



Planbureau voor de Leefomgeving

# KORTE MODELBESCHRIJVING OPERA

**Notitie**

**PBL**

**30 september 2019**

PBL

## **Colofon**

### **Korte modelbeschrijving Option Portfolio for Emission Reduction Assessment (OPERA)**

© PBL Planbureau voor de Leefomgeving

Den Haag, 2019

PBL-publicatienummer: 3838

## **Contact**

[Bert.Daniels@pbl.nl](mailto:Bert.Daniels@pbl.nl), [hans.elzenga@pbl.nl](mailto:hans.elzenga@pbl.nl)

## **Auteurs**

Bert Daniëls

Delen uit deze publicatie mogen worden overgenomen op voorwaarde van bronvermelding: Bert Daniëls (2019), Korte modelbeschrijving Option Portfolio for Emission Reduction Assessment (OPERA), Den Haag: PBL

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

# Inhoud

<b>1</b>	<b>Korte modelbeschrijving</b>	<b>5</b>
1.1	Inleiding	5
1.2	Wat zit er in?	8
1.3	Werking	9
1.4	Belangrijkste invoergegevens	11
1.5	Beperkingen en verdere ontwikkeling	14
<b>2</b>	<b>Bronnen</b>	<b>16</b>



# 1 Korte modelbeschrijving

## 1.1 Inleiding

*Wat staat in deze modelbeschrijving?*

Deze modelbeschrijving geeft een overzicht op hoofdlijnen van gebruik, opbouw, werking, aannames, beperkingen en verdere ontwikkeling van het model OPERA.

*Wat is OPERA?*

OPERA - Option Portfolio for Emissions Reduction Assessment - is een integraal optimalisatiemodel voor het Nederlandse energiesysteem, de bijbehorende broeikasgasemissies en – optioneel – luchtverontreinigende emissies. Omdat het model daarnaast ook de niet energiegerelateerde emissies omvat, is het geschikt voor analyses over broeikasgasemissies én luchtverontreiniging. OPERA is ook een systeemintegratiemodel: het houdt er rekening mee dat op elk moment energievraag en –aanbod op elkaar aan moeten sluiten, niet alleen voor elektriciteit maar ook voor warmte en andere toepassingen. De wijze waarop dat gebeurt verschilt. Bij bijvoorbeeld elektriciteit moet het aanbod altijd gelijk zijn aan de vraag, terwijl bij bijvoorbeeld warmte het aanbod slechts groot genoeg moet zijn om te voldoen aan de vraag, omdat warmte ook weggekoeld kan worden.

*Waar is het voor te gebruiken?*

OPERA kan berekenen hoe – met welke technologiemix - Nederland tegen de laagst mogelijke kosten (combinaties van) doelen voor emissies en energie in een bepaald jaar haalt. Een voorbeeld is een broeikasgasemissieplafond. Behalve met emissieplafonds kan OPERA ook met beprijzing van emissies werken. OPERA bevat ook de specifieke definities voor bijvoorbeeld de Europese doelen voor hernieuwbare energie en finaal energieverbruik, en kan onderscheid maken tussen ETS en niet-ETS emissies. Daarmee kan OPERA ook uitrekenen hoe Nederland dit soort specifieke doelen tegen de laagste kosten kan halen.

De huidige versie van OPERA is statisch; dat betekent dat het maar een jaar tegelijk doorrekent, en niet het traject over meerdere jaren. De architectuur van OPERA is overigens wel geschikt voor verdere uitbouw naar een dynamisch model waarmee ontwikkelingen over meerdere jaren geanalyseerd kunnen worden.

### Lijst van begrippen

Deze modelbeschrijving vermijdt jargon zoveel mogelijk. Toch bevat de beschrijving een aantal voor een breder publiek wellicht minder vertrouwde termen. Deze lijst licht die begrippen toe, zodat er geen lange omschrijvingen nodig zijn in de hooftekst zelf.

- *Energiedrager*: De vorm waarin energie beschikbaar kan zijn, zoals olie, kolen, gas, elektriciteit, waterstof, biomassa, warmte etc.
- *Intermittente bronnen*: bronnen zoals zon en wind, waarbij de per uur beschikbare hoeveelheid energie begrensd is door de *aanbodpatronen* van de zoninstraling en de windsnelheid. De productie uit zon en wind kan alleen negatief afwijken van het potentiële aanbod, door *curtailment*: het tijdelijk (gedeeltelijk) afschakelen van windmolens of zon-PV. Door technische ontwikkelingen kan in de loop van de jaren bij een bepaalde windsnelheid of zonne-instraling de hoeveelheid per uur gewonnen energie wel toenemen.
- *Interconnectie*. Hoogspanningsverbindingen tussen landen voor de uitwisseling van overschotten van en tekorten aan elektriciteit.
- *Elektrificatie*. Het toepassen van elektriciteit voor toepassingen waar nu brandstof gangbaar is: elektrische auto's, elektrische ketels, elektrische warmtepompen, elektrochemie, etc.
- *Vraagpatronen*: de vraag naar warmte, elektriciteit en transport is niet gelijkmatig in de tijd, maar volgt bepaalde vraagpatronen. Deze worden bepaald door factoren als het weer, werktijden, gewoontes, dag/nachtritme etc.
- *Vraagsturing*: aanpassen van de elektriciteitsvraag aan het aanbod, bijvoorbeeld het afschakelen van processen als er weinig aanbod is, het opladen van de elektrische auto als er veel aanbod is, etc.
- *Power-to-X*: de omzetting van elektrische energie in bijvoorbeeld warmte, waterstof (met waterelektrolyse), koolwaterstoffen (met water en CO<sub>2</sub>)

Als systeemintegratiemodel kan het ook de inpassing van intermittente bronnen zoals wind en zon onderzoeken, in samenhang met zowel de elektrificatie van warmteopwekking, transport en industriële processen, als de toepassing van technieken die flexibiliteit aan het systeem kunnen bieden. Voorbeelden hiervan zijn regelbare elektriciteitsopwekking, (elektriciteits)opslag, vraagsturing, interconnectie, power-to-X.

De gebruiker van het model kan daarbij allerlei randvoorwaarden opleggen aan de beschikbaarheid en toepassingmogelijkheden van grondstoffen en hulpmiddelen – bijvoorbeeld biomassa, CO<sub>2</sub>-opslagcapaciteit, ruimte voor wind en zon – en technieken – bijvoorbeeld kernenergie, of nieuwe nog onzekere technieken. Het is daarmee ook mogelijk om vast te stellen welke rol een bepaalde grondstof, hulpmiddel of techniek in het energiesysteem vervult, hoe belangrijk deze is voor haalbaarheid van doelen en de kosten er van, wat de belangrijkste concurrenten of alternatieven zijn, en wat de gevolgen zijn voor het beslag op andere grondstoffen, hulpmiddelen of technieken.

#### *Waar is OPERA de afgelopen jaren voor gebruikt?*

OPERA is voor het eerst toegepast in het P2G (Power-to-Gas) project bij ECN (Joode et al, 2014 a en b). Het voormalige Optiedocumentmodel (Daniëls et al, 2005, 2006; Daniëls, Tieben et al, 2012) is tijdens dat project omgebouwd naar een volwaardig systeemintegratiemodel en omgedoopt in OPERA. Het is vervolgens onder meer gebruikt voor berekeningen aan Europese doelen voor Nederland (Daniëls, Koelemeijer et al, 2014), voor het Flexnet-project (Sijm et al, 2017 a,b,c) en voor de Verkenning van Klimaatdoelen (Ros, Daniëls, 2017). Deze toepassingen geven een goed beeld van de range van toepassingen van OPERA. De tekstbox geeft een korte beschrijving van de verschillende projecten.

#### P2G (2013-2014)

In het power-to-gas project onderzochten ECN en DNV-GL de mogelijke business-case van Power-to-gas – de productie van waterstof of methaan uit elektriciteit – als flexoptie voor het opvangen van tijdelijke energieoverschotten uit intermitterende hernieuwbare elektriciteit (wind en zon). OPERA is hierbij gebruikt om vast te stellen onder welke omstandigheden P2G meerwaarde biedt aan het energiesysteem, en of de flexibiliteit die P2G biedt daarbij belangrijk is. Daartoe zijn meerdere varianten doorgerekend: emissiereductiedoelen, specifieke doelen voor wind en zon, voorrang voor duurzaam, maximaal bijmengingspercentage waterstof in het gasnet, de waterstofvraag vanuit de transportsector en de beschikbaarheid van flexibiliteit uit het buitenland. De belangrijkste bevindingen waren dat P2G - en dan specifiek power-to-hydrogen - vooral aantrekkelijk is voor het halen van vergaande emissiereductiedoelen, en dat de flexibiliteit die het biedt hoogstens een co-benefit is: alleen de behoefte aan flexibiliteit is onvoldoende basis voor de businesscase. Andere technieken zoals power-to-heat, interconnectie en elektriciteitsopslag zijn belangrijker voor het leveren van flexibiliteit, en ondermijnen daarmee de businesscase voor power-to-gas, tenzij de waterstof nodig is om emissiereductie in bijvoorbeeld de transportsector te realiseren. Een andere belangrijke bevinding was dat het omzetten van waterstof naar methaan meestal niet aantrekkelijk is.

#### De impact van EU-doelen op Nederland (2014)

Hierbij onderzochten ECN en PBL op verzoek van de toenmalige ministeries van I&M en EZ de haalbaarheid en impact (kosten) van - combinaties van - Europese doelen op energie en emissies in 2030 voor Nederland. Het ging daarbij om verschillende mogelijke doelen op niet-ETS-emissies al dan niet in combinatie met verschillende doelen op hernieuwbare energie en/of finaal energiegebruik. Later is ook nog een analyse uitgevoerd voor een doel op primair energiegebruik. De belangrijkste bevinding was dat de mogelijke doelen voor niet-ETS emissies, hernieuwbare energie en primair energiegebruik waarschijnlijk goed haalbaar zijn voor Nederland, en zonder excessieve kosten, maar dat doelen op het finale energieverbruik vaak niet of alleen tegen zeer hoge kosten haalbaar zijn.

#### Flexnet (2016-2017)

In het Flexnet-project gebruikte ECN de modellen OPERA en Competes gezamenlijk. Competes leverde daarbij aan OPERA informatie over de uitwisseling van elektriciteit met het buitenland in situaties met veel intermitterend vermogen, en OPERA rekende daarmee de Nederlandse energievoorziening door. Door de combinatie van beide modellen was het mogelijk om de internationale context beter mee te nemen in de nationale afwegingen. Flexnet liet zien dat interconnectie een belangrijke rol speelt bij het bieden van flexibiliteit, naast vraagsturing. Opslag van elektriciteit en power-to-hydrogen speelt slechts een bescheiden rol.

#### Verkenning van klimaatdoelen (2017)

Hierbij brachten PBL en ECN met onder andere OPERA kosten en maatregelpakketten in beeld voor 2050, voor broeikasemissiereductiedoelen van 80 en 95%, en voor variërende aannames over de beschikbaarheid van biomassa, CCS, windenergie en kernenergie. Op deze manier werd zichtbaar welke technieken een meer of minder robuuste rol spelen in 2050 en welke grondstoffen en hulpmiddelen meer of minder noodzakelijk zijn. Dat bood een basis om acties in kaart te brengen die voor 2030 nodig zijn om verdere emissiereductie na 2030 mogelijk te maken.

## 1.2 Wat zit er in?

### *De ingrediënten*

De belangrijkste elementen in het model zijn opties, energiedragers, activiteiten, emissiesoorten en de uren in een jaar (gegroepeerd in *timeslices*).

### *Opties*

Opties zijn de belangrijkste bouwstenen van het model. Een optie is een techniek (soms een gedragsverandering) die bepaalde inputs (iets wat de optie nodig heeft) en/of outputs (iets wat de optie levert) kent, of een effect heeft op de inputs of outputs van andere technieken. Voorbeelden van opties zijn windmolens, woningisolatie, distributienetten, elektrische auto's. De inputs en outputs van een optie kunnen bestaan uit energiedragers (consumptie en/of productie) of emissies (direct of via een emissiefactor op de energiedragers). Ook een activiteit (bijvoorbeeld de "levering" van personentransport) kan een input of een output zijn. Opties hebben meestal kosten (investeringen, O&M-kosten). In sommige gevallen hebben opties specifieke vraagpatronen (bijvoorbeeld een uurafhankelijke warmte- of elektriciteitsvraag) of aanbodpatronen (bijvoorbeeld wind op zee, zon). Andere opties zijn juist flexibel inzetbaar.

### *Categorieën en sectoren*

Opties zijn ondergebracht in categorieën en sectoren. Een categorie is een bepaalde groep van opties (bijvoorbeeld hernieuwbare elektriciteit, CCS, biomassa, besparing). Een sector is een - meestal economische - indeling naar functie of soort activiteit (industrie, transport, huishoudens, dienstensector). Sectorindelingen spelen ook bij het stellen van doelen of streefwaarden in het klimaat-, energie- en luchtbeleid vaak een belangrijke rol. De gebruiker kan categorieën en sectoren gebruiken om resultaten wat overzichtelijker - meer geaggregeerd - weer te geven, maar ook om op een hoger aggregatieniveau beperkingen op te leggen (bijvoorbeeld een maximale of minimale toepassing van een categorie technieken, zodat het model binnen die categorie een keuze kan maken).

### *Energiedragers, activiteiten*

Energiedragers vormen de belangrijkste inputs en outputs van opties, en ook activiteiten (personentransport, staalproductie) kunnen een input of output zijn van een optie. Bepaalde opties representeren de vraag naar warmte, elektriciteit, energie als grondstof (bijvoorbeeld olie voor plastics) en activiteiten. Deze vraag dwingt het model tot het inzetten van allerlei opties die die vraag invullen, en de energieconsumptie van die opties dwingt weer de inzet van andere opties af die de energie daarvoor opwekken of leveren, etc. Op deze manier dwingt de vraag naar activiteiten en energie OPERA om uiteindelijk een heel energiesysteem te configureren. Energiedragers kunnen vaak ook tegen een bepaalde prijs geïmporteerd of gewonnen worden, en met die prijs houdt OPERA rekening om de kosten van het energiesysteem zo laag mogelijk te houden.

### *Emissies*

De inzet van opties leidt - rechtstreeks of via het verbruik van energiedragers - tot emissies (CO<sub>2</sub>, overige broeikasgassen, luchtverontreiniging). OPERA kan door de keuze van opties dus de emissies hoger of lager maken, en daarmee zoeken naar de goedkoopste invulling van het energiesysteem waarmee de emissies onder het plafond blijven. Ook kunnen emissies een prijs hebben (bijv. CO<sub>2</sub>-prijs). In dat geval houdt OPERA rekening met die prijs bij het zoeken naar die configuratie van het energiesysteem die de laagste kosten heeft.

### *Uren en timeslices*

Op ieder afzonderlijk uur moet het aanbod van energie toereikend zijn om in de vraag te voorzien. Daarom is er voor alle opties informatie die van belang is voor het realiseren van



de afstemming tussen vraag en aanbod: vraagpatronen op uurbasis voor warmte, elektriciteit en activiteiten, aanbodpatronen op uurbasis van wind en zon, en de mogelijkheid om deze tijdelijk af te schakelen (curtailment), de mogelijkheid tot flexibele inzet van een optie en het vermogen van opties om energie op te slaan en weer af te geven (bijvoorbeeld batterijen). OPERA rekent – om de rekentijd te beperken – de uren van het jaar niet allemaal afzonderlijk door, maar groepeerde de uren met een vergelijkbaar vraag- en aanbodprofiel eerst in zogenaamde timeslices.

## 1.3 Werking

*Optimalisatiemodel: wat is dat?*

OPERA is een optimalisatiemodel. Gegeven de veronderstelde mogelijkheden - beschikbaarheid van technieken, potentiëlen, grondstoffen en hulpmiddelen - de kosten van technieken, de prijzen van energiedragers, en eventueel de te halen beleidsdoelen (bijvoorbeeld emissieplafonds) vindt het model die configuratie van het energiesysteem en die inzet van niet energieregerelateerde maatregelen, waarmee Nederland tegen de laagste kosten aan alle randvoorwaarden voldoet<sup>1</sup>. OPERA hoort daarmee bij een familie van modellen met vele leden: Markal (<https://en.wikipedia.org/wiki/MARKAL>), TIAM (<https://iea-etsap.org/index.php/applications/global>), ESME ([eti.co.uk/programmes/strategy/esme](http://eti.co.uk/programmes/strategy/esme)) en vele andere.

Box 1 laat voorbeelden zien van factoren die een rol spelen bij het bepalen of een techniek past in een kostenoptimale configuratie van het energiesysteem. Het kostenbegrip waar OPERA mee rekent sluit aan bij de Nationale Kosten uit de methodiek milieukosten (VROM, 1998).

### Box 1 **Kostenoptimaliteit**

De vraag: "Welke oplossing is kostenoptimaal?" wordt soms verward met de vraag: "Wat is op een bepaalde plaats de goedkoopste techniek?" Die laatste vraag laat echter veel aspecten buiten beschouwing die vaak juist doorslaggevend zijn voor wat de kostenoptimale oplossing is. Een model als OPERA betreft dan ook veel meer aspecten in het bepalen van de kostenoptimale oplossing. Ook om te begrijpen waarom een oplossing kostenoptimaal is, en waarom een techniek of optie daarin een bepaalde rol speelt – of juist geen rol – is het van belang te weten welke vragen daarbij allemaal komen kijken. Een aantal voorbeelden:

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

<sup>1</sup> OPERA kan ook uitrekenen wat de minimaal haalbare emissies zijn gegeven de veronderstelde mogelijkheden. Dit is vooral functioneel om de grenzen van het energiesysteem te verkennen en het model te valideren, maar het levert geen praktisch bruikbare resultaten op.

### *OPERA "bouwt" zelf een energiesysteem dat aan de randvoorwaarden voldoet*

OPERA stelt zelf het energiesysteem samen dat tegen de laagst mogelijke kosten aan alle randvoorwaarden voldoet die de gebruiker oplegt. Daarbij gaat het vaak om een betrekkelijk klein aantal randvoorwaarden: de vraag naar warmte, elektriciteit, grondstoffen en activiteiten per sector, vaak in combinatie met een emissieplafond. De gebruiker kan het aantal randvoorwaarden ook op allerlei manieren uitbreiden: minimale of maximale inzet van technieken (bijv. kernenergie) of potentiële (biomassa, CO<sub>2</sub>-opslag), meerdere doelen (emissieplafonds, minimaal percentage hernieuwbaar, maximaal energiegebruik, restricties op het gebruik van specifieke energiedragers (bijv. kolen of kernenergie), een verbod op curtailment<sup>2</sup> van wind en zon, etc.). De gebruiker kan de restricties opleggen op individuele technieken, maar ook op categorieën van technieken of per sector.

### *Systeemintegratie*

OPERA is gebouwd als systeemintegratiemodel, en dat betekent dat er veel aandacht is voor het op ieder moment op elkaar laten aansluiten van de vraag naar en het aanbod van energie. Veel optimalisatiemodellen zijn in dit opzicht globaler van karakter. OPERA groepeerd – voor de eigenlijke doorrekening – de uren van het jaar eerst in tijdsegmenten (Engels: time slices). In een time slice zitten uren bij elkaar die erg veel op elkaar lijken: allemaal veel of weinig zon- en/of windaanbod, veel of weinig elektriciteits- en warmtevraag, zomer/winter, ochtend/avond etc. De gebruiker van OPERA kan kiezen uit diverse mogelijkheden om uren te groeperen, afhankelijk van de beschikbare tijd voor een doorrekening en het vereiste niveau van precisie. In dit opzicht wijkt OPERA af van veel andere optimalisatiemodellen, die meestal werken met een grovere, vaste indeling in timeslices. Als systeemintegratiemodel kan OPERA een belangrijke bijdrage leveren aan het onderzoek naar inpassingsvraagstukken rond intermitterende bronnen zoals zon en wind, en naar de rol die verschillende soorten flexibiliteitsopties – regelbaar aanbod, curtailment, vraagsturing, opslag, power-to-X (warmte, waterstof, brandstoffen) en interconnectie – kunnen spelen.

### *De rol van het buitenland*

OPERA omvat het hele Nederlandse energiesysteem, maar niet het buitenland. Toch zijn ontwikkelingen in het buitenland van cruciaal belang voor de randvoorwaarden waarbinnen het Nederlandse energiesysteem moet functioneren. De gebruiker van OPERA kan daarom ook aangeven wat de beschikbaarheid en prijzen van energie uit het buitenland zijn, bijvoorbeeld van biomassa, fossiele brandstoffen en waterstof.

Elektriciteit is hierbij een speciaal geval. Nederland is via hoogspanningslijnen met het buitenland verbonden, en de Nederlandse elektriciteitsopwekking fungeert als integraal onderdeel van de Europese elektriciteitsmarkt. Het buitenland is daarmee voor Nederland ook een van de belangrijkste bronnen voor flexibiliteit: Nederland kan tijdelijke overschotten uit wind en zon exporteren naar andere landen, en tijdelijke tekorten opvullen met import uit andere landen, als tenminste de situatie in het buitenland dat op die momenten ook toelaat. Om dat te bepalen moet het model wel de situatie in het buitenland kennen. Omdat OPERA zelf het buitenland niet beschrijft, maakt het gebruik van uitkomsten van Competes (Ozdemir et al, 2017), dat wel de hele Europese elektriciteitsmarkt omvat inclusief de aanbodpatronen<sup>3</sup> van alle landen voor wind- en zon. OPERA gebruikt de gegevens op uurbasis uit Competes voor de uitwisseling met het buitenland. De gegevens moeten natuurlijk op dezelfde situatie betrekking hebben, daarom gebruiken OPERA en Competes de aanbodpatronen voor wind en zon uit hetzelfde jaar, 2012.

---

<sup>2</sup> Het moeten afschakelen van intermitterende bronnen zoals wind en zon-PV doordat de opgewekte elektriciteit niet direct nuttig kan worden ingezet.

<sup>3</sup> Bij aanbodpatronen gaat het om de zoninstraling en windsnelheid op uurbasis. Samen met de gegevens over het opgestelde vermogen van windmolens en zon-PV resulteert dat in de totale productie.

### *Hoe zitten netwerken in het model?*

Om de veranderingen in vraag (bijvoorbeeld door elektrificatie van de warmtevraag en transport) en aanbod (aanbodpieken uit wind en zon) te kunnen accommoderen moet het energiesysteem ook over voldoende netwerkcapaciteit beschikken. In OPERA kan – net als in werkelijkheid – transport van aardgas, elektriciteit, warmte en waterstof alleen via netwerken plaatsvinden. Daarvoor beschikt OPERA over speciale netwerkopties waarvoor geldt dat de output gelijk is aan de input minus een eventueel verlies. Voor die netwerkopties gelden standaard de capaciteiten die corresponderen met de huidige netwerkcapaciteit. Om hogere pieken in het transport van netwerkgebonden energiedragers – bijvoorbeeld door elektrificatie of veel zon-PV te kunnen verwerken moet OPERA investeren in uitbreiding van de netwerken. OPERA onderscheidt 3 netwerkniveaus voor gas (hoge, midden en lage druk) en elektriciteit (hoog-, midden- en laagspanning)

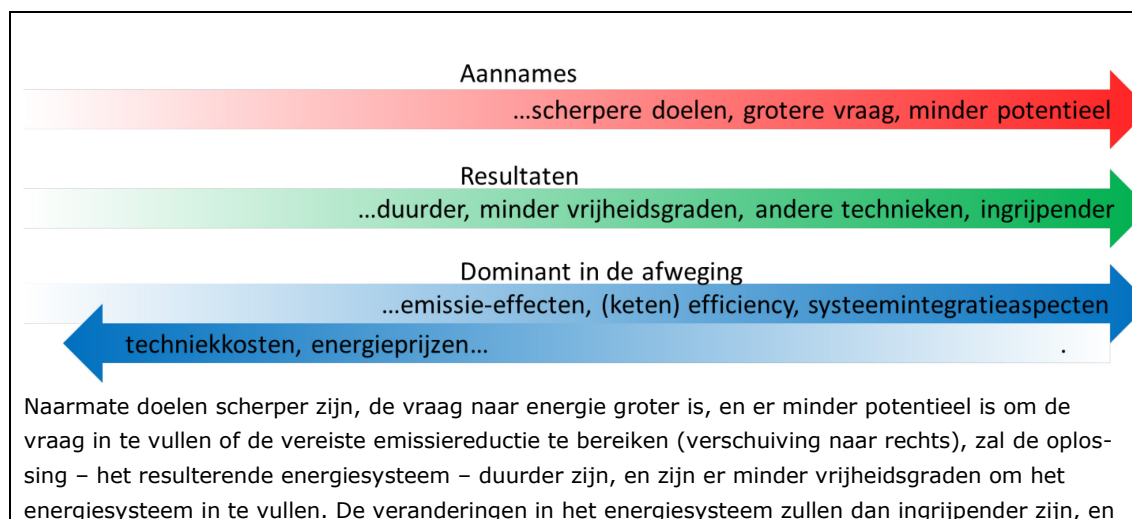
## 1.4 Belangrijkste invoergegevens

*Welke invoergegevens en aannames zijn belangrijk voor de uitkomsten, en op welke manier beïnvloeden ze die?*

In een integraal model als OPERA hangt alles met alles samen, en kun je niet op voorhand een onderscheid maken tussen aannames die meer of minder belangrijk zijn. Dat komt onder meer doordat veel aannames elkaars belang beïnvloeden. We gaan daarom in deze paragraaf vooral in op de omstandigheden die het belang van de verschillende aannames bepalen, en laten geen specifieke data zien. Vanaf 2019 zullen TNO en PBL wel werken aan publicatie van factsheets met de belangrijkste technologiedata in OPERA.

*Factoren die het belang van de verschillende data bepalen*

In een optimalisatiemodel weegt iets naarmate het schaarser is automatisch zwaarder mee. Als bijvoorbeeld de beschikbaarheid van allerlei potentiële, grondstoffen en hulpmiddelen (zoals wind, biomassa en CO<sub>2</sub>-opslag) relatief beperkt is in verhouding tot de vraag (naar warmte, elektriciteit en allerlei activiteiten), dan is vooral de (keten)efficiency van technieken belangrijk voor het systeem. Dat systeem moet immers in staat zijn om met die beperkte beschikbaarheid van grondstoffen en hulpmiddelen in de vraag te voorzien. Kosten van technieken zijn onder deze omstandigheden wat minder belangrijk. Omgekeerd is bij ruime beschikbaarheid van grondstoffen en hulpmiddelen, efficiency minder belangrijk, en tellen techniekkosten relatief zwaarder mee bij de keuze voor de inzet van bepaalde technieken. De figuur in onderstaande box laat op hoofdlijnen zien hoe de samenhang is tussen aannames, resultaten en de dominante factoren in de afweging.



de technologiemix zal sterker verschillen van die in het huidige systeem. Daarbij hoort ook dat andere afwegingen dominanter worden voor de techniekkeuze. Emissie-effecten (bijdrage aan de doelen), efficiency (beslag op potentiëlen) en systeemintegratieaspecten worden belangrijker voor de keuze van de technieken.

Bij de omgekeerde situatie (minder ambitieuze doelen, een kleinere energievraag en meer potentieel) daarentegen worden kosten van technieken en de prijzen van energie belangrijker voor de techniekkeuze.

Tabel y laat voor specifieke factoren zien onder welke omstandigheden die factoren belangrijker zijn voor de kostenoptimale uitkomst. Grosso modo is het vooral het spanningsveld tussen de eisen aan het systeem (omvang vraag, scherpte van doelen) en de mogelijkheden (potentiëlen, beschikbaarheid technieken) die bepaalt welke eigenschappen van opties het belangrijkste zijn voor de uitkomsten.

Tabel y voorbeelden

Issue	Wanneer belangrijker voor resultaat?
Techniekkosten, energieprijzen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bij ruimere potentiëlen/beschikbaarheid van grondstoffen en hulpmiddelen</li> <li>• Bij minder ambitieuze doelen (of lagere CO<sub>2</sub>-prijzen)</li> </ul>
Efficiency	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bij krappe potentiëlen in combinatie met ambitieuze doelen</li> <li>• Hoge kosten energie</li> </ul>
Flexibiliteit vraagtechnieken	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bij veel intermitterend vermogen en weinig regelbaar vermogen en weinig flexibiliteit via interconnectie</li> </ul>
Restemissies technieken	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bij ambitieuze doelen in combinatie met geringe mogelijkheden voor negatieve emissies (biomassa en CCS)</li> </ul>
Investeringskosten technieken	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bij een lager aantal draaiuren door een groter aandeel intermitterend vermogen</li> </ul>
Beslag op schaarse grondstoffen en hulpmiddelen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bij lage beschikbaarheid grondstoffen en hulpmiddelen</li> <li>• Bij beperkte beschikbaarheid alternatieven</li> <li>• Bij ambitieuzere doelen</li> </ul>

#### *Vraag en doelen*

De in te vullen vraag naar warmte, elektriciteit en activiteiten in OPERA is in te stellen door de gebruiker, maar meestal rekent OPERA met de vraag uit de NEV-scenario's. OPERA krijgt daarvoor input uit een excel-conversie tabel, die de informatie uit het NEV rekensysteem vertaalt naar de corresponderende opties in OPERA. Voor energie gaat dit geheel automatisch, maar voor de vraag naar activiteiten zijn ook handmatige acties vereist. Doordat OPERA de NEV-scenario's inleest, kan het die scenario's ook als referentie gebruiken voor kosten en emissies.

Doelen – emissieplafonds (BKG en luchtverontreiniging), energiegebruik, percentage hernieuwbare energie, separaat of in combinatie – kan de gebruiker zelf opleggen. OPERA biedt daarbij ook de mogelijkheid om in opeenvolgende runs doelen automatisch aan te scherpen.

#### *Begrenzing aan technieken*

OPERA kent ruwweg drie soorten begrenzings op de inzetbaarheid van technieken die hieronder verder worden uitgelegd:

- de beschikbaarheid van - in meerdere technieken in te zetten – *potentiëlen, grondstoffen en hulpmiddelen*
- *exogene begrenzings* aan individuele technieken of groepen van technieken
- de omvang van de *toepassingsniche*.

Als meerdere technieken een beslag leggen op beperkt beschikbare *potentiëlen, grondstoffen en hulpmiddelen* die ook alternatief inzetbaar zijn (bijv. biomassa, CO<sub>2</sub>-opslag, elektriciteit) zal het model bepalen bij welke technieken dat het goedkoopst uitvalt voor het hele systeem. Bijvoorbeeld omdat die technieken dat het goedkoopst of meest efficiënt doen, of omdat er juist voor die technieken geen of alleen heel veel duurdere alternatieven zijn. Bij de kostenoptimale keuze voor technieken geldt altijd dat het systeem moet voldoen aan alle gestelde doelen (bv. doelen voor hernieuwbaar, besparing en emissiereductie).

Bij *exogene begrenzings* aan individuele technieken gaat het om bijvoorbeeld een beperkt beschikbaar oppervlak (wind, zon) of beperkingen aan de ingroeisnelheid van een techniek (geothermie, kernenergie).

Op de lange termijn zal voor veel technieken de *toepassingsniche* beperkend zijn: bijvoorbeeld het aantal te verwarmen huizen of te verrijden kilometers. In dat geval is er vaak geen specifieke limiet voor de betreffende technieken. OPERA bekijkt dan welke techniek of combinatie van technieken binnen die niche past in een kostenoptimale systeemconfiguratie.

#### *Technieken*

Belangrijke eigenschappen van technieken zijn de investeringskosten, de operationele kosten, de efficiency, emissie-effecten (direct of via het energiegebruik), het beslag op (schaarse) grondstoffen en hulpmiddelen, de beschikbaarheid, toepasbaarheid, flexibiliteit/patronen. Zoals hierboven aangegeven hangt het belang van een eigenschap voor het wel of niet toepassen van een techniek heel sterk af van allerlei andere aannames, met de name de verhouding tussen vraag, ambities en beschikbare mogelijkheden. Vooral bij ambitieuzere doelen, schaarse grondstoffen en hulpmiddelen en een groter aandeel intermitterend vermogen worden eigenschappen als (keten) efficiency, flexibiliteit, restemissies en beslag op grondstoffen en hulpmiddelen van groter belang, terwijl bij minder ambitieuze doelen de directe kosten een groter gewicht hebben.

#### *Het belang van compleetheid*

Bij OPERA is het streven om alle soorten technieken voor alle mogelijk toepassingen vertegenwoordigd te hebben, en desnoods met minder detail genoeg te nemen t.a.v. technologische varianten. Zeker bij vergaande emissiedoelen is vaak belangrijker dat elke soort techniek vertegenwoordigd is in het model, dan dat de eigenschappen van al die technieken precies bekend zijn. Als bijvoorbeeld bij vergaande broeikasgasemissiereductiedoelen de marginale kosten op 350 euro per ton CO<sub>2</sub>-equivalenten of meer liggen, maakt het niet meer zo veel uit of een techniek 75 dan wel 150 euro/ton kost, tenzij juist binnen die kostenrange alternatieve technieken beschikbaar zijn.

Ook is het van belang dat bepaalde soorten technieken in alle sectoren en categorieën evenwichtig vertegenwoordigd zijn (tenzij ze om technische redenen ergens niet toepasbaar zijn). Zo kan BECCS – de combinatie van biomassa en CCS – bij vergaande reductie heel belangrijk zijn, omdat het tot negatieve emissies leidt, en daarmee hele dure maatregelen elders voorkomt. Bij vergaande reductiedoelen gaat het model BECCS dus vrijwel altijd toepassen. Als BECCS dan maar in één sector of categorie vertegenwoordigd zou zijn (bijvoorbeeld wel bij elektriciteitsopwekking en niet in de industrie of bij biobrandstof- of waterstofproductie),

drukt dat een heel zwaar stempel op het modelresultaat. De techniek drukt dan andere elektriciteitopwekkingstechnieken er uit, en wordt wellicht ten onrechte niet toegepast in industrie, biobrandstoffenproductie of waterstofproductie waar alternatieven schaarser zijn.

## 1.5 Beperkingen en verdere ontwikkeling

OPERA is breed inzetbaar voor allerlei systeembrede vraagstukken, maar heeft uiteraard ook zijn beperkingen. Sommige beperkingen zijn inherent aan het soort model (lineaire optimalisatie), andere hebben te maken met praktische beperkingen zoals de rekentijd en databeschikbaarheid, en weer andere zijn binnen de modelopzet (deels) te ondervangen. Dit onderdeel beschrijft beperkingen en de modelverbeteringen die momenteel op stapel staan.

### *Inherente beperkingen van lineaire modellen*

Een lineair model beschrijft alles in lineaire vergelijkingen, ook als het in werkelijkheid gaat om niet-lineaire verschijnselen of discrete keuzes.

Niet-lineaire verschijnselen zijn bijvoorbeeld dat de specifieke kosten van een techniek oplopen bij verdergaande toepassing. Naarmate een techniek op meer plaatsen wordt toegepast zal dat ook steeds vaker zijn op plekken waar toepassing duurder is, en/of het gewenste effect kleiner. Waar dit een rol speelt, werkt OPERA vaak met goedkopere en duurdere varianten van een techniek die samen de hele niche bestrijken.

Een voorbeeld van discrete keuzes speelt bijvoorbeeld bij infrastructuurkosten. OPERA behandelt netwerken alsof ze gradueel uitbreidbaar zijn, en laat ook de kosten lineair opschalen met de netwerkcapaciteit. In werkelijkheid is de kostenopbouw complexer: de discrete keuze voor de aanleg van bijvoorbeeld een hoogspanningleiding brengt al min of meer vaste kosten met zich mee, en de keuze voor een iets hogere of lagere capaciteit leidt niet tot proportioneel hogere of lagere kosten. Op het niveau van een land is dit soort effecten overigens vaak niet zo heel belangrijk.

### *Praktische beperkingen*

Lineaire optimalisatiemodellen hebben snel oplopende rekentijden bij een grotere omvang van het door te rekenen systeem. Dat brengt praktische beperkingen met zich mee voor bijvoorbeeld technologisch detail, geografische of sectordifferentiatie en tijdsresolutie. Een belangrijke consequentie van deze beperking is dat uitkomsten niet altijd een hele precieze weergave van de te verwachten kosten geven, maar wel betrouwbare ordegroottes en rangschikking van oplossingsrichtingen. Momenteel is PBL bezig met het stroomlijnen van het model, om deze beperking zo veel mogelijk te ondervangen, en meer detail mogelijk te maken. Het streven is om eind 2019 een modelversie te hebben die op 1, 2, of 3 uursbasis kan rekenen. Ook bij de specifieke onderwerpen die hieronder vermeld worden spelen de praktische beperkingen vaak een rol.

### *Energiehuishouding industrie*

De huidige modellering van de energiehuishouding in de industrie is erg grof. Het model kent binnen de warmtevraag geen onderscheid naar temperatuurniveau, hoewel in de technieken voor warmteproductie dat onderscheid wel bestaat. Op dit moment is het daardoor niet mogelijk om terugwinning en opwaardering van restwarmte apart te modelleren. Dat gebeurt nu met een benaderingsmethode door opties te introduceren die tot warmtevraagreductie leiden. Ook is het op dit moment niet mogelijk om benutting van restwarmte voor CCS te beschrijven. In 2019 werken PBL en TNO aan een meer natuurgetrouwe modellering van de energiehuishouding van de industrie.

### *Isolatie gebouwen en vraagpatronen, regionale differentiatie*

Op dit moment zijn de twee sectoren diensten en huishoudens ieder niet verder onderverdeeld, en hebben beide sectoren elk een generiek uurpatroon voor de warmtevraag. Dat is een forse beperking: de kosten en baten van veel verduurzamingsopties zijn sterk afhankelijk van de ruimtelijke karakteristieken en van de isolatiegraad van gebouwen. In 2019 werken PBL en TNO daarom aan een meer gedetailleerde opdeling van de gebouwde omgeving, met daarin onderscheid naar een aantal typen gebieden (bijv platteland, voorstedelijk, stedelijk) en gebouwen met verschillende isolatiegraden. Bij die isolatiegraden horen dan ook specifieke kosten en warmtevraagpatronen. Op deze manier kan het model beter onderscheid maken in waar welke verduurzamingsoptie het beste past, en ontstaat er ook een meer gedifferentieerd beeld van de gebouwde omgeving. Vanwege de beperkingen aan de rekentijd zal het wel een vrij grove indeling zijn. Ook gaat het model beter rekening houden met het verschil tussen individuele patronen (bijvoorbeeld van belang voor de toepassing en kosten van een individuele warmtepomp) en collectieve patronen (bijvoorbeeld van belang voor warmtenetten en elektriciteitsinfrastructuur).

### *Rekenen op uurbasis*

OPERA rekent nu met timeslices (zie paragraaf 1.2), om de rekentijd acceptabel te houden. Bij het samenvoegen van uren tot timeslices gaat detail verloren, vooral ten aanzien van de volgorde van periodes en de duur van periodes met bijvoorbeeld tekorten of overschotten aan hernieuwbare elektriciteit. Bij de huidige gelijktijdige integrale doorrekening van investeringen en operationele inzet is het vanwege de rekentijd echter niet mogelijk om op uurbasis te rekenen. PBL en TNO werken daarom aan een tweetrapsbenadering, waarbij na de huidige doorrekening een tweede doorrekening volgt op uurbasis. Die tweede doorrekening gaat verder met de resulterende investeringsbeslissingen uit de eerste doorrekening, waardoor het aantal variabelen veel kleiner is en toch een acceptabele rekentijd mogelijk is. De inzichten uit de tweede doorrekening kunnen bovendien helpen om de manier waarop de timeslices in de eerste doorrekening geconstrueerd worden te optimaliseren, zodat de verschillen tussen beide stappen van de doorrekening minimaal zijn.

### *Koppeling buitenland*

OPERA beschrijft, zoals vermeld, niet het buitenland, maar gebruikt wel informatie uit Competes over de uurlijkse elektriciteitsuitwisseling over de interconnectie. Op dit moment gebeurt dat slechts voor één scenario, terwijl die uitwisseling in de praktijk zal verschillen afhankelijk van de veronderstellingen voor Nederland en voor het buitenland. PBL werkt daarom aan een meer geavanceerde benadering, waarbij verschillende uitwisselingspatronen beschikbaar zijn, en OPERA die (combinaties van) patronen kiest die het beste passen bij veronderstellingen zoals reductiedoelen, energieprijzen en scenario's voor het buitenland. PBL onderzoekt ook een iteratieve benadering, waarbij OPERA informatie levert aan Competes over flexibiliteitsopties en elektrificatie van warmtevraag en transport, en Competes vervolgens aan OPERA de uitwisselingpatronen levert. Door deze cyclus te herhalen komen de resultaten uit OPERA en Competes steeds meer in elkaars verlengde te liggen totdat ze volledig consistent met elkaar zijn.

# 2 Bronnen

Daniëls, B.W., Koelemeijer, R., Dalla Longa, F., Geilenkirchen, G., Meulen, J. van der, Smekens, K.E.L. en van Stralen, J. (2014). EU-doelen klimaat en energie 2030: Impact voor Nederland; ECN-E--14-033 NL

Daniëls, B.W., B. Tieben, J. Weda, M. Hekkenberg, K.E.L. Smekens en P. Vethman (2012). Kosten en baten van CO2-emissiereductie maatregelen; ECN-E--12-008 NL.

Daniëls, B.W.; Beurskens, L.W.M.; Boerakker, Y.H.A.; Coninck, H.C. de; Dril, A.W.N. van; Harmsen, R.; Jeeninga, H.; Kroon, P.; Lako, P.; Londo, H.M.; Menkveld, M.; Seebregts, A.J.; Stienstra, G.J.; Volkers, C.H.; Vries, H.J. de; Wilde, H.P.J. de; Ybema, J.R.; Farla, J.C.M.; Optiedocument energie en emissies 2010/2020 ECN-C--05-105 NL maart 2006

Daniëls, B.W.; Beurskens, L.W.M.; Boerakker, Y.H.A.; Coninck, H.C. de; Dril, A.W.N. van; Harmsen, R.; Jeeninga, H.; Kroon, P.; Lako, P.; Londo, H.M.; Menkveld, M.; Seebregts, A.J.; Stienstra, G.J.; Volkers, C.H.; Vries, H.J. de; Ybema, J.R.; Farla, J.C.M.; Verkenning klimaatdoelstellingen en energiebesparing 2020. Analyses met het Optiedocument energie en emissies 2005 ECN-C--05-106 NL februari 2006

Joode, J. de; Daniëls, B.W.; Smekens, K.E.L.; Stralen, J. van; Dalla Longa, F.; Schoots, K.; Seebregts, A.J.; Grond, L.; Holstein, J.; Exploring the role for P2G in the future Dutch energy system - Background report of the TKI P2G system analysis project; ECN-E--14-026 EN september 2014

Joode, J. de; Daniëls, B.W.; Smekens, K.E.L.; Stralen, J. van; Dalla Longa, F.; Schoots, K.; Seebregts, A.J.; Grond, L.; Holstein, J.; De rol van Power-to-Gas in het toekomstige Nederlandse energiesysteem: Samenvatting ECN-O--14-030 EN september 2014

Ozdemir, O.; Hout, M. van; Koutstaal, P.; Integration costs and market value of variable renewables: A study for the Dutch power market, ECN-W--17-035, 2017  
<https://www.ecn.nl/publicaties/PdfFetch.aspx?nr=ECN-W--17-035> (ingediend bij Energy Policy).

Ros J en B Daniëls, 2017. Verkenning van klimaatdoelen: van lange termijn beelden naar korte termijn actie, PBL-publicatienummer 2966, PBL, Den Haag.

Schoots K, M Hekkenberg en P Hammingh, 2017. Nationale Energieverkenning 2017. ECN-O-17-018, ECN, Petten.

Sijm, J.P.M.; Gockel, P.; Welle, A.J. van der; Westering, W. van; Demand and supply of flexibility in the power system of the Netherlands, 2015-2050. Key Messages; ECN-E--17-063 EN november 2017

Sijm, J.P.M.; Demand and supply of flexibility in the power system of The Netherlands, 2015-2050. Summary report of the FLEXNET project; ECN-E--17-053 EN november 2017

Sijm, J.P.M.; Gockel, P.; Hout, M. van; Ozdemir, O.; Stralen, J. van; Smekens, K.E.L.; Welle, A.J. van der; van Westering, W.; Musterd, M.; The supply of flexibility for the power system in the Netherlands, 2015-2050. Report of phase 2 of the FLEXNET project; ECN-E--17-044 EN november 2017

Sijm, J.P.M.; Gockel, P.; Joode, J. de; van Westering, W.; Musterd, M.; The demand for flexibility of the power system in the Netherlands, 2015-2050. Report of phase 1 of the FLEXNET project; ECN-E--17-037 EN november 2017

Welle, A.J. van der; Sijm, J.P.M.; Maatschappelijk afwegingskader voor de inzet van flexibilitiopties in elektriciteitsnetten. Rapport van fase 3 van het FLEXNET project; ECN-E--17-052 EN november 2017



<https://www.eti.co.uk/programmes/strategy/esme>

<https://en.wikipedia.org/wiki/MARKAL>

<https://iea-etsap.org/index.php/applications/global>