

# Notitie energiesysteembeelden 2050

*Experts: Pieter Boot, Gulbahar Tezel, Bert Stuij*

## Samenvatting

In deze notitie bespreken we recente scenariostudies over het Nederlandse energiesysteem in 2050, die een CO<sub>2</sub>-neutraal of klimaatneutraal energiesysteem in 2050 beschrijven. We hebben ons daarbij op de twee *integrale systeemstudies* geconcentreerd. In integrale systeemstudies wordt de transformatie van het volledige energie- en grondstoffensysteem beschouwd, zodat de beelden ook de samenhang tussen veranderingen in verschillende segmenten van het energiesysteem laten zien .

Als startpunt wordt in deze notitie een kort overzicht gepresenteerd van belangrijke kenmerken van het Nederlandse energie- en grondstoffen door een snelle vergelijking met omliggende landen en de Europese Gemeenschap (EU27). Op basis van deze snelle inventarisatie kunnen we concluderen dat Nederland met de energietransitie een relatief grote uitdaging voor zich heeft. Nederland kent een - internationaal gezien - een hoog aardgasgebruik (30%), ook in de elektriciteitsopwekking (65%). Sinds de beperkingen aan de aardgaswinning in Groningen is Nederland daarom net als Duitsland sterk afhankelijk van de import van fossiele brandstoffen. Daarnaast kent Nederland een omvangrijke energie-intensieve industrie en bunkers voor internationale bunkers lucht- en scheepvaart. Ook de land- en tuinbouwsector is relatief zeer omvangrijk in Nederland, met relatief hoge broeikasgas (BKG) emissies door intensieve veehouderij en een sterke glastuinbouwsector. In tegenstelling tot andere Europese landen kan Nederland de koolstofopname van landgebruik (negatieve emissies) maar beperkt aanwenden om netto-nul emissies te bereiken. Het toekomstig energiesysteem zal dus vermoedelijk ook voor compensatie (negatieve emissies) van overige broeikasgas BKG emissies in landgebruik (ook wel *land use, land-use change and forestry* of LULUCF) emissies moeten zorgen.

## S.2 Energiesysteems scenario's voor 2050

Het expertteam heeft twee scenariostudies verkend die een belangrijke rol vervullen in nationale energiesysteemanalyse. De Integrale Infrastructuurverkenning 2030-2050 (I13050) heeft als doel om de benodigde ontwikkeling van de vereiste energie-infrastructuur voor 2030 tot 2050 te verkennen. De studie staat onder regie van de netbeheerders. Daarbij kijkt men vanuit vier verschillende "eindbeelden" voor een volledig CO<sub>2</sub>-neutraal energie- en (energetische) grondstoffensysteem in Nederland in 2050: regionale sturing waarin lokale gemeenschappen en burgers het energiesysteem veel meer aansturen richting (bijna) zelfvoorziening, nationale sturing waarin de nationale overheid een krachtige sturing geeft, Europese sturing middels een generieke CO<sub>2</sub>-heffing die geldt voor alle sectoren en tenslotte internationale sturing waarin de markt bepalend is en gericht op opties met de laagste kosten met relatief hoge importafhankelijkheid. Momenteel wordt gewerkt aan een update van de I13050 studie, maar de resultaten hiervan zijn nog niet publiek. Daarom wordt voor de scenariovergelijking in dit stadium van het onderzoek van het expertteam gebruik gemaakt van de I13050 studie uit 2020. In latere updates van deze notitie zullen ook de bevindingen uit de nieuwe versie van I13050 worden meegenomen.

De tweede scenariostudie is 'Naar een duurzaam energiesysteem voor Nederland in 2050' (hierna NL2050). Centraal staat de verkenning van twee energietransitie strategieën naar een klimaatneutraal Nederland in 2050. NL2050 onderscheidt een behoudend pad met voortzetting van de huidige levensstijl van de Nederlandse bevolking en incrementele aanpassingen van het energie- en grondstoffensysteem en ruimte voor meer omstreden oplossingen (ADAPT), en een vooruitstrevend pad met een sterkere transformatie van levensstijl en grondige aanpassingen van het energie- en grondstoffensysteem en beperkt ruimte voor meer omstreden oplossingen (TRANSFORM). Waar I13050 invulling geeft aan het energiesysteem op basis van *expert judgement* en sectorale achtergrondberekeningen van energietechnieken met als doel uithoeken van de netbelasting in kaart te brengen, geeft NL2050 een techno-economisch optimale invulling aan het energiesysteem op basis van de laagste realisatiekosten voor verkenning van een behoudende vs. een vooruitstrevende energietransitie.

### S.3 Overzicht van robuuste elementen, onzekerheden en witte vlekken

Robuuste elementen en variaties in de eerste 2050 beelden van het Nederlandse energiesysteem:

- In de **finale vraagontwikkeling** laten de scenario's substantiële verschillen in de omvang van de energievraag in alle sectoren zien. In de overzichten van finale vraag springen variaties het meest in het oog voor de industrie (energie & grondstoffen) en internationale lucht- en scheepvaart, vanwege het grote aandeel van deze sectoren in de algehele energievraag. Daarnaast wordt er in de I13050 scenario's voor gekozen om juist deze twee sectoren sterk te variëren in groei tot 2050:
  - **Industrie** - Industrie laat in de scenario's sterk verschillende groeiperspectieven zien, maar die zijn generiek van aard (I13050) of liggen in lijn met de verwachtingen voor de komende tien jaar (NL2050). Voor raffinage wordt wel een sterkere krimpverwachting gehanteerd (I13050) of resulteert dit uit de afnemende afzetmarkt in mobiliteit (NL2050). Voor de chemie laat de productie van plastics sterk verschillende trajecten zien, met voortzetting van de huidige fossiele route, tegenover chemische recycling routes en bio-based routes.
  - **Internationale lucht-en scheepvaart** - het gebruik van bunkerbrandstoffen varieert sterk op basis van generieke groeiveronderstellingen. In vrijwel alle scenario's neemt de relatieve vraag naar bunkerbrandstoffen toe. Geen scenario houdt rekening met een eventueel veranderende rol van Rotterdam als bunkering hub, die nu onder meer gestoeld is op de grote Rotterdamse raffinage sector. De routes voor CO<sub>2</sub>-emissiereductie voor bunkering variëren sterk, van productie uit geïmporteerde aardolie en biomassa (uitgaande van een 50% emissie reductie veronderstelling voor 2050 in ADAPT), import van (zeer grote hoeveelheden) hernieuwbare brandstoffen (I13050), of productie van biobrandstoffen voor de luchtvaart en synthetische methanol voor de scheepvaart (uitgaande van een 95% emissie reductie veronderstelling voor 2050 in TRANSFORM).
- In alle scenario's neemt gebruik van **fossiele energiedragers** sterk af. In enkele I13050 scenario's speelt aardolie nog een rol als grondstof voor plastics in de chemische industrie (I13050 Europees en Internationaal) en aardgas als grondstof voor blauwe waterstof (I13050 Europees). De directe emissies uit het energetisch gebruik van deze fossiele energiedragers worden vermeden door toepassing van CO<sub>2</sub>-afvang en -opslag, terwijl emissies uit fossiele energie als grondstof buiten beschouwing worden gelaten. Ook in ADAPT wordt nog gebruik gemaakt van fossiele energiedragers, met inzet van aardolie in productie van plastics en aardgas in vooral de internationale scheepvaart (LNG). Ook hier worden emissies (inclusief emissies uit fossiele energie als grondstof) vermeden door CO<sub>2</sub>-afvang en -opslag of gecompenseerd door negatieve emissies elders in het systeem (bio-energie gecombineerd met CO<sub>2</sub>-afvang en -opslag). Daartegenover staan scenario's met hogere inzet van pyrolyse olie, i.e. chemische recycling van plastics (I13050, Regionaal en Nationaal), of inzet van waterstof en biomassa voor de bio-based productie van plastics (NL2050, ADAPT en TRANSFORM). Groene waterstof biedt in deze scenario's het alternatief voor blauwe waterstofproductie.
- In alle scenario's wordt in de primaire vraag voorzien door grootschalige ontwikkeling van **wind en zon** in combinatie met grootschalige ontwikkeling van **directe elektrificatie** (direct gebruik van elektriciteit) en **indirecte elektrificatie** (i.e. elektrificatie via gebruik van groene waterstof geproduceerd uit elektriciteit) in de finale vraag. Waterstof speelt in vrijwel alle gevallen een rol in de verwaarding van de toenemende elektriciteitsproductie (pieken) en flexibiliteit, en dus ook in de balans tussen elektronen en moleculen. Dat varieert (inclusief bunkers) van ongeveer 20% elektronen om 80% moleculen (I13050, Internationaal) tot ruim 60% elektronen om 40% moleculen (NL2050, TRANSFORM). In TRANSFORM wordt ook nucleaire energie ingezet voor elektriciteitsopwekking; door in dit scenario te kiezen voor een (vrijwel) volledig klimaatneutrale invulling van de energie- en grondstoffenbehoefte voor het Nederlandse systeem, inclusief bunkering voor internationale lucht- en scheepvaart, volstaat het volledige potentieel voor hernieuwbare opwek niet en is ook aanvullende inzet van nucleair nodig.
- De rol van **biomassa, groengas en biobrandstoffen** loopt sterk uiteen in de scenario's. In de zelfvoorzienende scenario's (I13050 Regionaal en Nationaal) tot 9% van het primaire aanbod, maar in de andere scenario's met ruimte voor import loopt het op tot 25% van het primaire aanbod. In alle scenario's neemt het gebruik van biograndstoffen voor energiedoeleinden toe en wordt een netto import van biograndstoffen verondersteld. In de regionale scenario's is dat vergelijkbaar met de huidige import van enkele honderden PJ's, maar in de meer internationaal-georiënteerde scenario's (I13050 Europees en Internationaal, ADAPT, TRANSFORM) loopt dat op tot zo'n 500 à 700PJ. Dat correspondeert ruwweg met behoudender inschattingen van de zgn. economische fairshare voor Nederland.

De scenario's verschillen sterk in veronderstellingen over toekomstige **import** van energie en grondstoffen. In geval van I13050 is bewust import gevarieerd van ongeveer 20% tot 80% van het primaire aanbod (waterstof, hernieuwbare brandstoffen, biomassa/groengas, fossiel). In NL2050 is ruimte gelaten voor fossiele importen en beperkte importen van biomassa op basis van beschikbaarheid (totaal ongeveer 30% tot 60% van het primaire aanbod). In NL2050 wordt overigens verondersteld dat er geen waterstof wordt geïmporteerd.

#### S.4 Onzekerheden en blinde vlekken

Onzekerheden worden deels gevangen in scenario's, zoals de onzekerheden met betrekking tot de **vraagontwikkeling**. Daarin valt op dat de bandbreedte voor industrie sterk varieert, maar dat een nadere analyse van de onderliggende perspectieven op toekomstig verdienpotentieel niet verder rijken dan de constatering dat raffinage naar verwachting harder zal krimpen dan de overige industrie. In geval van de bandbreedte voor internationaal lucht- scheepvaart is de bandbreedte ook ruim, maar is geen rekening gehouden met een eventueel veranderende rol voor Rotterdam als bunkering hub, terwijl de rol nu stoelt op de raffinage activiteiten in het cluster. Zowel industrie als internationale lucht- scheepvaart dragen fors bij aan de vraag naar energie en grondstoffen, maar de achterliggende analyse vertoont dus blinde vlekken.

Ook de verhoudingen tussen **energiedragers** voor de invulling van de vraag worden deels gevangen in scenario's. De bandbreedten zijn daarin ruim, met sterke variaties in verhoudingen elektronen vs. moleculen, fossiel vs. niet-fossiel en lokale winning vs. import. Er wordt echter slechts beperkt aandacht besteed aan de (inpassing in) internationale context en ontwikkelingen in het buitenland, afgezien van inschattingen van redelijke (fairshare) of haalbare importen van biomassa. In die zin vormt **import** en uitwisseling met het buitenland een blinde vlek in deze studies.

Uit een overzicht van geselecteerde kwalitatieve en kwantitatieve scenario's kan verder opgemaakt worden dat er in algemenere zin nog andere beperkingen optreedt in dit type studies optreedt, zoals:

- goede representaties van **onzekerheid en risico** onderschatting van de economische waarde van technologieën die risico's verminderen, zoals flexibiliteit.
- **Gedrag en beleid** worden onvolledig gemodelleerd, zodat vooral technische mogelijkheden duidelijk worden in plaats van een maatschappelijk transitie pad (i.e. draagvlak).
- **Geografische scope en granulariteit** worden afgewogen, zodat in Nederlandse scenario's de rest van de wereld sterk vereenvoudigd wordt weergegeven (mogelijke overschatting import van energiedragers tegen een constante prijs, geen geopolitieke ontwikkelingen, onverminderde internationale vraag naar Nederlandse exportproducten) en succesvol internationaal klimaatbeleid.
- Veel **technische en economische restricties** zijn weggelaten of vereenvoudigd, zoals (beperkingen door) infrastructuur, marktmacht en andere vormen van marktfalen.
- **Niet-lineaire trends** zijn moeilijk te modelleren of te voorspellen, zoals de grote reductie in kosten van zonnepanelen.

# 1 Scenariostudies Energiesysteem Nederland 2050

Het expertteam is gevraagd om een globaal beeld van het technische energiesysteem in 2050 te schetsen op basis van scenario's tegen de achtergrond van maatschappelijke belangen. Een globaal eindbeeld voor het energiesysteem in 2050 is breder dan het technische systeem alleen, maar de inhoudelijke onderbouwing van technische invulling vormt wel een centraal element in het sociaaleconomische energiesysteem.

Deze notitie geeft een overzicht van de beelden van het energiesysteem in 2050 op basis van bestaande scenariostudies die in de afgelopen jaren zijn opgesteld. We hebben ons daarbij geconcentreerd op *integrale systeemstudies* die zijn gedaan naar de transitie van het hele energiesysteem en niet naar een deel daarvan, zoals industrie of elektriciteit. In integrale systeemstudies wordt de transformatie van het volledige energie- en grondstoffensysteem beschouwd, zodat de beelden ook nadrukkelijk inzicht geven in de samenhang tussen veranderingen in verschillende segmenten van het systeem. Daarbij bespreken we allereerst vanuit Europese context kort het Nederlandse energiesysteem en doelstellingen om vervolgens op basis daarvan de recente scenariostudies die de hele Nederlandse economie beslaan en een pad richting een CO<sub>2</sub>-vrije economie in 2050 te beschrijven.

We bespreken daarbij achtereenvolgens de toekomstige energie- en grondstoffenvraag en het aanbod van primaire energie tegen de achtergrond van achterliggende uitgangspunten, aannames en veronderstellingen. Vervolgens verkennen we robuuste elementen, keuzevraagstukken, onzekerheden en blinde vlekken op basis van overeenkomsten en verschillen tussen de scenario's. De verkenning wordt gevolgd door een vergelijking met een selectie van een bredere verzameling van kwantitatieve en kwalitatieve internationale scenario's.

## 1.1 Het Nederlandse energiesysteem in Europese context

Voordat de Nederlandse scenario's onder de loep genomen worden geven we een kort overzicht van kerncijfers van Nederland, verschillende omliggende Europese landen en de EU27 als achtergrond van de energietransitie opgave. De energievoorziening van de beschouwde landen verschilt aanzienlijk. Tabel 1 vat de samenstelling van het finale energieverbruik samen. Het aandeel olieproducten verschilt in de bestudeerde landen niet erg veel, behalve in Zweden dat een relatief grote verplichting om biobrandstoffen in het vervoer te gebruiken kent. Zweden en vooral Noorwegen hebben een veel groter aandeel elektriciteit in hun energieverbruik dan de andere landen, mede vanwege het grote Noorse en (beperkter) Zweedse potentieel voor waterkracht dat al vroeg in de vorige eeuw tegen lage kosten kon worden geëxploiteerd. Nederland en het Verenigd Koninkrijk gebruiken juist veel aardgas, vanwege de grote gasvondsten in deze

Tabel 1 Aandelen (procenten) energiedragers in finaal energieverbruik (exclusief bunkers) in 2020

	EU27	DK	DE	FI	FR	NL	SE	NO	UK
Olieproducten	35	36	33	24	38	30	20	29	39
Elektriciteit	23	20	23	29	26	22	34	52	22
Aardgas	22	11	28	4	20	32	2	3	34
Hernieuwbare energie	13	13	9	26	12	11	29	10	6*
Warmte	5	19	5	16	3	5	14	3	*
Kolen	2	1	2	1	1	0	1	3	1

\* Hernieuwbare energie incl. een klein aandeel warmte

Bron: Eurostat, Shedding light on energy in the EU, 2022 (EU landen en Noorwegen); Dep. for Business, Energy & Industrial Strategy, UK Energy in Brief, 2021(VK)

Tabel 2 Aandelen in opwekking elektriciteitsproductie in 2020

	EU27	DK	DE	FI	FR	NL	SE	NO	UK
Fossiele brandstoffen	36	16	41	12	8	65	0	0	37
Kernenergie	24	0	11	34	66	4	30	0	16
Windenergie	14	57	23	12	8	13	17	8	26
Waterkracht	13	0	4	24	13	0	44	92	2
Biomassa	6	20	10	17	2	9	6	0	14
Zonne-energie	6	4	10	0	3	9	1	0	5

Bron: Eurostat, Shedding light on energy in the EU, 2022 (EU landen en Noorwegen); Dep. for Business, Energy & Industrial Strategy, UK Energy in Brief, 2021(VK)

landen. Warmte (vooral stadsverwarming) is omvangrijk in Denemarken, Finland en Zweden, omdat hier na de oliecrisis van de jaren zeventig met succes op werd ingezet. Kolen wordt in de bestudeerde landen nauwelijks nog als directe brandstof gebruikt.

*Ook de elektriciteitsproductie verschilt sterk.*

Tabel 2 geeft een overzicht van de samenstelling van de elektriciteitsproductie. In de tabel zijn de fossiele brandstoffen weergegeven (kolen en gas, olie wordt vrijwel niet meer ingezet voor elektriciteitsproductie). Nederland springt er daarbij met een zeer groot aandeel aardgasgestookte elektriciteitsproductie uit, Duitsland (vooral kolen) en het Verenigd Koninkrijk (aardgas en kolen) in mindere mate. Frankrijk is de relatieve koploper in kernenergie. Hier besloot men tijdens de oliecrisis in de jaren zeventig tot grootschalige bouw van nucleaire centrales tot zo'n 70% procent in tien jaar tijd. Dat geldt ook voor Finland en Zweden met een groot aandeel nucleaire energie. Denemarken voorziet al voor meer dan de helft van de elektriciteitsproductie in windenergie; geen ander land komt daarbij in de buurt. Het verschil in aandelen waterkracht bestaat al lang, waarbij Noorwegen en Zweden veel produceren. Denemarken en Finland gebruiken relatief veel biomassa in de elektriciteitsvoorziening. De cijfers voor door zon opgewekte elektriciteit zijn nog niet zo groot: Duitsland en Nederland hebben daarbij de hoogste aandelen.

Duidelijk is dat de percentages waterkracht, aardgas en kolen grotendeels door beschikbaarheid (en dus lage kosten) zijn ingegeven, maar dat de andere aandelen meer zijn bepaald in het kader van importafhankelijkheid en emissiereductie: vooral bij het verschil in aandelen kernenergie, windenergie en zonne-energie valt dat op waar in het laatste geval een veel zon-intensiever land als Frankrijk maar een derde van het aandeel van Nederland heeft. In de nog te behandelen scenario's wordt voorzien dat de elektriciteitsvoorziening het snelst koolstofvrij moet zijn om nul emissies te bereiken. Nederland heeft daarbij nog de langste weg te gaan, op afstand gevolgd door Duitsland en het Verenigd Koninkrijk; Noorwegen en Zweden zijn er al. Door de grote aandelen fossiele brandstoffen is de importafhankelijkheid van de energievoorziening in Duitsland, Nederland en het Verenigd Koninkrijk aanmerkelijk groter dan in de andere landen - het dubbele van die in Zweden, anderhalf maal zo groot als die in Denemarken, Finland en Frankrijk. Meer informatie over de omringende landen en de daar ontwikkelde nul-emissie scenario's nis te vinden in de gelijktijdig verschijnende achtergrondstudie door Pieter Boot van de Expertgroep Energiesysteem. Ook worden in die studie twee recent verschenen nul-emissie scenario's voor Europa behandeld.

Op basis van deze snelle internationale analyse kunnen we concluderen dat Nederland op enkele punten in een relatief lastige positie verkeert. Nederland kent een - internationaal gezien - hoog aardgasgebruik (30%), ook in de elektriciteitsopwekking (65%). Sinds de beperkingen aan de aardgaswinning in Groningen is Nederland daarom net als Duitsland sterk afhankelijk van de import van fossiele brandstoffen. Daarnaast kent Nederland een omvangrijke energie-intensieve industrie en bunkers voor internationale lucht- en scheepvaart. Ook de land- en tuinbouwsector is relatief zeer omvangrijk in Nederland, met relatief hoge BKG emissies door intensieve veehouderij en een sterke glastuinbouwsector. Landgebruik is daarmee ook intensief. In tegenstelling tot andere Europese landen kan Nederland de koolstofopname van landgebruik

(negatieve emissies) maar beperkt aanwenden om netto-nul emissies te bereiken. Het toekomstige energiesysteem zal dus vermoedelijk ook voor compensatie (negatieve emissies) van overige broeikasgas (BKG) emissies in *land use, land-use change and forestry* (LULUCF) emissies moeten zorgen.

## Studies Nederlands energiesysteem 2050

Startpunt voor de analyse van het toekomstige energiesysteem is een verkenning van twee recente scenariostudies van het Nederlandse energiesysteem in 2050, die de hele Nederlandse economie beslaan en een pad richting een klimaatneutraal energiesysteem in 2050 beschrijven. Deze lichten we hieronder toe.

- ***Integrale Infrastructuurverkenning 2030-2050 (I13050)***  
Dit traject stelt de infrastructuurontwikkeling centraal en wordt uitgevoerd onder regie van de netbeheerders. I13050 is ontwikkeld met als doel om de toekomstige infrastructurele investeringsbehoeften voor 2030 en met name 2050 vast te stellen. Het proces voor dergelijke infrastructurele analyse is afgesproken in het Klimaatakkoord, in onderkenning van het belang van infrastructuur in de energie transitie. De analyse wordt uitgevoerd door de Nederlandse netbeheerders, en zal om de twee jaar worden geactualiseerd. De eerste scenariostudie is uitgevoerd in de periode 2020-2021, met in I13050 fase I een scenariostudie voor het energiesysteem *Klimaatneutrale energiescenario's 2050* opgezet door Berenschot en Kalavasta (Berenschot & Kalavasta, 2020), en in I13050 fase II gevolgd door de infrastructuuranalyse *Het Energiesysteem van de Toekomst* door de netbeheerders (Netbeheer Nederland, 2021). Momenteel wordt gewerkt aan de actualisatie van zowel de scenariostudie als de infrastructuurstudie, die naar verwachting in Q1 2023 zal worden opgeleverd.

### **Aanvullende toelichting op eindbeelden I13050 in deze notitie**

In geval van de I13050 studies gebruiken we daarvoor de finale overzichten zoals gepresenteerd in *Het energiesysteem van de toekomst* van de netbeheerders aangezien daarin nog enkele aanpassingen gepleegd zijn in context van de infrastructuuranalyse. In laatstgenoemde rapportage is de analyse van geïmporteerde brandstoffen voor de internationale scheep- en luchtvaart echter niet opgenomen in de base case van deze verkenning. Het navolgende I13050 beeld voor bunkering wordt gebaseerd op de gevoeligheidsanalyse met betrekking tot synthetische brandstoffen in *Het energiesysteem van de toekomst*, aangevuld met geïmporteerde bunkerbrandstoffen ontleend aan *Klimaatneutrale energiescenario's 2050*.

- ***Naar een duurzaam energiesysteem voor Nederland in 2050 (hierna NL2050)***  
Het tweede traject stelt beleidsontwikkeling ter ondersteuning van de rijksoverheid centraal. Het initiatief is ingezet door TNO ter ondersteuning van de beleidsontwikkeling voor de energietransitie op basis van het integrale energiesysteem model OPERA voor kosten optimale energiesysteem ontwikkeling. De eerste lange termijn verkenningen van het Nederlandse energiesysteem in 2050 is uitgevoerd in 2020, maar is recentelijk geactualiseerd (TNO, 2020; TNO, 2022). Het PBL heeft inmiddels aangekondigd om beleidsondersteunende lange termijn verkenningen van het Nederlandse energiesysteem tot 2050 met hetzelfde OPERA model te gaan ontwikkelen onder de werktitel *Toekomstverkenning Nederland 2050* (TVKN2050). Dat traject is dit voorjaar ingezet, en zal naar verwachting eveneens in Q1 2023 worden opgeleverd. Verwachting van (PBL) betrokkenen is dat die analyse een wat minder ruime bandbreedte zal gaan laten zien dan de staande TNO analyse.

Recente resultaten uit de eerste twee trajecten vormen de kern van deze notitie. In de navolgende paragrafen beschrijven we achtereenvolgens een algemene kenschets, doel en afbakening en tot slot de methodiek.

## 1.2 Kenschets van de studies: doel, afbakening en methodiek

### *I Klimaatneutrale energiescenario's 2050*

**Doel** - De scenario's schetsen een beeld van de toekomstige energievraag en -aanbod om de toekomstige infrastructuurbehoefte in beeld te brengen. De scenario's worden gepresenteerd als zogenaamde backcasting scenario's, i.e. eindbeelden voor 2050 met als doel de toekomstige infrastructuurbehoefte richting 2050 in beeld te brengen.

**Afbakening** - Uitgangspunt voor de 2050 beelden is het doel van een CO<sub>2</sub>-neutraal energiesysteem in 2050. Er wordt dus geen rekening gehouden met resterende *land use, land-use change and forestry* (LULUCF) emissies en overige BKG emissies. Ook wordt geen rekening gehouden met emissies ten gevolge van het gebruik van energie als grondstof (de zogenaamde scope 3 emissies).

**Error! Reference source not found.**

**Methodiek** - De studie gaat uit van vier sturingsscenario voor de ontwikkeling van vraag naar - en aanbod van energiedragers (elektriciteit, methaan, waterstof en warmte) : Regionaal, Nationaal, Europees en Internationaal. Het narratief van deze sturingsprincipes komt tot uitdrukking in een toenemende schaal van systeemprojecten en een toenemende schaal van geografische verbondenheid van het energiesysteem.

De scenario's variëren globaal op dominante energiedrager (elektronen vs. moleculen), economische groei (m.n. in industrie en mobiliteit) en importafhankelijkheid. Daarbij wordt beoogd de uithoeken van de toekomstige netbelastingen op te zoeken, als eerste verkenning van de uithoeken van de toekomstige transportbehoefte. De scenario's gaan dus niet uit van een kostenperspectief of economisch perspectief, maar verkennen de extremen van in toekomstige netbelastingen voor elektriciteit die door auteurs en andere betrokken nog realistisch geacht worden. Zie Bijlage **Error! Reference source not found.** voor een overzicht van de verdere kenmerken van deze scenariostudie.

Voor de studie is gebruik gemaakt van het *Energietransitiemodel* (ETM) om de realistische "hoekpunten" van het energiesysteem te toetsen op consistentie van de energiebalansen. Met dit energiebalansmodel kan de energiebalans (vraag, conversie en opslag, aanbod) van een op voorhand ontworpen integrale energiesysteem scenario worden getoetst en gevisualiseerd. Detaillering van de feitelijke netwerken (zoals het elektriciteitssysteem) blijven daarbij buiten beschouwing. Het scenario-ontwerp voor het energiesysteem is gebaseerd op achterliggende sectorale beelden en berekeningen. Duiding van resultaten vergt kennis van achterliggende berekeningen, en staat of valt met een transparante rapportage.

### *II Naar een duurzaam energiesysteem voor Nederland in 2050*

**Doel** - Deze studie is gericht op de verkenning van een behoudende vs. een vooruitstrevende BKG emissiereductiestrategie voor de energietransitie naar een klimaatneutraal energie en grondstoffensysteem in 2050 met als doel om de beleidsdiscussie te voeden met inzichten over lange termijn systeemontwikkeling.

**Afbakening** - Uitgangspunt voor de 2050 beelden zijn de BKG emissiereductiedoelstellingen. Daarbij wordt rekening gehouden met overige BKG emissies (N<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub>, HFCs, PFCs, SF<sub>6</sub>) en resterende *land use, land-use change and forestry* (LULUCF) emissies. Verder wordt in de analyse ook rekening gehouden met emissies ten gevolge van gebruik van energie als grondstof in de industrie (scope 3 emissies). Voor wat betreft internationale lucht- en scheepvaart wordt onderkend dat beleidskaders nog onzeker zijn en wordt er uitgegaan van een ruime bandbreedte voor de BKG emissiereductie in lucht- en scheepvaart met 50% emissiereductie in ADAPT en 95% in TRANSFORM. Het Europese Fit-For-55 voorstel voorziet in een



doelstelling voor inzet van 63% hernieuwbare brandstoffen in de luchtvaart in 2050 een doelstelling van 75% BKG emissiereductie in de scheepvaart.

**Methodiek** - In deze studie zijn twee scenario's opgesteld voor de ontwikkeling van de energie- en grondstofbehoefte richting 2050. De verhaallijn van de scenario's onderscheidt een behoudend pad met behoud van de huidige levensstijl van de Nederlandse bevolking (ADAPT), en een vooruitstrevend pad met een sterkere transformatie van levensstijl naar een duurzame samenleving (TRANSFORM).

In het ADAPT Scenario is de (intrinsieke) motivatie tot verandering van de huidige levenswijze beperkt. De reductiedoelstellingen worden gerealiseerd door beperkte incrementele aanpassingen in het energiesysteem, met een vergelijkbare energie-intensiteit als in het huidige. Tegen die achtergrond veronderstelt dit scenario dat er voldoende draagvlak is voor de meer omstreden technologieën zoals CCS en biomassa.

In het TRANSFORM Scenario wordt sterker ingezet op systeem- en gedragsverandering en fundamentele aanpassing van productieprocessen met een dalende energie-intensiteit tot gevolg. Dit scenario veronderstelt dat er beperkt draagvlak is voor de meer omstreden opties zoals CCS en biomassa. De scenario's laten enkel import van fossiele energiedragers en (beperkt) biomassa toe; import van waterstof wordt niet mee genomen. Zie Bijlage A voor een overzicht van de verdere kenmerken van deze scenariostudie.

Deze verhaallijn is vervolgens vertaald in concrete bandbreedten voor oplossingsruimte voor de optimalisatie van het energiesysteem met het integrale energiesysteem model OPERA (Daniels, Stralen, Dalla Longa, Smekens, & Zwaan, 2021; PBL, 2019) dat door PBL en TNO wordt ingezet voor verkenning van kosten-optimale integrale energiesysteemontwikkeling. Het OPERA-model "bouwt" een optimaal integraal energiesysteem op basis van een grote aantal mogelijke technologieën gekarakteriseerd naar -technisch of aanvaardbaar- potentieel en kosten. Daarbij wordt uitgegaan van een gegeven finale vraag naar energie en grondstoffen en/of achterliggende finale vraag (bijv. naar industriële producten, gebouwverwarming of voertuig kilometers), en relevante beperkingen voor BKG emissies.

### 1.3 Observaties

De beide studies verschillen sterk in doelstelling (infrastructuurverkenning vs. verkenning van energietransitie strategieën), in afbakening (II3050 is gericht op een CO<sub>2</sub>-neutraal energiesysteem, terwijl NL2050 is gericht op een klimaatneutraal energiesysteem). Verder verschillen de methoden sterk. Waar II3050 invulling geeft aan het energiesysteem op basis van *expert judgement* van energietechnieken met als doel uithoeken van de netbelasting in kaart te brengen, geeft NL2050 een techno-economisch optimale invulling aan het energiesysteem op basis van een database van technieken met in potentie uitkomsten die gevoelig zijn voor parameter *settings* of kostenkennallen.

## 2 Eindbeelden energiesysteem 2050

In deze paragraaf bespreken we de kwantitatieve eindbeelden, zoals die uit de beide studies wordt gepresenteerd. In de navolgende paragrafen bespreken we achtereenvolgens finale vraag naar energiedragers en de bijbehorende beelden voor het primaire aanbod van energiedragers.

Belangrijkste uitgangspunten van de beide studies liggen in de emissieveronderstellingen voor 2050 en de verhaallijnen in de beide studies zoals besproken in de voorgaande paragraaf. De verhaallijnen zijn echter nogal kwalitatief en schetsmatig van aard, zodat de vertaalslag naar energiesysteemsenario's niet altijd eenduidig is. Het karakter van deze vertaalslag verschilt bovendien voor I13050 en NL2050 vanwege het verschil in methodiek: in geval van I13050 worden direct scenariokeuzes gemaakt, maar ook richtingen aangegeven voor nadere uitwerking, terwijl voor NL2050 de verhaallijnen worden vertaald naar *settings* van de oplossingsruimte (zoals technische of aanvaardbare potentiëlen voor verschillende technieken). In Bijlage B presenteren we een gedetailleerd sectoraal overzicht van de veronderstellingen per scenario.

### 2.1 Finale vraag per sector (energie & grondstoffen)

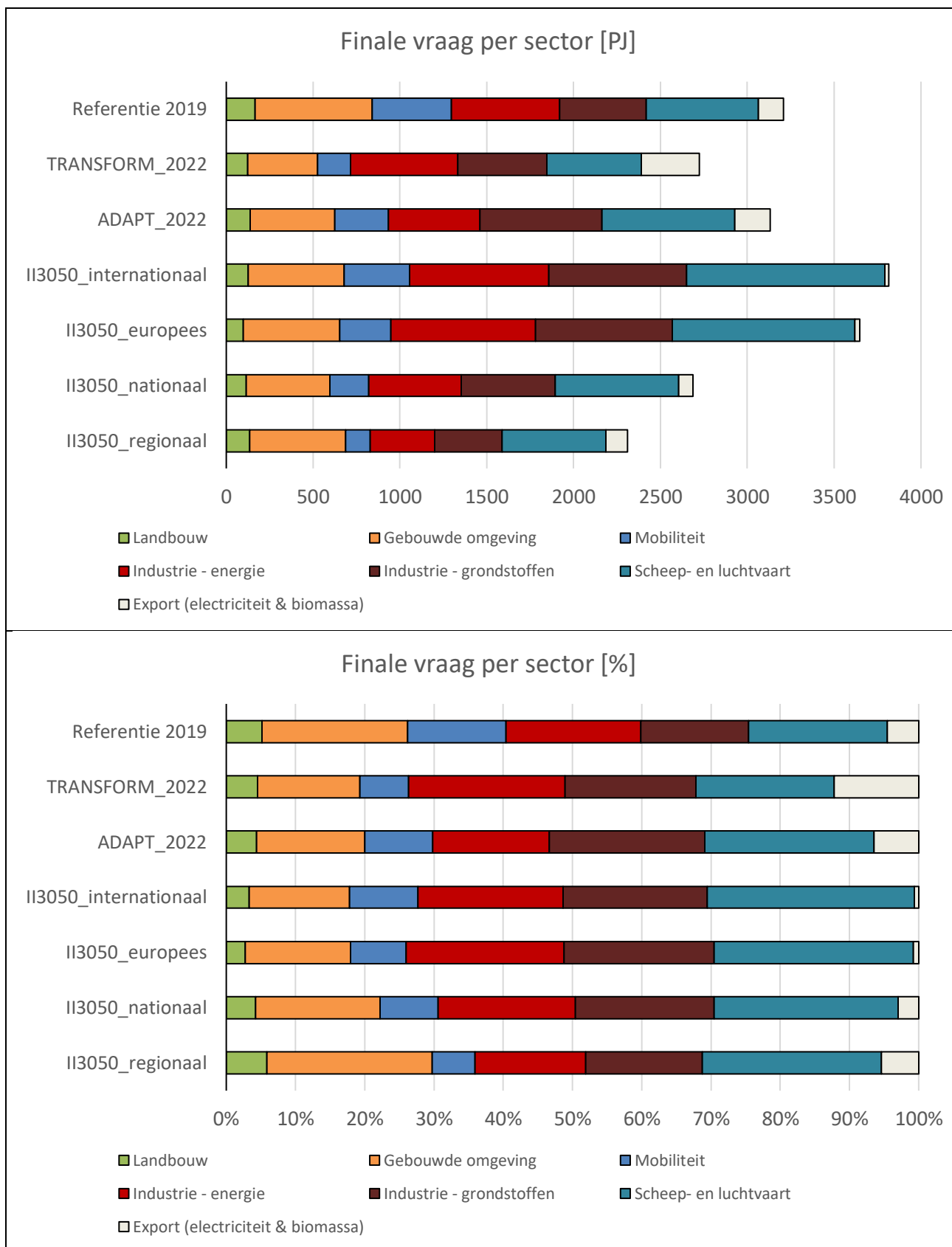
Een overzicht van de finale vraag naar energie en (energetische) grondstoffen in de Nederlandse economie en export anno 2019<sup>1</sup> en de ontwikkeling daarvan in de beelden uit I13050 en NL2050 wordt weergegeven in Figuur 1. Uit de weergave kan opgemaakt worden dat met 37% veruit het grootste deel van het huidige gebruik plaatsheeft in de industrie (20% energie & 16% grondstoffen), gevolgd door 22% in de gebouwde omgeving, 21% in bunkering (internationale scheep- en luchtvaart), 15% in mobiliteit en tot slot 5% in de landbouw (vooral glastuinbouw) in 2019.

Uit het overzicht blijkt ook dat de totale finale vraagontwikkeling in de 2050 beelden sterk varieert, in zowel de I13050 als de NL2050 analyse. De variatie wordt omspannen door ongeveer 30% daling (I13050 Regionaal) tot 20% stijging (I13050 Internationaal) ten opzichte van 2019, waarbij de I13050 scenario's daarbij veruit de grootste spreiding laten zien. De grootste variaties volgen uit industrie en bunkering. Laten we deze buiten beschouwing, dan daalt het energiegebruik voor alle scenario's met 20% tot 35%.

**Industrie** - In de I13050 studie wordt gekozen voor variatie van 1% jaarlijkse krimp (Regionaal) tot 1% jaarlijkse groei (Europees & Internationaal), passend bij de verhaallijnen. Voor het Nationale, Europese en Internationale scenario halveert de productie van raffinage in combinatie met nieuwe e-refining in vergelijking tot de huidige productie. In het regionale scenario loopt productie van raffinaderijen zelfs terug tot 14% van de huidige niveaus, waarmee de minimale behoefte van de chemische industrie juist bediend wordt. Het overzicht voor industrie suggereert dat industrie veel nadere karakterisering vergt, waarmee het heterogene en complexe karakter van de industrie duidelijk wordt. In I13050 worden scenario's onderscheiden voor herkenbare technieken (elektrificatie, groengas, waterstof en fossiel + CCS), met aanvullend ruimte voor CCS, al (Regionaal & Nationaal) of niet (Europees & Internationaal) met gevolgen voor grondstoffen in chemie (pyrolyse olie vs. aardolie) en technieken die geschikt zijn voor circulair staal en aluminium. De NL2050 studie onderscheidt deze sectoren ook, maar ook de zout, glas en keramiek (in verband met hoge temperatuur technieken). Voor de chemie volgt in deze analyse niet de pyrolyse route voor plastics productie, maar de een fundamentele aanpassing van het productieproces voor plastics uit (bio)methanol. Achterliggende vraagontwikkeling naar industriële productie wordt voor ADAPT gebaseerd op extrapolatie van de Klimaat- en Energieverkenning 2021 en neerwaarts aangepaste projecties (TRANSFORM). De energie en grondstoffen vraag vanuit de industrie varieert van ongeveer -30% tot 45% in respectievelijk I13050 Regionaal en Europees, als gevolg van een generieke groei of krimp

---

<sup>1</sup> We kiezen voor het 2019 vanwege de grote impact van COVID in 2020.



Figuur 1: overzicht van sectorale finale vraag naar energie en grondstoffen in 2019, ADAPT & TRANSFORM en de I13050 scenario's in PJ (boven) en in % (onder)

veronderstellingen van -1% tot 1% op jaarbasis. In ADAPT groeit de vraag naar energie en grondstoffen met ongeveer 10%, terwijl dat in TRANSFORM vrijwel gelijk blijft. In beide studies wordt beperkt ingegaan op verschillen in toekomstperspectieven per bedrijfstak.

**Internationale luchtvaart- en scheepvaart** - I13050 veronderstelt ook hier variatie in krimp met 1% (I13050 Regionaal) tot een groei van 1-2% (I13050 Internationaal), passend bij de verhaallijnen. Verder wordt de energiebehoefte ingevuld met synfuel productie op basis van de verhoudingen tussen wind-op-zee voor overige sectoren en het resterend potentieel in het Scenario Nationaal (om te vermijden dat het technisch wind-op-zee potentieel in alle vier scenario's tot het maximum wordt ingezet voor synfuel productie) en

verder aangevuld met import van synfuels. In NL2050 gaat ADAPT uit van een emissiereductiedoelstelling van 50% voor dit segment. Uitkomst van de optimalisatie is dan ook nog fossiele inzet, met een LNG en bio-LNG (90% vs. 10%) in scheepvaart en fossiele kero en bio-kero (30% vs. 70%) voor de luchtvaart in ADAPT. TRANSFORM daarentegen gaat uit van een emissiereductie-doelstelling van 95% dit segment en met vooral inzet van synthetische LNG in de scheepvaart als resultaat, terwijl de luchtvaart volledig overgaat op bio-kero. Geen van alle scenario's houdt rekening met een mogelijk veranderende rol Rotterdam in bunkering. Deze rol is echter ten dele gestoeld op de grote rol van raffinage in Rotterdam, en raffinage wordt in vrijwel alle scenario's (sterk) afgebouwd.

**Mobiliteit** - In de I13050 studie wordt gekozen voor variatie in krimp van 1% per jaar (Regionaal) en groei van 1% per jaar (Internationaal), passend bij de verhaallijnen. Ook nu worden de belangrijkste technieken (elektrisch, waterstof, groengas, biobrandstof) in verschillende verhoudingen ingezet, passend bij een verhaallijn met meer elektronen of juist meer moleculen (en naar type moleculen). In I13050 varieert elektrificatie van 100% personenvervoer en 75% in vracht (Regionaal) tot 50% in personenvervoer en 25% in vracht, in beide gevallen verder aangevuld met waterstof en biobrandstoffen. De energievraag varieert van ongeveer -70% tot -20% in I13050. In NL2050 wordt een vergelijkbare variatie in krimp en groei voor voertuigkilometers in personenvervoer verondersteld, terwijl beide scenario's eenzelfde groei voor voertuigkilometers in vrachtvervoer aannemen. Uit de optimalisatie volgt eenzelfde transitie voor beide scenario's: de energievraag varieert van ongeveer -60% tot -30% in ADAPT/TRANSFORM, waarbij personenvervoer volledig elektrisch wordt, terwijl het vrachtvervoer volledig overstapt op waterstof. Voor personenvervoer lijkt dat niet onaannemelijk, maar recente ontwikkelingen in vrachtvervoer suggereren dat er zeker ook kansen voor elektrificatie zijn, terwijl er nu al drop-in hernieuwbare diesel beschikbaar is. Bovendien zijn er veel nieuwbouwplannen voor bioraffinage in Rotterdam.

**Gebouwde omgeving** - Voor de gebouwde omgeving worden er een aantal beeldbepalende keuzes gemaakt in de I13050 analyse met variaties op de onderlinge verhoudingen tussen de belangrijkste technieken (isolatie, all-electric, warmtenet, hybride warmtepomp en zonthermie) voor de warmtetransitie. Deze keuze is ingegeven door een inschatting van de techno-economisch realistische potentiële om scenario's voor de bandbreedte aan mogelijke netbelastingen op de stellen. Er wordt echte vooral sterk ingezet op elektrificatie en tot 30% warmtenetten in I13050 regionaal. De energiebehoefte daalt met 20% tot 30% in I13050. Daarbij wordt wel ruim 45 PJ aan extra vraag vanuit datacenters meegerekend. In geval van NL2050 wordt een wat gedetailleerdere karakterisering van de gebouwde omgeving opgesteld. Uit de optimalisatie volgt vervolgens een sterke elektrificatie als resultaat in beide scenario's. Warmtenetten blijven bescheiden met 5% in beide scenario's, mede omdat de beschikbare restwarmte in de industrie afneemt in de scenario's (onder meer door sterke krimp in met name raffinage). Waterstof wordt voor 10% ingezet in ADAPT, maar wordt te schaars in TRANSFORM door toepassing in andere sectoren. Opvallend is dat in beide scenario's ook nog aardgas wordt toegepast; de schaarse hernieuwbare energiedragers zijn harder nodig voor andere sectoren, terwijl de emissies gecompenseerd kunnen worden met negatieve emissies (bio-energie met CO<sub>2</sub>-afvang en opslag). De energiebehoefte daalt met ongeveer 30% tot 40% in deze scenario's, inclusief een marginale groei van vraag vanuit datacenters.

**Landbouw** - Ook voor landbouw (m.n. glastuinbouw) varieert I13050 in verhoudingen tussen bekende technieken (elektrificatie, groengas, biomassa, geothermie en WKO). De verandering in energiebehoefte varieert van ongeveer -40% tot -20% in I13050. Uit NL2050 volgt een gelijkblijvende verhouding tussen warmte- en elektriciteitsgebruik (ADAPT) vs. een oplopende elektrificatie (TRANSFORM), en een krimp van 20% tot 25% als gevolg.

De finale vraag naar energie en grondstoffen in de scenario's levert de volgende beelden:

- **Totale finale vraag** - De finale vraag (inclusief grondstoffen en bunkering) varieert sterk door de grote variaties in vraag vanuit Industrie en internationale lucht- en scheepvaart. De variatie wordt omspannen door ongeveer 30% daling (I13050 Regionaal) tot 20% stijging (I13050 Internationaal) ten opzichte van 2019, waarbij de I13050 scenario's daarbij veruit de grootste spreiding laten zien. De grootste variaties volgen uit. Laten we industrie en bunkering buiten beschouwing, dan daalt het energiegebruik voor alle scenario's met 20% tot 45%. Daarmee wordt een ruimte bandbreedte omspannen, waar internationale studies meer aan de bovenkant van deze bandbreedte zitten.<sup>2</sup> De grootste variaties in de totale vraag volgen dus uit de sector industrie en internationale lucht- en scheepvaart:

---

<sup>2</sup> zie ook de achtergrondstudie 'Scenario's voor netto-nul emissies: lessen uit omringende landen' die door de Expertgroep Energiesysteem werd uitgevoerd.

- Voor **industrie** varieert de finale vraag naar energie en grondstoffen van een krimp van 30% tot een groei met 40% door de achterliggende groeiverwachtingen voor industriële producten. Hierbij wordt veelal uitgegaan van generieke krimp en groeiveronderstellingen, al wordt in alle gevallen voor raffinage een krimp verondersteld. Toekomstperspectieven voor overige industrie worden beperkt uitgediept.
  - Ook **internationale lucht- en scheepvaart** laat sterke verschillen in krimp en groei zien op basis van veronderstelde generieke groeiverwachtingen. Geen van alle scenario's houdt rekening met een mogelijk veranderende rol Rotterdam in bunkering.
  - De **overige sectoren** laten sterke dalingen van energiebehoefte zien, met de grootste daling in de vraag naar energie in de mobiliteit (20% tot 70%), gevolgd door de landbouw (20% tot 40%) en gebouwde omgeving (20% tot 40%), goeddeels als gevolg van elektrificatie respectievelijk besparing en isolatie.
  - **Energie efficiëntie** - Afgezien van groeiveronderstellingen is ook de ontwikkeling van energie efficiëntie van belang. Er treden tegengestelde effecten op in deze ontwikkeling:
    - Enerzijds treedt een daling van de energievraag door **sterke elektrificatie** op in alle scenario's, doordat de efficiëntie aan de vraagkant toe neemt. Elektrificatie door de vervanging van auto's met verbrandingsmotoren door elektrische auto's en vervanging van CV-ketels door warmtepompen leidt zo tot een fors lager energiegebruik.
    - Anderzijds treedt ook stijging van energiegebruik op door **afnemende conversierendementen** in de industrie. In deze sector speelt energieconversie een grote rol in verduurzamingsroutes met een toename van energieverliezen. Dit geldt met name voor scenario's waarin veel waterstof en biomassa gebruikt wordt, zoals in de methanolroute voor plastics en de productie van hernieuwbare brandstoffen, zijn inefficiënter dan conventionele fossiele processen. Doordat vooral in de industrie veel biomassa en waterstof gebruikt wordt, nemen juist daar de energieverliezen het sterkst toe. Dit maakt dat scenario's met hogere industriële activiteit en/of een grotere vraag naar bunkerbrandstoffen ook qua algehele energievraag vrij hoog uitvallen.
- Door de bovengenoemde tegengestelde trends is in de ADAPT en TRANSFORM scenario's richting 2030 een sterke daling van de energieverliezen te zien, terwijl ze later in de tijd weer opnieuw toenemen doordat de grootschalige toepassing van niet-fossiele grondstoffen voor de chemie en waterstof in de scenario's relatief laat grootschalig worden ingezet (Zie Bijlage C).

In alle gevallen sprake van sterke groei van vraag naar elektriciteit en waterstof en beperkte groei van finale vraag naar biomassa en warmte. Er blijft in de meeste gevallen behoefte aan (pyrolyse) olie in verband met de productie van plastics. Ook blijft de vraag naar bunkerbrandstoffen hoog en neemt in de meeste gevallen relatief toe. In de volgende paragraaf wordt dat verder uitgewerkt.

## 2.2 Finale vraag per energiedrager (energie & grondstoffen)

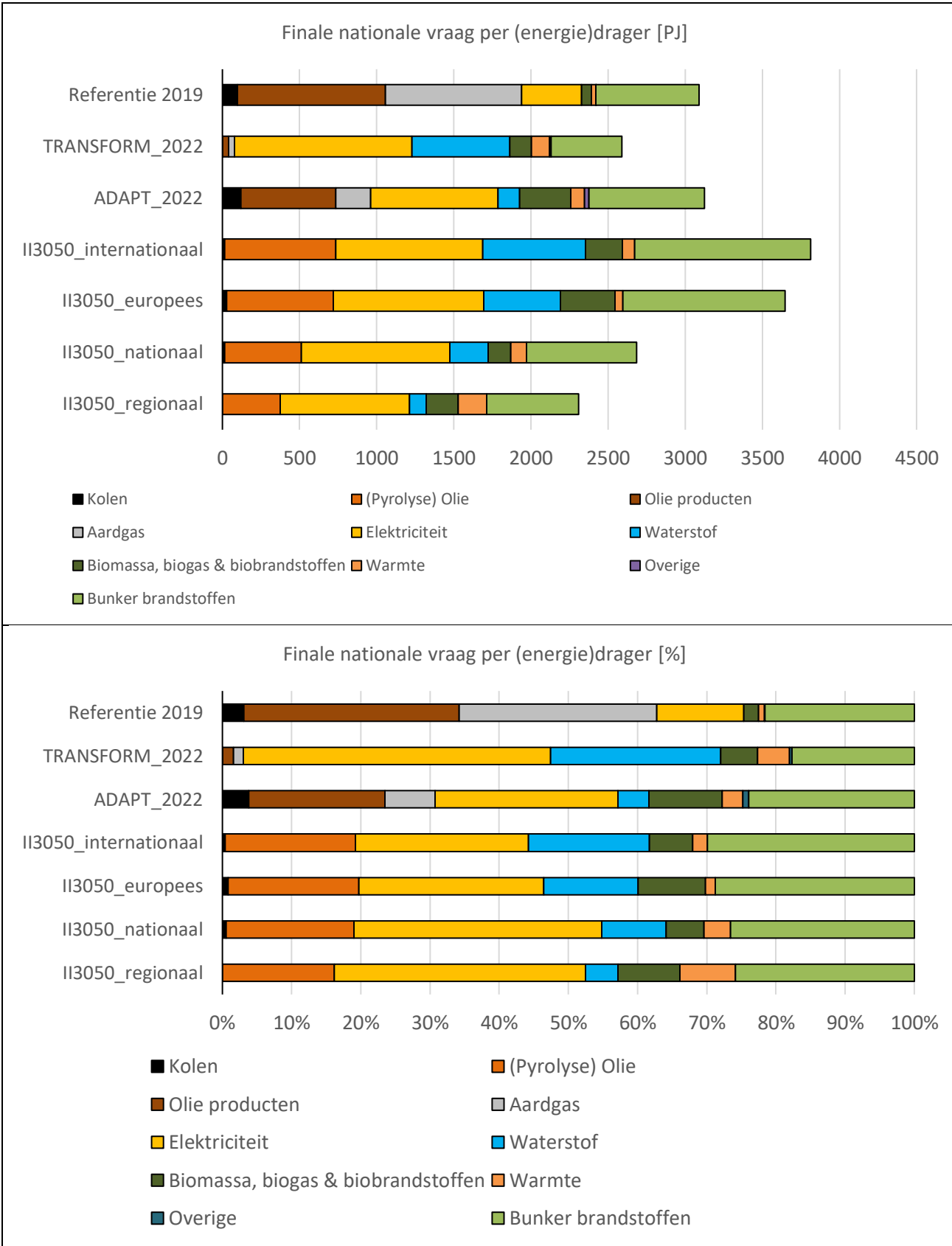
In Figuur 2 wordt een overzicht geboden van de finale nationale vraag naar energie en grondstoffen per energiedrager. Waar mogelijk is in de onderstaande analyse onderscheid gemaakt tussen de vraag naar energie en de vraag naar energetische grondstoffen. Uit de finale vraag naar energie en energetische grondstoffen blijkt een sterke terugval van fossiele dragers ten opzichte van 2019.

**Aardgas** - alleen in ADAPT en TRANSFORM is nog er nog finale vraag naar aardgas. Het gaat vooral om inzet in internationale scheepvaart (LNG), al worden er nog kleine volumes in voor verwarming van de gebouwde omgeving, en industrie (gecompenseerd door negatieve emissies door toepassing van bio-energie met CO<sub>2</sub>-afvang en opslag). Alleen in het Europese I13050 scenario wordt aardgas in de vorm van blauwe waterstof ingezet als energetische grondstof. In de figuur is deze inzet van aardgas niet zichtbaar maar is het in de vorm van waterstof terug te zien.

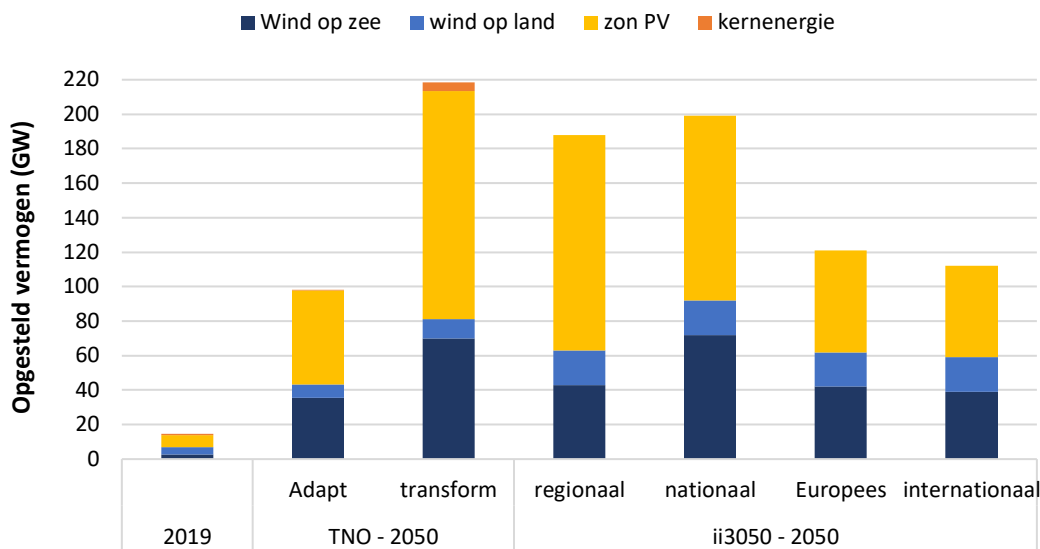
**Aardolie** - In zowel ADAPT als I13050 (internationaal en Europees) wordt aardolie in 2050 ingezet als (energetische) grondstof voor plastics. Pyrolyse olie speelt in die context een grote rol in I13050 Regionaal en Nationaal, terwijl dat voor NL2050 niet het geval is.

Pyrolyse-olie wordt voor een groot deel geproduceerd uit (fossiele) plastics. Dit betekent dat er voldoende plasticafval aanwezig moet zijn in deze scenario's, hetgeen ook veronderstelt dat er afval geïmporteerd moet worden. De resterende reststromen kunnen leiden tot scope 3 emissies, die echter niet in kaart gebracht worden in de studie. In NL2050 worden biomassa en waterstof ingezet om plastics te produceren uit hernieuwbare grondstoffen. Pyrolyse olie komt wel voor in NL2050, maar betreft in feite secundair energie aanbod (dus niet zichtbaar). Het gaat met 3% (ADAPT) tot 7% (TRANSFORM) bovendien om een bescheiden volumestroom.

**Elektriciteit en waterstof** - In alle scenario's is een sterke groei van elektriciteit, en in beperktere mate waterstof (laatstgenoemde zowel voor de energie- als grondstofvoorziening) te zien. Er zijn wel grote verschillen in de verhouding van vraag naar elektriciteit (directe elektrificatie) en de vraag naar waterstof (i.e. indirecte elektrificatie, maar in bredere zin de moleculaire energiedragers). De I13050 scenario's zijn onder meer ontworpen voor het in beeld brengen van de variatie op deze trade-off, met elektriciteitsrijke scenario's Regionaal en Nationaal en een sterkere inzet op moleculaire energiedragers in het Europese en Internationale I13050 scenario. Gegeven de doelstelling van I13050 (i.e. de uithoeken van de toekomstige netbelastingen in beeld brengen), zouden de I13050 scenario's dan ook het technisch potentieel voor verhoudingen tussen de vraag naar elektriciteit en moleculaire energiedragers binnen de energievoorziening moeten schetsen. Ook in NL2050 loopt het beeld van deze verhoudingen sterk uiteen, wat goeddeels verklaard wordt door de continuering van inzet van (fossiele) moleculaire energiedragers in ADAPT voor de industriële grondstofvoorziening en de sterk transformatieve inzet op hernieuwbare elektriciteit in de grondstofvoorziening (tot de grenzen van het technisch potentieel) in TRANSFORM. Ook omdat de grenzen van de draagkracht van het systeem in dat scenario opgezocht worden, levert een hogere mate van directe elektrificatie voordelen in verband met de lagere conversieverliezen. De relatieve bijdrage van directe elektrificatie is in dit scenario zelfs hoger dan in de I13050 scenario's. De achterliggende inzet hernieuwbare elektriciteit loopt sterk uiteen. Wind op zee loopt op van 2,6 GW in 2019 tot 38-70 GW in 2050. Het opgesteld vermogen van wind op land stijgt van 4 GW in 2019 naar 7-20 GW in 2050. In de verdere doorgroei van zon-PV zit een grote variatie tussen de scenario's met een groei van 7 GW in 2019 tot



Figuur 2: overzicht van finale vraag naar energie en grondstoffen per drager in 2019, ADAPT & TRANSFORM en de I13050 scenario's in PJ (boven) en in % (onder)



Figuur 3: overzicht van het opgesteld vermogen van wind en zon in 2019, ADAPT & TRANSFORM en de II3050 in GW.

53-130 GW in 2050. Figuur 3 schetst te sterk uiteenlopende primaire hernieuwbare elektriciteitsvoorziening aan de hand van de geïnstalleerde vermogens.

**Biomassa/biogas/groengas** - In alle scenario's is er ook sprake van finale vraag naar biomassa, biogas en groengas, maar de verhoudingen en toepassing loopt uiteen. In II3050 is er een relatief hoge bijdrage van vraag naar groengas in de scenario's Regionaal en Europees, bij een hogere beschikbaarheid vanuit respectievelijk het regionale energiesysteem en het Europese energiesysteem (i.e. groengas import). In het regionale scenario wordt groengas vooral ingezet in de energievoorziening van de gebouwde omgeving en de landbouw (nabij de bron). In het Europese scenario wordt een grote hoeveelheid van 230 PJ groengas import verdeeld over vraag naar energie in met name gebouwde omgeving en industrie, en bescheidener hoeveelheden ingezet als grondstof voor biobrandstoffen in mobiliteit. In het Scenario Internationaal en Nationaal wordt met 48,4 PJ juist vrij zwaar ingezet op biomassa als grondstof voor de Nederlandse mobiliteitssector. In NL2050 volgt een wat hogere vraag naar biomassa (en biogas) voor de energievoorziening van de industrie (ADAPT), terwijl in NL2050 biomassa vooral in de vraag naar bunkerbrandstoffen wordt voorzien. Dit bedraagt in TRANSFORM 25% en in ADAPT 30% van de totale vraag (niet uitgesplitst in Figuur 2). Biobrandstoffen vormen in deze studie een kosteneffectieve invulling van de (bunker)vraag naar hernieuwbare grondstoffen. Hiermee wordt in de 50% emissiereductie voor internationaal vliegverkeer in ADAPT voorzien, maar loopt men in het TRANSFORM al snel tegen de grenzen van de beperkte importvolumes aan.

**Warmtenetten** - Warmtelevering speelt een bescheiden rol in de verschillende scenario's. De vraag is beperkt tot de energievoorziening van de gebouwde omgeving en glastuinbouw. In II3050 wordt alleen een relatief grote warmtevraag verondersteld in het regionale scenario, i.e. in context van een sterke regionale systeemontwikkeling. In NL2050 volgt een relatief wat grotere warmtevraag in het TRANSFORM scenario, in dat geval vooral gedreven door de hoge energievraag waardoor het systeem tegen de randen van het potentieel voor energievoorziening aanloopt.

Het overzicht van de finale vraag per energiedrager in de scenario's laat zien dat in alle gevallen sterk wordt ingezet op zon en wind. Er zijn echter ook grote verschillen te zien:

- **Energievraag** - De finale vraag laat een waaier aan groei/krimp perspectieven zien. Er is in alle gevallen sprake van sterke groei van vraag naar elektriciteit en waterstof en beperkte groei van finale vraag naar biomassa en warmte. Er blijft in de meeste gevallen behoefte aan (pyrolyse) olie in verband met de productie van plastics. Ook blijft de vraag naar bunkerbrandstoffen hoog en neemt in de meeste gevallen relatief toe.
- **Moleculen vs. elektronen** - Er zijn sterke verschillen in de verhouding van vraag naar moleculaire energiedragers en elektriciteit, die af zal hangen van kosten, uitvoerbaarheid, draagvlak etc. van de verschillende technische opties voor emissiereductie in de verschillende sectoren maar vooral van het gevoerde (Europese) beleid ten aanzien van de scope 3 emissies en de positionering van Rotterdam als bunker. De kernstudies spannen daarin een ruime bandbreedte op van 25% elektronen vs. 75% moleculen (internationaal) tot 44% elektronen vs. 56% moleculen (TRANSFORM).



- **Fossiel vs. hernieuwbaar** - Er zijn grote verschillen in gebruik van fossiel vr. hernieuwbaar. Dat is onder meer het gevolg van inzet van pyrolyse olie als grondstof voor de chemie (in circulaire scenario's in I13050) vs. inzet van fossiele aardolie (in Europees en Internationaal) en inzet van biomassa & waterstof in de methanolroute in de beide NL2050 scenario's (ADAPT & TRANSFORM). Verder varieert fossiel vs. hernieuwbaar ook door invulling van internationale lucht- en scheepvaart. Die varieert van import van hernieuwbare bunkerbrandstof (I13050) tot import van biomassa en productie van synthetische methanol (in TRANSFORM, vanwege de emissiereductiedoelstelling 95%) of aardolie (in ADAPT, vanwege de emissiereductie doelstelling 50%). Het gaat daarbij om 600 tot 1000PJ of 25 á 30% van het totaal, waarvan ruwweg een derde voor luchtvaart en twee derde voor scheepvaart.

### 2.3 Aanbod van energie(dragers)

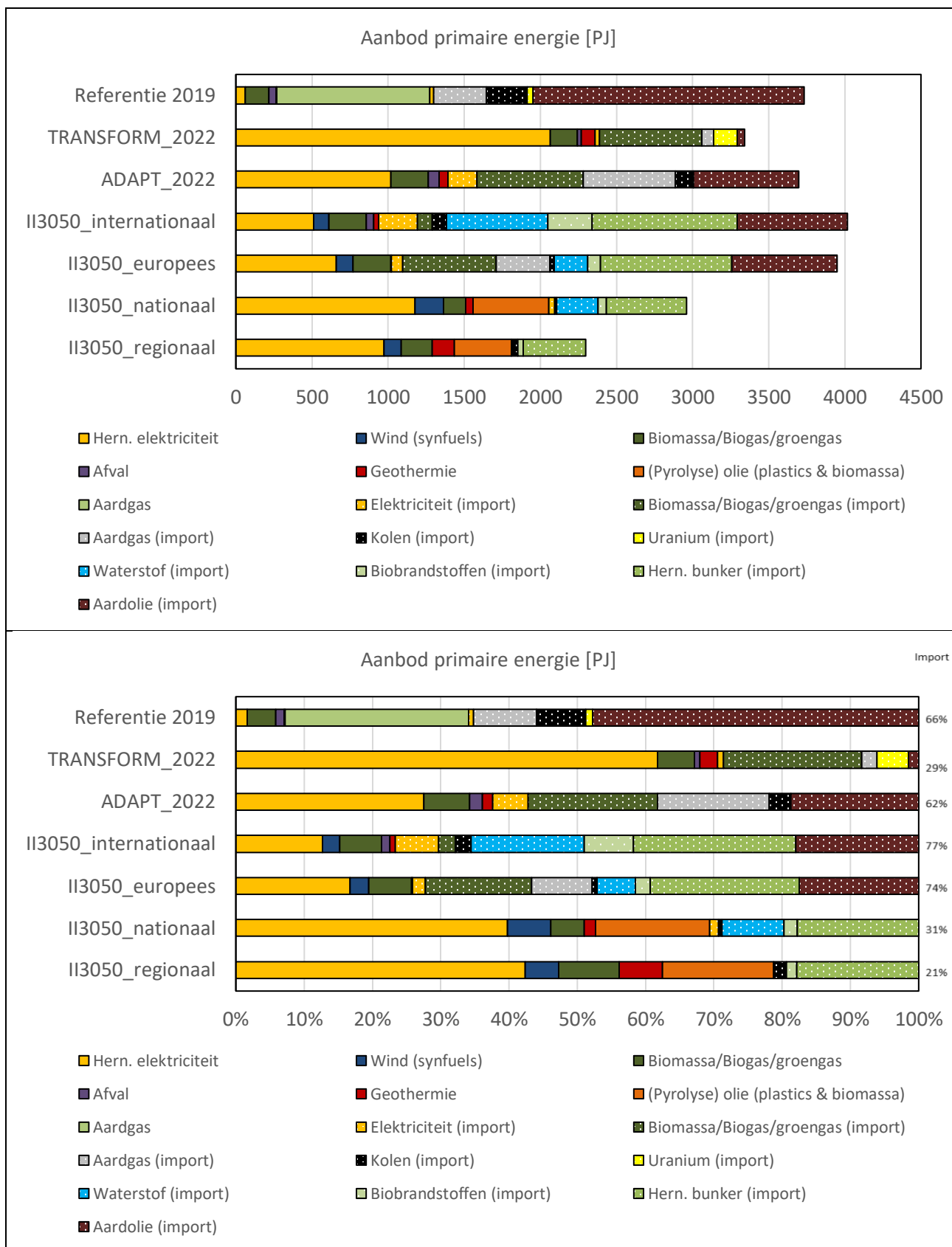
Een overzicht van het aanbod van primaire energie in de Nederlandse economie anno 2019 en de ontwikkeling daarvan in de beelden uit I13050 en NL2050 wordt weergegeven in Figuur 4. Hierin wordt het nationaal aanbod in effen kleuren onderscheiden van importen die worden aangegeven met een patroon. Uit het overzicht valt direct de grote rol van fossiele importen in 2019 op. Met 37% heeft veruit het grootste deel van het huidige gebruik plaats in de industrie (20% energie & 16% grondstoffen), gevolgd door 22% in de gebouwde omgeving, 21% in bunkering (internationale lucht- scheepvaart), 15% in mobiliteit en tot slot 5% in de landbouw (vooral glastuinbouw).

In beide beelden voor 2050 neemt de rol van (fossiele) importen sterk af ten opzichte van 2019 (66%) in alle scenario's, en blijkt dat alle scenario's uitgaan van een sterke groei van het nationale hernieuwbare aanbod. Voor de 2050 beelden laten de scenario's met een wat meer regionaal karakter zoals Regionaal, Nationaal en TRANSFORM een sterk teruglopende importafhankelijkheid zien tot ongeveer 20% à 30%, door zeer sterke ontwikkeling van de hernieuwbare elektriciteitsproductie en biomassa. In de internationalere scenario's Europees, Internationaal en ADAPT waarbij importafhankelijkheid op een niveau van 60% à 75% ligt, vergelijkbaar met de huidige situatie.

Het primaire energieaanbod laat een sterke groei van lokaal geproduceerde hernieuwbare elektriciteit zien voor alle scenario's, maar variatie op biomassa vs. pyrolyse olie zoals ook in de finale vraag naar voren kwam, aangevuld met de import van een grote variatie in zowel omvang als type energetische grondstof zoals bunkerbrandstof, waterstof en biomassa.

Grote verschillen (trade-offs) stemmen gedeels overeen met de beelden voor finale vraag naar energiedragers:

- **Moleculen vs. elektronen** - Er zijn sterke verschillen in de verhouding van vraag naar moleculaire energiedragers en elektriciteit, die af zal hangen van kosten, uitvoerbaarheid, draagvlak etc. van de verschillende technische opties voor emissiereductie in de verschillende sectoren. De studies spannen



Figuur 4: overzicht van aanbod van primaire energie en grondstoffen per drager in 2019, ADAPT & TRANSFORM en de I13050 in PJ (boven) en in % (onder). Kleurcodering: effen voor nationaal aanbod, patroon voor import.

(inclusief bunkering) een ruime bandbreedte op van 20% elektronen om 80% moleculen (I13050 Internationaal) tot 60% elektronen om 40% moleculen (TRANSFORM).

- Fossiel vs. hernieuwbaar** - fossiel speelt met ongeveer 40% nog grote rol in ADAPT (met inzet op negatieve emissies & de veronderstelde 50% emissiereductie doelstelling bunkering) en een beperkte rol in TRANSFORM. In de I13050 scenario's wordt ingezet op CO<sub>2</sub>-neutrale sectorale ontwikkeling, en speelt aardgas enkel nog een rol in blauwe waterstofproductie (I13050 Europees). Verder wordt onderscheid gemaakt tussen inzet van pyrolyse olie (I13050 Regionaal en Nationaal) vs. aardolie (I13050 Europees en Internationaal) als grondstof voor de chemische industrie.

- **Energie import vs. lokale productie** - varieert van bijna 80% (II3050 Internationaal) tot ongeveer 20% (II3050 Regionaal). Er zijn grote verschillen in inzet op lokale hernieuwbare bronnen tussen enerzijds II3050 Regionaal en Nationaal en TRANSFORM) en anderzijds import van fossiele danwel hernieuwbare energiedragers in II3050 Europees en Internationaal en ADAPT. Merk op dat export in het overzicht van het primaire energieaanbod niet expliciet wordt weergegeven.
- **Hernieuwbare elektriciteit** - wind en zon varieert van 15% (II3050 Internationaal) tot ongeveer 60% (TRANSFORM) van de finale vraag in 2050. De bovenkant van de bandbreedte loopt tegen grenzen van het veronderstelde technische potentieel (en dus niet de grenzen van bijvoorbeeld flexibiliteit).

Met groeiende bijdragen van zon en wind neemt de **energie efficiëntie** in vrijwel alle scenario's toe waar conventionele thermische centrales en bijbehorende conversieverliezen worden vervangen. In de scenario's waar veel elektriciteit wordt omgezet in waterstof (II3050 Europees en Internationaal en TRANSFORM) wordt dit effect beperkt vanwege de conversieverliezen die daarbij optreden. Zie voor verdere toelichting op energie efficiëntie in ADAPT en TRANSFORM ook Bijlage C.

### 3 Vergelijking van scenario's

In voorgaande zijn de studies gekenschetst, uitgangspunten, aannames & veronderstellingen gepresenteerd en de energiesysteembeelden voor 2050 besproken. In deze paragraaf gaan we in op de in het oog springende overeenkomsten en verschillen, gevolgd door een korte bespreking van onzekerheden.

#### 3.1 Overeenkomsten en verschillen in de uitkomsten

Robuuste elementen in de eerste 2050 beelden van het Nederlandse energiesysteem:

- In de **finale vraagontwikkeling** laten de scenario's vrij stabiele ontwikkeling van finale vraag uit landbouw en gebouwde omgeving zien, maar variëren vooral industrie (energie & grondstoffen) en mobiliteit (incl. internationale scheep en luchtvaart). De achtergronden van deze variaties zijn beperkt uitgewerkt en veelal gebaseerd op generieke krimp of groei van het sectorale activiteitsniveau.
 

**Industrie** - Industrie laat in de scenario's sterk verschillende groeiperspectieven zien, maar die zijn veelal generiek van aard (II3050) of liggen in lijn met de verwachtingen voor de komende 10 jaar (NL2050). Voor raffinage wordt wel een sterkere krimpverwachting gehanteerd (II3050) of resulteert dit uit de afnemende afzetmarkt in mobiliteit (NL2050). Voor de chemie laat de productie van plastics sterk verschillende trajecten zien, met continuering van de huidige fossiele route, chemische recycling routes en bio-based routes. De keuze zal consequenties voor scope 3 emissies hebben, maar dat wordt buiten beschouwing gelaten.

**Internationale lucht- en scheepvaart** - het gebruik van bunkerbrandstoffen varieert sterk op basis van generieke groeiveronderstellingen. In vrijwel alle scenario's neemt de relatieve vraag naar bunkerbrandstoffen toe, in het verlengde van de huidige hub-functie van Rotterdam in bunkering voor de scheepvaart. Geen scenario houdt rekening met veranderende rol van Rotterdam als bunkering hub, en de samenhang met de krimpende raffinage activiteit. De routes voor CO<sub>2</sub>-emissiereductie voor bunkering variëren sterk, van productie uit geïmporteerde aardolie en biomassa (uitgaande van een 50% emissie reductie veronderstelling voor 2050 in ADAPT), import van (zeer grote hoeveelheden) hernieuwbare brandstoffen (II3050), of productie van biobrandstoffen voor de luchtvaart en synthetische methanol voor de scheepvaart (uitgaande van een 95% emissie reductie veronderstelling voor 2050 in TRANSFORM).
- In alle scenario's neemt gebruik van **fossiele energiedragers** sterk af. In enkele (internationalere) varianten speelt aardolie nog een rol als grondstof voor plastics in de chemische industrie (II3050, Europees en internationaal) en aardgas als grondstof voor blauwe waterstof (II3050, Europees). Daartegenover staan scenario's met hogere inzet van pyrolyse olie, i.e. chemische recycling van plastics (II3050, Regionaal en Nationaal), of inzet van waterstof en biomassa voor de methanolroute voor de productie van plastics (NL2050, ADAPT en TRANSFORM). Groene waterstof biedt in deze scenario's het alternatief voor blauwe waterstofproductie.
- In alle gevallen wordt in de primaire vraag voorzien door grootschalige ontwikkeling van **wind en zon** in combinatie met grootschalige ontwikkeling van **directe elektrificatie en indirecte elektrificatie** (i.e. elektrificatie via inzet van groene waterstof) voor de finale vraag. Waterstof speelt ook in alle gevallen

een rol in de verwaarding van de toenemende elektriciteitsproductie(pieken) en flexibiliteit, en dus ook in de balans tussen elektronen en moleculen. Dat varieert van ongeveer 20% elektronen om 80% moleculen (II3050, internationaal) tot ruim 60% elektronen om 40% moleculen (NL2050, TRANSFORM).

- De rol van **biomassa, groengas en biobrandstoffen** loopt sterk uiteen. In de meer zelfvoorzienende en fossiele scenario's (II3050, Regionaal, Nationaal en Internationaal) spelen deze energiedragers tot 9% van het primaire aanbod een beperkte rol, maar in de andere scenario's wordt meer ruimte voor niet-fossiele import gegeven en loopt het gebruik van deze dragers sterk op tot 25% van het primaire aanbod.
- De scenario's verschillen sterk in veronderstellingen over toekomstige **import** van energie en grondstoffen. In geval van II3050 is bewust import gevarieerd van ongeveer 20% tot 80% van het primaire aanbod (waterstof, hernieuwbare brandstoffen, biomassa/groengas, fossiel), terwijl in NL2050 ruimte is gelaten voor fossiele importen en beperkte importen van biomassa en biobrandstoffen op basis van beschikbaarheid met een bandbreedte van ongeveer 30% tot 60% van het primaire aanbod als resultaat. In NL2050 wordt overigens verondersteld dat er geen waterstof wordt geïmporteerd.

### 3.2 Onzekerheden en witte vlekken

De besproken studies geven een goed inzicht in het huidige begrip van de systeemuitdagingen in de energietransitie. Door de scenarioanalyse wordt duidelijk dat er voor een aantal sectoren nog grote onzekerheden spelen die grote invloed zullen hebben op de verdere systeemontwikkeling en nadere analyse vergen.

**Vraag** - Grote onzekerheden hebben betrekking op de vraagontwikkeling, en in het bijzonder de ontwikkeling van de vraag naar industriële grondstoffen en bunkerbrandstoffen. Voor de **industrie** ontbreekt een analyse van het toekomstig verdienpotentieel van de individuele industrietakken in een veranderend energie- en grondstoffensysteem. Daarbij vormt het perspectief op chemie zonder fossiele koolstof een belangrijk vraagstuk dat grote gevolgen heeft voor de toekomstige energiebehoefte, maar ook recyclebare of biogene koolstof. In geval van **bunkering** blijkt duidelijk het belang van dit segment voor de Nederlandse energievoorziening. Het gaat hier om een forse energievraag, waarbij bovendien nog geen duidelijke richtlijnen voor emissiereductie zijn vastgesteld. De onzekerheid levert grote verschillen in invulling van deze energievraag. Het technisch productiepotentieel voor hernieuwbare bunkerbrandstoffen in eigen land vergen extreme realisaties van hernieuwbare elektriciteitsproductie, in combinatie met aanvullende importen van grondstoffen (NL2050) of zeer grote volumes aan import met bijbehorende diepe toeleveringsmarkt (II3050). Daarmee wordt ook de toekomstige vraagontwikkeling erg onzeker; een duidelijk beeld van de rol van Rotterdam als bunker hub tegen de achtergrond van de veranderende positie van de raffinage op langere termijn ontbreekt.

**Aanbod** - Voor de verhoudingen van moleculen vs. elektronen en fossiel vs. hernieuwbaar ontbreekt nog voldoende detaillering van de voorkeursalternatieven voor emissiereductie in de verschillende sectoren. In die zin biedt de bandbreedte benadering die in deze notitie besproken studies wordt gehanteerd een middel om de mogelijke variaties en implicaties in beeld te brengen. Daarbij wordt voor II3050 beoogd deze beelden elke twee jaar verder aan te scherpen, op basis van de verdere ontwikkeling en uitvoering van de sectorale plannen. Alternatief kan gewerkt worden met optimalisatiemodellen en gevoeligheidsanalyses om meer grip te krijgen op de afhankelijkheden die ontstaan door verschillende dwarsverbanden en mechanismen in het systeem. Zo leidt de hoge energiebehoefte in het TRANSFORM Scenario, in combinatie met de beperkingen op import tot een maximale ontwikkeling van hernieuwbare energie tot aan het technisch potentieel en daar voorbij met investeringen in nucleaire installaties. Volgens deze analyse zou een investering in een nucleaire installatie dus kosten-optimaal zijn, bij beperkt import potentieel en een sterke handhaving van de bestaande bunker faciliteiten. Daarmee wordt de robuustheid van het perspectief voor bunkering vs. evt. importperspectieven van belang voor een dergelijke systeemontwikkeling.

**Internationale context** - De beide systemstudies richten zich nauwelijks op de ontwikkelingen in omliggende landen en internationale markten. Gegeven de snelheid van de ontwikkelingen is dat ook een forse uitdaging; in het afgelopen jaar is de Duitse kolen-ausstieg ruim tien jaar naar voren gehaald, heeft de het Verenigd Koninkrijk zich gecommitteerd aan een CO<sub>2</sub>-vrije elektriciteitsproductie in 2035, terwijl in Duitsland mogelijkheden daartoe zijn verkend en de G7 heeft aangekondigd zich te richten op een

'hoofdzakelijk' CO<sub>2</sub>-vrije elektriciteitsproductie. Daarnaast hebben zowel de Verenigd Koninkrijk als Frankrijk plannen voor een nucleaire renaissance ontvouwd. Tot slot is er met de Oekraïne crisis en navolgende REPowerEU een sterke push voor versnelling van de 2030 agenda met agendering van grootschalige opschaling van LNG importen, waterstofimport en waterstofproductie. Dat laat echter niet onverlet dat de ontwikkelingen in omliggende landen grote gevolgen hebben voor de energiesysteemontwikkeling in Nederland, niet in de laatste plaats omdat Nederland een zeer hoge connectiviteit met het ommeland kent in vergelijking tot de nationale energievraag. De gevolgen van verschillende ontwikkelpaden op Noordwest Europees en internationaal niveau zouden daarom in kaart gebracht moeten worden.

### 3.3 Vooruitblik naar update II3050 studie

Hoewel het op dit moment nog te vroeg is om de resultaten van de update van de II3050 studie (hierna afgekort als II3050 V2) mee te nemen in de vergelijkende analyse in deze notitie, kunnen we wel op basis van communicatie met het team dat aan de scenario update werkt een doorkijkje geven op hoofdlijnen van de grootste veranderingen qua aanpak en resultaten t.o.v. de vorige versie van de studie (II3050 V1).

**Totstandkomingsproces** - In II3050 V1 is gebruik gemaakt van een klankbordgroep, maar voor V2 wordt gebruik gemaakt van een veel uitgebreider werkproces met stakeholders. veel meer extra interviews, sectorgesprekken, een rol voor frisse blikken. Daarnaast is er ook stroomlijning met de scenario's die ten grondslag liggen aan de investeringsplannen voor de netbeheerders in 2024.

**Sectorale groei/krimp** - In de oorspronkelijke versie van II3050 zijn verschillende sectorale groeiveronderstellingen toegepast tussen de verschillende scenario's, wat leidde tot significante verschillen in energievraag tussen scenario's. Dat maakt het moeilijk om het effect van de verschillende sturing filosofieën en technologische verduurzamingsroutes te duiden, omdat het effect van de economische groeiaannames er doorheen speelt. Bij II3050 V2 is er in de basis geen variërende groeiveronderstelling gehanteerd, behalve in de industrie waarbij de 14 grootste industriebedrijven in ieder scenario een andere invulling van hun totale bedrijfsstrategie inclusief verandering van sectorale groei. In de overige sectoren komt de verandering in energievraag dus met name voort uit de combinatie van de sturingsfilosofie en de gekozen verduurzamingsroutes.

**Vraag bunkerbrandstoffen** - In II3050 V1 is de bunkervraag niet meegenomen in de studie van de netbeheerders, maar wel in de achterliggende scenariostudie. Daarbij zijn voor de verschillende scenario's ook verschillende generieke groei veronderstelling toegepast, met binnenlandse productieniveaus op basis van het resterend Nederlands potentieel voor hernieuwbare elektriciteit. In II3050 V2 wordt bunkervraag indirect meegenomen in de scenario's op basis van plannen van industrie voor productie van bunkerbrandstoffen mee te nemen, ongeacht vraagniveau binnen Nederland.

**Koolstofvraagstuk** - In II3050 V1 wordt beperkt aandacht besteedt aan koolstof in productstromen (zoals in plastics) die tot de zogenaamde scope 3 emissies kunnen leiden. In II3050 V1 wordt in Scenario Regionaal en Nationaal grootschalige chemische recycling verondersteld via de route van pyrolyseolie (en zonder verdere uitwerking van de logistieke implicaties). In het Europese en Internationale scenario wordt uitgegaan van aardolie als grondstof, zonder verdere uitwerking van de scope 3 emissies die daaruit volgen. II3050 V2 brengt dit koolstofvraagstuk wel in kaart.

**Kernenergie** - In twee van de scenario's in de update van II3050 wordt kernenergie meegenomen, waar kernenergie in de vorige studie niet in de scenario's voorkwam.

## 5 Lessen uit geselecteerde scenariostudies

Tot slot hebben we een vergelijking met een aantal geselecteerde kwantitatieve en kwalitatieve systeemscenario's uitgevoerd. Hieronder volgen de belangrijkste bevindingen.

### 5.1 Inzichten uit kwalitatieve en alternatieve scenario's

Kwalitatieve/narratieve scenario's kunnen rekening houden met een veel groter aantal factoren en mogelijkheden dan kwantitatieve scenario's, maar zijn niet automatisch intern consistent. Ze zijn ook minder precies dan kwantitatieve scenario's. Beide typen studies zijn nodig. Kwantitatieve rekenmodellen moeten nooit worden gezien als de absolute waarheid. Hoewel ze meestal precieze cijfers opleveren, zijn die zo afhankelijk van de aannames en data dat deze moeten worden gezien als mogelijke paden, met een brede onzekerheidsbandbreedte hier om heen. Meer kwalitatieve narratieven kunnen aanvullende perspectieven bieden.

Veel bestaande kwalitatieve narratieven gaan vooral over de transitie en minder over het energiesysteem in 2050. Hiernaast zijn er zijn weinig kwalitatieve scenariostudies voor het hele Nederlandse energiesysteem. Er zijn wel kwalitatieve studies voor onderdelen hiervan (bijv. industrie), en voor het Europese en/of wereldwijde energiesysteem. Hiernaast bestaan ook kwantitatieve scenario's die meer kwalitatieve inzichten proberen te integreren. Relevant zijn o.a.:

- Royal HaskoningDHV, *industrietransitie 2052: Een energiek perspectief (2022)*, waarin de meningen van een panel van beslissers en professionals uit de industrie zijn samengevat. Genoemd wordt, onder andere, dat de Nederlandse industriestructuur mogelijk sterk kan veranderen. Dit komt doordat hernieuwbare energie meer ruimte nodig heeft, terwijl ruimte in Nederland schaars is. Energie-intensieve industrieën zouden daardoor richting de evenaar kunnen verhuizen, terwijl Nederland meer focust op activiteiten waar een samenwerkingscultuur, creativiteit, en innovatie meer waarde heeft. Dit heeft belangrijke implicaties voor de Nederlandse energievraag, en daarmee de benodigde energie, en suggereert dat scenario's met een flink lagere energievraag meegenomen moeten worden. In de hiervoor beschouwde systeemstudies wordt een dergelijk scenario vervat in I13050 Regionaal, met een terugval van ongeveer 25% in industriële activiteit.
- Het SET-Nav project<sup>3</sup>: Hierin worden kwalitatieve en kwantitatieve scenario's gecombineerd. Relevant is, o.a., dat ook een scenario is opgenomen waar technologisch optimisme er voor zorgt dat dat klimaatverandering als 'opgelost' wordt beschouwd, waardoor aandacht hiervoor afneemt, terwijl later toch blijkt dat technologische oplossingen minder succesvol zijn dan gedacht. In een ander scenario mist de sociale component van de transitie, waardoor deze uiteindelijk veel minder succesvol is. In de hiervoor beschouwde systeemstudies wordt met dergelijke scenario's beperkt rekening gehouden. Technologieën die nog volop in ontwikkeling zijn worden op de termijn tot 2050 beschikbaar verondersteld. Sociale componenten worden beperkt tot de vorm van draagvlak voor verschillende technologieën meegenomen in NL2050.
- Global Governance and the European Union - Future Trends and Scenarios (Deliverable 9.1: Preliminary Report on Future Global Governance Scenarios): Hier worden veel factoren meegenomen die in de meeste kwantitatieve scenario's niet voorkomen, handelsbarrières, financiële stromen, optimisme van investeerders, intergouvernementele dynamiek, gedrag van grootmachten zoals China en de VS, de waarde van privacy, economische structuren, etc. Al deze factoren hebben uiteindelijk een invloed op de kosten en kostenreductie van technologie, en op de beschikbaarheid van kapitaal; dit betekent dat kosten en beschikbaarheid meer variabel is dan een eenvoudige analyse van kosten in het verleden zou kunnen doen vermoeden. In de hiervoor beschouwde systeemstudies wordt met dergelijke scenario's beperkt rekening gehouden. Technologieën die nog volop in ontwikkeling zijn worden op de termijn tot 2050 beschikbaar verondersteld en kosten worden niet meegenomen in het scenario ontwerp van I13050 en niet gevarieerd in NL2050.
- Het Paris Agreement Compatible Scenario for Energy Infrastructure (PAC): Dit is een kwantitatief scenario dat echter niet puur modelmatig is ontwikkeld, maar door workshops met een grote groep

---

<sup>3</sup> D. Ansari & F. Holz, 2019, Anticipating global energy, climate and policy in 2055: Constructing qualitative and quantitative narratives, Energy Research & Social Science 58

maatschappelijke stakeholders. Interessant is dat de uitkomsten van dit proces vergelijkbaar zijn met modelscenario's, met als uitzondering het feit dat fossiele brandstoffen volledig naar 0 gaan en negatieve emissies/CCS dus minder noodzakelijk zijn. In de hiervoor beschouwde systeemstudies wordt met de uithoeken van volledige uitfasering van fossiele brandstoffen wel rekening gehouden in de II3050 scenario's.

- Het LED (Low Energy Demand) Scenario<sup>4</sup>: In tegenstelling tot de meeste andere scenario's wordt hier niet geanalyseerd hoe het energieaanbod vergroend kan worden, maar hoe ver de energievraag verminderd kan worden. In het LED scenario is de wereldwijde energievraag in 2050 meer dan 50% lager dan nu, waardoor ook veel minder hernieuwbare energie nodig is, en negatieve emissies in het geheel niet noodzakelijk zijn. In de hiervoor beschouwde systeemstudies is een dergelijke extreem scenario niet opgenomen; II3050 Regionaal laat de grootste terugval zien met ongeveer 30%.
- De scenario's beschreven in van Vuuren et al. (2018)<sup>5</sup>, waarin een integrated assessment model (IAM) wordt gebruikt om een aantal kwantitatieve scenario's door te rekenen waarin meer ongebruikelijke factoren worden meegenomen, waaronder lagere bevolkingsgroei, minder vleesconsumptie, lager gebruik van elektrische apparatuur, etc. Deze scenario's laten zien dat alternatieve transitiepaden met, o.a., meer gedragsverandering bestaan. In deze transitiepaden zijn minder negatieve emissies noodzakelijk om klimaatdoelstellingen te halen. In de hiervoor beschouwde systeemstudies wordt met dergelijke scenario's beperkt rekening gehouden. In NL2050 TRANSFORM wordt teruglopende energiebehoefte door gedragsverandering wel meegenomen, maar achterliggende (gedrags)dynamiek wordt niet in detail uitgewerkt. Daardoor is lastig in te schatten hoe de uitwerking zich verhoudt tot de hier genoemde analyse.

## 5.2 Beperkingen van kwantitatieve scenariostudies

Kwantitatieve scenario's dragen sterk bij aan inzichten in energiesysteemontwikkeling. Ze zijn intern consistent, i.e. bestaan uit een set van concrete technologieën en maatregelen die compatibel zijn en interne energetische en vaak ook techno-economische consistentie wordt berekend. De modellen die gebruikt worden om kwantitatieve scenario's door te rekenen zijn echter een zeer vereenvoudigde representatie van de werkelijkheid en er moeten veel aannames worden gemaakt. Deze aannames verschillen tussen modellen, maar er zijn een aantal beperkingen waar geen van de huidige scenariostudies aan ontkomt.<sup>6</sup>

- Goede representaties van **onzekerheid en risico** ontbreken. Sets van scenario's schetsen wel een beeld van de bandbreedte aan mogelijke ontwikkelingen, maar binnen een scenario rekenen modellen met een voorspelbare hoeveelheid vraag en aanbod (zoals in de ETM studies). In het gunstigste geval wordt met een beperkte hoeveelheid onzekerheid over een beperkt aantal parameters gerekend. Dit zorgt, onder andere, voor overschatting van de leveringszekerheid en een onderschatting van de economische waarde van technologieën die risico's verminderen. Hieronder vallen bijvoorbeeld opties die op korte en/of lange termijn flexibiliteit leveren. Het betekent ook dat een competitieve markt de gemodelleerde investeringen niet per definitie zal opleveren, omdat daar doorgaans niet-gemodelleerde risico's aan zijn verbonden
- **Gedrag en beleid** worden niet volledig gemodelleerd. Kwantitatieve modellen kunnen sociale, politieke, beleidsmatige of institutionele restricties wel gedeeltelijk meenemen, maar de academische consensus is dat kwantitatieve modellen intrinsieke beperkingen blijven houden m.b.t. het gebruik voor analyse van sociale transitie<sup>7</sup>. Deze zijn te complex om in simpele restricties te kunnen worden verrat. Kwantitatieve scenario's schetsen daarom vooral technische mogelijkheden, die niet per definitie compatibel zijn met een maatschappelijk haalbaar transitiepad.
- **Geografische scope en granulariteit** worden afgewogen. In specifiek Nederlandse scenario's is de rest van de wereld dusdanig versimpeld dat veel informatie verloren gaat. Er wordt bijvoorbeeld van uitgegaan dat import van energiedragers altijd tegen een constante prijs mogelijk is, grote geopolitieke

<sup>4</sup> Grubler et al. (2018). A low energy demand scenario for meeting the 1.5 °C target and sustainable development goals without negative emission technologies. *Nature Energy* 3, 515-527.

<sup>5</sup> van Vuuren et al. (2018). Alternative pathways to the 1.5 °C target reduce the need for negative emission technologies. *Nature Energy* 8, 391-397.

<sup>6</sup> In de academische literatuur is steeds meer aandacht voor de beperkingen van kwantitatieve modellen. Zie bijvoorbeeld een uitgebreide literatuurstudie in: Fodstad et al. (2022). Next frontiers in energy system modelling: A review on challenges and the state of the art. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 160, 112246.

<sup>7</sup> Andersson, C., Törnberg, A., & Törnberg, P. (2014). Societal systems – Complex or worse? *Futures* 63, 145-157.

ontwikkelingen worden niet meegenomen, en voor het bepalen van de energievraag wordt uitgegaan van een onverminderde internationale vraag naar Nederlandse exportproducten. Ook wordt vaak aangenomen dat niet alleen Nederlands, maar ook internationaal beleid succesvol is in het beperken van klimaatverandering, en dat er dus geen destabiliserende feedback loops zijn tussen het klimaat en het energiesysteem.

- Veel **technische en economische restricties** zijn weggelaten of vereenvoudigd. Bij technische restricties gaat het hier bijvoorbeeld om infrastructuur in het laagspanningsnet; op dit moment een van de belangrijkste barrières voor het versnellen van de energietransitie. Op economisch gebied worden marktmacht en andere vormen van marktfalen zelden expliciet gemodelleerd.
- **Niet-lineaire trends** zijn moeilijk te modelleren of te voorspellen. Belangrijke ontwikkelingen in het recente verleden, zoals de grote reductie in kosten van zonnepanelen, zijn vrijwel zonder uitzondering slecht voorspeld. Dit komt omdat het moeilijk is om niet-lineaire ontwikkelingen te voorspellen (bijvoorbeeld: kleine afwijkingen in parameters kunnen grote consequenties hebben) en omdat veel systeemmodellen lineair zijn.



## 6. Voorlopige conclusies

- In de beelden voor 2050 neemt de rol van fossiele importen sterk af in alle scenario's, en blijkt dat alle scenario's uitgaan van een sterke groei van het nationale aanbod. Voor de 2050 beelden laten de scenario's met een wat meer regionaal karakter (Regionaal, Nationaal, TRANSFORM) een sterke vermindering van de importafhankelijkheid zien, door zeer sterke ontwikkeling van de hernieuwbare elektriciteitsproductie en biomassa, terwijl internationalere scenario's (Europees, Internationaal, ADAPT) voortzetting van huidige hoge importafhankelijkheid laten zien.
- In de **finale vraagontwikkeling** laten de scenario's vrij stabiele ontwikkeling van finale vraag uit landbouw en gebouwde omgeving zien, maar variëren vooral industrie (energie & grondstoffen) en mobiliteit (incl. internationale scheep en luchtvaart). **Industrie** laat in de scenario's sterk verschillende, maar generieke groeiperspectieven. Raffinage krimpt naar verwachting sterker. Voor de chemie laat de productie van plastics productie sterk verschillende trajecten zien, met continuering van de huidige fossiele route, chemische recycling routes en bio-based routes. De keuze zal consequenties voor scope 3 emissies hebben, maar dat wordt buiten beschouwing gelaten. Het gebruik van bunkerbrandstoffen in **internationale lucht- en scheepvaart** variëren sterk op basis van generieke groeiveronderstellingen. In vrijwel alle scenario's neemt de relatieve vraag naar bunkerbrandstoffen toe, in het verlengde van de huidige hub-functie van Rotterdam in bunkering voor de scheepvaart. Geen scenario houdt rekening met veranderende rol van Rotterdam als bunkering hub, en de samenhang met de krimpende raffinage activiteit. De routes voor CO<sub>2</sub>-emissiereductie voor bunkering variëren sterk, van productie uit geïmporteerde aardolie en biomassa (uitgaande van een 50% emissie reductie veronderstelling voor 2050 in ADAPT), import van (zeer grote hoeveelheden) hernieuwbare brandstoffen (I13050), of productie van biobrandstoffen voor de luchtvaart en synthetische methanol voor de scheepvaart (uitgaande van een 95% emissie reductie veronderstelling voor 2050 in TRANSFORM).
- In alle scenario's neemt gebruik van **fossiele energiedragers** sterk af. In enkele (internationalere) varianten speelt aardolie nog een rol als grondstof voor plastics in de chemische industrie (I13050, Europees en internationaal) en aardgas als grondstof voor blauwe waterstof (I13050, Europees). Daartegenover staan scenario's met hogere inzet van pyrolyse olie, i.e. chemische recycling van plastics (I13050, regionaal en nationaal), of inzet van waterstof en biomassa voor de bio-based methanol2olefins route voor de productie van plastics (NL2050, ADAPT en TRANSFORM). Groene waterstof biedt in deze scenario's het alternatief voor blauwe waterstofproductie.
- In alle gevallen wordt in de vraag voorzien door grootschalige ontwikkeling van **wind en zon** in combinatie met grootschalige ontwikkeling van **directe elektrificatie en indirecte elektrificatie** (i.e. elektrificatie via inzet van groene waterstof). Waterstof speelt in vrijwel alle gevallen een rol in de verwaarding van de toenemende elektriciteitsproductie(pieken) en flexibiliteit, en dus ook in de balans tussen elektronen en moleculen. Dat varieert van ongeveer 20% elektronen om 80% moleculen (I13050, internationaal) tot ruim 60% elektronen om 40% moleculen (NL2050, TRANSFORM).
- De rol van **biomassa, groengas en biobrandstoffen** loopt sterk uiteen. In de meer zelfvoorzienende en fossiele scenario's (I13050, regionaal, nationaal en internationaal) spelen deze energiedragers tot 9% van het primaire aanbod een beperkte rol, maar in de andere scenario's wordt meer ruimte voor niet-fossiele import gegeven en loopt het gebruik van deze dragers sterk op tot 25% van het primaire aanbod.
- De scenario's verschillen sterk in veronderstellingen over toekomstige **import** van energie en grondstoffen. In geval van I13050 is bewust import gevarieerd van ongeveer 20% tot 80% van het primaire aanbod (waterstof, hernieuwbare brandstoffen, biomassa/groengas, fossiel), terwijl in NL2050 ruimte is gelaten voor fossiele importen en beperkte importen van biomassa en biobrandstoffen op basis van beschikbaarheid met een bandbreedte van ongeveer 30% tot 60% van het primaire aanbod als resultaat. In NL2050 wordt overigens verondersteld dat er geen waterstof wordt geïmporteerd.

In de studies is sprake van **beperkt zicht** op de industriële ontwikkeling en bijbehorende verdienpotentieel, ontwikkeling van internationale lucht- scheepvaart, en techno-economische en maatschappelijk optimale invulling van de vraag in bredere zin en tot slot de internationale context en gevolgen daarvan voor import-, maar ook exportmogelijkheden.

Uit een overzicht van geselecteerde kwalitatieve en kwantitatieve scenario's kan verder opgemaakt worden dat er in algemenere zin nog andere blinde vlekken in dit type studies optreedt, zoals:

- goede representaties van **onzekerheid en risico** (o.a. overschatting van de leveringszekerheid en een onderschatting van de economische waarde van technologieën die risico's verminderen, zoals flexibiliteit.
- **Gedrag en transities** worden onvolledig gemodelleerd, zodat vooral technische mogelijkheden duidelijk worden in plaats van een maatschappelijk transitie pad (i.e. draagvlak).
- **Geografische scope en granulariteit** worden afgewogen, zodat in Nederlandse scenario's de rest van de wereld sterk vereenvoudigd wordt weergegeven (overschatting import van energiedragers tegen een constante prijs, geen geopolitieke ontwikkelingen, onverminderde internationale vraag naar Nederlandse exportproducten) en succesvol internationaal klimaatbeleid.
- Veel **technische en economische restricties** zijn weggelaten of vereenvoudigd, zoals (beperkingen door) infrastructuur, marktmacht en andere vormen van marktfalen.
- **Niet-lineaire trends** zijn moeilijk te modelleren of te voorspellen, zoals de grote reductie in kosten van zonnepanelen.

## Bijlage A: Overzicht studies

In deze bijlage presenteren we een bondig overzicht van de kenmerken van de twee scenariostudies die we in deze notitie als studies hanteren.

## A.1 Integrale Infrastructuurverkenning 2030-2050 (II3050)

<b>Studie</b>	II3050 2020-2021: het energiesysteem van de toekomst, met achterliggend Klimaatneutrale energiescenario's 2050
<b>Auteur/organisatie</b>	Netbeheer Nederland, Berenschot & Kalavasta
<b>Publicatiejaar</b>	2021, 2020
<b>Doel studie</b>	Het doel van deze scenarioanalyse om een goed zicht te krijgen op de infrastructuur die nodig is in 2050 en welke stappen daarom nu al gezet moeten worden. Het gaat daarbij niet alleen om de energiedragers gas en elektriciteit, maar ook om warmte, waterstof en CO <sub>2</sub> .
<b>Focus studie</b>	Input voor investeringsplannen energie-infrastructuur, maar brede focus.
<b>Startjaar scenario's</b>	2015 (Startjaar), 2030 (Klimaatakkoord)
<b>Steekjaren scenario's</b>	2050
<b>Scope</b>	Hele Nederlandse energiesysteem, inclusief internationale lucht- en scheepvaart.
<b>Scenario's</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Regionale sturing</li> <li>2. Nationale sturing</li> <li>3. Europese sturing</li> <li>4. Internationale sturing</li> </ol>
<b>Ratio scenario's</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Regionale sturing: <ol style="list-style-type: none"> <li>a. Nederland haalt CO<sub>2</sub>-doelen door regionale ontwikkeling</li> <li>b. Zelfvoorzienend</li> <li>c. Geen importen</li> <li>d. Krimp van energie-intensieve industrie</li> <li>e. Regionale projecten</li> <li>f. Burgers zeer gedreven</li> <li>g. Circulariteit speerpunt voor goederen en voedselproductie</li> </ol> </li> <li>2. Nationale sturing: <ol style="list-style-type: none"> <li>a. Nederland haalt CO<sub>2</sub>-doelen nationaal als koploper in Europa</li> <li>b. Zeer hoge mate zelfvoorziening</li> <li>c. Minimale importen</li> <li>d. Energie-intensieve industrie blijft gelijk aan de huidige omvang</li> <li>e. Grote nationale projecten</li> <li>f. Circulariteit belangrijk voor goederen en voedselproductie</li> </ol> </li> <li>3. Europese sturing: <ol style="list-style-type: none"> <li>a. Europa haalt CO<sub>2</sub>-doelen en is daarin koploper in de wereld</li> <li>b. Algemene CO<sub>2</sub>-heffing, importheffingen &amp; compensatie aan de grenzen van Europa</li> <li>c. Energie-intensieve industrie groeit</li> <li>d. Wereldwijde waterstof- en biomassamarkt</li> <li>e. CCS krijgt veel ruimte</li> </ol> </li> <li>4. Internationale sturing: <ol style="list-style-type: none"> <li>a. Gehele wereld streeft naar CO<sub>2</sub>-doelen, fossiel wordt sterk beperkt</li> <li>b. Vrije handel wordt gestimuleerd</li> <li>c. Handelinfrastructuren worden bevorderd</li> <li>d. Energie-intensieve industrie groeit</li> <li>e. Wereldwijde waterstof- en biomassamarkt</li> <li>f. CCS krijgt ruimte</li> </ol> </li> </ol>
<b>GHG-reductie</b>	In alle scenario's: 1) 2030 à 49% (Klimaatakkoord) 2) 2050 à 100% (inclusief internationale lucht- en scheepvaart)
<b>Optimalisatie vs. Aangenomen scenario</b>	Aangenomen scenario. Energietransitiemodel (ETM) berekent kosten, infrastructuur en emissies op basis van ingevoerde vraag, aanbod en andere karakteristieken per sector.
<b>Belangrijkste inputs</b>	Zie tabel 2 van de publicatie.
<b>Belangrijkste outputs</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Finale energievraag</li> <li>2. Primair energieaanbod</li> <li>3. Vermogens en volumes in de elektriciteitsproductie</li> <li>4. Biomassa</li> <li>5. Waterstofbalans</li> <li>6. CO<sub>2</sub></li> <li>7. Circulair</li> <li>8. Energie-infrastructuur</li> <li>9. Kosten</li> </ol>
<b>Opmerking</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Vervolgstudie op Net voor de Toekomst (CE Delft, 2017)</li> <li>- Scenario's divergeren pas vanaf 2030</li> <li>- Geen tussenresultaten voor 2040</li> </ul>

## A.2 Naar een duurzaam energiesysteem voor Nederland in 2050/Toekomstverkenning Nederland 2050

<b>Studie</b>	Towards a sustainable energy system in the Netherlands in 2050
<b>Auteur/organisatie</b>	TNO
<b>Publicatiejaar</b>	2020
<b>Doel studie</b>	Verkenning van verschillende mogelijkheden om broeikasgasdoelstellingen uit het Klimaatakkoord (2030) en de Klimaatwet (2050) te bereiken.
<b>Focus studie</b>	Geen specifieke focus
<b>Startjaar scenario's</b>	2018
<b>Steekjaren scenario's</b>	2030, 2040, 2050
<b>Scope</b>	Hele Nederlandse energiesysteem, inclusief internationale lucht- en scheepvaart.
<b>Scenario's</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>ADAPT</li> <li>TRANSFORM</li> </ol>
<b>Ratio scenario's</b>	Het verschil tussen de scenario's is de intrinsieke motivatie van burgers en bedrijven om te veranderen. In het ADAPT-scenario is deze motivatie laag en is de inzet om de huidige levensstandaarden te behouden. De gedachte is daarom dat het energiesysteem CO <sub>2</sub> -vrij moet worden, zonder de energievraag te veranderen door bijvoorbeeld gedragsverandering. CCS en biomassa zijn toegestaan in dit scenario. In het TRANSFORM-scenario besluit de maatschappij tot gedragsverandering en structurele verandering van productieprocessen. De energie-intensiteit daalt daardoor. In dit scenario is er geen publieke acceptatie van CCS en biomassa.
<b>GHG-reductie</b>	<p>Nationale CO<sub>2</sub>-reductie in beide scenario's:</p> <p>2030 à 49%</p> <p>2040 à 72%</p> <p>2050 à 95%</p> <p>Verskil tussen scenario's CO<sub>2</sub>-reductie internationale lucht- en scheepvaart. ADAPT 50% reductie in 2050. TRANSFORM 95% reductie in 2050.</p>
<b>Optimalisatie vs. Aangenomen scenario</b>	Optimalisatie van het energiesysteem (laagste kosten) onder de randvoorwaarde van het bereiken van CO <sub>2</sub> -doelen en verschillende andere beperkingen (bijvoorbeeld potentiëlen).
<b>Belangrijkste inputs</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>Economische ontwikkeling</li> <li>Demografische ontwikkeling</li> <li>GHG-reductiedoelstellingen (verschilt per scenario)</li> <li>Internationale trends</li> <li>Technologiekosten en -ontwikkeling</li> <li>Vraag naar energie/producten (verschilt per scenario)</li> <li>Beperkingen aan technologieën (verschilt per scenario)</li> </ol>
<b>Belangrijkste outputs</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>Totaal primair energieaanbod</li> <li>Energieproductie</li> <li>Energieconsumptie</li> <li>GHG emissies</li> <li>Energie-infrastructuur</li> <li>Totale energiesysteem</li> <li>Energiesysteemkosten</li> </ol>
<b>Opmerking</b>	Resultaten zijn vaak weergegeven per sector of deel van het energiesysteem. Soms inclusief en soms exclusief feedstock. Soms inclusief en soms exclusief internationale lucht- en scheepvaart.

## B Sectoraal overzicht uitgangspunten van de gebruikte systeemstudies

	I13050				OPERA	
	Regionaal	Nationaal	Europees	Internationaal	ADAPT	TRANSFORM
<b>Gebouwde omgeving</b>	18,4 miljoen inwoners & 8,8 miljoen huishoudens in 2050 Energie label A/B 35% all-electric WP 45% warmtenet (geothermie + groen gas en/of biomassa) 20% hWP groen gas	18,4 miljoen inwoners & 8,8 miljoen huishoudens in 2050 Energie label A 55% all-electric WP 25% warmtenet (geothermie + groen gas/biomassa) 20% hWP groen gas	18,4 miljoen inwoners & 8,8 miljoen huishoudens in 2050 Energie label B 25% all-electric 15% warmtenet (restwarmte + groen gas/biomassa) 40% hWP groen gas 20% hWP waterstof	18,4 miljoen inwoners & 8,8 miljoen huishoudens in 2050 Energie label B 25% all-electric WP 15% warmtenet (restwarmte + groen gas/biomassa) 60% hWP waterstof	19,8 miljoen inwoners & 8,07 miljoen huishoudens in 2050 Energie label (G-F-E, D-C, B, A & A+) met onderscheid naar appartement, tussenwoningen en overige woningen voor bestaande woningen. Voor dienstensector energie label (G-F-E, D-C, B, A & A+) met onderwijs, ziekenhuizen en industriehallen met 0,4% jaarlijkse groei van bruto vloeroppervlak van 0,4% per jaar voor alle segmenten. Resultaat is 53% elektriciteit, 5% warmtenet (m.n. restwarmte, geothermie, elektriciteit), 9% waterstof en 15% aardgas.	19,8 miljoen inwoners & 8,07 miljoen huishoudens in 2050 Energie label (G-F-E, D-C, B, A & A+) met onderscheid naar appartement, tussenwoningen en overige woningen voor bestaande woningen. Voor dienstensector energie label (G-F-E, D-C, B, A & A+) met onderwijs, ziekenhuizen en industriehallen met 0,4% jaarlijkse groei van bruto vloeroppervlak en 0,8% voor kantoren en overige diensten. Resultaat is 58% elektriciteit, 5% warmtenet (m.n. restwarmte, geothermie), 1% waterstof en 1% aardgas.
<b>Mobiliteit</b>	38 PJ zonthermie Personenvervoer: krimp 0,75% per jaar, efficiency 0,2-0,4% per jaar, verschuift naar: 100% elektrisch  Vrachtvervoer: krimp -1% per jaar, efficiency 0,2-0,4% per jaar, verschuift naar: 75% elektrisch, 15% waterstof, 10% groen gas, 0% biobrandstof	18 PJ zonthermie Personenvervoer: groei 0,25% per jaar, efficiency 0,2-0,4% per jaar, verschuift naar: 95% elektrisch, 5% waterstof  Vrachtvervoer: groei 0% per jaar, efficiency 0,2-0,4% per jaar, verschuift naar: 25% elektrisch, 50% waterstof, 0% groen gas, 25% biobrandstof	16 PJ zonthermie Personenvervoer: groei 1,25% per jaar, efficiency 0,2-0,4% per jaar, verschuift naar: 70% elektrisch, 30% waterstof  Vrachtvervoer: groei 1% per jaar, efficiency 0,2-0,4% per jaar, verschuift naar: 25% elektrisch, 25% waterstof, 25% groen gas, 25% biobrandstof	12 PJ zonthermie Personenvervoer: groei 1,25% per jaar, efficiency 0,2-0,4% per jaar, verschuift naar: 50% elektrisch, 40% waterstof, 10% biobrandstof  Vrachtvervoer: groei 1% per jaar, efficiency 0,2-0,4% per jaar, verschuift naar: 25% elektrisch, 25% waterstof, 0% groen gas, 50% biobrandstof	26 PJ zonthermie Personenvervoer: groei 0,8% per jaar, verschuift vrijwel volledig naar elektrisch en verwaarloosbaar waterstof Bedrijfswagens: groei 0,6% per jaar, verschuift naar vrijwel volledig elektrisch  Vrachtvervoer: groei 0,4% per jaar, verschuift volledig naar waterstof	36 PJ zonthermie Personenvervoer: krimp 1,1% per jaar, efficiency 0,2-0,4% per jaar, verschuift volledig naar elektrisch Bedrijfswagens: groei 0,6% per jaar, verschuift naar volledig elektrisch  Vrachtvervoer: groei 0,4% per jaar, verschuift volledig naar waterstof
<b>Industrie</b>	Krimp 1% per jaar, efficiency 1% per jaar  Sterke elektrificatie inzet groen gas  CCS beperkt, 4,5 Mt/jaar  Sterk circulair, circulaire feedstock	Groei 0% per jaar, efficiency 1% per jaar  Sterke elektrificatie en inzet waterstof  CCS mogelijk, 5,9 Mt/jaar  Sterk circulair, circulaire feedstock	Groei 1% per jaar, efficiency 1% per jaar  Sterke elektrificatie en inzet waterstof  CCS omvangrijk, 26,8 Mt/jaar  Fossiele feedstock	Groei 1% per jaar, efficiency 1% per jaar  Sterke elektrificatie en inzet waterstof en fossiel+CCS  CCS omvangrijk, 15,8 Mt/jaar  Fossiele feedstock	Gemiddelde groei 0,3% per jaar op basis van KEV 2020.  Veel ruimte voor CCS tot 50Mt/jaar ~ de geschatte capaciteit voor offshore opslag 1600 – 1.700 Mt in 30 jaar, inclusief negatieve emissies (BECCS) ter compensatie resterende LULUCF emissies en overige BKG emissies.  Virgin vs. circulair wordt geoptimaliseerd	Gemiddelde krimp 0,9% per jaar.  CCS omvangrijk, tot 15Mt/jaar ~ 100% compensatie resterende LULUCF emissies en overige BKG emissies.  Virgin vs. circulair wordt

	(pyrolyse olie voor plastics, EAF en Hlsarna voor staal, smeltoven i.p.v. elektrolyse in aluminium)	(pyrolyse olie voor plastics, EAF en Hlsarna voor staal, smeltoven i.p.v. elektrolyse in aluminium)			voor de plastics keten in de chemie.	geoptimaliseerd voor de plastics keten.
	ICT groeit sterk	ICT groeit sterk	ICT groeit sterk	ICT groeit sterk		
<b>Landbouw (m.n. glastuinbouw)</b>	Sterke elektrificatie Nadruk op geothermie en groengasketels voor warmte. Sterk circulair (beperkt kunstmest)	Sterke elektrificatie Nadruk op geothermie en WP met WKO voor warmte, biomassaketels en enkele groengas-WKK's	Sterke elektrificatie Nadruk op WP met WKO en geothermie voor warmte	Sterke elektrificatie Deels geothermie, daarnaast WP met WKO voor warmte, biomassa ketels en groengas-WKK's	Elektrificatie, geothermie, WP met WKO, biomassa ketels en groengas ketels/WKK's, 65% warmte, 35% elektriciteit 39% zon-PV voor eigen gebruik	Elektrificatie, geothermie, WP met WKO, biomassa ketels en groengas ketels/WKK's, 43% warmte, 57% elektriciteit % zon-PV voor eigen gebruik
<b>Elektriciteit</b>	Brandstof centrales: waterstof (+groen gas)	Brandstof centrales: waterstof (+groen gas)	Brandstof centrales: groen gas	Brandstof centrales: waterstof (+groen gas)	Brandstof centrales: optimalisatie binnen technisch of maatschappelijk aanvaardbare potentiëlen (nucleair tot 5 GW, biomassa tot 1408,8 PJ/jaar), met 8,5 GW aardgas en 5,1 GW waterstof als resultaat	Brandstof centrales: optimalisatie binnen technisch of maatschappelijk aanvaardbare potentiëlen (nucleair tot 5 GW, biomassa tot 867,7 PJ/jaar), met 4,2 GW aardgas en 5 GW nucleair als resultaat
	Potentieel 180 – 370 GW zon-PV, waarvan 65 GW zon-op-dak, gerealiseerd 125 GW (66 GW grootschalig, 59 GW zon-op-dak)	Potentieel 180 – 370 GW zon-PV, waarvan 65 GW zon-op-dak, gerealiseerd 107 GW (58 GW grootschalig, 49 GW zon-op-dak)	Potentieel 180 – 370 GW zon-PV, waarvan 65 GW zon-op-dak, gerealiseerd 59 GW (35 GW grootschalig, 24 GW zon-op-dak)	Potentieel 180 – 370 GW zon-PV, waarvan 65 GW zon-op-dak, gerealiseerd 53 GW (35 GW grootschalig, 18 GW zon-op-dak)	Potentieel 106,8 GW zon-PV, 54,8 GW geïnstalleerd	Potentieel 132,1 GW zon-PV, 132,1 GW geïnstalleerd
	Potentieel 72 GW wind-op-zee, 31 GW wind-op-zee, (20,5/51,5)*31 = 12 GW extra voor synfuels	Potentieel 72 GW wind-op-zee, 51,5 GW wind-op-zee, 20,5 GW extra voor synfuels	Potentieel 72 GW wind-op-zee, 30 GW wind-op-zee, (20,5/51,5)*31 = 12 GW extra voor synfuels	Potentieel 72 GW wind-op-zee, 28 GW wind-op-zee, (20,5/51,5)*28 = 11 GW extra voor synfuels	Potentieel 40 GW wind-op-zee, 35,7 GW geïnstalleerd	Potentieel 70 GW wind-op-zee, 70 GW geïnstalleerd
	Potentieel 16 GW wind-op-land, 20 GW geïnstalleerd.	Potentieel 16 GW wind-op-land, 20 GW geïnstalleerd	Potentieel 16 GW wind-op-land, 10 GW geïnstalleerd	Potentieel 16 GW wind-op-land, 10 GW geïnstalleerd	Potentieel 7,8 GW wind-op-land, 7,4 GW geïnstalleerd	Potentieel 12 GW wind-op-land, 11,3 GW geïnstalleerd
<b>Scheepvaart &amp; luchtvaart</b>	Krimp 1% per jaar  113 PJ productie synfuels uit wind-op-zee, aangevuld met 410 PJ import van synfuels	Gelijk aan huidig  188 PJ productie synfuels* <sup>8</sup> uit wind-op-zee, aangevuld met 526 PJ import van synfuels	Groei 1% per jaar  110 PJ productie synfuels uit wind-op-zee, aangevuld met 862 PJ import van synfuels	Groei luchtvaart 2% per jaar scheepvaart 1% per jaar  100 PJ productie synfuels uit wind-op-zee, aangevuld met 954 PJ import van synfuels	Groei luchtvaart 0,2%, scheepvaart 0,8% per jaar  Import van biomassa voor nationale productie van biofuels + nationale productie van synfuels (geen import)	Krimp luchtvaart 1%, scheepvaart 0,3% per jaar  Import van biomassa voor nationale productie van biofuels + nationale productie van synfuels (geen import)

<sup>8</sup> In Het energiesysteem van de toekomst van de netbeheerders wordt geconcludeerd dat dit circa 50 zoutcavernes vergt en dat dit een knelpunt kan gaan vormen, gegeven de behoefte aan seizoensopslag voor overige waterstoftoepassingen. Zie ook ondergrond studie voor tech potentieel

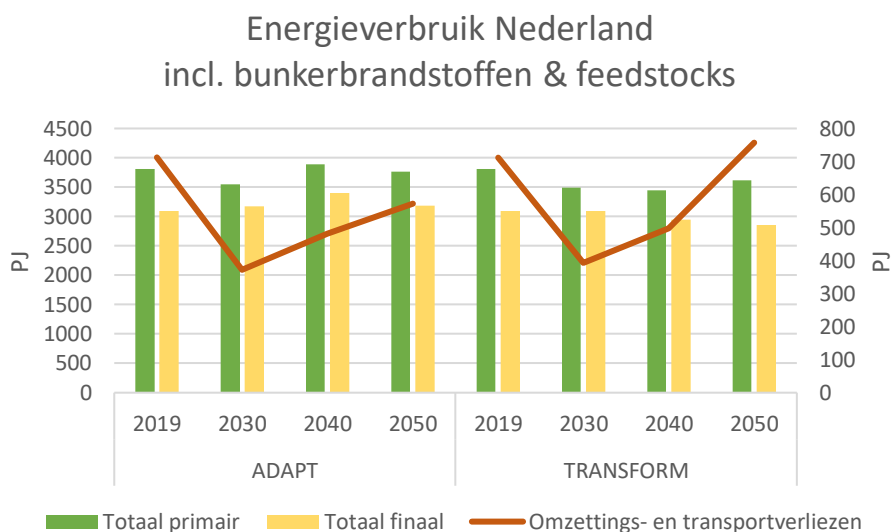
## C Energie-efficiency Nederlands energiesysteem

De ADAPT en TRANSFORM scenario's laten zien dat, na een aanvankelijk daling van de omzettingsverliezen in 2030 t.o.v. 2019, de omzettingsverliezen na 2030 weer toenemen, terwijl de BKG-emissies van het Nederlandse energiesysteem verder afnemen tot nul in 2050.

Figuur 5 toont het primaire en finale energieverbruik (linker as). Het verschil tussen primair en finaal energiegebruik zijn de omzettings- en transportverliezen (rechter as) in de energie-aanbod, d.w.z. de elektriciteits-, gas-, brandstof- en warmteproductie en de verliezen in elektriciteits- en warmtetransport.

Het finale energieverbruik in de figuur is de optelsom van alle energievraag van de eindgebruikers (inclusief bunkerbrandstoffen) en het niet-energetische gebruik van koolwaterstoffen in de chemie (feedstock). In het ADAPT scenario neemt de finale vraag toe, maar door veronderstelde gedragsverandering is in het TRANSFORM scenario sprake van een afnemende vraag. Energiebesparing (bijv. isolatie) en efficiëntere technieken (bijv. elektrische aandrijving in mobiliteit in plaats van verbrandingsmotoren) zorgen voor een daling van het finale energiegebruik.

Daar staat tegenover dat met name in de industrie nieuwe processen worden toegepast die minder efficiënt zijn of extra energie gebruiken. Daarbij gaat het om nieuwe processen voor productie van chemicaliën en kunststoffen op basis van duurzame koolstof (bio-grondstoffen, hergebruik van koolstof) en waterstof en CO<sub>2</sub>-afvangprocessen (zowel voor opslag als *direct air capture*).



Figuur 5: Het primaire en finale energieverbruik (linker as) en bijbehorende omzettings- en transportverliezen in ADAPT en TRANSFORM.

De aanvankelijke daling van de omzettingsverliezen wordt veroorzaakt doordat hernieuwbare elektriciteitsproductie de elektriciteitsproductie van conventionele kolen- en gascentrales grotendeels vervangt. Daarmee dalen de energieverliezen die ontstaan bij de elektriciteitsproductie van thermische centrales. Na 2030 nemen de omzettingsverliezen echter toe. Dit komt vooral door de energieverliezen die optreden bij de productie van groene waterstof (elektrolyzers) en de productie van synthetische- en biobrandstoffen. Deze nieuwe processen zijn (vooralsnog) minder efficiënt dan conventionele olieraffinaderijen. Doordat elektriciteits- en warmtetransport toenemen, nemen ook daarmee gepaard gaande energieverliezen toe.



Onderstaande tabel geeft een overzicht van technieken die verdwijnen en nieuwe of uitbreiding van technieken die in het energiesysteem zorgen voor toename van de energieverliezen.

	Technieken die uit het energiesysteem verdwijnen en zorgen voor minder energieverliezen	(nieuwe) technieken die in het energiesysteem die zorgen voor meer energieverliezen
Aanbod sectoren	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Thermische elektriciteitscentrales (kolen, aardgas)</li> <li>• Olieraffinaderijen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Waterstofproductie met elektrolyzers</li> <li>• Fabrieken voor synthetische en biobrandstoffen</li> <li>• Uitbreiding elektriciteits- en warmtetransport</li> </ul>
Vraagsectoren	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Conventionele chemische processen die fossiele brandstoffen gebruiken als grondstof</li> <li>• Verbrandingsmotoren in de mobiliteitssector</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Processen die chemicaliën en kunststoffen produceren op basis van duurzame koolstof en waterstof</li> <li>• CO<sub>2</sub>-afvang uit processen (CCU) en uit de lucht (DAC)</li> </ul>