komt overeen met de benodigde opslag van energie voor de duur van circa 48 dagen, uitgaande van het geprognosticeerde energieverbruik voor 2050 van 1.356 PJ.

Voor een exacte berekening van de opslagduur of capaciteit is nader onderzoek nodig. De 9-72 uur (Budischak et. al, 2013) is voor de Nederlandse situatie onvoldoende, gezien het aantal dagen zonder wind en/of zon. De 50.000 GWh (Mulder, 2014), circa 48 dagen, lijkt erg veel maar is ook afhankelijk van een schatting van het energieverbruik in 2050. Voor dit onderzoek is 21 dagen (Wolters, 2014) aangehouden als grove inschatting, mede omdat dit geen exacte wetenschappelijke berekening is, maar bedoeld om een indicatie te geven van de benodigde omvang en investeringen. Bij een aanname van 21 dagen volgt uit de berekeningen in tabel 11 dat in 2050, rekening houdend met de rendementen van de verschillende technieken, circa tussen de 25.000 en 29.000 GWh aan opslag benodigd is (zie pagina 63).

Rendementen

De gehanteerde rendementen voor de Power to Gas technieken zijn weergegeven inclusief de omzettingsverliezen en de verliezen voor het eventueel op druk brengen (gasvorm) en verliezen door opslag.

Kosten

Voor de verschillende technieken zijn qua investeringskosten per kilowatt en per kilowattuur, de in de literatuur gevonden ondergrenzen gehanteerd. Voor de operationele kosten is per jaar 2% van de investering aangehouden, waarbij de kosten voor de inkoop van elektriciteit op € 0 zijn gesteld (Sterner et. al, 2015).

Tabel 9 Investeringskosten en kostprijs per kWh voor opslagtechnieken 2015

Algemeen					
Elektriciteitsverbruik Nederland ¹ (PJ)	363				
Elektriciteitsverbruik Nederland (GWh)	100.833				
Elektriciteitsverbruik Nederland / dag (GWh)	276				
Totaal aantal dagen aan benodigde opslag ²	21				
Benodigde energie in opslag (GWh)	5.801				
	PHS	CAES	P2G (H ₂)	P2G (CH ₄)	
Rendement (%) ³	80	80	64	52	
Afschrijving / levensduur (jaren) ³	50	40	30	30	
Benodigde energie in opslag voor een jaar (na rendement in GWh)	7.252	7.252	9.065	11.156	
Investeringskosten installaties per kW ³⁺⁴	€ 950,00	€ 400,00	€ 1.000,00	€ 2.000,00	
Investeringskosten in opslagcapaciteit per kWh ³⁺⁴	€ 10,00	€ 10,00	€ 0,30	€ 0,10	
Opslagcapaciteit per installatie (GWh) ³⁺⁴⁺⁵	20	2,5	2,5	2,5	
Totaal aantal benodigde installaties (stuks)	363	2.901	3.626	4.463	
Investeringskosten in installaties (vermogen)	€ 13.668.902.207	€ 5.755.327.245	€ 17.985.397.641	€ 44.271.748.039	
Investeringskosten in opslagcapaciteit (kWh)	€ 72.517.123.288	€ 72.517.123.288	€ 2.719.392.123	€ 1.115.648.051	
Totaal investeringskosten	€ 86.186.025.495	€ 78.272.450.533	€ 20.704.789.764	€ 45.387.396.089	
Investeringskosten per jaar over levensduur	€ 1.723.720.510	€ 1.956.811.263	€ 690.159.659	€ 1.512.913.203	
Operationele kosten per jaar (2% van de investering) ⁴	€ 1.723.720.510	€ 1.565.449.011	€ 414.095.795	€ 907.747.922	
Totaal kosten per jaar	€ 3.447.441.020	€ 3.522.260.274	€ 1.104.255.454	€ 2.420.661.125	
Kostprijs per kWh geleverd uit de opslag	€ 0,59425	€ 0,60714	€ 0,19034	€ 0,41726	

¹ (CBS, 2015)

² (NL Ingenieurs, 2015 met eigen interpretatie)

³ (Pierie & van Someren, 2015 voor CAES)

⁴ (Sternier et. al, 2015 voor PHS en P2G)

⁵ (Lievence CSO, 2015 voor PHS)

Uit tabel 9 blijkt dat de opslagtechnieken, met een minimale kostprijs tussen de € 0,19034 en € 0,60714 per kilowattuur vooralsnog niet haalbaar zijn als we deze afzetten tegen de levering van (fossiel opgewekte) elektriciteit met een kostprijs van € 0,02554 (Baseload) en € 0,03157 (Peakload) per kilowattuur, een (aard)gasprijs van € 0,016 per kilowattuur (ICE Endex, 2016) en een waterstofprijs van € 0,040 per kilowattuur (Sternier et. al, 2015).

De investeringskosten voor opslag van energie, maar ook de rendementen van de installaties zijn in het algemeen afhankelijk van de grootte en het aantal van de eerder gebouwde installaties. De toekomstige ontwikkeling van de kosten en rendementen op dit gebied, in het bijzonder aangaande leereffecten, efficiency, schaalvoordelen en nieuwe, kostenbesparende ontwikkelingen door middel van onderzoek en ontwikkeling, zijn van groot belang. Gebaseerd op de prijsontwikkeling van PV (zonne-energie) tussen 1980 en 2013 is door het Duitse onderzoeksbureau Forschungsstelle Energienetze und Energiespeicher (FENES) geconcludeerd dat de prijzen per verdubbeling van de capaciteit met 13% zullen dalen (Sternier et. al, 2015).

In tabel 10 zijn voor PHS, CAES en Power to Gas de te verwachten investeringskosten en rendementen aangegeven voor 2050.

Tabel 10 Verwachte investeringskosten en rendementen voor opslagtechnieken 2050 (Sterner et. al, 2015)

Techniek	Rendement (min)	Rendement (max)	Investeringskosten per kW (min)	Investeringskosten per kW (max)	Investeringskosten per kWh (min)	Investeringskosten per kWh (max)
Pompcentrale (PHS)	80%	85%	€ 171,00	€ 198,00	€ 5,00	€ 25,00
Gecomprimeerde lucht (CAES)	85%	90%	€ 72,00	€ 207,00	€ 5,00	€ 60,00
Power to Hydrogen	78%	84%	€ 180,00	€ 550,00	€ 0,10	€ 0,30
Power to Methane	77%	79%	€ 360,00	€ 720,00	€ 0,05	€ 0,10

In tabel 11 zijn nogmaals de berekeningen gepresenteerd waarbij de investeringskosten en de rendementen zijn aangepast aan de verwachtingen voor het jaar 2050. Ook hier zijn voor de verschillende technieken, qua investeringskosten per kilowatt en per kilowattuur, maar ook qua rendement de ondergrenzen gehanteerd.

Tabel 11 Investeringskosten en kostprijs per kWh voor opslagtechnieken 2050

Algemeen					
Elektriciteitsverbruik 2050 Nederland (PJ) ¹	1.356				
Elektriciteitsverbruik 2050 Nederland (GWh)	376.667				
Elektriciteitsverbruik 2050 Nederland / dag (GWh)	1.032				
Totaal aantal dagen aan benodigde opslag ²	21				
Benodigde energie in opslag (GWh)	21.671				
	PHS	CAES	P2G (H ₂)	P2G (CH ₄)	
Rendement (%) ³	80	85	78	77	
Afschrijving / levensduur (jaren) ³	50	40	30	30	
Benodigde energie in opslag voor een jaar (na rendement in GWh)	27.089	25.496	27.784	28.144	
Investeringskosten installaties per kW ³⁺⁴	€ 171,00	€ 72,00	€ 180,00	€ 360,00	
Investeringskosten in opslagcapaciteit per kWh ³⁺⁴	€ 5,00	€ 5,00	€ 0,10	€ 0,05	
Opslagcapaciteit per installatie (GWh) ³⁺⁴⁺⁵	20	2,5	2,5	2,5	
Totaal aantal benodigde installaties (stuks)	1.354	10.198	11.113	11.258	
Investeringskosten in installaties (vermogen)	€ 9.190.924.658	€ 3.642.224.013	€ 9.922.725.676	€ 20.103.184.487	
Investeringskosten in opslagcapaciteit (kWh)	€ 135.445.205.479	€ 127.477.840.451	€ 2.778.363.189	€ 1.407.222.914	
Totaal investeringskosten	€ 144.636.130.137	€ 131.120.064.464	€ 12.701.088.865	€ 21.510.407.401	
Investeringskosten per jaar over levensduur	€ 2.892.722.603	€ 3.278.001.612	€ 423.369.629	€ 717.013.580	
Operationele kosten per jaar (2% van de investering) ⁴	€ 2.892.722.603	€ 2.622.401.289	€ 254.021.777	€ 430.208.148	
Totaal kosten per jaar	€ 5.785.445.205	€ 5.900.402.901	€ 677.391.406	€ 1.147.221.728	
Kostprijs per kWh geleverd uit de opslag	€ 0,26696	€ 0,27227	€ 0,03126	€ 0,05294	

¹ (CBS, 2015 alle energie minus jaarlijkse besparingen, zwaar transport en grondstoffen)

² (NL Ingenieurs, 2015 met eigen interpretatie)

³ (Pierie & van Someren, 2015 voor CAES)

⁴ (Sterner et. al, 2015 voor PHS en P2G)

⁵ (Lievense CSO, 2015 voor PHS)

Bovenstaande berekeningen betreffen alleen een inschatting van de kostprijs per kilowattuur in 2050 die vanuit de opslag geleverd wordt, om een vergelijk te kunnen maken met de kostprijzen per kilowattuur in 2016. Er is in de berekeningen geen rekening gehouden met rente, winst, belastingen en de inkoop van de benodigde elektriciteit. De uiteindelijke operationele kosten kunnen voor een groot gedeelte (75-80%) bestaan uit de kosten van de benodigde elektriciteit, maar deze kunnen ook nul of negatief (is opbrengst) zijn (Jansen, 2015).

De in de berekening opgenomen operationele kosten zijn voor het gebruik van de netaansluiting, gedemineraliseerd water (bij Power to Gas), onderhoud en managementkosten. Ook heeft de prijs van CO₂ invloed op de haalbaarheid bij Power to Gas, niet alleen in combinatie met de prijzen voor fossiele brandstoffen ook als kosten of opbrengst bij de methaniseringsstap. De haalbaarheid is eveneens afhankelijk van de (toekomstige) prijzen voor aardgas en fossiel geproduceerd waterstof en mogelijke toekomstige subsidies (Jansen, 2015).

Bij een hogere CO₂-prijs, een hogere kostprijs van aardgas of vrijstelling van de energiebelasting voor het gebruik van (groen) synthetisch methaan kan grootschalige opslag in 2050 financieel ook voor deze optie haalbaar zijn. Uit tabel 10 en 11 is tevens te concluderen dat niet zozeer het energetische rendement bepalend is voor de financiële haalbaarheid maar juist de verlaging van de kostprijzen, de benodigde investeringen maar ook de kostprijzen van fossiele brandstoffen. Door reststromen zoals zuurstof en warmte te exploiteren kan een verdere kostprijsreductie van 10-14% worden bereikt (Jansen, 2015).

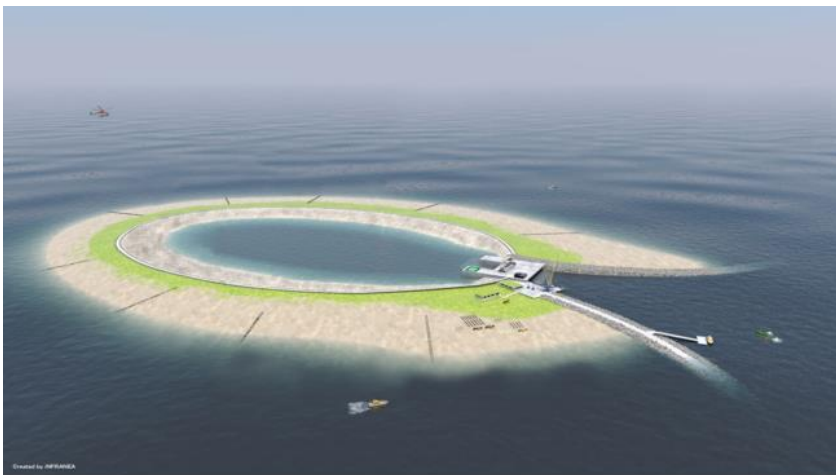
Conclusie

Grootschalige opslag kan in 2050 financieel haalbaar zijn, in ieder geval voor Power to Hydrogen, met een kostprijs per kilowattuur van € 0,03126 voor waterstof ten opzichte van de huidige prijs voor fossiel waterstof van € 0,040 per kilowattuur (Stern et al, 2015). Voor synthetisch methaan lijkt dat nog niet zo te zijn met een prijs van € 0,05294 ten opzichte van een huidige (aard)gasprijs van € 0,016 per kilowattuur (ICE Endex, 2016). Bij deze berekeningen is voorbij gegaan aan de “opbrengsten” van de externaliteiten, mogelijke prijsstijgingen van aardgas en CO₂-emissierechten en mogelijke financiële-, economische maatregelen, zoals verlaging of vrijstelling van de energiebelasting op duurzame energie of subsidies. Door het ontbreken van technische en financiële kentallen voor Power to Ammonia, is voor deze techniek nog geen conclusie te trekken, hiervoor is nader onderzoek benodigd.

5.2 Toepassingspotentieel in Nederland

In deze paragraaf wordt deelonderzoeksvraag 6b “Wat zijn in Nederland, op basis van de technische en financiële haalbaarheid, de meest kansrijke technieken voor de opslag van energie?” beantwoord.

Wat opvalt is het grote aantal aan benodigde installaties. Bij PHS zijn dat er 1.354 stuks indien we uitgaan van het vernieuwde plan Lievense (2007). Dit plan gaat uit van zogenaamde energie-eilanden in de Noordzee met ieder een opslagcapaciteit van 20 GWh en een oppervlakte van 40 km², zie figuur 12. Het Nederlandse deel van de Noordzee is ruim 57.000 km² groot, uitgaande van de benodigde 1.354 eilanden x 40 km² is in er totaal 54.160 km² aan oppervlakte benodigd. Dit komt neer op een ruimtebeslag van circa 95%, een onhaalbare zaak.



Figuur 12 Impressie energie-eiland (Het Nieuwsblad, 2013)

Bij de toepassing van CAES moet de lucht verwarmd worden voordat deze kan worden geëxpandeerd. Dit gebeurt in de regel door verbranding van aardgas, waardoor de efficiëntie aanzienlijk vermindert. Ook het aantal benodigde installaties (10.198 stuks) voor CAES moet, mede gezien de Nederlandse ondergrond, als onhaalbaar worden gekwalificeerd (Pierie & van Someren, 2015).

Het aantal Power to Gas installaties ligt ook zeer hoog. Gasopslag in de vorm van synthetisch methaan zal echter geen probleem vormen gezien de huidige enorme Nederlandse gasopslagmogelijkheden. Zonder het gas op hoge druk te brengen is de maximaal benodigde 28.144 GWh op te slaan in de vorm van gas, met een volume van 2,9 miljard m³. Alleen Gasopslag Bergermeer heeft al een opslagcapaciteit van 4,5 miljard m³ (EBN, 2015). Het plaatsen van de ruim 11.000 benodigde installaties zal zeker wel een uitdaging zijn.

De aantallen benodigde installaties zijn afhankelijk van de capaciteiten van de electrolyzers, de stapelbaarheid daarvan en de mogelijkheden om de installaties aan te kunnen sluiten op het transportnetwerk. Deze aspecten zijn nog volop in ontwikkeling. Een mogelijk alternatief is om de Power to Gas installaties bijvoorbeeld (voor een deel) op de ruim 500 verlaten booreilanden in de Noordzee te plaatsen (Jepma, 2015).

Conclusie

De Power to Gas technieken (waterstof en methaan) hebben voor de Nederlandse situatie het grootste toepassingspotentieel omdat deze, volgens dit onderzoek, financieel de meest gunstige opties zijn en de opslagmogelijkheden voor synthetische gassen al volop aanwezig zijn, waardoor het ruimtebeslag beperkt blijft. Desondanks zal Nederland niet mogen focussen op één bepaalde techniek, mede ook vanwege het potentieel van de andere technieken die zijn onderzocht.

5.3 Toepassingsvarianten

In deze paragraaf wordt deelonderzoeksvraag 6c “In welke toepassing kunnen deze opslagtechnieken bijdragen aan de Nederlandse energietransitie?” beantwoord.

Er zijn diverse mogelijkheden voor de toepassing van synthetische gassen. De meest milieu-effectieve toepassing is het vervangen van fossiele brandstoffen of als duurzame vervanger van fossiel (geproduceerde) waterstof en ammoniak. Vervanging van fossiele brandstoffen kan bijvoorbeeld door het invoeden op de bestaande (aard)gasinfrastructuur, het gebruik als transportbrandstof of als grondstof voor de chemische industrie. De synthetische gassen kunnen prima gebruikt worden als brandstof om weer elektriciteit op te wekken zonder CO₂-uitstoot (waterstof of ammoniak) of met een gesloten CO₂-kringloop (synthetisch methaan). Hoewel de toepassing daarvan resulteert in een flexibel en schoon back-up vermogen, is door de laatste conversiestap (productie van elektriciteit) een verdere afname van de efficiency onvermijdbaar. De productie van elektriciteit met een brandstofcel (voor waterstof), gasturbine of gasmotor resulteert in een afname van het energetisch rendement met ongeveer 40-50% (SBC Energy Institute, 2014). Niet alle gassen zijn geschikt voor iedere toepassing, zie tabel 12 (Jansen, 2015). In bijlage II is een beknopte beschrijving opgenomen betreffende de verschillende Power to Gas technieken.

Tabel 12 Geschiktheid gassen voor toepassingsmogelijkheden (Jansen, 2015, met eigen interpretatie voor ammoniak)

Nr.	Toepassing	H ₂	CH ₄	NH ₃
1	Invoeden op het aardgasnet	●	●	○
2	Invoeden op waterstofnet	●	○	○
3	Transportbrandstof	●	●	●
4	Grondstof voor de industrie	●	●	●
5	Elektriciteitsproductie	●	●	●

Invoeding op aardgasinfrastructuur

Bij een proef van netbeheerder Stedin op Ameland werd maximaal 20% waterstofgas in het bestaande aardgasnet bijgemengd. Dat percentage leverde in deze specifieke situatie (waarbij alleen huishoudelijke toestellen van het gasmengsel werden voorzien) technisch weinig problemen op (van der Molen, 2015). Nederlandse regelgeving bepaalt echter dat het maximale bijmengpercentage van waterstof in Gronings aardgas 0,02% is voor de landelijke en regionale transportleidingnetwerken (beheerd door Gasunie) en 0,5% voor de regionale distributieleidingnetten¹² die worden beheerd door de regionale netbeheerders (Staatscourant, 2014).

¹² Tot april 2016 was dit percentage 0,1% voor de regionale transportnetten.

In Duitsland is bijmenging van waterstof toegestaan tot 2% (Jansen, 2015). Bij synthetisch methaan, dat qua samenstelling gelijk is aan (Gronings) aardgas, gelden deze bijmengingsregels niet. De maximale bijmengpercentages voor o.a. waterstof zijn opgesteld omdat een te grote variatie in de gassamenstelling tot veiligheidsrisico's kan leiden, waaronder het risico op koolstofmonoxidevorming, lekkage door corrosievorming bij leidingen en appendages en inslagrisico's¹³ door hogere verbrandingssnelheden (Staatscourant, 2014).

De Wobbe-index is een grootte die het verbrandingsgedrag van een gas karakteriseert en voornamelijk afhangt van de verbrandingswaarde en de relatieve dichtheid van het gas (TU Delft, 2016). De Wobbe-index wordt bepaald met de volgende formule:

$$W = \frac{H_s}{\sqrt{d}}$$

Waarin:

$$W = \text{Wobbe-index} \left(\frac{\text{MJ}}{\text{m}^3} \right)$$

$$H_s = \text{Bruto calorische waarde} \left(\frac{\text{MJ}}{\text{m}^3} \right)$$

d = Relatieve dichtheid gas ten opzichte van lucht (–)

“De standaard voor laagcalorisch gas wordt bepaald door het Groningengas dat een Wobbe-index heeft van 43,8 MJ/m³(n)¹⁴. De bandbreedte hieromheen loopt van 43,46 tot 44,41 MJ/m³(n)” (Staatscourant, 2014). De Wobbe-index van waterstof is 48,27 MJ/m³(n), wat de kans op vlaminslag bij branders (in onder andere cv-ketels en gaskachels) verhoogt. Bij een te hoge Wobbe-index vormt zich eveneens het giftige koolmonoxide (CO) (TU Delft, 2016). Gasturbines en gasmotoren zijn eveneens zeer gevoelig voor waterstof, deze worden namelijk geoptimaliseerd voor een bepaalde gassamenstelling (Jansen, 2015).

Door bijmenging van waterstof zal ook de capaciteit van het aardgasnet afnemen aangezien waterstof een 2,8 keer lagere dichtheid heeft dan aardgas. Hierdoor dienen de leidingen te worden vervangen of de compressoren, om het gas op druk te houden, te worden uitgebreid. Het aanpassen van de compressoren is goedkoper dan leidingen vervangen (Jansen, 2015). Door diffusie van waterstof is het de vraag in hoeverre gastransportnetten bestand zijn tegen waterstof bijmenging. Diverse onderdelen in het gastransportsysteem zijn niet ontworpen op de aanwezigheid van waterstof.

¹³ Het terugslaan van de vlam in de brander.

¹⁴ m³(n) staat voor standaard kubieke meter gas, de hoeveelheid gas die bij een temperatuur van 273,15 K, een absolute druk van 1,01325 bar en vrij van waterdamp exact een volume inneemt van 1 m³.

Daardoor dienen wellicht extra maatregelen te worden genomen op het gebied van explosieveiligheid (Staatscourant, 2014). Het aardgasnetwerk bestaat uit verschillende transportnetten voor gassen van verschillende kwaliteiten. Om de omvang van eventuele waterstofbijmenging te berekenen is daarom uitgegaan van het jaarlijkse Nederlandse aardgasverbruik in 2013 van 1.416 PJ (44% van 3.219 PJ, zie paragraaf 3.1). Dit staat gelijk aan 40.261.586.579 m³ aardgas van Groningse kwaliteit. In tabel 13 is de hoeveelheid energie aangeven bij verschillende bijmengpercentages. Zoals in paragraaf 5.1 is berekend, dient er in 2050 tussen de 25.000 en 29.000 GWh opgeslagen te kunnen worden.

Tabel 13 Volume, energie en bijmengpercentages voor waterstof

Bijmengpercentage waterstof	energie in waterstof	benodigd volume
10%	39.333 GWh	4.026.158.658 m ³
1%	3.933 GWh	402.615.866 m ³
0,5%	1.967 GWh	201.307.933 m ³
0,02%	79 GWh	8.052.317 m ³

Indien een bijmengingspercentage van 10% zou worden toegestaan kan de benodigde hoeveelheid energie die opgeslagen dient te worden, als waterstof worden bijgemengd. Daarbij blijft dan 90% van het gas bestaan uit aardgas (fossiel met additionele CO₂-uitstoot) of synthetisch methaan (maximaal met gesloten CO₂-kringloop). Ook de productie van 393.333 GWh aan synthetisch methaan, om het gehele aardgasverbruik te verduurzamen, is een onmogelijke opgave. Op deze wijze kan, beredeneerd uit de schattingen voor de hoeveelheid benodigde opslag, maximaal 6 - 8% van het gasverbruik verduurzaamd worden. Het invoeden van waterstof of synthetisch methaan is dus een tussen (deel)oplossing en daarom niet de oplossing om de (gehele) energievoorziening te verduurzamen.

Een beter alternatief is om de bestaande transportnetwerken en gasopslaglocaties te gebruiken als opslag voor de geproduceerde gassen en deze gassen pas te benutten als dat noodzakelijk is. Daarom is ook de huidige gasopslagcapaciteit van Nederland beoordeeld op de omvang voor opslag van waterstof en synthetisch methaan. De ondergrondse bergingen in Nederland bestaan uit oude lege gasvelden en zoutcavernes (Gasunie, 2014). In tabel 14 zijn de gasopslagen en de hoeveelheden op te slaan gas en vandaaruit de energie-inhoud weergegeven.

Tabel 14 Volume en energie-inhoud van de ondergrondse gasopslagen in Nederland (Gasunie, 2014)

Gasopslag	energie		volume	
Norg	32 TWh	32.000 GWh	115 PJ	3.275.518.908 m ³
Grijskerk	16 TWh	16.000 GWh	58 PJ	1.637.759.454 m ³
Alkmaar	5 TWh	5.000 GWh	18 PJ	511.799.829 m ³
Zuidwending	3 TWh	3.000 GWh	11 PJ	307.079.898 m ³
Bergermeer	44 TWh	44.000 GWh	158 PJ	4.503.838.499 m ³
Totaal	100 TWh	100.000 GWh	360 PJ	10.235.996.588 m ³

Uit tabel 14 blijkt dat er in Nederland ruim voldoende (ondergrondse) gasopslag beschikbaar is om de in 2050 benodigde energie, die opgeslagen dient te worden, te kunnen opslaan. Dit is zowel mogelijk voor waterstof als synthetisch methaan. Uitgaande van een verdere elektrificering, is een duurzame energievoorziening in de toekomst mogelijk met behulp van opslag met Power to Gas technieken.

Ammoniak kan onder de juiste omstandigheden dienen als schone brandstof (omzetting in N_2 en H_2O), het is echter wel een gevaarlijke stof¹⁵. Opslag en transport vindt voornamelijk plaats in de vorm van vloeistof (onder druk van ongeveer 10 bar of bij $-33,4$ °C) in tankauto's, in ketelwagens over het spoor en in tankschepen (VROM, 2005). Hierdoor zijn aanvullende veiligheidsmaatregelen nodig om het milieu te beschermen. Ammoniak kan niet ingevoerd worden op het aardgasnetwerk en kan ook niet opgeslagen worden in lege gasvelden of zoutcavernes.

Vergisting

Door middel van vergisting wordt (groen)biogas geproduceerd. Dit gas kan worden opgewerkt tot aardgaskwaliteit en ingevoerd worden op de transportnetwerken of er wordt middels een warmte kracht koppeling (WKK) warmte en elektriciteit mee opgewekt. Door waterstof aan het vergistingsproces toe te voegen kan, doordat waterstof zich bindt met CO_2 (dat anders in de atmosfeer terecht komt als het niet wordt afgevangen) de methaanopbrengst worden vergroot. In een demonstratieproject bij Schwandorf (Duitsland) wordt op deze wijze het biogas bestaande uit 52% methaan, op biologische wijze opgewerkt naar 75% methaan (Jansen, 2015). Indien bij vergisting door middel van waterstof de methaanopbrengst wordt verhoogd en het biogas wordt ingevoerd op het aardgastransportnetwerk kan deze variant als opslag van energie worden beschouwd. Bij directe omzetting van het biogas in elektriciteit (WKK) geldt dit niet omdat dit een continue proces is en daardoor niet helpt om eventuele tekorten op te vangen.

Invoeden waterstofnet, transportbrandstoffen en grondstoffen

Invoeden op bestaande waterstofnetwerken berust op dezelfde principes als het invoeden op de aardgastransportnetwerken. De huidige waterstofnetwerken worden vooral gebruikt voor de levering van waterstof als grondstof aan de industrie of als distributienetwerk voor transportbrandstof. Zowel het gebruik van synthetische gassen als grondstof of als transportbrandstof valt buiten de scope van dit onderzoek en wordt daarom niet verder behandeld.

¹⁵ Ammoniak is gekwalificeerd als giftig gas (VN Gevarenklasse: 2.3). De stof is schadelijk bij inademen en kan daardoor longoedeem veroorzaken. Ammoniak veroorzaakt brandwonden en is tevens ontvlambaar en ontplofbaar. Ammoniak is zeer giftig voor waterorganismen. MAK-waarde: 20 ppm; 14 mg/m³ (International Chemical Safety Cards 0414).

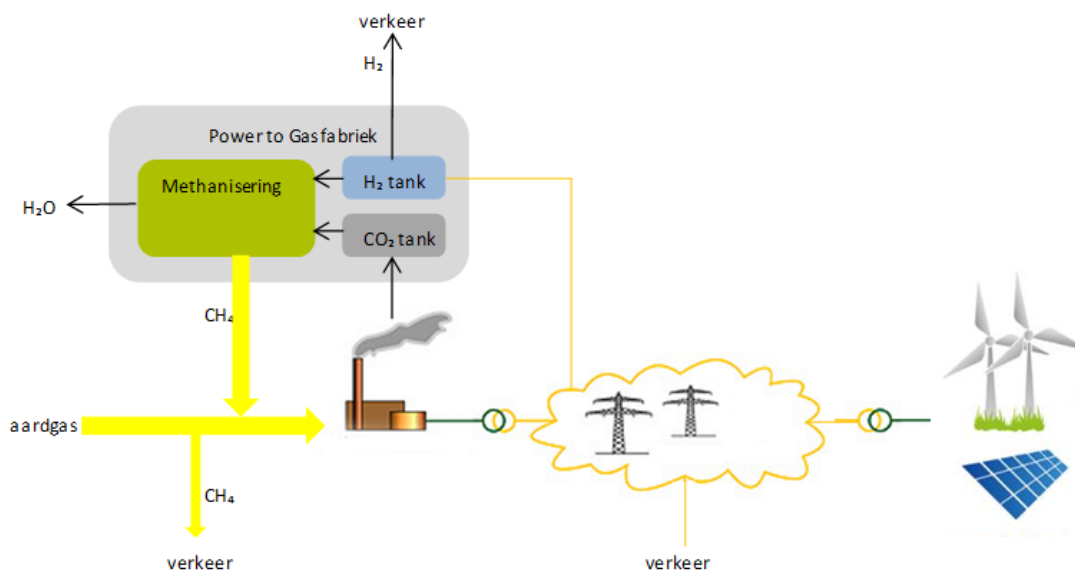
Elektriciteitsproductie

Het is aanbevelingswaardig om geproduceerd synthetisch gas op te slaan voor gebruik in perioden dat het gas noodzakelijk is. De in het toekomstperspectief geplaatste technisch meest voor de hand liggende oplossing is om de gassen te gebruiken om elektriciteit te produceren op momenten dat er niet voldoende zonne- of windenergie wordt opgewekt. In tabel 15 zijn de energetische rendementen weergegeven van duurzame elektriciteitsopwekking, opslag en vervolgens weer elektriciteitsopwekking. Bij de berekening is uitgegaan van de geprognosticeerde maximaal haalbare rendementen voor de diverse technieken.

Tabel 15 Energetische rendementen elektriciteit - elektriciteit

Gas	Elektrolyse tot waterstof	Methanisering	Ammoniak-productie	Opslag	Elektriciteits-productie	Overall energetisch rendement
Waterstof	89%	-	-	95%	60%	50,73%
Methaan	89%	81,50%	-	95%	60%	41,34%
Ammoniak	89%	-	81,80%	95%	60%	41,50%

Synthetisch geproduceerd gas kan, als de elektriciteitsvraag het (duurzaam opgewekte) aanbod overschrijdt, gebruikt worden als brandstof voor elektriciteitscentrales, waardoor een flexibele opwekmethode van elektriciteit ontstaat met geen of een gesloten CO₂-kringloop. Dit kan met brandstofcellen voor waterstof of met gasturbines of –motoren voor alle genoemde synthetische gassen. In figuur 13 is het principe van een mogelijke grootschalige Power to Gas oplossing met methaniseringsschap weergegeven, die invulling geeft aan opslag van energie en tevens aan flexibel opwek- en back-upvermogen.



Figuur 13 Mogelijke Power to Gas configuratie

Conclusie

De energietransitie betreft de verduurzaming van de gehele energievoorziening. Mede omdat veel duurzaam opgewekte energie in de vorm van elektriciteit opgewekt wordt, vindt er een verdergaande elektrificering plaats. Uiteraard is het doel niet het verduurzamen van het aardgasverbruik, door bijmenging of vervanging, of het produceren van grondstoffen. De overschotten aan duurzaam opgewekte elektriciteit dienen daarom (in gasvorm) opgeslagen te worden om deze later weer te kunnen gebruiken in de vorm van elektriciteit. Daardoor is de laatste conversiestap in de Power to Gas varianten (het weer opwekken van elektriciteit) onvermijdbaar. De bestaande Nederlandse gasinfrastructuur en opslagmogelijkheden bieden daarvoor grote mogelijkheden. Het afbouwen van het aardgasverbruik is een absolute voorwaarde voor een verdergaande elektrificering en verduurzaming. De opgave voor het opslaan van energie, voor de in paragraaf 5.1 bepaalde 21 dagen, is al enorm. Het verduurzamen van het gehele aardgasverbruik met behulp van Power to Gas technieken, moet als onmogelijk gekwalificeerd worden.

5.4 Succesbepalende factor, een rol van de overheid?

In deze paragraaf wordt deelonderzoeksvraag 6d *“Is een centrale en innovatieve rol van de overheid een vereiste om te slagen?”* beantwoord.

In een studie die Energieonderzoek Centrum Nederland (ECN) en partner DNV GL in juli 2014 hebben uitgevoerd, naar de mogelijke rol van Power to Gas in de toekomstige Nederlandse energievoorziening, is geconcludeerd dat Power to Gas belangrijk is voor CO₂-reductie, maar op korte en middellange termijn te duur als back-up voor zonne- en windenergie (Joode, 2014). De nadruk in het onderzoek van ECN ligt vooral op de verduurzaming van het gasverbruik voor de Nederlandse huishoudens en industrie en dan met name op de productie van waterstof en invoeding daarvan op het bestaande aardgasnet. De toepassing van Power to Gas in niches wordt echter niet uitgesloten, zoals bij lokale of regionale overschotten aan duurzaam opgewekte elektriciteit, locaties met een beperkte capaciteit voor de aansluiting op het transportnetwerk en de vraag naar duurzaam waterstof voor toepassing in bijvoorbeeld openbaar vervoer of de industrie (Jansen, 2015).

Volgens de heer prof. dr. mr. Jepma, hoogleraar bij de Rijks Universiteit Groningen, kan een positieve businesscase voor bijvoorbeeld Power to Gas al ontstaan bij de halvering van de investeringskosten in de benodigde electrolyzers (Jepma, 2015). Volgens Jepma is opslag van energie een absolute voorwaarde voor het verduurzamen van de energievoorziening (Jepma, 2015).

Door het vergroten van de productiecapaciteit van de benodigde technieken zullen de kostprijzen dalen en zal er sneller een rendabele businesscase ontstaan. Bij een toenemend aandeel duurzame energie zal de behoefte aan flexibiliteit toenemen en de rol van fossiele elektriciteitscentrales veranderen. Zeker ook omdat de opwekking van duurzaam geproduceerde elektriciteit de prijzen voor elektriciteit steeds verder onder druk zet, waardoor het moeilijker wordt om fossiele centrales (winstgevend) te kunnen exploiteren. Hierdoor zullen andere businessmodellen ontstaan, waarbij flexibiliteit financieel gewaardeerd zal worden en de kosten voor elektriciteit niet meer alleen bestaan uit een vergoeding voor de opwekker maar ook uit een vergoeding voor de aanbieder van flexibiliteit. Deze ontwikkelingen bieden op korte termijn uitzicht op succesvolle implementaties van pilotprojecten. Ondertussen worden steeds meer pilotprojecten opgestart zowel in Nederland als in het buitenland. Een aantal succesvolle initiatieven is beschreven in bijlage III.

De Raad voor de leefomgeving en infrastructuur concludeert in haar rapport over de toekomstige Nederlandse energievoorziening: “Dit is een enorme uitdaging die ondersteund moet worden met langjarige resultaat gestuurde innovatieprogramma’s waar meer budget voor moet komen. De transitie kan alleen gerealiseerd worden als de weg naar het te bereiken doel wordt bewaakt door een onafhankelijke persoon of instantie die op afstand staat van de in het geding zijnde belangen” (Raad voor de leefomgeving en infrastructuur, 2015). Dit zou een passende rol van de overheid kunnen zijn.

Conclusie

Het toepassingspotentieel van Power to Gas is, zoals tijdens dit onderzoek is aangetoond, groot. Op dit moment zijn grootschalige opslagtechnieken economisch gezien niet haalbaar. Op langere termijn kan Power to Gas een prominente rol in de Nederlandse energievoorziening innemen. De belangrijkste uitdagingen zijn niet van technologische aard, maar hebben vooral betrekking op zowel financiële aspecten als het aantal opslageenheden en de daarvoor benodigde ruimte. Uit dit onderzoek blijkt dat grootschalige opslag op z’n vroegst rond 2030 noodzakelijk zal zijn, dat betekent dat er nog ruim 14 jaar onderzoek en innovatie kan plaatsvinden. Dat lijkt lang maar de opgave mag zeker niet onderschat worden. Een centrale rol voor de overheid zou daar zeker goed in passen, niet alleen om de energietransitie en de rol van energieopslag daarin te faciliteren, maar ook om dit Europees af te stemmen en te onderzoeken. Op deze wijze (be)houdt de overheid ook de regie in handen om de gestelde doelstellingen te behalen en de noodzakelijke verduurzaming plaats te laten vinden.

6. Discussie

Dit onderzoek omvat niet alle aspecten van de energietransitie en de rol van opslag daarin. De toekomst is, ook wat de energietransitie betreft, onzeker en hangt af van veel factoren, die niet of nauwelijks te voorspellen zijn. Ook zijn er tijdens het onderzoek aannames gedaan, waarvan in de toekomst moet blijken of deze juist zijn. Deze aannames en de bijbehorende opmerkingen zijn in dit hoofdstuk beschreven.

Penetratiegraad duurzame energie

Er is bij de aannahme van een penetratiegraad van 70% een grove schatting gemaakt op basis van diverse onderzoeken en een eigen berekening. Het uitgangspunt voor deze aannahme is dat andere, voordeligere technieken, zoals netverzwaring, Smart Grids en interconnectors, eerst ingezet zullen worden. Tevens is uitgegaan van een verdere elektrificering van technieken en het gebruik van Power to Heat. Het feit dat deze opties voordeliger zijn om duurzame energie in te kunnen passen, wil niet zeggen dat deze opties ook daadwerkelijk volledig gebruikt zullen gaan worden. Het is niet mogelijk om een exacte berekening te maken van dit gestelde percentage. Om aan de hand van het aandeel duurzame energie en de ontwikkelingen voor het inpassen hiervan, verdergaande conclusies te kunnen trekken, zal er een modellering opgezet moeten worden met een veelheid aan parameters die continue bewaakt dienen te worden.

Opslagduur en hoeveelheid benodigde opslag

Ook voor de opslagduur is een grove schatting gebruikt. Aan de hand van een modellering zullen studies moeten worden gedaan waarbij de parameters opgesteld duurzaam opwekvermogen (aanbod) en energievraag (gebruik) in relatie tot meteorologische patronen en mate van elektrificering leidend zijn. Van daaruit kan een meer gevalideerde schatting gemaakt worden van de overschotten en tekorten van duurzame energie op jaarbasis. Daarbij zou het nog interessanter zijn om een dusdanig model op te zetten voor geheel Europa of Europa en een deel van Noord Afrika. Op deze wijze kan zowel de hoeveelheid benodigde opslag als de opslagduur inzichtelijk worden gemaakt. De opslagbehoefte zal ook nog verder beïnvloed worden door o.a. regionale initiatieven in zelfvoorzienend zijn (inclusief opslag), de ontwikkeling van warmtenetten (stadsverwarming), de eisen met betrekking tot een energieneutrale gebouwde omgeving en de snelheid van implementatie daarvan in de bestaande gebouwde omgeving.

Innovaties

Alle gepresenteerde berekeningen zijn gebaseerd op actuele gegevens en inschattingen daarvan in de toekomst. Er is geen rekening gehouden met mogelijke nieuwe technieken en ontwikkelingen van bijvoorbeeld duurzame energieopwekkingsmethoden en energieopslag. Een plotselinge doorbraak van bijvoorbeeld kernfusie of andere en nieuwe technieken voor opwekking van duurzame energie, die wellicht niet afhankelijk zijn van meteorologische omstandigheden, zouden een heel ander beeld schetsen voor de energietransitie en mogelijk opslag van energie grotendeels overbodig maken.

Elektrificering

De gedane aanname dat het gehele energieverbruik, exclusief grondstoffen en zwaar transport, in de toekomst geëlektrificeerd gaat worden, is op zich al een onderwerp van discussie. Vanuit de verduurzaming van de energievoorziening is dit een gewenste ontwikkeling, echter economisch en technisch gezien is dit een enorme opgave, denk daarbij bijvoorbeeld aan de energie-intensieve processen in de industrie, waar grote hoeveelheden hoogwaardige warmte benodigd zijn. Daarentegen zou juist voor deze processen Power to Gas een ultieme oplossing kunnen bieden. Ook warmtenetten zullen een rol van betekenis gaan spelen in de energievoorziening, hoe discutabel het gebruik daarvan ook is, aangezien dit een deel van de energievoorziening betreft die niet geëlektrificeerd hoeft te worden. Datzelfde geldt natuurlijk voor groengas.

Transport

Er wordt zeer zwaar ingezet op de ontwikkeling van elektrisch vervoer. Zwaar transport kan niet elektrisch plaatsvinden, hiervoor zijn andere technieken en innovaties noodzakelijk. Zwaar transport kan wel gebruik maken van biobrandstoffen en gas. Dit gas zou bijvoorbeeld een duurzame synthetische variant kunnen zijn. Het is nog zeer de vraag of elektriciteit de “brandstof” van de toekomst voor kleinschalig vervoer is. Naast biobrandstoffen kan ook waterstof, al dan niet via een brandstofcel, een rol vervullen.

Nederlandse duurzame energie

Het uitgangspunt, in zowel het Nederlandse beleid als ook voor dit onderzoek, is dat Nederland haar energievoorziening zelf verduurzaamt. De vraag of dit wel noodzakelijk is, aangezien een deel van onze huidige energievoorziening nu ook wordt geïmporteerd, is evident. De keuze die hierbij gemaakt moet worden is of Nederland ook in de toekomst duurzame energie zal importeren, waarbij een belangrijk afweging de eventuele ongewenste geopolitieke afhankelijkheid is. Nederland importeert immers nu ook olie, gas, steenkool, biomassa en elektriciteit.

Energiebesparing

In de gepresenteerde berekeningen is uitgegaan van de in het Energieakkoord afgesproken energiebesparing van 1,5% per jaar. Urgenda gaat in haar plannen uit van 4% energiebesparing per jaar. In de afgelopen jaren is het onmogelijk gebleken om de afgesproken 1,5% te halen. Dit zal nog moeilijker worden bij een groeiende economie, waarbij een duidelijke koppeling aanwezig is tussen zowel enerzijds de groei van de economie als anderzijds de toename van het energieverbruik (inmiddels is de groei van economie al wel ontkoppeld van de CO₂-emissie). Innovaties kunnen daarentegen wel weer zorgen voor nieuwe en meer energiebesparende technieken en producten.

Aantal installaties voor opslag

Het aantal benodigde opslaginstallaties wordt enerzijds bepaald door de opslagvolumes (en het aantal bedrijfsuren) en anderzijds door de aansluiting daarvan op de transportnetwerken. In het Eemshavengebied is circa 3 GW aan centrales ontsloten op het Nederlandse transportnetwerk. In dit onderzoek is gerekend met een maximaal vermogen van 2,5 GW voor de Power to Gas installaties. Een groter vermogen is technisch mogelijk, maar vergt grote aanpassingen aan de infrastructuur. Opslagcapaciteit voor Power to Gas (waterstof en methaan) is in Nederland ruimschoots beschikbaar. Voor de energie-eilanden is, conform het plan Lievense, gerekend met 20 GWh opslagcapaciteit, het vermogen van zo een energie-eiland is 1.500 MW (1,5 GW). Hoe dit qua infrastructuur ontsloten zal moeten worden, dient nog nader onderzocht te worden.

Nederlandse economie

De Nederlandse aardgasinfrastructuur (gasrotonde) en de rol daarvan in de Europese energievoorziening, de Nederlandse havens met veel productiecapaciteit voor brandstoffen en de energie gerelateerde procesindustrie kunnen Europees gezien een rol van betekenis gaan spelen in een toekomstige duurzame energievoorziening. Zeker bij opslag van energie met de Power to Gas varianten. Een voorwaarde daarvoor is dat het (Nederlandse) overheidsbeleid en het bedrijfsleven zich daar vroegtijdig op focust.

Kosten- en rendementsberekeningen

In de berekeningen omtrent financiële haalbaarheid zijn de laagste kosten per eenheden gehanteerd. Wellicht schept dat een te optimistisch beeld. De kosten van elektriciteit (inkoop) zijn niet gewaardeerd in de berekeningen (€ 0), omdat de prijzen van elektriciteit nu bij overschotten nul of zelfs negatief zijn. Echter zodra opslag van energie een rol van betekenis gaat spelen, komen zeer lage of negatieve elektriciteitsprijzen steeds minder voor.

De situatie, dat door het eigen succes de technieken straks verliesgevend worden, moet voorkomen worden. Dit is een trend die zich al heeft ingezet bij duurzame energie, waarbij het aanbod zorgt voor dusdanige lage elektriciteitsprijzen dat wind- en zonne-energie niet meer rendabel te exploiteren zijn. De waardering van de kosten voor CO₂-emissie zijn ook buiten beschouwing gelaten. Dit kan zowel een negatieve als positieve impact hebben op de financiële haalbaarheid. Indien de CO₂-emissie reëel wordt gewaardeerd, zullen de prijzen voor aardgas en fossiel geproduceerde elektriciteit sterk stijgen, daarentegen zal energie uit duurzame bronnen en uit opslag voordeliger worden. Aandachtspunt daarbij is de waardering van de CO₂-emissie van synthetisch en duurzaam geproduceerd methaan, er is daarbij immers geen additionele CO₂-emissie.

7. Conclusie

Steeds meer energie wordt duurzaam opgewekt. In Nederland groeien vooral zonne- en windenergie gestaag. De winning van elektriciteit uit deze duurzame bronnen is in Nederland echter afhankelijk van meteorologische omstandigheden en daardoor variabel en onzeker. Voor afstemming van vraag en aanbod lijkt opslag van energie een voor de hand liggende oplossing. Buiten financiële- en technische aspecten, spelen sociale en politieke aspecten ook een rol in de energietransitie. Prominente rollen in de discussie over de energietransitie zijn weggelegd voor het gebruik van steenkool voor elektriciteitsproductie, CO₂-afvang en -opslag, het gebruik van biomassa en natuurlijk de rol van aardgas, waarbij de ontwikkelingen in Groningen een grote rol spelen. De opgave waarvoor we staan is enorm. In 2013 werd 4,8% van onze energie duurzaam opgewekt. Onze elektriciteitsvoorziening is voor circa 10% verduurzaamd, maar alle windmolens, zonnepanelen, waterkrachtcentrales en het gebruik van biomassa voor elektriciteitsopwekking leveren slechts circa 2% van het totaal aan duurzame energie. Het doel voor 2020 is 14% duurzame energieopwekking, voor 2023 16% en wellicht voor 2050 geheel duurzaam.

Wanneer wordt opslag noodzakelijk?

Opslag van energie gaat altijd gepaard met verliezen. Alvorens er energie opgeslagen wordt, is het zinvol om alternatieven in te zetten waardoor minder of geen verliezen optreden en/of alternatieven die wellicht voordeliger zijn. Mogelijke alternatieven zijn: vraag en aanbod beter op elkaar afstemmen (Smart Grids), regionaal, nationaal maar ook internationaal (Europees bijvoorbeeld), gasverbruik voor verwarming vervangen door elektriciteit (Power to Heat), transportbrandstoffen vervangen door elektriciteit en het terugregelen van duurzaam opwekvermogen (bv. windmolens stil zetten). Pas hierna is opslag van energie zinvol.

Er is nog geen onderzoek gedaan naar wanneer opslag van elektriciteit in Nederland noodzakelijk wordt. Berekeningen in dit onderzoeksrapport tonen aan dat voor 2020 opslag nog niet noodzakelijk is. Door de grote hoeveelheid aspecten die invloed hebben op deze berekeningen, is voor de verdere toekomst alleen een schatting mogelijk. Agora, een vooraanstaand Duits onderzoeksinstituut, heeft op basis van een uitgebreid onderzoek een schatting gedaan voor de energievoorziening in Duitsland. Mede omdat Nederland evenals Duitsland, op het gebied van duurzame energieopwekking voor het grootste deel afhankelijk is van zonne- en windenergie, is voor de Nederlandse situatie aangesloten op dit Duitse onderzoek. Dat wil zeggen dat energieopslag noodzakelijk wordt indien meer dan 70% van de elektriciteit duurzaam wordt opgewekt. Volgens de (huidige) Nederlandse doelstellingen zal tussen 2030 en 2050 grootschalige opslag van energie noodzakelijk zijn.

De uitdagingen, met betrekking tot integratie van duurzame energie en de rol van opslag daarin, spelen niet alleen op nationaal niveau, maar in alle (Europese) landen. Met waterkracht in Scandinavië en de Alpen, Concentrated Solar Power in Zuid Europa, wind in Noord en West Europa en geothermie uit Italië en IJsland kan een redelijke stabiele duurzame energievoorziening worden ontworpen en gebouwd. Daarbij kan een systeem ontworpen worden waarin de behoefte aan langdurige en grootschalige opslag geminimaliseerd wordt. Het is daarvoor noodzakelijk de Europese infrastructuur verder uit te bouwen. Tevens is het van belang dat niet ieder land onderzoek doet naar alleen de eigen situatie maar dat er grensoverschrijdend onderzoek wordt gedaan naar de Europese situatie.

Dat betekent dat opwekking van duurzame energie ten eerste op de meest ideale geografische locatie moet plaatsvinden, maar ten tweede ook dat vraag en aanbod Europees moet worden gezien en op elkaar moet worden afgestemd. Op basis daarvan kan inzichtelijk gemaakt worden hoeveel energieopslag wanneer en werkelijk noodzakelijk is.

Welke opslagtechnieken zijn beschikbaar?

Kansrijke opslagtechnieken zijn: vliegwielen, pompcentrales (PHS), gecomprimeerde (pers)lucht (CAES), accu's en batterijen, condensatoren, magnetische opslag, Power to Gas (waterstof, methaan en ammoniak) en gesmolten zouten.

Voor- en nadelen van deze opslagtechnieken

Bovengenoemde opslagtechnieken hebben ieder hun eigen specifieke technische eigenschappen. De verschillende technieken zijn te verdelen in opslagtechnieken voor kortstondige opslag, van seconden tot uren, ook wel balancering genoemd en langdurige opslag, voor het overbruggen van seizoenen, ook wel seizoensopslag genoemd. Voor een verdergaande transitie naar een duurzame energievoorziening is grootschalige seizoensopslag noodzakelijk.

Opslagtechnieken voor grootschalige opslag

Vliegwielen, accu's en batterijen, condensatoren en magnetische opslag zijn geschikte opslagtechnieken voor kortstondige opslag. Technieken die in aanmerking komen voor grootschalige seizoensopslag zijn pompcentrales (PHS), perslucht (CAES), gesmolten zouten en Power to Gas.

Mogelijke grootschalige opslagtechnieken in Nederland

Op basis van de technologische aspecten komen alleen pompcentrales (PHS), perslucht (CAES) en Power to Gas technieken in aanmerking voor de Nederlandse situatie. Gesmolten zouten zijn zeker toepasbaar voor de opslag van warmte, maar in Nederland niet op een manier waarbij door zonne-energie elektriciteit opgewekt kan worden.

Financiële haalbaarheid

Op dit moment zijn alle grootschalige opslagtechnieken financieel gezien niet haalbaar. In 2050 zou op basis van een aantal aannames Power to Gas ook financieel haalbaar kunnen zijn, in ieder geval voor de Power to Hydrogen (waterstof) variant. Voor pompcentrales (PHS) en perslucht (CAES) geldt dat niet. De Power to Methane variant kan onder de juiste (markt)omstandigheden wel haalbaar zijn, terwijl voor de Power to Ammonia de financiële kentallen ontbreken om de financiële haalbaarheid te kunnen toetsen. Bij de financiële haalbaarheidsberekeningen is voorbij gegaan aan de opbrengsten van externaliteiten (o.a. voorkomen van milieu- en gezondheidsschade, klimaatadaptie en netverzwaringen), mogelijke prijsstijgingen van aardgas en CO₂-emissierechten en mogelijke financiële-, economische maatregelen, zoals verlaging of vrijstelling van de energiebelasting op duurzame energie of subsidies. Ondanks het feit dat berekeningen nu aantonen dat het merendeel van de opslagtechnieken ook in 2050 financieel niet haalbaar zijn, mag Nederland deze methoden, mede door het technische toepassingspotentieel (nu) nog niet uitsluiten. De belangrijkste uitdagingen zijn dus niet zozeer technologisch van aard, maar hebben vooral betrekking op de financiële aspecten en het aantal opslageenheden en de daarvoor benodigde ruimte. Zo is er in Nederland volstrekt onvoldoende ruimte om de gehele opslagbehoefte in te vullen met pompcentrales (PHS) of persluchttopslag (CAES).

Power to Gas meest kansrijke optie

Voor de Nederlandse situatie is Power to Gas de meest kansrijke optie voor opslag van energie. In welke vorm of combinaties is echter nog onzeker, als waterstofvariant (Power to Hydrogen), methaanvariant (Power to Methane) of ammoniakvariant (Power to Ammonia). De producten uit deze processen kunnen op verschillende manieren worden gebruikt. Als grondstof voor andere producten, als brandstof voor transportdoeleinden, als brandstof voor de productie van elektriciteit en voor de varianten waterstof en methaan als (gedeeltelijke) vervangers van aardgas. Doordat evenals bij pompcentrales (PHS) of persluchttopslag (CAES), ook bij de Power to Gas varianten er enorm veel opslagcapaciteit benodigd is, is het bijmengen in het aardgasnet of opslaan in de bestaande gasopslagfaciliteiten een interessante optie. De bestaande omvangrijke Nederlandse gasinfrastructuur en opslagmogelijkheden bieden daarvoor grote mogelijkheden.

Rol van Power to Gas bij energietransitie

De energietransitie betreft de verduurzaming van de gehele energievoorziening en het afbouwen van het aardgasverbruik is een absolute voorwaarde daarvoor. Mede omdat veel duurzame energie opgewekt wordt in de vorm van elektriciteit en er een verdergaande elektrificering van technieken plaatsvindt. Uiteraard is het verduurzamen van het aardgasverbruik, door bijmenging of vervanging niet het doel.

De overschotten aan duurzaam opgewekte elektriciteit dienen daarom (in gasvorm) opgeslagen te worden om deze later weer te kunnen gebruiken in de vorm van elektriciteit.

Succesbepalende factor, rol van de overheid?

Grootschalige seizoensopslag zal op z'n vroegst in 2030 noodzakelijk zal zijn, dat betekent dat er nog ruim 14 jaar onderzoek en innovatie kan plaatsvinden. Dat lijkt lang maar de opgave mag zeker niet worden onderschat. Een centrale rol voor de overheid zou daar zeker goed in passen, niet alleen om de energietransitie en de rol van energieopslag daarin te faciliteren, maar ook om dit Europees af te stemmen en te onderzoeken. Op deze wijze (be)houdt de overheid ook de regie in handen om de gestelde doelstellingen te behalen en de noodzakelijke verduurzaming plaats te laten vinden. Het is noodzakelijk om de huidige pilotprojecten te evalueren, daar waar mogelijk op te schalen en nieuwe projecten te initiëren en te faciliteren.

Opslag van energie is een voorwaarde om duurzame energie te integreren en daarmee de voorzieningszekerheid te borgen en te voorkomen dat er onnodige kosten gemaakt worden voor een overcapaciteit aan duurzaam opwekvermogen om in alle situaties, ook bij piekbelastingen, aan de vraag te kunnen voldoen. Bovendien kan opslag van energie helpen om in onze energievoorziening onafhankelijker te worden van politiek onstabiele regio's die ons nu fossiele brandstoffen leveren. Power to Gas komt als voornaamste grootschalige energieopslagstechniek in aanmerking voor een faciliterende rol in de Nederlandse energietransitie. Dat daarbij radicale innovaties nodig zijn om hernieuwbare energie en de opslag daarvan zo efficiënt te maken, zodanig dat fossiele energie niet meer interessant is, is evident. Of zoals Bill Gates onlangs zei: "We need an Energy-miracle" (Bennet, 2015). Ook minister Kamp is daar duidelijk in en wil alle opties openhouden, zelfs die van kernenergie en schaliegas (Ministerie van Economische Zaken, 2016).

8. Aanbevelingen en suggesties voor verder onderzoek

Door het ontbreken van financiële en technische kentallen van de energieopslagtechniek Power to Ammonia is het niet mogelijk deze techniek te classificeren in termen van haalbaarheid en toepasbaarheid. Het is aan te bevelen deze techniek nader te blijven onderzoeken en daarvoor ook pilotprojecten op te zetten. TU Delft en Nuon zijn daar momenteel mee bezig, het is op dit moment nog niet duidelijk wanneer de eerste uitkomsten daarvan mogen worden verwacht.

Een tweede belangrijke aanbeveling is modellen te ontwikkelen die een reële inschatting kunnen maken van de overschotten en tekorten die in de toekomst kunnen ontstaan en welke perioden dit betreft. Dit zou kunnen op basis van voorspellingen van de toekomstige vraag en aanbod. Het toekomstige aanbod kan door extrapolatie van de huidige (duurzame) opwekkingsprofielen en bijvoorbeeld het aantal zonne-uren en winduren op jaarbasis worden voorspeld. Op basis van deze modellen kan inzichtelijk gemaakt worden welke overschotten en tekorten er wanneer ontstaan en welke werkelijke behoefte aan opslag en opslagduur er is.

Wat verder duidelijk wordt in dit rapport is dat Nederland voor het verduurzamen van haar gehele energievoorziening over haar grenzen heen moet kijken. Het advies is het energiesysteem in Europees verband te bekijken en te onderzoeken. Daarbij zou het raadzaam zijn een geografische keuze te maken voor duurzame opwektechnieken die op de betreffende locatie het beste energetische rendement opleveren. Hiermee kan een stabiele en evenwichtige opwekking gerealiseerd worden, een opwekking die slechts minimaal afhankelijk is van meteorologische omstandigheden. Dit vereist echter een degelijk Europees transportnetwerk en wellicht zelfs een netwerk dat Europa's grenzen overschrijdt. Europees gezien zal er dan door een optimale afstemming en samenwerking minder grootschalige opslag van energie noodzakelijk zijn. Hoe de kosten, de baten en de potentie van een Europese energievoorziening zich verhouden is nu nog teveel onderbelicht en vergt nader (Europees) onderzoek.

Epiloog

Op deze plaats wil ik graag een korte visie op de toekomst geven. Ik ben ervan overtuigd dat na een trage start, zeker nu de noodzaak tot verduurzaming steeds duidelijker wordt, Nederland een versnelde energietransitie gaat doormaken. Enerzijds omdat dit beleidsmatig zal worden afgedwongen, maar anderzijds ook omdat maatschappelijk gezien een ommekeer gaande is en het verduurzamingsvraagstuk steeds hoger op de agenda's komt van instituten, organisaties maar ook zeker van de burgers.

De opgave waarvoor we staan ten aanzien van een duurzame energievoorziening, is aanzienlijk, zowel technisch als financieel. Maatschappelijk gezien is er veel verzet tegen kernenergie, windmolens, ondergrondse opslag van CO₂, kolencentrales en schaliegas. Het uitsluiten of beperken van bovenstaande opties kan betekenen dat de klimaatdoelstellingen alleen te realiseren zijn met enorme energiebesparingen, die onze economische activiteiten behoorlijk aan kunnen tasten. Het is daarbij de vraag of Nederland (de Nederlandse bevolking) een dusdanig offer wil brengen. Door dit onderzoek wil EFM een bijdrage leveren aan een bewustwordingsproces. Een proces waaruit duidelijk blijkt dat de opgave waarvoor we staan niet mag worden onderschat, alle opties op een juiste manier overwogen moeten worden en waaruit blijkt dat de keuzes nu beperkt zijn.

Nederland zal haar doelstellingen met betrekking tot verduurzaming wettelijk moeten vastleggen. Dit biedt een toekomstperspectief voor de lange termijn. Tevens zal het beleid geborgd en afgestemd moeten worden op de wettelijk vastgelegde doelstellingen, waardoor het investeren in duurzaamheid meer zekerheden biedt op de lange termijn. Nederland zou er goed aan doen om een ministerie van Klimaat en Energie op te richten, die belangen behartigt, faciliteert, mogelijk maakt en de doelstellingen bewaakt. Nederland zal zich in moeten zetten voor een goed werkend ETS-systeem waarbij gericht moet worden op een prijs van € 1.000 per ton CO₂-emissierechten in 2050 (WLO-studie van CPB en PBL, twee graden doel) en alle broeikasgassen in CO₂-equivalenten daarin onder te brengen. Alleen zo kan een levelling playing field ontstaan waarbij de verschillende opwekmethoden op een eerlijke manier met elkaar kunnen worden vergeleken. Dat zal niet alleen de transitie versnellen, maar is een absolute voorwaarde om de doelstellingen te behalen.

Energiebeleid zal Europees moeten worden afgestemd, waardoor vraag en aanbod op grotere schaal op elkaar kunnen worden afgestemd. Een uitgebreid Europees transportnetwerk en een Europese elektriciteitsmarkt zijn daarvoor een voorwaarde. De hoeveelheid benodigde opslagcapaciteit kan daardoor worden beperkt, zeker als ingezet wordt op productie op de meest gunstige locaties.

De gebouwde omgeving zal, in all-electric vorm, langzamerhand energieneutraal worden of zelfs energie opwekken, waarbij lokale initiatieven en kleinschalige opslag een grote rol gaan spelen. Investeren in grootschalige warmtenetten zal een grote fout blijken te zijn. Ten eerste omdat het thermisch opwekvermogen steeds kleiner wordt (dus minder warmte van elektriciteitscentrales), afvalverbranding in de toekomst niet meer nodig is (bij een circulaire economie) en restwarmte van processen op de plaats van productie weer zal worden hergebruikt. Een gecentraliseerde energievoorziening zal noodzakelijk blijven, als back-up maar ook voor energie-intensieve processen. De Nederlandse energievoorziening zal in 2050 grotendeels verduurzaamd zijn. Daarin zal ook geïmporteerde duurzame energie een rol spelen. Het Nederlandse geproduceerd aandeel duurzame energie, voornamelijk bestaande uit windenergie en gedeeltelijk uit getijden- en zonne-energie, zal deel uitmaken van een duurzame Europese energievoorziening. Opslag van energie is ook in deze situatie noodzakelijk en zal in Nederland worden vormgegeven door Power to Gas. In eerste instantie door bijmenging van waterstof in het aardgastransportnetwerk, met een maximum van bijvoorbeeld 10%. Het resterende deel van de energie dat opgeslagen moet worden zal dan met Power to Methane worden ingevuld. De bestaande gasgestookte elektriciteitscentrales zullen als back-up fungeren welke, naarmate het aandeel synthetische gasen toeneemt, steeds meer opereren zonder netto extra CO₂-uitstoot door de toepassing van CCS en hergebruik van CO₂ in met methaniseringsproces. Vervolgens zal er, zodra het gehele aardgasverbruik is afgebouwd en elektriciteit alleen nog maar duurzaam opgewekt of geïmporteerd wordt, er een volgende transitie op gang komen naar een waterstofeconomie. De Power to Hydrogen installaties kunnen daarin een rol vervullen en met een kleine aanpassing ook de Power to Methane installaties. De Nederlandse industrie en havenfaciliteiten kunnen Europees gezien daarin als producent, importeur en exporteur van waterstof, een belangrijke rol vervullen.

Bibliografie

- Agora Energiewende (1). (2015, oktober 23). *Agorameter*. Opgeroepen op oktober 23, 2015, van Agora Energiewende: <http://www.agora-energiewende.de/de/themen/-agothem-/Produkt/produkt/76/Agorameter/>
- Agora Energiewende (2). (2013). *12 Insights on Germany's Energiewende*. Berlin (Deutschland): Agora Energiewende.
- Audi. (2013, oktober). *Energietransitie in de tank*. Opgeroepen op maart 30, 2015, van Audi Voorsprong door Techniek: http://www.audi.nl/nl/web/nl/voorsprong_door_techniek/content/2013/10/energietransitie-in-de-tank.html
- Bartels, J. (2008). *A feasibility study of implementing an Ammonia Economy*. Ames Iowa: Iowa State University.
- BDEW. (2015, maart 6). *Erneuerbare Energien erzeugen mehr Strom*. Opgeroepen op april 20, 2015, van BDEW Energie Wasser Leben: <https://www.bdew.de/internet.nsf/id/20150306-pi-erneuerbare-energien-erzeugen-mehr-strom-de?open&ccm=900010020010>
- Bennet, J. (2015, november). 'We Need an Energy Miracle'. *The Atlantic*.
- Biesta, D. (2015). Is er toekomst voor CO2 opslag in EU? *Nederlands Energie Congres*. Utrecht.
- BioBased Economy. (2015, februari 26). *Bioraffinage*. Opgeroepen op maart 23, 2015, van BioBased Economy: http://www.biobasedeconomy.nl/wat-is-biobased-economy/themas/bioraffinage_v2/
- Budischak, C., Sewell, A. d., Thomson, H., Mach, L., Veron, D., & Kempton, W. (2013). *Cost-minimized combinations of wind power, solar power and electrochemical storage, powering the grid up to 99.9% of the time*. Newark USA: Journal of Power Sources.
- CBS (1). (2015, april 23). *Elektriciteit en warmte; productie en inzet naar energiedrager*. Opgeroepen op mei 5, 2015, van Centraal Bureau voor de Statistiek: <http://statline.cbs.nl/StatWeb/publication/default.aspx?DM=SLNL&PA=80030NED&D1=3&D2=0&D3=a&D4%20=a&HDR=T%2cG1&STB=G2%2cG3&VW=T>
- CBS (2). (2016, maart 15). *Windenergie; elektriciteitsproductie, capaciteit en windaanbod per maand*. Opgeroepen op april 3, 2016, van Centraal Bureau voor de Statistiek: <http://statline.cbs.nl/Statweb/publication/?DM=SLNL&PA=70802ned&D1=0,3&D2=a&D3=152,169,186,203-206,208-210,212-214,216-218,220-238&VW=T>
- Compendium voor de Leefomgeving (1). (2014, oktober). *Stroomdiagram energie voor Nederland, 2013*. Opgeroepen op mei 5, 2015, van Compendium voor de Leefomgeving: <http://www.compendiumvoordeleefomgeving.nl/indicatoren/nl0201-Energiebalans-Nederland-%28stroomdiagram%29.html?i=6-40>

- Compendium voor de Leefomgeving (2). (2015, oktober 19). *Energieverbruik door verkeer en vervoer, 1990-2014*. Opgeroepen op april 5, 2016, van Compendium voor de Leefomgeving: <http://www.compendiumvoordeleefomgeving.nl/indicatoren/nl0030-Energieverbruik-door-verkeer-en-vervoer.html?i=6-40>
- Dekker, N., & Rietveld, B. (2005). *Highly efficient conversion of ammonia in electricity by Solid Oxide Fuel Cells*. Petten: ECN.
- Derksen, H. (2014, september 5). Lector biobased economy Hogeschool Van Hall Larenstein. (R. Leemburg, Interviewer)
- DNV GL Energy - KEMA. (2015). *Routekaart Energieopslag 2030*. Arnhem: DNV GL Energy - KEMA.
- DNV-GL. (2015). *Demonstratieproject Power-to-Gas in Rozenburg*. Groningen: DNV-GL.
- EBN. (2015, april 1). *Gasopslag Bergermeer officieel geopend*. Opgeroepen op maart 16, 2016, van EBN: <https://www.ebn.nl/gasopslag-bergermeer-officieel-geopend/>
- ECN (1). (2014). *Nationale Energieverkenning 2014*. Petten: ECN.
- ECN (2). (2015). *Nationale Energieverkenning 2015*. Petten: ECN.
- Energiepark Mainz. (sd). Opgeroepen op april 17, 2016, van Energiepark Mainz: <http://www.energiepark-mainz.de/>
- Energy Valley. (2014, april 10). *Eerste grootschalige Power-to-Gas installatie in Delfzijl*. Opgeroepen op mei 5, 2015, van Energy Valley: <http://www.energyvalley.nl/nieuws/eerste-grootschalige-power-to-gas-installatie-in-delfzijl>
- Ensoc. (2015, maart 24). *Ensoc*. Opgeroepen op maart 30, 2015, van Stroomopslag is verkeerde afslag: <https://www.ensoc.nl/nieuws/stroomopslag-is-verkeerde-afslag>
- ensoe Transparency Platform. (2016, april 6). *Total Load - Day Ahead / Actual*. Opgeroepen op april 6, 2016, van ensoe Transparency Platform: https://transparency.entsoe.eu/load-domain/r2/totalLoadR2/show?name=&defaultValue=false&viewType=GRAPH&areaType=BZN&atch=false&dateTime.dateTime=28.02.2016+00:00|CET|DAY&biddingZone.values=CTY|10YNL-----L|BZN|10YNL-----L&dateTime.timezone=CET_CE
- Gasunie. (2014). *Rapportage Voorzieningszekerheid Gas 2014*. Groningen: Gasunie Transport Services.
- Geijp, J. (2015, november 19). *Sluit niets uit, ook kernenergie niet*. Opgeroepen op februari 22, 2016, van Dagblad van het Noorden: <http://www.dvhn.nl/plus/Sluit-niets-uit-ook-kernenergie-niet-21075825.html>
- Greenpeace. (2013). *energy [r]evolution*. Amsterdam: Greenpeace.

- Het Nieuwsblad. (2013, januari 18). *Wereld zal jaloers zijn op Belgisch energie-eiland*. Opgeroepen op maart 16, 2016, van Nieuwsblad.be: http://www.nieuwsblad.be/cnt/dmf20130117_00437185
- Hoofd, E. van der. (2015, september 25). Msc. (R. Leemburg, Interviewer)
- ICE Endex. (2016, april 13). *Ice Data Futures Report (Beveiligd met wachtwoord)*. Opgeroepen op april 13, 2016, van ICE Data: <http://data.theice.com/ViewData/EndOfDay/FuturesReport.aspx>
- Jansen, P. (2015). *Kansen voor Power-to-Gas*. Apeldoorn: Sparkling Projects.
- Jepma, C. (2015, juli 15). prof. dr. mr. (R. Leemburg, Interviewer)
- Joode, J. (2014). *De rol van power-to-gas in het toekomstige Nederlandse energiesysteem*. Petten: ECN.
- Kamp, H. (2015, juli 13). *30 196 Duurzame ontwikkeling en beleid*. Opgeroepen op oktober 1, 2015, van Overheid.nl: <https://zoek.officielebekendmakingen.nl/dossier/30196/kst-30196-355?resultIndex=1&sorttype=1&sortorder=4>
- KNAW. (2015). *Visiedocument biobrandstof en hout als energiebronnen, effect op uitstoot van broeikasgassen*. Amsterdam: KNAW.
- Ministerie van Economische Zaken. (2016). *Energierapport Transitie naar Duurzaam*. Den Haag: Ministerie van Economische Zaken.
- Ministerie van Infrastructuur en Milieu. (2015, december 12). Opgeroepen op december 16, 2015, van Rijksoverheid: <https://www.rijksoverheid.nl/actueel/nieuws/2015/12/12/nederland-stemt-in-met-historisch-klimaatakkoord>
- Molen, A. van der. (2015, oktober 22). Ir. ing. (R. Leemburg, Interviewer)
- Mulder, F. (2014). *Implications of diurnal and seasonal variations in renewable energy generation for large scale energy storage*. Delft: Journal of Renewable and Sustainable Energy.
- Mulder, F.; Postma, H.; Klop, E.; Visser, H.J.;. (2015). *Naar een hoog aandeel van duurzame energie*. Amsterdam: NL Ingenieurs.
- Nationaal Kritisch Platform Windenergie. (2015, mei 13). *Energiestromen in Nederland*. Opgeroepen op 12 23, 2015, van Nationaal Kritisch Platform Windenergie: <http://www.nkpw.nl/index.php/energiestromen-in-nederland>
- Nuon. (2016, maart 25). *Nuon en TU Delft onderzoeken opslag windenergie in nieuwe superbatterij*. Opgeroepen op april 22, 2016, van Nuon: <https://www.nuon.com/nieuws/nieuws/2016/nuon-en-tu-delft-onderzoeken-opslag-windenergie-in-nieuwe-superbatterij/>
- Olino. (2012, december 29). *Zonnebrandstof, een sprookje of perspectief?* Opgeroepen op april 16, 2016, van Olino Duurzame Energie: <http://www.olino.org/articles/2012/12/29/zonnebrandstof-een-sprookje-of-perspectief/>

- Pierie, F., & Someren, van, C. (2015). *Energieopslaglabel Een methode voor het vergelijken van het volledige spectrum van opslagsystemen*. Den Haag: Netbeheer Nederland.
- PWC. (2016, maart 29). *Oplossing energietrilemma vraagt om Europese samenwerking*. Opgeroepen op april 9, 2016, van PWC: <https://actueel.pwc.nl/diensten-en-sectoren/energie-en-utilities/oplossing-energietrilemma-vraagt-om-europese-samenwerking/>
- Raad voor de leefomgeving en infrastructuur. (2015). *Rijk zonder CO2: naar een duurzame energievoorziening in 2050*. Den Haag: Raad voor de leefomgeving en infrastructuur.
- Rieke, S. (2013). Erste Industrielle Power to Gas Anlage mit 6 Megawatt. *Erdgas in der Energiewende*, 660 - 664.
- Royal Haskoning DHV. (2014). *Technische, ruimtelijke en organisatorische aspecten van het elektriciteitsnet voor de verbinding van windparken op zee op het landelijke hoogspanningsnet*. Rotterdam: Ministerie van Economische Zaken.
- SBC Energy Institute. (2014). *Leading the Energy Transition FactBook Hydrogen-based Energy Conversion*. Parijs: SBC Energy Institute.
- SER. (2013). *Energieakkoord voor duurzame groei*. Den Haag: SER.
- Staatscourant. (2014, juli 11). *Regeling van de Minister van Economische Zaken van 11 juli 2014, nr. WJZ/13196684, tot vaststelling van regels voor de gaskwaliteit (Regeling gaskwaliteit)*. Opgeroepen op april 12, 2016, van Overheid.nl: <https://zoek.officielebekendmakingen.nl/stcrt-2014-20452.html>
- Stedin. (2014, oktober 3). *Power-to-Gas officieel geopend: elektriciteit wordt aardgas in Rozenburg*. Opgeroepen op mei 23, 2015, van Stedin: <https://www.stedin.net/over-stedin/pers-en-media/persberichten/powertogas-officieel-geopend-elektriciteit-wordt-aardgas-in-rozenburg>
- Sternier, M., Thema, M., Eckert, F., Lenck, T., & Götz, P. (2015). *Bedeutung und Notwendigkeit von Windgas für die Energiewende in Deutschland*. Regensburg: Forschungsstelle Energienetze und Energiespeicher.
- TenneT TSO B.V. (1). (2016, januari 1). *Opgesteld productievermogen*. Opgeroepen op januari 27, 2016, van TenneT taking power further: <http://energieinfo.tennet.org/Production/InstalledCapacity.aspx>
- TenneT TSO B.V. (2). (2014). *Rapport Monitoring Leveringszekerheid 2013 - 2029*. Arnhem: TenneT TSO B.V.
- TenneT TSO B.V. (3). (2015, maart 13). *TenneT investeert in leveringszekerheid en energietransitie*. Opgeroepen op april 6, 2016, van TenneT Taking power further: <http://www.tennet.eu/nl/nl/nieuws/article/tennet-investeert-in-leveringszekerheid-en-energietransitie.html>
- TKI Gas. (2014, januari 11). *HyPlasma Hydrogen production through plasma conversion of carbon*. Opgeroepen op april 15, 2016, van TKI Gas: <http://www.tki-gas.nl/projecten/teg0413006>

TNO innovation for life. (2013). *Naar een toekomstbestendig energiesysteem voor Nederland, flexibiliteit met waarde*. Delft: TNO, UU en ECN.

TU Delft. (2016, januari 20). *Aardgasconversie*. Opgeroepen op april 19, 2016, van TU Delft eduweb: <http://eduweb.eeni.tbm.tudelft.nl/TB141E/?aardgas-conversie>

Ummels, B. (2009). *Wind Intergration*. Delft: Technische Universiteit Delft.

Urgenda. (2014). *Nederland 100% duurzame energie in 2030, het kan als je het wilt!* Amsterdam: Urgenda.

VROM. (2005). *Ammoniak: opslag en verlading (publicatiereeks gevaarlijke stoffen 12)*. Den Haag: VROM.

Wij stoppen steenkool. (2015). *Kolencentrales in Nederland*. Opgeroepen op september 29, 2015, van Wij stoppen steenkool: http://www.wijstoppensteenkool.nl/?page_id=4711

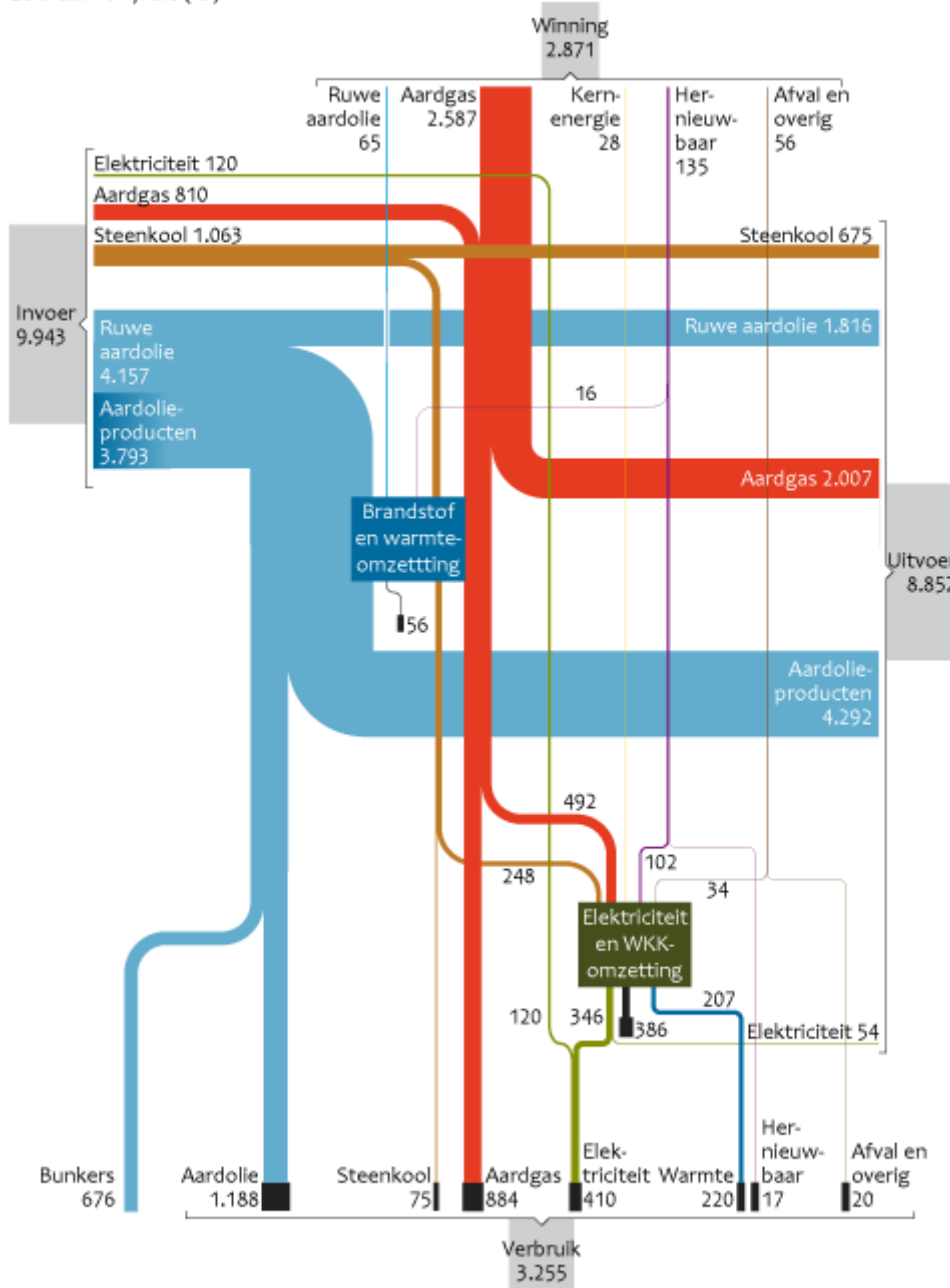
Wolters, T. (2014, december 5). *Opslag duurzame energie blijkt onbetaalbare mythe*. Opgeroepen op december 22, 2015, van Climategate.nl: <http://climategate.nl/2014/12/05/opslag-duurzame-energie-blijk-onbetaalbare-mythe/>

Bijlagen

Bijlage I Energiestromen in Nederland 2013

Energiestromen, 2013**

Eenheid: 10⁹ joule (PJ)



N.B. De som van de zwarte blokjes is het totale energieverbruik (finaal verbruik en saldi omzetting). In deze figuur zijn verschillende details verwaarloosd.

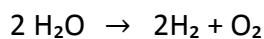
Bron: CBS.

CBS/okt14
www.clo.nl/nl02019

Bijlage II Power to Gas technieken

Power to Hydrogen

Waterstof kan dienen als CO₂-vrije brandstof voor elektrisch aangedreven brandstofcelvoertuigen, invoeding (bijmenging) op het aardgasnet, als grondstof of om direct elektriciteit mee op te wekken in een brandstofcel, gasmotor of gasturbine. Met (overschotten aan duurzaam opgewekte) elektriciteit kan waterstof, door elektrolyse, geproduceerd worden uit water. De reactievergelijking hiervan is:



Elektrolyse is een reeds lang bestaande (1832) en beproefde techniek. Er zijn verschillende manieren om waterstof te genereren door middel van elektrolyse, enkele technieken zijn:

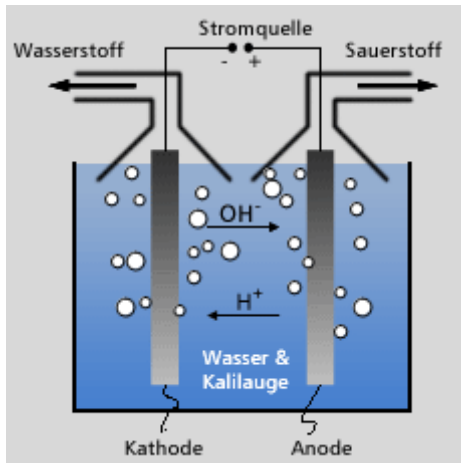
- Alkaline electrolyzers;
- Proton Exchange Membrane (PEM) electrolyzers en
- Solid Oxide Electrolyser Cell (SOEC).

PEM en SOEC electrolyzers zijn qua cel opbouw eenvoudig en compact en zijn gebouwd om een vast membraan zonder bewegende delen. Alkaline electrolyzers zijn goedkoper, maar zijn groter en maken gebruik van een elektrolyt met een complexe circulatie. Onderzoek bij Alkaline electrolyzers is voornamelijk gericht op het verbeteren van de elektrochemische prestaties. Verbeteringen aan PEM electrolyzers betreffen vooral de vermindering van de productiekosten. SOEC electrolyzers verkeren nog in een laboratoriumfase (SBC Energy Institute, 2014).

Alkaline electrolyzers

Alkaline elektrolyse is de meest eenvoudigste manier om waterstof te produceren. Dit type electrolyser is het meest marktvolwassen, de techniek wordt al meer dan 100 jaar gebruikt en is op dit moment het goedkoopste type electrolyser. Deze electrolyzers werken volgens het basisprincipe van elektrolyse, zoals weergegeven in figuur 14.

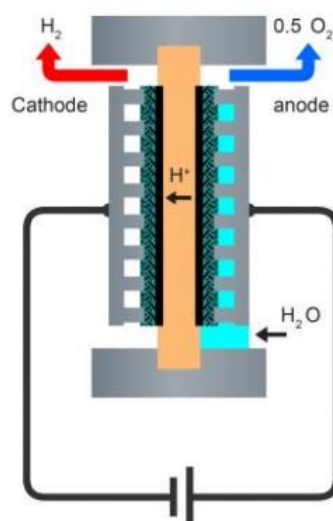
Door de lage stroomdichtheid zijn de electrolyzers groot van formaat en mede door toepassing van corrosief elektrolyt is de onderhoudsfrequentie hoog. Deze electrolyzers zijn toepasbaar vanaf 250 kW en verkrijgbaar tot een vermogen van 3 MW. Doordat deze techniek al vrij oud is, is de verwachting dat de efficiëntie niet meer veel zal verbeteren. Bovendien is, door de lage stroomdichtheid van dit type electrolyzers, de verwachting dat de kosten niet meer veel af zullen nemen (SBC Energy Institute, 2014).



Figuur 14 Principeschema elektrolyse (Bron: Bosy online)

PEM electrolyzers

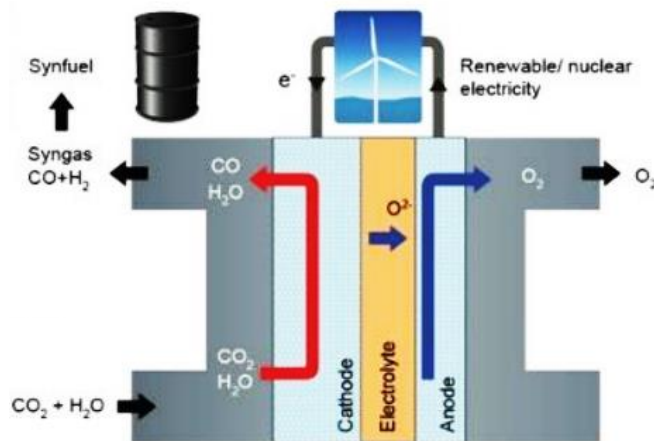
Dit type electrolyzers heeft een redelijk eenvoudig ontwerp, zie figuur 15. Door de hogere stroomdichtheden kunnen deze electrolyzers veel compacter worden gebouwd dan de Alkaline electrolyzers. De levensduur van PEM electrolyzers is echter (nog) wel aanzienlijk korter dan van de Alkaline electrolyzers. De fabricagekosten zijn vrij hoog door het gebruik van kostbare metalen, waaronder platina. Wel worden er hoge kostenreducties verwacht bij massaproductie (SBC Energy Institute, 2014).



Figuur 15 Principeschema PEM electrolyser (SBC Energy Institute, 2014)

Solid Oxide Electrolyser Cell

De Solid Oxide Electrolyser Cell (SOEC) verkeert nog in het onderzoekstadium. Het is een veelbelovende techniek, echter door de korte levensduur is het nog niet voor commerciële doeleinden geschikt. Deze electrolyzers zijn goedkoop te produceren en hebben door de hoge bedrijfstemperatuur (700-900°C) hoge rendementen. Theoretisch zou een rendement van 100% mogelijk zijn. Er zijn geen kostbare of zeldzame materialen benodigd (SBC Energy Institute, 2014). In figuur 16 is het prinsipeschema van SOEC weergegeven.



Figuur 16 Prinsipeschema SOEC electrolyser (SBC Energy Institute, 2014)

SOEC heeft daarnaast nog de mogelijkheid van co-elektrolyse van water en CO₂, waarmee in één processtap synthetisch methaan kan worden gemaakt (SBC Energy Institute, 2014).

SBC Energy Institute heeft een overzicht gemaakt van de elektrolyse technieken met bijhorende kengetallen, in tabel 16 is een samenvatting van de resultaten weergegeven.

Tabel 16 Kentallen electrolyzers (SBC Energy Institute, 2014)

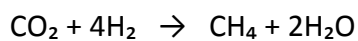
	Alkaline	PEM	SOEC
Maximum vermogen (kW)	3000	1000	10
Temperaturen (°C)	70-90	60-80	700-900
Status	Commercieel	Pre-commercieel	R&D
Levensduur (jaren)	10-20	5	1
Rendement	68-77%	62-77%	89%
Jaarlijkse rendementafname	2-4%	2-4%	17%
Investering per kW	€ 850	€ 1000 - € 2000	€ 200

DIFFER (Dutch Institute for Fundamental Energy Research) doet onderzoek naar nieuwe manieren voor het splitsen van water (en CO₂), in dit geval door middel van plasmolyse. Plasmolyse beperkt het ruimtegebruik door de hoge energiedichtheid, is snel en snel te schakelen en maakt geen gebruik van schaarse materialen. DIFFER verwacht gelijkwaardige energetische rendementen te kunnen halen als bij elektrolyse en met hetzelfde apparaat ook direct synthetisch methaan te kunnen produceren (TKI Gas, 2014).

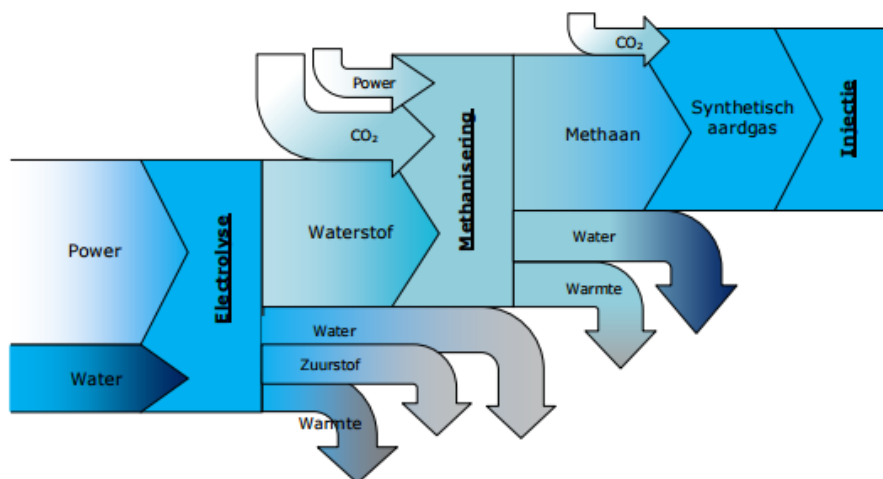
Power to Methane

Een volgende mogelijke stap in het proces is waterstof te laten reageren met CO₂, daarbij wordt (synthetisch) methaan gevormd. Dat kan (onbeperkt) ingevoerd worden in het aardgasnet, kan worden gebruikt als brandstof in gasmotoren of -turbines voor elektriciteitsproductie en kan ook in vloeibare (LNG) of samengeperste (CNG) vorm dienen als schone brandstof voor de transportsector. Methaan kan ook worden gebruikt als grondstof voor bepaalde kunststoffen.

Methanisering is het proces waarin waterstof (H₂) en koolstofdioxide (CO₂) met elkaar reageren om synthetisch methaan (CH₄) te vormen, wat gelijk is aan het hoofdbestanddeel van (Nederlands) aardgas. Kort samengevat wordt CO₂, dat vrijkomt bij verbranding van bijvoorbeeld (aard)gas, afgevangen en opgeslagen. Daarna reageert het CO₂ met geproduceerde waterstof volgens onderstaande reactievergelijking (dat bekend staat als het Sabatier proces).



Door gebruik te maken van afgevangen of uit de atmosfeer gehaalde CO₂, kan een brandstof met een gesloten CO₂-kringloop worden geproduceerd. Het theoretische maximale energetisch rendement van de methaniseringstap is bepaald op 81,5% (DNV-GL, 2015). In figuur 17 zijn de processtappen van methanisering in een prinscipeschema weergegeven.



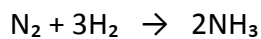
Figuur 17 Prinscipeschema Power to Gas met methaniseringstap (DNV-GL, 2015)

Bij invoeding op het aardgasnet wordt nog extra CO₂ toegevoegd om het synthetische gas net zo “slecht” te maken als Nederlands aardgas (van der Molen, 2015). Methaan heeft een hogere energiedichtheid dan waterstof en is gemakkelijker op te slaan en te transporteren dan waterstof, mede ook door de bestaande gasinfrastructuur in Nederland.

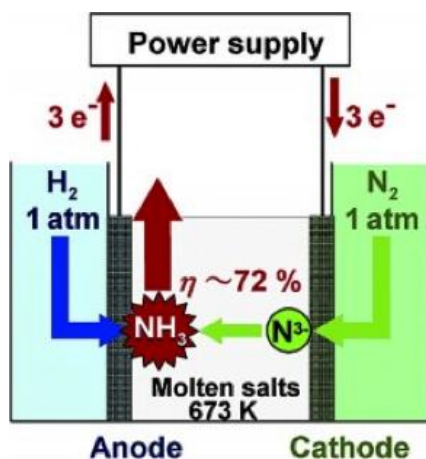
Power to Ammonia

Een derde mogelijke variant op het principe Power to Gas is om ammoniak te produceren met behulp van waterstof en stikstof.

Ammoniak kan dienen als brandstof en eenvoudiger opgeslagen worden dan waterstof. Bij de verbranding van ammoniak komt geen CO₂ vrij, alleen water en stikstof en in sommige situaties ook NO_x (Dekker & Rietveld, 2005). Ammoniak kan (onder druk of bij een lage temperatuur) als vloeistof worden opgeslagen. Het nadeel van ammoniak is dat het een gevaarlijke stof is. Ammoniak kan naast brandstof tevens dienen als grondstof voor andere producten, waaronder kunstmest. Ammoniak kan worden gemaakt door waterstof onder hoge druk en bij een hoge temperatuur te laten reageren met stikstof (uit de lucht), volgens onderstaande reactievergelijking, zie figuur 18.



Het energetische rendement van de omzetting van waterstof naar ammoniak ligt tussen de 73,4 en 81,8% (Bartels, 2008). Een bijkomend voordeel van ammoniak ten opzichte van waterstof is dat ammoniak een hogere energiedichtheid heeft dan waterstof.



Figuur 18 Principeschema Power to Ammonia (Olino, 2012)

Bijlage III Succesvolle initiatieven

De Nederlandse netbeheerder Stedin heeft in 2014 een succesvol pilotproject opgezet, waarbij duurzaam opgewekte elektriciteit wordt omgezet in synthetisch gas dat gebruikt wordt voor de verwarmingsinstallatie van een appartementencomplex in Rozenburg. Stedin deed op Ameland eerder een succesvol onderzoek met het produceren van groene waterstof om het vervolgens in te voeden op het reguliere aardgasnet van een appartementencomplex. In Rozenburg wordt door methanisering, een volledig CO₂-neutraal proces, gas van aardgaskwaliteit geproduceerd (Stedin, 2014). De installatie is geplaatst in de directe nabijheid van het appartementencomplex, zie figuur 19.



Figuur 19 Power to Gas installatie in Rozenburg in de directe nabijheid van een appartementencomplex (DNV-GL, 2015)

De 2 productiestappen, elektrolyse en methanisering, vinden ieder plaats in een eigen container, zie figuur 20.



Figuur 20 Containers voor de Power to Gas installatie in Rozenburg (eigen opname)

De installatie heeft een productiecapaciteit van $0,25 \text{ m}^3$ per uur, ongeveer 2.000 m^3 per jaar. De eerste stap, elektrolyse van water, vindt plaats in een PEM-electrolyser. Stedin heeft voor een PEM-electrolyser gekozen vanwege de relatief lage prijs, de lage bedrijfstemperatuur, de hoge energiedichtheid en de snelle responstijd. De electrolyser heeft geen hoog rendement, het is een verouderd type dat eerder in Ameland is gebruikt. Doel van het project is niet om een maximaal rendement aan te tonen, maar om aan te tonen dat de techniek ook in de praktijk werkt. Het methaniseringsproces vindt plaats in vier in serie geschakelde reactorvaten, waarbij het methaanpercentage in stappen oploopt tot bijna 100%, zie figuur 21.



Figuur 21 Methaniseringsproces in vier in serie geschakelde reactorvaten (eigen opname)

Het geproduceerde gas is calorisch hoogwaardiger dan het Nederlandse aardgas. Een reden om er voor bijmenging zelfs nog CO₂ aan toe te voegen om het gas wat “slechter” te maken. De experimenten van Stedin zijn niet bedoeld als verdienmodel, maar juist om van te leren. Stedin als netbeheerder wil voorbereid zijn op toekomstige vragen uit de markt van commerciële partijen (dat is Stedin zelf niet) die het op deze manier door hen geproduceerde gas wellicht in het gasnet van Stedin willen injecteren.

Die commerciële partijen zijn er nu nog niet omdat de techniek nog te duur is. Dat blijkt onder andere uit het door ECN gepubliceerde rapport “De rol van power-to-gas in het toekomstige Nederlandse energiesysteem” (Joode, 2014). Aan het energetische rendement ligt dat niet, dat is al redelijk hoog. In 2006 was het rendement van elektrolyse 50%, tegenwoordig is dat al 75%. Gemiddeld ligt het energetische rendement van de methaniseringsstap al op 70% (van der Molen, 2015). Vooral de apparatuur moet goedkoper worden, daarnaast zou het totaalbeeld er heel anders uitzien als aardgas en de CO₂-emissierechten duurder zouden worden (van der Molen, 2015)

Ook het automerk Audi heeft een succesvolle toepassing van Power to Gas geïntroduceerd. In Werlte (Duitsland) produceert Audi vanaf eind juni 2013 synthetisch methaan met gebruikmaking van wind- en zonne-energie plus CO₂ uit een naastgelegen biogasinstallatie, zie figuur 22. Het duurzame gas wordt ingevoerd in het aardgasnet en draagt zo bij aan de verduurzaming van de energieproductie (Audi, 2013).

Deze installatie heeft een elektrisch vermogen van 6 MW (drie electrolyzers van 2 MW) en produceert daarmee jaarlijks 3 miljoen m³ synthetisch methaan (Rieke, 2013).



Figuur 22 Power to Gas netwerk (Audi, 2013)

In Mainz (Duitsland) is sinds juli 2015 een Power to Gas installatie voor de productie van waterstof in bedrijf van 6 MW. De meeste waterstof die daar geproduceerd wordt, wordt gebruikt voor transportdoeleinden (waterstof tankstations). Het restant waterstof wordt gebruikt om in te voeden op het lokale gasnetwerk in de stad Mainz (Energiepark Mainz).

Er zijn plannen om in Delfzijl de grootste Power to Gas installatie ter wereld te bouwen, 12 MW. Er is 12 april 2014 een intentieverklaring getekend om dit project te verwezenlijken door Torrgas, Siemens, Stedin, Gasunie, A.Hak, Hanzehogeschool Groningen, EnTranCe en stichting Energy Valley. De productie van waterstof en synthetisch methaan uit deze installatie zal voornamelijk dienen als input voor de chemische industrie, waarbij de reststroom zuurstof zal worden gebruikt voor een vergassingsproces. Het project is vooral bedoeld om ervaring op te doen over opschaling en de integratie van Power to Gas in de industrie en de nationale energievoorziening (Energy Valley, 2014).

Energieleverancier Nuon kwam onlangs met het nieuws dat zij de hybride Magnum centrale, zie figuur 23 (in bedrijf vanaf medio 2013), bij de Eemshaven wil gaan gebruiken om elektriciteit te produceren zonder CO₂-uitstoot. Vanuit het onderzoeksprogramma “Power to Ammonia” van het Institute for Sustainable Process Technology (ISPT) doen Nuon en TU Delft onderzoek naar de toepassing van ammoniak als brandstof voor deze gascentrale. Voorlopig is het nog niet zover, Nuon hoopt binnen 5 jaar een demonstratie op relevante schaal te kunnen geven (Nuon, 2016).



Figuur 23 Nuon Magnum centrale Eemshaven (Nuon, 2016).

Bijlage IV Uitwerking Interviews

Uitwerking interview 1 de heer prof. dr. mr. C.J. Jepma

Functie en naam organisatie: Hoogleraar Energie en Duurzaamheid aan de
Rijksuniversiteit Groningen

Datum interview: 15 juli 2015

U bent groot voorstander van energieopslag en dan met name van Power to Gas. Power to Gas wordt vaak gekwalificeerd als te duur. U heeft duidelijk een andere mening, mits er goed gerekend wordt.

Jepma:

Opslag van duurzaam opgewekte elektriciteit is noodzakelijk en wordt nu al rendabel toegepast. Bijvoorbeeld met hydro-energie. Deze optie is echter beperkt, want wordt al volop gebruikt en is dus al "bezet". Ook in de vorm van accu's, maar deze zijn zwaar en duur en gebruiken daarnaast ook schaarse grondstoffen. Er is geen methode eenvoudiger dan Power to Gas (verder P2G), op termijn ook niet goedkoper. Gas is eenvoudig te transporteren, ook over lange afstanden en elektriciteit eigenlijk niet. Gas is ook oneindig goed op te slaan. De oplossing ligt hoofdzakelijk in het rendabel maken van de conversie. Er is nu een monopoly voor de weinige aanbieders, deze vragen de hoofdprijs (ongeveer € 1.000.000 per MW). Dit kan de helft goedkoper. Meer aanbieders zal ook een positief effect hebben op de ontwikkeling en daarmee het rendement van de conversie.

ECN en andere adviesbureaus melden echter dat P2G (nu nog) te duur is en daardoor geen optie.

Jepma:

P2G is niet te duur. Groene waterstof en synthetisch methaan zijn groene gassen, er is te weinig prijsverschil tussen groen en grijs gas, de CO₂ emissierechten zijn te goedkoop. Daarnaast wordt de fossiele sector nog teveel gesubsidieerd, schaf alle subsidies af voor een levelling playing field. Ook lekken de NL-subsidies weg naar het buitenland. In Duitsland doen ze dat beter, daar blijft de subsidie in Duitsland en versterkt daardoor de eigen economie. De vraag is ook niet zozeer of opslag door middel van P2G nu haalbaar is maar gezien de trends of er wel een businesscase is in de toekomst.

Welke trends bedoelt u dan?

Jepma:

Biomassa is beperkt beschikbaar in Nederland en de toepassing ervan staat ter discussie (voedsel en hoogwaardiger gebruik). Dan moeten we het hebben van geïmporteerde biomassa, wat voornamelijk houtachtig is. Dit zou dan vergast kunnen worden. Maar waarom hier vergassen en niet op de plek van herkomst? Zonne-energie heeft niet een ontzettend groot potentieel in Nederland, wat blijft dus over? Windenergie en dan voornamelijk offshore.

Hiervoor is grootschalige opslag nodig. Maar de windsector pakt dit niet op, want de businesscase is niet rond. Brussel wil de OPEX-subsidies afschaffen, waardoor het opwekken van windenergie minder interessant wordt. Dat is niet slim van de windsector. Energieproducenten investeren ook alleen in een businesscase die rond is.

De bedrijven Linde en Toyota spelen wel in op de trends, mede omdat Toyota wel plannen heeft met groene waterstof. Ook netbeheerders want er moet anders geïnvesteerd worden in een zwaarder elektriciteitsnetwerk en in onderhoud en vernieuwing van het gasnet.

Hoe kunnen we rekenen aan de businesscase?

Jepma:

Er is een model gemaakt door de RUG, met daarin veel parameters, waaronder elektriciteits-, gas-, CO₂-, waterstof- en zuurstofprijzen. Ook wordt rekening gehouden met de rentevoet, CAPEX en OPEX. De externaliteiten zijn moeilijk te berekenen, deze zijn niet generiek. Denk dan aan vermeden kosten voor TenneT en de regionale netbeheerders voor het verzwaren en uitbreiden van de netwerken. Maar een initiatiefnemer heeft daar niets aan, deze voordelen komen niet daar terecht. Deze externaliteiten dienen dus geïnternaliseerd te worden, bijvoorbeeld door subsidies. Dit vergt echter nieuw beleid. Uitgaande van een opbrengst voor groene waterstof die de helft meer is dan nu en een electrolyser die de helft kost, dan is de businesscase rond. In de praktijk blijkt dat ieder 7 jaar de kosten halveren, als de prijs van CO₂-emissierechten dan € 30,- kosten in plaats van € 5,-, is de businesscase ook rond.

De grootste externaliteit is wat ons betreft de zogenaamde stopcontacten op zee. De RUG denkt in de richting van P2G installaties op (verlaten) booreilanden en het gas te transporteren of te injecteren op de bestaande gasinfrastructuur op de zeebodem. De energievraag is daarvoor ook interessant, welk deel kan als elektriciteit geleverd worden en welk deel moet opgeslagen worden. Dit is voor de Nederlandse situatie nog niet onderzocht.

Is methanisering niet zinvoller?

Jepma:

Methanisering is niet rendabel en het uiteindelijke doel is een waterstofeconomie. Het rendement is ook lager, voor methanisering is dat 40% en voor waterstof via een brandstofcel 70%. In die zin is methanisering niet zinvol. Maar waterstof is moeilijker te transporteren en op te slaan, daarvoor zou een keuze voor methanisering weer wel zinvol zijn. Ook de recycling van CO₂ is een interessante optie, zolang we ook nog afhankelijk zijn van aardgas. Ook vergistingsinstallaties kunnen een bron van CO₂ zijn, door bijmenging van waterstof bij het vergistingsproces kan meer methaan gewonnen worden uit het proces. Dus ook dat is een interessante optie. De uiteindelijke winst ligt in het feit dat we in de toekomst geen aardgas meer nodig hebben.

Hoe ziet onze toekomstige energievoorziening eruit?

Jepma:

Over 50 jaar is kolen en olie uit, er zal nog wel gebruik worden gemaakt van gas, maar voornamelijk groen gas. Of er moet op het gebied van CCS een geweldige doorbraak komen. Naar mijn mening zal mobiliteit voorzien worden door elektriciteit (mits groen opgewekt) en waterstof. Woningen zijn all-electric en de industrie en chemie draait vooral op waterstof. Dus veel windenergie en de Sahara vol met PV, waar daar ter plaatse waterstof of synthetisch methaan gemaakt wordt.

Wat moet er nu gebeuren?

Jepma:

De CO₂-emissierechten zijn te goedkoop, dat komt ook door het opwekken van groene energie. Hierdoor wordt minder fossiel opgewekt, waardoor er CO₂-emissierechten overblijven. Er is en ontstaat dus geen schaarste, waardoor de prijs negatief beïnvloed wordt. Dus de OPEX-subsidies zorgen voor een lage CO₂-prijs. Het systeem wordt wel gerepareerd, maar dat is zinloos, CO₂-uitstoot moet fors bestraft worden. Tevens dient er gedegen onderzoek gedaan te worden naar welk gasverbruik vervangen kan worden door elektriciteit en hoeveel gas dan nog benodigd is. Met andere woorden hoeveel duurzaam opgewekte stroom moet worden omgezet in groen gas op basis van vraag en tijd. Op deze wijze kan berekend worden hoeveel duurzame energie moet worden opgewekt om in de piekvraag te kunnen voorzien. Bij weinig wind zal dan alle elektriciteit verbruikt worden en bij veel wind worden de overschotten opgeslagen.

Wat zal voor een doorbraak zorgen?

Jepma:

De rendementen zullen in de toekomst dalen, maar dat zal niet voor de doorbraak zorgen. Wat wel voor de doorbraak gaat zorgen is een juiste prijs voor CO₂-emissierechten, een bonus voor groen (synthetisch) gas, bijvoorbeeld vrijstelling van energielasting en een daling van de kostprijs voor de installaties, met name voor de electrolyzers.

Waarom wordt in veel onderzoeksrapporten Power to Gas als interessant betiteld en niet haalbaar, zonder daar de voorwaarden bij te vermelden wanneer het wel haalbaar zou kunnen zijn?

Jepma:

In veel studies wordt waterstofproductie vergeleken met het kraken van methaan (de huidige goedkope manier om waterstof te produceren). Dit is een oneerlijk vergelijk. Daarbij spelen bij veel onderzoeksrapporten ook politieke en economische motieven een rol en natuurlijk de overall visie van de betreffende bureaus op de toekomst (gas versus all-electric).

Uitwerking interview 2 de heer E. van der Hoofd MSc

Functie en naam organisatie: Business developer bij TenneT Arnhem

Datum interview: 25 september 2015

Kunt u cijfers aanleveren waarin de productie van duurzame energie op basis van uurwaarden wordt aangegeven? Ik wil deze cijfers extrapoleren om een berekening te maken van de hoeveelheid energie die in de toekomst opgeslagen dient te worden.

Van der Hoofd:

De beschikbaarheid van goede cijfers is inderdaad een probleem waar ik bij het opstellen van de TenneT Market Review ook elke keer tegen aan loop. De gevraagde cijfers hebben wij niet (volledig). Ik ben van mening dat er tot 2050 geen grootschalige behoefte aan opslag is. Agora heeft de situatie voor Duitsland onderzocht en komt tot de conclusie dat grootschalige opslag pas noodzakelijk is bij 70 – 80% penetratiegraad.

Gaat Power to Gas volgens u een rol spelen in de toekomst van de Nederlandse energievoorziening?

Van der Hoofd:

Power to Gas is een dure vorm van energieopslag. De vraag is: “wat kun je eerst nuttig met energie doen, voordat je deze opslaat?”. Eerst zal het gasverbruik vervangen kunnen worden, dus warmte opwekken met elektriciteit als er overschotten zijn. Dan ga je niet eerst gas maken omdat weer te verbranden. Nederland zal ook moeten afstappen van het dogma om duurzaam altijd voorrang te geven. Er is niets mis met het uitzetten van duurzaam productie vermogen. Dus bij negatieve elektriciteitsprijzen moeten de windmolens stil gezet worden, dat is prima te regelen en verlengt de levensduur. Als eerste optie moeten processen bij bijvoorbeeld de industrie flexibeler gemaakt worden. Dus eerst zoveel mogelijk elektrificeren, bij overschotten van elektriciteit gas vervangen door elektriciteit (Power to Heat) en als laatste optie pas fossiel gas gebruiken. De tweede optie is demand aanpassen aan het aanbod, dit door slimme apparatuur en Smart Grids. De derde optie is het Europees koppelen van netwerken, de vierde optie het terug regelen van duurzame opwekmethoden en daarna komt pas opslag van energie in beeld. Deze opslag als eerste in de vorm van batterijen / accu's voor snel regelvermogen.

Hoe ziet de toekomst eruit en welke fossiele energiebronnen blijven wij voorlopig gebruiken?

Van der Hoofd:

Het is heel moeilijk de toekomst te voorspellen, zeker wat betreft de fossiele energiebronnen. Dat is erg afhankelijk van de gas- en steenkolenprijzen. Daarbij is het natuurlijk ook van belang om te kijken naar het primaire doel, het reduceren van de CO₂-emissies.

In Duitsland zie je ondanks de Energiewende (een groot aandeel van duurzame energie) een toename van de CO₂-emissie. Dit doordat meer dan voorheen het overige deel van de energievoorziening door steenkool, of nog erger door bruinkool wordt voorzien. Ook interconnecties zijn afhankelijk van de verschillen tussen gas- en kolenprijzen. In Duitsland is steen- en bruinkool zeer goedkoop en in Nederland is het aardgas duur. Hierdoor ontstaan grote prijsverschillen voor elektriciteit. Flexibiliteit kan dus heel duur zijn.

In de toekomst zal conventionele (fossiele) opwekking een specialisatie worden voor het leveren van flexibiliteit. De focus zal zich dan verschuiven naar investeringskosten in plaats van naar technische rendementen van thermisch vermogen. Gedreven door de toename van prijsvolatiliteit ontstaat er een nieuw evenwicht. Er is dus veel invloed van marktwerking, dus prijzen bepalen in grote mate de toekomst.

Uitwerking interview 3 de heer ir. ing. A. van der Molen

Functie en naam organisatie: Expert asset management bij Stedin Netbeheer
Rotterdam

Datum interview: 22 oktober 2015

Voor dit interview ben ik door Albert van der Molen rondgeleid door het Power to Gas proefproject te Rozenburg. Daarbij zijn de processtappen uitgelegd. Het is een proefproject waar synthetisch methaan wordt geproduceerd uit elektriciteit en (aangeleverde industriële) CO₂. Na deze rondleiding vond een (kort) interview plaats.

Wat is het rendement van deze Power to Gas installatie?

Van der Molen:

Deze proef is vrij kleinschalig en is ook meer bedoeld om aan te tonen dat het werkt dan grote prestaties te leveren. De huidige electrolyser van 8 kW heeft een rendement van 45%, maar bij Siemens zijn electrolyzers te verkrijgen met een rendement van 75%. De methaniseringstap daarna heeft een rendement van 75% maar 90% is goed haalbaar. Bij DIFFER in Eindhoven wordt geëxperimenteerd met waterstofproductie op basis van plasmafysica, daarvan is het (totaal)rendement 90%. Deze techniek is ook nog eens sneller.

Wat gebeurt er nu met het synthetische gas?

Van der Molen:

Na reiniging, toevoegen van extra CO₂ (om het synthetisch gas net zo "slecht" te maken als Nederlands aardgas), odorisering (reukstof toevoegen), controle op de samenstelling (met een gaschromatograaf) en het reduceren van de druk, wordt het aardgas gebruikt voor de verwarmingsinstallatie in het nabijgelegen appartementencomplex. De productie op jaarbasis is ongeveer 2.000 m³ gas, voldoende voor het gebruik van 1 gezin.

Hoe ziet u de toekomst van energieopslag?

Van der Molen:

In Duitsland zijn nu al ongeveer 20 installaties operationeel om pieken op te kunnen vangen in de duurzame elektriciteitsproductie. Nederland heeft dit soort pieken ook al, maar nog niet op nationaal niveau, maar wel tussen verschillende netvlakken. Met de balancering daarvan zijn nu al aanzienlijke kosten gemoeid. Opslag is een manier om deze onbalans tegen te gaan, zowel op korte als lange termijn, dag en seizoensfluctuaties.

Zijn er nog andere manieren om te kunnen balanceren?

Van der Molen:

Ja, we zullen primair eerst moeten besparen op ons energiegebruik. Daarna dient duurzame energie zo effectief mogelijk ingezet te worden, dus de wasmachine aan als het hard waait of de zon schijnt. Hier kunnen Smart Grids een rol spelen. Vervolgens zou opslag met Power to Gas een rol kunnen spelen, eerst door de maximale wettelijke toegestane 0,5% waterstof bij te mengen in het aardgasnet. Daarna wordt pas de methaniseringsstap interessant. Het feit dat het rendement van methanisering niet hoog genoeg is, is in een situatie met grote elektriciteitsoverschotten (waarbij de elektriciteitsprijs op dat moment negatief zal zijn) minder relevant, zeker op het moment dat de eerder genoemde opties reeds zijn benut.

Waar moeten de benodigde Power to Gas installaties komen?

Van der Molen:

Bij voorkeur waar veel duurzame energie geproduceerd wordt, dus bij de windparken. Realiseer daarbij dat transport van gas ongeveer 20x zo goedkoop is als het transport van elektriciteit. Denk daarbij ook aan de enorme kosten van de zogenaamde “stopcontacten op zee” voor de offshore windparken. Het gastransportnetwerk is ook nog betrouwbaarder dan het elektriciteitsnetwerk en Nederland heeft een uitstekende en uitgebreide gasinfrastructuur met een gelijktijdigheidsfactor 1.

Hoe ziet u de toekomst voor Power to Gas?

Van der Molen:

Methanisering is een slimme manier om aardgas uit te faseren, dit door bij te mengen en op den duur te vervangen. Zodra er geen aardgas meer nodig is, wordt de methaniseringsstap overbodig. Ik verwacht ook veel meer een waterstofeconomie in de toekomst. Tot 2050 zal aardgas noodzakelijk blijven, zeker voor verwarmingsdoeleinden in binnensteden, die moeilijk aan te sluiten zijn op een warmtenet. In stedelijke gebieden zal voornamelijk gebruik gemaakt gaan worden van warmtenetten en voor buitenstedelijke gebieden verwacht ik dat er voornamelijk elektriciteit gebruikt gaat worden, ook voor verwarming. Vervoer zal steeds meer elektrisch gaan plaatsvinden. Rond het jaar 2100 verwacht ik veel van lokale opwekking, met opslagmogelijkheden, maar wel met een backbone naar de gecentraliseerde energievoorziening. Voor wonen en processen zal er een combi van elektriciteit en waterstof gebruikt worden, met een grote rol voor de brandstofcel. Transport zal dan voornamelijk met behulp van waterstof plaatsvinden. Nadeel van brandstofcellen is wel dat daarin platina gebruikt wordt, een beperkt beschikbare en eindigende grondstof.

Ziet u nog andere mogelijkheden voor de toepassing van Power to Gas?

Van der Molen:

Power to Gas is ook goed toepasbaar bij vergistingsinstallaties. Dat zijn ook puntbronnen van CO₂. Bij de productie van biogas ontstaat ongeveer 55% methaan en 45% CO₂. Door het injecteren van waterstof kan de opbrengst drastisch worden verhoogd. Zeker als de daarvoor benodigde elektriciteit wordt opgewekt door windmolens of PV in de buurt van de vergisters. Voor het proefproject hier hebben wij nog ideeën om de CO₂ van de cv-installatie van het appartementencomplex af te vangen en te gebruiken in het methaniseringsproces. Op deze manier ontstaat een volledig gesloten CO₂-kringloop.

Schriftelijke vragen aan de heer prof. dr. F.M. Mulder

Functie en naam organisatie: Hoogleraar sectie Materials for energy conversion and storage en Program director van de MSc opleiding 'Sustainable Energy Technologies' TU Delft

Naar aanleiding van het rapport "Naar een hoog aandeel van duurzame energie, Opslag is noodzaak voor afstemmen van vraag en aanbod" en de daarin gepubliceerde hoeveelheid energie die opgeslagen moet worden in Nederland in 2050 van 50.000 GWh (waarvoor geen onderbouwing in het rapport) heb ik prof. dr. Mulder schriftelijke vragen gesteld. Onderstaand de vragen die ik op 10 februari 2016 gesteld heb.

Geachte heer prof. dr. Mulder,

Met zeer veel belangstelling las ik het rapport van NLingenieurs "Naar een hoog aandeel van duurzame energie, opslag is noodzaak voor afstemmen van vraag en aanbod". Ik ben (in deeltijd) student aan Hogeschool Van Hall Larenstein, waar ik Milieukunde studeer met als specialisatie Energiemanagement en Klimaat. Inmiddels ben ik bezig met mijn afstudeeropdracht. Mijn onderzoek heeft als onderwerp "De rol van grootschalige energieopslag in de Nederlandse energietransitie".

Bijzonder is hoe wij gezamenlijk tot dezelfde conclusies komen. Ik ben overigens wel benieuwd hoe u en uw collega's komen tot een benodigde opslagcapaciteit van 50.000 GWh in 2050? Zou u mij willen informeren welke berekening daaraan ten grondslag ligt en op basis van welke uitgangspunten deze hoeveelheid tot stand is gekomen? Onderzoek uit Amerika becijfert dat voor 9 uur opslag voldoende zou zijn (dat onderzoek gaat overigens over een veel groter gebied dan Nederland waardoor er ook meer potentie en diversiteit is om duurzame energie op te wekken). Voor de Nederlandse situatie ben ik nog niet veel verder gekomen dan een opslag van energie voor de periode van 3 weken. Laatstgenoemde informatie komt van een dubieuze bron, maar wel een tegenstander van duurzame energie en ook opslag. Als ik alle energie voor warmte, transport en elektriciteit voor de Nederlandse situatie omreken (2.025 PJ in 2013 waarbij transport en warmte primair en elektriciteit als finaal gebruik berekend), kom ik met een opslagduur van 3 weken aan 30.000 GWh. Daarbij ga ik er dan vanuit dat alle benodigde energie duurzaam opgewekt wordt en vraag mij af of dat een reële aanname is voor 2050? Of rekent u met een langere benodigde opslagtijd om seizoenseffecten te voorkomen?

Ik zou het zeer op prijs stellen indien u mij wilt voorzien van bovenstaande berekening, waarbij ik uiteraard zorg draag voor een passende bronvermelding bij gebruik. Vanzelfsprekend mag u mij ook verwijzen naar één van uw collega's.

Graag verneem ik uw gewaardeerde reactie, waarvoor alvast mijn dank.

*Met vriendelijke groet,
Robert Leenburg
Hogeschool Van Hall Larenstein Leeuwarden
Studentnummer 680821242
robert.leenburg@hvhl.nl
06 - 234 77 824*

Op dezelfde dag ontving ik onderstaand antwoord van prof. dr. F.M. Mulder.

Dag Robert,

Er is een gratis te downloaden paper in Journal of Renewable and Sustainable Energy van mij, met daarin een berekening voor wereldschaal gemapt op EU en een stuk Afrika. Dat geeft een idee van mismatch vraag en aanbod bij een deel renewable van 30%. Om naar 100% renewables te komen heb ik wat grondstoffelijk geëxtrapoleerd. Het NL deel van energie gebruik is 0.6% van de totale energiebehoefte. Dat levert dan die 50.000 GWh voor lange termijn opslag. Hier zitten heel veel aannames in, waar niet van te zeggen valt hoe goed ze zijn. Bijvoorbeeld hoeveel energieverbruik er zal zijn en hoe de verhouding tussen zon en wind uitpakt.

Veel rapporten kiezen er voor alleen naar het huidige elektriciteitsgebruik te kijken. Dat is veel te beperkt, elektriciteit is maar klein deel van de totale energiebehoefte.

Die 9 uur in VS lijkt me typisch van iemand die niet over seizoenen heeft nagedacht...

*Met vriendelijke groet,
Fokko Mulder*

