



VORMGEVING VAN DE ENERGIETRANSITIE

Cases:

Grootschalige productie van groen gas en biobrandstoffen uit biomassa

Elektriciteit voor warmtevoorziening en processen in de industrie (power-to-X)

Beleidsstudie

Jan Ros en Klara Schure

19 februari 2016

PBL

Colofon

Vormgeving van de energietransitie

© PBL Planbureau voor de Leefomgeving , Den Haag, 2016

PBL-publicatienummer: 1747

Contact

jan.ros@pbl.nl

Auteurs

Jan Ros en Klara Schure

Met dank aan:

De analyse P2X is mede tot stand gekomen dankzij gesprekken met:

Christine Beijnen (Gasunie)

Cornelis Biesheuvel (Dow Chemicals)

Tjeerd Jongsma (ISPT)

Jeroen de Joode (ECN)

Theo Noordman (Innovation Quarter)

Jaap Oldenziel (Air Liquide)

Patrice Pawiroredjo (Stedin)

Daniel Scholten (TU Delft)

Simon Spoelstra (ECN)

Ulco Vermeulen (Gasunie)

Martien Visser (Gasunie)

Sander van der Wal (Innovation Quarter)

Hans Wiltink (ISPT)

Ton Wurth (Stedin)

Redactie figuren

Beeldredactie PBL

Eindredactie en productie

Uitgeverij PBL

Delen uit deze publicatie mogen worden overgenomen op voorwaarde van bronvermelding:

Ros J. & K. Schure (2016), Vormgeving van de energietransitie, Den Haag: PBL.

Het Planbureau voor de Leefomgeving (PBL) is het nationale instituut voor strategische beleidsanalyses op het gebied van milieu, natuur en ruimte. Het PBL draagt bij aan de kwaliteit van de politiek-bestuurlijke afweging door het verrichten van verkenningen, analyses en evaluaties waarbij een integrale benadering vooropstaat. Het PBL is voor alles beleidsgericht. Het verricht zijn onderzoek gevraagd en ongevraagd, onafhankelijk en wetenschappelijk gefundeerd.

Inhoud

BEVINDINGEN	5
1 Introductie en aanpak	5
1.1 Doelstelling van de studie	5
1.2 Toepassing van de backcastingsmethodiek	6
1.3 Backcasting op nationaal niveau	6
1.4 Backcasting op het niveau van mogelijke onderdelen van het toekomstbeeld	8
2 Opties voor 80 tot 95 procent emissievermindering in Nederland	10
2.1 Uitgangspunten voor en opzet van de analyses	10
2.2 Opties voor een CO ₂ -arm energiesysteem in 2050	10
2.3 De mogelijke rol van specifieke technieken	13
3 Grootschalige biomassaverwerking voor productie van transportbrandstoffen, methaan en/of chemicaliën	17
3.1 Het mogelijke toekomstbeeld	17
3.1.1 De betekenis van grootschalige biomassaverwerking voor Nederland	17
3.1.2 Schets van het toekomstbeeld	18
3.1.3 Het potentieel op de lange termijn	22
3.2 De huidige ontwikkeling van biomassaverwerking	23
3.3 De uitdagingen voor de komende periode	25
4 Elektriciteit voor warmtevoorziening en processen in de industrie	28
4.1 Een mogelijk toekomstbeeld	28
4.1.1 De rol van P2X in het energiesysteem in 2050	28
4.1.2 Schets van het toekomstbeeld	29
4.1.3 Potentieel op lange termijn	32
4.2 Huidige ontwikkelingen	33
4.2.1 Technologische ontwikkelingen	34
4.2.2 Infrastructurele ontwikkelingen	37
4.2.3 Institutionele ontwikkelingen	38
4.3 Uitdagingen voor de komende periode	39
5 Samenspel tussen systeemopties	42
5.1 Biomassa en P2X samen in een mogelijk toekomstbeeld	42
5.2 Recente ontwikkelingen van de biomassa en P2X-combinatie	43
5.3 De uitdagingen voor de komende periode	43
6 Naar een plan van aanpak voor de energietransitie	44
7 Literatuur	46

BEVINDINGEN

1 Introductie en aanpak

1.1 Doelstelling van de studie

Een vergaande vermindering van broeikasgasemissies is noodzakelijk om de temperatuurstijging op aarde onder de internationaal afgesproken waarde van 2°C te houden. Zowel Europa als Nederland hebben daarom de ambitie om in 2050 de emissies te hebben teruggebracht tot 80 tot 95 procent onder het niveau van 1990. Dat vergt ingrijpende veranderingen in de economie en vooral in het energiesysteem.

Met het vierde Milieubeleidsplan dat in 2001 door het toenmalige Kabinet Kok is uitgebracht is daarvoor de term transitie in het beleid geïntroduceerd. Zo'n transitie vraagt ander beleid dan het meer traditionele milieubeleid. Dat laatste was vooral gericht op het terugdringen van de uitstoot van verontreinigende stoffen door maatregelen bij processen, vaak in de vorm van zuiveringssystemen zoals waterzuiveringsinstallaties, luchtfilters en de katalysator op de auto. Bestaande processen en ook producten werden schoner gemaakt en geoptimaliseerd.

In het transitiebeleid verschuift het accent naar het accommoderen van vernieuwing van het systeem. Processen, voertuigen en apparaten worden vervangen en de nieuwe technologie berust in vele gevallen op zodanig andere concepten dan de oude dat ook de infrastructuur, de organisatie en instituties eromheen en soms ook het gebruik ervan moeten worden aangepast. Dat gaat niet zonder slag of stoot. Bovendien moet die nieuwe technologie dikwijls nog verder worden ontwikkeld. Er is dus ook op innovatie gericht beleid nodig en dat is meer dan beleid op R&D. Het moet zich meer richten op de vernieuwers van het systeem en het creëren van mogelijkheden tot verandering.

Over een termijn van vele decennia kan niet worden aangegeven hoe het toekomstige systeem er uit zal zien. Daarvoor zijn er te veel onzekerheden. Dat maakt de transitie ook een zoektocht voor alle betrokken maatschappelijke partijen (Ros 2015). Die zoektocht is gebaat bij duidelijkheid over wat de belangrijke vragen zijn waarop antwoord nodig is. De goede vragen kunnen richting geven aan een gezamenlijk plan van aanpak van bedrijven, overheden, kennisinstellingen en andere maatschappelijke partijen. Dit rapport tracht aan te geven hoe de goede vragen kunnen worden afgeleid en illustreert dat met voorbeelden.

PBL stelt een aanpak voor die is gebaseerd op backcasting, waarvan we de methodiek in dit hoofdstuk toelichten. Het gaat in feite om backcasting op twee niveaus: het niveau van Nederland als geheel en het niveau van specifieke, voor de lange termijn belangrijke elementen of deelsystemen van een vernieuwd energiesysteem. Zo'n element of deelsysteem wordt meestal opgezet rond een nieuwe technologie. Uiteraard zijn die twee niveaus met elkaar verbonden. De analyse voor Nederland als geheel geeft inzicht in het potentiële belang van nieuwe elementen. Dit wordt beschreven in hoofdstuk 2.

Twee van de technieken die uit die analyse als potentieel belangrijk op de lange termijn naar voren komen worden verder uitgewerkt in de hoofdstukken 3 en 4:

- grootschalige productie van groen gas en vloeibare biobrandstoffen op basis van duurzaam geproduceerde biomassa
- een groter gebruik van elektriciteit door de industrie in de vorm van *power-to-X* (*P2X*), waarin X staat voor warmte (H), voor gas (G) of voor producten (P).

Ook voor de nadere analyse van de ontwikkelingen rond deze nieuwe deelsystemen wordt de methodiek van backcasting gehanteerd. Eerst wordt geschetst hoe zo'n nieuw deelsysteem er in de toekomst uit zou kunnen zien. Vervolgens worden recente ontwikkelingen en de huidige situatie beschreven. Ten slotte wordt de uitdaging neergezet om heden met mogelijke toekomst te verbinden. Dat gebeurt in de vorm van het formuleren van de juiste vragen.

Zoals eerder aangegeven is het stellen van de goede vragen een belangrijke basis voor een plan van aanpak voor de komende jaren. Deze vragen leven bij de partijen die direct of indirect betrokken zijn bij de verkenning naar en inrichting van zo'n nieuw deelsysteem. Ze zullen door de betrokkenen zelf moeten worden beantwoord. Dit kunnen overheden zijn, maar ook stakeholders in bedrijven of niet-commerciële instellingen. Mogelijke nieuwe deelsystemen moeten worden geïntegreerd tot één nieuw geheel. Dat maakt de uitdaging groter, maar biedt ook nieuwe kansen.

Hoofdstuk 5 illustreert met een voorbeeld hoe een nieuwe combinatie van de in de hoofdstukken 3 en 4 uitgewerkte deelsystemen weer dergelijke nieuwe kansen biedt. Ten slotte wordt in hoofdstuk 6 kort besproken hoe de vragen kunnen worden omgezet in een plan van aanpak. Daarvoor komen de betrokken partijen in de praktijk immers te staan.

1.2 Toepassing van de backcastingsmethodiek

Backcasting heeft vooral meerwaarde als het om een ingrijpend veranderingsproces gaat, dat zich vaak uitstrekt over een langere termijn. In zo'n geval is het in de beginfase van zo'n verandering vaak niet helder waar het proces precies toe moet leiden. In feite geeft backcasting aan eerst eens over dat laatste na te denken. Het idee erachter is dat een beter inzicht in de opties voor de toekomst leidt tot een effectievere sturing van acties op de korte termijn. Dat wil niet zeggen dat er vooraf een blauwdruk wordt gemaakt van het gewenste eindbeeld, een regelmatig opduikend misverstand. Zeker als het gaat over het energiesysteem van de toekomst zijn er nog vele onzekerheden en dus vele varianten voor een toekomstbeeld. Die onzekerheden mogen echter niet leiden tot uitstel van actie; ze moeten juist agenderend zijn voor wat er op de korte termijn moet gebeuren. Meer inzicht in die varianten is bovendien zeer zinvol, zo niet essentieel voor een effectief transitiebeleid, want ze geven inzicht in de potentiële rol van alle opties.

1.3 Backcasting op nationaal niveau

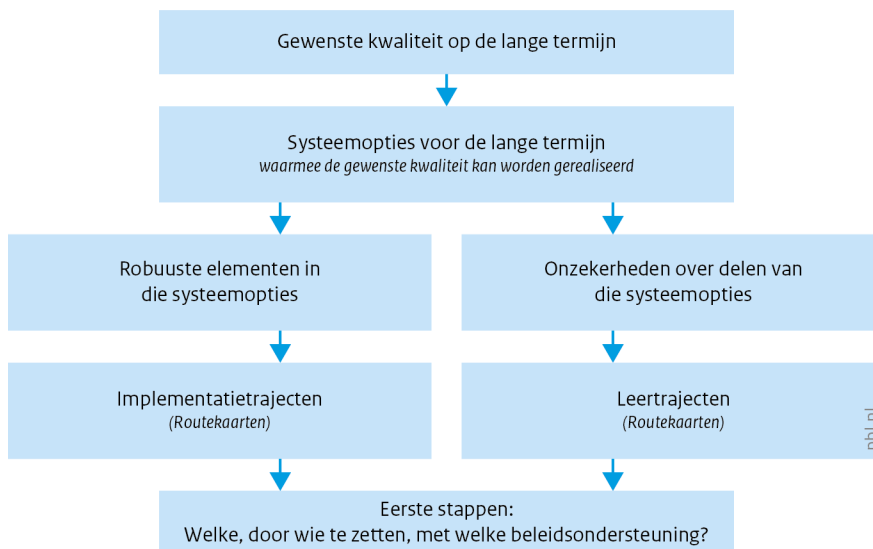
Een ingrijpend veranderingsproces, waarin het bestaande systeem eigenlijk wordt afgebroken om er een nieuw systeem voor in de plaats te kunnen bouwen, moet over tal van lastige barrières heen. Aantasting van machtsposities, extra kosten, onzekere afhankelijkheden, ze kunnen al snel een reden zijn om het proces niet door te zetten. Er moet daarom een krachtig ondersteund doel zijn met groot maatschappelijk draagvlak om het proces tot een succes te kunnen maken (RLI 2015, Ros 2015). Wij gaan in dit rapport uit van de – zij het informeel gestelde – *ambitie om de broeikasgasemissies met 80 tot 95 procent te verminderen*. Bij

invulling daarvan gaat het, naast dit primaire doel, ook om de bredere kwaliteit van het toekomstige energiesysteem. Diverse aspecten kunnen daarbij een rol spelen:

- Hoge leveringszekerheid
- Lage afhankelijk van import in het algemeen of import uit bepaalde landen
- Goede betaalbaarheid van energie
- Duidelijke randvoorwaarden met betrekking tot de kwaliteit van de directe leefomgeving zoals geluid, luchtverontreiniging en horizonvervuiling
- Beperkte risico's met betrekking tot nucleaire installaties en nucleair afval
- Afgebakende omgevingsrisico's van gaswinning, van CO₂-opslag
- Acceptabele effecten in de productieketen buiten Nederland, zoals het effect van biomassateelt op de bodemkwaliteit, de koolstofbalans, de biodiversiteit
- Toegevoegde economische bijdrage van Nederlandse bedrijven aan het (internationale) energiesysteem
- Overige economische kansen samenhangend met duurzaamheid (groene groei)

De invulling van de gewenste kwaliteit op de lange termijn, het doel (eventueel doelen), is in feite de eerste stap in de backcasting (zie figuur 1.1). Na het bepalen van de op termijn gewenste kwaliteit, kan worden verkend wat de opties zijn om daaraan invulling te geven. Dat kunnen er vele zijn, afhankelijk van de beschikbaarheid van technologieën en de vrijheidsgraden om ook gedrag en consumptie te veranderen.

Figuur 1.1
Methodiek van backcasting en de te volgen stappen



Bron: PBL

Als daarin robuuste elementen herkenbaar zijn die in vrijwel elke variant voor realisatie van het einddoel een significante rol spelen, dan ligt het voor de hand daarvoor een implementatietraject in te zetten. In vele gevallen ontbreekt die absolute duidelijkheid echter en moeten nog onzekerheden worden weggenomen. In dat geval is het uitzetten van een leertraject de aangewezen weg (zie ook figuur 1.1). Systeemopties met een potentieel belangrijke rol verdienen daarbij extra aandacht. Inzicht in het belang per optie kan worden verkregen door na te gaan hoeveel lastiger de realisatie van het einddoel wordt zonder de betreffende systeemoptie.

1.4 Backcasting op het niveau van mogelijke onderdelen van het toekomstbeeld

Voor het inrichten van implementatie- en vooral leertrajecten voor systeemopties die de potentie hebben om een belangrijk aandeel te hebben in het toekomstige energiesysteem, kan wederom een backcastingbenadering worden gekozen. Daartoe wordt als eerste stap een schets gemaakt van hoe de systeemoptie er in de toekomst uit zou kunnen zien, uitgaande van substantiële toepassing. Relevante onderdelen daarbij zijn:

- In te zetten technieken
- Benodigde infrastructuur
- De productieketens voor de nieuwe technieken en infrastructuur
- Nieuwe meet- en regelsystemen
- Aangepast gebruik van een nieuwe technologie
- De actoren die een belangrijke rol in het toekomstige systeem spelen en hun onderlinge afhankelijkheden
- Regels, handhavingssystemen, standaardisatie etc.

In alle gevallen kan het zo zijn dat er nog verschillende varianten mogelijk zijn, soms op een onderdeel van de systeemoptie, soms in een groot deel van de nieuwe systeemoptie. Het benoemen van deze varianten geeft een zinvolle indicatie van de onzekerheden en keuzes die gaandeweg opgehelderd zullen moeten worden.

Na het schetsen van één of meerdere mogelijke eindsituaties van de systeemopties brengen we de huidige situatie in de ontwikkeling van de betreffende optie in beeld. Daarbij bekijken we in stap 2 onder meer:

- Lopende relevante R&D-trajecten (in Nederland, maar ook relevante ontwikkelingen in het buitenland)
- Grootschalige demonstratieprojecten, niches, eerste toepassingen, vooral in Nederland, maar belangrijke ontwikkelingen op hoofdlijnen in het buitenland kunnen er ook toedoen
- Ontwikkelingen in nieuwe productieketens voor het op de markt brengen van de benodigde technieken
- Ontwikkelingen in specifieke infrastructuur of specifieke aanpassingen daarin met alles wat daaromheen nodig is
- Nieuwe specifieke richtlijnen, vormen van standaardisatie en afspraken
- Betrokken partijen, hoe werken ze samen, nieuwe organisaties opgericht voor dit doel
- Redenen waarom potentieel belangrijke partijen niet meedoen
- Succesverhalen maar ook mislukkingen uit het recente verleden met de reden van succes of falen
- Een indicatie van leercurven tot nu toe
- Ingezette beleidsinstrumenten die de laatste jaren belangrijke impulsen hebben gegeven en nog geven aan bovenstaande ontwikkelingen.

De derde stap is erop gericht acties aan te geven die van belang zijn om de ontwikkeling van dit deelsysteem verder te brengen. Daarbij is het resultaat van stap 2, de recente ontwikkelingen, het uitgangspunt en geeft het resultaat van stap 1, het toekomstbeeld, de richting (zie figuur 1.2).

Figuur 1.2

Plan van aanpak voor systeeminnovatie



Bron: PBL

Elke actie heeft een specifieke bedoeling. Voor acties gericht op implementatie is de bedoeling duidelijk: toepassing op grotere schaal of van grotere aantallen. In leertrajecten kan het gaan om antwoord te krijgen op bepaalde vragen, inzichten over de mogelijkheden te vergroten, vertrouwen te kweken en de randvoorwaarden scherper in beeld te krijgen. In vele gevallen is daarvoor ook meer ervaring in de praktijk nodig en past het om de eerste fase van implementatie in te zetten, maar soms zijn andere acties adequater.

Een plan van aanpak met concrete acties voor de korte termijn is een zaak voor alle betrokken stakeholders en geïnteresseerde initiatiefnemers, bij voorkeur in samenspel. Daarom wordt in deze rapportage geen voorstel voor een plan van aanpak gemaakt. Zo'n plan van aanpak begint echter bij de belangrijke vragen die er leven. Die vragen worden zoveel mogelijk op een rij gezet. Ze kunnen worden gebruikt als basis voor het inrichten van een actieplan voor de transitie.

Overigens dient daarbij ook in het oog te worden gehouden dat er redenen kunnen zijn om op een gegeven moment de inzet op ontwikkeling van een bepaalde systeemoptie stop te zetten, bijvoorbeeld bij tegenvallende resultaten tot nu toe of ontbreken van maatschappelijk draagvlak. Daarbij is het wel zaak voldoende andere systeemopties open te houden om het doel voor Nederland binnen bereik te houden. Een ambitie van een vermindering van de broeikasgasemissies met 80 tot 95 procent betekent dat we niet veel opties uit kunnen sluiten.

2 Opties voor 80 tot 95 procent emissievermindering in Nederland

2.1 Uitgangspunten voor en opzet van de analyses

Een belangrijk uitgangspunt voor het klimaatbeleid is de internationale afspraak om de temperatuurstijging niet boven de 2°C te laten komen. De Europese leiders hebben op basis daarvan de ambitie uitgesproken om in 2050 binnen de EU tot een emissiereductie van 80 tot 95 procent te komen, maar dan wel onder de voorwaarde van een vergelijkbare ambitie in andere ontwikkelde landen – de kans daarop is met het akkoord in Parijs (december 2015) toegenomen. De Raad voor de leefomgeving en infrastructuur (RLI 2015) heeft het kabinet geadviseerd deze ambitie tot een krachtig beleidsdoel te maken. Voor de analyse in dit hoofdstuk wordt deze doelstelling als uitgangspunt genomen. Daarbij moet worden aangetekend dat er nog een aanzienlijk verschil in de benodigde maatregelen kan zijn tussen 80 en 95 procent emissievermindering.

Het rapport *Naar een schone economie in 2050* (Ros, J. & R. Koelemeijer 2011) liet al zien dat er theoretisch honderden opties bestaan om een emissievermindering van 80 procent te realiseren. Dat betekent echter allerm minst dat het gemakkelijk zal zijn. In alle gevallen is er veel nieuwe technologie nodig.

In het rapport is aangegeven dat het terugdringen van de CO₂-uitstoot vooral moet worden gerealiseerd met vernieuwing in het energiesysteem. Ook beperking van de procesemissies in sectoren als landbouw en industrie is echter van belang, en emissies van de scheepvaart en luchtvaart, ook al tellen ze niet mee voor de huidige nationale emissiedoelen. De analyses zijn uitgevoerd met behulp van het backcastingmodel E-Design. In het volgende worden model, uitgangspunten voor 2050 en de gevolgde methode kort geschetst.

2.2 Opties voor een CO₂-arm energiesysteem in 2050

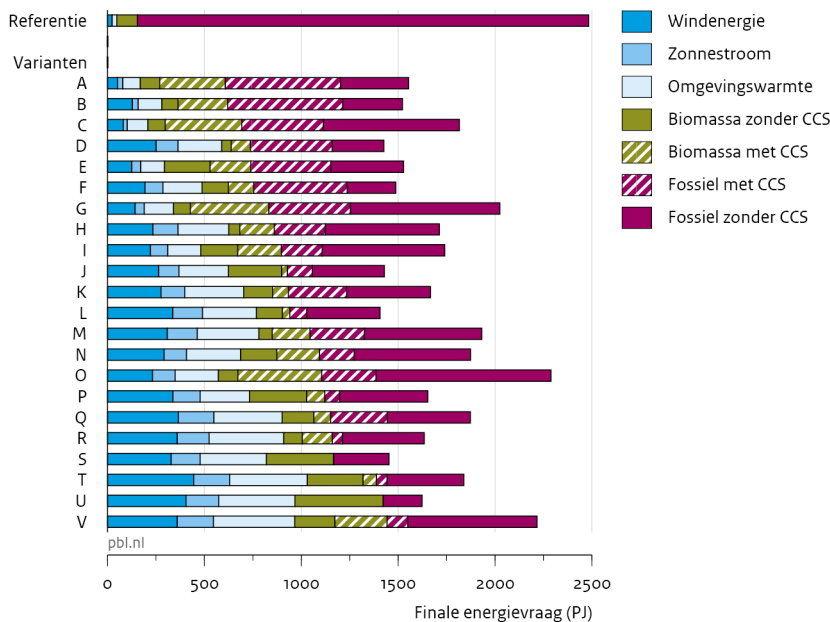
In 2050 zal het energiegebruik in Nederland zijn gebaseerd op verschillende energiebronnen. In de analyse onderscheiden we de volgende energiebronnen (kernenergie is in deze analyses buiten beschouwing gelaten):

- Elektriciteit uit wind (op land en op zee)
- Zonnestroom (decentraal opgewekt in de gebouwde omgeving)
- Omgevingswarmte (decentrale benutting van warmte in de lucht, de bodem of het grondwater middels warmtepompen, warmte van de zon middels zonnecollectoren en warmte uit de diepe ondergrond middels geothermie)
- Biomassa (alle verschillende typen duurzaam geproduceerde biomassa)
- Biomassa met CCS (*Carbon Capture and Storage*); bij de omzetting van biomassa in de gewenste energievorm wordt vrijkomende CO₂ afgevangen en opgeslagen; netto betekent dit negatieve emissies

- Fossiele bronnen met CCS
- Fossiele bronnen (zonder CCS); het gaat om aardgas, olie en kolen.

De resultaten zijn weergegeven in figuur 2.1, waarin duidelijk wordt wat de energievraag (ook wel aangeduid met 'finaal energiegebruik') in 2050 is en op welke energiebron dit gebruik is terug te voeren (zie ook PBL 2014). De energievraag die hier bekeken wordt is alle energie die de eindgebruikers aanwenden, in dit geval inclusief de energie uit de omgeving die daadwerkelijk wordt benut, zoals met warmtepompen. Het referentiebeeld laat zien hoe het gebruik zou zijn als in 2050 nog dezelfde technieken en energiedragers zouden worden toegepast als nu. Daarin is er binnen fossiel nog een flinke bijdrage van kolen. In de CO₂-arme toekomstbeelden is de bijdrage van kolen aan de fossiele mix relatief kleiner dan nu en soms verwaarloosbaar. Binnen de fossiele mix wordt in de toekomst dus al minder emissie uitgestoten per petajoule energievraag dan op dit moment het geval is.

Figuur 2.1
Opties voor invullen van energievraag in 2050 bij 80% emissiereductie ten opzichte van 1990

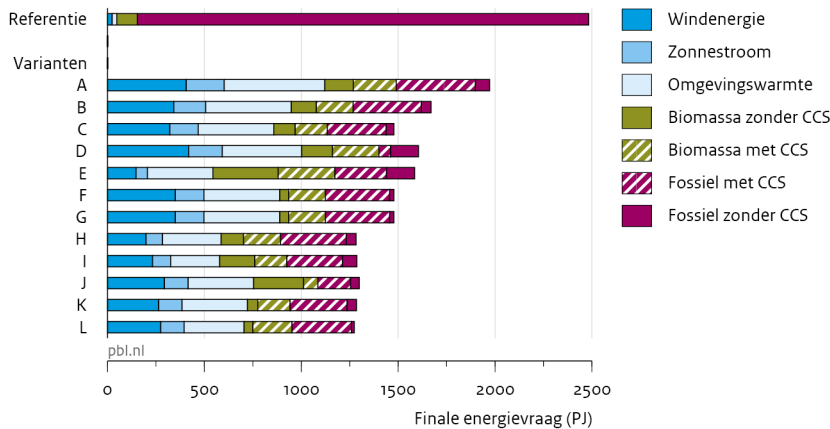


Bron: PBL model E-design

Voor sommige voorzieningen en bedrijven is het lastig om te functioneren zonder aardgas en fossiele olie, zoals voor (een deel van) de warmtevoorziening in de bestaande bebouwing, voor kleine bedrijven en in de transportsector. Dat maakt een bijdrage van biomassa voor groen gas en transportbrandstoffen belangrijk, zeker in combinatie met afvang van de bij die productie vrijkomende CO₂ om zo tot negatieve emissies te komen.

Het is duidelijk dat voor een 80 procent emissiereductie hernieuwbare energie in vele toepassingen de fossiele grondstoffen moet gaan vervangen, en dat de opslag van CO₂ een belangrijke voorwaarde is bij een relatief groot aandeel fossiel. Voor een emissiereductie met 95 procent is de opgave aanzienlijk groter. Het niveau van de broeikasgasemissies moet dan immers nog een factor 4 lager liggen dan bij 80 procent emissiereductie. De rol van fossiele energie wordt dan nog verder teruggedrongen en het opslaan van CO₂ wordt dan een onmisbaar onderdeel, zelfs in de combinatie met biomassa (zie figuur 2.2).

Figuur 2.2
Opties voor invullen van energievraag in 2050 bij 95% emissiereductie ten opzichte van 1990

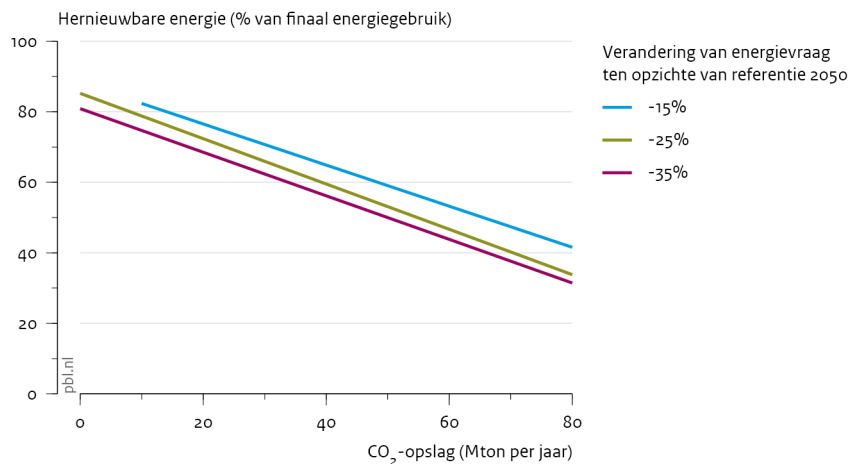


Bron: PBL model E-design

Figuur 2.3 geeft dezelfde resultaten voor een emissiereductie met 80 procent op een andere manier weer, om inzicht te geven in de verhouding tussen de inzet van verdergaande energiebesparing, hernieuwbare bronnen en het opslaan van CO₂ (de elementen van de Trias Energetica). Hierin is zichtbaar dat invulling van het energiesysteem mogelijk is zonder CCS, mits het aandeel hernieuwbaar toeneemt tot 80 procent van het finale energieverbruik en de energievraag met 35 procent wordt gereduceerd. Als veel CCS wordt ingezet (oplopend tot 80 tot 90 megaton CO₂ per jaar), is het benodigde aandeel hernieuwbaar nog altijd zo'n 35 tot 40 procent. Dit is waarschijnlijk alleen realiseerbaar met export van CO₂, omdat de capaciteit voor opslag over een langere periode in het Nederlandse deel van de Noordzee beperkt is (20 tot 25 megaton per jaar over 50 jaar) en opslag onder land vooralsnog geen draagvlak heeft en daarom erg onzeker is.

Figuur 2.3
Relatie tussen inzet van hernieuwbare energie, CO₂-opslag en emissiebesparing, 2050

Bij 80% emissiereductie ten opzichte van 1990



Bron: PBL model E-Design

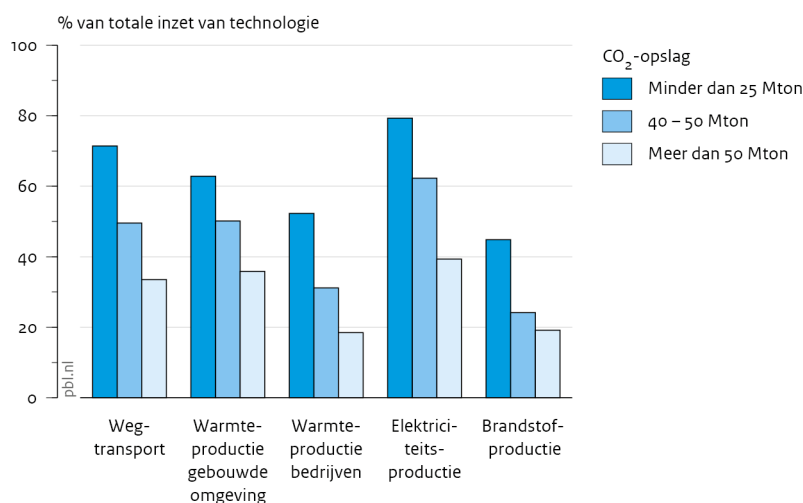
2.3 De mogelijke rol van specifieke technieken

In de vorige paragraaf zijn de algemene conclusies over het systeem van de toekomst besproken. Wat kunnen we zeggen over de rol van specifieke technieken in het toekomstbeeld, zoals van elektrische auto's, warmtepompen, biomassavergassingsinstallaties, elektrolyse voor waterstofproductie en CCS bij raffinaderijen? Het zijn innovatieve opties, niet alleen in het aanbod van energie maar ook aan de gebruikskant. In de verschillende sectoren is bijvoorbeeld ook de mate van elektrificatie van belang. In figuur 2.4 wordt een indicatief beeld gegeven van de mate waarin innovatieve opties in de verschillende sectoren moeten worden ingezet om tot 80 procent emissiereductie te komen. Daarbij zijn de technieken meegenomen die tot voor kort (daarvoor is het jaar 2013 genomen) nog voor minder dan 1 procent bijdroegen aan het totaal binnen een sector.

In de verschillende varianten om tot een emissievermindering met 80 procent te komen, is er binnen alle sectoren een groot aandeel voor de innovatieve opties: 20 tot 70 procent in 2050 (zie figuur 2.4; daarin zijn technieken als innovatief beschouwd als ze in 2013 nog minder dan 1 procent bijdroegen aan de totale productie van een sector). Ook dit is sterk afhankelijk van de mate waarin CCS wordt ingezet. Er is ook enige flexibiliteit, die niet in figuur 2.4 tot uiting komt. Als in de ene sector innovatieve technieken minder doordringen, kan dit in de meeste varianten worden opgevangen door meer innovatie in de andere.

Figuur 2.4
Inzet van innovatieve technologie afhankelijk van CO₂-opslag, 2050

Bij 80% emissiereductie ten opzichte van 1990



Bron: PBL model E-Design

Sector	Innovatieve opties
Elektriciteitsproductie	Windenergie op zee, Zon-PV, Geothermie
Elektriciteitsdistributie	Versterking Europese interconnecties (DC), Opslag
Productie brandstoffen	Biomassavergassing al dan niet met CCS (of hergebruik CO ₂) Geavanceerde biomassafermentatie al dan niet met CCS
Wegtransport	Elektrische voertuigen, Waterstofvoertuigen
Gebouwde omgeving	Elektrische warmtepompen, Geothermie (warmtenet), Zonne-warmte, Passiehuizen
Industrie	Biobased opties voor grondstoffen en processen, Elektrische warmtepompen, Hybride hoge temperatuur warmteproductie, Nieuwe generatie procestechologie

In het vervolg worden de specifieke systeemopties die alle voor de lange termijn een belangrijke rol kunnen spelen kort langsgelopen. Hoe belangrijk, dat kan verschillen. De inschatting van het potentiële belang is alleen gebaseerd op analyses met het E-Design-model en dus op technische overwegingen gericht op het halen van een vergaande vermindering van broeikasgassen in Nederland. Overwegingen van maatschappelijke of politieke haalbaarheid zijn niet meegenomen.

Grootschalige omzetting van biomassa in groen gas en/of biobrandstoffen met CCS

Inschatting potentieel belang: zeer groot

Deze optie bleek in de analyses het lastigst te missen. Ervan uitgaande dat het om duurzaam geproduceerde biomassa gaat (en de ketenemissies, ook buiten de Nederlandse grenzen beperkt zijn) dan is er een directe emissiewinst door vervangen van fossiele energie door bio-energie. Een deel van de koolstof uit de biomassa komt daarbij niet in het eindproduct, maar kan vrijkomen als CO₂. Afvang (of hergebruik) hiervan leidt tot negatieve emissies, mits de productie in Nederland plaatsvindt. Bovendien vormen groen gas en biobrandstoffen in 2050 de enige optie voor emissiereductie bij belangrijke energieverbruikers, zoals een deel van de gebouwde omgeving en kleine bedrijven (gas) en vliegverkeer, mogelijk zwaar transport over de weg (vloeibare brandstof). De duurzaam te importeren hoeveelheid biomassa bepaalt sterk de potentiële bijdrage van de optie. Deze optie wordt verder besproken in hoofdstuk 3.

Windenergie

Inschatting potentieel belang: groot

Er zijn in Nederland ruimtelijke beperkingen voor windenergie op land. Voor windenergie op zee zijn er juist relatief veel mogelijkheden, potentieel voldoende voor het huidige Nederlandse elektriciteitsgebruik en zelfs meer. Er zijn wel alternatieven voor schone elektriciteit, maar die kennen meer beperkingen of onzekerheden. Mogelijke beperkingen liggen bij de inpassing van het variabele aanbod in het systeem. Overigens is er ook een flink aanbod in de winter, wanneer de energievraag in Nederland typisch hoger ligt. Langdurige windstille perioden komen echter ook regelmatig voor.

Zonnestroom

Inschatting potentieel belang: redelijk

Op daken en in vrije ruimte is er een groot potentieel om stroom op te wekken, tot zeker meer dan de helft van het huidige Nederlandse elektriciteitsgebruik (DNV/PBL 2014). Voordeel van toepassing in Nederland is stimulering van de eigen energievoorziening en daarmee een grotere betrokkenheid bij het energiesysteem. Nadeel daarbij is dat het aanbod klein is op dagen dat de zon niet of nauwelijks schijnt en de warmtevraag juist hoger kan zijn. Bovendien is Nederland niet bij uitstek een zonnrijk land. Bij grootschalige uitbreiding van de interconnecties binnen Europa zou zonnestroom uit Zuid-Europa aantrekkelijker kunnen zijn.

Kernenergie

Inschatting potentieel belang: groot

Technisch is er de mogelijkheid om de bijdrage van kernenergie sterk te verhogen. Het aanbod van elektriciteit is enigszins stuurbaar en zeker voorspelbaar en daardoor gemakkelijker in te passen aan het vraagprofiel van elektriciteit dan wind- en zonenergie. Er zijn nieuwe soort reactoren in ontwikkeling (zoals de thoriumreactor) die mogelijk minder nucleair afval genereren, maar gezien de huidige stand van ontwikkeling en het lage draagvlak voor nucleaire energie is het zeer onwaarschijnlijk dat deze technologie al in 2050 een grote rol speelt in Nederland.

Power-to-gas en power-to-liquids

Inschatting potentieel belang: groot

Het belang hangt samen met een aantal factoren. In de eerste plaats is het technisch potentieel voor het produceren van CO₂-arme elektriciteit zo groot dat er meer mee kan worden gedaan dan alleen het huidige elektriciteitsgebruik verduurzamen. Voor vormen van energiegebruik waar een alternatief voor (methaan)gas of vloeibare brandstoffen als diesel of kerosine moeilijk zijn te vinden, kan gas of vloeibare brandstof uit elektriciteit een oplossing bieden. In de tweede plaats kan het bijdragen aan energieopslag, van belang als het aanbod van zon- en windenergie groot is en de vraag beperkt, want gas en brandstof zijn goed op te slaan en elektriciteit niet. Ten slotte levert het een bescheiden bijdrage aan vermindering van de benodigde opslagcapaciteit voor CO₂ omdat CO₂ wordt hergebruikt. Ook bij alternatieven in het energiegebruik gebaseerd op waterstof levert deze route deze schone brandstof. Samen met elektrificatie van warmte wordt deze optie besproken in hoofdstuk 4.

Nul-emissie voertuigen

Inschatting potentieel belang: groot

Voor personenauto's, de grootste emissiebron van verkeer, zijn er technisch goede mogelijkheden voor nul-emissie voertuigen. CO₂-vrije voertuigen rijden bijvoorbeeld op elektriciteit of waterstof (ook te produceren uit elektriciteit). Met deze vorm van elektrificatie kan het grote potentieel voor opwekking van schone elektriciteit ook beter worden benut. Voor zwaar vrachtverkeer over lange afstanden over de weg is het minder zeker of elektrisch rijden een goede optie kan worden. Een alternatief is om vracht-, vaar-, en vliegtuigen op biobrandstoffen te laten rijden, maar het aanbod daarvan zal zeer waarschijnlijk te beperkt zijn om alle transport te verduurzamen.

Elektrische warmtepompen in de gebouwde omgeving en bedrijven

Inschatting potentieel belang: groot

Deze techniek biedt de mogelijkheid tot elektrificatie van de warmtevoorziening, vooral lage-temperatuurwarmte (bijvoorbeeld temperaturen tot 100°C). In combinatie met CO₂-arme elektriciteitsproductie is dit een belangrijke optie in de warmtevoorziening, waar het potentieel van alternatieven nog onzeker is. De bijdrage van deze optie kan groot zijn omdat de behoefte aan lagetemperatuurwarmte een groot aandeel is in de totale energievraag.

Warmtenetten en geothermie voor de gebouwde omgeving

Inschatting potentieel belang: beperkt tot redelijk

Warmtenetten ten behoeve van de gebouwde omgeving en de glastuinbouw zijn qua mogelijkheden afhankelijk van lokale warmtebronnen. Geothermie biedt daarvoor een CO₂-arme basis, maar is lang niet overal beschikbaar. De omvang van het potentieel nabij warmteverbruikers is nog een zeer onzekere factor. Er is veel warmte aanwezig in de diepe bodem, maar de benutbaarheid ervan moet nog nader worden onderzocht. Er zijn nog andere potentiële warmtebronnen zoals WKK-installaties op fossiele energie of van industriële restwarmte. Deze vormen echter onzekere factoren. Het is immers twijfelachtig of en in welke mate fossiele WKK-installaties passen in het toekomstbeeld. De inzet van industriële restwarmte is onzeker omdat er dikwijls voor de continuïteit van bedrijven over perioden van vele decennia geen garantie kan worden gegeven en er bovendien mogelijk aantrekkelijker opties voor bedrijven zijn om de restwarmte zelf op te wekken (bijvoorbeeld met warmtepompen) en benutten.

CCS bij de industrie

Inschatting potentieel belang: groot

Er zijn enkele belangrijke industriële bronnen die niet CO₂-vrij kunnen produceren en waarvoor afvang en opslag van die CO₂ de enige optie voor vermindering is. Het gaat bijvoorbeeld om staalproductie, raffinaderijen en enkele processen in de chemie. Daarnaast kunnen

grote ketels en WKK-installaties voor de warmtevoorziening bij bedrijven (stoomproductie) ook van CCS worden voorzien. Hiermee biedt dit een optie voor een belangrijk deel van de Nederlandse emissies. Voor zover in de genoemde processen biomassa wordt ingezet is hier de mogelijkheid om de combinatie bio-CCS vorm te geven en zo negatieve emissies te creëren.

CCS en biomassa bij elektriciteitscentrales

Inschatting potentieel belang: beperkt

Gezien het grote potentieel voor het produceren van CO₂-vrije elektriciteit enerzijds en de mogelijke beperkingen in het aanbod van duurzame biomassa en maatschappelijk aanvaardbare opslagcapaciteit voor CO₂ anderzijds is het aandeel van CCS en biomassameestook bij centrales in de meeste varianten beperkt. Er blijft wel een aandeel voor flexibel in te zetten gascentrales, waarvan een deel met CCS kan worden voorzien. Mochten de genoemde beperkingen geen grote rol spelen, dan zou het aandeel van kolencentrales met biomassameestook en CCS groter kunnen zijn.

Zo is er een scala aan opties om tot vermindering van de uitstoot van broeikasgassen te komen. De opgave is zodanig groot dat er zeer waarschijnlijk zeven of acht van deze tien opties nodig zullen zijn om het doel te kunnen halen. En bij de meeste zo niet alle opties zijn er onzekerheden. Die kunnen te maken hebben met maatschappelijk draagvlak als gevolg van mogelijke neveneffecten (bijvoorbeeld van kernenergie of CO₂-opslag), onzekerheid over de omvang van duurzaam exploitabele energiebronnen (biomassa, geothermie) of de al dan niet succesvolle ontwikkeling van technologie. Des te belangrijker is het om bij deze onzekerheden niet te vervallen in een afwachtende houding. Daarvoor is de tijd om de transitie te realiseren te kort.

Welke opties goed uit zullen pakken en welke opties tegen zullen vallen is inherent onzeker. Het is daarom te vroeg om nu al te veel van deze opties uit te sluiten. Om de onzekerheden en risico's van de systeemopties te verkleinen is het van belang om een betere indruk te krijgen van de invulling en open vragen die op dit moment leven, en met beleidsmakers en stakeholders aan de slag te gaan om de antwoorden hierop te vinden. En daarbij geldt dat ook het voor langere tijd geen aandacht besteden aan de ontwikkeling van een bepaalde systeemoptie praktisch ook uitsluiting van deze optie voor 2050 kan betekenen.

In dit rapport gaan we dieper in op twee van deze systeemopties. De optie 'Biomassa voor de productie van groen gas of biobrandstoffen' blijkt in de modelanalyses het lastigst te missen voor het kunnen realiseren van het doel in 2050, en wordt daarom als eerste uitgewerkt. De andere optie die in dit rapport wordt uitgewerkt is 'Power-to-X', een systeemoptie die bijna zeker in meer of mindere mate een rol zal spelen in de toekomst, en waarvan de eerste stappen op weinig controversie stuiten – maar die toch niet gezet worden.

3 Grootschalige biomassaverwerking voor productie van transportbrandstoffen, methaan en/of chemicaliën

3.1 Het mogelijke toekomstbeeld

3.1.1 De betekenis van grootschalige biomassaverwerking voor Nederland

Naar verwachting zal er in 2050 in Nederland nog een aanzienlijke vraag zijn naar vloeibare transportbrandstoffen, gas (methaan) en grondstoffen voor de productie van kunststoffen. In diverse sectoren is niet te verwachten dat het de komende decennia al zou kunnen lukken volledig over te gaan op CO₂-vrije energiedragers als elektriciteit, waterstof of warmte. Voor lucht- en scheepvaart, het wegtransport of ten minste een groot deel daarvan en een (wellicht klein) deel van de personenauto's zullen mogelijk producten als diesel, benzine en kerosine nog in aanzienlijke hoeveelheden nodig zijn. Ondanks een aantal opties om de warmtevoorziening in de gebouwde omgeving meer op elektriciteit en omgevingswarmte te baseren kan ervan worden uitgegaan dat een deel van de gebouwde omgeving nog gas nodig zal hebben voor de warmtevoorziening. De chemie heeft bovendien voor de kunststofproductie in ieder geval koolstof- en energiehoudende grondstof nodig.

Als dat allemaal op fossiele basis zou moeten, dan wordt een emissievermindering met 80 procent of meer in 2050 onhaalbaar. Dat maakt de inzet van biomassa voor de productie van groen gas, groene vloeibare transportbrandstoffen en groene kunststoffen een belangrijke optie voor het energiesysteem van 2050. Dan kan in ieder geval een deel van de daaraan gekoppelde emissies worden vermeden.

Daarbij is het op systeemniveau van groot belang dat er ook 'negatieve' emissies kunnen worden gerealiseerd, wat mogelijk is door de combinatie van bio-energie met de afvang en opslag van CO₂. Er zullen namelijk bronnen zijn waarvoor met technische maatregelen slechts beperkte vermindering van emissies kan worden bereikt, zoals in de landbouw. Bij grootschalige omzetting van biomassa in brandstoffen komt een deel (ongeveer de helft) van de koolstof uit de biomassa niet in het eindproduct terecht. Het moet in de vorm van CO₂ worden verwijderd en kan dan worden opgeslagen. Overigens zijn er wellicht in de toekomst ook opties om die CO₂ nuttig in te zetten. Ook daarop wordt ingegaan.

Nederland heeft zelf maar een beperkt aanbod van duurzaam geproduceerde biomassa, vooral in de vorm van rest- en afvalstromen. Daarbij moet rekening worden gehouden met de gewenste cascadering: in eerste instantie zo hoogwaardig mogelijk verbruik door eerst het materiaal te hergebruiken alvorens het in te zetten als energiebron. Voor het kunnen halen van de 80 tot 95 procent emissiereductiedoelstelling in 2050 zal meer biomassa nodig zijn dan Nederland zelf kan produceren. Dat kan betekenen dat de gewenste energiedragers moeten worden geïmporteerd: groen gas of biobrandstoffen, of de biomassa zelf. Er wordt van uitgegaan dat het in dat laatste geval vooral gaat om droge, houtachtige biomassastromen (lignocellulose). De aanwezigheid van grote havens, nabijgelegen industriële complexen en afzetmogelijkheden biedt Nederland hier kansen.

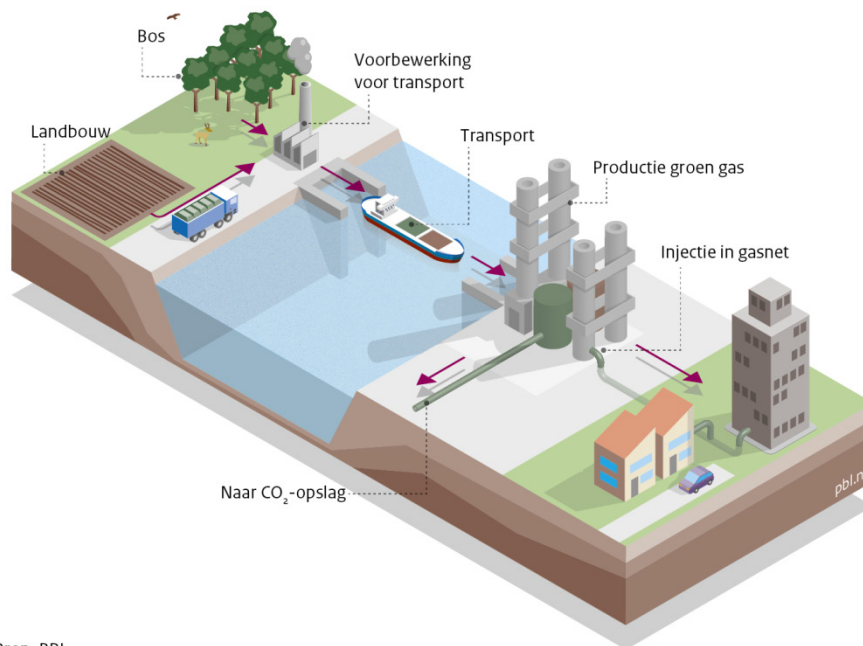
3.1.2 Schets van het toekomstbeeld

Hieronder wordt een beschrijving gegeven van hoe het systeem er in 2050 uit zou kunnen zien. Er zijn uiteraard nog vele varianten mogelijk. Die worden op diverse punten aangestipt. De basis van de beschrijving is de fysieke uitvoering van het nieuwe systeem, maar de belangrijkste (mogelijk) betrokken stakeholders en benodigde instituties worden eveneens benoemd.

Het toekomstbeeld: een kijkje in 2050

Figuur 3.1

Schets van het biomassasysteem van de toekomst



Bron: PBL

Productie, inzameling en handhaving op duurzaamheid

In Nederland is er een efficiënt systeem van inzameling en transport naar de centrale verwerking van de (lignocellulose) biomassastromen ingericht, onder meer voor houtafval van bedrijven en consumenten en residuen uit de landbouw. De meeste biomassa wordt geïmporteerd. Die import bestaat voornamelijk uit drie categorieën:

- Reststromen uit de landbouw (stengels, stro, en dergelijke; het is wel gewenst dat een deel daarvan op de akkers achterblijft voor het op peil houden van de bodemkwaliteit)
- Hout, bestaande uit reststromen uit bossen en mogelijk van specifieke houtteelt (het is gewenst dat een deel achterblijft in het bos ter bevordering van de bodemkwaliteit en biodiversiteit)
- Specifieke energiegewassen (grasachtig), geteeld op land dat ongeschikt is voor de teelt van voedingsgewassen; hiervoor zijn nieuwe landbouwbedrijven opgericht en is de benodigde infrastructuur aangelegd.

Bij de inzameling van de biomassastromen zijn naast de producenten of organisaties van de producenten (zoals bosbouwbedrijven en landbouwcoöperaties) ook lokale transportbedrijven en de eerste afnemers betrokken. In vele gevallen wordt het eerste transport van reststromen in de landen van herkomst gecombineerd met het transport van het hoofdproduct.

Een internationaal werkende, door overheden en bedrijven uit de productieketen gefinancierde autoriteit verzorgt de handhaving op de internationaal vastgestelde duurzaamheidscriteria. Belangrijke aandachtspunten daarbij zijn de bodemkwaliteit van de landbouwgronden en het voorkomen van ongewenste kap en van omzetting van natuurgebieden, direct of indirect.

Vorbewerking

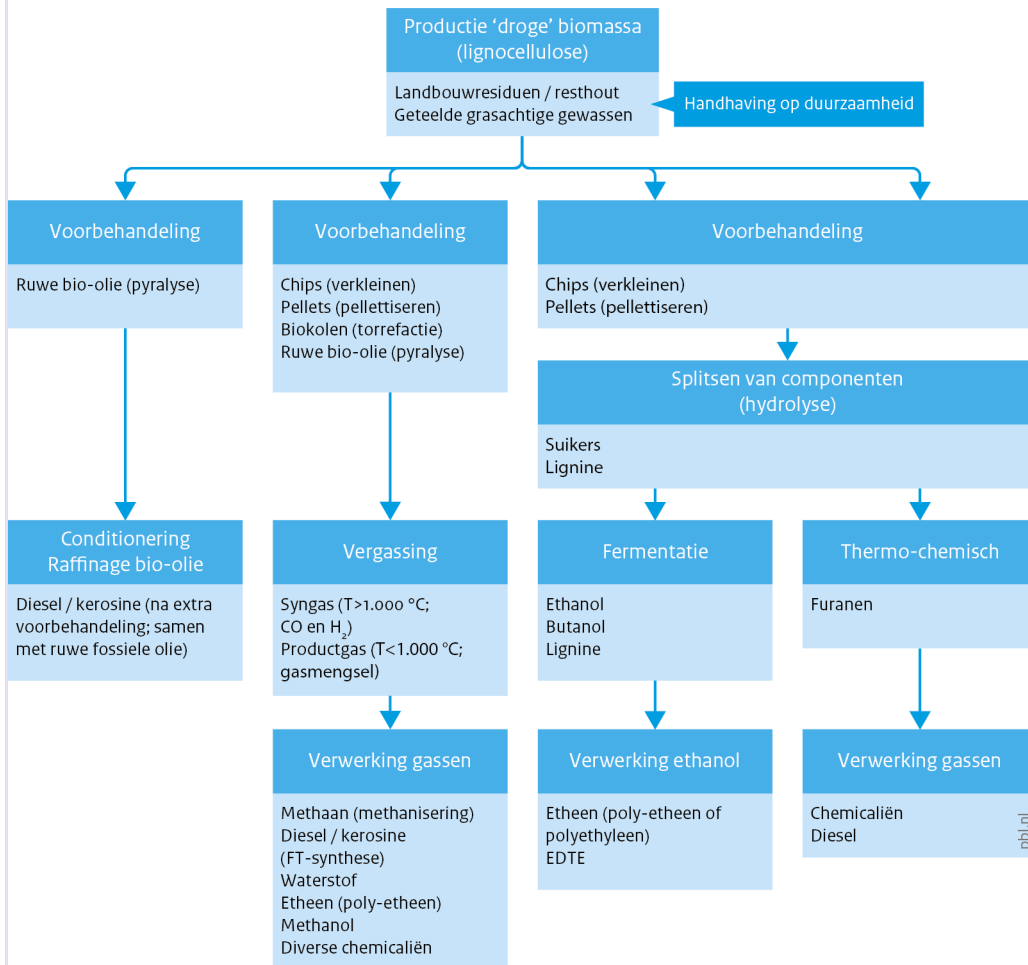
De biomassa wordt omgezet in een vorm die goedkoper kan worden getransporteerd, minder gevoelig is voor vocht (afbraak, mogelijk met methaanemissies) en gemakkelijk kan worden verwerkt in bijvoorbeeld een vergasser of een raffinaderij. Figuur 3.2 schetst de belangrijkste routes met daarin de daarbij passende verbewerking.

Als verbewerking voor biomassavergassing (of mogelijke directe verbranding) wordt vooral torrefactie ingezet, vrij dicht bij de oorspronkelijke bron maar zodanig dat het op voldoende grote schaal kan. Bedrijven die oorspronkelijk houtpellets produceerden zijn hier in grote mate toe overgegaan. Voor landbouwresiduen en grasachtige producten zijn er ook nieuwe gespecialiseerde bedrijven. Afhankelijk van specifieke omstandigheden en afzetmogelijkheden wordt ook pyrolyse (productie van pyrolyseolie) of pelletproductie ingezet.

De verbewerking voor verdere omzettingen in fermentatiereactoren (biochemisch) of thermochemische reactoren is vooral mechanisch opdat de aanwezige chemische verbindingen zoveel mogelijk intact blijven. Torrefactie of pyrolyse zijn hiervoor dus geen geschikte verbewerkingen.

De bedrijven die de verbewerking verzorgen brengen het product in de meeste gevallen zelf naar de lokale haven.

Figuur 3.2
Mogelijkheden voor de toekomstige inzet van biomassa



Bron: PBL

Grootschalig transport en het handelssysteem

De vóorbewerkte biomassa wordt per schip naar een Nederlandse haven getransporteerd. Gezien de grote omvang van de stromen (een jaarlijkse invoer van 100 petajoule biomassa komt in de orde van grootte van 6 miljoen ton) zijn hiervoor bij de vertrekhavens en de ontvangsthavens de nodige voorzieningen ingericht. De havenbedrijven zijn hierin belangrijke spelers. In Nederland zijn grootschalige verwerkingsinstallaties zodanig gesitueerd dat transportkosten van haven naar verwerker worden geminimaliseerd.

Voor alle partijen in de biomassaketen is het van belang voldoende zekerheid te hebben over afname en aanbod en de prijzen van de biomassa. Er zijn langlopende contracten tussen de betrokken partijen met betrokkenheid van biomassahandelaren op de wereldmarkt, die investeerders de zekerheid bieden dat de investering kan worden terugverdiend.

Grootschalige verwerking van de biomassa

Hiervoor zijn er verschillende alternatieven, die naast elkaar voorkomen (zie ook figuur 3.2), hoewel Nederland nog steeds een gasland is en daarom de route naar methaanproductie dominant is. De drie belangrijkste verwerkingsroutes worden kort geschetst.

1. Productie van groen gas

De biomassa wordt vergast in grootschalige installaties van grote kapitaalkrachtige bedrijven. In enkele gevallen worden in een eerste stap uit het productgas specifieke waardevolle kleine moleculen zoals etheen en aromaten gewonnen. Enkele bedrijven zetten het productgas zelf in voor de productie van methaan. Andere verkopen het productgas aan verschillende nabijgelegen bedrijven als grondstof voor verdere syntheseprocessen.

De belangrijkste vervolgstap is methanisering. Daarbij kan niet alle koolstof uit de biomassa worden omgezet in het gewenste product (daarvoor bevat het gasmengsel te weinig energie). De overtollige CO₂ wordt oorspronkelijk uit het product afgescheiden en voor opslag afgevoerd of waar mogelijk hergebruikt. Het methaangas wordt via de gasinfrastructuur naar de klanten gebracht.

2. Productie van biobrandstoffen en biochemicalïen

Een deel van het productgas wordt middels Fischer-Tropsch-synthese omgezet tot biodiesel en/of tot een mengsel met vooral ethanol/etheen voor de kunststofproductie.

Een andere verwerkingsmethode die wordt toegepast is die van geavanceerde fermentatie. Deze wordt vooral uitgevoerd door bedrijven die al een lange historie hebben met fermentatie in de productie van ethanol. De eerste route omvat ontsluiting van de lignocellulose om daaruit suikers vrij te maken. Het vervolg omvat geavanceerde vormen van fermentatie om met name ook de moeilijker afbreekbare suikers om te zetten in ethanol of butanol. Deze worden gebruikt als additieven of basiscomponenten voor de productie van additieven (bijvoorbeeld EDTE voor benzine) voor transportbrandstoffen of als intermediaire verbindingen voor de chemie, met name de kunststofproductie. In de fermentatie wordt niet alle beschikbare koolstof omgezet in het gewenste eindproduct. CO₂ als restproduct wordt zoveel mogelijk afgevangen voor opslag elders.

3. Ook de raffinaderijen hebben hun productie voor een flink deel vergroend. Zij gebruiken elders maar ook zelf geproduceerde ruwe pyrolyse-olie. Dit kan alleen zonder problemen na verdere voorbereiding van de pyrolyse-olie om het zuurstofgehalte te verlagen. Het product van die voorbereiding wordt gemengd met ruwe fossiele olie voor verwerking in het raffinageproces. Daarmee worden de componenten net als die uit de ruwe olie verdeeld over de verschillende producten van de raffinaderij.

Distributie van de eindproducten

Voor de distributie van chemische producten en vloeibare transportbrandstoffen wordt gebruik gemaakt van dezelfde distributiekkanalen als nu. Dat geldt in feite ook voor groen gas via het gasnet. Daartoe wordt de kwaliteit van het groene gas bij en/of na de laatste productiestap aangepast aan de vereiste criteria. Vervolgens wordt het gas op de gewenste druk gebracht voor invoer in het net onder verantwoordelijkheid van de bedrijven die ook voor het transport en de distributie van aardgas zorgen.

Tot zover een blik in de mogelijke toekomst. Daarin zijn diverse varianten naast elkaar beschreven. Zelfs bij een geslaagde transitie naar grootschalige omzetting van biomassa in groen gas of biobrandstoffen is het waarschijnlijk dat één of enkele van deze varianten veel aantrekkelijker blijken en andere opties geheel buiten beeld houden.

Er zijn bovendien mogelijkheden voor een slimme combinatie van biomassavergassing en Power-to-X. Deze worden in hoofdstuk 5 beschreven.

3.1.3 Het potentieel op de lange termijn

Het potentieel van grootschalige biomassaverwerking wordt sterk bepaald door de mogelijkheden om in de toekomst voldoende aanvoer van duurzaam geproduceerde biomassa tegen een redelijke prijs te realiseren. Dit is mede afhankelijkheid van het aanbod op de wereldmarkt. Schattingen van het potentiële aanbod van in 2050 lopen ver uiteen.

In een tamelijk pessimistische benadering wordt ervan uitgegaan dat er te veel barrières zullen zijn om veel meer reststromen in te zamelen dan nu. Bovendien komt er in dat beeld geen extra grond voor teelt beschikbaar, omdat land beter aan de natuur kan worden gelaten. Dan zal het biomassa-aanbod in 2050 niet veel meer zijn dan 50 exajoule (de lage schatting).

Een optimistische blik op de toekomst gaat uit van het inzamelen van alle duurzaam beschikbare afval- en reststromen. Bovendien biedt die wel extra ruimte voor teelt zonder extra verlies van natuur door zeer gunstige ontwikkelingen in de landbouwproductiviteit die de vraag naar meer voedsel van de groeiende en steeds welvarender wereldbevolking nog te boven gaat. Dan komt het toekomstige aanbod op ruim 300 exajoule (de hoge schatting). Dat kan nog hoger uitvallen als de productie van aquatische biomassa (algen en wieren) ook succesvol zou blijken.

Eerdere beschouwingen van het PBL laten zien dat het een grote, maar niet onhaalbare uitdaging vormt om tot een duurzaam mondiaal aanbod van 145 exajoule te komen (zie tabel 3.1) (PBL-website). Hierin wordt ervan uitgegaan dat een groter deel van de afval- en reststromen dan nu wordt ingezameld en er beperkte ruimte is voor teelt, voor een groot deel op land dat kwalitatief minder geschikt is voor voedingsgewassen. Met minder gevoelige energiegewassen kunnen daarop nog redelijke oogsten worden gerealiseerd.

In tabel 3.1 is aangegeven wat indicatieve schattingen zijn voor het potentiële aanbod van specifieke biomassastromen in 2050.

Tabel 3.1 Potentieel aanbod van biomassastromen in 2050

Biomassastroom	Schatting mondiaal duurzaam potentieel in 2050 (EJ)		
	Laag	Midden	Hoog
Geteelde energiegewassen en geteeld hout	15	70	190
Residuen van landbouw en uit bossen	10	30	55
Afvalstromen van industrie en consumenten	25	45	65

Meer info: <http://infographics.pbl.nl/biomassa/>

Bij een krachtig klimaatbeleid zullen ook andere landen biomassa willen inzetten. Er zal dus een verdeling van de biomassa gaan komen met mondiale handel, omdat er diverse landen zijn met een veel groter aanbod dan hun vraag. Daartegenover staat dat de kosten en praktische mogelijkheden van transport van met name natte afvalstromen leiden tot een voorkeur voor lokale verwerking daarvan. Vergelijk dit met de mest- en afvalvergistings in Nederland.

Een indicatie van het mogelijke aanbod voor Nederland kan worden verkregen door alle biomassa gelijk te verdelen over alle wereldburgers of per eenheid BNP. Dat zou respectievelijk op basis van de middenschatting in tabel 3.1 een totaal aanbod voor Nederland van 300 tot 800 petajoule betekenen. Met een aanbod van enkele honderden petajoules aan biomassa kan een belangrijke bijdrage aan het toekomstige systeem worden geleverd. De mogelijke combinatie met power-to-X kan ervoor zorgen dat de benutting van de koolstof wordt geoptimaliseerd.

3.2 De huidige ontwikkeling van biomassaverwerking

De huidige ontwikkelingen worden per stap in de keten kort toegelicht, vooral gericht op Nederland.

Productie en duurzaamheid

Eén van de belangrijkste knelpunten voor grootschalige bio-energieprojecten is dat er onzekerheid is over voldoende aanvoer van betaalbare, duurzaam geproduceerde biomassa over een langere periode (minimaal de afschrijvingstermijn van een installatie). Vanuit dat perspectief bekeken is er een positief aspect aan de verwachte toename tot 2020 van biomassameestook in kolencentrales: hoewel het twijfelachtig is of deze toepassing wel past in een CO₂-arm energiesysteem in 2050, brengt meer meestook wel de aanvoer van biomassa in de vorm van houtpellets op gang, wat inmiddels heeft geleid tot het maken van afspraken over de duurzaamheid daarvan, inclusief de ontwikkeling van een controlesysteem daarop. Dat laatste blijkt overigens in de praktijk veel tijd te vragen, omdat het om vele kleine producenten gaat. Die ontwikkeling leidt aldus tot belangrijke stappen richting een duurzame aanvoer. Er ligt echter nog geen helder plan voor het te volgen verdere ontwikkelingstraject naar andere toepassingen van die biomassa teneinde een zogenaemde *lock-in* in een systeem met kolencentrales te voorkomen of de aanvoer van duurzame biomassa naar Nederland weer te zien verdwijnen bij eventuele sluiting van kolencentrales.

Torrefactie

Nederland heeft een grote rol gespeeld in de ontwikkeling van torrefactie, oftewel de omzetting van biomassa in biokolen. De afgelopen jaren is de technologie in Nederland ook op industriële schaal in praktijk gebracht. Een belangrijk voorbeeld daarvan was de fabriek in Duiven waar de productie inmiddels is gestopt. Bij de start was er nog relatief weinig ervaring met de technologie op die schaal. Werkende weg werd er nog veel geoptimaliseerd.

Deze ontwikkelingen evaluerend kan worden geconstateerd dat voor het uitproberen van verbeteringen en doorvoeren van aanpassingen beter een demonstratieproject op kleinere schaal had kunnen worden ingericht dan de gekozen relatief grote productieschaal. De (wellicht voorlopige) stagnatie in de toepassing van deze technologie heeft niet zozeer te maken met technische tegenvallers als wel met gebrek aan marktperspectief.

Pyrolyse

In Twente wordt sinds kort (productie gestart in 2015) op demonstratieschaal bio-olie via pyrolyse geproduceerd op basis van biomassa uit de omgeving. De olie wordt als brandstof voor industriële warmtevoorziening ingezet. Er zijn geen initiatieven voor verwerking van pyrolyseolie – al dan niet na verdere voorbewerking – in één van de Nederlandse raffinaderijen of voor omzetting in andere producten.

Biomassavergassing

Deze technologie heeft al een belangrijk deel van het ontwikkelingstraject doorlopen, in Nederland met bijvoorbeeld bijstook (vergasser waar het gas naar kolenketel gaat). Onderdeel van de Amercentrale in Geertruidenberg is een 85 megawatt vergasser op sloophout. Het productgas wordt benut voor verbranding ten behoeve van de elektriciteitsproductie. Deze centrale zal echter op korte termijn sluiten. Andere Nederlandse initiatieven voor grootschalige demonstratie en toepassing in de praktijk – en dan met name gericht op de productie van methaan, biobrandstoffen of chemicaliën – komen niet van de grond, waardoor de ontwikkeling van grootschalige biomassavergassing momenteel stagneert.

In Alkmaar is een demonstratieproject met groen gas uit afvalhout al jaren in voorbereiding. Het project is meerdere malen uitgesteld, omdat de financiering moeilijk rondkomt. Groot-schaliger en meer commercieel van opzet is het project Woodspirit waarvoor Europees geld (200 miljoen euro) is gereserveerd. Dit project heeft als doel om op grote schaal in Nederland methanol te produceren uit geïmporteerd hout. Ook dit project is nog niet van de grond gekomen. Ondanks toegekende subsidiegelden is het in beide gevallen moeilijk om de businesscase rond te krijgen. Het ontbreekt voornamelijk aan een helder beleidsperspectief dat voor de bedrijven een extra investering rechtvaardigt. Ook in Europa worden investeringsbeslissingen voor grotere projecten uitgesteld. Alleen in Zweden zijn stappen gezet naar grootschalige demonstratie en productie van groen gas. In Duitsland is een project op commerciële schaal met vergassing van hout en houtachtige biomassa waarna middels Fischer-Tropsch-synthese diesel werd geproduceerd uit het gasmengsel inmiddels gestopt vanwege een gebrek aan economisch perspectief.

Onderzoek op pilotschaal in Nederland is erop gericht om naast synthese gas ook chemische verbindingen te produceren (aromaten als benzeen, xyleen en toluen alsmede etheen). Dit zijn hoogwaardige producten, die het kostenplaatje van biomassavergassingstechnologie kunnen verbeteren. Ook zijn Nederlandse bedrijven actief in de nichemarkt voor de vergassing van huishoudelijk afval (goedkope grondstof) die de laatste jaren wereldwijd is ontstaan. Een businesscase voor vergassing is dan snel positief.

Geavanceerde fermentatie

Internationaal worden de eerste stappen gezet naar grootschalige toepassing van geavanceerde ontsluiting en fermentatie, maar in Nederland komt deze technologie voor productie van cellulose-ethanol (ethanol gemaakt uit lignocellulose: droge, houtachtige biomassa) niet van de grond. De technologie heeft een belangrijk deel van het ontwikkelingstraject doorlopen, en ook momenteel wordt op dit terrein in Nederland R&D uitgevoerd. Projecten en vooral plannen daarvoor om ook in de praktijk lignocellulose (bijvoorbeeld stro) in ethanol om te zetten zijn er in Nederland wel geweest, maar hebben niet tot grootschalige toepassing geleid. Nederland (DSM) levert wereldwijd (enzym- en gist)technologie. In de Verenigde Staten wordt deze technologie commercieel toegepast bij de productie van ethanol uit agro-residuen en ook in Europa zijn daarvoor enkele initiatieven, meestal dicht bij de landbouwgebieden waar de residuen vandaan komen.

Integratie in het toekomstige energiesysteem

De koppeling van bio-energie met opslag en afvang van de vrijkomende CO₂ alsook de koppeling met power-to-gas (zie voor ontwikkelingen in power-to-gas hoofdstuk 4 voor betere benutting van de CO₂ zijn in Nederland nog nauwelijks onderzocht. Er zijn geen specifieke ontwikkelingstrajecten in deze richting in Nederland, noch – voor zover bekend – plannen voor projecten die met een toekomstige toepassing van deze combinatie rekening houden. Wel geven vele scenariostudies op verschillende schaalniveaus (tot mondiaal) aan dat de combinatie van bio-energie in het algemeen met CCS een belangrijke bouwsteen vormt voor vergaande emissievermindering.

Ontwikkeling van de kosten

De kosten voor groen gas of biobrandstoffen die op de beschreven manier zijn geproduceerd worden bepaald door de investeringen en de biomassaprijs. Ze liggen hoger dan die van de fossiele varianten (zie tabel 3.2). Door de ervaringen met demonstratie-eenheden zijn de productiekosten voor groen gas en biobrandstoffen gedaald en deze zullen naar verwachting verder omlaag kunnen gaan als gevolg van het leren van ervaringen in de praktijk en het steeds efficiënter bedrijven van de processen.

De nog te verwachten prijsdaling is niet spectaculair. Zoals ook uit tabel 3.2 blijkt, zijn de in de toekomst mogelijk geachte productiekosten sterk afhankelijk van de prijs voor de biomassa. De ontwikkeling van de kosten voor biomassa is niet gemakkelijk te voorzien. De technologie bij de productie (land- en bosbouw) en het transport van biomassa heeft nog potentie voor verdere efficiëntieverbetering, maar de effecten van klimaatverandering op de landbouwproductiviteit zijn onzeker. Daarnaast wordt de prijs van biomassa bepaald door de markt. Een toenemende vraag kan tot prijsstijgingen leiden. Van afval- en reststromen zonder hergebruiksmogelijkheden is de prijs lager dan van specifiek geteelde energiegewassen, waardoor de gemiddelde prijs in de praktijk ook van de beschikbaarheid van deze stromen afhangt.

Tabel 3.2. Indicatie mogelijk haalbare productiekosten methaangas en diesel (grootschalig)

		Prijs (euro/GJ)		
		Productiekosten totaal	Kosten biomassa	Kapitaalslasten en overig
Methaangas	Aardgas (prijs wereldmarkt)	6 - 10		
	Groen gas (na biomassavergassing)	10 - 18	5 - 12	5 - 6
Diesel	Fossiel (olieprijs \$ 50-100/barrel)	10 - 19		
	FT-diesel (na biomassavergassing)	20 - 40	8 - 23	12 - 17

Bron: ECN 2014, (Milbrandt, A., C. Kinchin, et al., 2013)

3.3 De uitdagingen voor de komende periode

Het is nog allerminst een zekerheid dat grootschalige biomassavergassing voor de productie van groen gas of biobrandstoffen in 2050 een belangrijke schakel zal zijn in het Nederlandse energiesysteem. Hoewel de potentie van de optie voor vergaande vermindering van broeikasgasemissies duidelijk is, zeker in combinatie met benutting of opslaan van CO₂, zijn er nog vele vragen en onzekerheden die partijen terughoudend maken. Die verklaren ook de enigszins stagnerende ontwikkeling. De uitdaging voor de komende periode ligt daarom in het zoeken naar antwoorden op die vragen en het verkrijgen van voldoende zekerheden, zodat wel duidelijke keuzes kunnen worden gemaakt. Die antwoorden en zekerheden komen niet vanzelf. Er moet dan ook een plan van aanpak zijn voor de komende periode om die te krijgen.

In het volgende worden belangrijke vragen en onzekerheden benoemd (zonder daarbij naar volledigheid te streven). Ze staan geordend naar de verschillende onderdelen binnen de waardeketen van het mogelijke systeem van de toekomst.

Productie en duurzaamheid

In paragraaf 1.1.3 is aangegeven dat er nog grote onzekerheid bestaat over het potentieel aan duurzaam geproduceerde biomassa in de toekomst en wat de import in Nederland zou kunnen worden. Vergroting van de vraag (tegen een goede prijs) kan daarbij uiteraard helpen, maar voor veel biomassastromen is een actieve bijdrage aan het creëren van meer aanbod gewenst. Het gaat erom de mogelijkheden daartoe te verkennen en zo mogelijk direct te benutten.

Uitbreiding energieteelt

- In welke (wereld)regio's liggen er kansen voor energieteelt op 'arme' gronden, welke partijen zijn daarin geïnteresseerd en wat kan de Nederlandse overheid bijdragen (ontwikkelingsprojecten)?
- Als energieteelt op 'arme' gronden als duurzaam wordt gezien, volgens welke criteria kan een land dan als 'arm' gelden?
- Welke actieve rol kan Nederland spelen in de ontwikkeling van teelt op 'arme' gronden in het buitenland?
- Moet duurzaamheid van houtkap worden gebaseerd op de koolstofvoorraad in bossen of op de opnamecapaciteit voor CO₂?
- Onder welke condities is er (nu of in de toekomst) energieteelt op landbouwgrond mogelijk zonder ongewenste indirecte effecten?

Agrarische residuen en residuen uit bossen

- Onder welke condities is afvoer van residuen van de landbouw en uit bossen voor centrale, grootschalige verwerking aantrekkelijker dan lokale, kleinschalige benutting?
- Is de afvoer en benutting van slechts een deel van de landbouwresiduen en het op het land achterlaten van het andere deel (voor behoud van de bodemkwaliteit) handhaafbaar?
- Is de afvoer en benutting van slechts een deel van de kapresiduen en dood hout en het in het bos achterlaten van het andere deel (voor behoud van de kwaliteit van en de biodiversiteit in het bos) handhaafbaar?

Afvalstromen van de industrie en consumenten

- Wat betekent optimalisatie van het cascadeprincipe voor de beschikbaarheid van bioafval voor energie?

Vorbewerking

De vorbewerking is gericht op efficiënter transport tegen lagere kosten en kan ook eventuele afbraak van het organische materiaal tijdens transport en opslag met mogelijk CH₄-emissies tot gevolg tegengaan. Het verdient de voorkeur deze vorbewerking zo dicht mogelijk bij de bron uit te voeren.

- Wat zijn de kosten van torrefactie, hoe afhankelijk zijn deze van de schaal van toepassing en wat is het potentieel voor kostenreductie over de hele keten tot het eindgebruik?
- Hoe verhouden de kosten van verschillende opties voor vorbewerking en transport zich tot elkaar, afhankelijk van type biomassa en geografische kenmerken (onder andere witte pellets, houtchips en zwarte getorificeerde pellets)?
- In welke mate beperkt torrefactie als vorbewerking de vorming van methaan bij afbraak van de biomassa tijdens transport en opslag?
- Welke partijen kunnen torrefactie-installaties nabij de bron in beheer en uitvoering hebben?

Transport en infrastructuur

- Is de opvangcapaciteit van de Nederlandse havens voldoende voor grootschalige verwerking?
- Productgas: is een pijpleidingsysteem voor productgas gewenst of noodzakelijk?
- Groen gas: waar wordt groen gas in het gasnet geïnjecteerd?

Vergassingsinstallatie

- Wat zijn de investeringskosten voor biomassavergassingsinstallaties en hoe zijn deze afhankelijk van type installatie/proces, schaalgrootte, type biomassa en gewenst primair product?
- Wat zijn de productiekosten voor groen gas en voor FT-diesel (Fischer-Tropsch-diesel) en wat kunnen ze op termijn (2030, 2050) worden? Waar in het productieproces bevinden zich de belangrijkste leereffecten? Kan de productie van nevenproducten de businesscase voor groen gas en FT-diesel verbeteren, en hoe belangrijk kan dit zijn?
- Is het mogelijk contracten voor voldoende lange termijn af te sluiten voor de aanvoer van biomassa tegen een voldoende aantrekkelijke prijs?
- Hoe storingsgevoelig is de vergassingsroute voor fluctuaties in de biomassakwaliteit (verschillende typen pellets van diverse herkomst)?
- Onder welke condities is het mogelijk waterstof toe te voegen aan het productgas om de methaanopbrengst te verhogen? Wat kan dat voor de kosten van groen gas betekenen (afhankelijk van de waterstofprijs)?
- Welke mogelijkheden zijn er voor gebruik van restproducten (mineralen)?

Fermentatie van lignocellulose

- Wat zijn de investeringskosten voor cellulose-ethanolinstallaties en hoe zijn deze afhankelijk van schaalgrootte, type biomassa en gewenst product?
- Wat zijn de productiekosten voor cellulose-ethanol (euro per liter) en hoe zijn deze afhankelijk van schaalgrootte, type biomassa en gewenst product?
- Wat kunnen op termijn (2030, 2050) de productiekosten voor cellulose-ethanol zijn en voor cellulose-ethaan? Waar in het productieproces zijn de belangrijkste leereffecten te vinden?
- Welk deel maken de grondstofkosten uit van de productiekosten voor cellulose-ethanol, en hoe kan dit zich tot 2030/2050 ontwikkelen?
- Kan de productie van nevenproducten de businesscase voor cellulose-ethanol verbeteren, en hoe belangrijk kan dit zijn? Welke mogelijkheden zijn er voor gebruik en verwaarding van de restproducten van fermentatie (onder andere lignine/houtstof)?
- Hoe storingsgevoelig is de fermentatieroute voor fluctuaties in de biomassakwaliteit?

Verwerking van pyrolyseolie in een raffinaderij

- Welke kosten zijn er gemoeid met de kwaliteitsverbetering van pyrolyseolie voordat het met de ruwe olie wordt verwerkt in de raffinaderij en hoe zijn deze afhankelijk van het percentage bijmenging? Hoe afhankelijk is dit van de kwaliteit van de oorspronkelijke biomassa?

4 Elektriciteit voor warmtevoorziening en processen in de industrie

4.1 Een mogelijk toekomstbeeld

4.1.1 De rol van P2X in het energiesysteem in 2050

Een toename aan duurzame energie gaat gepaard met een toename aan opwekking van schone elektriciteit. Daarvoor zijn er legio mogelijkheden, zoals zonnepanelen, windmolens, geothermie, en diverse vormen van waterkracht. Aan de gebruikerskant is momenteel de vraag naar elektriciteit maar een beperkt deel van het totaal (in 2013 zo'n 18 procent van het bruto eindverbruik, NEV 2015). Er is dus meer vraag naar (methaan)gas, kolen en transportbrandstoffen. De vraag is daarom enerzijds, of er aan de vraagkant een verschuiving mogelijk is van de genoemde brandstoffen naar elektriciteit, en anderzijds of elektriciteit kan worden omgezet in andere energiedragers, teneinde fluctuaties op te vangen en energiedragers te produceren voor sectoren die anders moeilijk – of tegen hogere kosten – te verduurzamen zijn.

Dergelijke opties worden samengevat met P2X. P staat voor *power*, vrij vertaald in elektriciteit. Elektriciteit kan worden omgezet in andere energiedragers en producten, zogeheten *Power-to-X* (P2X), waar X staat voor 'iets anders'. In dit hoofdstuk bekijken we met name de opties van P2X gericht op de energievoorziening in de industrie. Bij een verschuiving in de vraag van brandstoffen naar elektriciteit staat X onder andere voor warmte (X=H van *heat*). Daarbij gaat het om een verandering in het finale energiegebruik, in dit geval door middel van elektrificatie, waardoor de vraag naar fossiele brandstoffen wordt verminderd. Daarnaast is er de optie P2G (X=G van gas), waarbij het kan gaan om productie van waterstof of methaan. Ook hiermee wordt bij benutting van het geproduceerde waterstof of methaan, de vraag naar fossiele bronnen teruggedrongen. Ten derde is er de optie P2P (X=P van *products*), waar innovatieve productieprocessen op elektriciteit draaien of waterstof (met energie uit elektriciteit gemaakt) wordt ingezet als grondstof voor andere producten.

Een groter aanbod van schone elektriciteit betekent in Nederland vooral meer elektriciteit van windenergie op zee, windenergie op land en zon-PV. Die genereren een fluctuerend aanbod in de tijd. Daarbij kan er een probleem ontstaan in de balans in de tijd tussen vraag en aanbod. Waar tot nu toe de elektriciteitsproductie vraaggedreven is, kan in de toekomst de elektriciteitsvraag meer worden afgestemd op het fluctuerende niet-regelbare aanbod. Dan is het wenselijk om flexibiliteitsopties te hebben. Daarmee wordt de belasting van het elektriciteitsnet – en benodigde investeringen daarin – gereduceerd. Energieopslag in de vorm van elektriciteit is lastig en omzetting naar andere energiedragers is dan gewenst. Het meest in praktijk gebracht is de chemische opslag in batterijen, vooral geschikt voor korte opslagduur, en opslag door oppompen van water naar hooggelegen bergmeren, met ruimtelijke beperkingen en in die vorm geen optie voor Nederland. P2X is een manier om energie op te slaan over langere perioden. P2H voor dagen/weken, P2G voor weken/maanden, en P2P voor langere tijd.

P2X kan twee doelen dienen:

1. Het breder inzetten van (groene) elektriciteit – direct of na omzetting in een andere energiedrager – ter vervanging van fossiele energiedragers
2. Het bieden van flexibiliteit in energievraag en energieopslag, ter inpassing van toename van variabiliteit in elektriciteitsaanbod

In dit hoofdstuk wordt de focus gelegd op P2X voor de industrie, maar elektrificatie en benutting van groen gas¹ of waterstof zijn mogelijk in vele sectoren, ook in het transport (transportbrandstoffen, *power-to-liquids*) en de gebouwde omgeving, maar exacte invulling daarvan wordt hier niet verder besproken.

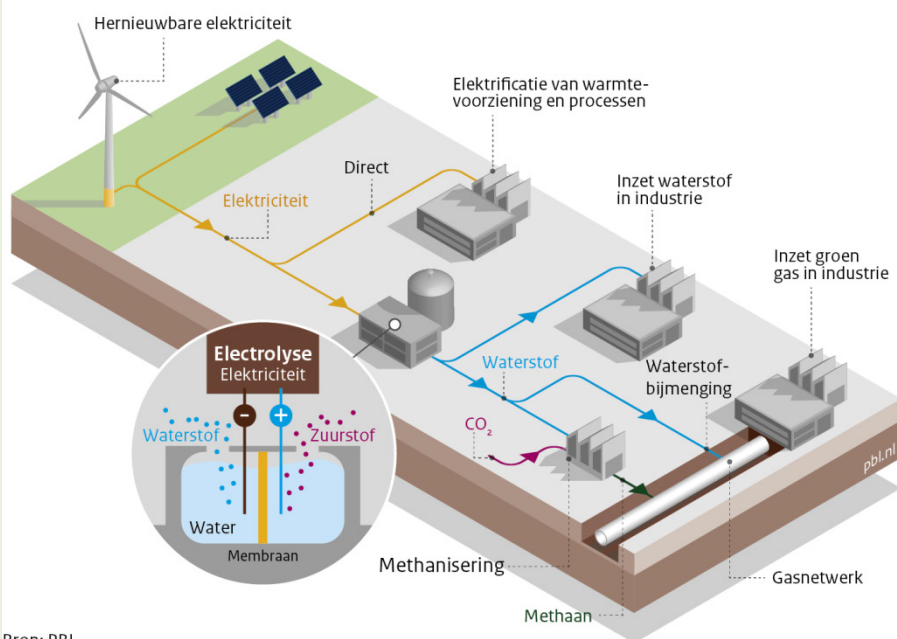
4.1.2 Schets van het toekomstbeeld

Figuur 4.1 geeft een schets op hoofdlijnen van het systeem zoals dat er in de toekomst voor P2X gericht op de industrie uit zou kunnen zien. De verschillende onderdelen en varianten daarvan worden vervolgens in meer detail beschreven. Er is daarbij niet alleen aandacht voor de belangrijkste technologieën, maar ook voor stakeholders en instituties.

Het toekomstbeeld: een kijkje in 2050

Figuur 4.1

Elektrificatie van de industrie (P2X)



Bron: PBL

¹ In dit rapport wordt methaan dat wordt geproduceerd via waterstof en CO₂ aangeduid als groen gas.

P2H: omzetting van elektriciteit naar warmte

In Nederland wordt in 2050 veel elektriciteit met windmolens en zonnepanelen geproduceerd en geïmporteerd en geëxporteerd. De industrie is een grote gebruiker van elektriciteit door de gerealiseerde overschakeling van gasverbranding naar de inzet van elektriciteit voor warmtegeneratie. Dat betekent een grote inzet van onder andere elektrische en elektrodeketels, warmtepompen op basis van warmte in lucht of in (grond)water, stoomrecompressie en thermo-akoestische motoren (voor stoom-herverwarming). De toepassing is afgestemd op de gewenste temperatuur; voor lage temperatuurwarmte in de vorm van warm water zijn andere opties geschikt dan voor hoge temperatuur (vaak stoom). Vele bedrijven hebben ook hybrideketels die op elektriciteit draaien op tijden dat er een groot (goedkoop) aanbod van elektriciteit is, en op een gasketel in tijden van schaarsere elektriciteit of bij piekvraag naar warmte. Bij lage buitentemperaturen, als de warmtepomp aan rendement verliest of er een piekvraag is, springt de waterstof-brandstofcel bij. In combinatie met een warmwaterbuffervat dragen deze flexibele vormen van P2H bij aan een betere balans tussen vraag en aanbod. Netten en ICT zijn mee ontwikkeld. Slimme inzet van P2H gebeurt in de vorm van een verregaand geautomatiseerde prijsgestuurde vraag, en doorwerking van *smart grids* in de industrie. Een niet-commerciële partij weet precies in welke wijk en regio welke combinatie van netten en aanvullende systemen de meest geschikte optie biedt, rekening houdend met wat er al ligt en welke bronnen in de omgeving toegankelijk zijn.

P2G: omzetting naar waterstof

Grote afnemers van elektriciteit zijn de waterstoffabrieken, waar elektrolyse de basistechnologie is, met diverse uitvoeringsvormen. De drie belangrijkste waar nu zicht op is zijn: Alkaline-elektrolyse, PEM-elektrolyse (Proton Exchange Membrane), en SOE-cellen (Solid Oxide Electrolysis) (FCHJU, 2014). De PEM-elektrolyse is door de snelle opstart en korte opschaltijd geschikt om met een variabel elektriciteitsaanbod waterstof te produceren. Gedurende korte tijd kan zelfs boven vollast niveau worden geproduceerd. SOE-cellen werken bij hoge temperatuur en kunnen eventuele restwarmte als input gebruiken. Elektrolyse wordt in relatief kleine modules uitgevoerd, waardoor vrij gemakkelijk kan worden ingespeeld op het variabele aanbod van elektriciteit. Hoewel er voldoende draaiuren worden gemaakt om de kapitaalslasten niet te hoog te laten worden en een relevante waterstofproductie te leveren, wordt er ook gestuurd op inzet van zo goedkoop mogelijke elektriciteit. Een klein deel van de productiecapaciteit, dat er specifiek op is gericht om pieken van goedkope elektriciteit te kunnen benutten, is ingericht met relatief eenvoudige elektrolyse-eenheden met lagere investeringskosten, die ondanks lagere efficiëntie al bij weinig draaiuren rendabel draaien. Op deze wijze draagt deze vorm van benutting van de elektriciteit bij aan het inspelen op het variabele aanbod. Er zijn ook bedrijven die zelf waterstof produceren in combinatie met een opslagbuffer voor eigen gebruik.

Waterstof wordt getransporteerd via pijplijnen of tanks voor gebruik door een industriële consument. Waterstof kan worden opgeslagen als gas, gecomprimeerd en gekoeld als vloeistof, of in een binding met een vaste stof. Daarmee biedt het meer flexibiliteit dan elektriciteit. Bij afnemers wordt het waterstof, behalve als grondstof, veelal ingezet als brandstof om middels een WKK elektriciteit en warmte lokaal op te wekken. Dit is met name interessant als het aanbod wind en zon laag is en elektriciteit daarmee duur. Warmtepompen draaien op zelf opgewekte elektriciteit of op die van het grid. Waterstof-verbrandingsketels zorgen voor warmte bij industrieën die minder elektriciteit nodig hebben.

Overschot van waterstof wordt voor zover technisch mogelijk bijgemengd in het gasnet of gebruikt voor de productie van methaangas (zie volgend kopje). Bijmenging kan slechts in beperkte mate vanwege de brandspecificatie en extra corrosie van leidingen of onderdelen die kan optreden, maar de apparatuur is in 2050 aangepast aan een nieuwe gassamenstelling.

P2G: omzetting naar methaan

De industrie die afvalstromen van CO of CO₂ heeft, of werkt met vergassing van biomassa (zie ook hoofdstuk 3 over biomassa), kan het waterstof goed benutten. Ze kunnen het in een reactie omzetten in methaan (aardgas) en hoeven daarom minder aanpassingen in de infrastructuur en branders te maken. De omzetting naar methaangas vindt bij voorkeur plaats middels biologische processen om de kosten laag te houden. Het geproduceerde methaan wordt geïnjecteerd in het gasnet. Verder biedt ondergrondse opslagcapaciteit de mogelijkheid om nog meer energie tijdelijk vast te leggen. Daarmee biedt P2G een oplossing voor de discrepantie tussen vraag en aanbod van elektriciteit over langere perioden (zoals de seizoenen).

P2P: innovatieve productieprocessen

Diverse thermische processen zijn vervangen door elektrochemische processen, waarbij elektriciteit in de vorm van druk, bijvoorbeeld in combinatie met een membraan met katalysator wordt gebruikt. Scheidingsprocessen worden steeds meer uitgevoerd op basis van elektriciteit in plaats van verdamping.

Elektriciteit wordt ook gebruikt om waterstof als grondstof te produceren. Dat wordt vervolgens ingezet in vele productieprocessen zoals het maken van ammoniak, koolstofhoudende brandstoffen (onder andere methaan, maar ook methanol, mierenzuur), opwaarderen van gas uit biomassa, synthese van chemische producten (High Value Chemicals, HVC, zoals de plastic polyethyleen), en eventueel nog het ontzwellen van brandstof. Het gebruik van waterstof bij productie van hoogwaardige producten betekent dat de prijs van waterstof in die gevallen minder belangrijk is (het vormt een relatief klein deel van de productiekosten), en duurzaamheid een meerwaarde levert. In vele gevallen kan de prijs daarvan worden doorberekend zonder drastische gevolgen in de productprijs.

Balans in vraag en aanbod van elektriciteit

Met de grootschalige toepassing van P2X zijn het elektriciteitssysteem en het gassysteem meer verweven geraakt. Het raakvlak tussen de verschillende energiedragers is verbreed ten gevolge van P2X, en P2X vindt niet meer alleen plaats bij de uiteindelijke consument, maar ook bij leveranciers van warmte, gas, en producten. De interface tussen energiedragers, elektriciteit, gas en warmte, is verstrengeld geraakt, en is tweerichtingsverkeer. Het gas-, elektriciteits-, en warmtenetwerk vallen allemaal onder de verantwoordelijkheid van een maatschappelijk gerichte partij, die de kennis heeft om per situatie te beoordelen op welke manier het goedkoopst en meest efficiënt energie kan worden geleverd. Zo worden op slimme manieren de meest kosteneffectieve oplossingen gevonden.

Tot hier de beschrijving van het toekomstbeeld. De geschetste contouren kunnen helpen richting te geven aan de ontwikkeling. Uiteraard kan dit beeld – zelfs bij doorzetten van P2X in de praktijk – er op tal van punten anders uitzien dan geschetst. Dat geldt zeker ook voor het laatste deel: er komen nieuwe of bekende partijen in nieuwe rollen; daarvoor zijn nog veel varianten mogelijk. Producenten van gas en eigenaren van back-upcapaciteit voor elektriciteitsproductie zouden een en dezelfde partij kunnen zijn, en daarmee vervaagt de grens tussen elektriciteitsmarkt en gasmarkt. Industrie zou zelf (mede)producent van waterstof en methaan kunnen worden, of het over kunnen laten aan specialistische partijen. Afspraken over transmissiecapaciteit zullen moeten worden herzien om het nieuwe systeem effectief te kunnen laten werken. Bij een grootschalig elektrisch supergrid dat zich uitstrekt over heel Europa en mogelijk Noord-Afrika kan P2X minder noodzakelijk zijn door grotere export en import tussen de landen, waardoor vraag en aanbod beter in balans kunnen worden gebracht. Het is echter waarschijnlijk dat er ook bij grotere interconnectiecapaciteit in Europa behoefte is aan aanvullende opslagcapaciteit in de vorm van P2G.

Het is duidelijk dat belangen op een andere manier verdeeld zullen zijn, en instituties zullen rekening moeten houden met de veranderende dynamiek tussen de spelers en het helpen formuleren van de onderlinge verantwoordelijkheden. Verantwoordelijkheid voor stabiliteit en levering van energie is daar natuurlijk één van. De relatieve inzet van elektriciteit, waterstof en methaangas in het toekomstige finale gebruik is onbekend. Gaandeweg zullen op basis van ervaringen keuzes worden gemaakt.

4.1.3 Potentieel op lange termijn

Het potentieel van P2X voor de lange termijn in Nederland wordt enerzijds bepaald door de mogelijkheden om meer CO₂-arme elektriciteit te produceren of te importeren en anderzijds door beperkingen en kansen van andere energiedragers.

Er zijn binnen Nederland wel limieten aan de hoeveelheid opgesteld vermogen aan wind en zon-PV. In een rapport van Lemmens, J. & R. van den Wijngaart (2014) is becijferd dat er bij *volledige* benutting van dakoppervlak 66 gigawatt peak PV-vermogen kan worden geïnstalleerd op 400 vierkante kilometer, met een jaarlijkse opwekking van 180 tot 300 petajoule (bij aangenomen efficiëntieverbetering boven 16 procent). Dat potentieel ligt hoger als ook beschikbare stukken land worden ingezet voor zonneparken. Huidige schattingen voor wind bedragen ongeveer 8 gigawatt peak op land en 35 op zee, voornamelijk bepaald door de mogelijkheden van ruimtelijke inpassing, wat neerkomt op ~50 petajoule op land en ~450 petajoule op zee. Het totaal potentieel van wind- en zon-PV is zo'n twee keer de huidige elektriciteitsvraag en daarmee is er aanzienlijk potentieel van 300-400 petajoule voor extra toepassingen van in Nederland geproduceerde elektriciteit. Verdere CO₂-arme elektriciteitsopwekking vindt mogelijk plaats door kernenergie, uit biomassa, of met diepe geothermie (Ros, J. & R. Koelemeijer 2011). Ter vergelijking: in 2013 werd 22 petajoule door zon en wind in Nederland opgewekt (CBS 2015).

Bij de omzetting van elektriciteit uit zon- en windenergie in waterstof en vervolgens in methaan gaat energie verloren. Bij een rendement in de elektrolyse van 70 tot in de toekomst mogelijk 90 procent is het potentieel voor waterstofproductie uit Nederlandse bronnen 200 tot 350 petajoule. Eventuele vervolgomzetting naar methaan kan met rendementen van 70 tot 85 procent (de resterende 15 tot 30 procent is mogelijk bruikbare restwarmte) bij chemische omzetting, tot mogelijk 95 procent in een bioreactor, wat neerkomt op maximaal 150 tot 300 petajoule opbrengst aan groen gas als alle elektriciteit van maximale inzet van zon- en windenergie daarvoor zou worden ingezet.

De energievraag van de industrie (focus van de inzet van P2X in dit rapport) is groot en biedt op alle drie de manieren – P2H, P2G, en P2P – grote potentie tot gebruik van duurzame elektriciteit. De warmtevraag (thermisch verbruik) door de industrie was met 386 petajoule in 2013 (Monit, 2015) ongeveer 12 procent van het totale primaire (bruto)energieverbruik in Nederland. Dit wordt momenteel grotendeels uit aardgas, kolen, en olie geproduceerd, en is goed voor ~24 megaton CO₂-emissie. Deze warmte zou in plaats van uit fossiele bronnen ook kunnen worden geleverd door groene elektriciteit in combinatie met P2X-opties: direct met P2H, of uit het (waterstof)gas via P2G. In het geval van P2H kan de efficiency van de warmteproductie (CoP) in het geval van elektriciteit (bijvoorbeeld met warmtepompen) veel hoger liggen dan bij gebruik van gas. Middels P2P kan een deel van het thermisch verbruik van industrie direct op elektriciteit gaan draaien, mits door onderzoek en innovatie de juiste elektrochemische processen geïdentificeerd worden. Dit ter illustratie dat er binnen industrie alleen al enorm potentieel bestaat in vraag.

In 2013 was daarnaast de vraag naar waterstof circa 30 petajoule. Waterstof wordt als grondstof ingezet bij productie van ammoniak, bij het ontzwellen van brandstoffen, en kan als grondstof worden gebruikt voor synthese van hoogwaardige chemicaliën (HVC) zoals 'plastic'. Dit waterstof zou in de toekomst met elektrolyse kunnen worden geproduceerd. Waterstof kan verder dienen als opslag van energie en voor productie van elektriciteit en warmte wanneer nodig. Bijmengen van waterstof in het gasnetwerk tot 2 procent van huidig verbruik zou leiden tot een extra vraag van circa 30 petajoule.

4.2 Huidige ontwikkelingen

De toepassing van P2X in een koolstofarm energiesysteem begint uiteraard met de productie van CO₂-arme elektriciteit. De inzet van zon- en windenergie is in Nederland nadrukkelijk in opkomst, maar in de huidige situatie zodanig bescheiden dat P2X nog weinig toegevoegde waarde heeft. In Duitsland is die ontwikkeling al verder, zijn de problemen met dit variabele aanbod meer voelbaar geworden en heeft mede daardoor het verkennen van P2X als mogelijke oplossing voor problemen eerder aandacht gekregen. In Nederland is dit effect wel merkbaar geworden in de import van elektriciteit, maar nog in beperkte mate.

De nu nog bescheiden rol van zon- en windenergie betekent dat de toekomstige mogelijke meerwaarde van P2X nog niet onmiddellijk herkenbaar is in aantrekkelijke businesscases op de korte termijn. Ook de relatieve prijs van elektriciteit ten opzichte van gas beïnvloedt de aantrekkelijkheid van P2X-opties. Er is in de afgelopen jaren een aantal studies op dit onderwerp geweest:

Een belangrijke stap in de verkenningsfase was een haalbaarheidsstudie van Joode, J., de, L. Grond, et al. (2014) waarin is bekeken wat de verschillende P2G-opties kosten en wanneer welke optie kosteneffectief kan worden ingezet. P2P wordt hierbij niet meegenomen. Hieruit komt naar voren dat P2G een robuuste optie is als onderdeel van een toekomstige energiemix die vergaande reductie van broeikasgasemissies mogelijk maakt via vergaande implementatie van energie uit zon en wind. Verschillende aannames als een 'schaduw'-CO₂-prijs om de gewenste emissiereductie te bereiken, en toekomstige ontwikkeling van prijzen en kosten, zijn natuurlijk inherent onzeker.

Ook Ros, J. & R. Koelemeijer (2011) concluderen dat, met name bij restricties aan beschikbare biomassa en CCS, P2G een belangrijke rol speelt bij de energievoorziening, en niet alleen moet worden gezien als optie om vraag en aanbod beter (bijvoorbeeld over de seizoenen) op elkaar af te stemmen, maar ook als optie voor de productie van groen (aard)gas. Voor opvang van variabele elektriciteit over korte tijdspannes is P2H de goedkoopste optie.

Gerwen, R. v., R. Bal, et al. (2015) heeft verder vanuit een systeemperspectief becijferd welke P2X-opties positief naar voren komen op meerdere aspecten; economisch, flexibiliteit, duurzaamheid en risico's. P2H komt daar uit als economisch – nu en in de nabije toekomst – de meest aantrekkelijke optie. Met name elektrische ketels in industrie scoren hoog in zowel kosten als geschiktheid voor flexibele elektrificatie. P2G in de vorm van waterstof, zeker in combinatie met brandstofcel en micro-WKK wordt rendabel geacht indien de investeringskosten dalen, en er voldoende momenten zijn met een lage elektriciteitsprijs. P2G in de vorm van methaangas is mogelijk interessant als biologische productie opgeschaald kan worden. Chemische methanisering scoort vooralsnog laag op economische aantrekkelijkheid.

Volgens Krebbekx, J., M. Afman, et al. (2015) zijn elektrische boilers en stoomketels als eerste rendabel bij elektriciteitsoverschot, en daarna pas waterstofelektrolyse en warmtepompen. In het geval van enkel marginale kosten komen warmtepompen er het meest gunstig uit, gevolgd door elektrische boilers en stoomketels en elektrolyse.

4.2.1 Technologische ontwikkelingen

Elektrificatie: P2H en P2P

Warmtepompen kunnen restwarmte opwaarderen en geschikt maken voor hergebruik in het proces alsmede omgevingswarmte benutten. Vanaf een zogenoemde 'Coefficient of Performance' van 4 ($\text{CoP} = (\text{energie-output als warmte}) / (\text{energie-input als elektriciteit})$) is een warmtepomp bij huidige elektriciteitsprijzen al rendabel (ECN, privécommunicatie). Deze technologie is met name inzetbaar bij lage temperatuurwarmte, al wordt er onderzoek gedaan naar manieren om de temperatuur te kunnen verhogen, en naar verbetering bij lagere buitentemperaturen. De belangstelling voor warmtepompen in industrie groeit, maar ondanks dat inzet ervan mogelijk wel rendabel kan zijn, is daadwerkelijke investering afhankelijk van meerdere factoren: energiebesparing is geen corebusiness voor bedrijven en staat daarom niet hoog op de agenda. Daarbij moeten investeringen een bepaald rendement opleveren, en investeringen in energie moeten daarin concurreren met andere investeringen. Voor directe verwarming door middel van elektriciteit (dus met een $\text{CoP} \sim 1$) is het aantal uren dat de elektriciteitsprijs deze technologie rendabel maakt ten opzichte van gas nog te laag.

Businesscases in de procesindustrie

Via de topsector Energie en TKI ISPT² zijn er in samenwerking met Berenschot, CE Delft en industrieën vijf businesscases onderzocht om de procesindustrie verder te elektrificeren (Krebbekx, J., M. Afman, et al., 2015). Verwachte energie- en prijsscenario's voor 2023 en uitkomsten daarvoor werden bekeken. Twee van de businesscases kwamen positief uit (zie tekstkader), waarmee verdere actie wordt verkend.

Mechanische dampcompressie bij Dow Chemicals

Uit het Topsector-onderzoek kwam naar voren dat het opwaarderen van stoom een positieve businesscase oplevert, met name in combinatie met een WKK. Hoe groter de stoomcapaciteit, hoe sneller het systeem rendabel bleek. Een unit elektriciteit in combinatie met restwarmte levert dan 7 tot 10 eenheden warmte ($\text{CoP}=7-10$). Opvallend is dat vollast draaien aantrekkelijker is dan variabel gebruik omdat zelfs bij de hoge elektriciteitsprijzen de warmte goedkoper is dan met een gasketel (met CoP van 1). Er wordt nu gekeken naar de mogelijkheid om een demoproject op site op te zetten.

Peak shaving bij Akzo

Ook bij Akzo kwam de businesscase positief uit, maar om een heel andere reden. Het afschakelen van chloorproductie bij hoge elektriciteitsprijzen op de onbalansmarkt levert zodanig veel op dat het rendabel kan zijn (zogenoemde peak shaving). Van de 200-250

De andere businesscases, van elektrische stoomketels en elektrische luchtverwarming voor een droogtoren, kwamen (nog) niet positief uit bij de huidige prijzen (en prijsfluctuaties) maar leverden belangrijke nieuwe inzichten op. In een specifiek geval waarin elektrificatie werd overwogen, bleken de kosten van aanleg van verzwaring van de elektriciteitskabel een knelpunt. Ook de tarieven voor hogere piekafnamen werden aangemerkt als barrière.

² Top Kennis Instituut: Institute for Sustainable Process Technology

Hybride ketels zouden een mogelijk alternatief zijn, maar daar wordt momenteel weinig in ontwikkeld. De systemen zijn relatief duur in de huidige beleidscontext en met het huidige marktperspectief, bijvoorbeeld de zekerheid over krachtig beleid richting vergaande emissie-reductie ontbreekt voor potentiële ketelproducenten. Door het nog geringe aanbod van duurzame elektriciteit en het kleine kostenvoordeel ten opzichte van gas is een businesscase nog niet positief.

De huidige elektriciteitsintensieve industrie betreft vooral de productie van chloor, aluminium en siliciumcarbide. Door de grote schaal kunnen deze industrieën ook als eerste inspelen op de onbalansmarkt en/of een rol spelen in de stabiliteit van het elektriciteitsnetwerk. Ook andere energie-intensieve industrieën kunnen hierbij een rol gaan spelen. De ontwikkelde businesscase door ISPT en Akzo heeft hier een stap in gezet.

Naast deze productieprocessen kunnen ook andere processen of processtappen elektrochemisch in plaats van thermisch plaatsvinden, zoals scheidingsprocessen door membranen (bijvoorbeeld bij papierrecycling). Deze processen bieden grote mogelijkheden, maar veel onderzoek bevindt zich nog in een vroege fase of vindt nog niet plaats.

Een specifieke procesinnovatie met aanzienlijk potentieel, met name bij hogere CO₂-prijzen, betreft onderzoek naar gebruik van elektriciteit in de productie van ammoniak. De eerste mogelijkheid is om met elektrolyse waterstof te produceren dat de grondstof vormt voor de ammoniaksynthese. De tweede mogelijkheid is directe elektrochemische productie van ammoniak³. Ammoniak is een belangrijk bestanddeel van kunstmest, dat grotendeels bestaat uit ammoniumnitraat. Ook kan ammoniak in specifieke situaties als energiedrager dienen en worden ingezet in een gasturbine. Doordat ammoniak vloeibaar is bij 20°C en 10 bar is transport en opslag relatief makkelijk. De toxiciteit en mogelijke geurhinder vereisen zorgvuldig handelen. Ammoniak als brandstof is overigens geen nieuw idee. In de Tweede Wereldoorlog reden er in België bussen op deze stof, en in 1954 werd het zelfs gebruikt als brandstof voor het raketvliegtuig X15. In 2013 produceerde Marangoni een hybridebenzine/ammoniak-motor. Er vindt ook onderzoek plaats naar ammoniakbatterijen, in feite in de vorm van een brandstofcel. Dit biedt mogelijkheden voor energieopslag, maar is nog in de prille ontwikkelingsfase. Ook mierenzuur als brandstof (of beter gezegd als waterstoffdrager) bevindt zich in de ontwikkelingsfase, en wordt momenteel onderzocht op geschiktheid binnen de mobiliteitsector⁴.

Omzetting in gas: P2G

Veel van de technologieën voor elektrolyse of andere vormen van waterstofproductie en daaropvolgend de synthese van methaan worden nog niet commercieel toegepast. Een aantal is in de opschaal- en demonstratiefase (pre-commercial). Sommige zijn nog in de *discovery* fase. Een overzicht van de meest bekende technologieën op het gebied van P2G is te vinden in Tabel 4.1. De investeringskosten zijn nog hoog, en de huidige elektriciteitsprijs is ook te hoog om elektrolytische productie van waterstof aantrekkelijker te maken dan productie uit aardgas.

³ O.a. Prof.dr. F. Mulder TU Delft

⁴ TUE; Teamfast.nl

Tabel 4.1 Overzicht technologische ontwikkelingen

Eindproduct	Technologie	Efficiëntie	Efficiëntie forecast 2030	Kapitaalslasten	Kapitaalslasten forecast 2030
Waterstof-productie	Alkaline elektrolyse ⁴	73%	79%	1000-1200 EUR/kW	370-800 EUR/kW
	Proton exchange membrane (PEM) ^{1,4}	69%	84%	1860-2320 EUR/kW	250-1270 EUR/kW
	Solid Oxide Elektrolyse (SOE) ^{2,5}		~100%		280-440 EUR/kW ³
	Microbiële elektrolyse cel (MEC) ^{2,6}				
Methaan-productie	Chemische methanisering ⁵	70-85%		700-1000 EUR/kW _{CH4}	
	Biologische methanisering ⁵		95-100% ^{1,3}		100-200 EUR/kW _{CH4}

Grootschalige toepassing van de P2G-opties is nog niet aan de orde, maar er bestaan steeds meer demonstratieprojecten. Commerciële toepassing wacht nog op het dalen van de kosten van de verschillende technologieën. Onzekerheid op het gebied van prijzen van elektriciteit en gas in de toekomst en de momenteel lage CO₂-prijs spelen daarbij een rol.

Een van de installaties in Nederland is een kleinschalige (7 kilowatt) PEM-elektrolyse + chemische methanisatie plant van Stedin in Rozenburg (2014). De energieconversie van elektriciteit naar methaan is 35 procent, en het gas voldoet aan de specificaties voor invoeding in het gasnet (Dorp, R., van, 2013; NorthSeaPowerToGas, 2015; Vlap, H., J. Holstein, et al., 2015). De installatie heeft daarmee laten zien dat het principe werkt, maar kan bij huidige elektriciteitsprijzen niet economisch rendabel draaien. In Delfzijl wordt een 12 megawatt (en daarmee de grootste tot nog toe) PEM-elektrolyse-unit gebouwd, door onder andere Siemens en Stedin om syngas van de biovergassingsinstallatie (door Torrgas en Gasunie) op te waarderen. Volgens de oorspronkelijke planning zou deze in 2016 online moeten komen maar de ontwikkeling van met name de vergassingsunit kampt nog met technische en financiële uitdagingen.

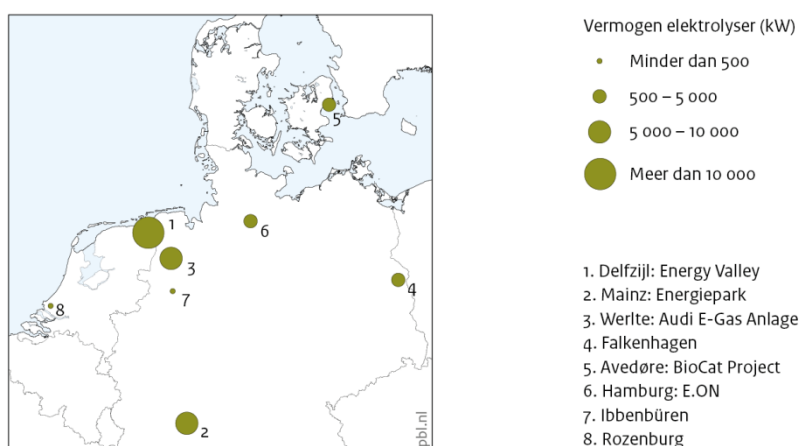
Ook in de rest van Europa is er een aantal demonstratieprojecten op het gebied van P2G dat via verschillende wegen de conversie van elektriciteit naar gas wil bewerkstelligen (NorthSeaPowerToGas, 2015). Vooral Duitsland en Denemarken lopen hierin voorop (zie figuur 4.2).

In Duitsland richten deze projecten zich veelal op toepassing in transport: productie van waterstof voor een waterstofnetwerk voor vervoer, en productie van synthetische brandstoffen. In juli 2015 is in Mainz een 6 megawatt PEM-elektrolyse-installatie in gebruik genomen voor productie van waterstof ten behoeve van met name brandstofcelauto's en invoeding in het gasgrid. Door Siemens en Linde is de installatie geoptimaliseerd voor het variërende aanbod van wind- en zonnestroom. Deze installatie zou ongeveer 2.000 auto's van brandstof kunnen voorzien. In augustus 2015 is de 140 kilowatt PEM-elektrolyse-installatie, gebouwd door ITM Power, in Ibbenbüren online gegaan; deze is gericht op opslag van elektriciteitsoverschot. Het geproduceerde waterstof wordt bijgemengd in het bestaande gasgrid. Bij tekorten aan elektriciteit wordt dit door een WKK-installatie weer omgezet in elektriciteit en warmte. Daarmee is het een van de eerste projecten die elektriciteit, gas, en warmte integraal koppelt. Etogas heeft in opdracht van Audi de bouw van een grote e-gasfabriek voltooid in 2013, waar een grote PEM-electrolyser waterstof levert voor mobiliteit, dat deels

verder wordt verwerkt met CO₂ van het nabijgelegen biogas voor synthetisch methaan dat wordt ingevoed ter compensatie van op e-gas tankende auto's. E.ON in Duitsland heeft ook twee P2G-installaties, in Falkenhagen en in Hamburg, waarbij het waterstof wordt bijgemengd in het gasnetwerk.

In Denemarken is in juni 2015 begonnen met de constructie van een project bij het afvalwaterverwerkingsbedrijf Avedøre biologische methanisering (Dorp, R., van, 2013). Met gebruik van de Electrochaea-bacterie wordt waterstof en CO₂ omgezet naar methaan, in het 1 megawatt BioCat-project⁵ door onder andere Electrochaea, Hydrogenics en Audi. Kosten van dit project zijn geraamd op 6,7 miljoen euro.

Figuur 4.2
Selectie van P2G-demonstratieprojecten



Bron: Dorp 2013, NorthSeaPowerToGas 2015

4.2.2 Infrastructurele ontwikkelingen

Welke P2X-optie vanuit een breed maatschappelijk welvaartsperspectief de meest nuttige toepassing biedt, kan ook sterk samenhangen met de infrastructuur situatie en de ontwikkelingen van de APX- en onbalansmarkt voor flexvermogen. Momenteel wordt de infrastructuur van gas, elektriciteit, en warmte niet integraal bekeken, maar dat zal van toenemend belang zijn. Behoeftte aan en innovatie van flexvermogen zijn in opkomst, en kan steeds beter worden meegenomen in afwegingen omtrent investeringen. De aansluitplicht op het elektriciteitsnet zorgt er nog voor dat er niet meteen aandacht is voor alternatieven, maar dat kan veranderen. Ook flex-opties worden nog niet meegenomen in de afweging, mede doordat productie en afname van elektriciteit gescheiden is van de netbeheerder.

Bij omzetting naar methaangas kan van het bestaande gasnetwerk in Nederland gebruik worden gemaakt. De extra conversieverliezen die hiermee gepaard gaan en het relatief laagwaardige gebruik van waterstof moeten worden afgewogen tegen het gemak van gebruik van bestaande infrastructuur. De technische mogelijkheid tot invoeding van waterstof in het gasnet hangt samen met de Wobbe-index van het aardgas. Deze hangt af van de verbrandingswaarde (calorische waarde) en dichtheid van het gas, en moet zo constant mogelijk blijven omdat de gasbranders hierop worden afgesteld. De Wobbe-index verschilt aanzienlijk tussen Gronings (laagcalorisch) aardgas en hoogcalorisch aardgas (zoals gebruikt in de industrie). Waterstof verlaagt de calorische waarde, en mag niet tot hoge percentages worden bijgemengd in het Groningse aardgas. Sinds 1 januari 2016 mag er tot 0,5 procent worden bijgemengd. Dit omdat sommige apparatuur, bijvoorbeeld gasmotoren, kloppedrag kunnen

⁵ Biocat-project.com

gaan vertonen bij te lage calorische gaswaarde. In een project op Ameland door GasTerra, Joulz en Stedin is aangetoond dat 20 procent bijmenging ook mogelijk is bij een opzet met uitsluitend nieuwe (standaard) branders. Waar precies de branders zitten die moeite hebben met hogere percentages invoeding van waterstof is niet duidelijk. Dit jaar is afgesproken tussen overheid en gaspartijen⁶ dat nieuwe installaties, en vanaf 2030 alle Nederlandse installaties, geschikt moeten zijn voor bredere gasspecificaties, in eerste instantie om ook hoogcalorisch gas te kunnen verbranden. Dit zal wellicht ook mogelijkheden bieden voor grootschaliger inzet van groen gas en/of bijmenging van waterstof. Snelle, grote, fluctuaties vormen echter ook dan een probleem, in verlies van procesefficiëntie of uitval.

Invoeding (met name van biogas) vindt vooral plaats in de lagedruknetwerken, dit is makkelijker wanneer de specificatie verruimd wordt, zoals ook per 1 januari 2016 van toepassing zal zijn. Er worden tests gedaan met invoeding op het 40 bar hogedruknetwerk door onder andere Gasunie, waar het tot minder fluctuatie zou leiden. Fluctuaties van de gasspecificatie kunnen overigens ook op het hoogcalorische net tot efficiëntieverlies lijden als de branderinstelling niet op tijd wordt aangepast.

Ook de vraag of/welke delen van het gasdistributienet een plaats hebben in de toekomst is actueel in verband met grootschalige vervanging van gietijzeren en asbest-cement-distributieleidingen⁷ tot 2029.

Netbedrijven opereren volgens de wet onafhankelijk van energiebedrijven en vervullen een maatschappelijke functie. Waar nieuwe of verstevigde infrastructuur nodig is hebben zij de taak die aan te leggen, waarbij de kosten gesocialiseerd worden. Dat dit niet altijd de goedkoopste oplossing biedt voor de maatschappij begint langzaam duidelijk te worden. Er is echter nog weinig aandacht voor het toekomstbestendig maken van deze situatie, in het licht van een veranderend vraag- en aanbodprofiel van elektriciteit.

Benodigheden voor infrastructuur hangen sterk samen met inzet van opslagtechnologieën en P2X. In een studie van DNV-GL (2014) wordt geschat dat meer dan 50 procent van nieuwe transmissiecapaciteit kan worden vermeden door productie en consumptie van elektriciteit dicht bij elkaar te plannen. Hiervoor is een gebalanceerde mix van hernieuwbare bronnen nodig. Overigens is zelfs in het scenario van decentrale productie en consumptie (bij vermijden supergrid) al een verdubbeling van de capaciteit van het Europese elektriciteitsnet nodig – van ~70,000 gigawatt-kilometer naar ~140,000 gigawatt-kilometer. Uitbreiding van transmissiecapaciteit is, naast de hoge kosten, ook lastig vanwege hoge maatschappelijke weerstand tegen nieuwe elektriciteitsmasten. Door dergelijke vertraging kan het wel 10 jaar duren voordat nieuwe capaciteitsprojecten van de grond komen.

4.2.3 Institutionele ontwikkelingen

Duidelijke kaders zijn nodig om zekerheid te bieden en investeringen mogelijk te maken zodat de benodigde innovatie, demonstratie, en adoptie een kans kan krijgen. Veel instituties zijn historisch gegroeid en verandering daarbinnen is niet altijd makkelijk, zeker als er grote gevestigde belangen zijn.

De prijs van elektriciteit is gebaseerd op marginale kosten. Dit is afkomstig vanuit een marktmodel dat gebaseerd is op een stabiel energiesysteem op basis van gecentraliseerde (fossiele) energie, waarbij de kosten van de infrastructuur ondergeschikt zijn. Door meer

⁶ <http://www.gasterra.nl/nieuws/van-l-gas-naar-h-gas>

⁷ www.stedin.nl

elektriciteit van zon- en windenergie worden de marginale kosten lager, omdat de input van zon en wind gratis is, en is juist de investering en infrastructuur bepalend voor de daadwerkelijke kosten. Het gevolg is dat de marktstructuur niet meer volledig aansluit bij de invulling daarvan en de energiebedrijven financieel onder druk komen te staan.

Er zijn meerdere modellen mogelijk die variabele bronnen beter laten integreren in de markt dan het huidige model en het zou goed zijn met de netbeheerders (transmissie en distributie), energieleveranciers, en andere stakeholders om tafel te gaan zitten om dit te ontwikkelen. Elektriciteit is niet meer alleen een product, de 'service'kant gaat een grotere rol spelen. De waarde van flexibiliteit, nabijheid tussen bron en afnemer van elektriciteit, voorzien van back-upcapaciteit, oplossen van congestie op het elektriciteitsnet, of andere factoren zouden mee kunnen worden genomen in de beprijzing van elektriciteit (Boot, P., J. Jong, de, et al., 2014; Duvoort, M., B. Pruiksma, et al., 2015; Stapersma, P., 2014). In dat licht zou er ook nog een derde groep partijen zijn die om tafel zou moeten bij deze ontwikkeling: grootverbruikers. Het flexvermogen moet aantrekkelijk genoeg zijn om in te investeren en in te passen in de productie, en er moet voldoende markt voor zijn. Daarbij moet het goed worden afgestemd met omliggende landen.

P2X kan in deze ontwikkeling een nuttige rol spelen door aan de vraagkant in te spelen op variabele elektriciteit; hetzij door afschakelen van vraag, toevoegen daarvan, of hybrideoplossingen die op zowel elektriciteit als andere brandstof kunnen draaien. De verantwoordelijkheden en regelgeving moeten hierop gaan inspelen. Door de fundamentele transitie van het energiesysteem, en het vervagen van grenzen tussen energie-opwek, -conversie, -producent, en -consument, moeten de actoren en hun verplichtingen en verantwoordelijkheden heroverwogen worden. De afweging tussen verschillende typen van investeringen binnen P2X (elektrificatie bij de gebruiker, inzet van waterstof of power-to-gas) moet juist ook binnen institutionele kaders een plaats krijgen om het risico van stijgende maatschappelijke kosten te beperken. Bijvoorbeeld de verantwoordelijkheden van gasnetbeheerder, elektriciteitsnetbeheerder of warmtenetbeheerder moeten duidelijk zijn voordat zich grote verschuivingen tussen de verschillende energiedragers kunnen voordoen.

4.3 Uitdagingen voor de komende periode

P2X omvat een scala aan opties die alle in meer of mindere mate ingrijpen in de structuur van het energiesysteem. Dat maakt dat elke vernieuwing van een bepaald onderdeel afhankelijk is van de vernieuwing van een andere onderdeel en vice versa. Op onderdelen is er immers nog nauwelijks een aantrekkelijke businesscase te vinden. Het risico van stagnatie bij dergelijke kip-ei-situaties dreigt. Aan de hand van het geschetste toekomstbeeld en de huidige situatie komt een groot aantal vragen naar boven waarop een antwoord gewenst is om de juiste afweging voor deze systeemoptie te kunnen maken. Er kunnen daarom beleidsinstrumenten worden overwogen om bedrijven te stimuleren om te investeren in kennis, teneinde een antwoord te vinden op deze vragen en de P2X-systeemoptie open te houden voor de toekomst. Onderstaand een voorzet van vragen, zonder volledig te zijn, gegroepeerd per onderwerp, waarvan wij voorzien dat die verder moeten worden onderzocht.

P2X overkoepelend: infrastructureel en institutioneel

Om verdere invulling van P2H en de rol daarvan in het energiesysteem te verkennen, zijn belangrijke vragen onder andere:

- Is de tariefstructuur voor elektriciteit belemmerend voor P2X en in welke mate?
- Heeft P2X een maatschappelijke functie?

- Wanneer wordt het wenselijk om in de ruimtelijke planning P2X-opties mee te gaan wegen? (warmtenetten/verzwaring elektriciteitsnetten/aanleg en onderhoud gasnetwerk)
- Hoe groot moet worden ingezet op interconnectie met het buitenland, en wat betekent dat voor een businesscase voor P2X in Nederland?
- Wat zijn de mogelijke bedrijfseconomische effecten bij verplichting van bepaalde elektrificatie-opties in verschillende sectoren?
- Wat is de huidige kostencurve voor elektrificatie-opties in de industrie?
- Wie betaalt er voor verzwaring van elektriciteitsnetten als er een grotere vraag optreedt door P2X-inzet of als er juist geen inzet van P2X bij een elektriciteitsbron plaatsvindt?

Elektrificatie van de warmtevraag: P2H

Voor de P2H-opties voor bedrijven geldt de afhankelijkheid tussen verschillende partijen nog het minst. Er zijn nu al voorbeelden van economisch levensvatbare technische vormen van P2H. In de huidige situatie is overaanbod van elektriciteit echter nog geen knelpunt, en elektriciteit is ook niet voldoende uren laag geprijsd, ten opzichte van gas, om alle opties rendabel te maken. Bovendien gaat van de lage CO₂-prijs weinig stimulans uit. Echter, gericht op de langetermijndoelen is een veel groter aandeel windenergie en zon-PV voorzien, waarbij dan wel degelijk overschotten optreden, en/of elektriciteit voor een groter aantal uren laag geprijsd zal zijn. Of het kosteneffectiever is om in te zetten op overcapaciteit van P2H in combinatie met een buffer, op andere P2X-opties, of op hybrideopties hangt dan ook weer samen met hoe andere systeemopties eruitzien en welke keuzes in de tussentijd zijn gemaakt. Met name hybrideopties worden nog weinig bekeken binnen P2H en laten veel vragen boven komen. Voor P2H gelden, naast de algemene vragen zoals hierboven gesteld, ook onder andere de volgende vragen:

- In hoeverre moet er rekening worden gehouden met alternatieven voor het nuttig gebruik van industriële restwarmte via warmtenetten naar/in de gebouwde omgeving?
- Wat zijn de (vooruitzichten van) kapitaalslasten van hybridesystemen voor productie van warmte voor de industrie?
- Onder welke condities qua profiel van aanbod-prijs van elektriciteit en gas, qua vraag met kenmerken van temperatuur en perioden en qua CO₂-prijs vormen hybridesystemen een interessant alternatief voor gasketels? Welk potentieel is er binnen die condities voor vermindering van CO₂-emissies?
- Welke invloed kunnen aanpassingen van de energiebelastingen op de elektriciteitsprijs en/of de gasprijs hierop hebben?
- In welke situaties kan een grootschalig hybridesysteem de introductie van CCS bij industriële gasketels in de weg staan?

Omzetting van elektriciteit in gas: P2G

Gezien de vele afhankelijkheden tussen verschillende belanghebbenden is het lastig om op de korte termijn te komen tot een interessante businesscase voor P2G. Als voor 2050 in Nederland een doelstelling van 80 tot 95 procent emissiereductie wordt aangehouden, is het een zo niet robuust dan toch zeker moeilijk te missen onderdeel van het toekomstig energiesysteem. De discrepantie tussen het mogelijke toekomstbeeld en de huidige situatie doet de volgende vragen opkomen:

- Welke partij wordt probleemhouder van – of initiatiefnemer voor – P2G-opties? Wat voor rol hebben netbeheerders en energieproducenten daarin?

- In hoeverre is energieconversie van maatschappelijk belang (conversie versus transmissie/distributie)?
- Welke kansen zijn er voor Nederland om via P2G een energieopslagfaciliteit voor Europa te bieden?

De eerste stap is productie van waterstof met elektriciteit. Elektrolyse is een technologie die zich inmiddels, afhankelijk van de uitvoeringsvorm, bevindt in een pre-commercieel tot commercieel stadium. Er kunnen dan ook stappen worden gezet richting toepassing op redelijk grote schaal. Waar en wanneer elektrolyse rendabel is hangt mede samen met de alternatieven, de elektriciteitsprijs en de toepassing van het geproduceerde waterstof. Een van de toepassingen is het omzetten, in combinatie met CO en/of CO₂, naar methaangas, dat zowel in het gasnet kan worden ingebracht als ondergronds worden opgeslagen. Met P2G samenhangende vragen zijn onder andere:

- Wordt elektrolyse opgepakt door industrie die waterstof consumeert, of door energiebedrijven die een nieuwe energiedrager gaan leveren?
- Wat zijn de verwachte toekomstige kosten van elektriciteit en daarmee samenhangend voor de met elektrolyse geproduceerde waterstof?
- Welke partij wordt probleemhouder van of initiatiefnemer voor de productie van groen (methaan)gas?
- Welke locatie voor een elektrolysefabriek is het gunstigst voor injectie van een maximale hoeveelheid waterstof in het gasnet?
- Zijn de richtlijnen over invoeding van waterstof in het gasnet toekomstbestendig?
- Wat is het potentieel bij de industrie voor direct kosteneffectief gebruik van waterstof voor de warmte- en elektriciteitsvoorziening?
- Wat betekent een combinatie van de productie van groen gas uit elektriciteit en uit biomassa voor de productiekosten in vergelijking met die voor groen gas uit elektriciteit of biomassa separaat?

De huidige productiemethode voor waterstof is vooral reforming van aardgas waarbij CO₂ vrijkomt. In feite zien we een omgekeerde route in P2G. Vervanging van dat reforming proces door elektrolyse levert dus niet alleen waterstof. Het bespaart ook op verbruik van aardgas en vermijdt de daarbij vrijkomende emissie.

Inzet van elektriciteit voor grondstoffen en producten: P2P

Naast direct gebruik van waterstof als energiedrager of voor omzetting in methaan, kan het ook als grondstof voor producten dienen, zoals voor methanol of mierenzuur, dat als energiedrager of grondstof voor de chemie kan worden ingezet, of voor productie van ammoniak als alternatief voor de huidige productiemethode. Ammoniak kan in specifieke situaties ook als brandstof worden gebruikt. Bovendien kunnen thermochemische processen worden vervangen door elektrochemische processen. Veel van deze processen moeten nog ontdekt en/of verder ontwikkeld worden.

- Wat zijn huidige belemmeringen voor ammoniak als brandstof? Wat is de reële potentie van ammoniak als brandstof?
- Voor welke producten is de consument bereid hogere prijzen te betalen voor CO₂-armere productieprocessen?
- Wat zijn de verwachte ontwikkelingen in de kostencurves van specifieke P2P-opties?
- Vindt er genoeg onderzoek plaats op het gebied van elektrificatie?

5 Samenspel tussen systeemopties

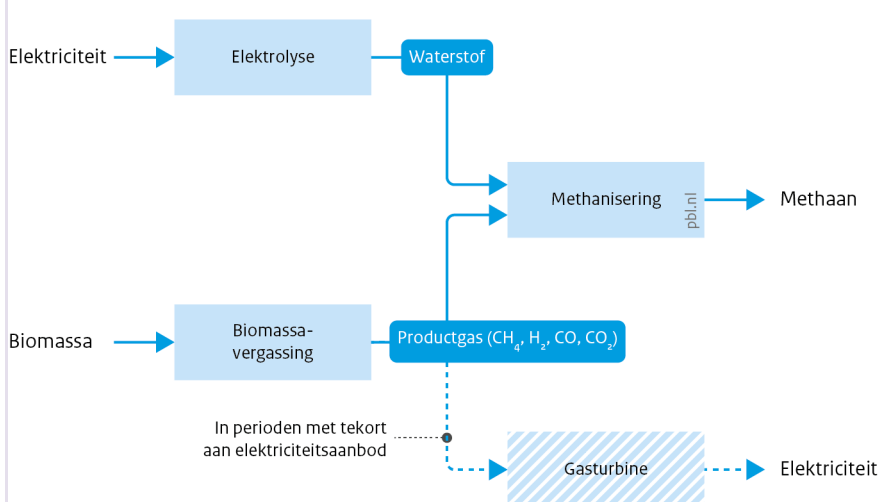
5.1 Biomassa en P2X samen in een mogelijk toekomstbeeld

In de hoofdstukken 3 en 4 zijn de grootschalige productie van groen gas of transportbio-brandstoffen uit biomassa en power-to-gas als bouwstenen voor een CO₂-arm energiesysteem in de toekomst neergezet. In hoofdstuk 2 zijn meerdere technische opties met een mogelijk groot belang voor de lange termijn genoemd. In de praktijk is het de kunst deze opties op een slimme en effectieve manier aan elkaar te verbinden. Dat kan bijvoorbeeld door de productie van groen gas uit biomassa en power-to-gas te koppelen. Hetzelfde geldt voor de productie van transportbrandstoffen uit biomassa en power-to-liquids.

Toekomstbeeld voor productie groen gas

Figuur 5.1

Slimme synergie tussen deelsystemen biomassavergassing en power-to-x



Bron: PBL

Biomassa wordt grootschalig vergast. Daarbij ontstaat een gasmengsel met vooral methaan, waterstof, CO en CO₂. Om hieruit zoveel mogelijk methaan te maken is de vervolgstap methanisering. Daarbij kan niet alle koolstof uit de biomassa worden omgezet in het gewenste product (daarvoor bevat het gasmengsel te weinig waterstof); er resteert CO₂.

Voor het sterk vergroten van het aandeel zon- en windenergie in de totale energievoorziening wordt ook de 'power-to-gas'-route ingezet, waarbij ook elektriciteit wordt omgezet in methaangas door na de elektrolyse middels methanisering. Daarvoor is een koolstofbron nodig. Dat kan CO₂ zijn.

Op dat punt vullen de twee routes elkaar prima aan. Het waterstof uit de elektrolyse kan worden ingezet ter verrijking van het gasmengsel uit de biomassavergassing en de CO₂ uit de vergassing is de koolstofbron voor power-to-methaan. Hierdoor kan een veel groter deel van de koolstof uit de biomassa in het product methaan komen (zie ook figuur 5.3).

In perioden dat het aanbod van elektriciteit laag is en er geen waterstof wordt geproduceerd wordt het gasmengsel uit de biomassavergassing direct ingezet voor elektriciteitsproductie met een gasturbine.

Nieuwe bedrijven hebben hiervoor nieuwe samenwerkingsverbanden ingericht met elkaar en met elektriciteits- en gasbedrijven. Die twee vormen van groen gas hebben ervoor gezorgd dat een belangrijk deel van de gasinfrastructuur nog steeds wordt benut en daarvoor ook is vernieuwd.

Ook de grootschalige productie van biobrandstoffen en power-to-liquids wordt in enkele fabrieken gecombineerd. Dit gebeurt na biomassavergassing en de elektrolyse via de Fischer-Tropsch synthese.

Er zijn ook bedrijven die de biotechnologieroute volgen. Zij produceren biobrandstoffen (ethanol en butanol) uit lignocellulose met geavanceerde technologie en zetten het restproduct met de CO₂ samen met waterstof in voor methaanproductie langs biologische weg.

Zeer waarschijnlijk zal er een voorkeursroute zijn die bij verdere ontwikkeling de gunstigste resultaten levert. Zo kan het zijn dat de productie van groen gas zoveel efficiënter en goedkoper kan verlopen dan die van groene diesel dat het over de gehele keten kostenefficiënter is voertuigen (bijvoorbeeld vrachtwagens) te laten rijden op methaangas.

5.2 Recente ontwikkelingen van de biomassa en P2X-combinatie

Over ontwikkelingen van de beschouwde combinatie is niet veel meer te zeggen dan dat over de ontwikkelingen van de afzonderlijke onderdelen in de hoofdstukken 3 en 4 al is aangegeven. Er zijn vooral theoretische beschouwingen aan gewijd.

Het plan van Stedin om bij een biomassavergassingsinstallatie testen te doen met verrijking van het geproduceerde gasmengsel met waterstof zou een eerste concretere stap zijn.

5.3 De uitdagingen voor de komende periode

Er kunnen voor de eerstvolgende fase drie uitdagingen worden benoemd:

- Welke partijen zijn bereid om in samenspel de verdere ontwikkeling van deze combinatie vorm te geven?
- Hoe zou de qua kosten optimale balans er uit kunnen zien tussen de draaiuren van de verschillende installaties (elektrolyse, biomassavergassing en methanisatie), de onbalans tussen vraag en aanbod van elektriciteit op de Nederlandse markt en de opslag en benutting van waterstof en methaan?
- Wat is het potentieel in kostenvermindering van de verschillende processtappen en voor opslag?

6 Naar een plan van aanpak voor de energietransitie

De hoofdstukken 3, 4 en 5 schetsen onze eerste inzichten in de uitdagingen voor de komende periode in de vorm van vragen. Twee potentieel belangrijke opties zijn in dit rapport nader doorgelicht. De overige opties genoemd in hoofdstuk 3 vereisen vergelijkbare analyses om de mogelijke invulling van de systeemoptie en heersende vragen daarover in beeld te krijgen. Het is aan de maatschappelijke partijen die hiervoor verantwoordelijkheid hebben of voelen – en/of partijen die hierin kansen zien en/of deskundigheid kunnen inbrengen – om in samenspel die acties te formuleren.

Die acties kunnen verschillende vormen hebben, afhankelijk van de vraag die moet worden beantwoord. Voorbeelden van acties in leertrajecten zijn:

- R&D-project
- Demonstratieproject
- Haalbaarheidsstudie
- Vormgeving publiek-private samenwerking
- Inrichting of aanpassing van infrastructuur
- Vastlegging richtlijnen, standaardisatie, normen
- Inrichting van een nichemarkt
- Afspraken met alle betrokkenen over eerste fase van implementatie
- Evaluatiestudie over ontwikkelingen tot nu toe
- Internationale afspraken over R&D-trajecten
- Maatschappelijk debat
- Voorbereiding beleidsinstrumentarium voor creëren markt

Er is in dit rapport bewust geen poging gedaan om op basis van de vragen een plan van aanpak te schetsen. Het is immers aan de stakeholders om te bepalen welke onzekerheden zij het zwaarste vinden wegen en welke acties het meest urgent zijn. Er zijn wel verschillende fasen bij de ontwikkeling te onderscheiden. De huidige stand van de ontwikkeling van een systeemoptie is daarom mede bepalend voor het vervolgtraject.

De eerste fase van ontwikkeling is vaak kleinschalig met een grote rol voor kennisinstituten. Subsidies met beperkte omvang kunnen hierbij voldoende stimulans geven. Als die fase achter de rug is en de eerste fase van toepassing aan de orde komt, gaat het meestal om veel grotere bedragen. Juist die fase is echter cruciaal voor beantwoording van de belangrijkste vragen. Daarnaast is die fase belangrijk om de vaart erin te houden. Een energietransitie die in 2050 al vergaand vorm moet hebben gekregen, vereist een voortvarende aanpak omdat de meeste vernieuwende systeemopties meerdere decennia nodig hebben om van eerste toepassing tot een groot marktaandeel te komen.

Als alle betrokken maatschappelijke partijen het erover eens zijn dat een bepaalde innovatie er moet gaan komen, dan krijgt het plan van aanpak helemaal het karakter van een implementatieplan. Ook in die gevallen kunnen er nog vragen komen, die vooral te maken hebben met de afstemming op andere onderdelen van het systeem en een optimale planning.

Er kan ook een situatie ontstaan dat de meeste betrokken partijen geen enkel vertrouwen meer hebben in een bepaalde optie. Dit gebeurt meestal als de resultaten van eerder uitgevoerde projecten vooral negatieve resultaten hebben opgeleverd. Dan kan het efficiënt zijn

om zo'n ontwikkelingstraject helemaal af te breken en alle middelen op andere opties in te zetten.

In hoofdstuk 2 is echter al aangegeven dat Nederland niet zodanig ruim keus heeft uit opties om een vermindering van de broeikasgasemissies met tenminste 80 procent in 2050 te realiseren dat het zich kan veroorloven al te lichtzinnig opties aan de kant te schuiven. Daarom is het van groot belang dat er voor een groot aantal van de in hoofdstuk 2 genoemde systeemopties (zo niet voor alle) een op de lange termijn gericht plan van aanpak komt met acties op de korte termijn. Hier ligt de uitdaging voor overheidsplannen, voor plannen van maatschappelijke partijen, voor de dialoog met alle stakeholders, mogelijk voor een vervolgvorsie van het Energieakkoord.

7 Literatuur

- Boot, P., J. Jong, de & N. Hoogervorst (2014). Reflections on coordination mechanisms for accomodating increasing amounts of wind and solar in the power market. CIEP/PBL.
- CBS (2015). Statline database.
- DNV-GL (2014). Electrifying the future.
- Dorp, R., van (2013). Innovatieve technieken en leveranciers voor biogas en groen gas. Groen Gas Nederland.
- Duvoort, M., B. Pruiksma, R. Meijer & H. Koetzier (2015). The end of the marginal cost model in the Netherlands? DNV-GL.
- FCHJU (2014). Study on development of water electrolysis in the EU.
- Gerwen, R. v., R. Bal, L. Grond, S. Hers, B. L. Schepers & H. Croezen (2015). System Integration - Hybrid energy infrastructures. DNV-GL/CE-Delft.
- Joode, J., de, L. Grond, B. Daniels, J. Holstein, K. Smekens, J. Stralen, van, F. Dalla Longa, K. Schoots & A. Seebregts (2014). Exploring the role for power-to-gas in the future Dutch energy system. ECN/DNV-GL.
- Krebbekx, J., M. Afman, H. Wiltink, N. Lintmeijer, B. Ouden, den, P. Graafland & H. Croezen (2015). Power to Products - Over de resultaten, conclusies en vervolgstappen. Berenschot/CE-Delft/ISPT.
- Lemmens, J. & R. van den Wijngaart (2014). Het potentieel van zonnestroom in de gebouwde omgeving van Nederland. DNV-GL, PBL.
- Milbrandt, A., C. Kinchin & R. McCormick (2013). The Feasibility of Producing and Using Biomass-Based Diesel and Jet Fuel in the United States. NREL.
- Monit (2015). Database. ECN.
- NorthSeaPowerToGas (2015). <http://www.northseapowertogas.com/demonstrations>. Retrieved 16/3/15.
- PBL website. Biomassa, wens en grenzen. <http://infographics.pbl.nl/biomassa/>
- PBL (2014). Recente ontwikkelingen in het klimaat -en energiebeleid. Achtergronddocument bij Balans van de Leefomgeving 2014.
- RLI (2015). Remmen los, Advies over versnelling van de transitie naar een duurzame energiehuishouding in Nederland. Raad voor de Leefomgeving, 2015.
- Ros, J. & R. Koelemeijer (2011). Naar een schone economie in 2050: routes verkend. PBL.
- Stapersma, P. (2014). Sunset or Sunrise? Electricity business in Northwest Europe. CIEP.
- Ros, J. (2015). Energietransitie: zoektocht met een helder doel. PBL-notitie
- Vlap, H., J. Holstein, A. van der Steen & L. Grond (2015). Technische uitgangspunten en resultaten demonstratieproject P2G. DNV-GL.

Bijlage: korte toelichting op het model E-Design en de daarmee uitgevoerde analyses

Het model E-Design

Voor de analyses van het toekomstige energiesysteem is het model E-Design ingezet. Het PBL heeft het model samen met ECN ontwikkeld als instrument voor backcasting (zie ook PBL/ECN 2011). Het ondersteunt de gebruiker bij het ontwerp van het energiesysteem in 2050 in Nederland. De hoofdonderdelen in het model, verkeer, industrie, gebouwde omgeving, elektriciteitsvoorziening en brandstoffenproductie, zijn met elkaar verbonden via de energiedragers in het systeem. Daarbij wordt de balans tussen vraag en aanbod kloppend gehouden; voor brandstoffen en warmte voor het jaarlijkse totaal, voor elektriciteit op uurniveau, inclusief de uitwisseling met het buitenland. De vijf hoofdonderdelen zijn weer opgesplitst in 16 deelsystemen met elk een scala aan mogelijk inzetbare technieken, waaruit de gebruiker kan kiezen.

Het model omvat gegevens over rendementen en kosten van deze technieken in 2050. Die kunnen niet zonder meer worden gebaseerd op kengetallen van nu. Vele technieken zijn nog volop in ontwikkeling. Het blijft uiteraard enigszins koffiedik kijken hoeveel beter en goedkoper ze zullen worden. Vele deskundigen hebben verwachtingen daarover uitgesproken. Soms zijn deze gekleurd door belangen bij bepaalde technieken. Voor het model is in ruime mate gebruik gemaakt van de inschattingen van het International Energy Agency voor de *Energy Technology Perspectives* (IEA 2010). Daarnaast is gebruik gemaakt van het Optiedocument (ECN 2010) met kosten zoals die voor het komende decennium worden geraamd, waarbij op basis van empirische ervaringen met leercurven de mogelijke resultaten van verdere ontwikkelingen zijn bepaald. Uiteindelijk is ervoor gekozen voor 2050 zowel optimistische als pessimistische inschattingen in het model bijeen te brengen om de gevoeligheid te kunnen toetsen.

Het model berekent op basis van de gekozen vraagvariant en de technologiekeuzes die de gebruiker heeft gemaakt hoeveel energiegrondstoffen nodig zijn, welke capaciteit benodigd is voor de verschillende productieopties voor elektriciteit, warmte en brandstoffen om vraag en aanbod met elkaar in balans te brengen en hoeveel CO₂-opslagcapaciteit nodig is. Uit de berekening volgt ook de resulterende emissie van broeikasgassen. Het model toetst of de resultaten voldoen aan de gestelde maximale toepassing van biomassa, CO₂-opslagcapaciteit, wind-, zonne- en kernenergie, en het gestelde emissiedoel. Ten slotte geeft het inzicht in de verschillen in productiekosten in 2050 tussen varianten. Als de resultaten niet de gewenste emissie opleveren of ergens de maximale toepassing overschrijden, dan kan de gebruiker zijn keuzes aanpassen. E-Design is erop ingericht om iteratief tot een zinvol resultaat te komen, en optimaliseert niet zelf. Het helpt de gebruiker daarmee inzicht te krijgen in de systeemeffecten van verschillende technologiekeuzes.

De Nederlandse economie in 2050

Er is een beeld nodig van de Nederlandse economie in 2050 om zinvolle analyses mogelijk te maken. Dat beeld is uiteraard erg onzeker. Het uitgangspunt is geweest het toekomstbeeld voor 2050 uit eerdere analyses (PBL/ECN 2011). In dat referentiebeeld is het vaststaande beleid verwerkt. Dat betekent bijvoorbeeld dat de eisen aan nieuwbouwwoningen zijn meegenomen, maar niet de onzekere maatregelen voor bestaande bebouwing. Voor de industrie is wel rekening gehouden met een autonome efficiencyverbetering.

Dit referentiebeeld is gebaseerd op een bepaalde economische groei. Inmiddels zijn er nieuwe scenario's (Toekomstverkenning Welvaart en Leefomgeving; PBL 2015), waarin wordt

uitgegaan van een andere economische groei en dat heeft invloed hebben op de toekomstige energievraag. Die energievraag in 2050 is voor de analyses gericht op broeikasgasemissies op zich van groter belang dan een exact beeld van de productie in de verschillende sectoren in 2050. De energievraag is immers niet alleen afhankelijk van de economische groei, maar ook van de mate van energiebesparing. Voor het referentiescenario gaat het dus ook om de business-as-usual-besparing. Daarbovenop kunnen maatregelen voor extra besparing worden ingezet.

Analysemethode

Met het model E-Design is een groot aantal varianten samengesteld met een emissie die 80 procent respectievelijk 95 procent lager ligt dan in 1990. Daarbij zijn verschillende uitgangspunten gebruikt voor met name de mate van energiebesparing, de beschikbaarheid van biomassa en de beschikbare opslagcapaciteit voor CO₂.

In de varianten is de optie kernenergie niet meegenomen. In eerdere analyses is dat overigens wel gedaan (Ros, J. & R. Koelemeijer, 2011). Kernenergie wordt in het geheel niet genoemd in het Energieakkoord. Het zou vooral als alternatief voor wind- en zonnestroom kunnen worden ingezet. Er is evenmin rekening gehouden met opties die nu nog niet ten minste het stadium van pilots of demonstraties hebben bereikt. De kans dat zij al over 35 jaar een grote rol spelen in het energiesysteem is heel klein.