



Planbureau voor de Leefomgeving

VERKENNING VAN KLIMAATDOELEN

Van lange termijn beelden naar korte termijn actie

Policy Brief

Jan Ros (PBL) en Bert Daniëls (ECN)

9 Oktober 2017

PBL

Colofon

Verkenning van klimaatdoelen: van lange termijn beelden naar korte termijn acties

© PBL Planbureau voor de Leefomgeving

Den Haag, 2017

PBL-publicatienummer: 2966

Contact

jan.ros@pbl.nl

Auteurs

Jan Ros en Bert Daniëls (ECN)

Met medewerking van Jos Notenboom, Gert Jan van den Born, Marian van Schijndel, Nico Hoogervorst, Pieter Boot, Robert Koelemeijer, Joost van Stralen (ECN) en Koen Smekens (ECN)

Delen uit deze publicatie mogen worden overgenomen op voorwaarde van bronvermelding: Ros, J. en B. Daniëls (2017), Verkenning van klimaatdoelen, Den Haag: PBL Planbureau voor de Leefomgeving.

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
VERDIEPING	11
1 Inleiding	11
1.1 Klimaatbeleid en emissiereducties	11
1.2 Uitgangspunten voor de studie	12
1.3 Aanpak	13
1.3.1 Beelden voor 2050 bij vergaande emissiereductie	13
1.3.2 Betekenis van de 2050-beelden voor de periode tot 2030	14
1.3.3 Afbakening van de functionaliteiten	14
1.4 Indeling van het rapport	16
2 Beelden voor 2050	18
2.1 Inleiding	18
2.1.1 Korte beschrijving van de gebruikte modellen	18
2.1.2 Emissies conform IPCC	20
2.1.3 Beperkingen van de uitgevoerde analyses	20
2.1.4 Geanalyseerde varianten	21
2.1.5 Type maatregelen	23
2.1.6 Berekening van meerkosten	24
2.2 Het referentiebeeld in 2050	25
2.3 Resultaten: kosten	28
2.3.1 Meerkosten en schaduw prijzen	28
2.3.2 Kosten per functionaliteit	30
2.4 Resultaten: de verdeling van de emissies over de functionaliteiten	31
2.5 Resultaten: hernieuwbare energie en energiegebruik	34
2.6 Algemene technische kenmerken in de 2050-beelden	37
2.7 Technieken in de aanbodsectoren	39
2.7.1 Elektriciteitsvoorziening	39
2.7.2 Productie van biogene brandstoffen	44
2.7.3 Productie van waterstof	46
2.7.4 Power-to-fuel	47
2.7.5 Warmte voor warmtenetten	48
2.8 Technieken in de functionaliteiten	49
2.8.1 Hoge temperatuur warmte	49
2.8.2 Kracht en licht	51
2.8.3 Lage temperatuurwarmte	52
2.8.4 Mobiliteit	54
2.8.5 Natuur en voedsel	57
3 De ontwikkelingen tot 2030	60
3.1 Inleiding	60
3.2 Snelle emissiereductie is belangrijk voor het klimaat	60
3.3 Voorbeeld van een emissiereductiepad	60
3.4 Van 2050-beelden naar korte termijn acties	62

3.4.1	CO ₂ -emissie als enige transitie-indicator is onvoldoende	62
3.4.2	Technologiekeuzen	63
3.5	Opzet van de analyse per functionaliteit	63
3.6	Uitwerking van korte termijn acties in aanbodsectoren	64
3.6.1	Elektriciteitsvoorziening	64
3.6.2	Productie van biogene brandstoffen	68
3.6.3	Productie van waterstof	71
3.7	Uitwerking van korte termijn acties in de functionaliteiten	72
3.7.1	Hoge temperatuur warmte	72
3.7.2	Kracht en licht	75
3.7.3	Lage temperatuur warmte	76
3.7.4	Mobiliteit en transport	82
3.7.5	Landbouw, landgebruik en voedsel	85
3.8	Korte termijn acties voor centrale regie	89
3.8.1	Aandeel hernieuwbare energie	89
3.8.2	Energiebesparing	91
3.8.3	Biomassa	92
3.8.4	Afvang en opslag van CO ₂	93
4	Referenties	96
	Bijlage 1. Beschrijving van de gebruikte modellen	98
	Bijlage 2. Gedetailleerde resultaten van de berekeningen met het OPERA-model	102

BEVINDINGEN

Op het verzoek van de ministeries van Economische Zaken, Infrastructuur en Milieu, Binnenlandse Zaken en Koninkrijksrelaties, en Financiën voor ondersteuning bij de invulling van het klimaatbeleid tracht deze studie drie vragen te beantwoorden:

1. Met welke (bij voorkeur kostenoptimale) technische maatregelpakketten zou Nederland in 2050 een emissiereductie van broeikasgassen met 80 respectievelijk 95 procent kunnen realiseren?
2. Tot welke toekomstige verdeling van emissies over de vijf voor het beleid gekozen functionaliteiten leiden die maatregelpakketten?
3. Wat betekenen de beelden voor 2050 voor wat in 2030 al moet worden bereikt om te kunnen spreken van een voortvarend verloop van het transitieproces? Wat betekent dit in termen van CO₂-emissies en ook per functionaliteit?

De klimaatovereenkomst van Parijs die in december 2015 werd gesloten en in november 2016 van kracht werd vraagt een vérgaande reductie van de uitstoot van broeikasgassen. Wat een adequate bijdrage van Nederland is aan het realiseren van de overeenkomst is moeilijk rekenkundig te bepalen. In dit rapport wordt een verkennende analyse uitgevoerd naar de transitiepaden gericht op 80 dan wel 95 procent emissiereductie in 2050 ten opzichte van 1990. De analyse is gericht op het in beeld brengen van de grote toekomstige uitdagingen. Overigens lijkt een emissiereductie van 95 procent in 2050 meer passend bij de ambities van Parijs dan een emissiereductie van 80 procent.

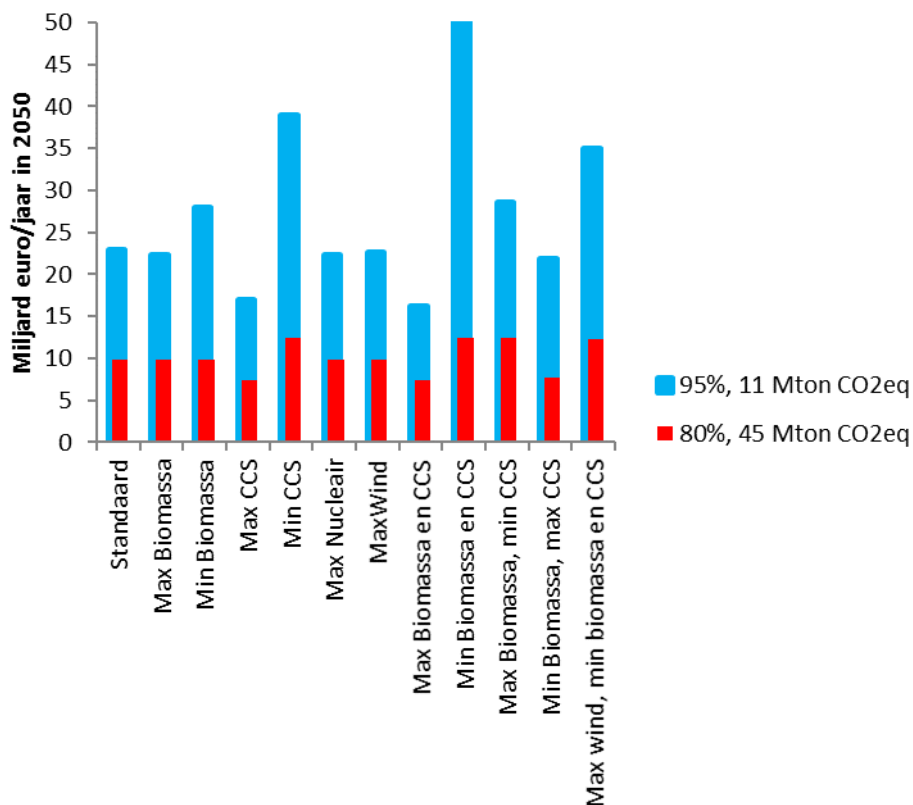
In navolging van de Energieagenda en op verzoek van de ministeries werkt de studie met vijf functionaliteiten: hoge temperatuur warmte, kracht en licht, lage temperatuur warmte, mobiliteit, en voedsel en natuur. Op basis van de beschikbare gegevens is voor de verschillende resultaten een indicatieve verdeling van de broeikasgasemissies over de functionaliteiten gemaakt. Daarbij zijn de door de energiesectoren aangeboden energie en de daarbij behorende emissies naar rato van het gebruik aan de functionaliteiten toebedeeld. Zo is een deel van de emissies van raffinaderijen toebedeeld aan mobiliteit en een ander deel aan hoge temperatuur warmte. Bij de berekeningen van de emissieverdeling over functionaliteiten konden overigens binnen de beschikbare mogelijkheden de gekozen afbakeningen niet op alle details op gelijke wijze worden gekoppeld aan de modellen en aan historische emissiegegevens. Daarom kunnen inconsistenties van beperkte omvang niet worden uitgesloten. De studie is dan ook verkennend van aard en beoogt door de oogbaren naar de toekomst te kijken om de grote patronen te ontwaren.

De studie is gebaseerd op analyses met twee integrale energiemodellen voor Nederland: het OPERA model dat kostenoptimale maatregelpakketten berekent (beperkt aantal nieuwe berekeningen) en het E-Design model (al eerder gepubliceerde berekeningen). Dergelijke modellen voor analyses van situaties op de lange termijn omvatten veel expert verwachtingen, met name over toekomstige kosten en rendementen van technieken. Dergelijke verwachtingen kennen inherente onzekerheden. Het gebruik van resultaten uit twee verschillende modellen vergroot de mogelijkheid robuuste patronen in de bevindingen te identificeren. Dit kan overigens niet alle beperkingen van deze verkennende studie wegnemen. Voor de analyse van aan het landgebruik gerelateerde emissies zijn ook andere modellen gebruikt.

De analyse omvat varianten die laten zien wat de impact is van een hogere of lagere beschikbaarheid van verschillende opties op de totale kosten, de inzet van technieken en de verdeling van emissies in 2050. Het gaat in die varianten om meer of minder duurzame biomassa, meer of minder afvang en opslag van koolstof (CCS), meer of minder windenergie

en wel of geen inzet van kernenergie ten opzichte van een standaard variant en dat in wisselende combinaties. Andere varianten, zoals meer of minder geothermie, en meer import van elektriciteit zijn (uitzonderingen daargelaten) niet bekeken. Evenmin zijn verschillende scenario's voor economische groei in de studie betrokken.

Er zijn andere dan alleen technische opties om binnen Nederland tot emissiereducties te komen, zoals veranderingen in gedrag of in productievolumes. Dergelijke opties zijn in deze studie niet beschouwd. In die zin gaat het in deze studie om een beperkte analyse gericht op technische maatregelenpakketten waarmee Nederland de emissies met 80 of 95 procent kan reduceren in 2050 en op zinvol te zetten stappen op korte termijn om realisatie van die pakketten naderbij te brengen.



Figuur S1: Additionele jaarlijkse kosten in 2050, in miljard euro per jaar.

Beelden voor 2050

Voor beantwoording van de eerste vraag van deze studie zijn technische maatregelenpakketten geïdentificeerd waarmee respectievelijk 80 en 95 procent emissiereductie in 2050 kan worden gerealiseerd. Bij een broeikasgasreductie met 80 procent zijn er geen grote kostenverschillen tussen maatregelenpakketten in de verschillende varianten. De meerkosten in 2050 – ten opzichte van continuering van het huidige beleid – variëren globaal tussen de 7 en 12 miljard euro per jaar (het gaat hierbij dus niet om de totale transitiekosten over de periode van nu tot 2050). Bij een reductie met 95 procent is dat heel anders. De extra kosten in 2050 voor de doorgerekende varianten liggen veelal ruim een factor 2 hoger. Door de ooghaars kijkend kost 80 procent broeikasgasreductie in 2050 één procent van het bruto binnenlands product (BBP) of minder, en 95 procent reductie ongeveer 2 procent. Een geringe beschikbaarheid van (duurzame) biomassa of CCS maakt de reductie relatief nog duurder. Wanneer beide beperkt beschikbaar zijn is het bereiken van 95 procent reductie met alleen

technische maatregelen eigenlijk nauwelijks voorstelbaar. De varianten met relatief meer inzet van duurzame biomassa of inzet van CCS zijn meestal het goedkoopst (figuur S1).

Robuuste opties in de 2050-beelden

Ondanks verschillen in de beschikbaarheid van opties is een aantal robuuste elementen aan te wijzen in de maatregelenpakketten. CCS, al of niet in combinatie met biomassa (BECCS met negatieve emissies), levert een essentiële bijdrage aan de emissiereductie. BECCS wordt daarbij niet in de elektriciteitsproductie toegepast, maar wel voor hoge temperatuur warmte en bij de productie van biogene brandstoffen. De verdeling van de emissies over de functionaliteiten is sterk afhankelijk van de toepassing van BECCS en van de daarmee geproduceerde brandstoffen en warmte. De kostenverschillen van BECCS tussen de functionaliteiten zijn zodanig klein, dat dit een grote gevoeligheid geeft in de verdeling van de emissies over de functionaliteiten.

Efficiencyverbetering treedt al in belangrijke mate op in de te verwachten ontwikkeling bij voortzetting van het voorgenomen beleid uit de Nationale Energieverkenning (NEV) 2016. In alle varianten komt ook verdergaande technische energiebesparing voor, maar in de meeste gevallen niet tot het maximale potentieel, want sommige besparingsopties zijn relatief duur.

Robuuste opties zijn verder de elektrificatie van de energievraag en een grote inzet van windenergie, vooral op zee. Inzet op kernenergie lijkt qua kosteneffectiviteit niet veel uit te maken – hoewel de onzekerheden in de kosten op dat punt nadere analyse behoeven – maar vermindert wel de noodzaak tot inzet van hernieuwbare energie enigszins. Bij zowel CCS, kernenergie als andere opties is voldoende maatschappelijk draagvlak evenzeer een belangrijke randvoorwaarde. Voor bijna alle technische opties zijn daarom ook andere dan kostenoverwegingen relevant.

Verdeling van de emissies in 2050 over functionaliteiten

Omdat de reductiemogelijkheden en de kosten daarvan per functionaliteit verschillen ligt het niet voor de hand om in alle functionaliteiten dezelfde emissiereductie te realiseren. Dit aspect weegt zwaar in het beantwoorden van de tweede vraag van deze studie. Het betekent dat de resterende emissies in 2050 tussen de functionaliteiten verschillen. Bij een reductie van 80 procent zal de resterende emissie van de functionaliteit kracht en licht laag zijn, tot ongeveer 0 in bepaalde varianten. Die van hoge temperatuur warmte, lage temperatuur warmte, mobiliteit, en voedsel en natuur (in dit geval de landbouwemissies) zijn elk in de orde grootte van 10 Mton, overigens met voor elk een aanzienlijke bandbreedte waarbij de emissie ook tot een extra 10 Mton per functionaliteit hoger kan liggen.

Die bandbreedtes zijn er ook bij een reductie van 95 procent, al is het overzichtsbeeld anders. De emissies van hoge temperatuurwarmte worden dan in vele varianten negatief (door een combinatie van biomassa en CCS), die van kracht en licht blijven rond de 0 en die van lage temperatuur warmte en mobiliteit rond de 5 Mton. De resterende broeikasgasemissie van voedsel (landbouwemissies) ligt rond de 10 Mton. Hierin zijn niet de LULUCF-emissies meegenomen, maar hiervoor zijn opties denkbaar om deze in 2050 rond de nul te brengen.

Emissieniveaus in 2030

Voor beantwoording van de derde vraag van deze studie beschouwt de studie wat de 2050-beelden voor 2030 betekenen en welke korte termijn acties en maatregelen nodig zijn om in 2030 het pad naar 2050 te zijn ingeslagen.

Voor het klimaatbeleid is niet alleen een zeer laag emissieniveau in 2050 van belang. De totale belasting van de atmosfeer met broeikasgassen in de rest van de eeuw (voor CO₂ aangeduid met de term koolstofbudget) en daarmee ook al in de komende jaren is bepalend

voor de temperatuurstijging en de effecten daarvan. De Energieagenda neemt een geleidelijke transitie naar een CO₂-arme economie als uitgangspunt. Op verzoek van de ministeries is de kwantitatieve reductie per functionaliteit in 2030 daarom afgeleid met een eenvoudig uitgangspunt: de emissiewaarde in 2030 als punt op een rechte lijn tussen 2014 en 2050. Voor het totaal van de emissies in Nederland leidt zo'n lineair pad naar 80 dan wel 95 procent reductie in 2050 tot een emissiereductie van 43 respectievelijk 49 procent in 2030 ten opzichte van 1990. Dat betekent een flinke extra opgave ten opzichte van het nu vastgestelde en voorgenomen beleid (NEV 2016) waarmee in 2030 een emissiereductie van 16-32 procent wordt verwacht.

Gezien de onzekerheden in de emissieverdeling in 2050 zijn er met deze werkwijze geen exacte emissieniveaus per functionaliteit in 2030 aan te geven. Als zo'n rechte lijn wordt gehanteerd per functionaliteit komen er wel bandbreedtes voor de emissieniveaus in 2030 in beeld. Die laten zien dat ten opzichte van het vastgestelde en voorgenomen beleid in de periode tot 2030 voor alle functionaliteiten extra emissiereducerende maatregelen nodig zijn. Dat geldt vooral bij kracht en licht, in iets mindere mate bij hoge temperatuur warmte en mobiliteit, en het minst bij lage temperatuur warmte en voedsel en natuur.

Overwegingen bij eventuele subdoelen voor broeikasgasemissies per functionaliteit

Het werken met subdoelen leidt in het algemeen tot minder flexibiliteit in de mogelijke oplossingen. Daartegenover kan staan dat het beleid krachtiger wordt als actoren meer verantwoordelijkheid voelen voor een specifiek subdoel dan voor een algemeen doel. Het wordt ook duidelijker welke maatregelen nodig zijn. Of die versterking van beleid bij eventuele subdoelen voor functionaliteiten met de voor deze analyse afgesproken afbakening ook voldoende is en op de beste manier wordt gerealiseerd, is echter onzeker. Bij de uitgevoerde analyses is gebleken dat die aanpak vanuit het perspectief van de transitie ook ongewenste of afgezwakte impulsen kan geven, zoals voor elektrificatie. Nader onderzoek naar de consequenties van een dergelijke indeling (als ook voor elke andere indeling) verdient daarom aanbeveling.

Het beschikbare 'koolstofbudget' illustreert dus dat niet alleen een bepaalde reductie op enig moment (zoals 2050) van belang is maar ook de weg daarheen. Forse emissiereductie in 2030 belast het koolstofbudget veel minder dan doorgaan met het huidige beleid. Kernpunt van deze studie is echter dat een specifieke emissiereductie op korte termijn zoals in 2030 niet de enig relevante factor is voor de transitie. Het gaat om een samenhangend geheel van activiteiten waarin de voorbereiding op volgende stappen van belang is. Zoals het beleid niet eindigt met het Energieakkoord in 2023, zal dat voor een succesvolle transitie ook in 2030 niet zo zijn en blijft voorbereiding op de volgende fase cruciaal.

Acties en maatregelen voor de korte termijn

Er kunnen drie type acties en maatregelen in de praktijk voor de korte termijn worden onderscheiden (ter verduidelijking: hiermee worden geen beleidsmaatregelen of beleidsinstrumenten bedoeld, die zullen daarbij ondersteunend of daartoe dwingend zijn). Het gaat ten eerste om maatregelen die grootschalige implementatie voorbereiden (zoals institutionele vernieuwing, RD&D, infrastructuur, creëren van draagvlak). Dat zijn urgente zaken, omdat het onderdelen van de transitie betreft die nog in de beginfase verkeren en waarvoor de resterende periode tot 2050 in vele gevallen erg krap is. Ten tweede is het cruciaal om zo snel mogelijk de eerste fase van implementatie van maatregelen met groot potentieel voor de lange termijn in te zetten. Toepassing draagt bij aan de emissiereductie tot 2030 en leidt eveneens tot kostenverlaging bij die nieuwe technieken. Ten derde zijn er maatregelen die al wel op de korte termijn aan emissiereductie kunnen bijdragen maar minder essentieel zijn voor de transitie richting 2050; aandachtspunt hierbij is of ze belemmerend kunnen werken voor de gewenste transitie. Het belang van de eerste en tweede categorie maatregelen voor

het transitieproces is dus groot. Zowel bij een keuze voor 80 als bij 95 procent emissiereductie is op de korte termijn een krachtige inzet op het transitieproces en voor beide is een breed scala aan technische opties nodig.

Voor de verschillende functionaliteiten zijn in het volgende overzicht belangrijke acties en maatregelen benoemd met onderscheid naar de genoemde drie typen.

Aanbod Elektriciteitsvoorziening (bijdrage aan meerdere functionaliteiten)

- Ondersteunende acties: versterking netwerk inclusief interconnectie; verkenning implicaties voor elektriciteitsmarkt vanwege groter aandeel kapitaallasten en noodzaak tot flexibiliteit; doordenken aanpak financiële ondersteuning (SDE+ en saldering).
- Implementatie: wind op zee, zon-PV.
- Aanvullend: vervanging van kolen- door gascentrales (aandachtspunt is dat gascentrales in de toekomstbeelden slechts een kleine rol spelen).

Aanbod Waterstof (bijdrage aan meerdere functionaliteiten)

- Ondersteunende acties: RD&D; inzicht in mogelijkheden bijmenging waterstof in gasnet; studies naar procesoptimalisatie en -integratie van de keten power-to-hydrogen.
- Implementatie: demonstratieproject met waterstofproductie uit elektriciteit.
- Aanvullend: CCS bij waterstofproductie uit aardgas (aandachtspunt lock-in: rem op de elektrificatie van waterstofproductie).

Aanbod (groene) brandstoffen (bijdrage aan meerdere functionaliteiten)

Kenmerk: de optie groene brandstoffen met CCS kan cruciaal zijn, vooral als elektrificatie en inzet van waterstof ontoereikend zijn. Productie van groen gas dan wel groene transportbrandstoffen is echter vooral een reserve-optie omdat rekening moet worden gehouden met een beperkt aanbod van duurzame biomassa.

- Ondersteunende acties: RD&D, studies naar procesoptimalisatie en -integratie van de keten power-to-fuel; nadenken over regie; beeld nodig van productiecapaciteit groen gas.
- Implementatie: proces- en systeemoptimalisatie productie groene brandstoffen uit biomassa of elektriciteit; eerste grootschalige productie-eenheden (flag ships); verhoging aandeel groene transportbrandstoffen met controlesysteem gericht op duurzaamheid.
- Aanvullend: CCS raffinaderijen (aandachtspunt lock-in: raffinaderijen hebben andere rol in energiesysteem van 2050).

Functionaliteit hoge temperatuur warmte

- Ondersteunende acties: infrastructurele en organisatorische voorbereiding van transport en opslag van CO₂; inzicht in keuzemomenten voor en tijdige beschikbaarheid van nieuwe processen staal; concrete RD&D projecten.
- Implementatie: eerste fase elektrificatie, inclusief hybride opties met vraagsturing, demo's en eerste fase implementatie CCS; CCS bij afvalverbrandingsinstallaties.
- Aanvullend: energiebesparing door procesoptimalisatie (aandachtspunt lock-in: investeringen in bestaande processen kunnen nieuwe processen in de weg staan).

Functionaliteit kracht en licht

- Ondersteunende acties: voorbereiding en verbreding draagvlak voor vraagsturing.
- Implementatie: vraagsturing bij huishoudens en bedrijven.
- Aanvullend: efficiencyverbetering apparaten en licht.

Functionaliteit lage temperatuur warmte

- Ondersteunende acties: regionale warmteplannen, inclusief de rol van glastuinbouw en besluitvorming over infrastructuur; voorbereiding pilotprojecten met landelijke

- uitstraling, waarin vooral de betrokkenheid van en het samenspel tussen de betrokkenen belangrijk is; vernieuwing tariefstructuur; doordinking rollen partijen in nieuwe systemen van warmtevoorziening; scholing.
- Implementatie: geothermie; kas (glastuinbouw) als energiebron; grootschalige voorbeeldprojecten voor de overgang in de bestaande bebouwing naar gasvrije wijken; nul op meter renovatie; all-electric kantoren en woningen.
 - Aanvullend: optimalisatie energiegebruik en isolatie woningen en kantoren (aandachtspunt lock-in: stap-voor-stap sanering mag integrale sanering naar bijvoorbeeld gasvrij niet in de weg staan); biomassaketels glastuinbouw (aandachtspunt: te kleinschalig voor combinatie met CCS en dus voor negatieve emissies).

Functionaliteit mobiliteit

- Ondersteunende acties: initiatieven voor krachtig EU-beleid maar ook verkenning nationale beleidslijnen; gemeentelijke plannen opladen/parkeren; internationale samenwerking bij West-Europese infrastructuur voor opladen; RD&D aan batterijen en brandstofcellen; experimenten met nieuwe technologie (waterstof, rijdend opladen) vrachtauto's; onderzoek naar haalbaarheid van CCS of bio-CCS op zeeschepen.
- Implementatie: meer nul-emissie voertuigen (auto's op biobrandstoffen tellen hierbij niet mee als nul-emissie), in lijn met een ontwikkeling naar 100 procent nieuwverkoop in 2035 zou 15-20 procent van alle personenauto's op de weg in 2030 nul-emissie auto's zijn; het geleidelijk vergroten van het aandeel groene brandstoffen (ook al genoemd bij aanbod brandstoffen).
- Aanvullend: geleidelijke optimalisatie voor alle soorten auto's (aandachtspunt lock-in: efficiencyverbetering van voertuigen met verbrandingsmotoren mag niet tot uitstel van de introductie van nul-emissie voertuigen leiden; hangt samen met hoogte van eventuele norm); toepassing van zuinige banden.

Functionaliteit voedsel en natuur

Met name voor deze functionaliteit geldt dat de huidige afbakening gericht op emissies binnen Nederland betekent dat daarmee niet wordt aangegrepen op de voedselketens die voor een groot deel over de grenzen gaan, gepaard gaande met zeer relevante emissies. Enkele ondersteunende acties hebben wel daarop betrekking.

- Ondersteunende acties: uitwerking plannen voor omzetting landbouwgrond in bossen met integrale consequenties op emissies (ook door productieverschuiving buiten Nederland); onderzoek naar novel protein foods; experimenten met betrekking tot opties voor beleidsimpulsen gericht op consumptieverandering ondersteund met het in beeld brengen van de CO₂-emissie van voedingsproducten; duurzaamheidsonderzoek veevoer met verkenning van de mogelijkheden voor duurzaamheidscriteria.
- Implementatie: meer bossen.
- Aanvullend: beheersmaatregelen organische gronden (waaronder veenweiden); optimalisatie bestaande processen, zoals met methaanoxidatie bij mestopslag en/of monomestvergisting en levensduurverlenging en rantsoenaanpassingen bij melkvee.

VERDIEPING

1 Inleiding

1.1 Klimaatbeleid en emissiereducties

De internationale afspraken over temperatuurstijging die in 2016 in de klimaatovereenkomst van Parijs zijn gemaakt stellen de wereld voor de grote opgave om de emissie van broeikasgassen vergaand terug te brengen (UNFCCC 2015). Dat we bij de precieze kwantificering van de noodzakelijke emissiereductie op onzekerheden stuiten, neemt niet weg dat de noodzaak van ingrijpende maatregelen duidelijk is. In tekstbox 1.1 is toegelicht hoe de gewenste maximale temperatuurstijging kan worden vertaald naar een emissiereductie en wat dat voor de EU en Nederland zou kunnen betekenen.

Bij het afleiden van een emissiedoel voor Nederland spelen diverse factoren een rol:

- de mondiale temperatuurstijging

In Parijs is een stijging met ruim beneden de 2 graden afgesproken met daarbij het streven naar maximaal 1,5 graad. Het laatste heeft nog grotere consequenties voor het terugdringen van broeikasgasemissies.

- onzekerheid in de relatie tussen broeikasgasemissies en temperatuurstijging

De complexiteit van het klimaatsysteem betekent dat het effect van een bepaalde emissiereductie op mondiaal niveau veelal wordt uitgedrukt in de kans dat daarmee de temperatuurstijging onder een bepaalde waarde blijft. Hoe groter die kans moet zijn, hoe groter de emissiereductie.

- verdeling van de emissies in de tijd

Als gevolg van emissies van broeikasgassen worden er in de atmosfeer concentratieniveaus opgebouwd, die ook weer afhankelijk zijn van de levensduur van de verschillende broeikasgassen in die atmosfeer. Met name voor CO₂ is die levensduur relatief lang. Dat betekent dat het er niet alleen om gaat in 2050 op een laag emissieniveau te komen, maar ook – en vooral – dat emissiereductie over een lange periode en dus ook op de korte termijn van belang is.

- verdeling van de emissiereductieopgave over verschillende landen

In de huidige beleidspraktijk worden vooral emissiedoelen voor landen gehanteerd. Voor Nederland is ook relevant wat de emissieopgave voor de EU is, maar Nederland kan zelf een scherper doel formuleren. Voor de verdeling van emissies over landen kunnen verschillende verdeelsleutels worden gehanteerd, zoals gelijke emissie per capita of per eenheid GDP of reductiekosten afhankelijk van de economische kracht van een land.

Hoewel het voldoende duidelijk is dat de afspraken in Parijs over de temperatuurstijging op aarde vergaande emissiereductie noodzakelijk maken, betekenen de genoemde factoren dat er geen wetenschappelijke grondslag is voor een precieze emissiereductie in Nederland, zowel voor 2030 als voor 2050. Het is daarom een politieke keuze waarin afwegingen met betrekking tot risico's van klimaatverandering en de Nederlandse bijdrage aan de oplossing tot een beleidsdoel leiden. Al voor het Parijs-akkoord hadden Europese leiders voor de EU de

ambitie van een emissiereductie in 2050 met 80 tot 95 procent ten opzichte van 1990 vastgelegd. Voor 2030 geldt in de EU een emissiereductiedoel van tenminste 40 procent emissiereductie. Nederland heeft (nog) geen formeel beleidsdoel voor de broeikasgasemissies in 2050, maar heeft de EU-opgave van 80 tot 95 procent emissiereductie wel ondersteund. Deze percentages komen ook terug als richtpunt in documenten als het Energieakkoord en de Klimaatagenda.

Op basis van de inzichten over de relatie tussen broeikasgasemissies en temperatuurstijging en mogelijke verdelingen van de opgaven over landen lijkt een reductie van 95 procent in 2050 beter aan te sluiten bij de afspraken van Parijs dan een reductie van 80 procent

Tekstbox 1.1 (Uit: PBL, 2016)

Wat betekent het Parijsakkoord voor het Nederlands lange termijn klimaatbeleid?

De klimaatdoelen uit het Parijsakkoord komen overeen met een maximale cumulatieve emissie van ongeveer 250-400 Gt CO₂ of 600-1200 Gt CO₂ (vanaf 2015) voor respectievelijk 1,5 en 2°C (het gaat hierbij om alleen CO₂-emissies en niet om alle broeikasgasemissies). Een dergelijk budget is zo krap dat wereldwijd stringent klimaatbeleid nodig is om hieraan te voldoen. Een dergelijk beleid gaat ver voorbij het huidige beleid van de betrokken landen. In het Parijsakkoord is de doelstelling van internationaal klimaatbeleid geformuleerd als het beperken van klimaatverandering tot ruim onder de 2°C, en te streven naar een maximale opwarming van 1,5°C. Onderzoek laat zien dat een wereldwijde maximale cumulatieve emissie van ongeveer 600-1200 GtCO₂ vanaf 2015 een waarschijnlijke kans (van meer dan 66 procent) geeft om beneden de 2°C te blijven. Voor een 1,5°C zouden emissies moeten worden beperkt tot een waarde in de orde van 250-400 Gt CO₂. Die maximale CO₂-emissies worden ook wel koolstofbudget genoemd. Ter vergelijking: een koolstofbudget van 900 GtCO₂ is bij de huidige emissies in 25 jaar volledig opgebruikt. De bovengenoemde ranges hangen vooral samen met onzekerheid over het klimaatsysteem.

Op basis van een aanname van gelijke wereldwijde emissie per hoofd in 2050 zou een Nederlandse doelstelling voor een 2°C-doel overeenkomen met een reductie van CO₂-emissies van zo'n 85-95 procent in 2050. Het 1,5°C-doel komt in dat geval overeen met een emissiereductie van meer dan 100 procent in 2050. Ruwweg betekent dit een volledige decarbonisatie van de Nederlandse energievoorziening in 2050. Voor deze illustratieve berekeningen zijn we uitgegaan van een gelijke emissieverdeling per hoofd van de wereldbevolking, en drie interpretaties van het Parijsdoel: maximaal 2°C met negatieve emissies, 2°C zonder negatieve emissies en 1,5°C met negatieve emissies (de cumulatieve mondiale CO₂ emissies vanaf 2020 tot 2050 variëren tussen de 550 en 850 GtCO₂).

Afhankelijk van het scenario zouden de emissiereducties in de EU in 2030 rond de 50 procent moeten zijn voor de 2°C-doelstelling en 60 procent voor 1,5°C ten opzichte van 1990.

1.2 Uitgangspunten voor de studie

Een emissiereductie van 80 of 95 procent in 2050 binnen de Nederlandse grenzen is uitgangspunt voor de analyses in deze studie. Die reductiepercentages betekenen in ieder geval dat er de noodzaak is van ingrijpende veranderingen of anders geformuleerd van meerdere maatschappelijke transitie.

De vragen die de aanleiding vormen tot dit rapport waren gericht op de betekenis van deze emissiedoelen voor de (beleids-)aanpak. Het gaat daarbij om de volgende vragen:

1. Met welke (bij voorkeur kostenoptimale) maatregelpakketten zou Nederland in 2050 een emissiereductie van 80 respectievelijk 95 procent kunnen realiseren?
2. Tot welke toekomstige verdeling van emissies over de functionaliteiten leiden die maatregelpakketten?
3. Wat betekenen de beelden voor 2050 voor wat in 2030 al moet worden bereikt om te kunnen spreken van een voortvarend verloop van het transitieproces? Wat betekent dit in termen van CO₂-emissies en ook per functionaliteit?

Deze vragen zijn als uitgangspunt gekozen. Dat wil niet zeggen dat deze vragen eenduidig kunnen worden beantwoord. De problemen daarbij worden in het rapport toegelicht. Bovendien hebben de beperkingen in de doorlooptijd alsmede de beschikbare capaciteit ertoe geleid dat de resultaten een sterk indicatief karakter hebben en de onzekerheden slechts summier konden worden verkend.

1.3 Aanpak

1.3.1 Beelden voor 2050 bij vergaande emissiereductie

In eerdere studies is al aangetoond dat er vele technische varianten zijn om een emissiereductie van 80 procent te realiseren (PBL/ECN 2011) en ook meerdere voor 95 procent (Ros en Schure 2016). In deze studie is van die resultaten met het E-Design model gebruik gemaakt. Aanvullend daarop is gezocht naar kostenoptimale maatregelpakketten voor 2050. Daartoe maakt de studie gebruik van het OPERA-model (Options Portfolio for Emission Reduction Analysis). Het model berekent – gegeven de veronderstelde randvoorwaarden over de toekomstige situatie, bijvoorbeeld over de kosten van technieken die nu nog in ontwikkeling zijn – een kostenoptimale configuratie van het energiesysteem. Een precieze bepaling van de kosten over een zo lange periode is echter onmogelijk (zie ook PBL/ECN 2011). Het is daarom niet mogelijk één kostenoptimaal maatregelpakket af te leiden, maar de aanpak geeft wel aanwijzingen over relatief goedkope en dure maatregelpakketten.

Beide modellen zijn gericht op Nederland als geheel. Dat betekent enerzijds dat de uitwisseling met het buitenland slechts beperkt wordt meegenomen en anderzijds dat de mate van detail in de uitwerking voor specifieke sectoren eveneens beperkingen kent. De kracht van de modellen zit in het integrale karakter van de toekomstbeelden waarin vraag en aanbod van energiedragers goed op elkaar wordt afgestemd.

Vele factoren zijn van invloed op de resultaten. In het kader van deze studie konden slechts enkele daarvan nader worden bekeken en kon geen volledige onzekerheidsanalyse worden uitgevoerd. De factoren die wel nader zijn bekeken hebben vooral te maken met beschikbare potentiëlen en het al dan niet uitsluiten van technieken. Hiervoor zijn verschillende varianten met het OPERA-model doorgerekend, met name verschillende aannames op het gebied van beschikbare potentiëlen zoals biomassa, CCS, kernenergie en wind. Met het E-Design model zijn in eerdere analyses soortgelijke varianten bekeken.

De uitkomsten vormen daarmee stippen op de horizon, waar het beleid gericht op de energietransitie op kan koersen. Ze laten zien hoe belangrijk bepaalde technieken zijn, welke vraagstukken nog openstaan en welke oplossingsrichtingen nadere bestudering verdienen.

1.3.2 Betekenis van de 2050-beelden voor de periode tot 2030

Op basis van de beelden voor 2050 is het mogelijk om belangrijke stappen te identificeren voor de periode tot 2030. De beelden laten immers zien welke technieken belangrijk (kunnen) zijn, wat de omvang daarvan in 2050 kan zijn, wat dit kan betekenen voor de rol van bepaalde actoren, enzovoort. Het gaat daarbij voor 2030 niet alleen om de fysieke emissiereductie in 2030 die voor het klimaatbeleid van belang is. Het gaat ook om de voorbereidende stappen tot 2030, die nodig zijn om na 2030 de vereiste verdere emissiereducties en de daarvoor benodigde transitie voldoende snel, en bij voorkeur op een soepele en efficiënte manier door te kunnen zetten.

Dat betekent dat de voor de transitie gewenste (tussen-)situatie in 2030 niet (alleen) kan worden uitgedrukt in een bepaald niveau van broeikasgasemissies. Het is evenmin mogelijk om op wetenschappelijke grondslag precies aan te geven, in hoeverre nieuwe CO₂-arme technieken in 2030 al moeten zijn geïmplementeerd om van een voldoende voortvarend verlopende transitie te kunnen spreken.

Om die reden worden drie typen acties voor de periode tot 2030 onderscheiden:

- a) Acties die de transitie moeten faciliteren, maar geen directe emissiereductie opleveren
- b) Acties gericht op implementatie van nieuwe (in de beginfase soms nog relatief dure) technieken die van groot belang zijn om één van de gewenste eindbeelden voor 2050 te kunnen realiseren en ook emissiereductie met zich meebrengen
- c) Andere acties die op de korte termijn tot emissiereductie kunnen leiden, maar minder cruciaal zijn voor de transitie; daarbij komt ook aan de orde of deze acties mogelijk belemmerend kunnen werken voor de gewenste transitie.

In overleg met de betrokken ministeries is daarnaast geanalyseerd wat een lineaire emissieontwikkeling tussen 2014 en de voor 2050 afgeleide emissies per functionaliteit zou opleveren voor de emissies in 2030. Het inzicht hierin kan ondersteunend zijn bij de keuze voor eventuele emissiedoelen in 2030. In het kader van deze studie is het niet mogelijk om bij die emissieniveaus ook precieze maatregelpakketten te geven. Met name de verhouding tussen de hiervoor genoemde acties b) en c) vraagt hiervoor nadere bestudering.

1.3.3 Afbakening van de functionaliteiten

De indeling in dit rapport en de verdeling van emissies sluiten zo veel mogelijk aan bij de nieuwe indeling in functionaliteiten die de ministeries van Economische Zaken, Infrastructuur en Milieu, en Binnenlandse Zaken en Koninkrijksrelaties gebruiken:

- hoge temperatuur warmte (HTW)
- kracht en licht (K&L)
- lage temperatuur warmte (LTW)
- mobiliteit (Mob)
- voedsel en natuur (V&N).

Daarbij dient echter de kanttekening te worden geplaatst dat de gebruikte afbakening van de functionaliteiten en de keuzen daarbij niet kunnen worden gebaseerd op formele beleidskeuzen. Het moet daarom worden gezien als een voorlopige afbakening die tot stand gekomen is in overleg van de vertegenwoordigers van de ministeries die dit project hebben begeleid. Daarbij is als uitgangspunt genomen dat de functionaliteiten alleen de emissies binnen Nederland en dan ook alle emissies moeten omvatten. Een dergelijke indeling stimuleert een

meer systeemgerichte aanpak, maar heeft in de precieze afbakening en betekenis in het beleid, bijvoorbeeld gericht op beleidsdoelen in de vorm van emissies, een nadere analyse van de consequenties (zie daarover tekstbox 1.2). Tabel 1.1. geeft een overzicht van de functionaliteiten, en beschrijft wat in de berekeningen wel en niet onder de afzonderlijke functionaliteiten valt.

Tabel 1.1. Uitgangspunten voor de in dit rapport gehanteerde verdeling van emissies binnen Nederland over functionaliteiten.

Functionaliteit	Scope	Toelichting
Lage temperatuur warmte	Warmtevraag in huishoudens, handel, diensten en overheid, en glastuinbouw	Inclusief elektrificatie van de warmtevraag elektriciteitsvraag voor hernieuwbare warmte (warmtepompen, pompenergie geothermie) en warmtelevering
Hoge temperatuur warmte	Warmtevraag in industrie, inclusief kleine industrie	Inclusief kleine industrie, en inclusief de (kleine) lage temperatuurwarmtevraag binnen de industrie, omdat de warmtevoorziening via cascadering vaak in HT- en LT-vraag voorziet. Bij elektrificatie van processen blijft dit onder HT-warmte vallen Exclusief raffinaderijen, die worden naar rato van de levering van de geproduceerde olieproducten aan respectievelijk mobiliteit en HT-warmte toebedeeld; dat geldt ook voor geëxporteerde producten al is in 2050 in de berekeningen met OPERA geen export verondersteld.
Kracht en licht	Traditionele elektriciteitsvraag in huishoudens, diensten en industrie	Omvat verlichting, apparaten, pompen en compressoren. Exclusief nieuwe elektriciteitstoepassingen zoals elektrificatie van warmtevraag, warmtepompen en power-to-X en exclusief elektrisch transport
Mobiliteit	Energievraag voor transport	Inclusief elektriciteitsproductie en brandstofproductie voor voertuigen, bestaand elektriciteitsverbruik treinen en mobiele werktuigen. Raffinaderijen worden naar rato van de levering van de geproduceerde olie aan resp. mobiliteit en HT-warmte toebedeeld en export
Voedsel en natuur	Emissies, voornamelijk OBG, door landbouw en natuur	Nauwelijks relevant voor energie, m.u.v. gasproductie uit mest (wat als productie aan andere functionaliteiten wordt toegerekend)
Overig	Een aantal processen waarvan de positie nog niet duidelijk is.	Onder andere de opslag van CO ₂ en bijbehorend elektriciteitsverbruik In het referentiejaar was de emissie van stortplaatsen nog aanzienlijk.

Aanbodactiviteiten (productie van elektriciteit, waterstof, warmte voor warmtenetten, biogene brandstoffen) zijn niet op voorhand onder te brengen bij een functionaliteit. Het toerekenen van verbruik en emissies gebeurt op grond van de verdeling van de levering van de producten aan de verschillende functionaliteiten. In de huidige situatie is dit vooral van toepassing op de raffinaderijen (toe te rekenen aan HTW en Mob) en de elektriciteitsopwekking (toe te rekenen aan K&L). In de toekomst wordt zowel de diversiteit aan aanbodsectoren,

zoals de productie van groene brandstoffen, als het scala aan leveringen, bijvoorbeeld door elektrificatie, groter.

Voor deze studie zijn analyses met de modellen OPERA en E-Design gebruikt (zie 2.1). Om met deze nieuwe afbakeningen tot emissiecijfers te kunnen komen zijn in de eerste plaats toewijzingen in het OPERA-model opgenomen. Ook in het model E-Design zijn de resultaten met eenvoudige rekenregels omgezet naar de functionaliteiten. Voor de historische emissiegegevens (1990 en 2014), alsmede voor de emissies in 2030 op basis van voorgenomen beleid zijn de resultaten per sector eveneens zo goed mogelijk toegedeeld naar de functionaliteiten. Omdat moest worden uitgegaan van verschillende datasets en modelstructuren bij deze toedelingen kunnen er op details inconsistenties zitten in de verschillende berekeningen, reden waarom de resultaten vooral een eerste indicatie van ordegrottes geven.

1.4 Indeling van het rapport

Hoofdstuk 2 gaat in op de beelden in 2050 in de vorm van de combinaties van technieken waarmee een emissiereductie van 80 dan wel 95 procent kan worden bereikt ten opzichte van 1990. Allereerst wordt in 2.1 de aanpak beschreven met de gekozen varianten in de nieuwe berekeningen, de beperkingen en de wijze waarop kosten zijn bepaald. Een toelichting op de gebruikte modellen is opgenomen in bijlage 1. In 2.2 wordt het bij de nieuwe berekeningen gehanteerde referentiescenario beschreven. Vervolgens worden de resultaten gepresenteerd. In 2.3 staan de kosten voor de met OPERA berekende varianten, in 2.4 de bandbreedtes van de emissies per functionaliteit in 2050 op basis van alle beschikbare modelberekeningen en in 2.5 de inzet van hernieuwbare energie en de rol van energiebesparing. Vervolgens wordt verder ingezoomd op de technologische kenmerken in de 2050-beelden. In paragraaf 2.6 worden de algemene technologische kenmerken besproken. Vervolgens worden de onderdelen van het systeem beschouwd, waarbij de aanbodsectoren elektriciteitsvoorziening en de brandstoffenproductie in 2.7 apart worden beschouwd omdat ze voor meerdere functionaliteiten van belang zijn en komen in 2.8 de vijf functionaliteiten aan de orde. Gedetailleerde resultaten van de nieuwe berekeningen met het OPERA-model staan in bijlage 2.

Hoofdstuk 3 gaat in op de periode tot 2030, maar dan wel gericht op de twee mogelijke doelen voor de emissiereductie in 2050. In de eerste plaats wordt in 3.2 geschetst wat een geleidelijke emissiereductie in de tijd, vertaald naar een lineaire ontwikkeling van de emissie tussen 2014 en 2050 voor tussenwaarden van de emissies per functionaliteit in 2030 zou betekenen. In 3.3 wordt in algemene zin geschetst wat de betekenis van de 2050-beelden voor de acties op de korte termijn kunnen betekenen. Vervolgens worden in 3.4 tot en met 3.6 voor de aanbodsectoren en per functionaliteit concrete stappen benoemd die in de periode tot 2030 van groot belang zijn voor de gewenste transitie. Dat kunnen maatregelen zijn die tot directe emissiereductie leiden, maar juist ook maatregelen die belangrijke randvoorwaarden voor grootschalige implementatie van CO₂-arme technieken in een latere fase invullen. Ten slotte wordt in 3.7 en 3.8 kort geschetst wat respectievelijk de aandelen hernieuwbare energie en het energiegebruik in de 2050-beelden zou kunnen betekenen voor tussenresultaten in 2030.

Tekstbox 1.2. Functionaliteiten en hun mogelijke betekenis voor klimaatbeleid

Uit 'Rijk zonder CO₂. Naar een duurzame energievoorziening in 2050. Advies van de Raad voor de Leefomgeving en Infrastructuur (RLI, 2015):

Het jaar 2050 lijkt ver weg, maar de opgave is ook groot en ambitieus. Tegelijkertijd stelt de raad vast dat de onzekerheden, technisch maar ook sociaal-maatschappelijk, te groot zijn om een gedetailleerd pad uit te stippelen. Ook daarom is een ander perspectief nodig: we moeten niet langer redeneren vanuit de huidige situatie, vanuit het nu, maar in de discussie ruimte maken voor de toekomst. Bovendien moet de discussie breder gevoerd worden dan over specifieke bronnen en sectoren. Om deze redenen is het startpunt van het advies de fundamentele maatschappelijke behoefte waarin energie, ook in 2050, moet voorzien. De raad onderscheidt vier functionaliteiten: i) lage temperatuur warmte in gebouwen voor verwarming en warm water; ii) hoge temperatuur warmte voor industriële productie; iii) transport en mobiliteit; iv) de werking van verlichting en elektrische apparaten.

Het bovenstaande is niet alleen een pleidooi voor een backcasting benadering zoals in dit PBL-rapport, het wijst bovendien op een aanpak die meer is gericht op de vormgeving van een nieuw systeem dan op het verminderen van emissies bij bestaande processen en sectoren. Een indeling in functionaliteiten kan helpen om het transitieproces meer systeemgericht te benaderen. Maar wat zijn die fundamentele maatschappelijke behoeften? Gaat het dan om behoeften van mensen; behoeften als voeding, zorg, comfortabel wonen met facetten als goede temperatuur, hygiëne en ontspanning en kunnen reizen? Voor de invulling van die behoeften kunnen innovatieve systeemconcepten naar voren komen met andere typen producten, andere materiaalkeuzen, andere diensten en ook andere vormen van interactie tussen consument en techniek. Beleidsaangrijpingspunten komen dichterbij de consument en de aanbieder van eindproducten en diensten.

De RLI heeft een invulling voorgesteld met energiefunctie-eigenheden. Lage temperatuur warmte, mobiliteit en kracht en licht komen dan wel in de buurt van de fundamentele behoeften van de mens, maar zijn toch net iets anders gedefinieerd. Voor hoge temperatuur warmte gaat het niet om een functionele behoefte van de mens maar van de industrie en zelfs voor betrokken bedrijven kan het vaak zonder hoge temperaturen. Daarmee gaat al een deel van de potentiële meerwaarde van de benadering verloren en dat verlies wordt nog versterkt door alle emissies binnen de landsgrenzen te verdelen over de functionaliteiten (met voedsel en natuur als vijfde). Functievulling – denk aan de productieketens – gaat immers in de praktijk vrijwel altijd voor een deel over de landsgrenzen heen. De nationale emissiebenadering past daar niet bij.

In de uitwerking leidt de huidige benadering tot soms discutabele keuzen over de toedeling van bepaalde emissies aan een bepaalde functionaliteit. De huidige monitoring is niet afgestemd op deze indeling en ze past evenmin bij de door de EU aan Nederland gevraagde emissierapportages. Dat zijn echter geen doorslaggevende zaken als de meerwaarde van de benadering voor het beleid groot genoeg is. Zoals hiervoor al aangegeven is er echter door de gemaakte keuzen voor de praktische invulling al veel van de potentiële meerwaarde weggevallen. Bovendien is onzeker of enige maatschappelijke partij zich verantwoordelijk voelt voor zo'n functionaliteit.

De meest effectieve aangrijpingspunten voor het beleid zijn de actoren met voldoende handelingsperspectief. Zo staan de verduurzaming van de elektriciteitsvoorziening en de prikkels die daarvoor nodig zijn grotendeels los van de vraag in welke functionaliteit de geproduceerde elektriciteit wordt ingezet. Datzelfde geldt voor de ontwikkelingen van nieuwe energie-aanbodsectoren voor biogene brandstoffen en waterstof, waarvan de bestemming van het product ook niet op voorhand vaststaat. Het ligt daarom voor de hand om ook los van de functionaliteitenbenadering aanbodsectoren de juiste prikkels te bieden. Belangrijker is eveneens de vraag of de gekozen functionaliteitenindeling gekoppeld aan een verdeling van de Nederlandse emissies met mogelijk zelfs vijf subdoelen voor emissies per functionaliteit de juiste prikkels geeft aan het gewenste transitieproces. We hebben daartoe geen grondige analyse uitgevoerd maar zijn al wel op enkele voorbeelden gestuit die op het tegendeel wijzen: het kan tot verkeerde prikkels leiden. Een voorbeeld: op de korte termijn leidt elektrificatie tot minder emissiereductie per functionaliteit dan import van groene brandstoffen. Voor de transitie is het juist van het grootste belang zo veel mogelijk op elektrificatie in te zetten en daar zo snel mogelijk mee te beginnen. Redenen genoeg voor bezinning op de invalshoek van de functionaliteiten in het beleid.

2 Beelden voor 2050

2.1 Inleiding

Dit hoofdstuk geeft inzicht in mogelijke beelden voor 2050 bij 80 of 95 procent reductie van de Nederlandse uitstoot van broeikasgassen. Voor diverse uitgangspunten voor beschikbaarheid van biomassa, CCS, windenergie en kernenergie laat het zien wat bijbehorende (kostenoptimale) beelden zijn, en welke kosten, en verdeling van emissies over de functionaliteit daarbij horen. Ook de technische invulling en de meer of minder robuuste elementen daarin komen aan de orde. Daarmee vormt dit hoofdstuk een basis voor hoofdstuk 3, dat in kaart brengt welke acties tot 2030 nodig zijn om te anticiperen op de beelden tot 2050.

2.1.1 Korte beschrijving van de gebruikte modellen

Nieuwe beelden zijn berekend met het OPERA-model (Options Portfolio for Emission Reduction Analysis), dat de kostenoptimale configuratie van het energiesysteem berekent gegeven bepaalde uitgangspunten zoals voor de kosten van technieken en hun inpassing in het systeem in dat toekomstjaar. Daarnaast zijn eerdere analyses met het door PBL en ECN ontwikkelde model E-design gebruikt om de resultaten breder en robuuster te maken. Verder zijn aparte analyses gedaan voor landgebruik. Hieronder volgt een korte toelichting op de modellen en modelberekeningen. Zie voor aanvullende details over de modellen en kanttekeningen bijlage 1.

Specifieke kenmerken en gebruik van het OPERA-model

De kostenoptimalisatie in het OPERA-model (Daniels et al. 2014, De Joode et al. 2014) houdt rekening met allerlei genoemde factoren die van belang zijn voor de kosten van het energiesysteem. Het grote voordeel van een kostenoptimale oplossing is dat het een heel helder gedefinieerde oplossing is. Het resulterende energiesysteem is immers niet een willekeurige mix van mogelijkheden waarmee Nederland 2050 haar emissiereductiedoelen zou kunnen halen, maar het is – gegeven de op basis van expert beoordeling veronderstelde mogelijkheden, onzekerheden en de beperkingen van het model - de goedkoopste manier om dat doen. Het betekent ook dat van iedere techniek in de oplossing de status duidelijk is: gegeven de veronderstellingen zou elke andere techniek op die plek tot hogere kosten leiden. Tekstbox 2.1 laat zien welke factoren een rol spelen bij het bepalen van de kostenoptimale situatie.

In die veronderstellingen kan de gebruiker van het model ook rekening houden met andere factoren dan kosten die van belang kunnen zijn voor de (maximale) inzet van een techniek of potentieel in 2050. De gebruiker kan het model altijd overrulen als andere dan kostenafwegingen inzet van een techniek of potentieel niet of minder waarschijnlijk maken. De huidige analyse varieert expliciet in de veronderstelde beschikbaarheid van biomassa, CCS, nucleair en wind op basis van andere dan kostenoverwegingen, maar ook bij andere veronderstellingen is soms rekening gehouden met meer dan alleen technische begrenzingen.

Tekstbox 2.1. Kostenoptimaliteit

De vraag: "Welke oplossing is voor het systeem kostenoptimaal?" wordt soms verward met de vraag: "Wat is op een bepaalde plaats de goedkoopste techniek?" Die laatste vraag laat echter veel aspecten buiten beschouwing die vaak juist doorslaggevend zijn voor wat de kostenoptimale oplossing is. Naarmate reductiedoelen verder gaan en potentiële krappere zijn, worden die andere aspecten bovendien steeds belangrijker.

Een model als OPERA betreft dan ook veel meer vragen in het bepalen van de kostenoptimale oplossing. Ook om te begrijpen waarom een oplossing kostenoptimaal is, en waarom een techniek of optie daarin een bepaalde rol – of juist geen rol – speelt, is het van belang te weten welke vragen daarbij allemaal komen kijken. Een aantal voorbeelden:

- Hoe duur is een techniek en hoe duur zijn de alternatieven?
- Hoe groot is de emissiereductie van een techniek en die van alternatieven? Gaat die reductie ver genoeg om het doel te halen?
- Gebruikt de techniek energie die elders opgewekt moet worden? Wat zijn de kosten en emissies van die energieopwekking en wat zijn de grenzen aan de beschikbaarheid ervan? Welke voorzieningen en kosten vergt het om die energie op de plek van bestemming te krijgen? Kan die energie op elk gewenst moment geleverd worden, of vergt dat aanvullende maatregelen en kosten?
- Heeft een techniek zelf effecten die elders in het systeem aanvullende maatregelen en kosten vergen? Of kan een techniek juist zelf een rol spelen bij het opvangen van effecten van andere technieken? Maken effecten van andere technieken de techniek duurder?
- Gebruikt de techniek direct of indirect resources (bijvoorbeeld CCS, biomassa) die ook elders ingezet kunnen worden? Hoeveel is daarvan beschikbaar? Hoe efficiënt gebruikt de techniek die resources? Levert inzet van die resources elders meer of minder emissiereductie of kostenvoordelen omdat alternatieven elders dunner gezaaid zijn en/of duurder zijn?

De verklaringen die dit hoofdstuk op een aantal plekken voor de rol van technieken voor bepaalde functionaliteiten geeft zijn vrijwel altijd gerelateerd aan bovenstaande vragen.

Overigens is een maatregelpakket dat in 2050 tot de laagste kosten leidt nog iets anders dan een analyse naar de laagste kosten voor een transitiepad over de periode van nu tot 2050. Dat laatste is voor dit rapport niet geanalyseerd.

Specifieke kenmerken en gebruik van het model E-Design

E-design is specifiek ontwikkeld als backcastingtool. Het bevat geen kostenoptimalisatie. De gebruiker ontwerpt het systeem van 2050 en maakt zelf keuzen voor technieken. Ook in dit geval zorgt het model voor de balans tussen vraag en aanbod van de verschillende vormen van energie. In het model zelf zitten geen specifieke besparingsmaatregelen. De energievraag in 2050 is onderdeel van het scenariobeeld van economische activiteiten in 2050 en wordt – inclusief de daarbij veronderstelde energiebesparing – buiten het model om vastgesteld.

Interactief kan de gebruiker toe werken naar een ontwerp dat voldoet aan bepaalde uitgangspunten, zoals een resterende emissie maar bijvoorbeeld ook een maximale inzet van biomassa. De gebruiker kan hierbij rekening houden met diverse factoren, anders dan kosten, die mogelijk de maximale inzet van zo'n techniek in 2050 zouden kunnen beïnvloeden (zie ook PBL 2016, themawebsite energietransitie).

Status uitkomsten modellen

De output van de modellen geeft inzicht in de broeikasgasemissies, de jaarlijkse kosten, de inzet van bepaalde voorraden (zoals biomassa, opslag van CO₂ en geothermie) en van technieken met een mogelijk beperkt potentieel zoals wind, zon en kernenergie. Het is goed om de betrekkelijkheid van de uitkomsten in het oog te houden. De uitkomsten zijn gebaseerd

op de huidige inzichten over beschikbaarheid, eigenschappen en kosten. Die inzichten veranderen voortdurend. De uitkomsten zijn daarmee vooral een verzameling beelden die inzicht bieden in welke oplossingsrichtingen voor de hand liggen om verder te verkennen en te onderzoeken, omdat ze niet tot onnodig hoge kosten zullen leiden.

2.1.2 Emissies conform IPCC

De berekende emissies met het OPERA-model en E-design zijn conform IPCC. Dat heeft een aantal gevolgen. Het gaat alleen om emissies op Nederlands grondgebied. Dat betekent dat emissie-effecten buiten Nederland geen rol spelen in de afwegingen. Om dit enigszins te ondervangen is de uitwisseling met het buitenland van bewerkte energiedragers zoveel mogelijk beperkt. Het model kent dus geen import van waterstof en beperkte export van elektriciteit. De laatste is ontleend aan de naar 2050 geëxtrapoleerde NEV 2016 baseline. Ook betekent de focus op emissies op Nederlandse grondgebied dat er geen uitwisseling van de fysieke reductieopgave met het buitenland is, zoals bijvoorbeeld via het ETS. Een belangrijk gevolg is wel dat de kosten waarschijnlijk iets hoger uitvallen dan bij internationale uitwisseling het geval zou zijn.

Biobased feedstock telt niet mee als emissiereductie

Verder betekent de IPCC definitie dat vastlegging van biogene brandstoffen in producten niet als emissiereductie telt. Immers, pas daar waar de producten na gebruik weer verbrand worden is er een emissie-effect. Biobased chemie telt daarom niet als emissiereductieoptie voor Nederland. Alleen biomassa plus CCS telt als negatieve emissie.

Emissies lucht- en scheepvaart

De internationale bunkers vallen buiten de scope van de binnenlandse emissies. In de analyses met het E-design model zijn ook emissies van lucht- en scheepvaart meegenomen. De emissies van lucht- en scheepvaart treden slechts beperkt op binnen de grenzen van Nederland. Naar rato van het aandeel van Nederland in de mondiale economie is ook het aandeel van Nederland in de mondiale emissies van lucht- en scheepvaart bepaald. Aangezien de volgens de huidige inzichten belangrijkste emissiereductiemaatregel voor deze sectoren voor 2050 de inzet van biobrandstoffen is, heeft dit sterke invloed op de benodigde biomassa.

LULUCF-emissies

LULUCF-emissies (Land Use, Land Use Change and Forestry) vallen buiten de modelanalyse. LULUCF telt wel mee voor de IPCC-emissies. Deze emissies zijn niet meegenomen in de modelberekeningen gericht op 80 dan wel 95 procent emissiereductie, alsmede in de daaruit afgeleide emissieoverzichten. Ze zijn wel nader beschouwd, alsmede de opties om ze terug te dringen en gepresenteerd onder de functionaliteit voedsel en natuur.

2.1.3 Beperkingen van de uitgevoerde analyses

Omdat de uitgangspunten voor 2050 zeer onzeker zijn – beschikbare potentiële technieken, eigenschappen van die technieken enzovoort – vertegenwoordigen de uitkomsten van het OPERA-model zeker niet hét kostenoptimale beeld voor 2050: dat bestaat niet. Ongeacht de modelkeuze is het op een zo lange termijn niet mogelijk zo'n pakket te bepalen. Daarvoor zijn er te veel onzekerheden.

Drie belangrijke onzekerheden die binnen het tijdsbestek van dit project niet nader konden worden verkend betreffen:

- a. Onzekerheden in de kosten van technieken. Deze onzekerheden zijn enerzijds het gevolg van het feit dat er vele relatief nieuwe technieken in zitten die nog een leertraject

doormaken. Daarnaast zijn er vele aspecten van systeemintegratie aan de orde, waarvoor het lastig is eenduidig de kosten in de toekomst in te schatten.

- b. Analyses met één scenario in plaats van verschillende scenario's. Voor ontwikkelingen over een zo lange periode zijn er vele onzekerheden over bijvoorbeeld activiteitsniveaus in de verschillende economische sectoren en consumptief gedrag. Ook de prijzen van grondstoffen zijn onzeker en vormen daarom deel van scenario-uitgangspunten in verkenningen over een zo lange periode. Overigens zijn in de E-Design analyses andere scenario-uitgangspunten (PBL/ECN 2011) gehanteerd dan in de nieuwe berekeningen met OPERA (zie 2.2).
- c. Onzekerheden over andere factoren dan kosten die de implementatie in de praktijk kunnen bepalen. Voorbeelden zijn specifieke factoren die de introductie van elektrische voertuigen vertragen of versnellen, lokale omstandigheden en weerstanden voor de realisatie van gasvrije wijken, innovatieve industriële processen die wel of niet op voldoende schaal zijn uitgetest om op tijd bij vervangingsmomenten te kunnen worden ingezet.

De getoonde resultaten geven indicatieve antwoorden en brengen globaal oplossingsrichtingen in kaart. Daarin worden robuuste elementen van het systeem in 2050 helder, waarvan de realisatie een daadkrachtige aanpak zal vragen. De resultaten kunnen eveneens leiden tot vragen. Ook dat past bij een transitieproces dat immers ook – en zeker nog in deze fase – het karakter van een zoekproces heeft. Onderdeel van een daadkrachtige aanpak is ook het voortvarend identificeren én wegnemen van leemtes in kennis, zodat kennisleemtes de voortgang van de transitie niet belemmeren.

2.1.4 Geanalyseerde varianten

Voor een aantal belangrijke variabelen zijn met het OPERA-model varianten doorgerekend en wel voor beschikbare biomassa, beschikbare CCS, kernenergie en windpotentieel (zie tabel 2.1). In alle gevallen gaat het alleen om beperkingen aan het maximaal in te zetten potentieel; het OPERA-model is dus vrij om in de oplossing onder dit maximum te blijven. Tekstbox 2.2 is toegevoegd om de betekenis van de gekozen varianten toe te lichten. De verschillende varianten vertegenwoordigen verder geen (beleids-)voorkeuren, wenselijkheden of waarschijnlijkheden, maar moeten in de eerste plaats de impact van de verschillende aannames zichtbaar maken.

De veronderstelde beperkingen op de potentiële kunnen samenhangen met de natuurlijke beschikbaarheid, technische realiseerbaarheid, maatschappelijke acceptatie en politieke keuzes, vaak in onderlinge samenhang. Er is meestal niet een enkele factor aan te wijzen die bepaalt hoeveel er in 2050 mogelijk is. Een voorbeeld is CCS: er is een - onzekere - natuurlijke opslagcapaciteit in de Nederlandse ondergrond, er zijn beperkingen aan de snelheid waarmee Nederland dit potentieel kan ontsluiten, het maatschappelijk draagvlak voor CCS bepaalt of CCS niet of bijvoorbeeld alleen offshore benut kan worden en tot slot is het een politieke keuze om de effectief beschikbare capaciteit in 20, 40 of 100 jaar te benutten. Het betekent dus dat als er bijvoorbeeld alleen voor CCS-offshore draagvlak is, dan niet meteen bekend is wat de maximale hoeveelheid Mton in 2050 is. Omgekeerd is ook niet te zeggen of voor 50 Mton per jaar rond 2050 CCS op land per se nodig is of dat dat noodzaakt tot export van CO₂. Bij dat laatste speelt uiteraard ook een rol wat de claim van andere landen op CO₂-opslagcapaciteit is.

Tabel 2.1. Randvoorwaarden voor de met OPERA doorgerekende varianten.

	Maximale CO ₂ opslag Mton CO ₂ /jaar	Maximale inzet biomassa (PJ)	Biomassa binnenland (PJ)	Biomassa buitenland (PJ)	Maximale capaciteit Wind op land (GW)	Maximale capaciteit Wind op zee (GW)	Maximale capaciteit kern-energie (GW)
Standaard	25	400	143	258	7	40	0
Max Biomassa	25	700	143	558	7	40	0
Min Biomassa	25	250	143	108	7	40	0
Max CCS	50	400	143	258	7	40	0
Min CCS	10	400	143	258	7	40	0
Max Nucleair	25	400	143	258	7	40	10
MaxWind	25	400	143	258	14	80	0
Max Biomassa en CCS	50	700	143	558	7	40	0
Min Biomassa en CCS	10	250	143	108	7	40	0
Max wind, min biomassa en CCS	10	250	143	108	14	80	0
Max Biomassa, min CCS	10	700	143	558	7	40	0
Min Biomassa, max CCS	50	250	143	108	7	40	0

Tekstbox 2.2. Wat stellen de potentiëlen in de verschillende varianten voor?

De potentieelaannames zijn vrij abstract, en geven niet meteen een duidelijk beeld van wat de aannames concreet inhouden. Om dit iets tastbaarder te maken, daarom een aantal voorbeelden.

CCS

25 Mton CCS is 20 keer de hoeveelheid afvang van het ROAD project, circa 2,5 keer de hoeveelheid CO₂ die de industrie in het IJmond gebied jaarlijks uitstoot, en qua ordegrrootte gelijk aan de uitstoot in de gemeente Rotterdam: stad plus haven en industrie. Het potentieel voor opslag bedraagt naar schatting 11000 Mton (Lysen et al. 2003), waarvan 1500 Mton offshore. 25 Mton opslag per jaar is dus – bij gebruik van alleen dit offshore potentieel – gedurende maximaal 60 jaar mogelijk.

Biomassa

De binnenlandse biomassa vertegenwoordigt vooral mest en reststromen: hout- en snoeiafval, diverse industriële en agrarische reststromen. Bij veel van die reststromen heeft de oorspronkelijke grondstof overigens vaak weer een buitenlandse herkomst. De – speciaal voor energie geïmporteerde – buitenlandse biomassa betreft voornamelijk houtpellets. 250 PJ import van biomassa is gelijk aan vijf keer de hoeveelheid die de partijen van het Energieakkoord als maximum hebben afgesproken voor de bij- en meestook in kolencentrales. In de NEV 2016 bedraagt het totale verbruik van biomassa in 2020 circa 190 PJ. Voor meer informatie over potentieel aanbod zie PBL (2014).

Nucleair

10 GW nucleair is ruim 20 keer het vermogen van de bestaande kerncentrale in Borssele, en ongeveer 3 keer het vermogen van de nieuw te bouwen centrale Hinkley Point in Groot-Brittannië.

Wind op land

7 GW wind op land ligt 1 GW boven het huidige streven voor 2020, en zou overeenkomen met bijvoorbeeld 3500 turbines van 2MW. Bij Wind op Zee zijn turbines meestal groter. 40 GW komt overeen met bijvoorbeeld 8000 turbines van 5 MW.

Overige veronderstellingen over potentiëlen

Naast de variërende aannames zijn er tal van aannames waarop de analyse niet varieert. Dit geldt zowel voor de grootte van potentiëlen als de beschikbaarheid van technieken. Een voorbeeld is de beschikbaarheid van geothermie, waarover ook nog aanzienlijke onzekerheid bestaat.

Algemeen uitgangspunt in de analyse bij technieken is dat het beter is technische mogelijkheden niet op voorhand uit te sluiten, ook als beschikbaarheid in 2050 nog twijfelachtig is. Op deze manier wordt in elk geval zichtbaar welke technische oplossingsrichtingen goed passen in een kostenoptimale invulling en wanneer. Het op voorhand uitsluiten van mogelijkheden ontnemt juist het zicht op dit soort bevindingen, en kan onzichtbaar maken waarop innovatie en ontwikkeling zich zouden moeten richten.

Algemeen uitgangspunt bij de grootte van potentiëlen is om deze niet te optimistisch in te schatten. Dat zou niet alleen leiden tot een onderschatting van de kosten, maar ook het belang van bepaalde potentiëlen – met name de duurdere – kunnen maskeren. Het uitsluiten van technische opties kan wel inzicht geven in het belang ervan voor de lange termijn (lukt het zonder een bepaalde optie nog om een doel te halen?). Voor dergelijke analyse was nu geen tijd, maar ze zijn eerder wel al gedaan met het E-Design model (PBL/ECN 2011; Ros 2015).

In tabel 2.2. zijn enkele belangrijke aannames voor de nieuwe analyses met OPERA op een rij gezet.

Tabel 2.2. Aannames voor enkele potentiële bronnen van emissiereductie.

Potentieel	Aanname	Toelichting
Zon-PV	74 GW	In de uitkomsten van de beschreven varianten ligt de inzet altijd lager. Zon-PV wordt dan de facto beperkt door de inpasbaarheid in de elektriciteitsvoorziening, en beschikbaarheid van alternatieven
Additionele besparing warmtevraag	Circa 400 PJ	Dit is exclusief de substitutie door elektrische alternatieven.
Additionele besparing elektriciteitsvraag	Circa 100 PJ	Dit omvat alleen het potentieel bij de traditionele elektriciteitstoepassingen (kracht en licht)

De doorgerekende varianten verschillen onderling in de begrenzing van de beschikbaarheid van belangrijke bronnen van CO₂-emissiereductie: beschikbare biomassa, CCS, nucleair en windenergie. De beschikbaarheid van technieken is in alle varianten hetzelfde, de varianten verschillen dus niet in het wel of niet beschikbaar zijn van elektrische auto's, warmtepompen etc. De resultaten laten dus vooral zien welke technieken uit kosten oogpunt meer of minder voor de hand liggen gegeven de aannames voor de potentiëlen.

2.1.5 Type maatregelen

De opties in de berekeningen omvatten daarom vooral technische reductieopties. Uitgangspunt daarbij is dat Nederland dezelfde (relatieve) bijdrage blijft leveren aan de mondiale productie van allerlei goederen als dat in de baseline het geval is. Volumemaatregelen of andere maatregelen die tot verschuiving van emissies naar het buitenland leiden zijn dus geen onderdeel van de analyse (tenzij dit nadrukkelijk wordt vermeld). Voorbeelden zijn krimp van de staalindustrie of veehouderij, overstap op schroot-gebaseerd (secundair) staal. Dit soort

maatregelen leveren op wereldschaal alleen een bijdrage aan emissiereductie als de mondiale vraag naar de bijbehorende producten (chemicaliën, primair staal, zuivel, vlees) ook daalt, of wanneer productie in het buitenland tegen lagere emissies kan plaatsvinden. Dit ligt echter niet binnen de directe invloedssfeer van het Nederlandse beleid. Het op voorhand anticiperen op een mondiale afname van de consumptie kan leiden tot een onderschatting van de reductieopgave voor Nederland. Dat laat onverlet dat inzet op verandering van consumptiepatronen en heroriëntering op de rol van Nederland bij de productie van bepaalde goederen onderdeel uit kunnen maken van het Nederlandse beleid.

Volume-effecten binnen het energiesysteem of volumemaatregelen zonder tegengestelde emissie-effecten in het buitenland vallen wel binnen de analyse: Een lagere/hogere vraag naar elektriciteit leidt tot een kleinere/grotere elektriciteitsproductie, rekeningrijden vermindert het aantal voertuigkilometers.

2.1.6 Berekening van meerkosten

Nationale Kosten

De kosten waarop het OPERA-model optimaliseert zijn de Nationale Kosten in 2050 volgens de milieukostenmethodiek. De Nationale Kosten omvatten de directe kosten vanuit Nationaal perspectief: investeringskosten (verdisconteert o.b.v. een discontovoet van 3 procent), jaarlijkse bedienings- en onderhoudskosten, energiekosten en -baten inclusief energiebesparing, en eventuele effecten op reistijd. Beleidsinstrumenten spelen geen rol in het bepalen van het kostenoptimaal pakket; ze kunnen hoogstens een rol spelen bij het tot stand brengen van een zo kostenoptimaal mogelijk pakket. Ook het ETS - en de CO₂-prijs daarin - spelen daarom geen rol voor het bepalen van kostenoptimale pakket – wat niet wil zeggen dat de analyse ervan uitgaat dat het ETS in 2050 niet meer bestaat! Het niet meenemen van het ETS ligt in de aard van de analyse: uitgangspunt is 80 of 95 procent emissiereducties in Nederland, daarmee staan de emissies vast. Dat verdraagt zich niet goed met een internationaal handelssysteem waarbij juist de prijs bepalend is voor de emissies. Daarnaast zou het meenemen van de CO₂-prijs de kosten van opties die onder het ETS vallen maskeren, terwijl die kosten er wel degelijk zijn.

De kosten omvatten geen bredere kosten zoals impact op energievoorzieningszekerheid, luchtverontreinigende emissies, biodiversiteit, voedselvoorzieningszekerheid, en indirecte effecten. Voor de totale kosten en baten maakt dit weliswaar wel uit, maar voor de mix van opties is de impact waarschijnlijk beperkt (Daniëls en Tieben 2012). Luchtverontreinigende emissies zijn vooral belangrijk bij de inzet van biomassa, en dit komt dan ook iets minder gunstig uit een bredere kostenbenadering.

Ook aspecten als de verdeling van lusten en lasten, ruimtelijke inpassing en maatschappelijk draagvlak zijn geen onderdeel van de kosten. Wel spelen ze in een aantal gevallen een rol voor de veronderstelde beschikbare potentiëlen in de doorgerekende varianten. Die varianten maken daarmee de impact van dergelijke aspecten wel zichtbaar, en kunnen daarmee de afweging tussen kosten en andere aspecten ondersteunen. Ze kunnen in OPERA en het E-Design model worden meegenomen in de technologiekeuzen.

Energieprijzen

Voor Nederland is het gebruik van energie een kostenpost, en het ten opzichte van de baseline vermeden energiegebruik een baat. De grootte van deze kosten en baten hangt af van de mondiale energieprijzen.

De onderliggende aanname van de analyse is dat Nederland alleen overgaat tot vergaande emissiereductie als de rest van de wereld dat ook doet. Daarom gebruikt de analyse de

brandstofprijzen uit de 2 graden scenario's uit de WLO (Aalbers et al. 2016, Matthijsen et al. 2015, www.wlo2015.nl) omdat deze een mondiale context met intensief klimaatbeleid vertegenwoordigen (tabel 2.3)¹. De elektriciteitsprijs speelt hierin geen rol, omdat elektriciteitsprijzen altijd een afgeleide zijn van prijzen van andere energiebronnen en van de kosten van de elektriciteitsproductietechnieken.

Tabel 2.3 Gehanteerde energieprijzen in de berekeningen met het OPERA-model volgens het WLO 2-graden scenario

In 2050	
Ruwe olie (\$/vat)	80
Gas (\$/Mbtu)	7
Kolen (\$/ton)	85
Biomassa (\$/gigajoule)	28

Totale kosten energiesysteem: lastig af te bakenen, daarom meerkosten

De beelden omvatten kosten van het energiesysteem als geheel en bijvoorbeeld aanvullende kosten om procesemissies van overige broeikasgassen te verminderen. Het is lastig om deze kosten in absolute getallen uit te drukken, omdat er geen goede afbakening voor het energiesysteem bestaat: moeten bijvoorbeeld de kosten van auto's er wel of niet in? Of gedeeltemogelijk? Wel mogelijk en ook zinvol is het om de kosten van de varianten onderling te vergelijken en zo meerkosten te bepalen. Zo'n vergelijking kan ook worden gedaan met een referentiebeeld voor 2050 zonder vergaande emissiereductie (zie 2.2).

2.2 Het referentiebeeld in 2050

NEV 2016

Het in dit project gehanteerde referentiebeeld is gebaseerd op de doorkijk naar 2050 van de Nationale Energieverkenning, NEV 2016 (Schoots et al. 2016). Deze doorkijk is het resultaat van extrapolatie van de ontwikkeling tot 2030 waarover in de NEV wordt gerapporteerd. De gepresenteerde kosten zijn meerkosten ten opzichte van dit scenario en binnen het tijdsbestek van dit project was alleen dit referentiescenario voor de met het OPERA-model berekende varianten mogelijk. De OPERA-berekeningen gaan uit van de met die werkwijze bepaalde omvang van bevolking en (economische) activiteiten en de hieruit voortvloeiende vraag naar energiediensten. De berekende kosten zijn de meerkosten ten opzichte van een situatie met het emissieniveau in 2050.

Waarom de keuze voor de NEV?

De keuze voor de NEV als baseline is ingegeven door inhoudelijke en praktische overwegingen. De NEV is de enige beschikbare projectie die een middenpad (trendmatige ontwikkeling van bevolking en economie) zonder verdere beleidsintensivering vertegenwoordigt. Daarmee geeft de NEV – voor zover dat op deze lange termijn mogelijk is – een indicatie van business-as-usual ontwikkelingen op het gebied van energiegebruik. Belangrijke praktische overwegingen zijn verder dat de beschikbare gegevens in de NEV voldoende detailniveau hebben om de vraag per functionaliteit te kunnen bepalen, en dat de gegevens over het Nederlandse energiesysteem automatisch ingeladen kunnen worden in OPERA. Dat was ook de doorslaggevende reden om binnen het korte tijdsbestek van dit project niet van de WLO-scenario's uit te gaan. Overigens zijn de WLO-scenario's wel gebruikt bij analyses voor de

¹ De prijzen uit de NEV zijn hiervoor niet bruikbaar: die vertegenwoordigen een business-as-usual scenario waarin de energieprijzen niet beïnvloed zijn door mondiale inspanningen om de broeikasgasemissies terug te dringen

landbouwemissies naast de berekeningen met OPERA, zodat de resultaten daarvoor daarmee in overeenstemming zijn.

2050 doorrekening NEV 2016

De gepubliceerde NEV 2016 loopt weliswaar tot 2030, maar bij de NEV 2016 heeft het NEV-modelinstrumentarium doorgerekend tot 2050². Het is deze doorkijk naar 2050 die de referentiesituatie vormt voor de huidige analyse. De getoonde meerkosten van 80 en 95 procent emissiereductie zijn ten opzichte van de emissies in de NEV 2016 voor 2050. De 2050 situatie in de NEV 2016 gaat uit van continuering van het voorgenomen beleid, zonder verdere beleidsintensivering. Belangrijke elementen daaruit zijn voortzetting van de SDE+, en diverse beleidsmaatregelen gericht op energiebesparing in de verschillende sectoren. De NEV 2016 komt daarmee op de kentallen voor energie en klimaat uit tabel 2.4, en een ontwikkeling van de CO₂-emissies uit figuur 2.1. Het beleid uit de NEV 2016 zorgt na 2030 voor een geleidelijke verdere daling van de CO₂-emissies.

Tabel 2.4. Kentallen in 2050 voor het referentiescenario, afgeleid uit het scenario uit de NEV 2016.

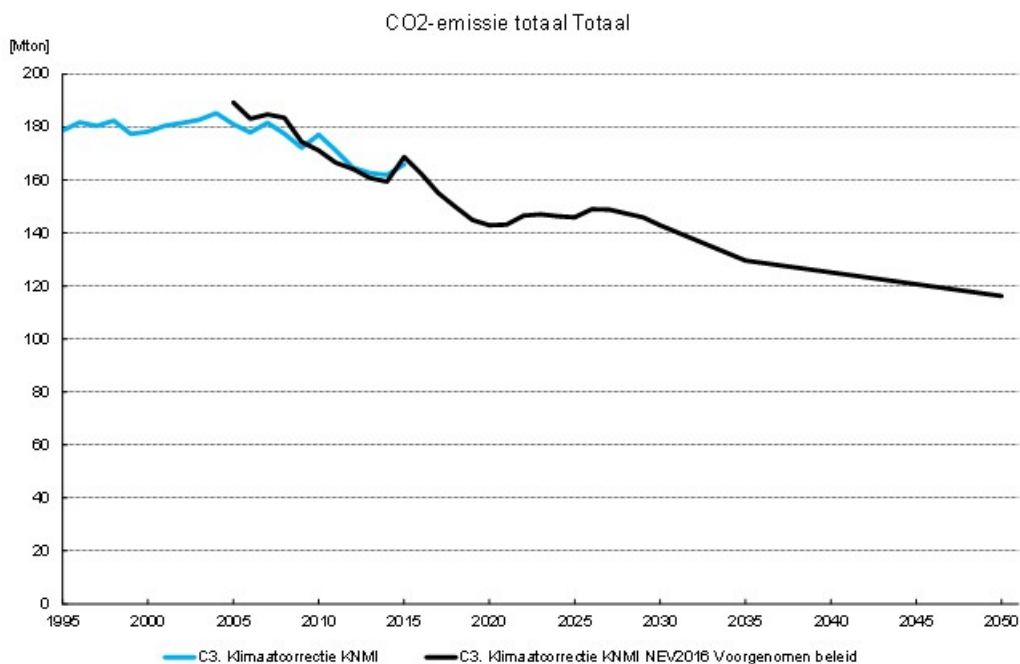
Item	2030 NEV 2016	2050
Totaal broeikasgasemissies Mton CO ₂ -eq	168,5	141
Aandeel hernieuwbaar %	20,6	29
Bruto finaal energetisch verbruik PJ	2005	1955
Aantal huishoudens (CBS Prognose 2015)	8,4 miljoen	8,6 miljoen
Bevolking (CBS Prognose 2015)	17,8 miljoen	18,1 miljoen
Woningvoorraad	8,3 miljoen	8,6 miljoen
Economische groeicijfers	2016-2030	2031-2050
BBP-groei	1.8%	1.5%
Consumptie huishoudens	1.6%	1.9%
Consumptie overheid	1.2%	1.1%
Investerings (inclusief voorraden)	2.7%	0.5%
Uitvoer van goederen en diensten	3.6%	2.5%
Invoer van goederen en diensten	3.7%	2.1%
Productie	1.6%	1.3%
Werkgelegenheid (in gewerkte uren)	0.4%	0.0%
Arbeidsproductiviteit	1.3%	1.5%
Koopkracht (dynamisch, gemiddeld per capita)	1.6%	1.6%

Uitgangspunten NEV 2016

De uitgangspunten voor de economische ontwikkelingen in de NEV 2016 zijn voor een groot deel afgeleid van de WLO. De NEV gebruikt voor verschillende economische variabelen een fictief middenpad op basis van het gemiddelde van de waarden uit de WLO-scenario's Hoog en Laag. De sectorgroei is op eenzelfde wijze als in de WLO bepaald, maar binnen de context van de macro-economische ontwikkelingen volgens de NEV. De NEV maakt daarbij voor de energie-intensieve sectoren, evenals de WLO, gebruik van een studie van CE Delft (CE 2014). De gevolgde aanpak voor de NEV 2015 is beschreven in Drissen (2016). De economische ontwikkelingen in de NEV 2016 wijken daar maar licht van af en zijn het gevolg van nieuwe bevolkingsprognoses van het CBS. Voor de demografische ontwikkelingen volgt de NEV de meest actuele bevolkings- en huishoudensprognose van het CBS, inclusief een

² Voor mobiliteit zijn de NEV 2016 resultaten voor 2020 en 2030 geëxtrapoleerd naar 2050.

nieuwe prognose van het arbeidsaanbod (CBS 2015). Daarmee is in de NEV 2016 rekening gehouden bij het bepalen van de economische groei³. Voor de OBG-emissies uit de landbouw is de middenwaarde tussen WLO-Hoog en WLO-Laag voor 2035 aangehouden.



Figuur 2.1. Ontwikkeling CO₂-emissies in de doorkijk van de NEV 2016.

Hoe gebruikt de analyse de NEV?

De belangrijkste informatie uit de NEV omvat de omvang in 2050 van de diverse (economische) activiteiten en de daaruit voortvloeiende vraag naar energie voor de verschillende functionaliteiten. De manier waarop in de NEV het energiesysteem aan die vraag voldoet, en hoe het energiesysteem er dus uit ziet, speelt voor de OPERA-berekeningen maar een beperkte rol: OPERA kiest voor een eigen invulling van die vraag, en houdt dus geen rekening met hernieuwbare energie en andere emissie-reducerende opties die in de NEV al ingezet worden. Wel neemt OPERA met het overnemen van de energievraag in de NEV impliciet over wat er in de NEV al aan energiebesparing plaatsvindt.

Voor de NEV zijn geen kosten van het energiesysteem bekend, maar OPERA kan wel zelf de kosten berekenen bij het emissieniveau uit de NEV, maar dan op basis van de energieprijzen uit de WLO-2 graden scenario's. Deze kosten fungeren als referentiewaarde voor de meerkosten.

³ Voor de langere termijn wordt - in navolging van het CPB - verondersteld dat de groei van de werkgelegenheid gelijk is aan de groei van het arbeidsaanbod en deze is weer gelijk is aan de groei van potentiële beroepsbevolking. Daarbij is gecorrigeerd voor veranderingen in de leeftijdsopbouw van de potentiële beroepsbevolking. Omdat de participatiegraden verschillen per leeftijdscohort en geslacht verandert namelijk de participatiegraad van de totale potentiële beroepsbevolking. Veranderingen in arbeidsaanbod zijn daarmee het gevolg van veranderingen in de potentiële beroepsbevolking.

2.3 Resultaten: kosten

2.3.1 Meerkosten en schaduwrijzen

De figuren 2.2. en 2.3. geven de meerkosten in 2050 ten opzichte van het referentiescenario en de schaduwrijzen voor CO₂-emissies in 2050. Bijlage 1 geeft een overzicht van de schaduwrijzen bij de verschillende doelen en varianten. De schaduwrijzen zijn de marginale kosten voor de duurste eenheid emissiereductie die nodig is om het doel te halen.

Alle getallen hebben betrekking op de situatie in 2050. Uiteraard zullen ook in de periode daaraan voorafgaand kosten optreden, maar de manier waarop de kosten zich in de loop van de tijd ontwikkelen is zonder specifieke analyse niet goed aan te geven. Dat komt omdat allerlei effecten door elkaar heen kunnen spelen: kostendaling, uitstel van duurdere opties tot het laatste moment of juist vroegtijdige toepassing vanwege een natuurlijk moment, etc.

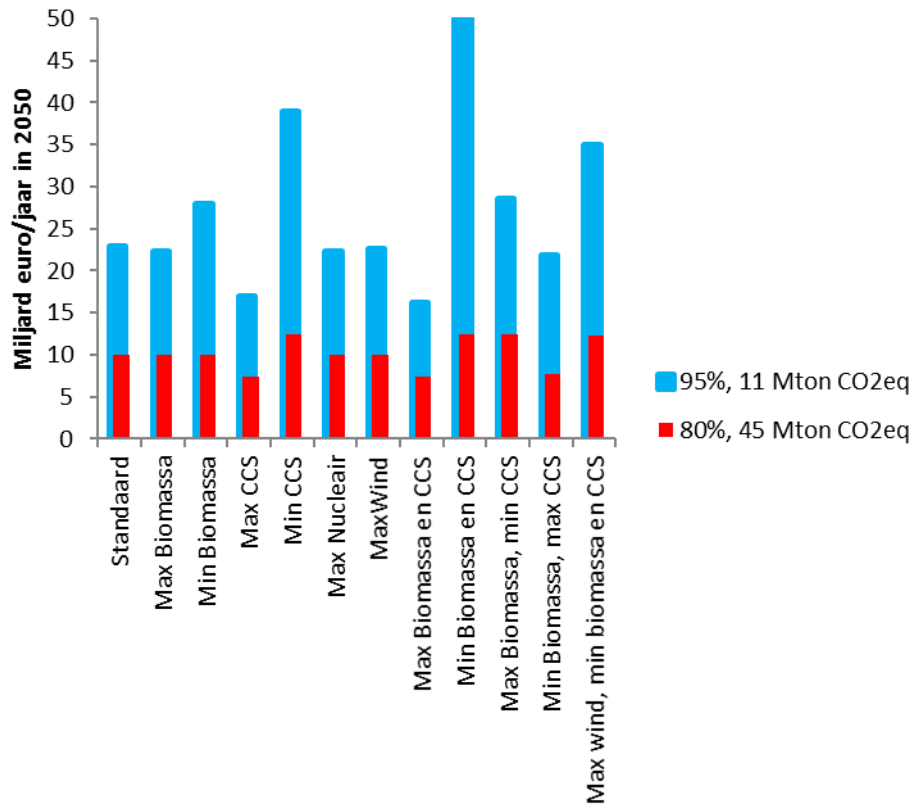
Kosten bij 80 procent reductie

De figuren laten zien dat de kosten en schaduwrijzen voor 80 procent emissiereductie relatief weinig variëren. De extra kosten bedragen zo'n 7 tot 12 miljard euro in huidige prijzen. Afgezet tegen het verwachte binnenlands product (BBP) van zo'n 935 miljard euro bij lage economische groei en 1320 miljard euro bij hoge groei, is dat 0,7 – 1,3 procent van het BBP bij lage economische groei en 0,5 – 0,9 procent van het BBP bij hoge economische groei (CPB en PBL 2015). De varianten met weinig CCS zijn het duurst, en de overige varianten liggen dicht bij elkaar. Dat betekent dat de beschikbaarheid van emissiereductiebronnen in geen van de varianten echt knellend wordt bij 80 procent.

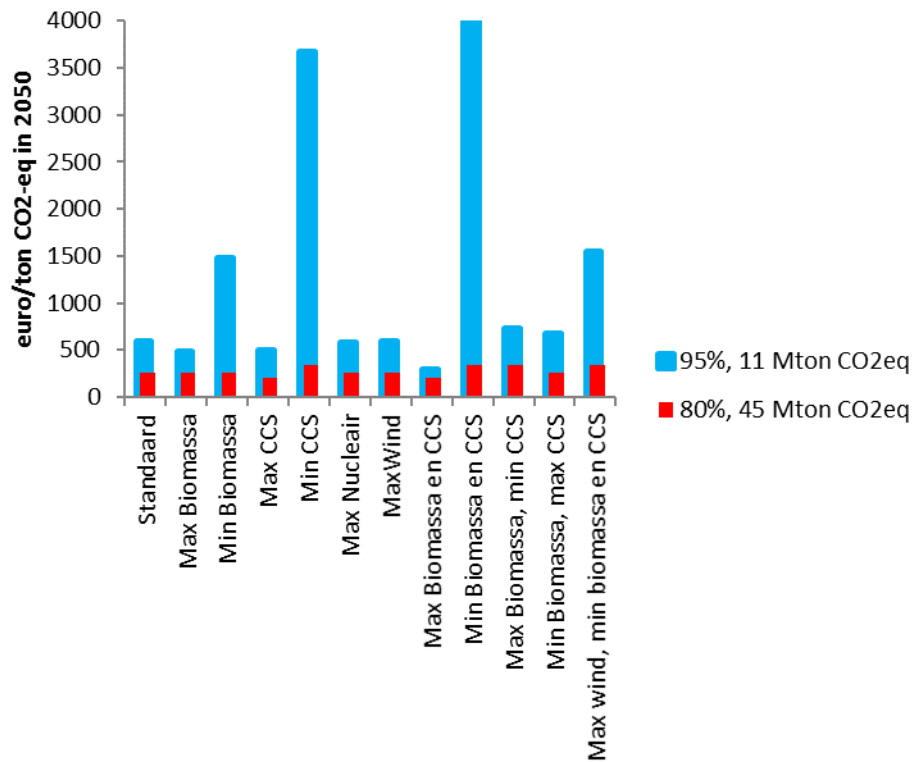
Kosten bij 95 procent reductie

Bij 95 procent reductie ligt dat duidelijk anders. Als er weinig biomassa en/of CCS beschikbaar is lopen de kosten flink op. Dat betekent dat in die gevallen de beschikbaarheid van CCS of biomassa wel knellend begint te worden, en dat veel duurdere maatregelen als alternatief nodig zijn. In een aantal gevallen lopen de marginale kosten zeer sterk op. In die gevallen ligt het doel niet zo ver van de theoretisch met technische maatregelen haalbare minimale emissie, en is het doel bij de veronderstelde mogelijkheden waarschijnlijk praktisch niet haalbaar: een theoretische berekening met een model is iets heel anders dan het daadwerkelijk aansturen van ontwikkelingen in de samenleving. In de standaard variant of bij ruime beschikbaarheid van biomassa, CCS, wind- of kernenergie bedragen de extra kosten zo'n 20 tot 25 miljard euro. Afgezet tegen een lage economische groei zou dat 2,1 – 2,7 procent van het BBP bedragen, en bij hoge economische groei 1,5 – 1,9 procent van het BBP.

Figuur 2.3 laat zien dat de schaduwrijzen voor CO₂-emissies sterk afhankelijk zijn van de gewenste emissiereductie en de beperkingen in de varianten. Ook in de WLO zijn – op EU-niveau – in de tweegraden scenario's prijzen berekend van 200-1000 euro/ton (Matthijsen et al. 2015). Ook daaruit blijkt de gevoeligheid voor gekozen randvoorwaarden.



Figuur 2.2. Meerkosten in 2050 ten opzichte van het referentiebeeld in de met OPERA doorgerekende varianten.



Figuur 2.3. Schaduwrijzen voor CO₂-emissies in de met OPERA doorgerekende varianten.

2.3.2 Kosten per functionaliteit

De in deze paragraaf gepresenteerde kosten omvatten de kosten aan de vraagkant en de aanbodkant, inclusief de kosten van energiegebruik en baten van uitgespaard energiegebruik.

Voorbeelden van kosten aan de aanbodkant zijn:

- Meerkosten hernieuwbare opwekking en technieken voor elektriciteitsopslag, nucleair
- Elektrolysecapaciteit voor de productie van waterstof
- Kosten van installaties voor productie van vloeibare biogene brandstoffen al dan niet met CCS, kosten van installaties voor productie groen gas al dan niet met CCS, meerprijs biomassa ten opzichte van fossiel
- Meerkosten infrastructuur (hoogspanningslijnen, warmtenetten, waterstofleidingen)
- Meerkosten van biomassa

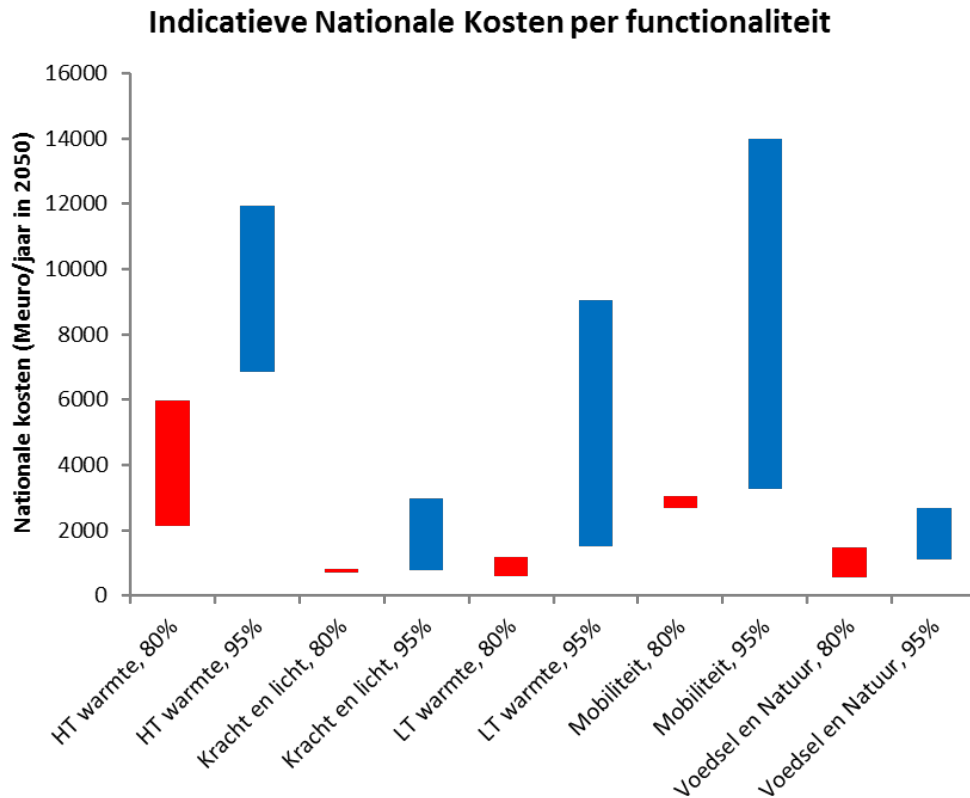
Afhankelijk van de bestemming van energiedragers van de aanbodkant tellen deze kosten ook mee bij de verschillende functionaliteiten. Daarnaast zijn er ook kosten (en soms baten van uitgespaarde energie) specifiek bij de sectoren binnen de functionaliteiten die de eindgebruikers van de energie zijn:

- HTW: investeringen in CCS, meerkosten biomassaketels, meerkosten biomassa, kosten besparingsmaatregelen
- K&L: kosten energiebesparingsmaatregelen
- LTW: isolatie, meerkosten warmtepompen en geothermie
- Mob: meerkosten elektrische en waterstofauto's inclusief bijbehorende infrastructuur
- V&N: kosten reductieopties overige broeikasgassen

Verdeling kosten over functionaliteiten

Figuur 2.4 laat de jaarlijkse meerkosten (kapitaal en O&M) zien per functionaliteit voor 80 en 95 procent. Bij 80 procent kunnen vooral de kosten bij HTW fors oplopen. Dat is consistent met het beeld dat in de baseline daarvoor ook het minste gebeurt. K&L is juist relatief laag, en ook dat is consistent met de veronderstelde voortzetting van SDE+ in de baseline. Bij 95 procent reiken vooral bij LTW en Mob de bandbreedtes hoog, en is de spreiding daar ook groot. In iets mindere mate geldt dit voor HTW. Bij overvloedige beschikbaarheid van biomassa en CCS hoeft er minder te gebeuren bij LTW en Mob, en gebeurt er juist meer bij HTW. Als de beschikbaarheid van biomassa en opslagcapaciteit voor CO₂ beperkt zijn, zijn er vooral bij LTW en Mob meer dure maatregelen nodig, zoals warmtepompen en energiebesparing (LTW) en elektrische en waterstofauto's (Mob).

De spreiding bij K&L is relatief gering. Dat is ook wel logisch: in alle varianten zijn de emissies daar al ongeveer nul. De variatie in kosten die wel optreedt heeft vooral te maken met de samenstelling van de elektriciteitsopwekking, extra elektriciteitsinfrastructuur en kosten van elektriciteitsopslag. Ook bij V&N zijn spreiding en kosten beide vrij gering. Het gaat hier – vergeleken met de andere functionaliteiten – om een relatief kleine emissiereductie, met vergelijkbare maatregelpakketten.



Figuur 2.4. Jaarlijkse kosten in 2050 voor de verschillende functionaliteiten⁴.

2.4 Resultaten: de verdeling van de emissies over de functionaliteiten

De verdeling van de emissies in 2050 over de functionaliteiten is vastgesteld op basis van nieuwe berekeningen uitgevoerd voor deze studie met het OPERA-model en op basis van eerdere analyses met het E-Design model. De resultaten voor de 80 procent varianten zijn als bandbreedtes weergegeven in figuur 2.5 en voor de 95 procent varianten in figuur 2.6. Het gaat om de directe emissies plus toegerekende emissies van het energie-aanbod per functionaliteit.

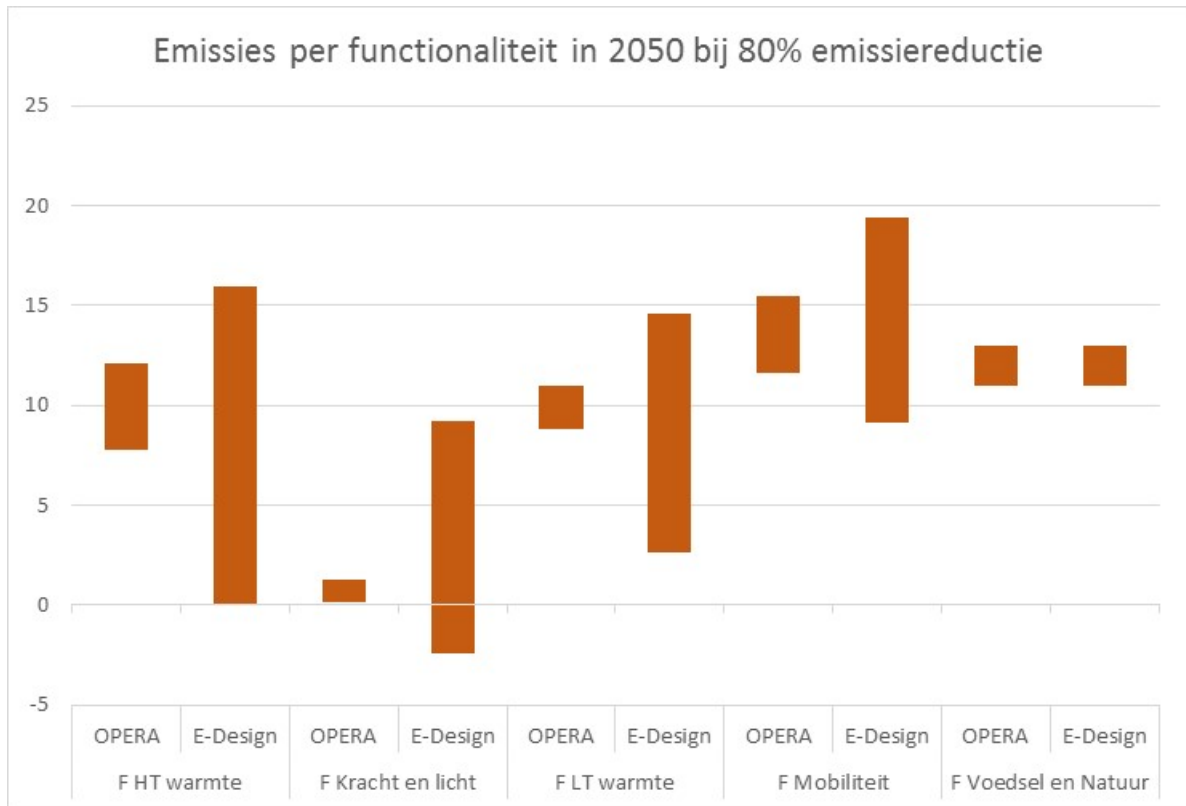
80 procent reductie

Bij 80 procent reductie liggen de emissies bij de meeste functionaliteiten rond de 10 Mton, bij mobiliteit iets hoger en bij kracht en licht iets lager. De bandbreedtes per functionaliteit zijn in de berekeningen met het OPERA-model vrij beperkt: een indicatie dat bij 80 procent emissiereductie de verschillen in beschikbare potentiëlen nog niet leiden tot grote verschuivingen binnen het energiesysteem. Bij het zoeken naar kostenoptimale maatregelpakketten worden zonder onzekerheidsanalyses in de kosten veelal dezelfde technieken geselecteerd.

Op zich geldt dat er voor het realiseren van 80 procent emissiereductie veel meer technische varianten zijn aan te geven dan voor 95 procent emissiereductie. Er zijn immers meer mogelijkheden om technische tegenvallers in de ene functionaliteit op te vangen met extra maatregelen in andere functionaliteiten. In de gepresenteerde varianten uit het E-Design model

⁴ De variant met minimale biomassa en CCS is uit de bandbreedte weggelaten, omdat deze vanwege de hoge kosten het beeld te veel domineert. Recent is door nieuwe inzichten gebleken dat de kosten bij voedsel en natuur iets hoger kunnen uitvallen

komt dat meer naar voren: daarin zijn ook varianten met hogere dan minimale kosten vertegenwoordigd. De bandbreedtes zijn daardoor doorgaans groter. Verder wijken aannames en beschikbare technieken iets af (zie tekstbox B1.2 (bijlagen)). Desondanks is het algemene patroon in de resultaten van beide modellen vergelijkbaar.



Figuur 2.5. Bandbreedtes van emissies in 2050 per functionaliteit bij 80 procent emissiereductie totaal⁵.

95 procent reductie

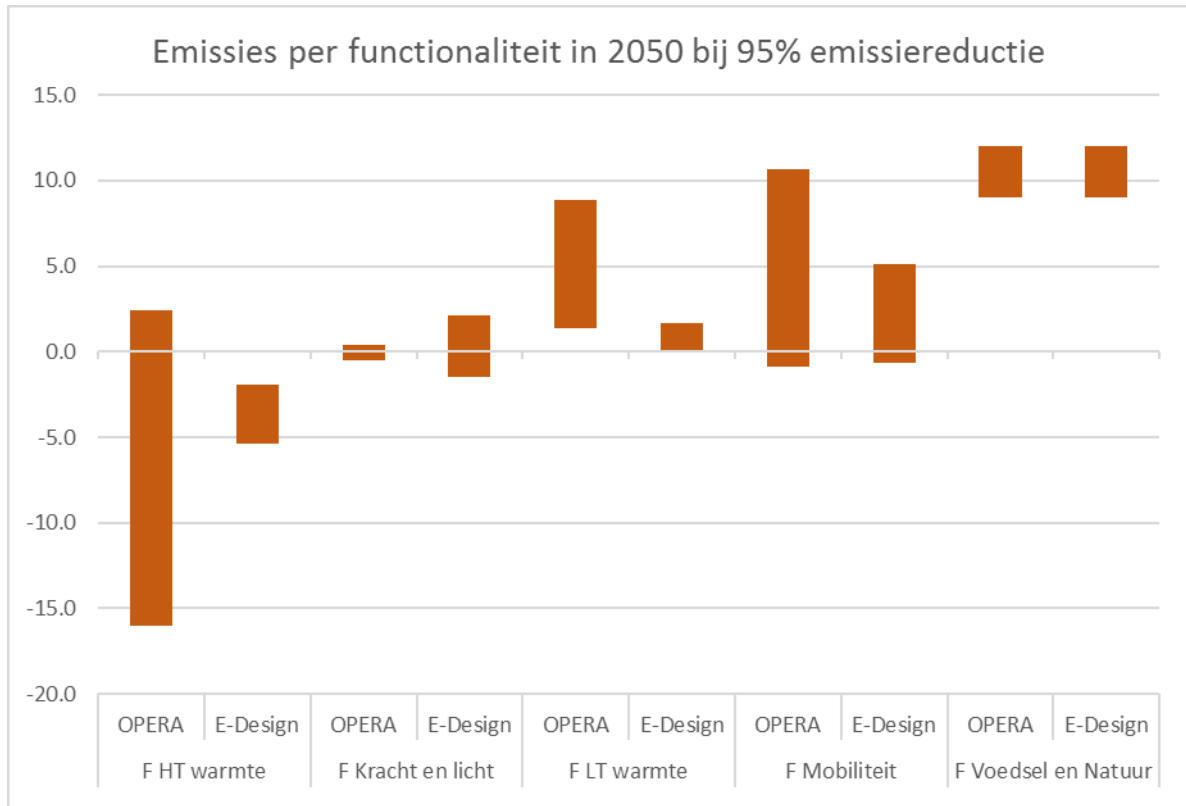
Bij 95 procent reductie liggen voor alle functionaliteiten de emissies uiteraard lager en komen netto negatieve emissies nadrukkelijker in beeld, vooral bij HTW. Negatieve emissies worden daarbij gerealiseerd door toepassing van biomassa met CCS bij de productie van warmte. Ze treden ook op bij de productie van biobrandstoffen (Mob) of groen gas en bij de benutting van groen gas in combinatie met CCS. Groen gas komt in de E-Design varianten iets meer naar voren dan in de OPERA-varianten. Voor de kosten maakt de precieze plek waar BECCS wordt toegepast niet zo heel veel uit, en dat verklaart voor een deel ook de grote bandbreedte: BECCS kan zonder grote consequenties voor de kosten voor verschillende toepassingen worden ingezet.

In alle varianten blijven er lastig te elimineren emissies van overige broeikasgassen in de functionaliteit landbouw en voedsel (in de figuren gepresenteerd zonder de LULUCF-emissies). Voor alle andere functionaliteiten schommelen de emissiewaarden rond nul (HTW en K&L) of iets daar boven (LTW en Mob).

De grotere bandbreedte bij 95 procent vergeleken met 80 procent in de OPERA-varianten is te verklaren door de spreiding in de schaduwrijzen en systeemkosten die veel groter is dan

⁵ Voor voedsel en natuur bleek na de berekeningen met OPERA dat het reductiepotentieel wat lager lag dan dat strookt met de beschreven uitgangspunten. De emissies voor deze functionaliteit zullen dus wat liggen dan berekend. In deze figuur is dit handmatig gecorrigeerd. In tabel B2.12 (bijlagen) staan de ongecorrigeerde uitkomsten met toelichting.

bij 80 procent. Dat betekent dat bij 95 procent in een aantal varianten het potentieel voor de benodigde emissiereducties veel schaarser is, waardoor het model bepaalde duurdere, verdergaande opties selecteert, dikwijls in één of enkele functionaliteiten.



Figuur 2.6. Bandbreedtes van emissies in 2050 per functionaliteit bij 95 procent emissiereductie totaal⁶.

Ook in de 95 procent beelden vertonen de patronen van de twee gehanteerde modellen in de verdeling van de emissies over de functionaliteiten duidelijke overeenkomsten. De belangrijkste verschillen treden op voor HTW en LTW. De belangrijkste verklaring ligt waarschijnlijk in het feit dat de OPERA-beelden op kostenoptimalisatie gebaseerd zijn en die van E-design niet, hoewel ook kleine verschillen kunnen optreden bij de toedeling van emissies in de modelresultaten naar functionaliteiten. OPERA zet consequent in op negatieve emissies voor zover mogelijk (vaak in HTW) en benut de ruimte die dat oplevert om dure maatregelen in andere functionaliteiten te vermijden (vaak in LTW). In de E-Design varianten zijn de negatieve emissies wat meer gespreid, waardoor de bandbreedtes iets kleiner uitvallen.

Rol van negatieve emissies bij de emissieverdeling

Voor de spreiding in de emissies zijn vooral de variatie in grootte en verdeling van negatieve CO₂-emissies (BECCS, biomassa plus CCS) belangrijk. BECCS is relatief goedkoop, en maakt het mogelijk duurdere reductieopties te vermijden. Het is bovendien op veel plekken inzetbaar: productie van warmte, elektriciteit, waterstof en biogene brandstoffen, waarbij de kosten elkaar niet veel ontlopen. In de kostenoptimale oplossing vindt toepassing vooral plaats bij ketels bij de HTW en de productie van biobrandstoffen en groen gas (slechts een deel van de koolstof uit de biomassa komt in het product; de rest kan als CO₂ worden afgevangen) en incidenteel bij de productie van waterstof, maar de verdeling over deze activiteiten varieert dus sterk. Wel robuust lijkt dat BECCS niet kostenoptimaal is bij de elektriciteitsopwekking (zie paragraaf 2.7.1). Dat is er ook de oorzaak van dat er nog – zeer beperkt – CO₂-

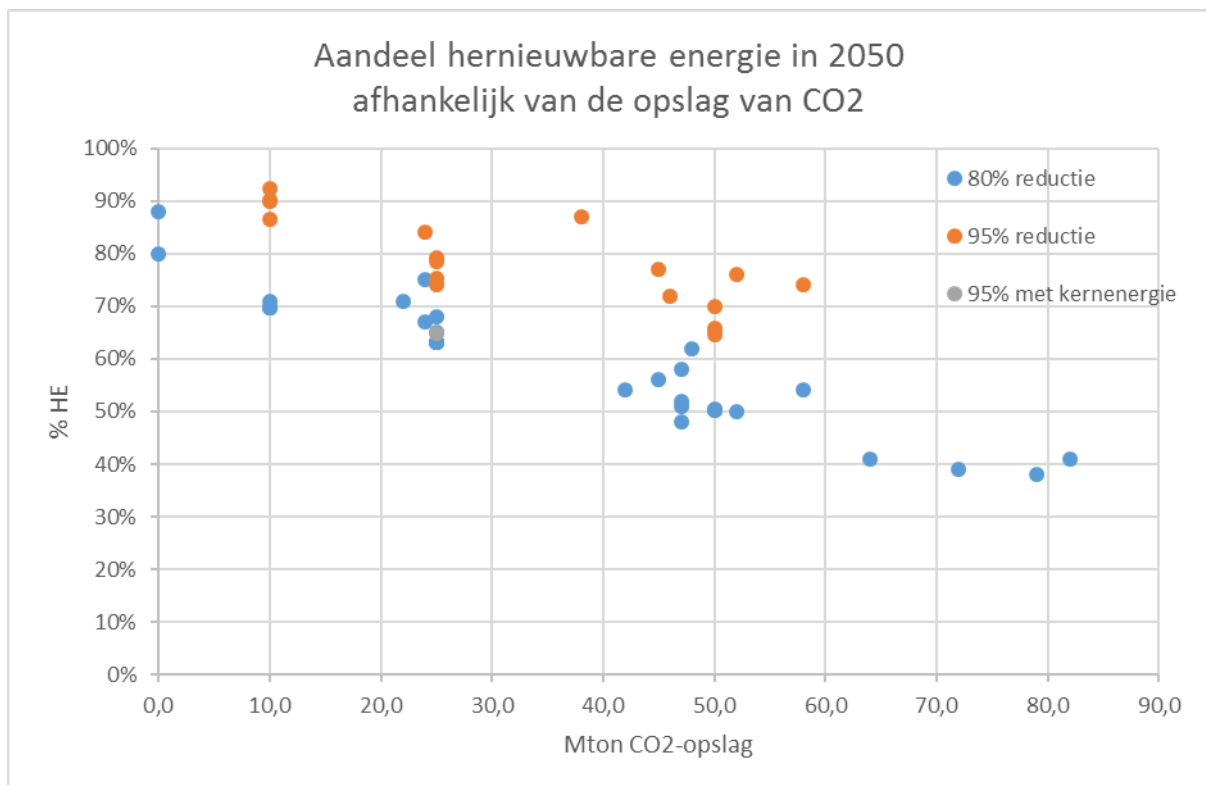
⁶ Zie voetnoot 5

emissies zijn bij de elektriciteitsopwekking: regelbaar fossiel vermogen speelt in een deel van de varianten nog steeds een – weliswaar bescheiden – rol, maar toepassing van (BE)CCS nauwelijks. In de resultaten van E-design speelt kostenoptimaliteit geen rol, en komen nog wel negatieve emissies bij de elektriciteitsopwekking voor, zij het eveneens slechts in geringe mate.

2.5 Resultaten: hernieuwbare energie en energiegebruik

Hernieuwbare energie in de 2050-beelden

In de varianten met weinig CCS en nucleair liggen de percentages hernieuwbare energie het hoogst. Biomassa heeft een dubbelrol: het telt mee voor het percentage hernieuwbare energie, maar in combinatie met CCS maakt het soms ook extra fossiel verbruik mogelijk, omdat de negatieve emissies van BE(CCS) ruimte scheppen voor meer inzet van fossiele brandstof. Veel biomassa in combinatie met weinig CCS leidt daardoor tot een hoog percentage hernieuwbaar, maar in combinatie met veel CCS kan het percentage hernieuwbaar juist weer wat lager liggen.



Figuur 2.7. Aandeel hernieuwbare energie in verschillende beelden voor 2050 afhankelijk van de opslag van CO₂ (berekenningsresultaten met de modellen OPERA en E-Design).

In figuur 2.7 is de het aandeel hernieuwbare energie dat in 2050 ingezet moet worden om tot 80 respectievelijk 95 procent emissiereductie te komen uitgezet tegen de hoeveelheid CO₂ die er in de verschillende varianten wordt opgeslagen. Hierin zijn naast de OPERA resultaten ook E-Design resultaten opgenomen. De beide modellen geven geen significante verschillen. In figuur 2.7 is kernenergie slechts in een beperkt aantal varianten meegenomen. Die laten zien dat in de varianten met 10 GW kernenergie het benodigde aandeel hernieuwbare energie 10-15 procent lager kan liggen. Andere factoren die van invloed zijn op het benodigde aandeel hernieuwbare energie zijn de mate van energiebesparing en de inzet van bio-CCS (negatieve emissies). Deze zijn wel in verschillende mate in de varianten in figuur

2.7 opgenomen. Op basis van analyses met het E-Design model kan indicatief worden afgeleid dat een verschil in besparing van 20 procent (bovenop de autonome besparing) een spreiding van ongeveer 10 procent in het benodigde aandeel hernieuwbare energie kan betekenen voor de 80 procent reductievarianten. Voor 95 procent emissiereductie is vergaande technische besparing nog belangrijker en leidt de laatste 10 procent extra besparing tot 5-10 procent minder benodigde hernieuwbare energie.

Energieverbruik in de 2050-beelden.

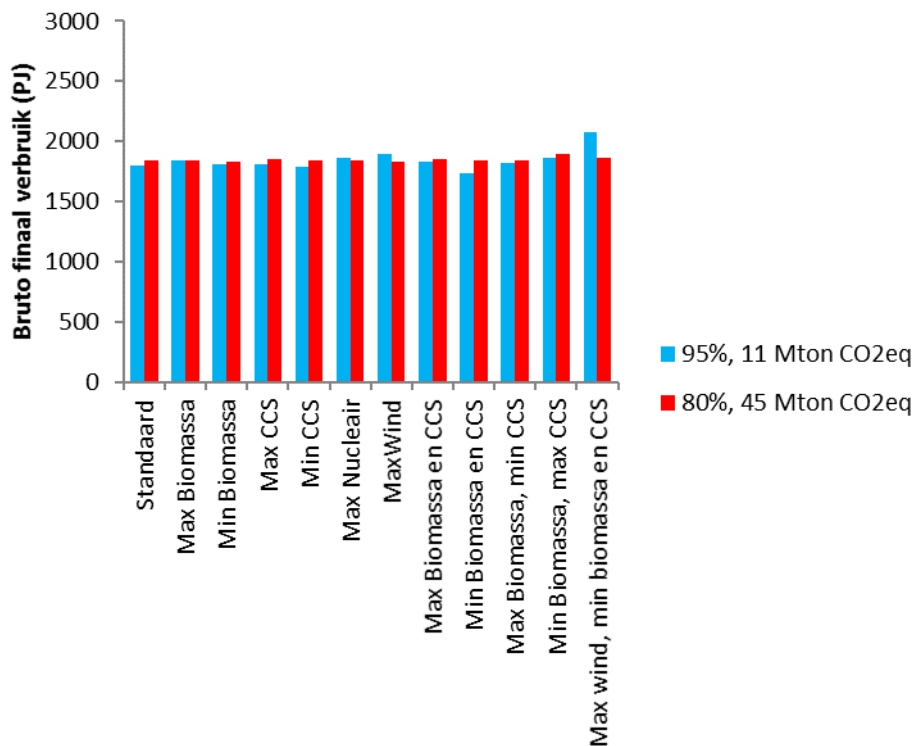
De figuren 2.8 en 2.9 laten het bruto finaal verbruik en het totaal verbruik zien. Het bruto finaal verbruik (c.f. Eurostat) is ook de noemer voor de berekening van het percentage hernieuwbaar. Een belangrijke kanttekening bij het bruto finale verbruik is dat de 2050 beelden veel nieuwe elementen bevatten die in het huidige energiesysteem niet voorkomen of nog geen rol van betekenis spelen. Daarom is voor sommige elementen nog niet bekend hoe de energiestatistiek er mee om zullen gaan, en of en hoe ze meetellen voor het bruto finale verbruik. De berekening in OPERA sluit voor die nieuwe elementen zo goed mogelijk aan bij de huidige conventies en de op grond daarvan meest logische invulling voor 2050.

De verschillen tussen de varianten in het bruto finaal en totaal gebruik hebben slechts voor een zeer beperkt deel te maken met verschillen in finale besparingen, wat overigens niet betekent dat energiebesparing daarmee niet belangrijk zou zijn. Andere ontwikkelingen leveren vaak een grotere bijdrage aan de daling - of stijging - van het verbruik.

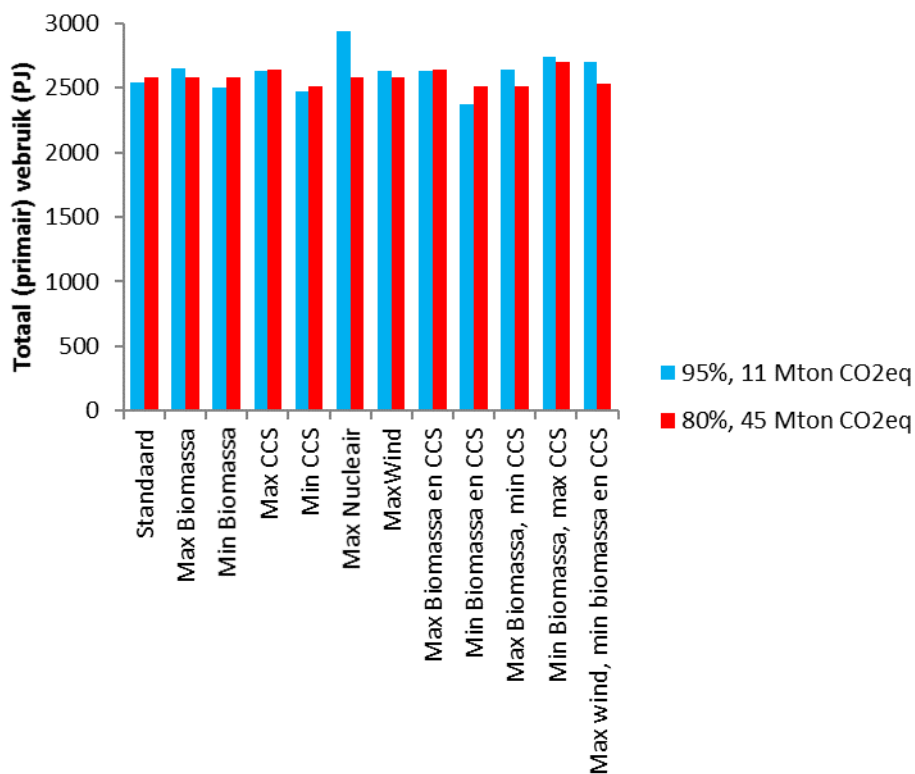
Specifiek voor het primaire verbruik is er ook nog een andere oorzaak voor daling van het verbruik: de inzet van wind en zon in plaats van kernenergie of fossiele/biomassacentrales. Dit heeft te maken met de conventie uit de energiestatistiek dat bij wind en zon het primair verbruik gelijk is aan de geproduceerde elektriciteit, terwijl bij nucleair en fossiele centrales de energieconsumptie van uranium resp. brandstof telt. Een centrale met een elektrisch rendement van bijvoorbeeld 40 procent heeft daardoor bij gelijke elektriciteitsproductie een 2,5 keer zo hoog verbruik als windmolens en zon-PV. Dit fenomeen verklaart ook het hogere primaire verbruik bij de variant met nucleair en in iets mindere mate bij de variant met max CCS en minimale biomassa.

Er zijn ook factoren die het verbruik juist doen stijgen: toepassing van CCS (lagere rendementen, dus meer energiegebruik), opslagverliezen bij elektriciteitsopslag, conversieverliezen bij omzetting van elektriciteit in waterstof en inzet van biomassa in plaats van fossiel (lagere rendementen, dus meer energiegebruik).

In het finaal verbruik zit ook een belangrijk arbitrair element. Inzet van CCS en biomassa bij aanbodsectoren leidt niet tot een stijging van het finale verbruik, inzet bij eindgebruikers wel. Idem elektriciteitsopslag. Verschuiving van verliezen tussen eindgebruikers en aanbodsectoren heeft daardoor een forse impact op het finale verbruik. Het effect hiervan is zichtbaar bij de vergelijking van het primair en het finale verbruik. Bij het finale verbruik is er van 80 naar 95 procent emissiereductie in een aantal gevallen een forse toename, terwijl het totale verbruik veel minder verandert of soms zelfs daalt. Het totale (of primaire) verbruik is daarmee een veel betere indicator van meer of minder verliezen in het energiesysteem. Dit maakt het finale verbruik ook een minder bruikbare indicator om in het beleid op te koersen.



Figuur 2.8. Bruto finaal energieverbruik in de met OPERA doorgerekende varianten.



Figuur 2.9. Totaal primair energieverbruik in de met OPERA doorgerekende varianten.

2.6 Algemene technische kenmerken in de 2050-beelden

Inzicht in het belang van technieken in de 2050-beelden kan sturing geven aan de transitie en richting geven aan het beleid. Als kan worden geconcludeerd dat bepaalde technieken in alle varianten voorkomen, het mogelijk zelfs zo is dat zonder die technieken de genoemde emissiedoelen onhaalbaar zijn, dan kan van robuuste opties worden gesproken. Voor robuuste opties kunnen, ondersteund door beleid, implementatietrajecten worden ingezet. Daarnaast kunnen er technieken zijn die in vele varianten voorkomen, maar wellicht niet in alle hetgeen ook te maken kan hebben met onzekerheden over de toekomstige beschikbaarheid of kosten. Naarmate het lastiger is om het eventuele ontbreken van zo'n technische optie te compenseren met de inzet van andere technieken, wordt het des te belangrijker om de optie voorlopig open te houden voor een bijdrage in 2050. Dat 'open houden' lukt alleen als de ontwikkeling ervan verder wordt gebracht en er ook in wordt geïnvesteerd.

De met OPERA en E-Design tot stand gekomen beelden voor 2050 waarmee emissiereducties van 80 of 95 procent kunnen worden gerealiseerd zijn nader bekeken op de technieken die daarin een belangrijke rol spelen. Voor de gedetailleerde analyses van de E-Design resultaten wordt verwezen naar eerdere publicaties (PBL/ECN 2011, Ros en Schure 2016). Het OPERA-model levert ook voor alle varianten en functionaliteiten gedetailleerde energiebalansen; die zijn opgenomen in bijlage 1.

Allereerst worden enkele bronnen van CO₂-reductie of CO₂-vrije energie besproken die in meerdere functionaliteiten van betekenis kunnen zijn: CCS, biomassa, CO₂-vrije elektriciteit, hernieuwbare warmte en energiebesparing. Wat is hun belang op termijn, op welke manier zijn ze inzetbaar en hoe robuust zijn ze in de 2050-beelden?

Inzet van die bronnen heeft vaak ook gevolgen aan de gebruikerskant en voor de energieinfrastructuur. Soms hebben ze directe impact: besparing, hernieuwbare warmte en CCS vergen vaak aanpassingen bij de eindgebruikers. Maar ook indirect zijn er gevolgen: vergeleken met de huidige situatie komt een heel andere mix van energiedragers in beeld, met meer elektriciteit, waterstof en groen brandstoffen, en minder fossiele brandstoffen. De toepassing van die nieuwe energiedragers vergt ook allerlei aanpassingen.

CCS

CCS is breed toepasbaar in energieproductie en bij de vraagsectoren (Pershad et al. 2013, ZEP 2015, ZEP 2011), mits het schaalniveau voldoende groot is: productie van warmte, waterstof, elektriciteit en biogene brandstoffen en specifieke industriële processen. Realisatie van een 80 procent beeld zonder CCS is nauwelijks denkbaar, van 95 procent beelden al helemaal niet. De inzet van CCS is ook sterk bepalend voor de noodzaak om andere CO₂-vrije energiebronnen in te zetten. Bij weinig CCS zijn bijvoorbeeld de inzet van wind, zon en omgevingswarmte hoger.

De inzet van CCS bepaalt evenzeer de ruimte die er is om fossiele brandstoffen in te zetten. Dat is bijvoorbeeld goed te zien aan de inzet van kolen (ijzer- en staalproductie en kolencentrales). Bij 80 procent correleert dat sterk met de aanname voor CCS. Ook bij 95 procent is het verband zichtbaar: energetische inzet van kolen (in dit geval in de staalindustrie) vindt alleen nog plaats bij veel beschikbare opslagcapaciteit voor CO₂. CCS in combinatie met biomassa is daarnaast cruciaal om negatieve emissies in het systeem te hebben ter compensatie van moeilijk geheel te elimineren emissies.

In alle met OPERA doorgerekende varianten voor 95 procent reductie benut het kostenoptimale pakket de beschikbare CCS volledig, en ook bij de 80 procent pakketten ligt de inzet op

of in de buurt van het maximum. Inzet van CCS past dus bij een streven naar zo laag mogelijke kosten.

Biomassa

Biomassa staat voor een breed scala aan technische opties om bio-energie in te zetten. Het is daarmee evenals CCS breed inzetbaar in energieproductie en bij de vraagsectoren: productie van warmte, waterstof, elektriciteit en biogene brandstoffen en in specifieke industriële processen.

Alle kostenoptimale pakketten zetten biomassa in, al is die inzet lang niet altijd maximaal. Bio-energie is dus bij de veronderstelde biomassaprijzen (op basis van het WLO 2 graden scenario; PBL 2015) niet altijd goedkoper dan andere oplossingen. Die prijzen liggen overigens ver boven de huidige niveaus. Inzet van biomassa is hoger als andere bronnen sterker gelimiteerd zijn en de reductiedoelstelling inzet wel nodig maakt. Dat is ook te zien aan het verschil in inzet tussen de 80- en 95 procent beelden: bij 80 procent ligt biomassa duidelijk lager, en is de bandbreedte ook niet zo groot. Bij 95 procent is de inzet hoger, en vult biomassa bijvoorbeeld een deel van het gat op als er weinig CCS is. Eerdere analyses met E-Design gaven al aan dat een emissiereductie van 80 procent zonder de inzet van bio-energie zeer waarschijnlijk niet mogelijk is (PBL/ECN 2011). Een belangrijk aspect hierbij is – net als bij CCS – de mogelijkheid om in de vorm van BECCS negatieve emissies in het systeem te brengen.

In de OPERA-berekeningen zijn de emissies van lucht- en scheepvaart maar ten dele meege-
nomen. In 2050 is te verwachten dat naast verdergaande efficiencyverbetering de inzet van
groene brandstoffen de belangrijkste maatregel is om emissies daar te reduceren. Dat kan
een grote vraag naar biomassa betekenen. Ter indicatie: als we het Nederlandse aandeel in
de mondiale emissies van lucht- en scheepvaart gelijkstellen aan het Nederlandse aandeel in
de wereldeconomie en de brandstofinzet wordt voor 80 procent gebaseerd op biobrandstof-
fen, dan is daarvoor bij benadering 400 PJ biomassa nodig.

Bronnen van CO₂-vrije elektriciteitsproductie

De 2050-beelden zijn in sterke mate gebaseerd op de vele technische opties om CO₂-vrij
electriciteit te produceren. Wind, kernenergie en in belangrijke mate ook zon (met uitzonde-
ring van zonneboilers) zijn direct (en eigenlijk ook alleen) inzetbaar voor de productie van
electriciteit. Paragraaf 2.7.1 gaat in op de electriciteitsproductie en de rol van deze bronnen.

Hernieuwbare warmte

De benutting van hernieuwbare warmte gebeurt dichtbij de plaats van benutting. Het gaat
om warmte uit de ondergrond, de lucht en mogelijk het oppervlaktewater die met elektrische
warmtepompen wordt aangewend, iets grootschaliger om geothermie en kleinschalig om
zonnecollectoren. Vooral de eerste twee opties spelen een grote rol in alle varianten. De ge-
schatte warmtevoorraad in de diepe ondergrond voor geothermie is groot, maar onzeker is
wat hiervoor daadwerkelijk kan worden benut, mede gelet op mogelijke neveneffecten.

Energiebesparing

Finale energiebesparing is een belangrijke manier om energiegebruik en de daarmee samen-
hangende emissies te verminderen. Een heel belangrijk voordeel van energiebesparing is dat
het benutten van de mogelijkheden op een specifieke plek niet ten koste gaat van de moge-
lijkheden op andere plekken. Dat is heel anders bij potentiëlen waarbij een collectief beschik-
baar, beperkt potentieel (bijvoorbeeld biomassa, CO₂-opslag) verdeeld moet worden over
allerlei mogelijkheden. Toch speelt het in de meeste varianten als aanvullende optie niet zo'n
heel belangrijke rol. De oorzaak hiervan is dat er in de baseline al een forse energiebespa-
ring optreedt, waardoor de goedkopere potentiëlen grotendeels benut zijn. Extra energiebe-
sparring komt wel weer in beeld bij de varianten met hogere schaduw prijzen.

Elektrificatie, waterstof en groene brandstoffen

Zoals genoemd heeft inzet van allerlei bronnen van CO₂-vrije energie vaak ook gevolgen voor de energiemix, met meer elektriciteit, waterstof en groene brandstoffen, en minder fossiele brandstoffen. De toepassing van die nieuwe energiedragers vergt vaak ook allerlei aanpassingen aan de gebruikerskant.

In alle varianten is in het eindverbruik sprake van een duidelijke verschuiving van brandstoffen naar elektriciteit. Elektrificatie is een robuust onderdeel van de energietransitie, maar de vereiste, soms grote aanpassingen aan de gebruikerskant maken het nog onzeker in welke mate die in 2050 kan worden gerealiseerd. Ondanks energiebesparingsmaatregelen neemt door deze elektrificatie het elektriciteitsgebruik toe ten opzichte van de huidige situatie. De inzet van waterstof kan in het verlengde worden gezien van deze elektrificatie, omdat voor de productie van waterstof elektriciteit kan worden ingezet (elektrolyse). Ook bij de inzet van waterstof geldt dat er aan de gebruikerskant vaak ingrijpende maatregelen nodig zijn en dat er daarom nog onzekerheden bestaan over de toepassing.

Daarom is het verstandig de 'reserveoptie' van de groene brandstoffen achter de hand te hebben. Het grote voordeel van groene brandstoffen – die chemisch identiek zijn aan de huidige fossiele equivalenten – is dat ze dure, ingrijpende aanpassingen aan de vraagkant die een (te) lange tijd vergen nog kunnen uitstellen.

2.7 Technieken in de aanbodsectoren

Deze paragraaf bespreekt de aanbodsectoren. De elektriciteitsproductie, productie van waterstof en productie van biogene brandstoffen zijn van belang voor meerdere functionaliteiten, waarbij niet op voorhand vaststaat welke dat zullen zijn. Daarom worden ze eerst apart besproken. Wat in de aanbodsectoren mogelijk is bepaald in hoge mate wat er mogelijk is binnen de functionaliteiten. Zo kunnen onvoldoende beschikbaarheid of hoge productiekosten van elektriciteit de kosteneffectieve mogelijkheden voor elektrificatie beperken. Omgekeerd speelt de vraagkant van de functionaliteiten ook een rol bij het kosteneffectief inpassen van de elektriciteitsproductie: als (flexibele) elektrificatieopties goedkoop en ruim beschikbaar zijn zal het makkelijker zijn om grote hoeveelheden (intermittente) elektriciteit in te passen. Dergelijke aanbod/vraag interacties zijn erg belangrijk voor de vraag/aanbodmix. Voor bijvoorbeeld de rol van waterstof zijn niet alleen de productiekosten bepalend, maar ook de kosten en beschikbaarheid van opties die de waterstof kunnen gebruiken, de efficiency waarmee ze dat doen, en de beschikbaarheid en kosten van alternatieven zoals Fischer-Tropsch biobrandstoffen of elektrificatie.

2.7.1 Elektriciteitsvoorziening

Omvang

In alle varianten, zowel bij 80 als bij 95 procent, neemt de elektriciteitsproductie sterk toe door elektrificatie van HTW, LTW en Mob. In alle beelden is de vraag naar elektriciteit vanuit nieuwe toepassingen groter dan die vanuit de conventionele toepassingen die onder K&L zijn geschaard. Bij 95 procent reductie is dit sterker het geval dan bij 80 procent, en kan de vraag vanuit nieuwe toepassingen tot 3 keer zo hoog liggen als vanuit K&L. Voor de inzet van die elektriciteit in andere dan conventionele elektriciteitsvraag zijn overigens vaak ingrijpende aanpassingen nodig.

Rol in het systeem

Elektriciteit heeft van alle energiedragers de “hoogste kwaliteit” (exergie), en dat betekent dat het met het hoogste rendement is om te zetten in het gewenste eindproduct (bijvoorbeeld beweging en licht en met warmtepompen in warmte). De ketenefficiency is bij elektriciteit dus het hoogst, en dit betekent dat een relatief kleine hoeveelheid elektriciteit in een relatief grote vraag kan voorzien. Bovendien is elektriciteit goed en in de Nederlandse context zonder grote verliezen te transporteren. Ook is elektriciteit uit CO₂-vrije bronnen relatief ruim beschikbaar. Veel CO₂-vrije energiebronnen zoals wind, zon en nucleair zijn direct om te zetten in elektriciteit en vaak is dat ook de enige directe inzetmogelijkheid.

Kernenergie, wanneer beschikbaar, is onderdeel van een kosteneffectieve oplossing bij 95 procent, maar het is geen onmisbare optie. Kernenergie heeft als voordeel dat het anders dan wind en zon wel regelbaar is, in moderne kerncentrales overigens beter dan in oudere. Windenergie speelt in alle varianten een grote rol. Bij windenergie is wel de afweging belangrijk tussen wind op land – goedkoper, maar met een grotere impact op de directe leefomgeving – en wind op zee – duurder, maar met een kleinere impact op de direct leefomgeving. De voor deze studie gekozen maximaal inzetbare capaciteit van wind is in de verschillende varianten niet geheel benut. Dat betekent dat het eventuele ontbreken van wind op land (deels) kan worden opgevangen door meer wind op zee, zij het dat het met een beperkte kostenstijging gepaard kan gaan. Daar staat minder hinder in de woonomgeving van mensen tegenover.

Het toepassen van die elektriciteit bij functionaliteiten waarvoor nu brandstof gangbaar is, vergt vaak wel ingrijpende en soms dure aanpassingen, zowel in de infrastructuur als aan de vraagkant. Bij de infrastructuur zijn dat bijvoorbeeld netverzwaringen, en aan de vraagkant alternatieve technieken voor toepassingen die nu brandstof gebruiken: elektrische auto's, warmtepompen etc. Elektriciteit is verder moeilijk op te slaan. Dat moet bijna altijd in een andere vorm van energie en brengt extra investeringen en verliezen met zich mee.

Uitwisseling met het buitenland, bijvoorbeeld in de vorm van een versterkt Europees elektriciteitsnetwerk is een manier om in heel Europa de potentiële voor hernieuwbare productie en opslag optimaal te benutten. De huidige berekeningen gaan uit van een vaste uitwisseling met het buitenland. Deze is gebaseerd op een doorrekening met het model COMPETES voor een situatie met veel hernieuwbaar aanbod. De studie heeft niet verkend welke mate van uitwisseling voor de verschillende varianten optimaal zou zijn.

Mix

Tabel 2.5 geeft een overzicht van observaties van de verschillende 2050-beelden. In alle beelden komt het grootste deel van de elektriciteitsproductie uit wind, meestal gevolgd door zon. De precieze verhoudingen variëren wel sterk, waarbij de hoeveelheid elektriciteit uit wind 3 tot 6 keer zo groot is als die uit zon. In de variant met maximaal 10 GW nucleair wordt het aandeel nucleair beperkt door de veronderstelde maximale beschikbaarheid (10 GW), anders zou het aandeel nucleair hier wellicht groter zijn dan dat van wind en zon. Bij dit beeld spelen uiteraard de veronderstelde kosten een rol, maar meer nog de aanbodpatronen (wind en zon) en regelbaarheid (nucleair versus zon en wind) van de verschillende technieken.

Regelbare fossiele productie uit gas en – alleen in enkele 80 procent-beelden – uit kolen komt voor in enkele varianten. Vooral opslag en flexibele vraag spelen een belangrijke rol bij het op elkaar aan laten sluiten van vraag en aanbod (zie tekstbox 2.3). In dat verband lijken ook nieuwe processen op elektriciteit in de industrie een belangrijke rol te kunnen spelen: in de kostenoptimale oplossing hebben deze processen een grotere capaciteit zodat het proces in minder uren dezelfde productie realiseert. Bij een laag aanbod van wind en zon schakelen deze processen dan af.

Tabel 2.5. Kenmerken van elektriciteitsvoorziening in de verschillende varianten.

Aanbod: Elektriciteitsvoorziening			
Onderdeel	Technologie en/of energiedrager	Potentiële rol in 2050	
		In 80%-beelden	In 95%-beelden
Elektriciteitsgebruik en -productietotaal	Gebruik in Nederland	800 – 1000 PJ	900 – 1300 PJ
		Uitgangspunt voor de modelanalyses is geweest dat de productie grotendeels in Nederland plaatsvindt, en dat import/export gelijk blijven aan de baseline	
Elektriciteitsproductie in Nederland	Wind op zee	40 - 75% (25 - 50 GW)	50 – 80% (35 – 75 GW)
	Wind op land	10 – 13% (9 - 11 GW)	7 - 11% (9 – 11 GW)
	Wind algemeen	Minder inzet van wind op land kan in de meeste gevallen waarschijnlijk worden opgevangen door wind meer op zee	
	Zon-PV	15 - 20% of 40 - 55 GW	10 – 25% of 40 - 75 GW
		Bijdragen van zowel PV op woningen en gebouwen als van zonneparken en -centrales	
	Kernenergie	niet	0 – 25% (tot 10 GW)
		Alleen in varianten nucleair 95% en daarin gelimiteerd maar maximaal benut; grotere onzekerheid over kosten. In combinatie met weinig CCS en biomassa (geen onderdeel van de doorgerekende varianten) kan kernenergie ook bij 80% reductie een rol spelen.	
Kolen en gas	1 - 10%	1 – 20%	
	In sommige 2050-beelden met CCS (in ieder geval bij de variant met 20% gas)		
Geothermiecentrales	niet	1 - 4%	

Opvallend

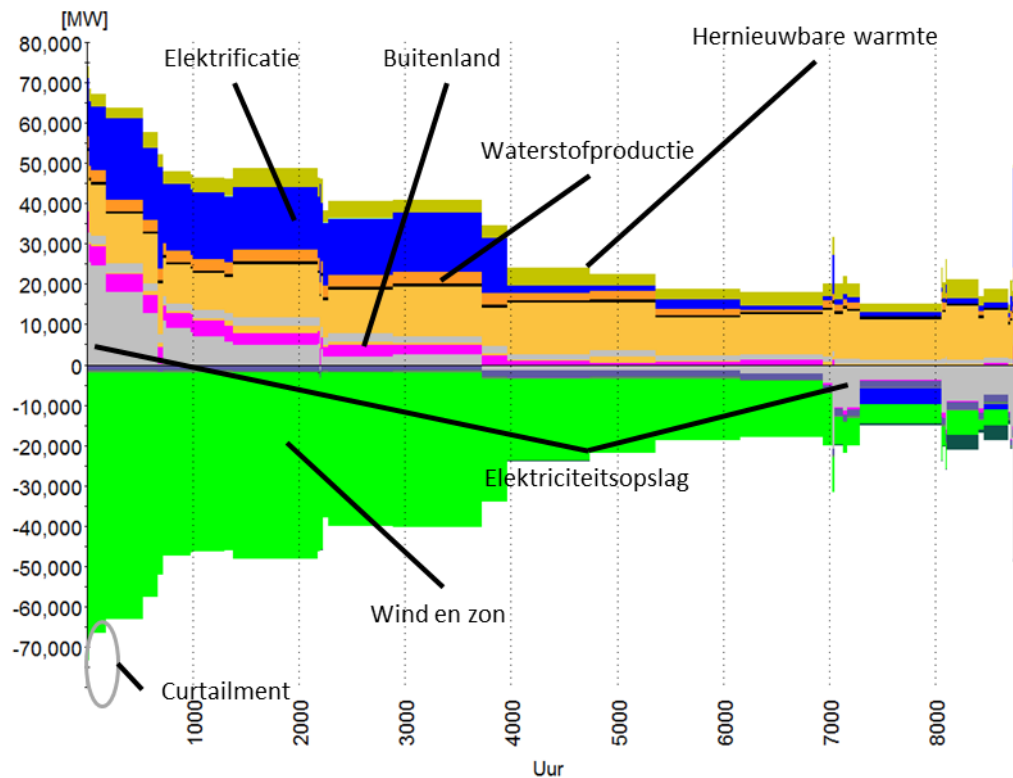
Opvallend is dat zowel bij 80 als 95 procent (BE)CCS (directe inzet van biomassa) slechts zeer incidenteel een rol speelt in de elektriciteitsopwekking, en dan bijna altijd een kleine rol, met name in enkele van de E-Design varianten. Daarin komt inzet van groen gas met CCS voor, waarbij ook al bij de productie van dat groene gas uit biomassa vrijkomende CO₂ wordt afgevangen. Er lijkt een combinatie van oorzaken een rol te spelen. Een ervan is de impact van grote hoeveelheden wind en zon op de bedrijfstijden van andere centrales. Bij de veronderstelde beschikbaarheden van biomassa, CCS en nucleair is grootschalige inzet van intermitterende wind en zon onvermijdelijk om in de vraag te voorzien, en dat betekent dat de bedrijfstijden van regelbaar vermogen op basis van fossiel of biomassa – waar CCS mogelijk is – sterk teruglopen. De meerinvestering in (BE)CCS bij dit regelbaar vermogen is daardoor relatief groot: de CCS-installatie wordt slechts een beperkte tijd gebruikt. Bij bijvoorbeeld HTW en (bio)brandstoffen, waar processen meer continu draaien is CCS goedkoper (wel is er in sommige varianten toepassing in flexibele grootschalige (biomassa) WKK; deze valt onder

warmte). Het is dus aantrekkelijk om eerst de CCS-mogelijkheden bij die andere processen te benutten, en als er daarna nog opslagcapaciteit beschikbaar is eventueel CCS bij de elektriciteitsopwekking toe te passen.

Een andere oorzaak is dat de elektriciteitsopwekking in de meeste varianten voldoende alternatieven heeft voor CCS, en dat alternatieven voor CCS bij andere toepassingen juist minder voorradig en/of duurder zijn. Pas als ook de elektriciteitsopwekking een tekort aan alternatieven heeft, komt CCS daar in beeld, mits de opslagcapaciteit toereikend is. Deze situatie is bijvoorbeeld van toepassing bij 95 procent emissiereductie in de variant met weinig biomassa, veel CCS, geen kern en maximaal 47 GW windenergie. Doordat er weinig biomassa is, is dan in veel functionaliteiten meer elektrificatie nodig om toch de emissies voldoende terug te dringen. De extra elektriciteitsvraag die dit oplevert wordt dan ingevuld met centrales op aardgas met CCS.

Tekstbox 2.3. Inpassing van intermitterend elektriciteitsaanbod

Figuur 2.10 is een voorbeeld zien van de elektriciteitsbalans bij een hoog aandeel intermitterend hernieuwbaar bij een reductie van 95% en figuur 2.11 bij een reductie van 80%. De figuur laat momentane productie en consumptie van elektriciteit zien, waar bij de uren van het jaar zijn geaggregeerd in timeslices. In een timeslice zijn uren gecombineerd die veel op elkaar lijken qua (conventionele) elektriciteitsvraag, warmtevraag (i.v.m. elektrificatie) én het momentane aanbod van zon en wind. Onder X-as staat het elektriciteitsaanbod, boven de x-as de elektriciteitsvraag. Op elk afzonderlijk moment moeten vraag en aanbod met elkaar in evenwicht zijn.



Figuur 2.10. elektriciteitsbalans bij variërend aanbod intermitterend hernieuwbaar, 95% reductie standaardvariant.

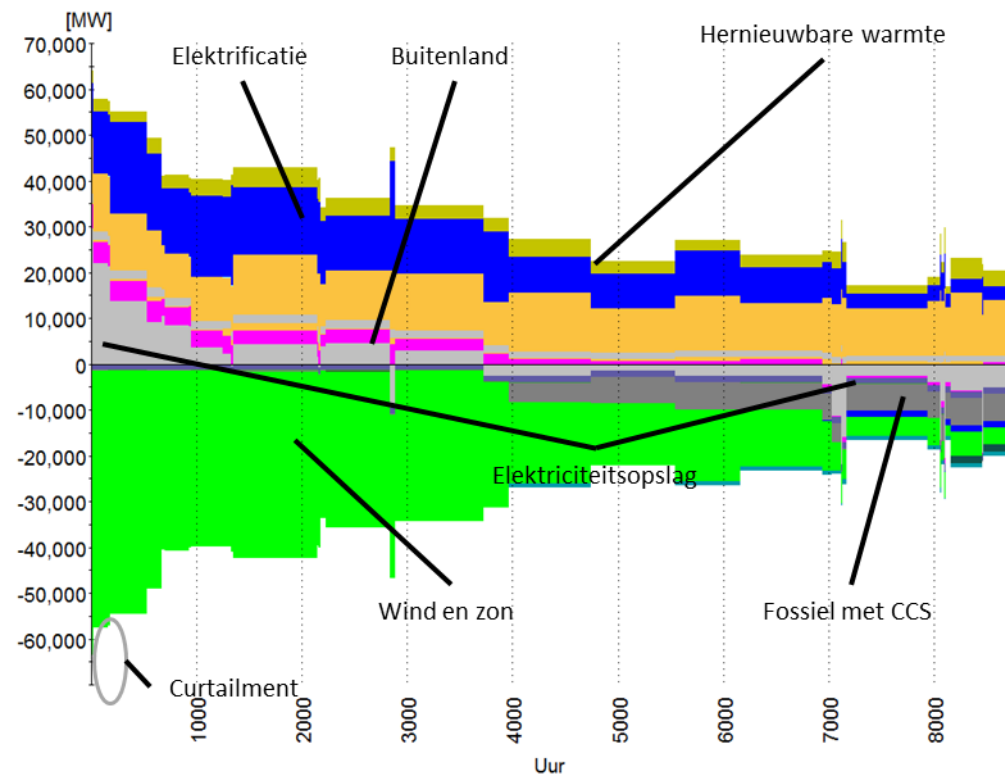
Momenten met veel aanbod in verhouding tot de vraag

Links in de figuren staan de situaties met veel aanbod van intermitterend hernieuwbaar (wind en zon). De productie is dan veel groter dan de 'conventionele' elektriciteitsvraag (bij de in dit rapport gehanteerde afbakening grotendeels samenvallend met de functionaliteit kracht en licht). Diverse nieuwe bestemmingen voor elektriciteit absorberen het surplus: elektrificatie (waarbij een aantal industriële processen een belangrijke rol speelt), elektriciteitsvraag voor hernieuwbare warmte, power-to-hydrogen, het buitenland en elektriciteitsopslag. Die laatste speelt de grootste rol bij het opvangen van de grootste pieken in het aanbod, en omvat ook het slim opladen van elektrische en plug-in hybride auto's. De meest extreme pieken zijn overigens ook al wat afgevlakt door curtailment (niet zichtbaar in de figuur): het tijdelijk afschakelen van windmolens en zonnepanelen.

Momenten met weinig aanbod in verhouding tot de vraag

Rechts in de figuren staan de situaties met weinig aanbod van intermitterend hernieuwbaar. De productie is dan veel kleiner dan de 'conventionele' elektriciteitsvraag. Bij de variant met 95% reductie is opgeslagen energie de belangrijkste bron van elektriciteit op dit soort momenten, en bij 80% reductie (of bij grotere potentiëlen van biomassa en CCS) speelt ook regelbaar (fossiel of nucleair) vermogen

een belangrijke rol. Verder is de flexibiliteit van de nieuwe elektriciteitstoepassingen van groot belang: de vraag vanuit elektrificatie en power-to-hydrogen is op dit soort momenten veel lager.



Figuur 2.11. elektriciteitsbalans bij variërend aanbod intermitterend hernieuwbaar, 80% reductie standaardvariant.

2.7.2 Productie van biogene brandstoffen

Omvang

Biogene brandstoffen omvatten zowel vloeibare brandstoffen als gas. Vloeibare biogene brandstoffen spelen in alle varianten een rol, gasvormige vooral bij de 95 procent varianten. De vloeibare brandstoffen hebben een relatief stabiele rol in de transportsector, de gasvormige komen via het gasnet bij alle andere sectoren

Emissievoordeel

Verbranding van biomassa en biogene brandstoffen zorgt ook voor CO₂-uitstoot, maar het gaat wel om koolstof die recent nog door planten aan de atmosfeer onttrokken is, de kortcyclische CO₂. Onder de voorwaarde dat de biomassa productie duurzaam is en in de productieketen niet alsnog ongewenste broeikasgasemissies met zich meebrengt, leidt inzet van biomassa tot een lagere netto CO₂-emissie in vergelijking met inzet van fossiele brandstoffen. In combinatie met CCS leidt inzet van biomassa zelfs tot negatieve emissies: hierbij wordt immers kort-cyclische CO₂ voor onbepaalde tijd aan de koolstofkringloop onttrokken.

Rol in het systeem

Het leeuwendeel van de biogene brandstoffen in de kostenoptimale oplossingen is chemisch identiek aan fossiele brandstoffen, en dus inzetbaar in alle processen die nu fossiele brandstoffen gebruiken. Biogene brandstoffen maken het dus mogelijk om dure en lastige aanpassingen bij eindgebruiksectoren te vermijden (of uit te stellen). De productie van biogene

brandstoffen heeft echter vaak wel een laag rendement (vaak ongeveer 50 procent). Rechtstreekse inzet van houtige biomassa in industriële ketels levert een veel hoger energetisch rendement.

Dat lage rendement is paradoxaal genoeg ook een voordeel, want bij de productie komt namelijk ook slechts ongeveer de helft van de koolstof in het beoogde product. De rest kan als CO₂ afgevangen en opgeslagen worden. Daarom zijn – evenals bij de productie van warmte, elektriciteit en waterstof uit (ruwe) biomassa – ook bij de productie van biogene brandstoffen negatieve emissies mogelijk met CCS. Die negatieve emissies zijn per hoeveelheid biomassa wel kleiner dan bij bijvoorbeeld gebruik voor warmteproductie, de helft van de koolstof komt immers wel in het beoogde product, en komt via uitlaat of ketel weer vrij als CO₂. Als biomassa relatief schaars is, en de behoefte aan negatieve emissies groot, dan is het waarschijnlijk aantrekkelijker om biomassa te gebruiken voor een product waar geen koolstof meer in zit, en zijn biogene brandstoffen dus minder aantrekkelijk, maar dit hangt ook weer samen met de beschikbaarheid van CO₂-arme alternatieven.

Mix

Biogene brandstoffen komen voor het leeuwendeel uit houtige biomassa, waarvan het grootste deel uit het buitenland komt. Andere biomassastromen lenen zich minder goed voor de productie van biogene brandstoffen, maar vergisting van mest en binnenlandse reststromen levert ook een kleine bijdrage aan biogas. In de 2050-beelden is er een aanzienlijk aandeel Fischer-Tropsch diesel voor transport. Ook voor lucht- en scheepvaart zijn groene brandstoffen in 2050 eigenlijk de enige optie met groot potentieel. Grootschalige inzet van groen gas vindt pas plaats bij ruime beschikbaarheid van biomassa. De vaak grotere inzet op vloeibare biogene brandstoffen komt doordat vloeibare fossiele brandstoffen een hogere CO₂-emissiefactor hebben dan gasvormige, waardoor verdringing van vloeibare fossiele brandstoffen meer emissiereductie oplevert. De verschillen in kosten en effecten zijn echter minimaal. Dit betekent dat er relevante verschuivingen in de emissies per functionaliteit kunnen optreden.

Aandachtspunt

Gebruik van biogene brandstoffen uit biomassa plus CCS levert een functionaliteit negatieve emissies vanuit de productie op, en maakt ingrijpende en dure aanpassingen aan de vraagkant overbodig. Negatieve emissies zorgen voor meer ruimte om daarnaast ook nog fossiele brandstoffen in te blijven zetten. Het is dus een in dubbel opzicht aantrekkelijke optie. Daar staat tegenover dat de beschikbaarheid van biomassa erg onzeker is. Het is daarmee riskant om zwaar op biomassa en biogene brandstoffen te leunen, als er ook alternatieven zijn. Als biomassa erg schaars is, wordt het steeds aantrekkelijker om het maximum aan negatieve emissies eruit te halen. Dat is niet het geval bij biogene brandstoffen omdat hier nog steeds koolstof in zit, maar wel bij (grootschalige) warmte-, elektriciteits- of waterstofproductie uit biomassa, want hierbij zit er geen koolstof meer in het product. Bij ruimere beschikbaarheid van biomassa liggen biogene brandstoffen meer voor de hand. Ook de verhouding met de veronderstelde CO₂-opslag capaciteit speelt hierbij een rol: als die erg klein is, is dat de belangrijkste beperking op negatieve emissies, en niet de hoeveelheid koolstof die uit de biomassa wordt gehaald.

Een tweede criterium voor de inzet van biomassa voor een bepaalde toepassing is de beschikbaarheid van (goedkope) alternatieve CO₂-vrije opties. Naarmate deze minder beschikbaar zijn, en er minder ruimte voor inzet van fossiele brandstoffen is, ligt inzet van biogene brandstoffen meer voor de hand.

Tabel 2.6. Kenmerken van de productie van brandstoffen in de verschillende varianten.

Aanbod: Productie brandstoffen			
Onderdeel	Technologie en/of energiedrager	Potentiële rol in 2050	
		In 80%-beelden	In 95%-beelden
Primaire energiebronnen (OPERA-varianten)	Aardgas	300 – 400 PJ	10 – 700 PJ
	Biomassa	100 – 250 PJ	100 – 600 PJ
		Inzet deels direct zoals in ketels bij de industrie, deels voor de productie van groen gas en biodiesel Hierin is niet meegenomen biomassa die wordt ingezet voor de productie van brandstoffen voor lucht- en scheepvaart (kan ordegrootte 400 PJ zijn)	
Olie (voor energie)	250 – 350 PJ	100 – 250 PJ	
Methaangas (E-Design varianten)	Aardgas	200 – 800 PJ	100 – 300 PJ
	Groen gas	150 – 250 PJ 20 - 50% van gas totaal	200 – 350 PJ 50 – 70% van gas totaal
Groene brandstoffen uit vaste biomassa algemeen	Vergassing biomassa, Fischer-Tropsch, optioneel met CCS	Ja	Ja
		Voor 80%-beelden moeilijk te missen optie, voor 95%-beelden is het een robuuste optie, zoveel mogelijk met CCS.	
Waterstof (niet als grondstof voor C-verbindingen)	Bijmenging in gasnet	0 - 7 PJ	10 – 40 PJ
		Hiervoor is een maximum van 25% aangehouden	
Methaanproductie	Uit waterstof met CO ₂	Niet	0 – 50 PJ
Raffinaderijen	CCS	Afvang afhankelijk van de omvang van de productie	
	Olieraffinage met waterstof	Nee	Ja

2.7.3 Productie van waterstof

Omvang

In een deel van de varianten bij 95 procent reductie speelt waterstof een belangrijke rol, voornamelijk in de transportsector (zie 2.8.4), en meer incidenteel in andere sectoren. Ook via bijmenging in het gasnet speelt het een rol (zie tabel 2.6). Dit is zeer onzeker: de huidige wettelijk norm is maximaal 0,1 procent, maar er zijn ook geluiden dat tot 100 procent mogelijk is. De berekeningen gaan uit van een maximaal momentaan waterstofpercentage in het gasnet van 25 procent⁷, maar hogere percentages zouden nog tot een grotere rol van waterstof kunnen leiden.

⁷ Met deze aanname wordt zichtbaar of bijmenging aantrekkelijk kan zijn, zonder dat dit meteen het hele beeld domineert. Een maximaal momentaan percentage betekent dat op geen enkel moment het percentage waterstof (gemeten als energie-aandeel) hoger mag liggen. Het gemiddelde percentage ligt dan lager.

Rol in het systeem

Ten opzichte van elektriciteit heeft waterstof een aantal voor- en nadelen: waterstof is beter op te slaan – vooral een voordeel in mobiele toepassingen – en het is iets makkelijker met grote vermogensdichtheden te transporteren, maar daartegenover staan lagere ketenrendementen. Ten opzichte van methaan of vloeibare brandstoffen is opslag juist weer lastiger. Productie van waterstof uit elektriciteit gaat met een rendement van ongeveer 70 procent, en omzetting van de waterstof in het gewenste product gaat meestal ook met een lager rendement dan bij elektriciteit. Bij productie van elektriciteit uit waterstof en inzet in een waterstofauto komt ten opzichte van een elektrische auto uiteindelijk ongeveer de helft van de energie ten goede aan de gereden kilometers. Als aanbod van elektriciteit schaars of duur is weegt dit nadeel zwaarder dan bij overvloedig en goedkoop aanbod. Productie van waterstof uit elektriciteit kan wel een bijdrage leveren aan het uitbaten van overschotten van elektriciteitsproductie uit wind en zon.

Mix

In de kostenoptimale oplossingen vindt waterstofproductie voornamelijk plaats uit elektriciteit (elektrolyse van water) of uit aardgas met toepassing van afvang en opslag van CO₂. De laatste kan ook als overgangstechnologie van belang zijn.

Aandachtspunt

Bij elektrolyse van water komt behalve de beoogde waterstof ook zuurstof vrij. Pure zuurstof kan toegepast worden bij CCS in zogenaamde oxy-fuel combustion. Hierbij wordt brandstof met pure zuurstof verbrand, waardoor er (bijna) pure CO₂ vrijkomt. Dit zou de kosten van CCS iets kunnen verlagen en het afvangpercentage kunnen verhogen, waardoor minder restemissies van CO₂ overblijven. Het gebruik van de zuurstof is echter geen optie in de gebruikte modellen.

2.7.4 Power-to-fuel

Omvang

Eventueel is het ook mogelijk om waterstof verder om te zetten naar koolwaterstoffen, met CO₂. Dit is een vorm van CCU: Carbon Capture and Utilization. Alleen bij 95 procent reductie zijn er een paar varianten waar dit in geringe omvang gebeurt

Rol in het systeem

Evenals biogene brandstoffen maken brandstoffen uit power-to-fuel (P2F) dure aanpassingen voor de toepassing van de energie bij eindgebruikerssectoren overbodig. Het emissiereductie-effect is echter kleiner en biogene brandstoffen zijn goedkoper. Ook een goedkoper alternatief is om de CO₂ op te slaan in plaats van te gebruiken voor P2F, en de ontstane emissieruimte te gebruiken voor inzet van fossiele brandstoffen. Pas als deze alternatieven – biomassa en CCS – uitgeput zijn komt power-to-fuel in beeld. Bij energetische toepassingen gaat het uiteindelijk om de energie, en niet om de vorm waarin die aangeboden wordt, en daarom zal power-to-fuel alleen daar toegepast worden waar de aanpassingen voor elektrificatie en waterstof duurder zijn, en bijmenging van waterstof in het gasnet niet meer hoger kan (zie tabel 2.6).

Bij gebruik als grondstof ligt dit anders: daar gaat het om de specifieke eigenschappen van het materiaal, en juist niet om de energie-inhoud. Voor het produceren van feedstock komt power-to-fuel daardoor wellicht eerder in beeld dan voor het produceren van energiedragers. Power-to-fuel kan dan bijvoorbeeld ook gebruikt worden om een groter deel van de koolstof uit ruwe biomassa te benutten. Omdat de huidige berekeningen de IPCC-systematiek volgen, en die vastlegging van koolstof niet als emissiereductie ziet, komt dit niet uit de resultaten naar voren.

Mix

Alleen waterstof uit elektrolyse komt logischerwijze in aanmerking. Waterstof uit aardgas met toepassing van afvang en opslag van CO₂ is immers precies het omgekeerde van methanatie van waterstof, en zal daarom niet op grote schaal tegelijkertijd voorkomen.

2.7.5 Warmte voor warmtenetten

Deze paragraaf gaat alleen over de productie van warmte voor warmtenetten voor de lage-temperatuurwarmte. Meestal vindt de productie van warmte plaats immers bij de gebruiker van de warmte, en is daarmee geen aparte aanbodactiviteit maar integraal onderdeel van de betreffende functionaliteit.

Ook als warmte via warmtedistributie naar de gebruiker gaat, is de afstand tussen bron en bestemming nooit erg groot. Toch is het – mede in verband met de warmtelevering van HTW naar LTW – belangrijk om aandacht te besteden aan de aanbodkant van warmte.

Omvang

De rol van warmteproductie voor warmtelevering is lastig uit de berekeningen af te leiden omdat bij de LTW vanwege de enorme verschillen in schaalniveau de grens tussen warmtelevering en eigen productie door de gebruiker niet altijd goed te trekken is. Een groot glastuinbouwbedrijf kan een eigen geothermiebron hebben – overigens in diverse praktijkgevallen ook ontsloten voor levering aan andere bedrijven of wijken – terwijl inzet van geothermie bij diensten en huishoudens een warmtenet vergt. Ook missen de huidige berekeningen de ruimtelijke differentiatie die vaak sterk bepalend is voor de toepassing van warmtenetten. Toch valt uit de resultaten wel af te leiden dat warmtelevering aan de LTW wel een robuust onderdeel van de kostenoptimale invulling is, zowel bij 80 als bij 95 procent emissiereductie. Bij de uitrol van warmtenetten spelen – ondanks de lange termijn tot 2050 – ingroeibeperkingen zeer waarschijnlijk een belangrijke rol.

Rol in het systeem

In de oplossingen van het model komt veel van de warmte voor LTW van de industrie. De belangrijkste reden daarvoor lijkt dat er op het grotere schaalniveau van de industrie CO₂-arme of –vrije oplossingen voor warmteproductie zijn die op het kleinere schaalniveau van de meeste LTW-vraag ontbreken of veel duurder zijn. In de industrie is bijvoorbeeld vanwege de schaal warmteproductie met (BE)CCS mogelijk. Als de industrie (rest) warmte uit BECCS aan de LTW levert, levert dat de LTW een negatieve emissie op.

Mix

Warmte voor de LTW komt deels via levering vanuit de industrie, deels vanuit eigen aardwarmtebronnen. De warmteproductie in de industrie komt een vaak uit zeer diverse mix van aardgas, biomassa (beide vaak met CCS), elektriciteit. Ook aardwarmte speelt vaak een rol

Aandachtspunt

Zoals al genoemd was het binnen de korte doorlooptijd niet mogelijk om het onderscheid tussen lage en hoge temperatuurwarmte op de ideale manier in de modellen onder te brengen. Dat geldt ook voor de rol van ruimtelijk differentiatie voor de keuzes bij de warmtevoorziening.

Onbekend is in hoeverre de warmtebehoefte van CCS – die in dezelfde temperatuurrange ligt als die van veel warmtenetten – de beschikbaarheid van (rest)warmte vanuit de industrie zal beperken. Voor zover bekend is dit laatste nog nooit goed uitgezocht. Ook industriële warmtepompen, die lage temperatuur restwarmte kunnen opwaarderen tot hoge(re) temperatuurwarmte, kunnen de beschikbaarheid van lage temperatuur restwarmte verminderen. Als CCS en andere veranderingen in de HTW de beschikbaarheid van (rest)warmte verminderen kan

dit de toepassing van warmtelevering beperken. Daarnaast is de beschikbaarheid van geothermische warmte van groot belang maar ook onzeker en is de gevoeligheid daarvoor niet nader onderzocht

2.8 Technieken in de functionaliteiten

Deze paragraaf bespreekt technieken die in de verschillende functionaliteiten aan de orde (kunnen) komen.

2.8.1 Hoge temperatuur warmte

Algemeen beeld

De energiebalans (tabel B.2.8 in bijlage 2) laat zien dat de belangrijkste energiedragers voor energetische inzet in de HTW elektriciteit, kolen en biomassa zijn. Opvallend zijn de grote ranges in het verbruik van energiedragers. Door het schaalniveau is de HTW erg flexibel bij de inzet van verschillende energiedragers, en verschillen in beschikbaarheid van potentiële komen hier dan ook sterk naar voren. Het verbruik van kolen hangt rechtsreeks samen met de keuze van de technologie voor de productie van ijzer en staal.

Opties

Generiek

Belangrijke generieke opties bij de HTW omvatten besparing, inzet van biomassa en/of CCS, en (gedeeltelijke) elektrificatie van de warmteproductie. Dat laatste kan met weerstandverwarming of warmtepompen. Zie ook tabel 2.7.

Specifiek

Naast de generieke opties omvat de analyse een beperkt aantal opties die heel specifiek zijn voor bepaalde processen. Processpecifieke opties zijn onder andere alternatieven op basis van elektriciteit voor staalproductie en ammoniakproductie. Bij de staalproductie zijn er twee dominante alternatieven: voortzetting van de productie op basis van kolen in combinatie met CCS, al dan niet met nieuwe processen (Hisarna) of productie op basis van elektrolyse (ULCOLYSIS/ULCOWIN), waarbij net als bij zink of aluminium erts met elektriciteit gereduceerd wordt tot metaal. Bij ammoniak speelt productie met SSAS (solid state ammonia synthesis) een belangrijke rol. De processen op basis van elektriciteit komen vooral in de oplossing bij verdergaande reductie en/of minder CCS. Waarschijnlijk zijn er nog meer specifieke mogelijkheden om processen te elektrificeren (dus anders dan elektrificatie van de warmtevraag), maar hiervoor waren geen gegevens voorhanden.

Opvallende observaties

Met de elektrificatie levert de HTW ook vaak een substantiële bijdrage aan de flexibiliteit van het energiesysteem: in veel varianten is de capaciteit van bijvoorbeeld ULCOLYSIS staalproductie en SSAS ammoniakproductie overgedimensioneerd. Hiermee is de totale productie van staal en ammoniak haalbaar in een kortere bedrijfstijd en hoeft het proces alleen te draaien op momenten dat er voldoende wind en zon zijn. Dergelijke flexibiliteit is misschien wel veel breder te ontsluiten in de industrie dan nu in het model mogelijk is. Ook is het denkbaar dat dit op een goedkopere manier kan, door alleen de meest elektriciteitsintensieve processtappen te overdimensioneren.

Tabel 2.7. Technische kenmerken van hoge temperatuur warmte in de 2050-beelden.

Functionaliteit: Hoge temperatuurwarmte			
Onderdeel	Technologie en/of energiedrager	Potentiële rol in 2050	
		In 80%-beelden	In 95%-beelden
Warmtevoorziening en processen totaal	Elektriciteit	0-25%	20-30%
		Vaak flexibel ingezet, en daarmee belangrijk voor inpassing wind en zon	
	Waterstof	Komt niet in de OPERA-beelden, maar kan mogelijk wel een rol gaan spelen. Mogelijk ook verborgen in de toepassing van CCS (Centrale waterstofproductie met CCS in grote industriële agglomeraties als alternatief voor individuele pre-combustion CCCS)	
	Biomassa	Speelt relatief grote rol IN warmteproductie, vaak in combinatie met CCS	
	CCS	8-29 Mton	6-34 Mton
Besparing	Warmtevraagvermindering, terugwinning restwarmte	Circa 70 PJ	70-120 PJ
		Exclusief fundamenteel nieuwe processen en elektrificatie (b.v. Hisarna, ULCOLYSIS/ULCOWIN). Belangrijker naarmate biomassa en CCS minder beschikbaar zijn	
Staalproductie	De belangrijkste varianten zijn: a) Huidige proces soms met CCS b) Hisarna proces met CCS c) ULCOLYSIS/ULCOWIN proces op basis van elektriciteit	Optie a en b zijn relevant bij voldoende CO ₂ -opslagpotentieel en als optie c) in de praktijk pas later dan 2050 grootschalig zou kunnen worden ingezet. In de 95%-beelden is het meestal c), maar in enkele varianten optie a/b met CCS. In de 80%-beelden komt optie a) met en zonder CCS voor, in een enkel geval ook c).	
Chemie: kunststofproductie	CCS bij feedstock	-	-
	Aandeel biograndstof	Telt niet mee als reductie bij IPCC-grondgebiedbenadering, daarom geen onderdeel van de oplossingen. Wel relevant bij bredere mondiale benadering	
Chemie: ammoniakproductie	CCS	0%	0%
	Elektriciteit	100%	100%

Nader uit te zoeken, beperkingen berekeningen en beperkingen beschikbare kennis

Ook in de HTW liggen er nog de nodige vraagstukken, en ook hier gaat het niet zozeer over de richtingen waarlangs verduurzaming moet plaatsvinden, maar wel de omvang van de verschillende richtingen en de precieze vorm waarin dit moet plaatsvinden. Veel vraagstukken hebben hier te maken met de consequenties voor beschikbare restwarmte (vooral belangrijk voor LTW) en de toepasbaarheid van bepaalde technieken:

- Bij de hoge temperatuurwarmte is nog veel onduidelijk over de precieze potentiële omvang, invulling en implicaties van opties. De studies die op dit gebied beschikbaar zijn beperken zich vaak tot energiebesparing, en zijn bovendien vaak gedateerd en/of niet toegespitst op de Nederlandse situatie.

- Bij CCS zijn er ruwweg drie alternatieven: post-combustion (CO₂ uit verbrandingsgasen), pre-combustion (CO₂-uit brandstoffen waarna een waterstofrijk gas overblijft) of oxy-fuel combustion (verbranding met zuivere zuurstof, waardoor na condensatie van de waterdamp vrijwel zuivere CO₂ overblijft). Bij de keuze tussen deze alternatieven zullen zaken als technologische ontwikkeling, kosten en omvang van rest-emissies (alleen vrijwel nihil bij oxy-fuel) een belangrijke rol spelen. Op basis van de huidige informatie ontlopen de alternatieven elkaar nog niet zo veel. Ook lokale factoren en inpassing in bestaande processen kunnen belangrijk zijn, vooral bij grote industriële agglomeraties. Deze bieden de mogelijkheid om bepaalde voorzieningen centraal op te zetten, zoals een zuurstoffabriek (oxyfuel) of een waterstoffabriek (pre-combustion), met de bijbehorende infrastructuur.
- Bij CCS kan lage temperatuur restwarmte nodig of inzetbaar zijn voor de regeneratie van het solvent waarmee CO₂-wordt afgevangen (post- of pre-combustion). Het is onbekend wat de consequenties hiervan kunnen zijn op de beschikbaarheid van restwarmte voor levering aan derden. Dit is ook van belang omdat bij inzet van restwarmte in de industrie zelf er een veel betere aansluiting is op het warmtevraagpatroon dan bij inzet bij de LTW. In dat laatste geval kan ook bij toepassing van warmtebuffers een groot deel van de restwarmte waarschijnlijk niet benut worden.
- Onbekend is wat precies de beperkingen zijn voor industriële warmtepompen ten aanzien van haalbare temperatuurniveaus, en wat de consequenties zijn van toepassing ervan voor de beschikbaarheid van restwarmte voor derden
- Flexibiliteit is nu in kaart gebracht voor een paar specifieke processen en elektrische (bij)verwarming, maar wellicht is dit nog veel breder mogelijk. Ook zijn er waarschijnlijk nog veel mogelijkheden om dit qua kosten te optimaliseren, door deze flexibiliteit te concentreren in de meest energie-intensieve en minst kapitaalintensieve processtappen. Dat zal dan wel (extra) voorzieningen voor opslag van tussenproducten vergen.
- Voor de staalproductie zijn twee processen op basis van elektrolyse opgenomen, een hoog temperatuurproces (ULCOLYSIS, 1600 °C) en een proces met een veel lagere temperatuur (ULCOWIN, 110 °C). Beide processen zijn nu flexibel op- en afregelbaar verondersteld, maar het ligt voor de hand dat dit bij een lage-temperatuurproces makkelijker is. Bij onderzoek naar en ontwikkeling van dergelijke processen zou de realiseerbare flexibiliteit een apart aandachtspunt moeten zijn.
- Bij de industrie kan de rol van de investeringscyclus in installaties erg belangrijk zijn, en doen zich niet zo vaak geschikte momenten voor om de overstap naar een nieuwe techniek te maken. Als een dergelijk moment te vroeg komt, is de meest aantrekkelijk keuze van dat moment niet noodzakelijk optimaal op de langere termijn. Er bestaan dan een risico op een (tijdelijke) lock-in.
- Voor de staalindustrie geldt: komen de nieuwe processen op tijd gereed om in 2050 al grootschalige inzet te kunnen veronderstellen? Hierbij is van belang dat de ontwikkeling van het Hisarna proces veel verder is gevorderd dan van de ULCOLYSIS/ULCOWIN-processen, terwijl de laatste beter passen in de 95 procent beelden met beperkte CCS.

2.8.2 Kracht en licht

Algemeen beeld

De totale vraag naar elektriciteit voor K&L – de traditionele elektriciteitsvraag - bedraagt 300-320 PJ bij 80 procent reductie en 230-320 bij 95 procent reductie. Hiermee maakt de traditionele elektriciteitsvraag in 2050 40-60 procent van de totale elektriciteitsvraag uit. K&L is aan de vraagkant de meest eenvoudige functionaliteit: elektriciteit is de enige energiedrager en er zijn geen directe emissies. De emissies komen dus geheel van de aanbodkant: de elektriciteitsopwekking heeft bij zowel 80 als 95 procent emissiereductie nauwelijks emissies, maar evenmin negatieve emissies van betekenis.

Opties

Aan de vraagkant zijn de opties voornamelijk beperkt tot finale besparingen. Voorbeelden zijn (nog) efficiëntere (huishoudelijke) apparaten, efficiëntere industriële pompen en compressoren, efficiëntere verlichting etc. Voor de aanbodkant zie paragraaf 2.7.1.

Tabel 2.8. Technische kenmerken van kracht en licht in de 2050-beelden.

Functionaliteit: Kracht en licht			
Onderdeel	Technologie en/of energiedrager	Potentiële rol in 2050	
		In 80%-beelden	In 95%-beelden
Elektriciteitsvraag	Energiebesparing	27-44 PJ	42-120 PJ
		(nog) efficiëntere (huishoudelijke) apparaten, efficiëntere industriële pompen en compressoren, efficiëntere verlichting. Belangrijker naarmate minder biomassa en CCS beschikbaar zijn.	

Nader uit te zoeken en beperkingen berekeningen

- Bij een aantal elektrische toepassingen is (beperkt) automatisch gestuurde demand-side management denkbaar. Voorbeelden zijn vriezers en vrieshuizen (lagere temperatuur bij voldoende aanbod om tekortperiodes te kunnen overbruggen), of wasmachines en wasdrogers die voor een bepaalde tijd klaar moeten zijn, maar verder wel rekening kunnen houden met aanbod van elektriciteit.

2.8.3 Lage temperatuurwarmte

Algemeen beeld

De totale vraag naar lage temperatuurwarmte bedraagt 350-410 PJ, afhankelijk van de gerealiseerde additionele besparingen. Belangrijke energiedragers voor het directe gebruik zijn aardgas/groen gas, elektriciteit, warmte en omgevingswarmte (zie tabel 2.9). Het aandeel elektriciteit in het gebruik is als gevolg van elektrificatie van de verwarming aanzienlijk.

In de berekende toekomstbeelden is de gebouwde omgeving niet helemaal aardgasvrij met uitzondering van een enkel 95 procent beeld. Het aandeel van aardgas ligt in de 80 procent beelden wat hoger dan in de 95 procent beelden; die voor de andere energiedragers liggen juist bij 95 procent meestal hoger.

Aardgasvrij betekent niet gasvrij. Er wordt ook groen methaangas ingezet en in bepaalde varianten waterstof bijgemengd in het gasnet. Het (methaan-)gas is in sommige beelden voor een groot deel gemaakt uit biomassa (zie 2.7.2). Via gas uit biomassa (met CCS) krijgt LTW vaak wat negatieve emissies.

De directe emissies en de totale emissies hebben in de OPERA-varianten ongeveer dezelfde range: de LTW krijgt via het aanbod niet veel extra emissies maar ook nauwelijks negatieve emissies. In de E-Design analyse zijn er wel varianten met een grotere bijdrage van groen gas met negatieve emissies.

Tabel 2.9. Technische kenmerken van lage temperatuur warmte in de 2050-beelden.

Functionaliteit: Lage temperatuur warmte			
Onderdeel	Technologie en/of energiedrager	Potentiële rol in 2050	
		In 80%-beelden	In 95%-beelden
Gebouwde omgeving algemeen	Aardgas	25 – 30 %	0 – 30%
	Groen gas of biomassa	5 – 10%	5 – 30%
		Deels als biomassa direct, deels als biogas uit natte afvalstromen en deels uit groen gas geproduceerd met negatieve emissies	
	Warmtenetten	~20% of ~80 PJ	20 – 30%
		Aandeel van restwarmte ongeveer de helft: 10-15% Daarnaast zijn er ook modellen die een aandeel tot 50% warmtenetten aangeven; potentieel van geothermie is erg onzeker	
	Elektrificatie (inclusief omgevingswarmte)	40 – 50%	40 – 80%
Deels all-electric, deels in hybride systemen (verdeling op wijkniveau is aan de hand van de gebruikte modellen niet te geven)			
Warmtevraagvermindering	10-20 PJ	15-65 PJ	
	Veel besparing vindt al plaats in de baseline. Warmtevraagvermindering omvat bijvoorbeeld diverse vormen van gebouw isolatie, warmterugwinning etc. Belangrijker naarmate minder biomassa en CCS beschikbaar zijn.		

Opties

Belangrijke opties bij de LTW zijn elektrificatie, in de vorm van (hybride) warmtepompen gecombineerd met winning van omgevingswarmte, inzet van groen gas via het gasnet (methaan of bijmenging van waterstof, in die toepassing ook een vorm van groen gas), warmtelevering en geothermie. Verder draagt bijmenging van waterstof in het aardgasnet ook nog iets bij in een aantal 95 procent beelden. Bij elektrificatie komen zowel weerstandsverwarming (bijvoorbeeld elektrische boilers, elektrisch koken) als (hybride) warmtepompen en WKO met warmtepompen voor. De resultaten laten variërende verhoudingen van volledige warmtepompen en hybride concepten zien. Investeringskosten lijken in de resultaten een belangrijke factor voor de toepassing van (hybride) warmtepompen. Gezien het potentieel voor kostendaling zou een gevoeligheidsanalyse voor de kosten wel op zijn plaats zijn. Het percentage groen gas hangt sterk af van de beschikbaarheid van biomassa.

De grens tussen decentrale opties en warmtelevering is binnen de LTW niet altijd scherp te trekken vanwege de enorme verschillen in schaalniveau. Wat bij huizen via een warmtenet moet (centraal), kan in de glastuinbouw of dienstensector vaak bij individuele bedrijven (decentraal). Denk daarbij aan technieken als geothermie, of WKO.

Specifieke onzekerheden

Veel technieken voor de kleinschalige toepassingen (vooral huishoudens) zijn relatief duur, maar mogelijk is er wel een flinke ruimte voor kostendaling. Een gevoeligheidsanalyse op het effect van lagere kosten voor deze technieken zou wel van belang zijn.

Nader uit te zoeken, beperkingen berekeningen en kennisvragen

Bij de LTW liggen er nog de nodige vraagstukken. Dat gaat niet zozeer over de richtingen waarlangs verduurzaming moet plaatsvinden, dat lijkt op hoofdlijnen vrij robuust. Maar de omvang van de verschillende richtingen (bijv. aandelen elektrificatie versus warmtelevering) en de precieze vorm waarin dit moet plaatsvinden is wel onzeker, vraagt nadere analyses, maar is ook sterk afhankelijk van lokale omstandigheden (zoals bebouwingsdichtheden, aanwezigheid van geothermiebronnen) en zal dan ook lokaal in een samenspel met vele partijen moeten worden vastgesteld.

Een heel belangrijk vraagstuk hierbij is de rol van verdergaande energiebesparing (dus nog verdergaand dan de baseline): in welke mate dit randvoorwaardelijk is om bijvoorbeeld elektrificatie en hernieuwbare warmte op grote schaal te kunnen toepassen is nog onduidelijk.

Specifieke vraagstukken/aandachtspunten zijn dan ook:

- Hoe is precies de relatie tussen verdergaande gebouwisolatie en de afvlakking van het warmtevraagpatroon?
- Wat is de potentiële bijdrage van andere opties aan de afvlakking van het warmtevraagpatroon (bijvoorbeeld phase change materials)?
- Hoe goed moeten gebouwen geïsoleerd zijn om succesvol over te kunnen gaan op volledige elektrificatie en hernieuwbare warmte? Hoe verschilt dit per soort gebouw (kantoor, tussenwoning, appartement, vrijstaande woning)?
- Welke netverzwaringen zijn nodig bij vergaande elektrificatie? Gaat dit vaak alleen om transformatoren en schakelstations, of (soms) ook om de kabels van het distributienet? In hoeverre kan netverzwaring aansluiten bij natuurlijke momenten?
- Elektrificatie van gebouwen kan goeddeels op individuele basis, waardoor dit vaker samenvalt met natuurlijke momenten. Verduurzaming via warmtenetten moet vooral collectief, en valt daardoor veel minder vaak samen met natuurlijke momenten. Wat betekent dit voor de kostenafweging?
- Hoe valt de afweging uit tussen volledige warmtepompen en hybride warmtepompen? Mogelijk dat bij de laatste door voortdurende verbetering en optimalisatie het aandeel van de warmtepomp in de warmtevoorziening sterk zal toenemen ten opzichte van het aandeel van de gasketel, waardoor het voordeel van volledige warmtepompen (met meenemen van het uitsparen van gasinfrastructuur) afneemt.
- Ondanks de lange termijn is met name voor warmtenetten door de vele betrokkenen en organisatorische vraagstukken daaromheen de ingroeisnelheid mogelijk beperkend, hetgeen mede bepalend kan zijn voor het potentieel in 2050.
- Onduidelijk is wat de beschikbaarheid van warmtebronnen voor warmtenetten op deze termijn zal zijn. In bijvoorbeeld de HTW kunnen nieuwe technieken om daar de emissies te reduceren de beschikbaarheid van restwarmte sterk verminderen (zie HTW). Ook rond geothermie is er nog de nodige problematiek die de (lokale) inzetbaarheid kan beperken. Dit is in de modelanalyses niet meegenomen.

2.8.4 Mobiliteit

Algemeen beeld

Mobiliteit in de 2050-beelden is in veel sterkere mate gebaseerd op elektriciteit dan nu en mogelijk ook van waterstof en/of aardgas (deels groen gas); zie tabel 2.10. Dat betekent dat de rol van olieproducten als diesel, benzine en kerosine minder wordt, al blijft die belangrijk en worden deze brandstoffen deels uit hernieuwbare bronnen geproduceerd.

De functionaliteit Mob moet het voor negatieve totale emissies helemaal van de toerekening vanuit de aanbodsectoren hebben: productie van biobrandstoffen met CCS (zie paragraaf

2.7.2). Paradoxaal genoeg zijn die negatieve emissies het grootst als er aan de vraagkant het minst verandert: Fischer-Tropsch biobrandstoffen zijn immers inzetbaar in conventionele verbrandingsmotoren. Bij de varianten met de in veel opzichten meest vergaande transitie – hoge aandelen elektriciteit en waterstof – zijn er juist minder negatieve emissies. Dit is een risico voor de transitie dat kleeft aan een mogelijk beleidsdoel voor de emissie op het niveau van de functionaliteit. Omdat sterk rekening moet worden gehouden met een beperkt toekomstige aanbod van biobrandstoffen, is het immers zaak zoveel mogelijk op elektrificatie en waterstof in te zetten.

Tabel 2.10. Enkele belangrijke technische kenmerken van mobiliteit in de 2050-beelden.

Functionaliteit: Mobiliteit			
Onderdeel	Technologie en/of energiedrager	Potentiële rol in 2050	
		In 80%-beelden	In 95%-beelden
Wegverkeer algemeen	Groene brandstoffen	50 – 60 PJ	50 - 100 PJ
		Als alle wegverkeer nog op fossiele brandstoffen zou rijden, dan betekent 50 PJ ongeveer 10% daarvan;	
Personenauto's	Nul-emissie	60 - 90% Elektrische voertuigen met een deel plug-in hybrides	80 – 100% Vooral elektrische voertuigen en plug-in hybrides met waterstof
Vrachtverkeer op de weg	Waterstof	Niet	0 - 100%
	Elektriciteit	Ook elektrische vrachtwagens (eventueel met de mogelijkheid om tijdens het rijden op te laden) zijn in beeld als alternatief voor waterstof. Deze optie is in de modelanalyses niet meegenomen.	
Luchtvaart	Biobrandstoffen of power-to-fuel	Enige technische optie met groot potentieel. Niet meegenomen in analyses gericht op reductiepercentages in Nederland.	
Zeescheepvaart	Biobrandstoffen of power-to-fuel	Belangrijkste technische optie met groot potentieel. Niet meegenomen in analyses gericht op reductiepercentages in Nederland.	
	CCS	Wellicht optie, niet nader bekeken. Niet meegenomen in analyses gericht op reductiepercentages in Nederland.	

Opties

Olieproducten kunnen deels uit hernieuwbare bronnen worden geproduceerd; de productie daarvan wordt besproken in 2.7.2). Ze vergen nauwelijks aanpassingen aan de gebruikerskant. Beperkte aanpassingen zijn nodig voor het gebruik van methaangas als brandstof voor het zware wegtransport, hetgeen in enkele 80 procent beelden als optie naar voren komt. Daarbij zijn in de modelberekeningen lagere emissies aangehouden voor methaangas in vergelijking met diesel. Dat is overigens alleen het geval als er geen methaanlekage plaatsvindt: het onverbrand vrijkomen van een deel van het gas. In dat geval is de emissiewinst – door het veel grotere aardopwarmingsvermogen (global warming potential) van methaan ten opzichte van CO₂ – snel verdampt.

Elektrische auto's, waterstofauto's en hybride varianten hierop vragen ingrijpende systeeminnovaties. Deze nul-emissie voertuigen zijn in nog grotere omvang en ook bij vrachtverkeer

in de 95 procent beelden nodig als biomassa en/of CCS niet ruim beschikbaar zijn. Voor zwaar vrachtverkeer komt waterstof als optie in het OPERA-model naar voren maar ook elektrische varianten zijn als alternatieven voor de lange termijn in beeld. Het model laat ook een rol zien voor plug-in hybride waterstofauto's, maar dit zal afhangen van het gebruiksgemak en vooral de actieradius en oplaadfaciliteiten van elektrische voertuigen in de toekomst. De precieze technische invulling als output van de gebruikte modellen – all-electric, waterstof, (bio)brandstoffen en de diverse hybride concepten – is gezien de grote onzekerheid geen robuust resultaat. Wel robuust lijkt dat – zeker in 95 procent beelden – elektriciteit een grote rol gaat spelen, maar daarnaast is ook een grote rol voor waterstof goed denkbaar.

De verschillende richtingen hebben verschillende voor- en nadelen: all-electric heeft de hoogste well-to-wheel ketenefficiency, maar wellicht iets minder gebruiksgemak qua actieradius en opladen op lange afstanden. Waterstof heeft een lagere ketenefficiency, maar waarschijnlijk een hogere actieradius. Niet bekeken is of er nog veiligheidsissues kleven aan deze opties. Hybride oplossingen vertegenwoordigen vaak een compromis tussen de verschillende aspecten maar hebben daarvoor soms wel een extra prijskaartje.

Internationale bunkers

De bunkers – het energiegebruik voor de internationale lucht- en scheepvaart – zijn geen onderdeel van de analyse; ze vallen immers ook niet onder de IPCC grondgebiedemissies. Wel moeten om de klimaatdoelen te halen ook de internationale lucht- en scheepvaart hun emissies beperken. Andere opties dan nog zuiniger schepen en vliegtuigen en biobrandstoffen of power-to-fuel lijken daarbij niet waarschijnlijk in 2050. Er zijn wat voorzichtige stappen richting elektrische vliegtuigen, maar grootschalige toepassing in 2050 is eigenlijk ondenkbaar. Gezien het schaalniveau is CCS bij grote zeeschepen misschien een mogelijkheid, maar dit is nog erg speculatief.

Vooraf van belang is dus voorlopig de claim vanuit de bunkers op de beschikbare biomassa. Bij naar rato van BBP toedelen van de internationale bunkers aan Nederland in 2050 en vervanging van 80 procent door biobrandstoffen zou dit een claim op biomassa van zo'n 400 PJ kunnen betekenen. Dat is een zodanig grote claim op het biomassa-aanbod dat het een extra argument vormt om voor het wegverkeer en andere mobiele bronnen vooral op elektrificatie en waterstof in te zetten.

Specifieke onzekerheden

In de transportsector zijn allerlei (plug-in) hybride configuraties denkbaar, met allemaal een andere mix van voor- en nadelen. Ook zijn de technische ontwikkelingen – batterij technologie, waterstof auto's – nog in volle gang en daarmee onzeker. Elektrificatie en waterstof – de laatste alleen bij 95 procent reductie – lijken robuust als na te streven oplossingsrichtingen, maar in welke vorm en verhouding ze zich op termijn zullen manifesteren is nog onduidelijk.

Opvallende observaties

Een belangrijke notie is dat de uitkomsten met negatieve toegerekende emissies – uit de productie van biobrandstoffen met CCS – niet de meest vergaande transitie bij de mobiliteit vertegenwoordigen, maar eerder het beeld dat hoort bij tegenvallende technische ontwikkelingen en handhaving van de status quo. Waterstof en elektriciteit – vergaande oplossingsrichtingen die de afhankelijkheid van onzekere biomassa (en CCS) verminderen brengen minder negatieve emissies met zich mee. Op het niveau van de functionaliteit vormen de laagst mogelijke emissies dus zeker niet automatisch het baken om op te koersen.

Nader uit te zoeken en beperkingen berekeningen

Issues binnen de mobiliteit die nader onderzoek vergen:

- Het is onzeker of de actieradius op de lange termijn nog een obstakel is voor de elektrische auto. De analyses met het OPERA-model houden hier beperkt rekening mee, door bij elektrische auto's een gemiddeld wat lager aantal kilometers per voertuig te veronderstellen. Het is wel met veel onzekerheden omgeven, een onderwerp van veel onderzoek en ontwikkeling. Mogelijke oplossingen omvatten niet alleen batterijontwikkeling, maar ook snellaadsystemen, mobiele oplaadsystemen en logistieke oplossingen.
- De automarkt is een internationale markt die aan Europese regels moet voldoen. Oplossingen worden niet op nationaal niveau gekozen (hooguit gestimuleerd) maar op Europese (of zelfs wereld-)schaal. Oplossingen die goed in de Nederlandse situatie – korte afstanden, goede infrastructuur – passen, moeten ook aansluiten bij oplossingen in het buitenland. Nederlandse auto's moeten ook in het buitenland kunnen rijden en tanken, en buitenlandse auto's in Nederland.
- De opkomst van zelfrijdende auto's zou kunnen leiden tot grote verschuivingen in autobezit en mobiliteitsgedrag. De implicaties hiervan en eventuele extra mogelijkheden zijn geen onderdeel van de studie. Elektrisch en zelfrijdend kunnen elkaar versterken, er zit ook overlap in de ontwikkeling, maar het hoeft het per definitie samen te gaan. Ook de snelheid van deze transitie is onzeker. Komt deze eerder of later dan de elektrische auto?
- Grote verschuivingen in mobiliteitsgedrag, zoals structureel meer thuiswerken, overgaan op deelauto's of flexwerk zijn geen onderdeel van de analyse.
- Elektrische auto's en brandstofcelauto's, mogelijk zelfs batterijen die voor voertuigen niet goed genoeg meer zijn, kunnen een rol spelen bij energieopslag en als leverancier van flexibiliteit op de elektriciteitsmarkt en daarmee bijdragen aan een betere benutting van het elektriciteitsaanbod van wind en zon. In de kostenoptimale beelden speelt de opslagcapaciteit van elektrische auto's een rol bij het bieden van flexibiliteit, maar alleen bij het absorberen van pieken in het aanbod. Teruglevering aan het net door elektrische auto's is in principe wel denkbaar, maar in de berekeningen niet verondersteld. Wat hiervan praktisch realiseerbaar is, is niet nader onderzocht.

2.8.5 Natuur en voedsel

Voedsel en landbouw

Deze functionaliteit omvat bronnen van overige broeikasgassen (OBG: CH₄ en N₂O) uit landbouw, en dan vooral de veehouderij en bemesting van landbouwbodems. Volumemaatregelen, zoals verkleining van de veestapel zijn niet meegenomen in deze verkenning. Met name voor de functionaliteit Voedsel en natuur geldt dat de afbakening van deze studie gericht op emissies binnen Nederland betekent dat daarmee niet wordt aangegrepen op de voedselketens die voor een groot deel over de grenzen gaan, en gepaard gaan met zeer relevante emissies – en dus reductiepotentieel - van broeikasgassen. De maatregelen die wel zijn meegenomen voor 2050 zijn gericht op optimalisatie van het bestaande systeem.

Daarnaast is voor 2050 een optie zoals de productie van novel protein foods (npf's) of een substantiële vervanging van de productie van melk en vlees in veehouderijen door industriële processen kansrijk. Omdat onzeker is in hoeverre dit zal leiden tot een vervanging van de productie van vlees en melk in Nederland, is deze niet meegenomen. Het is bijvoorbeeld denkbaar dat de productie van vlees en melk op peil blijft en daarnaast ook de productie van npf's zich ontwikkelt in Nederland. Op mondiale schaal kan een ontwikkeling van npf's zeker leiden tot reductie van OBG- en LULUCF-emissies.

Veranderingen in voedingspatronen en met name het verminderen van de consumptie van dierlijke producten en een veel groter aandeel van npf's kunnen ingrijpende gevolgen hebben

binnen de functionaliteit. Dergelijke veranderingen hebben het karakter van een transitie. De emissie-effecten hiervan zijn belangrijk, maar treden vooral buiten de landsgrenzen op. Deze zijn in het kader van deze studie niet nader bestudeerd aangezien deze gericht is op de uitwerking van beelden voor Nederland voor 2050.

De maatregelen voor OBG uit landbouw die in deze studie gericht zijn op optimalisatie van het systeem, betekenen mogelijk een forse aanpassing voor de landbouw en dan met name voor de veehouderij. Het is denkbaar dat deze maatregelen in de periode tot 2030 al grotendeels kunnen worden genomen (zie voor de maatregelen en de effecten in 2030 tabel 3.7). Er is onzekerheid over slagingskansen van sommige maatregelen, bijvoorbeeld over de mate waarin processen in de maag van runderen beïnvloed kunnen worden. Onzeker is ook hoe de sector het mogelijke risico dat nitrificatieremmers in de melk komen, zal beoordelen. OBG-maatregelen zijn gericht op reductie van methaanemissie uit de veestapel (vooral melkvee) en uit de mest (tijdens opslag), en op reductie van lachgasemissies uit de bodem. Op basis van de kosteneffectiviteit van maatregelen komen er in de 95 procent beelden in het algemeen iets meer maatregelen in het vizier dan in de 80 procent beelden.

De relevantie van de bestudeerde maatregelen voor de energietransitie is beperkt: er is één optie die methaanemissies reduceert en daarbij groen gas produceert. Het emissie-effect hiervan verklaart ook waarom in 95 procent beelden de range bij totale broeikasgassen soms net even lager ligt dan van de OBG alleen.

Volumemaatregelen, zoals verkleining van de veestapel zijn niet meegenomen in de verkenning. Wel is in zowel het WLO-Hoog als in het WLO-Laag scenario de veestapel in 2050 kleiner en de OBG-emissie daardoor lager dan nu. Ten opzichte van dat scenario is daardoor in 2050 het emissiereductiepotentieel lager dan in 2030.

Na het uitvoeren van de berekeningen met OPERA voor deze studie bleek dat het reductiepotentieel in de berekeningen wat lager lag dan dat strookt met de beschreven uitgangspunten. Bij de bovenstaande uitgangspunten zullen de emissies van V&N dus wat hoger liggen dan in de berekeningen. Dat betekent dat een wat grotere emissie-reductie bij de andere functionaliteiten nodig is. De reducties uit de berekeningen zijn wel denkbaar bij (gedeeltelijke) vervanging van vleesproductie in Nederland door productie van npf's, dus in afwijking van de gehanteerde uitgangspunten.

LULUCF

De berekeningen met OPERA en E-Design omvatten niet de LULUCF: de emissies en vastlegging van CO₂ door bodem en bossen. Daarvoor zijn aparte analyses uitgevoerd. Als die emissies worden meegenomen in de totale emissiebeschouwing kan dit betekenen dat er een kleine afwijking optreedt van de 80 dan wel 95 procent reducties in de eindbeelden. Met de potentieel beschikbare maatregelen is het mogelijk tot zeer kleine netto LULUCF-emissies, mogelijk zelfs negatieve te komen, maar deze maatregelen zijn zeker niet vanzelfsprekend. Tabel 2.11 laat diverse opties zien om die ontwikkeling naar meer LULUCF-emissies te keren.

Belangrijke opties zijn productiever bosbeheer, geen ontbossing ten behoeve van bijvoorbeeld andere natuurdoelen of landbouw en de omzetting van landbouwgrond en natuurterreinen (anders dan bos) in bosareaal (verondersteld is 100.000 ha). Houtwallen, laanbeplanting of schaduwbomen in permanente graslanden maken daar deel vanuit. Van de laatstgenoemde optie is de vermeden emissie van de landbouw niet meegeteld. Hier is alleen ter illustratie aangegeven wat het effect zou zijn als 100.000 ha land (waarvan 75.000 ha agrarische grasland) omgezet zou worden in bos. Het is tevens belangrijk in ogenschouw te nemen wat de consequentie is als landbouwgrond met bomen wordt beplant en de land-

bouwproductie verschuift naar minder efficiënte landbouwproductie buiten Nederland. Het totaal effect omvat de CO₂-sink in die nieuwe bossen, maar ook de vermeden landbouwemissies. Beheersmaatregelen van bodems omvatten onder meer waterbeheer in veenweidegebieden gericht op vermindering van de bodemdaling en het beheer van landbouwgrond, met name in de akkerbouw gericht op vasthouden en vastleggen van organisch materiaal.

Tabel 2.11. Overzicht van LULUCF-emissies en opties voor de vermindering in 2050.

Autonome ontwikkeling	Emissie in 2050 Mton CO ₂
Referentie: bruto emissie	8,9
Ontwikkelingen in de sink (bestaand bos)	-1,7
Totaal netto	7,2
Maatregel	Potentieel emissiereductie-effect in 2050
Bestaand bos: productiever bosbeheer, geen ontbossing, meer reservaten	-2,0
Bosuitbreiding (excl. vermeden emissie landbouw*)	-1,2**
Beheersmaatregelen minerale landbouwbodems	-1,0
Beheersmaatregelen organische bodems (veenweide)	-2,0
Beheersmaatregelen moerige gronden	-0,9
Beheersmaatregelen overige natuur	-0,3
Beheersmaatregelen groenvoorzieningen	-0,2
Totaal	-7,6

* de berekening vermeden emissie is gebaseerd op het uitgangspunt dat het areaal van de grondgebonden melkveehouderij door deze maatregel daalt met ongeveer 75.000 ha. De overige 25.000 ha wordt gevonden in bestaande natuurgebieden. De vermeden emissie van methaan en lachgas komt overeen met 1 Mton CO₂.

** de vastlegging in 2050 is sterk afhankelijk van de snelheid van implementatie en de uitgangspunten: type bomen, grondsoort, wijze van bosbeheer (productie versus natuur).

Onzekerheden

Emissiecijfers van landgebruik en landbouw zijn onzeker. In de rapportage door Olivier et al. (2009) wordt aangegeven dat de onzekerheden zowel betrekking hebben op de activiteiten data als de emissiefactoren. Voor de activiteiten data is de onzekerheid circa 25 procent. De koolstof in bossen op 30 procent en de koolstof in bodems boven de 50 procent. Door projecties nemen de onzekerheden verder toe.

Biomassa

Land- en bosbouw zijn de bronnen voor biomassa, ook voor het energiesysteem. Specifieke teelt van energiegewassen voor Nederland gebeurt vooral in het buitenland. Binnenlandse biomassa anders dan reststromen en mest speelt slechts een beperkte rol in het energiesysteem. Daarnaast geldt wel dat duurzaam gebruik van inlands hout een bijdrage kan leveren aan de vorming van een koolstofvoorraad in het maatschappelijk systeem. Dat geldt in zekere zin ook voor het gebruik reststromen uit de natuur (zoals zomermaaisel) als organische bodemverbeteraar in de akker- en tuinbouw.

3 De ontwikkelingen tot 2030

3.1 Inleiding

Dit hoofdstuk brengt in kaart welke acties tot 2030 nodig om de in het vorige hoofdstuk geschetste beelden tot stand te brengen. De analyse in dit hoofdstuk is daarmee niet in de eerste plaats kwantitatief, maar vooral kwalitatief, en brengt in kaart wat er allemaal nodig om de diverse elementen uit de 2050 beelden te realiseren. Het gaat daarbij niet alleen om maatregelen die direct emissiereductie opleveren maar ook en vooral om acties die de verdere transitie na 2030 mogelijk maken. Daarnaast geeft dit hoofdstuk een eerste indicatie voor emissies per functionaliteit in 2030 die passen in een geleidelijke transitie.

3.2 Snelle emissiereductie is belangrijk voor het klimaat

Het gaat bij de realisatie van de klimaatdoelen in het akkoord van Parijs niet zozeer om een laag emissieniveau in 2050, maar ook en vooral om lage cumulatieve emissies. Emissiereductie op de korte termijn is daarom eveneens van groot belang: Elke extra Mton CO₂ die op de korte termijn in de atmosfeer wordt gebracht draagt bij aan de temperatuurstijging (zie tekstbox 1.1 in de inleiding). Daarbij maakt het voor een beleidsdoel voor de CO₂-emissie in 2030 uiteraard verschil of voor het klimaat maximaal 1,5°C dan wel 2°C temperatuurstijging wordt nagestreefd met – in het licht van de onzekerheden daarbij – de kans waarop dat wordt bereikt alsmede van het vertrouwen dat er in de tweede helft van de eeuw netto negatieve emissies op aarde kunnen worden gerealiseerd. Er is immers ook nog een verdelingsvraagstuk van de emissies in de tijd.

Het klimaatprobleem is een mondiaal probleem, waarbij het gaat om de mondiale broeikasgasemissies. Om tot een vergaande emissiereductie te komen moeten alle landen bijdragen leveren en daarbij is weer van belang welke verdeelsleutel daarbij wordt gehanteerd. Hoewel de afleiding van een emissiedoel voor Nederland op basis van het klimaatakkoord van Parijs met wetenschappelijke kennis kan worden ondersteund, zijn voor alle genoemde factoren (politieke) keuzen daarbij onvermijdelijk.

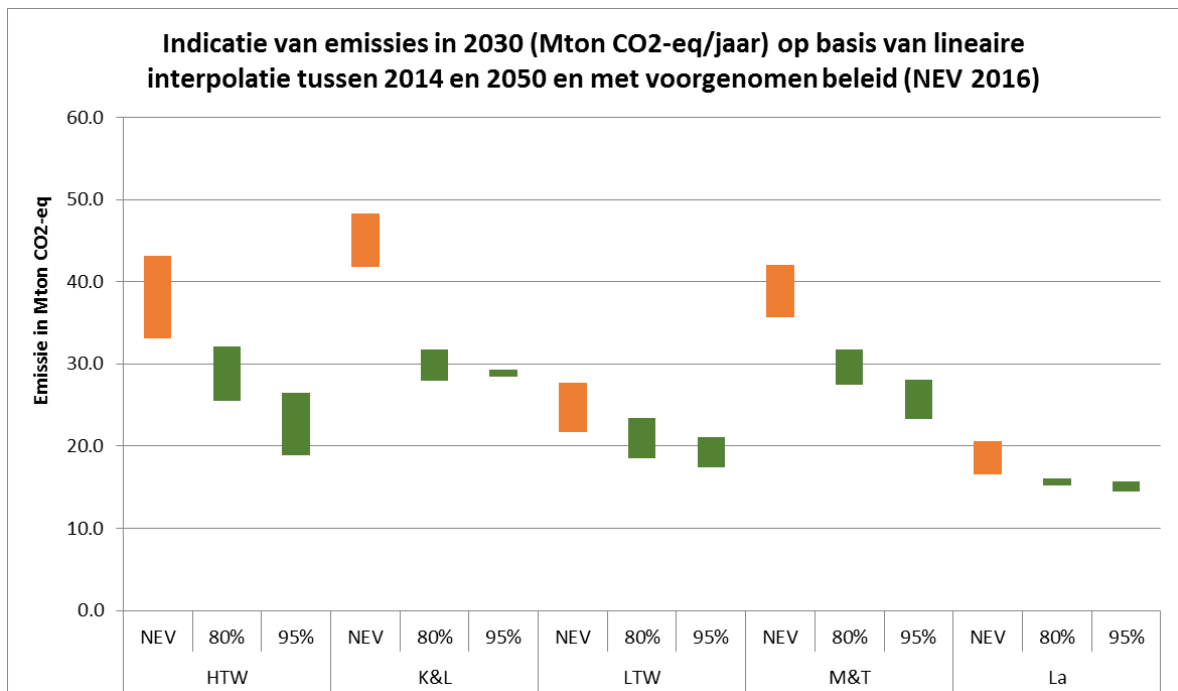
Andere overwegingen daarbij zijn de kosten, de mogelijke voortrekkersrol bij het oplossen van het probleem, minder grote afhankelijkheid van import van fossiele grondstoffen en van aardgaswinning en het voorop lopen met innovatie om daarmee ook economische kansen te kunnen benutten. Op deze aspecten wordt in deze studie niet ingegaan.

3.3 Voorbeeld van een emissiereductiepad

Zoals aangegeven in 3.2 is een emissiedoel voor 2030 een politieke keuze. Daarbij kunnen indicatieve berekeningsresultaten behulpzaam zijn. Al eerder (PBL en ECN 2017) is aangegeven dat een lineair reductiepad vanaf 2014 naar de einddoelen in 2050 van 80 of 95 procent

in Nederland een emissie in 2030 van 43 respectievelijk 49 procent (ten opzichte van 1990) zou betekenen. Een lineair pad zou kunnen worden gekozen als beleidsvertaling van wat wel als geleidelijke transitie wordt aangeduid, waarvoor bijvoorbeeld ook de Nederlandsche Bank (2016) pleit, en wat het uitgangspunt vormt van het Nederlandse beleid zoals geformuleerd in de Energieagenda. Overigens zou voor het streven naar maximaal 1,5 graad temperatuurstijging een sterkere afname van de emissies op de korte termijn als bijdrage van Nederland te overwegen zijn.

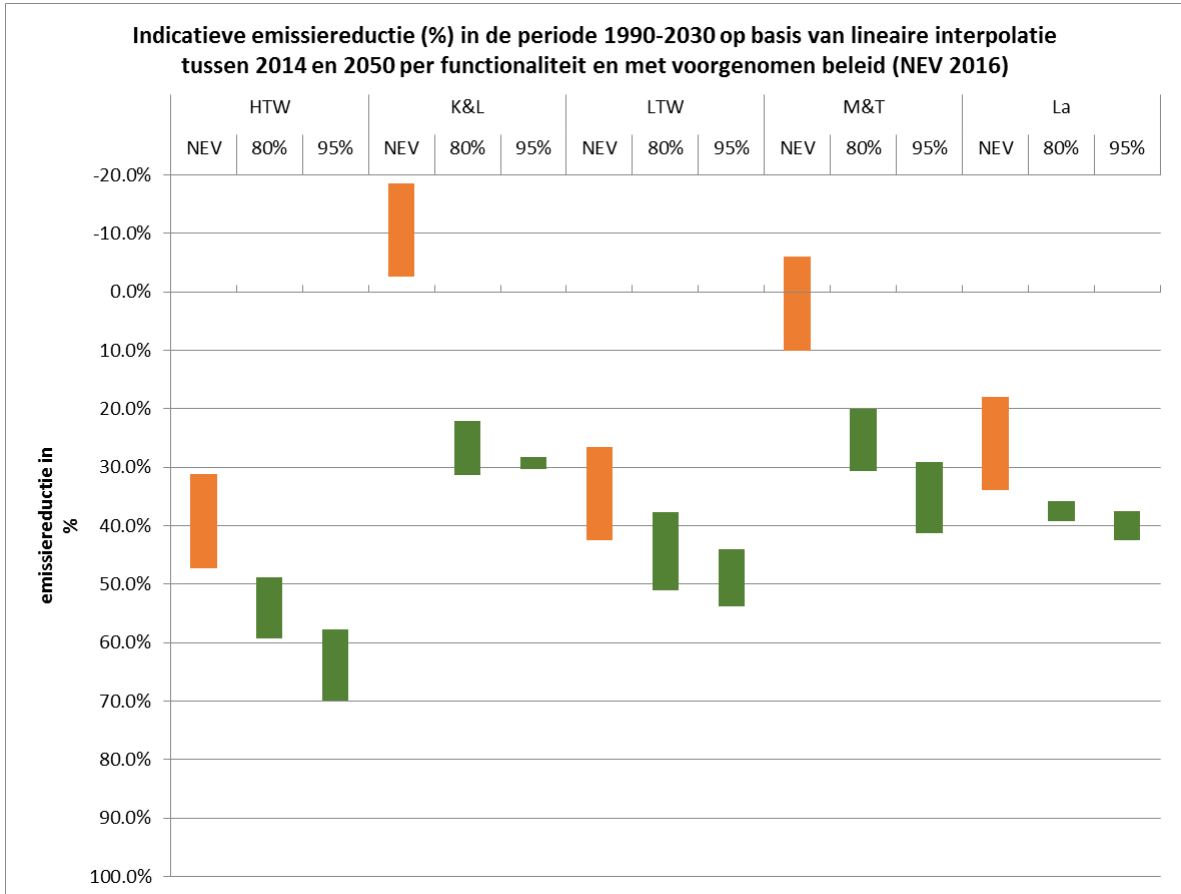
De bandbreedtes van de emissies per functionaliteit van de beelden voor 2050 uit hoofdstuk 2, afgeleid uit de analyses met OPERA en E-Design, zijn gebruikt om vanaf 2014 een lineaire ontwikkeling tot 2050 te schetsen. Via interpolatie leidt dat tot indicatieve emissieniveaus, eveneens in bandbreedtes, voor de functionaliteiten in 2030. De resultaten zijn weergegeven in figuur 3.1 met daarbij een indicatie van de in 2030 verwachte emissies met momenteel al voorgenomen beleid (NEV 2016). Bij zo'n lineaire interpolatie zijn andere overwegingen met betrekking tot de verdeling van de emissies over de functionaliteiten op de korte termijn, zoals de vereiste voorbereidingstijden voor diverse innovaties, de kosten van de maatregelen en economische kansen en risico's, niet meegenomen. In de paragrafen 3.6 en 3.7 wordt wel een zo goed mogelijk inzicht gegeven in de benodigde voorbereidende maatregelen en de beschikbare emissiereductieopties en hun betekenis voor de transitie. Gezien de termijn van ruim 30 jaar die nog resteert voor de transitie – die qua daadwerkelijke realisatie immers nog in de beginfase verkeert – is overigens voor elke functionaliteit al op de korte termijn een voortvarende aanpak vereist.



Figuur 3.1. Broeikasgasemissies per functionaliteit afgeleid uit lineaire interpolatie tussen waarden voor 2014 en de resultaten (bandbreedtes) voor 2050, vergeleken met de verwachte emissies met voorgenomen beleid (NEV 2016).

De resultaten laten zien dat er voor zo'n lineair reductiepad nog een aanzienlijke opgave ligt in het komende decennium. De NEV 2016 geeft aan dat met voorgenomen beleid de verwachte emissiereductie in 2030 voor Nederland totaal ten opzichte van 1990 16-32 procent bedraagt. Figuur 3.1 geeft de met het gekozen uitgangspunt afgeleide emissies per functionaliteit en laat zien dat er ook voor elk van de functionaliteiten nog een extra opgave wacht. Figuur 3.2 geeft dezelfde resultaten weer als reductiepercentages van de emissies in

2030 ten opzichte van 1990. Die percentages verschillen onderling aanzienlijk, maar ook de verschillen tussen de functionaliteiten volgens voorgenomen beleid zijn al groot. Bij K&L en bij Mob liggen de nu voorziene reductiepercentages volgens de NEV zelfs onder of rond nul: ten opzichte van 1990 wordt er in 2030 nog geen emissiereductie verwacht, vooral als gevolg van een toename tussen 1990 en heden.



Figuur 3.2. Reductie van broeikasgasemissie in de periode 1990-2030 per functionaliteit afgeleid uit lineaire interpolatie tussen emissiewaarden voor 2014 en de resultaten (bandbreedtes) voor 2050, vergeleken met de verwachte emissiereducties met voorgenomen beleid (NEV 2016)

3.4 Van 2050-beelden naar korte termijn acties

3.4.1 CO₂-emissie als enige transitie-indicator is onvoldoende

De eindbeelden voor 2050 zijn ingrijpend anders dan de huidige situatie. Niet voor niets wordt er voor de realisatie van 80 of 95 procent emissiereductie over een transitie gesproken en die vraagt tijd. De resterende periode van ruim 30 jaar tot aan 2050 is krap. Des te belangrijker is het voortvarend voort te gaan met het transitieproces. Daarvoor is ook op de korte termijn realisatie van diverse mijlpalen van groot belang.

De opgave om in 2050 tot een emissiereductie van 80 of 95 procent te kunnen komen, betekent meer dan het nemen van emissiereducerende maatregelen op de korte termijn. Het vraagt op de korte termijn ook vele acties die zich moeten richten op RD&D, infrastructurele aanpassingen, institutionele vernieuwing en vergroten van het maatschappelijk draagvlak;

allemaal acties en maatregelen die nog niet of nauwelijks bijdragen aan emissiereductie in die fase. En in die gevallen waar de eerste fase van implementatie moet worden opgepakt, zijn nieuwe technieken dikwijls relatief duur. Juist ervaring ermee opdoen in de praktijk is belangrijk, niet alleen voor verdere prijsverlaging maar ook voor het verkrijgen van bekendheid en daarmee maatschappelijk draagvlak. Al die acties en maatregelen zijn cruciaal om invulling te geven aan de randvoorwaarden voor en eerste stappen naar grootschalige implementatie van nieuwe technieken en systemen in een latere fase. Het zijn daarom ook de resultaten van die acties en maatregelen waaraan de voortgang van de transitie in de komende jaren kan worden afgemeten. Die bepalen daarom de tussenstand in 2030. Alleen de CO₂-emissie in 2030 geeft daarin onvoldoende inzicht.

Wat voor de CO₂-emissie op nationaal niveau geldt – het is niet voldoende als graadmeter voor de voortgang van de transitie – geldt ook voor emissies per functionaliteit in 2030. Wat er voor een voortvarend verloop van het transitieproces in 2030 of zelfs al eerder bereikt zou moeten zijn, dient daarom specifiek te worden aangegeven. Daarbij geven de in hoofdstuk 2 geschetste eindbeelden richting en bepaalt de huidige stand van zaken in het transitieproces welke volgende stappen zinvol en belangrijk zijn (zie hiervoor ook PBL 2016). In 3.5 wordt dit voor de verschillende functionaliteiten verder ingevuld.

3.4.2 Technologiekeuzen

Uit hoofdstuk 2 blijkt dat vele van de technologische opties nodig zijn voor 80 procent reductie; voor een reductie met 95 procent zijn zelfs bijna alle opties in 2050 nodig. Daarbij is de combinatie van bio-energie met CCS (BECCS met negatieve emissies) van groot belang, beide zijn echter nog onzeker wat betreft toekomstig potentieel en maatschappelijke acceptatie. Ook voor andere opties is de potentiële bijdrage op de lange termijn nog onzeker. Er kunnen tegenvallers komen. Des te belangrijker is het om voldoende opties beschikbaar te houden om eventuele tegenvallers te kunnen opvangen. Om ze beschikbaar te houden is het nodig om op tijd, dus op de korte termijn, voorbereidende actie te ondernemen. Dat betekent dat in het transitieproces tot 2030 een breed palet aan technologische opties aandacht moet krijgen in de verdere ontwikkeling en de invulling van randvoorwaarden voor eventuele latere grootschalige toepassing.

Het transitieproces tot 2030 zal daarom voor robuuste elementen van de beelden voor 2050 al het karakter van een implementatieproces krijgen. Voor minder robuuste onderdelen zal het ook het karakter van een zoektocht krijgen. Voor zover er nu nog onzekerheden en vragen leven, zal de komende periode er ook op gericht moeten zijn antwoorden op die vragen te krijgen. Acties moeten ook daarop worden gericht. Zaken als proefprojecten, demonstratiefabrieken, verkennende institutionele studies en vergroten van betrokkenheid van en samenwerking tussen maatschappelijke partijen horen daarbij.

3.5 Opzet van de analyse per functionaliteit

In 3.3.1 is aangegeven dat grootschalige technologische vernieuwing in vele gevallen ook infrastructuurle en institutionele aanpassingen vraagt met aandacht voor voldoende maatschappelijke draagvlak. Ook specifieke ondersteuning in de eerste fase van de implementatie is voor vele innovaties cruciaal. Een routekaart voor de eerstkomende periode in het transitieproces is afhankelijk van de kennis over de mogelijke beelden in 2050 waarmee de emissiedoelen op de lange termijn kunnen worden gerealiseerd en van de huidige situatie. Het transitieproces in de afzonderlijke functionaliteiten en zelfs in diverse onderdelen daarbinnen kan zich immers in verschillende fasen bevinden (zie ook PBL 2016). Daarom wordt in 3.5

per functionaliteit de huidige stand van zaken kort weergegeven. Inleidend wordt de afbakening van elke functionaliteit nog eens kort herhaald en worden belangrijke elementen van de eindbeelden uit hoofdstuk 2 samengevat.

Op basis van inzichten op de huidige stand van zaken en de beelden voor 2050 worden per functionaliteit acties en maatregelen gegeven die in de komende periode van belang kunnen zijn voor het transitieproces. Daarbij wordt onderscheid gemaakt tussen drie categorieën en van acties en maatregelen:

- 1) maatregelen gericht op invulling van de randvoorwaarden voor grootschalige implementatie van CO₂-arme opties in een latere fase (geen emissiereductie tot 2030)
- 2) de eerste fase van implementatie van vaak nog relatief dure maatregelen die van groot belang zijn voor het halen van de emissiedoelen in 2050 en waarmee al enige emissiereductie tot 2030 kan worden bereikt
- 3) maatregelen die op de korte termijn wel aan emissiereductie kunnen bijdragen, maar niet essentieel zijn voor de transitie; aandachtspunt hierbij is of ze belemmerend kunnen werken voor de gewenste transitie.

Deze rapportage geeft inzicht in potentieel belangrijke, zo niet cruciale acties op de korte termijn. Voor de gewenste transitie is de resterende periode van ruim 30 jaar kort en daarom zijn met name de acties in de categorieën 1) en 2) urgent. Dit rapport heeft niet de pretentie een compleet overzicht van alle zinvolle acties en maatregelen op details te geven. Bovendien zijn er met betrekking tot de onder 1) en 2) bedoelde maatregelen te veel onzekere factoren, die het lastig maken om kwantitatief aan te geven waar de transitie in 2030 precies zou moeten staan of wat het exacte pakket van maatregelen voor 2030 zou moeten zijn. In het kader van deze studie wordt daartoe dan ook geen poging gedaan. In de praktijk van een zo ingrijpend maatschappelijk veranderingsproces is het ook aan betrokkenen, specifieke deskundigen en vooral aan beleidsmakers en potentiële uitvoerders om nadere invulling te geven aan een actieplan voor de korte termijn, de komende fase van het transitiepad. De in 3.6 en 3.7 gegeven acties beogen wel een zodanige concreetheid te bieden, dat zij een impuls geven aan een gericht plan voor de invulling van transitiepaden.

Elke paragraaf bevat ook een tabel waarin zo mogelijk emissie-effecten van de onder 2) en 3) bedoelde maatregelen zijn opgenomen.

3.6 Uitwerking van korte termijn acties in aanbodsectoren

De ministeries hebben een indeling in vijf functionaliteiten gevraagd. Die indeling houdt in dat aanbodprocessen zoals de elektriciteitsvoorziening en de productie en levering van brandstoffen relevant zijn voor meerdere functionaliteiten. Om in de beschrijving van de acties en maatregelen versnippering en herhaling van informatie zo veel mogelijk te vermijden worden deze aanbodsectoren in het energiesysteem in het vervolg van dit hoofdstuk apart en als eerste beschreven.

3.6.1 Elektriciteitsvoorziening

Deze paragraaf beschrijft de acties voor de elektriciteitsvoorziening, waaronder opwekking, transport en distributie.

Belangrijke elementen uit de beelden voor 2050

Windenergie en dan met name wind op zee zal in Nederland de belangrijkste aanbodtechnologie worden als we de klimaatdoelen willen halen. De beelden voor 2050 laten bijdragen van windenergie van 50 tot 90 procent zien. Wind op land kan daarbij een nuttige bijdrage leveren en draagt bij aan een kostenoptimale oplossing, waar de ruimtelijke inpasbaarheid geen probleem vormt, maar een sterke uitbreiding ten opzichte van de huidige situatie is niet cruciaal. Omdat wind en zon verschillende aanbodprofielen kennen, verbetert de balans tussen aanbod en vraag enigermate door een (beperkt) aandeel zonnestroom (verhouding wind:zon is 3:1 of meer).

In tegenstelling tot kolen en biomassa is flexibele inzet van (methaan-)gas een robuust - zij het in omvang beperkt - onderdeel van het systeem. De combinatie met CCS is echter bij een klein aantal draaiuren relatief duur en minder voor de hand liggend en speelt in de meeste toekomstbeelden geen of een beperkte rol. Elektriciteit uit geothermie komt als optie alleen in een enkel 95 procent beeld naar voren als er relatief weinig windcapaciteit en geen kernenergie beschikbaar zouden zijn.

Een sterke mate van elektrificatie in de verschillende functionaliteiten vraagt aanpassingen in de distributie en het netwerk op verschillende schaalniveaus, zoals verzwaring van lokale netwerken bij veel elektrische verwarming en elektrische voertuigen. Er is duidelijk sprake van een schaalvergroting naar Europese schaal als het gaat om het inrichten van het elektriciteitssysteem van de toekomst. Mogelijke grote verschuivingen in import en export zijn in deze studie niet verkend.

Een toegevoegd element dat van invloed is op het totale systeem is vraagsturing. Meer flexibiliteit in het elektriciteitsgebruik in de tijd kan tot een betere balans van vraag en aanbod leiden en daarmee de efficiency van het gehele systeem vergroten. Deze studie heeft dit aspect in beperkte mate bekeken, vooral bij de nieuwe elektriciteitsvraag (elektrificatie). Het betreft daarbij vooral flexibiliteit over uren en soms dagen, en levert een beperkte bijdrage aan het oplossen van een eventuele onbalans over langere perioden zoals de seizoenen.

Kenmerken van de huidige situatie

In de elektriciteitsvoorziening is de transitie al het meest zichtbaar, met een aandeel hernieuwbare elektriciteit in 2016 van 13 procent (energie totaal circa 6 procent). De bijdragen van wind en zon nemen de laatste jaren toe en in het voorgenomen beleid zet deze toename nog door (NEV 2016). Daarnaast wordt gewerkt aan het elektriciteitsnetwerk voor het transport en de inpassing van windenergie op de Noordzee, onder meer ook met afwegingen of, waar en in welke vorm (mogelijk power-to-gas; zie 3.5.2) opslag noodzakelijk wordt. Een andere belangrijke ontwikkeling is de vergroting van de interconnectiecapaciteit met landen om Nederland heen. Het elektriciteitssysteem in Nederland moet steeds meer worden gezien als onderdeel van een Europees systeem. Daarbinnen loopt al enige tijd de discussie over de inrichting van de elektriciteitsmarkt ter ondersteuning van de transitie en zijn ook al stappen gezet. De Europese Commissie heeft onlangs voorstellen gedaan. Het is ook onderwerp van de samenwerking in het pentalateraal energieforum van Benelux, Duitsland, Frankrijk en Oostenrijk. Diverse partijen zijn hierin al actief.

Acties en maatregelen voor de komende jaren in het transitieproces

Ondersteunende acties en maatregelen in het transitieproces

- De kosten van elektriciteit uit wind en zon zullen voor een deel bestaan uit kosten voor integratie ervan in het systeem. Dat betekent dat het voor de overheid steeds lastiger zal worden om middels financiële regelingen (zoals bijvoorbeeld een salderingsregeling voor zonnepanelen) tot een kostenoptimale ondersteuning te komen. Dat betekent dat marktpartijen die een beter inzicht hebben in de kosten van bepaalde maatregelen de ruimte zouden moeten krijgen hierin keuzen te maken, maar ook dat zij dan voldoende beleidsprikkelels moeten krijgen, niet alleen om de emissie van de elektriciteitsproductie

te verlagen en/of het aandeel hernieuwbare elektriciteit te verhogen, maar ook om flexibiliteit te bieden waar ze over mogelijkheden daartoe beschikken. Vermeden moet ook worden dat ontwikkelingen worden afgeremd door onzekerheid over het beleid.

- De inzet van elektriciteit op basis van diepe geothermie zou onderwerp van nader onderzoek kunnen zijn voor een beoordeling van de kosten en de inpassing van deze continue bron.
- Eventuele toekomstige inzet van thoriumcentrales vraagt nog de nodige RD&D ter voorbereiding van een eventuele pilot in een latere fase en voor nadere bepaling van risico's. Voor kernenergie is maatschappelijk draagvlak echter nog crucialer en zijn een haalbaarheidsverkenning en/of het opstarten van een maatschappelijk debat te overwegen acties, zolang deze optie een rol in de overwegingen speelt.
- Een verdere benutting van wind op land als relatief goedkope optie vraagt zorgvuldige lokale processen, ook al om te voorkomen dat maatschappelijke weerstand tegen wind op land een voedingsbodemp vormt voor weerstand tegen het transitieproces als geheel. Dit is des te belangrijker omdat (uitbreiding van) wind op land niet onmisbaar lijkt voor de emissiereductie.
- Een sterke elektrificatie in de verschillende functionaliteiten die ook gepaard kan gaan met flexibilisering van de elektriciteitsvraag, vraagt aanpassingen in de distributie en het netwerk op verschillende schaalniveaus. Dit vraagt om snelle afstemming met de ontwikkelingen in die functionaliteiten en het doorvoeren van verzwaren waar nodig, opdat de infrastructuur geen vertragende factor behoeft te zijn voor elektrificatie.
- De daadwerkelijke bijdrage van een Europees interconnectiesysteem op de lange termijn aan de Nederlandse elektriciteitsvoorziening is nog een onzekere factor, ook voor de balans tussen vraag en aanbod van elektriciteit in Nederland. Die optie kan onderwerp zijn van nadere verkenning, inclusief regionale decarbonisatiestrategieën en leveringszekerheidsanalyses.
- De productie van elektriciteit met windmolens en zonnepanelen alsmede de meer flexibele inzet (met minder draaiuren) van aanvullende capaciteit, waaronder niet alleen gascentrales maar ook energieopslag, leidt tot een veel groter aandeel van kapitaalslasten in de elektriciteitskosten dan nu het geval is. Wat dit betekent voor de inrichting van de elektriciteitsmarkt (zowel de groothandelsmarkt als de markt voor particulieren) is een vraagstuk dat vraagt om versterking en/of continuering van samenwerkingsverbanden.

Implementatiepaden van emissiereducerende opties met groot potentieel voor de toekomst

- Wind op zee heeft met een gerichte beleidsaanpak in relatief korte tijd een ontwikkeling doorgemaakt naar marktrijpe technologie. In Nederland wordt het in de 2050-beelden verreweg de belangrijkste technologie voor elektriciteitsopwekking, zeker als niet op kerncentrales wordt ingezet. Verdere uitbreiding van de capaciteit is dan ook een voor de hand liggende aanpak. Daarbij is het zaak het tempo van uitbreiding af te stemmen op de daarvoor benodigde ondersteunende middelen, zodat de ingerichte capaciteit op termijn blijvend kan worden aangewend als onderhoudswerkzaamheden een grotere rol gaan spelen en vervangingsinvesteringen aan de orde komen. Indicatief: bij een eindbeeld met 50-60 GW wind op zee en een technische afschrijvingstermijn van 25-30 jaar zou een toename van 2 GW per jaar voor een stabiele markt kunnen zorgen.
- Verdere groei van het aandeel zonnestroom kan ook bijdragen aan de emissiereductie. Voor de daadwerkelijke toename is het van belang van integratie in het systeem groot. In de 2050-beelden is het aandeel van elektriciteit uit wind meestal 3 keer zo hoog - of hoger - als van elektriciteit uit zon. Dit beperkt de verliezen uit de vraag-aanbod onbalans van deze bronnen, die zich voor zonnestroom vooral manifesteert over de seizoenen (opslag in batterijen kan dit maar zeer beperkt oplossen). Voor een tussentijds beeld in 2030 lijkt het te verkiezen om deze verhouding bij benadering aan te houden. Ook hierbij geldt dat een geleidelijke toename ook voor een stabiele marktsituatie van belang is.
- Een eerste demonstratieproject met diepe geothermie voor elektriciteitsproductie kan meer duidelijkheid geven over de daadwerkelijke mogelijkheden van deze optie.

Overige maatregelen gericht op emissiereductie op de korte termijn

- Een veel besproken optie voor de elektriciteitsproductie is de versnelde sluiting van kolencentrales, deels te vervangen door beschikbare capaciteit van gascentrales. In dit rapport wordt niet verder op deze optie ingegaan. Daarbij wel de aanvulling dat kolencentrales in 2050 – zeker bij 95 procent emissiereductie zelden onderdeel vormen van de verschillende eindbeelden en dat daarom uitfasering prima past in het transitieproces. Een aandachtspunt is wel dat gascentrales in de eindbeelden ook maar een beperkte rol spelen. Er moet daarom worden gewaakt voor lock-in situaties. Als op korte termijn grote investeringen worden gedaan in gascentrales, kan dat investeringen in hernieuwbare technieken in de weg staan. Waarschijnlijk kan dat worden voorkomen door bestaande Nederlandse capaciteit (er is niet benutte capaciteit van gascentrales) in te zetten die geen al te grote investeringen vraagt.

Tabel 3.1. Overzicht van emissiereducerende maatregelen die mogelijk kunnen worden ingezet in de periode tot 2030 voor de elektriciteitsvoorziening.

Maatregelen belangrijk voor het transitieproces (extra ten opzichte van voorgenomen beleid)	Indicatie van de potentiële emissiereductie (Mton CO ₂ -eq)	Indicatie van de kosten (euro/ton CO ₂)	Overwegingen
Extra kernenergie 1,6 GW	4,9	~100	Kosten zijn tamelijk onzeker
Extra wind op zee a. 2.1 GW b. 1,4 GW c. 11,5 GW	a. 4 b. 2 c. 10	a. ~100 b. ~130 c. ~180	Kosten en opbrengsten verschillen per locatie (op basis van NEV 2016; de meest recente inzichten over kosten zijn nog niet verwerkt. De oplopende kosten weerspiegelen naast de verschillen per locatie ook de toenemende inpassingskosten. Ook curtailment leidt tot hogere kosten.
Extra zon-PV a. Grootschalig 5-6 GW b. U-bouw 4-6 GW c. Woningen 5-10 GW	a. 2-2,5 b. 1,7-2,5 c. 2-4	a. 100-150 b. 200-250 c. 250-300	Afstemmen op integratie? Is max de helft van wind en daarmee afgestemd op 2050-beelden dan niet beter?
Proef diepe geothermie			Vooraf demonstratie
Aanvullende maatregelen			
Vervanging kolen (inclusief meegestookte biomassa) door aardgas	12,7	50-100	De rol van aardgas in de eindbeelden is beperkt; oppassen voor lock-in
CCS bij kolencentrales	16-22	25	Heeft alleen zin als kolencentrales niet op korte termijn worden gesloten
CCS bij gascentrales	6-8	75	In 2050-beelden speelt deze optie ten hoogste een kleine rol, maar in de periode tot 2050 kunnen gascentrales nog een relevante bijdrage leveren en kan de maatregel effectief zijn

3.6.2 Productie van biogene brandstoffen

Deze paragraaf beschrijft de acties voor de productie van biogene brandstoffen, waaronder zowel vloeibare brandstoffen als gas.

Belangrijke elementen uit de beelden voor 2050

De toekomstige vraag naar groene brandstoffen hangt mede af van het succes van elektrificatie bij de verschillende functionaliteiten. De inzet van groene brandstoffen, geproduceerd uit biomassa met CCS, levert negatieve emissies op en is daarom aantrekkelijk voor alle functionaliteiten om tot flinke emissiereductie te komen. Toch moet deze optie voor de functionaliteiten voornamelijk vooral als een 'reserve-optie' worden gezien, omdat het aanbod van duurzaam geproduceerde biomassa een belangrijke beperkende factor kan worden. Toepassing verdient vooral daar aanbeveling waar geen CO₂-arm alternatief op tijd beschikbaar komt, zoals in lucht- en scheepvaart, mogelijk goederentransport over de weg en een deel van de gebouwde omgeving en de industrie.

In de met OPERA doorgerekende varianten komen in alle gevallen groene transportbrandstoffen voor. De inzet van groen gas komt vooral voor in de varianten voor 95 procent emissiereductie met minder beschikbaarheid van biomassa. Uit de analyses met E-Design is gebleken dat het niet beschikbaar komen van deze optie met daarbij negatieve emissies ook realisatie van een emissiereductie van 80 procent een stuk lastiger maakt, omdat vrijwel alle andere opties dan noodzakelijk zijn en tegenvallers daarbij niet meer kunnen worden opgevangen.

De inzet van groene grondstoffen in de chemie in Nederland draagt maar beperkt bij aan emissiereductie binnen Nederland, omdat de meeste koolstof uit de biomassa in het product kunststof terecht komt. Die wordt voor een groot deel geëxporteerd en dat betekent dat de emissiereductie vooral in het buitenland optreedt en pas dan als de producten worden afgedankt en verbrand of afgebroken. Voor de mondiale emissiereductie en de transitie is dit dus wel belangrijk.

Kenmerken van de huidige situatie

De duurzaamheid van de biomassa heeft de afgelopen jaren veel ter discussie gestaan. Bio-brandstoffen in de EU worden voornamelijk uit agrarische gewassen geproduceerd, waarbij de CO₂-emissies optreden die het gevolg zijn van indirecte landomzetting. Deze kunnen zodanig van omvang kunnen zijn dat het EU-beleid erop is gericht dit type biobrandstoffen terug te dringen. Ook inzet van vaste biomassa voor verbranding (zoals houtpellets voor meestook in kolencentrales) is onderwerp van duurzaamheidsdiscussies. Inmiddels heeft Nederland daarvoor duurzaamheidscriteria opgesteld, maar de handhaving daarop is nog een grote uitdaging. Het is een van de redenen voor investeerders voor terughoudendheid in grootschalige bio-energieprojecten. Ook de onzekerheid over de langjarige beschikbaarheid van biomassa tegen een goede prijs speelt daarbij een rol.

Vormen van bio-energie die minder ter discussie staan zijn de productie van biogas in vergistingsinstallaties voor mest en nat afval alsmede de productie van biodiesel uit afvalolie en -vet. Het toekomstig potentieel van beide is echter beperkt, evenals de mogelijkheden om hiermee negatieve emissies te realiseren. Vaste biomassa (hout, landbouwresiduen, grassen met vooral lignocellulose) heeft op termijn waarschijnlijk meer potentieel. Momenteel wordt daartoe al biomassa geïmporteerd en dat zal bij een grotere rol van bio-energie nog toenemen. Twee belangrijke technische opties voor grootschalige verwerking van lignocellulose biomassa zijn vergassing en (geavanceerde vormen van) fermentatie. Deze technieken hebben al een ontwikkelingstraject in Nederland en het buitenland doorlopen – en verdergaande

RD&D zal bijdragen aan verdere optimalisatie van de processen –, maar de ontwikkelingen zijn in Nederland blijven steken bij plannen voor grootschalige demonstratieprojecten. De discussie om kolencentrales te sluiten is nu actueel en het zou daarom nuttig zijn om te bezien of ook bij sluiting van kolencentrales alle inspanningen rond het regelen van de huidige import van duurzame biomassa kunnen worden benut voor de nieuwe duurzamere toepassingen van de biomassa en die voor te bereiden.

Een belangrijk aandachtspunt in de productie van brandstoffen in Nederland is de aardgaswinning. De winning in Groningen wordt nadrukkelijk teruggebracht. Dat vergroot de aandacht van vermindering van aardgasgebruik, hetgeen kan door energiebesparing en elektrificatie maar ook door grotere inzet van groene brandstoffen.

De genoemde vormen van vergroening vormen een uitdaging voor raffinaderijen die immers met hun fossiele olieproducten een veel minder prominente positie in de meeste toekomstbeelden hebben. Tot nu toe wijst weinig erop dat deze bedrijven sterk inzetten op de genoemde innovatieve routes.

Acties en maatregelen voor de komende jaren in het transitieproces

Ondersteunende acties en maatregelen in het transitieproces

- Het gaat bij de verwerking van biomassa om processen waarvoor demonstratieprojecten op grotere schaal gewenst zijn om het leerproces verder te brengen. Daarnaast zal verdere ondersteuning van dit traject ook leiden tot RD&D voor verdere optimalisatie.
- Als gevolg van het fluctuerende aanbod van elektriciteit in de toekomst zal beperking van de kapitaalslasten bij de kostenoptimalisatie in de keten van power-to-fuel belangrijk kunnen worden en een onderzoeksonderwerp zijn.
- Aangezien het gaat om nieuwe processen is er niet een vanzelfsprekende initiatiefnemer. Bovendien zullen bedrijven die in een bepaalde processtap investeren afhankelijk zijn van anderen. Het kan daarom van belang zijn voor de voortgang dat er regie wordt gevoerd.
- Voor de planning van de benodigde aanpassingen in elektriciteitsnetten, warmtenetten en gasnetten is van belang een realistische schatting te maken van de toekomstige productiecapaciteit voor groen gas. Op dit punt is nader onderzoek nodig. Meer inzicht hierin kan mede worden gebaseerd op inzichten in de mogelijkheden van waterstofbijmenging in het gasnet en power-to-gas productie, maar ook van initiatieven gericht op import van duurzaam geproduceerde biomassa.

Implementatiepaden van emissiereducerende opties met groot potentieel voor de toekomst

- De productie van groene brandstoffen uit biomassa is een potentieel zeer belangrijk onderdeel van het toekomstige systeem. De verdere ontwikkeling kent zowel aspecten van procesoptimalisatie als systeemoptimalisatie. In beide ligt er nog potentieel voor kostenvermindering. Het gaat om processen die tot 2030 naar verwachting qua kosten niet gaan concurreren met de huidige technologie. Het belang ligt op de langere termijn, maar het lijkt verstandig voor de ontwikkeling en implementatie ervan de periode van nu tot 2050 goed te benutten. Dat betekent grootschaliger pilot-projecten en proefabrieken, ontwerpen van meer gedetailleerde integrale systeemopties en verkenningen van de mogelijkheden voor bijmenging van waterstof in het gasnet. Omdat het om nieuwe technologie gaat is het niet vanzelfsprekend welk bedrijf of welke partij daarin initiatieven neemt, zeker niet als business-cases op de korte termijn niet aantrekkelijk worden. Het is een (institutionele) uitdaging initiatiefnemers te vinden en ondersteunen dan wel de probleemhouder(s) te 'creëren'.
- Het aandeel van groene transportbrandstoffen kan worden verhoogd. Dat kunnen ook alternatieve koolstofhoudende brandstoffen zijn als methaan of mierenzuur. Daarbij is het echter van belang dat de vraag naar biomassa niet zodanig toeneemt dat de duurzaamheid daarvan onvoldoende kan worden gegarandeerd, want ook de inrichting van aanvoerstromen van duurzame biomassa alsmede een afdoend controlesysteem daarbij vraagt tijd. Ook power-to-fuel opties kunnen voor 2030 wellicht enige bijdrage leveren.

- Het aandeel groen gas, groene transportbrandstoffen en/of groene grondstoffen voor de chemie kan worden verhoogd, als er een grootschalige 'flagship' in Nederland wordt ingericht. Op basis van de huidige ontwikkelingsfase moet zo'n fabriek voor verwerking van biomassa voor 2030 in productie kunnen zijn, zeker als de biomassastromen die nu worden geïmporteerd voor meestook in kolencentrales tegen die tijd voor deze nieuwe toepassing kunnen worden ingezet.

Tabel 3.2. Overzicht van emissiereducerende maatregelen die mogelijk kunnen worden ingezet in de periode tot 2030 voor de productie van brandstoffen.

Maatregelen belangrijk voor het transitieproces	Indicatie van de potentiële emissiereductie (Mton CO ₂ -eq)	Indicatie van de kosten (euro/ton CO ₂)	Overwegingen
Extra bijmengen bio-brandstoffen verkeer (tot 12% fysiek)	1,4	300-350	Geavanceerde biobrandstoffen
Toepassing CCS bij bio-brandstoffen productie in Nederland			Productie in Nederland biedt de optie van negatieve emissies
Inzet groen gas in het gasnet	1,8	300-350	Productie van methaangas uit biomassa dan wel bijmenging van waterstof geproduceerd met elektriciteit
Toepassing CCS bij groen gasproductie in Nederland			Productie in Nederland biedt de optie van negatieve emissies
Inzet meer biomassa bij de productie van monomeren voor kunststoffen	Beperkt (binnen Nederlandse grenzen, omdat groot deel van het product wordt geëxporteerd)	Hoog, als de emissiereductie in Nederland bepalend is	Kunststofproducent is volgens huidige beleidsregels niet verantwoordelijk voor emissies in de gebruiksketen en krijgt daarom evenmin credits voor emissiereductie in die keten (verandert niet bij huidige functionaliteitsbenadering)
Toepassing CCS bij de productie van monomeren voor kunststoffen			
Aanvullende maatregelen			
CCS raffinaderijen	5-8	50-100	In hoeverre maatregel past bij de transitie hangt af van de rol die de raffinaderijen in Nederland in 2050 nog zullen hebben.

Overige maatregelen gericht op emissiereductie op de korte termijn

- CCS bij raffinaderijen kan bijdragen aan emissiereductie. Gezien de bij de transitie te verwachten veranderingen in de vraag naar olieproducten op basis van fossiele olie is het wel een aandachtspunt daarbij in te spelen op mogelijke vernieuwingen in de productieprocessen.
- Een grotere inzet van bio-energie op basis van geïmporteerde biomassa of biobrandstoffen kan bijdragen aan emissiereductie binnen Nederland, maar het is daarbij zaak om de duurzaamheid van de ingezette biomassa in acht te nemen. Er is daarvoor meer import

van biomassa nodig. Onduurzaamheid daarvan manifesteert zich vooral in emissies buiten Nederland. Het risico op meer onduurzame biomassa wordt groter bij een snel stijgende vraag die geen rekening houdt met de praktische beperkingen aan de toename van het duurzame aanbod op mondiale schaal.

3.6.3 Productie van waterstof

Deze paragraaf beschrijft de acties voor de productie van waterstof, en van power-to-gas (koolwaterstoffen uit elektriciteit met als tussenstap waterstof).

Belangrijke elementen uit de beelden voor 2050

Waterstof komt vooral in de 95 procent beelden naar voren. In de eerste plaats zijn er specifieke toepassingen waar (volledige) elektrificatie of andere opties aan de gebruikskant te veel obstakels kennen en waterstof een CO₂-vrij alternatief biedt. Dit zou bijvoorbeeld kunnen gelden - al is het niet zeker - voor vrachtverkeer over de weg en - bijvoorbeeld als plug-in hybride - bij personenwagens. In de tweede plaats is - beperkte - toevoeging van waterstof aan het gasnet mogelijk, waardoor alle functionaliteiten die gas gebruiken hiervan profiteren. De omzetting van elektriciteit in waterstof kan ook een bijdrage leveren aan een betere balans tussen energievraag en -aanbod, doordat waterstof beter kan worden opgeslagen. Verdere conversie van waterstof naar koolwaterstoffen heeft een beperkt aandeel in een deel van de varianten met vergaande emissiereductie.

Kenmerken van de huidige situatie

De belangrijkste ontwikkelingen - vooral pilots en demo's - rond power-to-hydrogen/gas, onder meer met toevoeging van waterstof aan het gasnet, hebben tot nu toe vooral plaatsgevonden in enkele buurlanden (Duitsland, Verenigd Koninkrijk, Denemarken). Dat heeft te maken met de voorlopersrol van deze landen met hernieuwbare elektriciteit en het fluctuerende aanbod in combinatie met de soms minder goede hoogspanningsverbindingen voor elektriciteit, waardoor het opslagvraagstuk op de agenda van de energiebedrijven kwam. In Nederland zijn er tot nu toe slechts enkele projecten geweest op zeer kleine schaal en een aantal verkennende studies.

Acties en maatregelen voor de komende jaren in het transitieproces

Ondersteunende acties en maatregelen in het transitieproces

- Voor de productie van waterstof op basis van elektrolyse en bij power-to-gas/fuel opties zijn demonstratieprojecten op grotere schaal gewenst om het leerproces verder te brengen. Daarnaast zal verdere ondersteuning van dit traject ook leiden tot RD&D voor verdere optimalisatie.
- Voor bijmenging van waterstof in het gasnet is het van belang een goed beeld te krijgen van de mogelijkheden en beperkingen en de hiervoor vereiste aanpassingen, zowel aan de kant van de infrastructuur als aan de gebruikskant. Daarbij vormen ook de fluctuaties in de gasdebieten in combinatie met mogelijk deels discontinue productie van waterstof een aandachtspunt; dat vereist wellicht de ontwikkeling van bijvoorbeeld nieuwe brandertehnologie. Dit geldt ook en in nog sterkere mate voor gebruik van zuivere waterstof.
- Als gevolg van het fluctuerende aanbod van elektriciteit in de toekomst zal beperking van de kapitaalslasten bij de kostenoptimalisatie in de keten van power-to-H₂ belangrijk kunnen worden en een onderzoeksonderwerp zijn. Lagere kapitaalkosten maken immers een flexibele inzet van de elektrolyse aantrekkelijker.
- Aangezien het gaat om nieuwe processen is er niet een vanzelfsprekende initiatiefnemer. Bovendien zullen bedrijven die in een bepaalde processtap investeren afhankelijk zijn van anderen. Het kan daarom van belang zijn voor de voortgang dat er regie wordt

gevoerd, en er bijvoorbeeld een partij wordt aangewezen die initiatieven moet opstarten.

Implementatiepaden van emissiereducerende opties met groot potentieel voor de toekomst

- Het is denkbaar dat vóór 2030 al op redelijke schaal waterstof uit elektriciteit of uit aardgas met CCS kan worden geproduceerd in een demonstratiefabriek en dat deze waterstof wordt bijgemengd dan wel wordt ingezet in industriële processen.
- De verdere ontwikkeling van waterstofproductie en power-to-gas kent zowel aspecten van procesoptimalisatie als systeemoptimalisatie. In beide ligt er nog potentieel voor kostenvermindering. Het gaat om processen die tot 2030 naar verwachting qua kosten niet gaan concurreren met de huidige technologie. Het belang ligt op de langere termijn, maar het lijkt verstandig voor de ontwikkeling en implementatie de periode van nu tot 2050 goed te benutten. Dit betekent enerzijds grootschaliger pilot-projecten en proeffabrieken, ontwerpen van meer gedetailleerde integrale systeemopties en verkenningen van de mogelijkheden voor bijmenging van waterstof in het gasnet. Omdat het om nieuwe technologie gaat is het niet vanzelfsprekend welk bedrijf of welke partij daarin initiatieven neemt, zeker niet als business-cases op de korte termijn niet aantrekkelijk worden. Het is een (institutionele) uitdaging initiatiefnemers te vinden en ondersteunen dan wel de probleemhouder(s) te 'creëren'.

Overige maatregelen gericht op emissiereductie op de korte termijn

- CCS bij de (huidige) waterstofproductie op basis van aardgas.

3.7 Uitwerking van korte termijn acties in de functionaliteiten

3.7.1 Hoge temperatuur warmte

Belangrijke elementen uit de beelden voor 2050

Elektrificatie is een belangrijke optie, zowel in de warmtevoorziening als in innovatieve productieprocessen, zoals in de staalindustrie of de ammoniakproductie. Deze laatste kunnen een alternatief zijn voor processen waarvoor anders toepassing van CCS nodig (en wellicht soms ook goedkoper) is. De combinatie van de inzet van biomassa met CCS om tot negatieve emissies te komen, komt nadrukkelijk bij deze functionaliteit in beeld. Voldoende schaalgrootte en continuïteit van de processen zijn sterk bepalend hiervoor. Daarnaast is er een breed scala aan technische opties voor energiebesparing, deels in de vorm van nieuwe processen, deels door geleidelijke efficiencyverbetering van vele apparaten en door andere maatregelen ter optimalisatie van bestaande processen.

Kenmerken van de huidige situatie

Grootschalige toepassing van CCS is in Nederland nog niet aan de orde, en na het afblazen van het ROAD-project zijn er evenmin demonstratieprojecten. Er is nog geen duidelijkheid over de infrastructuur, over wanneer welke (lege) gasvelden voor opslag gaan worden benut, of er ook CO₂ zal worden geëxporteerd en wie de verantwoordelijkheid heeft voor transport en opslag.

Elektrificatie in de warmtevoorziening wordt op zeer beperkte schaal zichtbaar, onder meer door toepassing van elektrische warmtepompen. Er is echter nog geen sprake van een versnelling in de introductie, evenmin van hybride systemen.

Innovatie is een cruciaal element voor de continuïteit van de industrie. Er zijn dan ook vele voorbeelden van ontwikkelingen die op termijn ook kunnen leiden tot minder energiegebruik en minder broeikasgasemissies. In het kader van deze studie is niet onderzocht of de ontwikkeling van innovatieve procesconcepten voldoende snel gaat om ze beschikbaar te hebben voor grootschalige toepassing, als de bestaande procesinstallaties aan vervanging toe zijn. Enkele belangrijke processen lichten we eruit. Bij de staalproductie zijn er twee dominante alternatieven: voortzetting van de productie op basis van kolen, maar dan met nieuwe processen (Hisarna) en toepassing van CCS of productie op basis van elektrolyse (ULcolysis/ULcowin), waarbij ijzererts gereduceerd wordt tot metallisch ijzer. Het Hisarna proces wordt al op pilotschaal toegepast. ULCOLYSIS en ULCOWIN verkeren nog in een prillere ontwikkelingsfase. Dat geldt ook voor SSAS (solid state ammonia synthese) in de ammoniakproductie.

Acties en maatregelen voor de komende jaren in het transitieproces

Ondersteunende acties en maatregelen in het transitieproces

- Het transport en de opslag van CO₂ vergen de nodige voorbereiding. Niet alleen moet de infrastructuur voor de in de toekomst te verwachten CO₂-stromen worden ingericht (dit kan verder gaan dan aanbod uit Nederland), maar ook de institutionele aspecten vragen aandacht. Er moet een partij komen (eventueel in publiek-private samenwerking) die verantwoordelijk is voor afvang en opslag. Het kunnen ook meerdere bedrijven zijn. Het belang om dit snel aan te pakken hangt ook samen met de situatie in de praktijk. Als er gasvelden uitgeput raken, kan het kostentechnisch gunstig zijn om snel tot opslag te kunnen overgaan om de beschikbare infrastructuur zoveel mogelijk te benutten. Als deze lange tijd onbenut blijven, gaat beschikbare infrastructuur verloren of moeten extra beheerkosten worden gemaakt.
- De staalindustrie vormt een relatief grote bron van CO₂-emissies in Nederland en zeker ook binnen de industrie. De ontwikkeling van alternatieve processen is gaande en daarbij is het van groot belang de ontwikkeling op tijd zover te hebben gebracht dat introductie vóór 2050 mogelijk wordt. Dit betekent dat de technologie beschikbaar moet zijn, als er grote vervangingsinvesteringen aan de orde komen. Dat kan van invloed zijn op de proceskeuze. Gezien het grote belang is het zetten van mijlpalen op de weg daarnaartoe noodzakelijk. Daarbij geldt ook dat de toepassing van CCS een essentieel onderdeel van de vergaande emissiereductie kan zijn.
- RD&D is voor de industrie van groot belang voor de ontwikkeling van innovatieve CO₂-arme opties; er is vooral aandacht nodig om op tijd de benodigde leerfase met een eerste grootschalige toepassing door te maken, zodat de technologie gereed is als de huidige installatie moet worden vervangen. Dat vergt uiteraard maatwerk. Voorbeelden van procesvernieuwing zijn biobased processen, processen op elektriciteit of waterstof in plaats van op koolstofhoudende brandstoffen en processen waarmee de circulariteit van de ketens kan worden vergroot.

Implementatiepaden van emissiereducerende opties met groot potentieel voor de toekomst

- Eerste fase van elektrificatie, onder meer met de introductie van hybride systemen. De kosten van hybride systemen zijn afhankelijk van de schommelingen in de elektriciteitsprijzen en daarmee van de ontwikkelingen in het aandeel hernieuwbare elektriciteit. Daarnaast zijn ze ook afhankelijk van veranderingen in het vraagpatroon bij alle gebruikers en dus ook weer van de omvang van hybride systemen in de industrie zelf. Op de korte termijn kan er een negatief emissie-effect optreden door toerekening van de emissies van de huidige elektriciteitsproductie. Toch past de ontwikkeling wel in de transitie, zij het dat de ontwikkeling dan beter een geleidelijke kan zijn.
- Hiervoor is al aangegeven dat de afvang van CO₂ bij industriële processen de nodige voorbereiding vergt, maar daadwerkelijke afvang en opslag ruim vóór 2030 is mogelijk. Voor een ambitieuze emissiereductieopgave in 2030 is dat bijna een noodzaak te noemen. Daarbij ligt het voor de hand in de eerste fase te beginnen met redelijk goedkoop af te vangen, geconcentreerde CO₂-stromen. Het kan ook aan de orde zijn voor een eventuele grootschalige proeffabriek voor de omzetting van biomassa in groene brandstof. Als de meestook van biomassa in kolencentrales al ruim voor 2030 is beëindigd,

dan is het denkbaar dat de import van duurzame biomassa zoveel mogelijk wordt gecontinueerd, maar dan met andere biomassa-toepassingen

- Ook bij afvalverbrandingsinstallaties (ook producenten van elektriciteit en warmte) kan CCS worden toegepast.
- De inzet van groen gas draagt bij aan de emissiereductie, zeker als bij de productie van dat groene gas ook CO₂ wordt afgevangen en opgeslagen en in nog grotere mate als bij de verbranding van dat groene gas ook de CO₂ wordt afgevangen. Een alternatief hiervoor is de inzet van beschikbare duurzame biomassa direct in grote industriële biomassaketels (een beschikbare technologie) met toepassing van CCS. Het moet mogelijk worden geacht hiervan al vóór 2030 praktijkvoorbeelden te hebben.
- De technische afschrijvingstermijnen van vele processen variëren ruwweg van 20 tot 50 jaar. Dit betekent dat in een aantal gevallen mogelijk al op korte termijn bij de vervanging van processen keuzen worden gemaakt die bepalen hoe het systeem er in 2050 zal uitzien. Dan is het van groot belang dat dan een keuze kan worden gemaakt voor een CO₂-arme procesvariant.

Overige maatregelen gericht op emissiereductie op de korte termijn

- Implementatie van (meer) energie-efficiëntie maatregelen. Er is potentieel met terugverdientijden van minder dan 5 jaar. Hierbij is wel van belang dat investeringen in de optimalisatie van bestaande processen een eventueel cruciale overstap naar innovatieve processen met veel lagere emissies niet in de weg staan.

Tabel 3.3. Overzicht van emissiereducerende maatregelen die mogelijk kunnen worden ingezet in de periode tot 2030 voor hoge temperatuur warmte.

Maatregelen belangrijk voor het transitieproces	Indicatie van de potentiële emissiereductie (Mton CO ₂ -eq)	Indicatie van de kosten (euro/ton CO ₂)	Overwegingen
CCS industrie	11-21 Afhankelijk van voorbereidende acties. Technisch potentieel is hoger, maar ingroei-tempo is voor 2030 waarschijnlijk beperkend	60-110 In praktijk afhankelijk van bedrijfskenmerken	Processen waarvoor in 2050 geen CO ₂ -vrij alternatief beschikbaar is. Voor staalproductie is dit onzeker en zou het een tussenmaatregel kunnen zijn voor enkele decennia.
CCS bij afvalverbrandingsinstallaties a. CCS bij grote AVI's b. CCS bij overige AVI's	a. 3 b. 3	a. ~60 b. ~80	Emissiereductie en kosteneffectiviteit is inclusief effect van vastlegging biogeen CO ₂ (BECCS bij biogene deel afval)
Verbetering procesefficiency in innovatieve processen	Niet nader onderzocht		Een deel van de maatregelen verbetering procesefficiency kan procesvernieuwing zijn, passend bij de transitie (niet onderzocht is welk deel)
Elektrificatie industrie (inclusief hybride systemen)	-1,2 Mogelijk tijdelijk negatief emissie-effect in enkele situaties door toerekening elektriciteitsvoorziening	Sterk wisselend	Kosten van hybride systemen zijn sterk afhankelijk van ontwikkelingen in elektriciteitsvoorziening (en bij andere bedrijven)
Recycling keteneffecten	2,2	batens	In de praktijk is het erg onzeker in elke mate ketenmaatregelen tot

			emissiereductie binnen Nederland leiden
Biomassaketels industrie	7,4 Exclusief emissie-effect van eventuele combinatie met CCS	120-170	Onzekere factor hierbij is het aanbod van duurzaam geproduceerde biomassa
Overige maatregelen gericht op emissiereductie op de korte termijn			
CCS bij procesemissies in de industrie bij NH ₃ - en H ₂ -productie; relatief geconcentreerde en daarom gemakkelijk af te vangen stromen	1 - 2	20-80	Voor NH ₃ wellicht en voor H ₂ zeer waarschijnlijk een tijdelijke maatregel, omdat in 2050 innovatieve productieprocessen op basis van elektriciteit een beter alternatief vormen; dus goede afspraken daarover zijn belangrijk
Verbetering procesefficiency	4,5 3,4	baten ~50	Aandachtspunt: investering in optimalisatie van bestaande processen mag vervanging door nieuwe processen niet in de weg staan

3.7.2 Kracht en licht

Deze paragraaf beschrijft de acties voor de vraagkant van K&L (zie tabel 3.4). Overigens geldt wel dat elektrificatie in alle andere functionaliteiten kan leiden tot de noodzaak van aanpassingen in het elektriciteitsnetwerk. Regie hierop is noodzakelijk en aspecten betreffende systeemintegratie die over de grenzen van de functionaliteiten gaan spelen hierbij een grote rol. De elektriciteitsproductie en de daarvoor benodigde infrastructuur zijn verder besproken in 3.6.1.

Tabel 3.4. Overzicht van emissiereducerende maatregelen die mogelijk kunnen worden ingezet in de periode tot 2030 voor kracht en licht.

Maatregelen belangrijk voor het transitieproces	Indicatie van de potentiële emissiereductie (Mton CO ₂ -eq)	Indicatie van de kosten (euro/ton CO ₂)	Overwegingen
Benutting flexibiliteit in de elektriciteitsvraag	Niet onderzocht, maar beperkt	Niet onderzocht	Betere benutting van intermitterend elektriciteitsaanbod
Aanvullende maatregelen			
A+++ apparaten	0,6	Baten tot 250	
Introductie slimme meter (elektriciteit)	Beperkt	Effect niet bekend	Gedragsverandering op basis van informatie over gebruik en kosten
LED-verlichting kassen	0,4	baten	
LED-verlichting kantoren	1	~20	

Belangrijke elementen uit de beelden voor 2050

In de beelden voor 2050 zijn in vele gevallen zuiniger apparaten in huishoudens en bij bedrijven verondersteld dan in de huidige situatie.

Kenmerken van de huidige situatie

In de afgelopen jaren is er mede onder invloed van Europees beleid, maar vaak ook om redenen van kostenbesparing een ontwikkeling geweest naar efficiëntere apparaten. Daarnaast is er een ontwikkeling geweest naar steeds meer elektrische apparatuur. De introductie van slimme meters in huishoudens is op gang gekomen. In de glastuinbouw wordt toepassing van elektriciteit voor belichting van gewassen een steeds belangrijker factor. De elektriciteitsvraag over een etmaal is relatief goed stuurbaar, waarmee kan worden ingespeeld op het aanbod van intermitterende bronnen.

Acties en maatregelen voor de komende jaren in het transitieproces

Ondersteunende acties en maatregelen in het transitieproces

Veel van de maatregelen hebben vooral als doel om tot efficiencyverbetering te komen; hiervoor is geen ingrijpende transitie noodzakelijk.

Implementatiepaden van emissiereducerende opties met groot potentieel voor de toekomst

Benutting van de potentiële flexibiliteit in de vraag bij de verschillende afnemers van elektriciteit vormt een nuttig onderdeel van het toekomstige systeem, dat bij een grotere inzet op zon en wind in 2030 al kan bijdragen aan minder gasverbruik in de elektriciteitsproductie.

Overige maatregelen gericht op emissiereductie op de korte termijn

De vervanging van elektrische apparatuur door nieuwe, efficiëntere versies is een continu doorlopend proces van verbetering.

3.7.3 Lage temperatuur warmte

Belangrijke elementen uit de beelden voor 2050

Voor de transitie in de warmtevoorziening in de gebouwde omgeving is de keuze voor de toekomstige infrastructuur een kernelement, dat sterk bepalend is voor het veranderingsproces. De belangrijkste nieuwe opties zijn warmtenetten met benutting van warmte uit de directe omgeving en all-electric systemen met elektrische warmtepompen als de centrale technologie. Hierbij is de gasinfrastructuur niet nodig, al betekent dit in het geval van warmtenetten niet dat het systeem helemaal gasvrij is omdat voor de piekvraag op zeer koude dagen hulpketels op gas een aanvullende optie zijn. Uit de analyse blijkt echter dat de gasinfrastructuur nog steeds een relevante rol speelt in 2050, zij het voor een belangrijk deel met groen gas en in combinatie met elektriciteit in hybride systemen. In alle gevallen is energiebesparing een belangrijke ondersteunende optie, maar de mate waarin hangt samen met de hiervoor genoemde keuze voor infrastructuur en met zeer specifieke kenmerken van de woning of het gebouw. De genoemde opties zijn evenzeer relevant voor de glastuinbouw. De energiebehoefte van de glastuinbouw kan tot 2050 met bijna 40 procent afnemen door een combinatie van areaalkrimp, de toepassing van energiebesparende kassen en energiebesparende teeltmethoden (Schepers et al. 2015).

De verhouding tussen de hiervoor genoemde systemen in de verschillende beelden voor 2050 is wisselend. In de praktijk zullen lokale omstandigheden, die niet in de gebruikte modellen zijn opgenomen, van grote invloed zijn op de uiteindelijke keuzen.

Kenmerken van de huidige situatie

Het huidige tempo van verduurzaming is onvoldoende om in Nederland in 2050 een klimaatneutraal woningbestand te realiseren. Vooral bij bestaande woningen en gebouwen zijn

krachtiger beleidsimpulsen vereist om tot de gewenste eindsituatie te komen. Duidelijkheid over de infrastructuur van de toekomst is voor specifieke locaties een vereiste om de transitie voortvarend door te zetten. Deze duidelijkheid is er voor het overgrote deel van de gebouwde omgeving nog niet. Een besluit daarover vergt een zorgvuldig proces van samenspel met alle betrokkenen, niet in de laatste plaats bewoners en lokale bedrijven, maar ook goed zicht op de technische mogelijkheden in de gebouwen en huizen en op de warmtebronnen. Ook zijn er proefboringen en aanvullend onderzoek nodig om duidelijkheid te krijgen over het aanbod van geothermie.

Elektrificatie van de warmtevoorziening komt voorzichtig op gang. In de praktijk gaat het vooral om hybride systemen met aardgas, met name om de warmtevoorziening op zeer koude dagen te kunnen garanderen. Deze hybride systemen hoeven – met afschrijvingstermijnen rond de 15 jaar – een overgang naar all-electric op termijn niet in de weg te staan maar wel wordt het een aandachtspunt dat er met die hybride systemen meer kapitaal geïnstalleerd staat, dat bij een overgang op een gasvrij systeem tot meerkosten kan leiden. Voordeel van hybride systemen is dat ze leiden tot meer ervaring bij installateurs en meer vertrouwde bij de klanten met elektrische warmtepompen.

Voorbeeldprojecten met ombouw van woningen tot nul-op-de-meter met volledige elektrificatie en vérgaande isolatie zijn er nog slechts in beperkte mate. De meeste zijn gedaan bij corporatiewoningen met een G-label. Gecombineerd met andere verbeteringen is het in dit soort situaties financieel het gunstigst. Dit betekent ook dat een stap-voor-stap sanering zonder direct voor een integrale oplossing te kiezen relatief duur kan uitpakken.

Het aandeel van woningen dat is aangesloten op een warmtenet is nog beperkt: in 2016 naar schatting 760.000 aansluitingen (Ecorys 2016) ofwel 8 procent van alle gebouwen in Nederland. Er zijn echter diverse grootschalige plannen voor nieuwe warmtenetten, met name in de Randstad. Er worden momenteel zowel kleinschalige als grootschalige initiatieven ontwikkeld (Hoogervorst 2017). Lokale initiatieven vinden plaats rond relatief kleine netwerken, primair gericht op duurzame energiebronnen (geothermie, WKO, biomassa). Deze ontwikkeling past in de 'energieke samenleving' waarin lokaal draagvlak voor verduurzaming van de energievoorziening belangrijk is. Lokale partijen maken samen de businesscase rond. Die 'partijen' zijn gemeente, netbeheerders, private partijen, woningcorporaties, kantoren en eigenaren van koopwoningen. Ze zoeken naar manieren om hun inspanningen te bundelen, zoals onder andere blijkt uit het manifest 'Aan de slag met wonen zonder aardgas' dat tijdens de Nationale Klimaattop in oktober 2016 aan de regering werd aangeboden door bijna 100 deelnemende partijen. Daarnaast ontstaan grootschalige initiatieven voor nieuwe regionale netwerken om (industriële) restwarmte te benutten en warmte te leveren aan afnemers zonder nabije bronnen (onder andere in Zuid-Holland, Regio Amsterdam, Parkstad Limburg). Deze initiatieven gaan voornamelijk langs de lokale en regionale bestuurlijke route, 'bovenlangs' dus. Centraal daarin staat het aanleggen van een provinciale 'warmtesnelweg' of 'rotonde' waarop lokale bronnen en netwerkjes te zijner tijd kunnen aansluiten.

Een zeer begrijpelijke zorg bij afnemers van warmte is dat een nieuw systeem – of dit nu een warmtenet of een all-electric optie is – warmte voor hen duurder zal maken en dat anderen, die voorlopig niet tot maatregelen worden gedwongen, beter af zijn. Hier ligt een opgave voor het waarborgen van een eerlijke verdeling van de lasten, zodat ook het draagvlak voor dergelijke veranderingen niet afkalft. Dat geldt onder andere voor de kostenverdeling bij een energiebesparingsverplichting voor energiebedrijven, en ook bij nieuwe warmtenetten waar afnemers kunnen worden geconfronteerd met een aansluitplicht en hoge aansluitkosten.

In de glastuinbouw gaan de kassen zo'n 25 jaar mee. Dat biedt ruimte om voor 2050 bij de vernieuwing in glastuinbouwbedrijven ook de warmtevoorziening mee te nemen. De glastuinbouw loopt voorop met geothermie. Van de huidige 12 geothermieputten zijn er 10 door tuinders aangelegd. Gasvrije glastuinbouwbedrijven zullen een alternatief moeten hebben voor de CO₂-voorziening voor groeibevordering, die nu wordt afgetapt van de eigen ketel of warmtekrachtkoppeliningsinstallatie. Een aantal bedrijven koopt nu al CO₂ van externe leveranciers, in het Westland vaak via het CO₂-net. Op korte termijn kan uitbreiding van het bestaande CO₂-net in het Westland en inzet van biomassaketels hiervoor een oplossing bieden. Wel moet worden bedacht dat slechts 10-20 procent van de toegediende CO₂ door planten wordt vastgelegd en de rest alsnog in het milieu komt (Hoogervorst 2017). Als op lange termijn meer gesloten kasconcepten worden toegepast, kan CO₂-bemesting efficiënter verlopen en het verbruik van CO₂ (met bijbehorende emissies) dalen.

Acties en maatregelen voor de komende jaren in het transitieproces

Ondersteunende acties en maatregelen in het transitieproces

- De eerste stap naar een omzetting van een wijk naar gasvrij of emissie-arm is de keuze van de infrastructuur van de toekomst. Een nadere verkenning op lokaal niveau moet uiteindelijk leiden tot een besluit over de infrastructuur voor 2050 met ruwweg drie keuzen: een warmtenet, een all-electric systeem of een gasnet. De eerste twee zijn emissievrij. De laatste zou kunnen worden gezien als terugvaloptie waarin nog veel emissiereductie kan worden bereikt met energiebesparing, hybride verwarmingssystemen en groen gas. Aan zo'n besluit, bijvoorbeeld vast te leggen in een gemeentelijk warmteplan, gaan zaken vooraf als verkenningen van de huidige technische situatie en de noodzaak en mogelijkheden daarbij van energiebesparing, eventuele proefboringen als geothermie een belangrijke warmtebron moet worden, de mogelijkheden voor warmte-uitwisseling met glastuinbouwbedrijven en andere bedrijven in de buurt, de potentie van warmtepompen en eventuele combinatiemogelijkheden daarvan met een warmtenet. Die voorbereiding vraagt daarom flink wat tijd en geld.
- Bij de uitwerking van warmteplannen is speciale aandacht nodig voor de afstemming van bedrijven die restwarmte kunnen leveren en bedrijven die warmte benutten, ook met het profiel van de warmtevraag, denk aan zwembaden in de zomer. Dat kan nader voorbereidend onderzoek vergen.
- Uit diverse, indicatieve berekeningen blijkt, dat – voor zover beschikbaar – toepassen van groen, hernieuwbaar gas in de meeste gevallen de goedkoopste optie is, ook als de gasprijs zou oplopen van de huidige 0,32 €/m³ (exclusief belastingen) tot 1,50 €/m³ (groen gas; CE Delft 2016) of 2,25 €/m³ inclusief belastingen (PBL in prep.). Het is echter onduidelijk hoeveel groen gas tegen die prijzen op termijn in Nederland beschikbaar zal kunnen zijn. Bij binnenlandse productie moet voldoende biomassa beschikbaar zijn; bij import moeten andere landen over een exporteerbaar overschot beschikken. Dan zijn er nog andere sectoren die mogelijk meer voor groen gas willen betalen om daarmee CO₂-reductie te realiseren. Gemeenten, die hun warmteplan moeten opstellen, kunnen toekomstige ontwikkelingen op de groen-gas-markt onmogelijk overzien. Informatie over een realistische prijs van groen gas (incl. eventuele belastingen) kan hen wel helpen om de kosten van verschillende systeemopties te vergelijken. Om te voorkomen dat gemeenten anticiperen op gebruik van groen gas dat er later niet blijkt te zijn, zou de overheid moeten stimuleren dat bij voorkeur opties met zo min mogelijk gas de voorkeur krijgen, bijvoorbeeld door voor te schrijven welke ondergrens van gasprijzen gemeenten moeten hanteren bij de onderbouwing van hun warmteplannen.
- Warmtenetten zijn in de meeste 2050-beelden een belangrijke optie. Uit indicatieve berekeningen met meer op de gebouwde omgeving toegesneden modellen en gevoeligheidsanalyses van CE Delft en van PBL blijkt, dat verwarming met warmtenetten de goedkoopste klimaatneutrale optie is voor ongeveer de helft van de (na isolatie resterende) warmtevraag van woningen in 2050 (CE Delft 2016, PBL in prep; vergeleken in Hoogervorst 2017). Om deze optie te benutten is een forse uitbreiding van het huidige aantal warmteaansluitingen nodig en moeten er meer warmtenetten aangelegd worden. Uitbreiding en aanleg van grootschalige warmtenetten ondervindt momenteel nog veel

hindernissen; ontbrekende financiering en gebrekkige coördinatie zijn daarvan de grootste en meest hardnekkige (Hoogervorst 2017). De financiering wordt vooral bemoeilijkt door grote onzekerheden over toekomstige warmteafzet (Welke wijken kunnen worden aangesloten? Hoeveel warmte gaan gebouwen in de toekomst afnemen?), over de toekomstige verkoopprijzen van warmte (nu nog gemaximeerd door de prijs van aardgas, die mogelijk gaat dalen wanneer de energietransitie internationaal succesvol wordt en het gebruik ervan drastisch afneemt), en onzekerheid over toekomstige productie van warmte (Zijn er voldoende bronnen beschikbaar als kolencentrales en AVI's sluiten?). Deze (en andere) onzekerheden kunnen door aanvullend beleid worden gereduceerd. Dat vereist echter wel regelingen die duidelijk zijn en langdurig van kracht blijven zodat stabiele marktomstandigheden gecreëerd worden.

- Grootschalige, goed voorbereide en begeleide pilotprojecten zijn gewenst om ervaring op te doen met dergelijke vernieuwingsprojecten die vele mensen direct raken, bijvoorbeeld door stimulering en ondersteuning van gemeenten tot degelijke experimenten. Succes ervan is van groot belang voor het creëren van maatschappelijk draagvlak voor dergelijke processen en de voorbereiding ervan dient snel te worden opgepakt dan wel te worden geïntensiveerd.
- Voor de transitie in de gebouwde omgeving is naar verwachting de periode tot 2050 hard nodig. Dit betekent dat de technische sanering een periode van 30 jaar zal beslaan. Als dat gepaard zou gaan met te grote verschillen in kosten voor de warmtevoorziening tussen 'early adopters' en 'laggards', dan kan het maatschappelijk draagvlak ervoor verdwijnen. Daarom is de inrichting van een maatschappelijk aanvaarde energietariefstructuur belangrijk, waarbij de kosten van klimaatbelastend en klimaatneutraal verwarmen voor de eindgebruikers maatschappelijk acceptabel zijn en tegelijkertijd de prikkel tot verduurzaming op een voldoende hoog niveau ligt.
- Een institutioneel vraagstuk is wie de probleemhouder is ofwel op wie het beleid zich moet richten. Krachtiger beleid is nodig om het proces voortgang te laten boeken. Een te verkennen optie is dat er energieleveranciers komen die niet zozeer verantwoordelijk zijn voor de levering van gas en elektra, maar van warmte. Zij bezitten en beheren in zo'n concept ook de apparatuur waarmee warmte wordt gegenereerd. Zo'n aanpak kan verhinderen dat leveranciers van stroom, gas en warmte elkaar gaan beconcurreren in plaats van gaan samenwerken om de meest efficiënte energievoorziening te ontwikkelen.
- Als regionale warmteplannen een belangrijke basis voor de transitie vormen, betekent dit ook dat individuele woningeigenaren minder zeggenschap krijgen over hun verwarmingssysteem. Dit betekent ook dat beleid zich minder op die doelgroep zal richten, al blijven die uiteraard betrokken. Dat roept echter wel de vraag op, waar de verantwoordelijkheid wel komt te liggen. Worden de huidige leveranciers van gas en elektra in de toekomst warmteleveranciers? Of is er een alternatief? Duidelijkheid over de institutionele vormgeving is gewenst voor een soepele uitvoering, maar kan ook een complex vernieuwingstraject betekenen.
- De omvang van de investeringen en de arbeidsintensiviteit van de aanpassingen zijn relatief hoog. Dat betekent dat beschikbaarheid van arbeidskrachten hier wellicht sneller een probleem is dan bij andere functionaliteiten. Opleiden van vaklieden is nodig voor installatie en onderhoud van nieuwe technische systemen. Ook zal de werkgelegenheid in de renovatiesector groeien. Dat betekent dat er meer timmerlieden, metselaars en elektriciens moeten worden opgeleid dan nu gebeurt.
- Glastuinbouwbedrijven kunnen onderdeel zijn van integrale regionale warmteplannen. Hun belangen gaan verder en de ontwikkeling van een eigen visie is van belang, zeker ter voorbereiding van ingrijpende investeringen (kassen hebben een afschrijvingstermijn van zo'n 25 jaar). Ook andere soorten bedrijven met een substantiële warmte- of koude-behoefte kunnen een bijdrage leveren aan een klimaatneutraal energiesysteem. Warmteplannen per bedrijf kunnen helpen om op tijd klaar te zijn voor een innovatie aanpak als er vervangingsmomenten komen.
- Bestaande klimaatneutrale warmtetechnieken zijn vaak nog duur en (in energetisch opzicht) inefficiënt. Met gerichte innovatieprogramma's kunnen de technische prestaties van deze technieken worden verbeterd en de productiekosten worden verlaagd. Het

gaat daarbij onder andere om: lage-temperatuur warmtenetten, warmtepompen, warmteopslag, geothermie en groen gasproductie.

Implementatiepaden van emissiereducerende opties met groot potentieel voor de toekomst

- Er ligt een grote opgave om het gehele woningbestand en alle gebouwen – vooral al bestaande bouw – over een periode van ruim 30 jaar CO₂-vrij of ten minste CO₂-arm te maken. Zoals aangegeven zijn daarvoor op het niveau van wijken of regio's nog vele voorbereidingen noodzakelijk. Waar het echter al wel duidelijk is of snel duidelijk kan worden wat de toekomstige infrastructuur van een wijk moet worden, kunnen groot-schalige voorbeeldprojecten worden gestart of geïntensiveerd en emissiereducties worden gerealiseerd. De eerste projecten zullen het karakter van pilots hebben, waarin niet alleen de technische maar ook de sociale aspecten en kosten veel aandacht vragen. Deze projecten moeten goed worden voorbereid en begeleid, want ze zullen het draagvlak voor het vervolg bepalen. Voor optimale leereffecten in de pilot periode is het belangrijk zoveel mogelijk voorbeelden te hebben van de overgang naar gasvrije wijken, met een warmtenet of all-electric. Het is niet goed aan te geven welke omvang deze pilots tot 2030 al moeten hebben. Het gaat dan om ruim een derde van de nog beschikbare tijd tot 2050. Dat daarin al ruim een derde van de gebouwde omgeving gesaneerd zal zijn, lijkt gezien de vereiste voorbereidingen niet haalbaar, maar een grootteorde van 5-10 procent van de bestaande gebouwde omgeving gasvrij lijkt toch wel een te overwegen omvang.
- Met de opgedane ervaringen en de daarbij opgebouwde kennis en capaciteit zou het proces uiteindelijk rond 2030 tot een tempo van 300.000-350.000 woningen en ruim 10.000 utiliteitsgebouwen per jaar moeten komen, waarvan ook een deel met sterk verminderd gasgebruik door besparing en hybride systemen.
- De integratie van kassen in het warmtevoorzieningssysteem maakt het mogelijk in de toekomst de kas meer te gaan benutten als energiebron. Dit geldt in de eerste plaats voor geothermieprojecten in de glastuinbouw, maar wellicht ook bij projecten met grootschaliger inzet van warmtepompen.

Overige maatregelen gericht op emissiereductie op de korte termijn

- Het potentieel voor maatregelen om de warmtevraag te verminderen is nog lang niet uitgeput. Het gaat om inzet van marktrijpe technologie in woningen en gebouwen. Een belangrijk deel van die maatregelen is al onderdeel van het scenario met voorgenomen beleid zoals dat in de NEV is doorgerekend. Er is aanvullend potentieel, maar daarbij geldt ook dat de investeringskosten relatief hoog kunnen worden. Qua maatregelen gaat het om optimalisatie van de bestaande warmtesystemen, inclusief feedback systemen, en verdergaande isolatie. Hoe ingrijpender de maatregelen, des te belangrijker is een goed totaalplan, dat ook in de uitvoering goedkoper kan zijn dan sanering in een aantal stappen. Daarom is het zaak na te gaan, tot in welke mate energiebesparingsmaatregelen de komende jaren no-regret zijn, vooruitlopende op verdere aanpak.
- In de glastuinbouw kunnen biomassaketels ter vervanging van gasketels worden ingezet. De onzekerheid of deze maatregel past bij de transitieaanpak zit in het feit dat op deze schaal geen combinatie met CCS mogelijk is. Dit betekent dat deze inzet van biomassa – zeker bij een beperkt aanbod ervan – ten koste gaat van het potentieel om negatieve emissies in het systeem te brengen.

Tabel 3.5. Overzicht van emissiereducerende maatregelen die mogelijk kunnen worden ingezet in de periode tot 2030 voor lage temperatuur warmte (emissie-effecten in de tabel zijn niet optelbaar) (bron PBL en ECN 2017).

Maatregelen belangrijk voor het transitieproces	Indicatie van het technisch potentieel voor emissiereductie (Mton CO ₂ -eq)	Indicatie van de kosteneffectiviteit (euro/ton CO ₂)	Overwegingen
Geothermie kassen	1	Van baten tot 10	
Procesinnovatie in glastuinbouw	1,9	100	Hierin kan overlap zitten met geothermie
Pilotprojecten voor overgang naar gasvrije bestaande wijken	2-3 bij realisatie in 5-10% van woningen en gebouwen in 2030	Zie bij de volgende opties	Inclusief extra kosten voor optimale begeleiding van de eerste projecten; realisatie in 2030 is sterk afhankelijk van snelheid waarmee voorbereidende activiteiten worden uitgevoerd.
Technische optie voor gasvrije wijken a: warmtenetten		250-375	
Technische optie voor gasvrije wijken b: warmtepomp/ zonneboiler		150-350 kantoren 200-1200 woningen	
Technische optie gasvrije wijken c: warmteterugwinning			
Nul-op-de-meter renovatiewoningen (individueel)	Afhankelijk van aantal; deel van effect (PV) hoort bij elektriciteitsvoorziening	1100-1300	Afstemming van individuele aanpak met aanpak op niveau wijk of regio;
WKO kantoren (individueel)	1,6	~600	Afstemming van individuele aanpak met aanpak op niveau wijk of regio;
BENG All-electric nieuwe kantoren en woningen	0,2 kantoren 0,1 woningen	~300 kantoren ~1300 woningen	
BENG warmtelevering nieuwe woningen en kantoren	0,5 kantoren 0,6 woningen	~250 kantoren 250-300 woningen	
Aanvullende maatregelen			
Warmteterugwinning	0,7 kantoren 1,7 woningen	~30 kantoren 600-1300 woningen	Oppassen voor lock-in bij optimalisatie bestaand systeem
Optimalisatie energiegebruik kantoren	4	100-200	Oppassen voor lock-in bij optimalisatie bestaand systeem
Isolatie	1,7 kantoren 3,3 woningen	100-7000 kantoren Van baten tot 900 woningen	Aandachtspunt: nagaan of isolatie past in integraal saneringsplan voor een kantoor en of

			mate van isolatie past bij toekomstige energie-infrastructuur
Regel en feedback/ optimalisatie	1,7	Van baten tot 5000	Grote spreiding in effect per huishouden
Biomassaketels glastuinbouw	2	140-190	Geen combinatie met CCS mogelijk en neemt daarom deel van biomassapotentieel om negatieve emissies te genereren weg. Slechts deel CO ₂ binnen glastuinbouw zelf nuttig te gebruiken.

3.7.4 Mobiliteit en transport

Belangrijke elementen uit de beelden voor 2050

In alle beelden voor 2050 rijdt het overgrote deel van de personenauto's op elektriciteit. In de 80 procent beelden is er nog een relevant aandeel plug-in hybrides, in de 95 procent beelden zijn die hybrides vooral combinaties met waterstof. Voor vrachtverkeer komt in enkele 80 procent scenario's methaangas (deels aardgas, deels groen gas) als brandstof naar voren. Voor 95 procent scenario's volstaat dat niet meer en komt waterstof als brandstof nadrukkelijk in beeld, maar kunnen ook niet meegenomen opties als vrachtwagens op batterijen die onderweg worden opgeladen nog een alternatief vormen.

Overigens geldt dat bij grote beschikbaarheid van biomassa en CCS de negatieve emissies die bij de productie van biobrandstoffen kunnen worden bereikt ertoe leiden dat biobrandstoffen nadrukkelijker in beeld komen voor het wegverkeer. De beschikbaarheid van voldoende duurzame biomassa is daarbij een zeer onzekere factor, zeker gezien de potentiële vraag uit lucht- en scheepvaart. Daarom verdient het aanbeveling deze optie voor wegverkeer vooral als 'reserveoptie' te beschouwen en vol in te zetten op elektriciteit en waterstof, omdat de resterende termijn tot 2050 al krap is voor de daarvoor vereiste transitie. Voor lucht- en scheepvaart zijn groene brandstoffen voor 2050 de enige haalbare reductieoptie.

Kenmerken van de huidige situatie

De introductie van elektrisch rijden is voor personenauto's in Nederland in de periode 2013-2015 nadrukkelijk op gang gekomen in de zakelijke automarkt. Het aandeel nieuw verkochte auto's met een stekker is onder invloed van de gunstige bijtellingsregeling duidelijk toegenomen, overigens met een relatief groot aandeel plug-in hybrides. De bijtellingsvoordelen zijn voor plug-in hybriden inmiddels sterk teruggeschoefd zonder dat daar ander stimuleringsbeleid voor in de plaats is gekomen en dat heeft in 2016 en 2017 geleid tot een duidelijke vermindering in de verkoopaantallen. Voor emissievrije auto's blijven de voordelen in de bijtelling tot en met 2020 bestaan. Desondanks loopt Nederland ten opzichte van de meeste andere Europese landen nog wel aan het front mee (voorafgegaan door Noorwegen). De oplaadinfrastructuur in Nederland is mee ontwikkeld, maar de rest van West-Europa loopt daarbij achter, hetgeen van invloed is op het gebruiksgemak van Nederlandse automobilisten in het buitenland. De Clean Power for Transport richtlijn verplicht overigens alle lidstaten tot de tijdige uitrol van een adequate infrastructuur voor alternatieve aandrijving, maar wat als tijdig wordt beschouwd kan per land verschillen. Vele autobezitters zijn afhankelijk van publieke parkeerplaatsen nabij hun huis en in de toekomst van oplaadfaciliteiten daarbij. De verdere ontwikkeling daarvan zonder grote problemen met de toch al vaak nijpende parkeerproblematiek in de stedelijke omgeving en de technische keuzen daarbij (laadpalen en stekkers, inductie?) vormen een belangrijk aandachtspunt.

Het rijden op waterstof is in Nederland voor alle voertuigen nog niet verder dan het stadium van enkele demonstratievoertuigen (mede door de beperkte tankinfrastructuur), maar daarmee is de situatie in Nederland niet veel anders dan in het buitenland. Enkele specifieke ontwikkelingen zoals met nul-emissie bussen kunnen worden beschouwd als niches waarin de innovaties als eerste toepassing vinden. Ze vormen een element in de leerfase voor gebruik van de nieuwe technologie in zware voertuigen. In de stedelijke distributie zijn de eerste stappen gezet naar een emissievrije stadslogistiek in 2025.

Acties en maatregelen voor de komende jaren in het transitieproces

Ondersteunende acties en maatregelen in het transitieproces

- Een mogelijk snelle introductie van elektrische auto's betekent ook een toenemende vraag naar oplaadfaciliteiten en mogelijk aanpassingen in het elektriciteitsnetwerk. Vele autorijders zijn aangewezen op publieke parkeermogelijkheden nabij hun huis en dat zal een grotere behoefte aan oplaadpunten in de publieke ruimte betekenen. Het bieden van voldoende zekerheid over de beschikbaarheid van een oplaadpunt moet worden gecombineerd met de behoefte aan parkeerruimte voor de gebruikers van auto's met een verbrandingsmotor, want bij het eventueel vrijhouden van parkeerplekken voor opladen loeren mogelijke problemen en zou weerstand tegen de ontwikkeling kunnen ontstaan. Het is daarom van belang dat gemeenten daarvoor op tijd plannen opstellen, die ook rekening houden met ontwikkelingen in het autobezit en -gebruik in steden.
- Voor gebruikers van elektrische auto's is het ook wezenlijk dat er voldoende oplaadfaciliteiten zijn in geheel West-Europa. De ontwikkelingen in Nederland kunnen dus niet los worden gezien van die in de rest van Europa en het is daarom van belang daaraan zo mogelijk versnellende impulsen te geven.
- Het draagvlak voor elektrisch rijden kan worden vergroot door demonstratie- en proefprojecten en informatiecampagnes om de bekendheid met de technologie te vergroten. Dit kan bijdragen aan een snellere acceptatie en het verkleinen van de weerstand die er nu nog is tegen deze technologieën (Hoen & Jacobs, 2016).
- Duidelijkheid over de fiscale behandeling van de elektrische auto en de waterstofauto op de langere termijn kan ook bijdragen aan het faciliteren (en afhankelijk van de invulling ook het versnellen) van het transitieproces.
- De ontwikkeling van nul-emissie vrachtauto's en trucks voor transport over lange afstanden loopt achter bij die van personenauto's. Er zijn slechts enkele kleinschalige proeven gedaan. Ze vormen wel een belangrijk onderdeel van de toekomstbeelden. Grootschaliger experimenten met waterstofauto's of onderweg opladen van batterijen zijn daarom in de komende periode van groot belang.
- Initiatieven vanuit Nederland in EU-verband kunnen helpen om te komen tot een beleidskader met CO₂-normen dat is gericht op nul-emissie alternatieven voor vrachtauto's en cruciaal is voor de vereiste internationale vernieuwing in het transport.
- Een krachtig EU-beleid is belangrijk voor de implementatie van nul-emissie voertuigen en Nederland kan daarop invloed uitoefenen. Mocht het EU-beleidskader onvoldoende basis bieden of te laat op gang komen om de Nederlandse ambities te realiseren, dan is het alternatief een Nederlandse beleidslijn in te zetten. Dat kan in de vorm van beprijzen, waarbij nader moet worden onderzocht bij welke prijsniveaus welk resultaat kan worden bereikt in de vorm van emissies maar met name ook in de doorgroei van de nul-emissie auto's. Een andere optie voor beleid gericht op mobiliteitsconsumenten met zo veel mogelijk keuzevrijheid voor die consument, maar ook met de zekerheid van een bepaalde emissiereductie is het werken met (verhandelbare) emissierechten per consument voor persoonlijk vervoer. Zo'n optie kent echter ook tal van haken en ogen en vergt daarom nog nadrukkelijker nadere voorstudie en experimenten, waarbij maatschappelijk draagvlak een belangrijk element vormt. Daarnaast is het belangrijk dat het emissieplafond zodanig scherp wordt gekozen dat de benodigde systeeminnovatie daadwerkelijk op gang komt. Een plafond dat in lijn is met het emissiedoel voor verkeer en vervoer voor 2030 in het Energieakkoord biedt daarvoor waarschijnlijk een goede basis, maar dat zou nader moeten worden bekeken.
- Bij grootschalige emissiebronnen is CCS een belangrijke optie. Een punt van nader onderzoek kan zijn of dat mogelijk is bij zeeschepen, een optie die in de 2050-beelden niet

is meegenomen. Een combinatie met de inzet van biobrandstoffen zou tot negatieve emissies te leiden.

Implementatiepaden van emissie-reducerende opties met groot potentieel voor de toekomst

- De introductie van elektrische personenauto's is de afgelopen jaren op gang gekomen. Batterijkosten zijn aanzienlijk omlaag gegaan. Dit betekent dat verdere doorgroei tot een aanzienlijk aandeel in 2030 mogelijk is. Dit geldt zeker als het in het Energieakkoord benoemde perspectief dat in 2035 alleen nog auto's mogen worden verkocht die nul-emissie kunnen rijden wordt gehaald (en zo wordt geïnterpreteerd dat auto's die volledig op biobrandstoffen kunnen rijden niet worden meegeteld!). Die afspraak is tot stand gekomen op basis van de verwachting dat dan in 2050 90 procent of meer van de auto's op de weg zonder uitstoot van broeikasgassen rondrijdt. Als die ontwikkeling tot 2035 (volgens een S-curve) wordt ingezet, dan zou dat betekenen dat er in 2030 zo'n 15-20 procent nul-emissie personenauto's rondrijden en dat zou ook kunnen gelden voor bestelauto's. Het behoeft daarbij niet te worden uitgesloten dat waterstofauto's of hybride waterstof/batterij auto's ook daaraan bijdragen.
- Het aandeel van groene brandstoffen kan worden verhoogd. Zie daarvoor 3.5.7. Dat kan bijvoorbeeld door groene diesel te produceren, maar het kunnen ook alternatieve koolstofhoudende brandstoffen zijn als methaan of mierenzuur. Daarnaast is de inzet van groene brandstoffen voor lucht- en scheepvaart waarschijnlijk de enige technische optie (tenzij CCS voor grote schepen haalbaar blijkt) in 2050 die een relevante bijdrage aan emissiereductie kan leveren.
- Scherpe Europese CO₂-normen voor de periode na 2020, met specifieke focus op de marktintroductie van emissievrije technologieën, zijn cruciaal om het aanbod en de marktintroductie van emissievrije auto's op gang te brengen c.q. te versnellen. Nederland streeft voor personenauto's naar een norm van 70 g/km in 2025 en 35 g/km per 2030 (NEDC-waarden). Dit kan, al dan niet aangevuld met specifieke prikkels voor emissievrije technologieën, een krachtige impuls geven aan de (versnelde) marktintroductie van emissievrije auto's in de EU. Voor bestel- en vrachtauto's is er nog geen Nederlands standpunt, maar ook daar geldt dat het Europese bronbeleid een potentieel krachtige stimulans kan geven aan de introductie van nieuwe technologieën. Ook daar is krachtige inzet vereist om de transitie tijdig in gang te zetten.
- De marktpenetratie van emissievrije technologie kan nationaal worden versneld via gerichte prikkels. Dat kan zijn in de vorm van fiscale voordelen, maar ook door andersoortige prikkels zoals (innovatie- of aanschaf) subsidies, extra faciliteiten en mogelijkheden voor emissievrije auto's (zoals ruimere venstertijden voor bevoorrading van binnensteden voor emissievrije voertuigen of strengere regels voor milieuzones), goedkoper parkeren, etc.

Overige maatregelen gericht op emissiereductie op de korte termijn

- Om redenen van kostenbesparing maar ook onder invloed van beleid worden voer-, vaar- en vliegtuigen steeds energiezuiniger. De steeds scherpere EU-normen voor CO₂-emissies voor personenauto's en bestelauto's hiertoe aan. Vanuit transitieoogpunt is het van belang – zeker als deze normering het enige ingezette beleidsinstrument is – of de norm zodanig scherp is geformuleerd dat de implementatie van nul-emissie auto's daarmee ook voldoende impuls krijgt. Tot nu toe is dat niet het geval.
- Voor vrachtverkeer over de weg kan een overstap van diesel naar methaangas als brandstof tot een beperkte emissiereductie leiden, mits methaanemissie daarbij kan worden geminimaliseerd. Deze optie komt ook voor in 80 procent varianten voor 2050. Verdergaande reductie is dan mogelijk in de vorm van groen gas (in plaats van biodiesel).
- Er is nog een scala aan technische, ruimtelijke en gedragsmaatregelen, waaronder de zuiniger banden, rekeningrijden en snelheidsverlaging die bij kunnen dragen aan CO₂-reductie op de kortere termijn maar niet noodzakelijk zijn voor de op de lange termijn benodigde transitie.

Tabel 3.6. Overzicht van emissiereducerende maatregelen die mogelijk kunnen worden ingezet in de periode tot 2030 voor mobiliteit.

Maatregelen belangrijk voor het transitieproces	Indicatie van de potentiële emissiereductie in 2030 (Mton CO ₂ -eq)	Indicatie van de kosten (euro/ton CO ₂)	Overwegingen
Versnelde introductie nul-emissie personenauto's (in praktijk vooral EV's) tot 15-20% in 2030	2-3 Alleen effect directe emissies (effect op niveau van deze functionaliteit 0,7-1)	~100 (in de eerste fase nog relatief duur, maar kan snel afnemen)	Ontwikkeling naar ' <i>alleen verkoop van nul-emissie auto's in 2035</i> ' impliceert in 2030 15-20% van de auto's op de weg; Ketenemissies omvatten meer elektriciteitsproductie en minder brandstofproductie
Aanvullende maatregelen (waaronder beleidsmaatregelen)			
Zuiniger banden (technisch potentieel)	0,2	batens	Potentieel te ontsluiten met nationaal beleid
Uitstootverlaging bestelauto's (bijvoorbeeld met norm van 120 g/km na 2025)	0,8	batens	Alleen werken met een dergelijke norm kan introductie van nul-emissie voertuigen vertragen
Geleidelijke energiebesparing vrachtauto's (van 1,1% per jaar na 2020)	0,5	batens	Voor 2030 is nog geen relevante bijdrage van nul-emissie vrachtauto's te verwachten
Vrachtwagens op methaan-gas in plaats van diesel	Maximaal circa 20% reductie	~100	Kan vertragend werken voor de overgang naar nul-emissie voertuigen
Snelheidsverlaging *	0,08	~200	Gedragsmaatregel, mogelijk gebrek aan maatschappelijk draagvlak is belangrijk issue
Kilometerheffing vrachtverkeer *	0,5	~300	Gedragsmaatregel, mogelijk gebrek aan maatschappelijk draagvlak is belangrijk issue
Kilometerheffing personenverkeer (7 ct/km) *	2	400-500	Gedragsmaatregel, mogelijk gebrek aan maatschappelijk draagvlak is belangrijk issue

* anders dan de andere maatregelen betreft het hier beleidsmaatregelen gericht op gedragsverandering

3.7.5 Landbouw, landgebruik en voedsel

Belangrijke elementen uit de beelden voor 2050

De technische maatregelen voor overige broeikasgassen (OBG) in de beelden voor 2050 betekenen geen ingrijpende transitie al gaat het wel om forse aanpassingen in de optimalisatie van bestaande processen. Daarnaast is voor 2050 een optie als de productie van novel protein foods kansrijk. Het is echter onzeker in hoeverre dit zal leiden tot een vervanging van de productie van vlees en melk in Nederland. Daarom is een (verdere) krimp van de veestapel niet meegenomen. Desondanks kan dit in enkele 95 procent beelden het een optie zijn om op die manier bij te dragen aan de reductie van OBG in Nederland.

Veranderingen in het landgebruik binnen Nederland en diverse beheersmaatregelen die van invloed kunnen zijn op de LULUCF-emissies zijn niet in de modellen OPERA en E-Design doorgerekende beelden opgenomen. Hiervoor zijn aparte analyses uitgevoerd. Met name veranderingen in landgebruik of -beheer en in de bedrijfsvoering kunnen overigens zodanig ingrijpend zijn dat deze ook als transitie kunnen worden aangemerkt.

Kenmerken van de huidige situatie

Uitgangspunt zijn de huidige landbouwpraktijk en het huidige landgebruik. In het kader van deze studie wordt deze hier niet verder beschreven. Wel wordt ingegaan op de belangrijkste bronnen van methaan en lachgas. Methaan is afkomstig van dieren en komt grotendeels vrij via de uitademing bij het verteren van ruwvoer door runderen (pensfermentatie) en voor een ander belangrijk deel vanuit de mestopslag in de mestkelders en mestsilo's (buitenopslag). De belangrijkste bronnen van lachgas zijn het gebruik van rundvee- en varkensmest en kunstmest op landbouwbodem, de opslag van mest, mest- en urine-uitscheiding tijdens beweiding. Daarnaast zijn er nog indirecte bronnen (afkomstig van ammoniak en nitraatuitspoeling) en overige bronnen (veengronden, gewasresten). In CO₂-equivalenten heeft methaan met 70 procent het grootste aandeel in de overige broeikasgassen afkomstig van landbouw. Lachgas is verantwoordelijk voor de overige 30 procent. Binnen de veehouderij heeft de melkveesector het grootste aandeel in de emissie van zowel methaan als lachgas.

Acties en maatregelen voor de komende jaren in het transitieproces

Ondersteunende acties en maatregelen in het transitieproces

- Zoals hiervoor vermeld is de voedingsketen als geheel geen onderdeel van de functionaliteit. Gezien het potentieel grote belang ervan voor het klimaatbeleid noemen we hier toch twee mogelijk belangrijke acties:
 - In de voedingsketen vraagt een productgerichte of consumptiegerichte benadering een groot maatschappelijk draagvlak. Activiteiten in de vorm van het beter in beeld brengen van de CO₂-emissie van voedingsproducten, onderzoek naar novel protein foods, tegengaan van voedselverspilling, experimenten met en voorbeelden van consumptieveranderingen in de praktijk of beleidsimpulsen daartoe en communicatie kunnen daaraan bijdragen, ook via het meeliften met andere aspecten als gezondheid en gemak.
 - Zoals hiervoor is aangegeven is de bijdrage van biobrandstoffen op basis van landbouwgewassen om redenen van duurzaamheid in de EU aan een (afnemend) maximum gebonden. Een dergelijke duurzaamheidsbeoordeling is er niet voor veevoer. Dat is minder gebaseerd op een verschillend maatschappelijk belang van veevoer en bio-energie of verschillende klimaateffecten dan op het feit dat veevoer al lang al op de markt was voordat er sprake was van klimaatbeleid. Bovendien worden biobrandstoffen mede gepropageerd vanwege een verondersteld positief klimaateffect. Het kan in de huidige situatie echter zinvol zijn te verkennen hoe de duurzaamheidseffecten van veevoer ook in beleid kunnen worden meegenomen.

Implementatiepaden van emissiereducerende opties met groot potentieel voor de toekomst

- Productief bosbeheer, geen ontbossing, meer reservaten en aanplant van nieuwe bossen op landbouwgrond en natuurterreinen (anders dan bos), kan op termijn leiden tot een grotere voorraad en een grotere opname van CO₂ in bossen. Met als neveneffect van nieuw bos ook een afname van de landbouwemissies. Het meer dan voorheen toepassen van hout in woningen en in grond-, water en wegebouw biedt mogelijkheden voor duurzame vastlegging en vermeden emissie door vervanging van staal en beton.
- Ten behoeve van de gangbare landbouw (melkveehouderij) worden veengronden ontwaterd. Dit leidt tot oxidatie en inklinking waardoor de veenbodem daalt. Dit noodzaakt tot steeds verdere grondwaterspiegeldaling (en daardoor weer verdere bodemdaling en CO₂-emissie). Door technische maatregelen w.o. (druk)onderwaterdrainage en peilfixatie kan de bodemdaling en de daarmee samenhangende emissie worden verminderd.

Met herbestemming tot natuur of natte landbouw kan de bodemdaling tot stilstand worden gebracht. Het verdient aanbeveling daarbij de mogelijke effecten op N₂O-emissie (lager) en CH₄-emissie (hoger) mee te nemen. Bij plasdras neemt de emissie van methaan toe. Een grotere vastlegging van organische stof in landbouwbodems is een optie die vanuit mitigatie belangrijk is maar ook kan bijdragen aan verbeterde productie. Dat kan door minder te ploegen, reststromen op het land te laten, organisch materiaal aan te voeren, vanggewassen en stikstofbinders toe te passen en door grasland minder vaak te scheuren. Deze maatregelen dragen bij aan grotere voorraad van koolstof en hebben een positief effect op de productie.

- Kijken we met een meer integrale blik naar de opties dan gaat het om verschuivingen in landgebruik, zowel in landgebruikstype als intensiteit. In veengebieden gaat het om een andere bedrijfsvoering welke is aangepast aan een ander waterbeheersysteem. In moerige gronden om een ontwikkeling naar meer permanente bedekking (grasland) en minder intensieve grondbewerking (akkerbouw). In de akker- en tuinbouw een trend naar meer koolstofopbouw in de bodem en het toepassen van vanggewassen en stikstofbinders (akkerbouw). Het gaat dus feitelijk om twee opgaven: het tegengaan van verdroging en een meer permanente bodembedekking. Verdroging leidt voor afbraak van organisch materiaal en dat staat haaks op zowel de adaptatieopgave als de mitigatieopgave.
- Veranderingen in landgebruik of een lagere productie kan leiden tot verschuiving van landbouwactiviteiten naar over de grens en daarmee een (mogelijk extra) toename van emissies buiten Nederland. Dit is vergelijkbaar met het ILUC-effect (Indirect Land Use Change) bij de productie van gewassen voor biobrandstoffen, reden waarom hiervoor in het EU-beleid voor hernieuwbare energie een maximale bijdrage is genoemd die stap voor stap wordt verlaagd. Daarom is het belangrijk de effecten vooraf integraal in beeld te brengen en consensus te bereiken over de duurzaamheid van de maatregel.

Overige maatregelen gericht op emissiereductie op de korte termijn

- De maatregelen in de veehouderij en bij bemesting van landbouwbodem betreffen ofwel toegevoegde maatregelen (mestvergisting of methaanafbraak in afgezogen lucht van afgedekte buitenopslagen van mest of van stallucht) of procesoptimalisatie (rantsoenaanpassingen inclusief diervoeradditieven, levensduurverlenging bij melkkoeien, precisiebemesting en inzet van nitrificatieremmers). Vanuit een puur technisch oogpunt zijn er weinig belemmeringen om een aantal van deze opties al in de komende jaren in te zetten. Zo kan er bij mestopslag een flinke reductie worden bereikt. Het principe daarbij is dat de mest zo snel mogelijk uit de stal en de mestkelder verwijderd wordt en een nabehandeling ondergaat die leidt tot verdere methaanreductie. Voor toepassing van grootschalige monomestvergisting als nabehandeling is het van belang eerst meer zicht te hebben op integrale milieu-effecten, zoals lekverliezen (methaan, lachgas) en gevolgen van bemesten met digestaat (waar een deel van de koolstof uit onttrokken is). Bij methaanoxidatie zijn er minder of geen neveneffecten op milieu. Door deze maatregel toe te passen bij vervanging van stallen na afschrijving kunnen de meerkosten beperkt blijven. Versnelde implementatie is een mogelijkheid, maar leidt tot hogere kosten, die overigens nog altijd lager zijn dan voor monomestvergisting. Punt van aandacht bij deze maatregel is uitvoeren van praktijkexperimenten (nog nauwelijks toegepast) en de impact van oxidatie op de wijze waarop de stikstof vrijkomt. Voor beide maatregelen vraagt de ruimtelijke inpassing van de buitenopslagen en vergistingstanks aandacht.
- De inzet van voeradditieven en nitrificatieremmers kent beperkingen en risico's die goed onderzocht moeten worden. Het technisch potentieel lijkt nog ver af te staan van het potentieel waarbij het draagvlak en eventuele risico's worden meegewogen. Stalluchtzuivering is een techniek die nog in de kinderschoenen staat en bovendien hoge kosten en een beperkte reductie met zich meebrengt. De techniek kan worden toegepast bij halfopen stallen (i.v.m. dierenwelzijn) bij melkkoeien die permanent op stal staan. Dat is in 2050 grofweg de helft van de dieren volgens de WLO-scenario's. Huidig beleid is erop gericht om meer melkkoeien te beweiden in verband met dierenwelzijn en daar staat deze techniek dus haaks op.
- Met beheersmaatregelen op landbouwgronden (onder meer veengronden) en in natuurgebieden en bij groenvoorzieningen kan door het vasthouden en vastleggen van koolstof al voor 2030 een deel van de op de lange termijn denkbare emissiereductie worden gerealiseerd.

- Er is in de huidige situatie sprake van een netto opname van CO₂ in de Nederlandse bossen (van 2,7 Mton per jaar) maar deze opname neemt geleidelijk af en zou in 2030 al een 0,5 Mton lager kunnen zijn. Met aanvullende beheersmaatregelen w.o. productie-
ver bosbeheer, bosreservaten en minder ontbossing zou dit kunnen worden gecompenseerd.
- Als de optie voor betere benutting van reststromen in de bodem (o.a. stro, bietenloof) en de optie om meer organisch materiaal aan te voeren (o.a. zomermaaisel uit natuur) naar de landbouwakkers wordt gecombineerd, ontstaat een functionele keten rond organische stof. Dit vraagt om de verkenning van vraag- en aanbod en analyse van de potentie van een efficiënt markt- en transportsysteem.

Tabel 3.7. Overzicht van emissiereducerende maatregelen die mogelijk kunnen worden ingezet in de periode tot 2030 voor landbouw.

Maatregelen belangrijk voor het transitieproces	Indicatie van de potentiële emissiereductie (Mton CO ₂ -eq)*	Indicatie van de kosten (euro/ton CO ₂ -eq)	Overwegingen
Productie novel protein foods	-		Het emissie-effect in Nederland is onzeker; de mate waarin vermindering van de veestapel plaatsvindt, is daarvoor bepalend
Aanvullende maatregelen			
Monomestvergisting (dagelijkse afvoer van 90% van de drijfmest) <i>of</i> Methaanoxidatie (dagelijkse afvoer 70% van de drijfmest)	3,6 (vermeden CH ₄ -emissie (daarnaast 1: vermeden CO ₂ -emissie door vervanging aardgas) 2,5	~200 ~5**	
Stalluchtzuivering	1	~700	Combinatie met monomestvergisting
Levensduurverlenging melkkoeien	0,5	~5	
Nitrificatieremmers	0,4	50-100	
Precisiebemesting	0,4	~100	
Rantsoenaanpassingen melkkoeien	1,7	100-200	

* emissiereductie is afhankelijk van de veronderstelde omvang van de veestapel en kan daarom voor verschillende zichtjaren en bij verschillende scenario's iets anders uitpakken. In 2050 zal potentiële emissiereductie in WLO-Hoog scenario lager uitvallen (max -5,5 OBG reductie ipv max 6,6 reductie OBG in 2030) omdat daarin verondersteld is dat de veestapel kleiner is dan in 2013 en in 2030. (-10% melkkoeien, -25% varkens en -10% pluimvee).

**bij versnelde implementatie bij bestaande stallen worden kosten hoger, maar wel lager dan die van monomestvergisting

Tabel 3.8. Overzicht van emissiereducerende maatregelen die mogelijk kunnen worden ingezet in de periode tot 2030 voor landgebruik (LULUCF); in het referentiebeeld voor 2030 is de netto LULUCF-emissie projectie 6,5 Mton CO₂.

Maatregelen belangrijk voor het transitieproces	Indicatie van de potentiële emissiereductie (Mton CO ₂ -eq)	Indicatie van de kosten (euro/ton CO ₂)	Overwegingen
Bosuitbreiding door omzetting van landbouwgrond en natuurterreinen (anders dan bos) in bos.	0,5 – 1,0 door vastlegging in nieuwe bossen (1,0 door vermeden emissie landbouw; niet meegeteld)	>200 voor aanplant (m.n. kosten aankoop grond en aanplant)	Snel CO ₂ vastleggen in de bossen en met neveneffect het vermijden van emissie landbouw. Reductie potentie is sterk afhankelijk van de aanplantsnelheid en plantkeuze.
Aanvullende maatregelen			
Productief bosbeheer, reservaten en minder ontbossing	0,5	gering	Meer investeringen maar ook meer opbrengst
Managementmaatregelen op (minerale) landbouwgronden voor meer C-vastlegging	0,6	~50	Geleidelijke opbouw koolstof door aanvoer, vastleggen via vanggewassen
Beheersmaatregelen voor organische gronden (veenweiden)	0,8	20-40	Met name door het toepassen van drukdrainage systeem
Beheersmaatregelen voor organische gronden (moerige gronden)	0,5	50-100	Beperken bodembewerking en stimulan bodembedekking
Beheersmaatregelen overige natuur (niet bos) en groenvoorzieningen	0,1	50-100	Extra vastleggen en aanplant (potentieel erg onzeker, nadere analyse gewenst, inclusief verkenning potentie van aquatische systemen)
vastleggen koolstof in woningen en grond-, water en wegebouw	0,1	gering	Vermeden emissie en duurzaam vastleggen

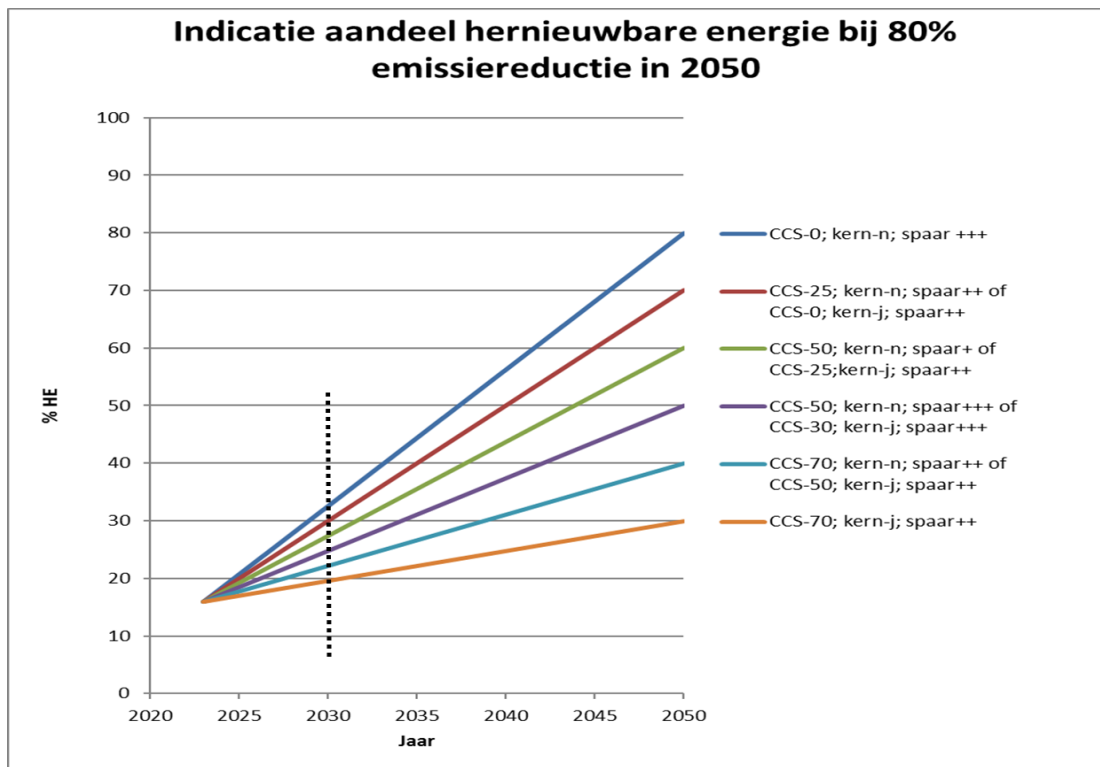
3.8 Korte termijn acties voor centrale regie

Sommige acties of ambities voor de korte termijn overstijgen het niveau van de individuele functionaliteiten of aanbodsectoren. Dat kunnen zijn meer algemeen geformuleerde ambities voor de korte termijn, aanvullend op doelen voor broeikasgasemissies, zoals voor hernieuwbare energie of energiebesparing. Maar er zijn ook acties die juist te maken hebben met afwegingen tussen functionaliteiten over de inzet van schaarse, beperkt beschikbare potentiële zoals biomassa en CO₂-opslagcapaciteit. Ook bij voldoende beleidsprykkels voor CO₂-emissiereductie leidt de besluitvorming van burgers en bedrijven dan niet altijd tot de uitkomst die voor Nederland als geheel de beste is.

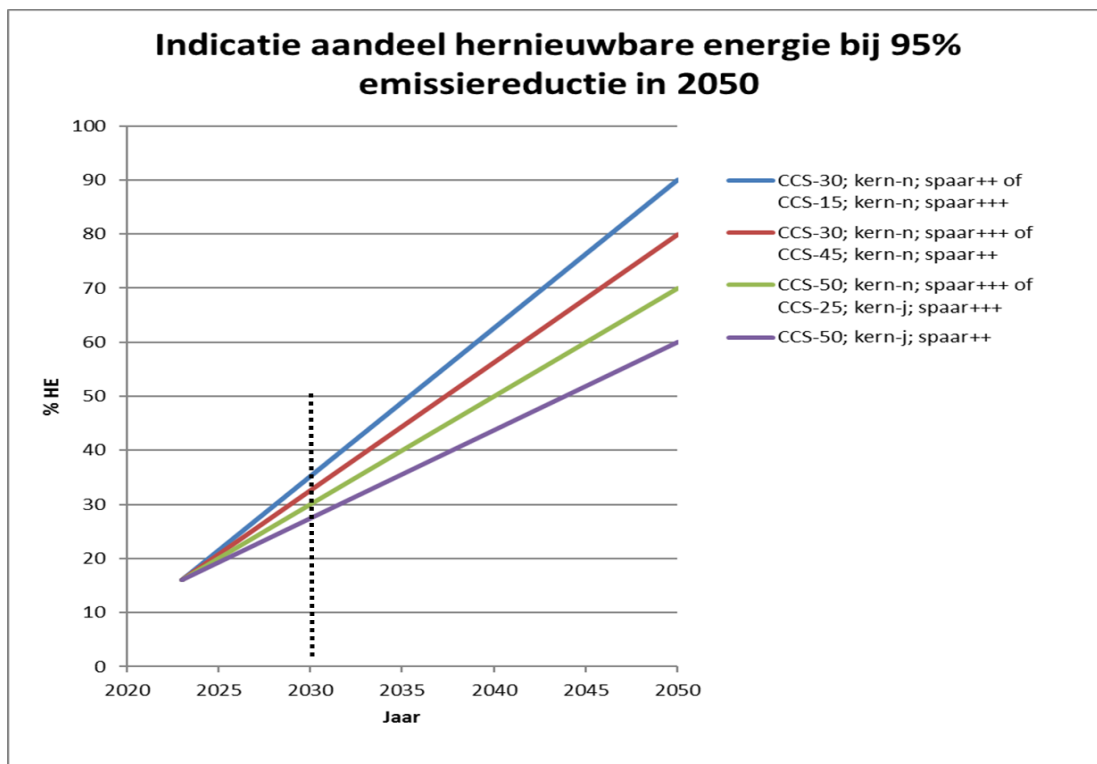
3.8.1 Aandeel hernieuwbare energie

In 3.3 is op basis van een lineaire ontwikkeling in de tijd afgeleid tussen 2014 en 2050 afgeleid wat de daarbij behorende emissiewaarden in 2030 zijn. Eenzelfde benadering kan ook worden gekozen om indicaties te krijgen over het aandeel hernieuwbare energie in 2030. Als

beginpunt is daarvoor het jaar 2023 gekozen, waarin een aandeel hernieuwbare energie van 16 procent het beleidsdoel is volgens de afspraak hierover in het Energieakkoord. Voor 2050 zijn de waarden afgeleid uit figuur 2.6 en de inzichten over de afhankelijkheid van het benodigde aandeel hernieuwbare energie van andere ingezette technische opties. Figuur 3.3 laat (lineaire) ontwikkelingen zien gericht op 80 procent emissiereductie en figuur 3.4 voor 95 procent emissiereductie. Voor beide wordt ook indicatief aangegeven wat de bijdrage in 2050 is van CCS, wel of geen kernenergie (volgens variant max nucleair) en technische besparingsmaatregelen bovenop de autonoom te verwachten efficiencyverbeteringen (van spaar+ met beperkte aanvullende maatregelen tot spaar+++ met maximale inzet van het technisch potentieel). Afhankelijk hiervan varieert het aandeel hernieuwbare energie in 2030 voor het 80 procent reductie scenario van 20 tot 33 procent in 2030 en voor het 95 procent reductie-scenario van 27 tot 35 procent. Voor een reductie van 95 procent in 2050 betekenen de geschetste lineaire ontwikkelingen een jaarlijkse toename van het aandeel hernieuwbare energie met 1,6 tot 2,7 procentpunt. Ter vergelijking de gemiddelde toename tussen 2013 (Energieakkoord en 2023 (doel van 16 procent) bedraagt 1,2 procentpunt per jaar. Als die ontwikkeling zou worden doorgezet zou in 2050 een aandeel hernieuwbare energie van ongeveer 48 procent worden bereikt. Voor de 80 procent reductie ontwikkelingen varieert de jaarlijkse toename tussen 0,5 en 2,4 procentpunt.



Figuur 3.3. Lineaire ontwikkeling van het aandeel hernieuwbare energie gericht op 80 procent emissiereductie in 2050, bij verschillende inzet van andere opties als CCS, kernenergie en besparing.



Figuur 3.4. Lineaire ontwikkeling van het aandeel hernieuwbare energie gericht op 95 procent emissiereductie in 2050, bij verschillende inzet van andere opties als CCS, kernenergie en besparing.

3.8.2 Energiebesparing

In 3.5 zijn vele maatregelen genoemd die bijdragen aan energiebesparing. Op vele punten zijn er nog mogelijkheden het huidige systeem efficiënter te maken. Voertuigen kunnen lichter en aerodynamischer met nog zuiniger motoren, woningen en gebouwen kunnen beter worden geïsoleerd, elektrische apparaten kunnen zuiniger, de energieverliezen bij industriële processen kunnen verder worden beperkt en ook de energievoorziening zelf kan efficiënter zoals is gerealiseerd met WKK. Dit zijn in feite vooral maatregelen die het bestaande systeem optimaliseren. Daarvoor is geen ingrijpende transitie nodig. De kosten variëren overigens sterk. Een belangrijk aandachtspunt, zeker bij grotere investeringen, is echter dat optimalisatie van het bestaande systeem de noodzakelijke transitie niet in de weg mag staan.

Systeemvernieuwing kan ook samengaan met energiebesparing. Elektrificatie is daarvan een belangrijk voorbeeld (dat overigens ook bijdraagt aan meer hernieuwbare energie). Elektrische voertuigen bieden niet alleen de mogelijkheid van emissievrije mobiliteit, ook de finale energievraag (in de vorm van elektriciteit) is lager dan de brandstofvraag van verbrandingsmotoren⁸. Ook bij elektrische warmtepompen tegenover gasketels is de geleverde energie lager, maar dit is geen "echte" besparing: er vindt winning van hernieuwbare warmte plaats. In de industrie is de energievraag van innovatieve, alternatieve processen meestal lager dan van geoptimaliseerde bestaande processen. Daartegenover staat dat een emissiebeperkende maatregel als CCS tot extra energiegebruik leidt. Het brede scala aan besparingsopties, die

⁸ Of dit ook tot een daling van de totale (primaire) energievraag leidt hangt sterk af van de rest van het energiesysteem. Bij een verbrandingsmotor zijn er grote omzettingsverliezen in de auto zelf. Bij een elektrische auto verplaatsen die omzettingsverliezen zich in de huidige situatie naar de fossiele elektriciteitscentrales, waardoor de daling van de totale energie-inzet zeer beperkt is. In een toekomstig systeem met voornamelijk elektriciteit uit wind en zon is er wel een grote daling van de totale vraag. Dat geldt met de bestaande rekenregels weer niet als kernenergie de belangrijkste bron van elektriciteit is.

aangrijpen op verschillende punten in het energiesysteem, betekent ook dat de definitie van energiebesparing sterk bepalend is voor de maatregelen die daaraan bijdragen.

In de voor de klimaatdoelen vereiste transitie zullen niet alle elementen van het bestaande systeem worden vervangen door nieuwe concepten. Tot op zekere hoogte vullen optimalisatie van het bestaande systeem en systeeminnovatie elkaar aan. Er kunnen echter situaties zijn waarin een keuze voor vernieuwing cruciaal is om voor 2050 de transitie te hebben gerealiseerd, ook al zouden er op de korte termijn goedkopere opties zijn in de vorm van optimalisatie van het bestaande systeem.

In de WLO zijn twee scenario's uitgewerkt die leiden naar een emissiereductie van 80 procent, beide met een hoge economische groei van gemiddeld 2 procent over de periode tot 2050. In tabel 2 is aangegeven welke mate van energiebesparing in die scenario's is opgenomen. Ook met het model E-Design zijn analyses uitgevoerd, maar dan in scenario's met 1 procent economische groei.

Tabel 3.9. Vermindering van het finale energiegebruik in twee scenario's die leiden naar 80 procent emissiereductie in 2050 (WLO 2015, E-Design analyse).

Scenario	Emissiere- ductie in 2050 (%)	Vermindering finale energiegebruik t.o.v. 2013		
		In 2030 %	In 2050 %	%/jaar 2013- 2050
WLO Centraal	80	12	25	0,76
WLO Decentraal	80	17	36	1,2
E-Design analyses	80	1-20	2-40	0,05-1,35
	95	7-25	15-45	0,45-1,6

Maatregelpakketten uit PBL en ECN-notitie van april 2017, Nationale kosten energietransitie in 2030, komen op een afname van het finale energiegebruik over de periode 2020-2030 van 0,7-1 procent/jaar (basispad met voorgenomen beleid 0,2 procent). De besparingspercentages per jaar geven de absolute vermindering van het eindverbruik weer binnen de context van scenario's met groeiende economie. Groei betekent zonder technische verbeteringen een toename van het energiegebruik. Dat betekent dat met de energiebesparingsmaatregelen ook moet worden gecompenseerd voor deze groei (2 procent in de WLO-scenario's en 1 procent in de E-Design analyses). De besparing die de relatieve vermindering van het energiegebruik ten opzichte van de economische groei aangeeft ligt procentueel dus hoger dan de weergave in bovenstaande tabel.

De resultaten in tabellen 2 laat een brede range voor de mate van extra energiebesparing zien. Dit wekt de suggestie dat een beperkte mate van extra energiebesparing kan worden opgevangen door andere maatregelen waarmee alsnog het gewenste emissieniveau wordt bereikt. Dat is ook het geval, zij het dat naarmate er minder besparing wordt gerealiseerd het risico dat de alternatieven onvoldoende potentieel blijken te hebben groter wordt. Het realiseren van 95 procent emissiereductie in 2050 is zonder een flink pakket aan extra besparingsmaatregelen bijna onmogelijk.

3.8.3 Biomassa

Het toekomstige aanbod van biomassa vormt voor de energietransitie een van de belangrijkste onzekerheden. Dat geldt voor de toekomstbeelden in 2050 maar ook voor tussentijdse situaties. De inrichting van een nationaal maar zeker ook mondiaal systeem waarin meer van

de potentieel beschikbare biomassa ook daadwerkelijk beschikbaar komt en duurzaamheids-criteria alsmede de handhaving daarop voldoende geregeld en gegarandeerd zijn kost immers tijd.

Ook bij biomassa is er sprake van een beperkt beschikbare resource, maar hier is wel sprake van een mondiale markt die de schaarste vertaalt in een prijs. Een goede marktwerking leidt in principe tot een optimale allocatie van de beschikbare biomassa over verschillende landen en toepassingen. Een goede marktwerking is echter niet vanzelfsprekend. De met OPERA doorgerekende varianten laten al zien dat een beperkte beschikbaarheid van biomassa het lastiger en waarschijnlijk duurder maakt om de einddoelen te bereiken. Daarin is nog niet de biomassavraag voor de lucht- en scheepvaart en als grondstof voor de industrie meegenomen. De laatstgenoemde toepassing leidt overigens slechts tot een zeer beperkte emissiereductie binnen Nederland, omdat een groot deel van de koolstof uit de biomassa in product voor de export (kunststof) terecht komt en in sommige producten zoals bouwmaterialen voor lange tijd wordt vastgelegd. In de in Nederland gehanteerde cascaderingsfilosofie krijgt bovendien de inzet van biomassa voor andere toepassingen dan energievoorziening waar mogelijk prioriteit. E-Design analyses inclusief lucht- en scheepvaart laten zien dat in 80 procent beelden minimaal 300 PJ biomassa nodig is (PBL en ECN 2011) en in de meeste varianten is de vraag nog groter en dat in nog sterkere mate in 95 procent beelden. Indicatieve cijfers over toekomstige beschikbaarheid kennen een grote onzekerheid maar laten een spanningsveld zien met die mogelijke vraag (PBL 2014). Daarom zijn acties van belang die erop zijn gericht het potentieel van duurzame biomassa in Nederland en over de grenzen optimaal te benutten en voor Nederlandse toepassing geschikt te maken.

3.8.4 Afvang en opslag van CO₂

De afvang en opslag is een optie die al in 2030 in meerdere functionaliteiten een grote rol kan spelen voor de emissiereductie. In tabel 3.10 zijn de denkbare maatregelen met hun technische potentiëlen qua emissiereductie zoals genoemd in de paragrafen 3.6 en 3.7 bijeengebracht. Die technische potentiëlen zijn gebaseerd op de huidige emissies bij zodanig grote bronnen dat afvang van CO₂ een optie is. Daarnaast zijn er opties voor nieuwe processen waarbij CO₂ kan worden afgevangen.

In het licht van de binnen Nederland beschikbare opslagcapaciteit zijn de in tabel 3.10 aangegeven hoeveelheden tamelijk groot. Eerst voor de hand liggend is opslag op het Nederlandse deel van de Noordzee, waar ruwweg 25-30 Mton/jaar kan worden opgeslagen voor een periode van 50 jaar en het dubbele voor een periode van 25 jaar. Voorlopig is het beleid dat van opslag op land wordt afgezien. Afgezien van het Slochterenveld zou opslag op land een extra opslagcapaciteit van zo'n 20 Mton/jaar voor 50 jaar kunnen bieden. Het Slochterenveld zou nog veel meer capaciteit kunnen hebben, maar is zeker voorlopig uiterst onzeker. Resteert de optie van export, waarbij aquifers in het Noorse deel van de Noordzee een groot opslagpotentieel bieden, de mogelijke basis voor een oplossing op West-Europees niveau. Voor dit rapport zijn eventuele voors en tegens hiervan niet nader bekeken.

De goedkoopste oplossing voor het hele systeem is in sommige gevallen niet hetzelfde als de goedkoopste oplossing voor de burgers en bedrijven die die oplossing toe moeten passen. Een concreet voorbeeld is te vinden bij de primaire staalproductie. Toepassing van CCS is voor het bedrijf de goedkoopste oplossing, maar bij beperkte beschikbaarheid van CO₂-opslagcapaciteit gaat dit ten koste van de mogelijkheden voor CCS elders en dat leidt per saldo tot hogere kosten. Ook bij andere toepassingsmogelijkheden voor CCS kan deze discrepantie tussen individuele afwegingen en het collectieve belang een rol spelen.

Tabel 3.10. Technische potentiëlen voor toepassing van CCS.

Functionaliteit of aanbodsector	Maatregel	Potentiële emissiereductie in in Mton CO ₂	Type maatregel
Vorbereidende maatregelen			
Algemeen	Organisatie van transport, opslag en beheer en inrichting infrastructuur voor transport	-	Inrichting systeem
Bestaande bronnen van CO₂			
Elektriciteits-voorziening	CCS bij kolencentrales ervan uitgaande dat ze niet worden gesloten	16 - 22	Maatregel voor de korte termijn en alleen als kolencentrales niet worden gesloten; optie komt niet of nauwelijks in 2050-beelden
	CCS bij gascentrales op basis van huidige productie	6 - 8	Vooraf maatregel voor de korte termijn; optie komt niet of beperkt in 2050-beelden
Raffinaderijen	CCS bij raffinaderijen, inclusief waterstof voor raffinage	5 - 8	Korte en mogelijk ook onderdeel transitie; rol van olieraffinaderijen in 2050 in Nederland is erg onzeker
Hoge temperatuurwarmte	CCS bij staalindustrie, inclusief cokesproductie en gebruik restgassen	4 - 7	Toepassing bij huidige productie of Hisarna-proces; het is een tussenmaatregel als in de toekomst wordt overgestapt op elektrolytisch proces
	CCS bij NH ₃ - en H ₂ -productie	1 - 2	Vooraf maatregel voor korte termijn; in 2050 zijn naar verwachting CO ₂ -vrije processen beschikbaar
	CCS bij overige industriële processen en warmteproductie bij bedrijven	7 - 14	Toepassing bij processen waarvoor een alternatief CO ₂ -arm in 2050 onwaarschijnlijk
Totaal bestaand technisch potentieel bij bestaande bronnen		39 - 61	
Nieuwe potentiëlen			
Productie vloeibare biogene brandstoffen	Toepassing van CCS bij grootschalige productie biotransportbrandstof	~0,14 per PJ biodiesel	Nieuw proces (reductie in de vorm van negatieve emissies)
Productie gasvormige biogene brandstoffen	Toepassing van CCS bij grootschalige productie van groen gas	~0,1 per PJ biomethaan	Nieuw proces (reductie in de vorm van negatieve emissies)
Productie waterstof	Toepassing CCS bij productie waterstof uit methaan (of biomassa) voor energiedoeleinden	~0,06 per PJ waterstof	Aanvullende capaciteit; wegname van potentieel extra emissies

Acties en maatregelen voor de komende jaren in het transitieproces

Bij CCS leiden voldoende prikkels op de reductie van CO₂-emissies niet automatisch tot de optimale verdeling van de CO₂-opslagcapaciteit en biomassa. Het verdient aanbeveling om in kaart te brengen waar dit risico substantieel is. Verder is mogelijk aanvullende regie of beleid nodig om tot een goede verdeling te komen. Een te overwegen actie is nader onderzoek naar de beleidsopties daartoe, met bijvoorbeeld een verkenning naar de mogelijkheid van veiling van CO₂-opslagcapaciteit, omdat dit bij bedrijven leidt tot een afweging tussen de meerkosten van alternatieven die geen CO₂ gebruiken en de prijs van CO₂-opslag. Een aandachtspunt hierbij is de concurrentiepositie van bedrijven; idealiter vindt het ontwerp van verdelingsmechanismen in Europees verband plaats.

4 Referenties

- Aalbers R., G. Renes en G. Romijn (2016). WLO-klimaatscenario's en de waardering van CO₂-uitstoot in MKBA's, Den Haag: CPB/PBL.
- Van den Born, G.J. et al. (2016). Dalende bodems, stijgende kosten. Den Haag: PBL.
- CBS (2015), Prognose bevolking kerncijfers, 2015-2060, CBS statline.
- CE Delft (2014). Economische ontwikkeling en energie-intensieve sectoren, Publicatienummer: 14.7C19.57, Delft: CE Delft.
- CE Delft (2015). Visie 2030 Glastuinbouw.
- CE-Delft (2016). Kansrijk beleid voor CCS - Bijdrage aan het programma Kansrijk Energie- en Klimaatbeleid.
- CE-Delft (2016). Kansrijk beleid voor CO₂-reductie van de industrie - Bijdrage aan het programma Kansrijk Energie- en Klimaatbeleid.
- CE Delft (2016). Een klimaatneutrale warmtevoorziening voor de gebouwde omgeving, update 2016.
- CPB en PBL (2015). Toekomstverkenning Welvaart en Leefomgeving - Nederland in 2030 en 2050: twee referentiescenario's.
- Daniëls, B. en R. Koelemeijer (2016). Kostenefficiëntie van beleidsmaatregelen ter vermindering van broeikasgasemissies. Petten/Den Haag: ECN/Planbureau voor de Leefomgeving.
- Daniëls, B.W., Koelemeijer, R., Dalla Longa, F., Geilenkirchen, G., Meulen, J. van der, Smekens, K.E.L. en van Stralen, J. (2014). EU-doelen klimaat en energie 2030: Impact voor Nederland; ECN-E--14-033 NL.
- Daniëls, B., M. Hekkenberg and R. Koelemeijer (2016). Effort sharing regulation; gevolgen voor Nederland. Petten/Den Haag: Energieonderzoek Centrum Nederland/Planbureau voor de Leefomgeving.
- Daniëls, B.W., B. Tieben, J. Weda, M. Hekkenberg, K.E.L. Smekens en P. Vethman (2012). Kosten en baten van CO₂-emissiereductie maatregelen; ECN-E--12-008 NL.
- De Nederlandsche Bank (2016). Tijd voor transitie, een verkenning van de overgang naar een klimaatneutrale economie.
- Drissen, E. (2016). Demografie en Economie in de Nationale Energieverkenning 2015, Publicatienummer 2395. Den Haag/Bilthoven: Planbureau voor de Leefomgeving.
- Ecorys (2016). Evaluatie Warmtewet en toekomstig marktontwerp warmte (in opdracht van Min. EZ). Rotterdam: Ecorys.
- Hoen, A. en B. Jakobs (2016). Stimuleren elektrisch rijden. Effecten van enkele beleidsprikkeles, Den Haag: PBL.
- Hoogervorst, N. (2017). Toekomstbeeld klimaatneutrale warmtenetten in Nederland, Den Haag: PBL.
- Joode, J. de, Daniëls, B.W., Smekens, K.E.L., Stralen, J. van, Dalla Longa, F., Schoots, K., Seebregts, A.J., Grond, L., Holstein, J. (2014). Exploring the role for P2G in the future Dutch energy system - Background report of the TKI P2G system analysis project; ECN-E--14-026 EN.
- Koelemeijer, R., P. Koutstaal, B. Daniëls en P. Boot (2017). Nationale kosten energietransitie in 2030, Den Haag: PBL.
- Matthijssen, J., R. Aalbers en R. van den Wijngaart (2015). Toekomstverkenning Welvaart en Leefomgeving - Cahier Klimaat en energie, PBL/CPB, Den Haag.
- Olivier J.G.J., L.J. Brandes and R.A.B. te Molder (2009). Uncertainty in the Netherlands' greenhouse gas emissions inventory Estimation of the uncertainty about annual data and trend scenarios, using the IPCC Tier 1 approach
- PBL (2011). Naar een schone economie in 2050: routes verkend. Den Haag: PBL.
- PBL (2013). De macht van het menu. Opgaven en kansen voor duurzaam en gezond voedsel. PBL.
- PBL (2014). Biomassa: Wensen en Grenzen - PBL Interactive Data Visuals. <http://infographics.pbl.nl/biomassa/>
- PBL (2016). Energietransitie - Joulebak 2050. <http://themasites.pbl.nl/energietransitie/>
- PBL (in prep.). Resultaten van voorbeeldberekeningen met het Vesta-MAIS-model voor de nieuwe WLO-scenario's.
- Pershad H., E. Standen, E. Durusut and S. Slater (2013). The costs of Carbon Capture and Storage (CCS) for UK industry- A high level review, Revised Final Report V3

- Rli (2015). Rijk zonder CO₂: Naar een duurzame energievoorziening in 2050. Raad voor de Leefomgeving en Infrastructuur, Den Haag
- Ros J. (2015). Energietransitie: zoektocht met een helder doel. PBL Den Haag
- Ros, J. en K. M. Schure (2016). Vormgeving van de energietransitie. PBL Den Haag
- Schoots K., M. Hekkenberg en P. Hammingh (2016). Nationale Energieverkenning 2016. ECN-O--16-035. Petten: Energieonderzoek Centrum Nederland.
- SCP (2016). COB Burgerperspectieven 2016 | 4, SCP, Den Haag.
- SER (2013). Energieakkoord voor duurzame groei. Sociaal-Economische Raad, Den Haag.
- UNFCCC (2015). 2015.FCCC/CP/2015/L.9/Rev.1: Adoption of the Paris Agreement. Paris, France: UNFCCC
- Vuuren D. P. van, P. Boot, J. Ros, A. Hof en M. den Elzen (2016). Wat betekent het Parijsakkoord voor het Nederlandse klimaatbeleid? PBL Den Haag.
- Zero Emissions Platform (2015). CCS for industry, Modelling the lowest-cost route to decarbonising Europe.
- Zero Emissions Platform (2011). The Costs of CO₂ Capture, Transport and Storage, Post-demonstration CCS in the EU.

Bijlage 1. Beschrijving van de gebruikte modellen

Dit hoofdstuk geeft inzicht in mogelijke beelden voor 2050 bij 80 of 95 procent reductie van de Nederlandse uitstoot van broeikasgassen. Nieuwe beelden zijn berekend met het OPERA-model (Options Portfolio for Emission Reduction Analysis), dat de kostenoptimale configuratie van het energiesysteem berekent gegeven bepaalde uitgangspunten. Daarnaast zijn eerdere analyses met het door PBL en ECN ontwikkelde model E-design gebruikt om de resultaten breder en robuuster te maken. Verder zijn aparte analyses gedaan voor landgebruik. Het OPERA-model en het model E-Design zijn beide specifiek ontworpen voor systeemintegratievraagstukken. Ze bevatten informatie over kosten en rendementen van technieken, prijzen van energiedragers, de grootte van potentiëlen, de uurpatronen van warmte- en elektriciteitsvraag van sectoren, aanbodpatronen van wind en zon, kosten van infrastructuur en energieverliezen in netten, opslagtechnieken met de karakteristieken van laden, opslag en ontladen etc. De technieken vertegenwoordigen een brede range van bestaande, nieuwe en innovatieve en in sommige gevallen nog deels speculatieve technieken. Het energiesysteem staat daarin centraal, maar andere bronnen en daarbij behorende maatregelen en emissiereductie zijn eraan toegevoegd.

De huidige databases zijn beperkt tot Nederland. Dit is vooral van belang voor de mogelijkheden om internationaal vraag en aanbod van elektriciteit op elkaar af te stemmen. De gebruikte modellen kennen geen ruimtelijke details en variaties. Met name bij lage temperatuurwarmte spelen de lokale omstandigheden een belangrijke rol bij wat ter plekke de meest voor de hand liggende of goedkoopste opties zijn.

Specifieke kenmerken en gebruik van het OPERA-model

De kostenoptimalisatie in het OPERA-model houdt rekening met vrijwel alle genoemde factoren die van belang zijn voor de kosten van het energiesysteem. Het grote voordeel van een kostenoptimale oplossing is dat het een heel helder gedefinieerde oplossing is. Het resulterende energiesysteem is immers niet een willekeurige mix van mogelijkheden waarmee Nederland 2050 haar emissiereductiedoelen zou kunnen halen, maar het is – gegeven de veronderstelde mogelijkheden, onzekerheden en de beperkingen van het model - de goedkoopste manier om dat doen. Het betekent ook dat van iedere techniek in de oplossing de status duidelijk is: gegeven de veronderstellingen zou elke andere techniek op die plek tot hogere kosten leiden (voor kanttekeningen bij het gebruik van het model zie tekstbox B1.1). In die veronderstellingen kan de gebruiker van het model ook rekening houden met andere factoren dan kosten die van belang kunnen zijn voor de (maximale) inzet van een techniek of potentieel in 2050. De gebruiker kan het model altijd overrulen als andere dan kostenafwegingen inzet van een techniek of potentieel niet of minder waarschijnlijk maken. De huidige analyse varieert expliciet in de veronderstelde beschikbaarheid van biomassa, CCS, nucleair en wind op basis van andere dan kostenoverwegingen, maar ook bij andere veronderstellingen is soms rekening gehouden met meer dan alleen technische begrenzings. Het is goed om de betrekkelijkheid van de uitkomsten in het oog te houden. De uitkomsten zijn gebaseerd op de huidige inzichten over beschikbaarheid, eigenschappen en kosten. Die inzichten veranderen voortdurend. De uitkomsten zijn daarmee vooral een verzameling beelden die inzicht bieden in welke oplossingsrichtingen voor de hand liggen om verder te verkennen en te onderzoeken, omdat ze niet tot onnodig hoge kosten zullen leiden.

Elektriciteitsvraag en-aanbod vanuit het buitenland zijn in het OPERA-model nu vertegenwoordigd als een extra vraag/aanbodpatroon gebaseerd op de Flexnetstudie. In deze studie heeft het Europese elektriciteitsmarktmodel COMPETES voor het jaar 2050 uurpatronen gegenereerd voor de Nederlandse elektriciteitsimport en -export. Deze patronen zijn redelijk representatief voor een situatie met veel intermitterend hernieuwbaar.

Tekstbox B1.1. Gebruik OPERA-model en kanttekeningen bij de analyses

Voor de analyse heeft OPERA -model kostenoptimale optiepakketten berekend. In korte tijd waren ingrijpende aanpassingen in het model en de database nodig om gegevens te actualiseren en te completeren, om de indeling in functionaliteiten in het model onder brengen, en effecten per functionaliteit te berekenen en in kaart te brengen. Er was hierbij geen gelegenheid om de structuur en data van het model ingrijpend aan te passen, en dat heeft een aantal beperkingen voor de analyses en resultaten tot gevolg. Deze tekstbox zet een aantal belangrijke kanttekeningen op een rij. De eerste drie beperkingen gelden overigens ook voor de gebruikte resultaten van E-design.

- Ruimtelijke differentiatie. Het model kan met meerdere regio's rekenen, of onderscheid maken in subsectoren met een verschillende ruimtelijke structuur. Dit is vooral belangrijk bij de invulling van de LTW, Binnen het tijdbestek van de analyses was dit echter niet mogelijk. Beperkingen aan de levering van restwarmte zijn nu exogeen opgelegd.
- Effect gebouwisolatie op warmtevraagpatronen. Uit eerdere studies is bekend dat (vergaande) isolatie van gebouwen zorgt voor afvlakking van het warmtevraagpatroon. Het is wel mogelijk dit in OPERA op te nemen, maar dat kon niet binnen de beschikbare tijd. Naar verwachting maakt het energiebesparing aantrekkelijker omdat het leidt tot lagere kosten voor warmtepompen en infrastructuur.
- Processen in OPERA hebben vaak standaardkarakteristieken: kosten, rendementen, CO₂-afvangpercentages. In werkelijkheid is er meestal enige ruimte om een techniek zo te configureren dat de eigenschappen het best aansluiten bij de omstandigheden. Vaak is er een uitruil tussen verschillende karakteristieken: bij bijvoorbeeld hele hoge CO₂-schaduw prijzen ligt het voor de hand om een duurdere variant van een techniek toe te passen met hogere rendementen. Het model kent bij een aantal technieken variatie in de karakteristieken. Zo zijn er meerdere varianten van CCS-technieken, met hogere kosten en hogere CO₂-afvangpercentages. Daarnaast heeft een aantal technieken operationele flexibiliteit, waarmee het model de inzet van de techniek kan aanpassen aan de omstandigheden. Dit is vooral van belang bij hybride technieken, WKK en technieken met variabele brandstofverhoudingen.
- Onderscheid temperatuurniveaus warmte. Het huidige model onderscheidt wel hoge en lage temperatuurtoepassingen met bijbehorende processen, maar maakt in de energiedragers geen onderscheid naar hoge en lage temperatuurwarmte. Dit maakt voor de resultaten van het model meestal niet zo veel uit: in het model is de toepasbaarheid van technieken beperkt, mede op grond van het temperatuurniveau dat ze kunnen leveren, en de match met het gevraagde temperatuurniveau. Het levert wel een onnauwkeurigheid op bij de boeking van energiegebruik en emissies bij warmteleveringen tussen functionaliteiten: hierbij zijn hoge – en lage temperatuurwarmtestromen niet te onderscheiden. Ook maakt het model hierdoor bij besparing geen onderscheid tussen vermindering van de warmtevraag en terugwinning van (lage temperatuur) restwarmte. Hierin zit dus een bepaalde onnauwkeurigheid en overlap.

Het model zorgt voor ieder tijdslot voor aansluiting van vraag en aanbod. Bij intermitterend aanbod van wind en zon berekent het model ook de benodigde –goedkoopste – aanpassingen in het systeem om die aansluiting mogelijk te maken: netwerken, opslag, demand side management, curtailment. De resulterende kosten en mix van opties omvat dus ook de inpassingskosten voor wind en zon.

Buitenlandse potentiëlen zijn verder vertegenwoordigd in de vorm van importen van energiedragers (aardgas, olie, kolen en biomassa). Voor buitenlandse biomassa gaan de huidige berekeningen alleen uit van ruwe, houtige biomassa, niet van biobrandstoffen. Verdere verwerking/omzetting naar biogene brandstoffen of andere producten vindt in de analyses dus in Nederland plaats.

Bij het doorrekenen van het energiesysteem aggregereert het model de uren tot "timeslices" waarbij uren die veel op elkaar lijken wat betreft vraag en aanbod gecombineerd worden. Dit gebeurt om de rekentijd te beperken. Bij het optimaliseren kiest het model niet alleen in welke technieken het investeert, maar ook hoe het die technieken inzet in de verschillende timeslices.

Specifieke kenmerken en gebruik van het model E-Design

E-design is specifiek ontwikkeld als backcastingtool. Het bevat geen kostenoptimalisatie. De gebruiker ontwerpt het systeem van 2050 en maakt zelf keuzen voor technieken. Ook in dit geval zorgt het model voor de balans tussen vraag en aanbod van de verschillende vormen van energie. In het model zelf zitten geen specifieke besparingsmaatregelen. De energievraag in 2050 is onderdeel van het scenariobeeld van economische activiteiten in 2050 en wordt – inclusief de daarbij veronderstelde energiebesparing - buiten het model om vastgesteld.

Tekstbox B1.2. Achtergrond verschillen uitkomsten OPERA en E-design

De resultaten van beide modellen laten op hoofdlijnen sterk vergelijkbare richtingen zien, en bevestigen daarmee elkaars resultaten. Toch zijn er meer op detailniveau ook wat verschillen. Dat wil niet zeggen dat de modellen elkaar op die punten tegenspreken: Daarvoor zijn er te veel verschillen in de onderliggende aannames van beide modellen. Deze box zet een aantal oorzaken van de verschillen op een rij.

Optimalisatie versus gebruikerskeuze

De resultaten van OPERA zijn gebaseerd op kostenoptimalisatie, die van E-design op de keuzes van de modelgebruiker. De resultaten hebben dus een verschillende status. Bij OPERA komen alleen de (met de in het model opgenomen veronderstellingen) kostenoptimale oplossingen in beeld, en daardoor kunnen technieken die altijd second-best zijn buiten beeld blijven, ook als het verschil in kosten heel klein is. Aan de andere kant is van een oplossing in E-design niet automatisch bekend hoe ver deze verwijderd is van de volgens het model kostenoptimale oplossing. Optimalisatie versus keuze is geen zwart-wit verschil: In OPERA maakt de gebruiker wel keuzes over maximale of minimale haalbaarheid, terwijl bij E-design de gebruiker via trial en error kan uitvinden wat goedkoper of duurder is, en met deze kennis erg dure oplossingen als minder plausibel terzijde kan leggen. Als zodanig geven de E-design resultaten echter geen inzicht in wat meer of minder kostenoptimaal is.

Scenarioverschillen

De resultaten van OPERA en E-design zijn gebaseerd op verschillende scenario's. De E-design aannames voor economische ontwikkeling op de Referentieraming Energie en Emissies 2010-2020 (ECN en PBL 2010) en energieprijzen zijn gebaseerd op IEA scenario's uit 2010. OPERA gebruikt voor de economische ontwikkeling de NEV 2016, en voor de energieprijzen de WLO-2 gradenscenario's. Vooral de hoge biomassaprijzen uit de laatste hebben een forse impact, en leiden tot een lagere inzet van biomassa en biogene brandstoffen. Ook de veronderstellingen voor beschikbare biomassa, CCS, nucleair en wind liggen op iets andere waarden.

Technologiedatabase

Beide modellen gebruiken ongeveer dezelfde basis-set aan opties, met als belangrijk verschil dat in OPERA er wel opties voor energiebesparing zijn die meedraaien in de optimalisatie, terwijl de gebruiker bij E-design exogeen een besparingspercentage moet veronderstellen, en de technische invulling daarvan niet verder bekend is. Verder is OPERA recent geactualiseerd en uitgebreid met een aantal opties die in E-design niet beschikbaar zijn.

De output geeft inzicht in de broeikasgasemissies, de jaarlijkse kosten, de inzet van bepaalde voorraden (zoals biomassa, opslag van CO₂ en geothermie) en van technieken met een mogelijke beperkt potentieel zoals wind, zon en kernenergie. Interactief kan worden toegewerkt naar een ontwerp dat voldoet aan bepaalde uitgangspunten, zoals een resterende emissie maar bijvoorbeeld ook een maximale inzet van biomassa.

Het feit dat de gebruiker zelf tot een bepaalde inzet van technieken komt, maakt het gemakkelijk om rekening te houden met diverse factoren, anders dan kosten, die mogelijk de maximale inzet van zo'n techniek in 2050 zouden kunnen beïnvloeden.

Ook voor E-design geldt dat de bevindingen horen bij de huidige inzichten, en dat met die inzichten ook de bevindingen zullen verschuiven. De kanttekeningen in tekstbox B1.1 (m.u.v. het onderscheid van temperatuurniveaus) gelden ook voor E-design. Voor de vergelijking van de inzichten uit beide modellen is van belang dat OPERA recent is uitgebreid met een aantal technieken die in de gebruikte analyse van E-design nog niet vertegenwoordigd waren. Meer details over de verschillen zijn opgenomen in tekstbox B1.2.

Bijlage 2. Gedetailleerde resultaten van de berekeningen met het OPERA-model

De tabellen B2.1 en B2.2 geven de resultaten van de OPERA-berekeningen van de emissies per functionaliteit in de verschillende varianten voor het gekozen scenariobeeld (en de daarin veronderstelde omvang van activiteiten) in 2050.

Tabel B2.1. Emissies per functionaliteit voor de verschillende varianten bij 80 procent emissiereductie.

Mton CO2-eq	F HT warmte	F Kracht en licht	F LT warmte	F Mobiliteit	F Onbepaald	F Voedsel en natuur
Standaard (253 euro/ton CO2)	9.5	0.7	10.6	12.1	0.0	11.6
Max Biomassa (253 euro/ton CO2)	9.5	0.7	10.6	12.1	0.0	11.6
Min Biomassa (253 euro/ton CO2)	9.5	0.7	10.6	12.1	0.0	11.6
Max CCS (211 euro/ton CO2)	9.8	0.6	10.8	11.7	0.0	11.6
Min CCS (346 euro/ton CO2)	6.8	1.5	10.5	16.8	0.1	8.7
Max Nucleair (253 euro/ton CO2)	9.5	0.7	10.6	12.1	0.0	11.6
MaxWind (253 euro/ton CO2)	9.5	0.7	10.6	12.1	0.0	11.6
Max Biomassa en CCS (211 euro/ton CO2)	9.8	0.6	10.8	11.7	0.0	11.6
Min Biomassa en CCS (346 euro/ton CO2)	6.8	1.5	10.5	16.8	0.1	8.7
Max Biomassa, min CCS (346 euro/ton CO2)	6.8	1.5	10.5	16.8	0.1	8.7
Min Biomassa, max CCS (260 euro/ton CO2)	9.8	0.6	10.8	11.7	0.0	11.6
Max wind, min biomassa en CCS (338 euro/ton CO2)	6.9	1.3	10.4	16.2	0.1	9.6

Tabel B2.2. Emissies per functionaliteit voor de verschillende varianten bij 95 procent emissiereductie.

Mton CO2-eq	F HT warmte	F Kracht en licht	F LT warmte	F Mobiliteit	F Onbepaald	F Voedsel en natuur
Standaard (597 euro/ton CO2)	-1.4	0.6	9.6	-3.3	0.0	5.5
Max Biomassa (483 euro/ton CO2)	-4.4	0.9	7.7	1.1	0.1	5.5
Min Biomassa (1474 euro/ton CO2)	2.5	0.2	7.2	-4.7	0.0	5.9
Max CCS (496 euro/ton CO2)	-9.6	0.2	7.2	7.4	0.0	5.9
Min CCS (3672 euro/ton CO2)	2.4	0.4	3.4	-1.0	0.0	5.8
Max Nucleair (575 euro/ton CO2)	-5.7	0.1	9.0	2.1	0.0	5.5
MaxWind (597 euro/ton CO2)	-5.0	0.3	8.9	1.5	0.0	5.5
Max Biomassa en CCS (295 euro/ton CO2)	-16.7	0.4	6.8	10.9	0.0	9.6
Min Biomassa en CCS (39149 euro/ton CO2)	-0.5	0.1	2.6	2.0	0.0	7.0
Max Biomassa, min CCS (735 euro/ton CO2)	-5.6	0.3	3.5	7.0	0.0	5.8
Min Biomassa, max CCS (676 euro/ton CO2)	2.3	0.2	6.3	-3.5	0.0	5.9
Max wind, min biomassa en CCS (1549 euro/ton CO2)	2.8	0.3	2.6	-0.6	0.0	5.9

Tabel B2.3 toont het percentage hernieuwbare energie en het bruto energetisch eindgebruik volgens de Eurostatdefinities. Volgens de Europese definitie tellen bunkerbrandstoffen voor

de luchtvaart mee voor de noemer van het percentage hernieuwbare energie tot een maximum van 6,18 procent van het bruto energetisch eindgebruik. In deze analyse vallen de luchtvaartbunker buiten de berekeningen. Daarmee is onbepaald of die bunkers in 2050 bestaan uit biobrandstoffen of uit fossiele brandstoffen. De tabel laat daarom voor het bruto energetisch eindgebruik twee percentages zien: de laagste gaat ervan uit van fossiel verbruik voor de bunkers, de hoogste van het gebruik van biobrandstoffen.

Tabel B2.3. Energiegebruik en hernieuwbare energie in de verschillende varianten.

	80%			95%		
	Bruto fi- naal ver- bruik (PJ)	Aandeel hernieuw- baar (%)		Bruto fi- naal ver- bruik (PJ)	Aandeel hernieuw- baar (%)	
		bunkers fossiel	bunkers bi- omassa		bunkers fossiel	bunkers bi- omassa
Standaard	1837	63%	69%	1797	74%	80%
Max Biomassa	1837	63%	69%	1840	79%	85%
Min Biomassa	1837	63%	69%	1805	79%	85%
Max CCS	1851	50%	56%	1808	65%	71%
Min CCS	1846	70%	76%	1788	90%	96%
Max Nucleair	1837	63%	69%	1869	65%	71%
MaxWind	1837	63%	69%	1898	75%	81%
Max Biomassa en CCS	1851	50%	56%	1828	66%	72%
Min Biomassa en CCS	1846	70%	76%	1734	90%	96%
Max Biomassa, min CCS	1846	70%	76%	1816	87%	93%
Min Biomassa, max CCS	1895	50%	57%	1868	65%	72%
Max wind, min bio- massa en CCS	1866	71%	77%	2074	92%	98%

Tabel B2.4. Inzet energiedragers in de 80 procent beelden.

Energie (PJ)	80% Standaard		Min Biomassa		Max CCS		Min CCS		Max Nucleair		Max Wind		Min Biomassa en CCS		Max Biomassa, Biomassa, min CCS		Min Biomassa, Biomassa, max CCS		Max wind, min biomass en CCS		
	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Aardgas	539	539	539	539	658	658	366	366	539	539	539	539	366	366	366	366	720	720	349	349	
Aardwarmte	24	24	24	24	33	33	23	23	24	24	24	24	23	23	23	23	34	34	23	23	
Afval (niet-biogeen)	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	
Biomassa (overig)	39	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	
Biomassa (hout)	112	112	112	112	187	187	124	124	112	112	112	112	124	124	124	124	149	149	118	118	
Kolen	12	12	12	12	153	153	3	3	12	12	12	12	3	3	3	3	136	136	3	3	
Olie (energetisch)	258	258	258	258	326	326	253	253	258	258	258	258	253	253	253	253	300	300	253	253	
omgevingswarmte	243	243	243	243	158	158	263	263	243	243	243	243	263	263	263	263	182	182	254	254	
Uranium																					
Wind	601	601	601	601	418	418	671	671	601	601	601	601	671	671	671	671	445	445	727	727	
Zon	139	139	139	139	131	131	155	155	139	139	139	139	155	155	155	155	131	131	139	139	
Opbouw emissies (Mton CO2-eg)																					
Kolen	1	1	1	1	14	14	0	0	1	1	1	1	14	14	0	0	13	13	0	0	
Olie	19	19	19	19	24	24	18	18	19	19	19	19	24	24	18	18	22	22	18	18	
Aardgas	31	31	31	31	37	37	21	21	31	31	31	31	37	37	21	21	41	41	20	20	
Overige	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
CCS	-25	-25	-25	-25	-50	-50	-10	-10	-25	-25	-25	-25	-50	-50	-10	-10	-50	-50	-10	-10	
OBKG	18	18	18	18	18	18	14	14	18	18	18	18	14	14	14	14	18	18	15	15	
Totaal	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	

Tabel B2.5. Inzet energiedragers in de 95 procent beelden.

Energie (PJ)	95% Standaard		Min Biomassa		Max CCS		Min CCS		Max Nucleair		MaxWind		Max Biomassa en CCS		Min Biomassa en CCS		Max Biomassa, min CCS		Min Biomassa, max CCS		Max wind, min biomassa en CCS		
	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Aardgas	296	193	286	579	50	259	264	463	45	57	710	26											
Aardwarmte	23	23	33	33	77	23	22	34	90	23	34	34											
Afval (niet-biogeen)	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13											
Biomassa (overig)	51	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15											
Biomassa (hout)	299	478	149	299	299	299	299	299	299	299	299	299											
Kolen	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3											
Olie (energetisch)	105	171	124	214	101	134	130	252	105	85	137	120											
omgevingswarmte	274	269	307	137	352	260	258	104	339	319	273	320											
Uranium					525																		
Wind	679	673	686	560	687	605	826	585	687	685	619	1197											
Zon	172	182	227	138	227	139	138	139	277	189	135	165											
Opbouw emissies (Mton CO2-eq)																							
Kolen	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Olie	8	12	9	16	7	10	9	18	8	6	10	9											
Aardgas	17	11	16	33	3	15	15	26	3	3	40	1											
Overige	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1											
CCS	-25	-25	-25	-50	-10	-25	-25	-50	-10	-10	-50	-10											
OBKG	10	11	9	11	9	10	10	15	9	10	9	9											
Totaal	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11											

Tabel B2.6. Kosten per functionaliteit voor de verschillende varianten bij 80 procent emissie-reductie.

Miljard euro/jaar	F HT warmte	F Kracht en licht	F LT warmte	F Mobiliteit	F Onbetaald	F Voedsel en natuur
Standaard	4.2	0.8	0.9	3.0	0.3	0.5
Max Biomassa	4.2	0.8	0.9	3.0	0.3	0.5
Min Biomassa	4.2	0.8	0.9	3.0	0.3	0.5
Max CCS	2.1	0.8	0.7	3.0	0.2	0.5
Min CCS	6.0	0.7	1.2	2.7	0.3	1.5
Max Nucleair	4.2	0.8	0.9	3.0	0.3	0.5
MaxWind	4.2	0.8	0.9	3.0	0.3	0.5
Max Biomassa en CCS	2.1	0.8	0.7	3.0	0.2	0.5
Min Biomassa en CCS	6.0	0.7	1.2	2.7	0.3	1.5
Max Biomassa, min CCS	6.0	0.7	1.2	2.7	0.3	1.5
Min Biomassa, max CCS	2.6	0.7	0.6	2.9	0.1	0.5
Max wind, min biomassa en CCS	6.0	0.7	1.2	2.8	0.2	1.3

Tabel B2.7. Kosten per functionaliteit voor de verschillende varianten bij 95 procent emissie-reductie.

Miljard euro/jaar	F HT warmte	F Kracht en licht	F LT warmte	F Mobiliteit	F Onbetaald	F Voedsel en natuur
Standaard	9.1	1.0	1.9	7.8	0.3	2.5
Max Biomassa	9.1	0.9	2.1	7.1	0.3	2.6
Min Biomassa	8.4	1.6	4.3	10.4	0.3	2.6
Max CCS	7.7	0.8	2.1	3.4	0.3	2.6
Min CCS	9.7	3.0	9.1	14.0	0.4	2.5
Max Nucleair	9.1	1.5	2.1	6.4	0.3	2.5
MaxWind	9.7	1.2	2.1	6.5	0.3	2.5
Max Biomassa en CCS	9.1	0.8	1.5	3.3	0.3	1.1
Min Biomassa en CCS	20.9	17.0	45.0	27.9	0.5	1.1
Max Biomassa, min CCS	11.9	1.4	3.4	8.7	0.3	2.5
Min Biomassa, max CCS	6.8	1.0	3.4	7.6	0.3	2.6
Max wind, min biomassa en CCS	10.4	2.1	7.8	11.3	0.3	2.7

Energiebalansen

In de tabellen B1.6 tot en met B1.10 worden per functionaliteit de energiebalansen samengevat van de beelden voor 2050. De tabellen laten zien welke functionaliteiten gebruik maken van welke energiedragers of energiebronnen, wat de productie is van de aanbodsectoren, en welke energiedragers of bronnen de aanbodsectoren daarbij benutten.

De getoonde getallen zijn de ranges in de doorgerekende varianten. Evenals bij de emissies zijn de ranges bij 95 procent in het algemeen groter dan bij 80 procent, een indicatie dat de kosteneffectievere oplossingen sterker variëren.

Wat is uit de tabellen af te leiden

De tabellen geven een eerste globaal beeld welke typen technieken in de functionaliteiten en aanbodsectoren een rol spelen. Elektriciteit bij LTW kan bijvoorbeeld duiden op elektrificatie van de warmtevraag, en in combinatie met gebruik van omgevingswarmte op de inzet van elektrische warmtepompen of hybride warmtepompen. De tabellen laten bijvoorbeeld zien wat bij de range aan aannames eigenlijk altijd wel enigermate in een kostenoptimale oplossing past (zon en wind, biomassa, CCS, omgevingswarmte, aardwarmte, elektrificatie) en in welke sectoren/functionaliteiten, en wat soms (zonnewarmte) past. Ook laten ze zien hoeveel verbruik van fossiele brandstof er nog is (Olie en LPG bij HT warmte is allemaal feedstock en varieert nauwelijks). Ook is te zien waar onzekerheid in de invulling groot en sterk afhangt van de gekozen aannames (mobiliteit: erg grote ranges vaak vanaf 0 of iets daarboven) of waar de onzekerheid kleiner is en de oplossingsrichtingen robuuster (elektrificatie) etc.

Hoge temperatuur warmte

Tabel B2.8 geeft een beeld van energiegebruik en emissies, zowel direct als via energieleveringen vanuit de aanbodsectoren. Voor de interpretatie van de getallen is het belangrijk dat de warmteproductie van de HTW in zijn geheel bij het aanbod is ondergebracht. De getallen voor direct verbruik en emissies hebben dus een wat andere betekenis dan bij de andere functionaliteiten, waar de lokale warmtevoorziening onderdeel is van het direct verbruik. In de tabel staat bij het direct verbruik dus een omvangrijke warmtevraag, die vrijwel geheel door de eigen ketels, warmtepompen en WKK (onderdeel van het eigen warmteaanbod) wordt geleverd.

Ook van belang is dat het verbruik van Olie en LPG voor leeuwendeel uit feedstock bestaat, en dus geen onderdeel is van het energetische verbruik of bijdraagt aan de emissies. Dat verklaart ook de geringe bandbreedte bij olie en LPG.

Tabel B2.8. Energiebalans HTW.

	F HT warmte		Via aanbod	95%		Via aanbod
	80%	Totaal		Direct	Totaal	
	Direct	Totaal	Via aanbod	Direct	Totaal	Via aanbod
Aardgas	28 tot 37	52 tot 153	52 tot 153	-60 tot 37	-31 tot 131	-31 tot 131
Aardwarmte		3 tot 13	1 tot 11		3 tot 13	1 tot 11
Afval (niet-biogeen)	13 tot 13	13 tot 13	13 tot 13	13 tot 13	13 tot 13	-24 tot 13
Benzine	2 tot 2			2 tot 2		
Biobrandstoffen				0 tot 37		
Biobrandstoffen FT				0 tot 41		
Biogas				0 tot 97	0 tot 5	0 tot 5
Biomassa (afval biogeen)	15 tot 15	15 tot 15	15 tot 15	15 tot 15	15 tot 15	15 tot 15
Biomassa (AWZ, RWZ en STRT)					0 tot 4	0 tot 4
Biomassa (coferment)						
Biomassa (GFT & VGI)					0 tot 2	0 tot 2
Biomassa (hout)		0 tot 63	0 tot 63		0 tot 233	0 tot 233
CO2flow	-18 tot -6	-29 tot -8	-29 tot -8	-8 tot -5	-34 tot -6	-34 tot -6
Diesel	-4 tot -4			-4 tot -4		
Elektriciteit	-5 tot 126			125 tot 126		
Kolen	3 tot 153	3 tot 153	-241 tot -91	3 tot 3	3 tot 3	-241 tot -238
LPG	244 tot 244	244 tot 244	244 tot 244	241 tot 244	241 tot 244	241 tot 244
Olie	212 tot 212	210 tot 210	210 tot 210	212 tot 212	210 tot 212	210 tot 266
omgevingswarmte		76 tot 161	76 tot 161		31 tot 182	31 tot 182
Uranium warmte	337 tot 373			297 tot 346		
Waterstof						
Wind		12 tot 183	12 tot 183		121 tot 249	121 tot 249
Zon		4 tot 39	4 tot 39		29 tot 54	29 tot 54
CCS	6 tot 18	8 tot 29	2 tot 12	5 tot 8	6 tot 34	1 tot 26
BKG	-1 tot 2	7 tot 10	6 tot 11	-11 tot -1	-17 tot 3	-16 tot 6
CO2	-5 tot -2	3 tot 5	6 tot 11	-14 tot -4	-20 tot 0	-16 tot 6
OBG	3 tot 4	4 tot 5		2 tot 3	2 tot 4	

Kracht en licht

Tabel B2.9. Energiebalans K&L.

	F Kracht en licht					
	80%			95%		
	Direct	Totaal	Via aanbod	Direct	Totaal	Via aanbod
Aardgas		22 tot 144	22 tot 144		0 tot 105	0 tot 105
Aardwarmte					0 tot 10	0 tot 10
Afval (niet-biogeen)						
Benzine						
Biobrandstoffen						
Biobrandstoffen FT						
Biogas					0 tot 2	0 tot 2
Biomassa (afval biogeen)						
Biomassa (AWZ, RWZ en STRT)						
Biomassa (coferment)						
Biomassa (GFT & VGI)						
Biomassa (hout)					0 tot 4	0 tot 4
CO2flow		-8 tot 0	-8 tot 0		-6 tot 0	-6 tot 0
Diesel						
Elektriciteit	304 tot 321			229 tot 307		
Kolen						
LPG						
Olie						
omgevingswarmte						
Uranium warmte					0 tot 190	0 tot 190
Waterstof						
Wind		199 tot 272	199 tot 272		178 tot 303	178 tot 303
Zon		52 tot 64	52 tot 64		42 tot 75	42 tot 75
CCS		0 tot 8	0 tot 8		0 tot 6	0 tot 6
BKG		1 tot 2	1 tot 2		0 tot 1	
CO2		0 tot 1	0 tot 1			
OBG						

Lage temperatuur warmte

Tabel B2.10 geeft een beeld van energiegebruik en emissies, zowel direct als via energieleveringen vanuit de aanbodsectoren. Belangrijke energiedragers voor het direct gebruik zijn aardgas⁹, elektriciteit, warmte en omgevingswarmte. De ranges voor aardgas liggen bij 80 procent wat hoger dan bij 95 procent, die voor de andere energiedragers liggen juist bij 95 procent meestal hoger. Het aardgas is in sommige beelden voor een groot deel gemaakt uit biomassa. Alleen bij warmtelevering is er nauwelijks verschil tussen 80 en 95 procent, maar dat heeft vooral te maken met de veronderstelde ingroeilimiet. De directe emissies en de totale emissies hebben ongeveer dezelfde range: de LTW krijgt via het aanbod niet veel extra emissies maar ook nauwelijks negatieve emissies.

Tabel B2.10. Energiebalans LTW.

	F LT warmte					
	80%			95%		
	Direct	Totaal	Via aanbod	Direct	Totaal	Via aanbod
Aardgas	155 tot 155	160 tot 229	141 tot 210	25 tot 155	9 tot 188	-44 tot 168
Aardwarmte	19 tot 19	20 tot 21	20 tot 21	19 tot 56	20 tot 62	20 tot 62
Afval (niet-biogeen)						
Benzine						
Biobrandstoffen						
Biobrandstoffen FT						
Biogas	0 tot 6	0 tot 7	0 tot 7	0 tot 97	0 tot 5	0 tot 5
Biomassa (afval biogeen)						
Biomassa (AWZ, RWZ en STRT)	14 tot 14	14 tot 14	5 tot 5	9 tot 14	10 tot 14	4 tot 5
Biomassa (coferment)						
Biomassa (GFT & VGI)	9 tot 9	9 tot 9	2 tot 8	6 tot 9	7 tot 9	0 tot 9
Biomassa (hout)	2 tot 7	2 tot 11	2 tot 11	0 tot 9	0 tot 169	0 tot 169
CO2flow		-4 tot 0	-4 tot 0		-5 tot 1	-5 tot 1
Diesel						
Elektriciteit	86 tot 129			73 tot 249		
Kolen						
LPG						
Olie	0 tot 1	0 tot 1	0 tot 1	1 tot 1	1 tot 1	1 tot 1
omgevingswarmte	67 tot 67	79 tot 96	79 tot 96	67 tot 134	72 tot 165	72 tot 165
Uranium					0 tot 78	0 tot 78
warmte	54 tot 60			51 tot 62		
Waterstof						
Wind		79 tot 97	79 tot 97		75 tot 293	75 tot 293
Zon		18 tot 26	18 tot 26	0 tot 20	18 tot 59	18 tot 59
CCS		0 tot 4	0 tot 4		-1 tot 5	-1 tot 5
BKG	9 tot 9	10 tot 11	1 tot 2	1 tot 9	3 tot 10	-2 tot 1
CO2	9 tot 9	10 tot 11	1 tot 2	1 tot 9	2 tot 9	-2 tot 1
OBG						

⁹ De negatieve waarde bij aardgas bij 95 procent is het gevolg van de verrekening met biomassa.

Mobiliteit en transport

Tabel B2.11 geeft een beeld van energiegebruik en emissies, zowel direct als via energieleveringen vanuit de aanbodsectoren. Belangrijke energiedragers voor het direct gebruik zijn aardgas, Olie (w.o. benzine en diesel), biobrandstoffen, elektriciteit, en waterstof. De mobiliteit is de sector bij uitstek die het voor negatieve totale emissies helemaal van de toerekening vanuit de aanbodsectoren moet hebben: productie van biobrandstoffen met CCS.

Tabel B2.11. Energiebalans Mobiliteit.

	F Mobiliteit					
	80%			95%		
	Direct	Totaal	Via aanbod	Direct	Totaal	Via aanbod
	101 tot 101	110 tot 157	110 tot 157	8 tot 101	4 tot 288	4 tot 288
Aardgas						
Aardwarmte			-51 tot -51		0 tot 8	-51 tot 8
Afval (niet-biogeen)						
Benzine	51 tot 51			0 tot 51		
Biobrandstoffen	15 tot 15			12 tot 15		
Biobrandstoffen FT	40 tot 40			40 tot 93		
Biogas					0 tot 5	0 tot 5
Biomassa (afval biogeen)						
Biomassa (AWZ, RWZ en STRT)						
Biomassa (coferment)						
Biomassa (GFT & VGI)						
Biomassa (hout)		98 tot 113	98 tot 113		119 tot 228	119 tot 228
CO2flow		-9 tot -1	-9 tot -1		-24 tot -2	-24 tot -2
Diesel	80 tot 80			7 tot 80		
Elektriciteit	104 tot 106			39 tot 108		
Kolen						
LPG	3 tot 3	-3 tot -3	-3 tot -3	1 tot 3	-3 tot 2	-3 tot 2
Olie		159 tot 159	159 tot 159		0 tot 159	0 tot 159
omgevingswarmte		2 tot 6	2 tot 6		1 tot 19	1 tot 19
Uranium warmte					0 tot 80	0 tot 80
Waterstof	3 tot 3			3 tot 191		
Wind		65 tot 100	65 tot 100		53 tot 266	53 tot 266
Zon		19 tot 21	19 tot 21		12 tot 85	12 tot 85
CCS		1 tot 9	1 tot 9		2 tot 24	2 tot 24
BKG	17 tot 17	12 tot 17	-5 tot 0	2 tot 17	-5 tot 11	-13 tot -1
CO2	16 tot 16	11 tot 16	-5 tot 0	1 tot 16	-5 tot 10	-13 tot -1
OBG	1 tot 1	1 tot 1		0 tot 1	0 tot 2	

Voedsel en natuur.

Voor energie is de betekenis van voedsel en natuur niet zo groot. Bij de indeling van de functionaliteiten valt biomassa grotendeels buiten de scope. Wel zijn er wat processen die uit mest energie produceren. Ook kunnen sommige processen tot extra verbruik leiden.

Na het uitvoeren van de berekeningen met OPERA voor deze studie bleek dat het reductiepotentieel in de berekeningen enkele megatonnen lager lag dan dat strookt met de beschreven uitgangspunten. De emissies van natuur en voedsel zullen dus wat hoger liggen dan uit de berekeningen komt. Dat betekent dat een wat grotere emissiereductie bij de andere functionaliteiten nodig is. De reducties uit de berekeningen zijn wel denkbaar bij (gedeeltelijke) vervanging van vleesproductie in Nederland door productie van novel protein foods, dus in afwijking van de gehanteerde uitgangspunten.

Tabel B2.12. Energiebalans voedsel en natuur.

	F Voedsel en natuur					
	80%			95%		
	Direct	Totaal	Via aanbod	Direct	Totaal	Via aanbod
Aardgas						
Aardwarmte						
Afval (niet-biogeen)						
Benzine						
Biobrandstoffen						
Biobrandstoffen FT						
Biogas	-8 tot 0	-8 tot 0	-8 tot 0	-12 tot 0	-12 tot 0	-12 tot 0
Biomassa (afval biogeen)						
Biomassa (AWZ, RWZ en STRT)						
Biomassa (coferment)	0 tot 8	0 tot 8	0 tot 8	0 tot 11	0 tot 11	0 tot 11
Biomassa (GFT & VGI)						
Biomassa (hout)					-18 tot 0	-19 tot 0
CO2flow					0 tot 1	0 tot 1
Diesel						
Elektriciteit						
Kolen						
LPG						
Olie						
omgevingswarmte						
Uranium						
warmte						
Waterstof						
Wind						
Zon						
CCS					-1 tot 0	-1 tot 0
BKG	9 tot 12	9 tot 12		6 tot 10	5 tot 10	0 tot 1
CO2					0 tot 1	0 tot 1
OBG	9 tot 12	9 tot 12		6 tot 10	6 tot 10	