



Planbureau voor de Leefomgeving

ACHTERGRONDDOCUMENTATIE VAN HET RESOLVE-E MODEL

Notitie

PBL

3 mei 2021

PBL

Colofon

Achtergronddocumentatie van het RESolve-E model

© PBL Planbureau voor de Leefomgeving

Den Haag, 2021

PBL-publicatienummer: 4646

Contact

Bert.Daniels@pbl.nl

Auteurs

Joost van Stralen (TNO) en Marc Marsidi (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

Lijst van gebruikte termen en toelichting	5
Korte modelbeschrijving	6
1.1 Inleiding	6
1.2 Wat zit er in?	6
1.3 Werking	9
1.4 Wat komt er uit?	12
1.5 Belangrijkste invoergegevens	12
1.6 Beperkingen en verdere ontwikkeling	12
Technische modelsamenvatting	14
Uitgebreide modelbeschrijving	16
3.1 Functie en opbouw	16
3.1.1 Werkingsprincipes	16
3.1.2 Geografische scope, ruimtelijk detail	16
3.1.3 Temporele scope, statisch/dynamisch, temporeel detail	16
3.1.4 Bouwstenen, ingrediënten, structuur	17
3.2 Hoe werkt het model?	20
3.2.1 Wat gaat er in en hoe wordt het gebruikt?	20
3.2.2 Wat komt er uit?	26
3.3 Toepassingen	27
3.4 Validatie en kalibratie	29
3.5 Beperkingen	31
3.6 Interactie met andere modellen	34
3.7 Verwijzingen naar rapporten met eerdere toepassingen	35
3.8 Wetenschappelijke literatuur	36
Invoerdata en rol in model	37
4.1 Kort overzicht van gebruikte databases	37
4.2 Beleidsgerelateerde invoerdata	37
4.3 Invoerdata voor onrendabele top	40
4.4 Invoerdata voor realistische potentiëlen	41
4.5 Andere relevante invoerdata	42
Referenties	50

Samenvatting en leeswijzer

Het RESolve-E model wordt binnen de Klimaat- en EnergieVerkenning (KEV) gebruikt om een projectie te maken van het grootste deel van de beschikbare technieken voor hernieuwbare energie in Nederland. Categorieën die RESolve-E niet beschrijft worden aangevuld door andere modellen binnen het Nationale Energie Verkenningen - RekenSysteem. Kostenontwikkelingen van hernieuwbare energietechnieken, potentiëlen en beleid zijn de belangrijkste input voor dit model.

Omdat RESolve-E het grootste deel van alle hernieuwbare energie beschrijft, zijn de resultaten een belangrijke bouwsteen voor het bepalen van het aandeel hernieuwbaar in het totale Nederlandse energiegebruik. Vanuit de Europese Commissie en het Energieakkoord zijn er doelen voor hernieuwbare energie vastgesteld voor 2020 en 2023. Ook na 2023 zal het aandeel hernieuwbare energie een belangrijk gegeven zijn in de KEV.

De SDE+-regeling (vanaf 2020 SDE++¹) speelt binnen RESolve-E een zeer belangrijke rol. RESolve-E is binnen de KEV de bewaker van SDE+(+) budgetten en kasuitgaven.

De structuur van dit rapport is gelijk aan de structuur die gebruikt wordt voor de beschrijving van de andere nationale modellen.

Hoofdstuk 1 geeft een globale beschrijving van het model en is vooral gericht op beleidsmakers en andere geïnteresseerden. Dit hoofdstuk beschrijft het doel van het model en de werking op hoofdlijnen, zonder gedetailleerde achtergrondinformatie.

Hoofdstuk 2 geeft een zeer beknopte technische beschrijving van het model in tabelvorm. Dit hoofdstuk is vooral gericht op inhoudelijke (model)experts die snel een beeld willen krijgen van de opzet en scope van het model, en die vertrouwd zijn met de terminologie.

Hoofdstuk 3 volgt dezelfde structuur als hoofdstuk 1 en 2, maar gaat in detail in op de werking, het gebruik en de beperkingen van het model.

Hoofdstuk 4 bespreekt de belangrijkste data die het model gebruikt, en de rol die de data spelen.

Een leesbare modelbeschrijving kan niet op alle details ingaan waarin lezers mogelijk geïnteresseerd zijn. Voor vragen waarop de beschrijving geen antwoord geeft kunt u contact opnemen met de auteur (joost.vanstralen@tno.nl), of met de coördinatoren van de modelbeschrijvingen (bert.daniels@pbl.nl, hans.elzenga@pbl.nl).

¹ In 2020 is de SDE+ regeling verbreed onder de noemer Stimuleringsregeling Duurzame Energietransitie (SDE++) (EZK, 2018b; RVO SDE+). Als een passage in dit rapport betrekking heeft op zowel de SDE+- als de SDE++- regeling wordt dat aangeduid met SDE+(+).

Lijst van gebruikte termen en toelichting

KEV – Klimaat- en Energieverkenningen, voorheen Nationale Energieverkenningen. Raming van energiegebruik en broeikasgasemissies op basis van vastgesteld en voorgenomen beleid, op basis van actuele inzichten over economische ontwikkelingen, energieprijzen etc.

Kasuitgaven – De totale SDE+(+)-subsidie-uitkering voor een specifiek jaar of gesommeerd over een aantal jaren.

ODE – Opslag duurzame energie. De ODE is extra accijns die iedereen die elektriciteit of gas afneemt moet betalen. De inkomsten die de overheid uit de ODE haalt, worden gebruikt om de uitgaven aan SDE+(+) te betalen.

ODE reeks – Verwachte reeks van inkomsten uit de ODE voor toekomstige jaren. Deze reeks is afkomstig van het Ministerie van EZK en wordt als input gebruikt voor RESolve-E.

Openstellingsruimte SDE+(+) – Het maximale bedrag dat het Ministerie van Economische Zaken opzij zet voor een specifiek jaar dat de SDE+(+) is opengesteld. Dit bedrag is het maximaal mogelijke subsidiebedrag dat kan worden uitgekeerd aan alle projecten die SDE+(+) subsidie ontvangen in een specifiek jaar, gesommeerd over alle productie jaren. In SDE+(+) terminologie wordt voor openstellingsruimte ook de term budget gebruikt.

Optimalisatiemodel – model dat gegeven een set van condities (randvoorwaarden) berekent wat de optimale uitkomst is, bijvoorbeeld de configuratie van het energiesysteem dat tegen minimale maatschappelijke kosten bepaalde beleidsdoelen haalt. In sommige gevallen - zoals bij de elektriciteitsmarkt - bieden optimalisatiemodellen ook een adequate benadering van het gedrag van actoren. In dat geval kan een optimalisatiemodel ook functioneren als simulatiemodel.

Simulatiemodel – model dat het gedrag van sectoren, bedrijven, huishoudens en/of markten zo goed mogelijk benadert.

Vollastuur – Eenheid voor effectieve opbrengst voor technieken met wisselend vermogen, oftewel het theoretisch aantal uren dat de techniek op vol vermogen zou produceren.

WKK – Warmte-krachtkoppeling.

Zichtjaar – Een jaar in de toekomst waar een projectie voor is gemaakt. Vaak gaat het om een jaar dat specifiek wordt geanalyseerd, zoals het jaar 2030.

Korte modelbeschrijving

1.1 Inleiding

RESolve-E is een simulatiemodel: het simuleert voor toekomstige jaren het te verwachten investeringsgedrag van producenten van hernieuwbare energie onder invloed van beleid en energieprijzen. Het rekent per jaar de verwachte toepassing van hernieuwbare energieproductietechnieken in - naar keuze - Europa² en Nederland uit. RESolve-E is een zogenoemd jaargangenmodel. Dat betekent dat in de simulaties rekening wordt gehouden met het tempo waarin nieuwe capaciteit kan worden gerealiseerd en tevens met de eindige levensduur van installaties.

Met behulp van RESolve-E is het mogelijk om voor Nederland een kwantitatieve inschatting te maken van de hoeveelheid geproduceerde hernieuwbare elektriciteit, hernieuwbare warmte en groen gas voor toekomstige jaren. Voor alle andere landen in de voormalige EU28 (dus nog inclusief het Verenigd Koninkrijk) is het alleen mogelijk om een kwantitatieve inschatting te maken voor de hoeveelheid geproduceerde hernieuwbare elektriciteit. Het model bouwt voort op een model voor simulatie van hernieuwbare elektriciteit in de EU15 (Daniëls & Uyterlinde, 2005).

Het RESolve-E model wordt binnen de Klimaat- en Energieverkenning (KEV) gebruikt om de Nederlandse energieproductie uit hernieuwbare bronnen in de toekomst te kwantificeren (ECN/PBL/CBS, 2015, 2015, 2016, 2017; PBL/CBS/ECN-TNO 2019, 2020). Het model kan gebruikt worden om het effect van beleid op de investeringen in hernieuwbare energieproductietechnieken te analyseren. Stimuleringsbeleid is dus een essentiële invoer voor het model.

Hoofdstuk 1 geeft een globale beschrijving van de belangrijkste elementen uit het model en focust daarbij op de toepassing voor Nederland; de toepassing voor de rest van Europa blijft grotendeels buiten beschouwing.

1.2 Wat zit er in?

Technieken

RESolve-E bevat alle hernieuwbare energieproductietechnieken die in Nederland onder de Stimulering Duurzame Energie (Plus) (SDE+, vanaf 2020 SDE++³) vallen. Daarnaast maken houtketels die groter zijn dan 50 kW en die tot en met 2019 gesubsidieerd werden middels de Investeringssubsidie duurzame energie (ISDE) ook onderdeel uit van de modelberekeningen. De technieken zijn in het model onderverdeeld in zogenaamde 'techniek-banden' om ze

² Het model is binnen de Europese context voor het laatst in 2016 gebruikt en geactualiseerd. Het model is dus voor andere landen dan Nederland niet meer up to date.

³ In 2020 is de SDE+ regeling verbreed onder de noemer Stimuleringsregeling Duurzame Energietransitie (SDE++) (EZK, 2018b; RVO SDE+)

specifiek te maken voor verschillende omstandigheden en toepassingen, met bijbehorende specifieke kosten. Zo is geothermie bijvoorbeeld verdeeld in drie techniek-bandens:

- Geothermische warmte in de industrie, diepte ≥ 500 m;
- Geothermische warmte in de landbouw, diepte ≥ 500 m;
- Geothermische warmte voor stadsverwarming, diepte ≥ 500 m;

De belangrijkste bron voor de huidige stand van zaken van techno-economische parameters zijn de SDE+(+) eindadviezen (Lensink *et al.*, 2017; Lensink, 2019; Lensink en Schoots, 2021). Inschatting van toekomstige techno-economische parameters zijn doorgaans gebaseerd op een deskundigenoordeel.

Beleid

RESolve-E wordt vooral gebruikt binnen de context van de KEV en ontleent daaraan ook allerlei invoergegevens voor beleid en prijzen. De KEV maakt gebruik van één referentiescenario met exogene veronderstellingen over bijvoorbeeld economie, demografie, brandstof- en CO₂-prijzen, en dat uitgaat van bepaalde aannames op gebied van technologische ontwikkelingen. Het referentiescenario wordt doorgerekend voor twee beleidsvarianten:

- Vastgesteld beleid, met maatregelen en afspraken die per 1 mei van het lopende jaar bindend zijn vastgelegd;
- Voorgenomen beleid, met naast het vastgestelde beleid ook voorgenomen maatregelen en afspraken op basis van de stand van zaken per 1 mei van het lopende jaar.

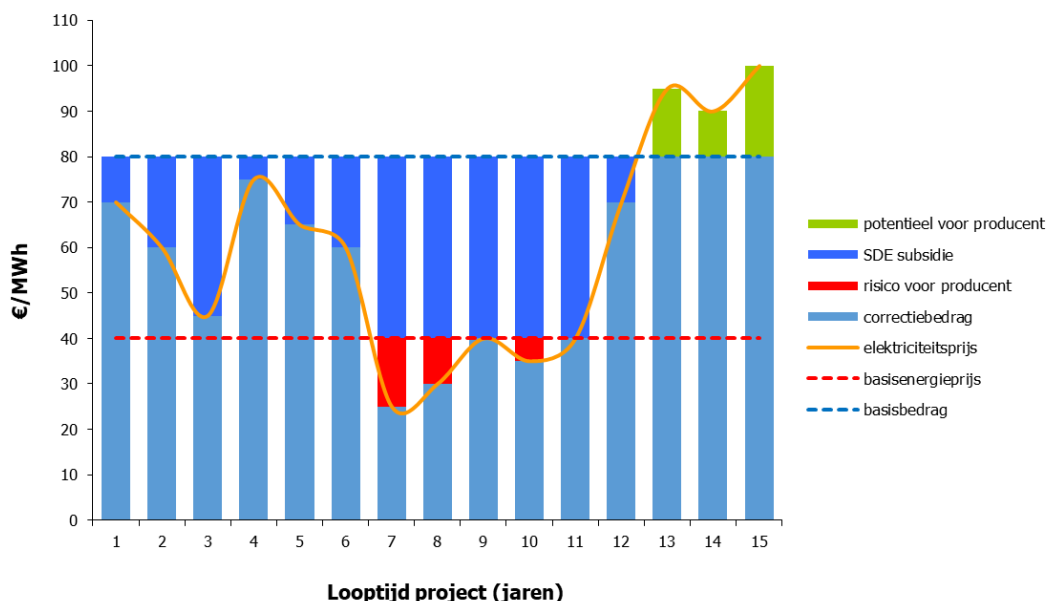
Het belangrijkste beleid voor RESolve-E is de SDE+(+). De SDE+(+) is het belangrijkste instrument van de Nederlandse overheid om de hernieuwbare energiedoelstelling in 2020 en 2023 te halen. De SDE+(+) vergoedt de onrendabele top van projecten. De elementen uit de SDE+(+) die worden meegenomen staan in Tabel 1 en Figuur 1.

Tabel 1: Elementen uit de SDE+(+) die gebruikt worden in RESolve-E

Element uit de SDE(+)	Betekenis
Basisbedrag	De kostprijs van een hernieuwbaar energieproject op grond waarvan subsidie wordt toegekend. Dit is binnen de SDE+(+) gemaximeerd.
Correctiebedrag	De marktwaaarde van de geproduceerde energie.
Onrendabele top (subsidie)	Het verschil tussen de kostprijs en de marktwaaarde van de geproduceerde energie. Als de kostprijs hoger ligt dan de marktwaaarde, is dit verschil de subsidie per kWh geproduceerde energie die een project ontvangt.
Basisenergieprijs	De bodemwaarde voor de correctiebedragen. Als de marktwaaarde van energie lager is dan de basisprijs, blijft de onrendabele top het verschil tussen basisbedrag en basisenergieprijs.
Totale jaarlijkse verplichtingenbudget (openstellingsuimte)	De SDE+(+) maakt per jaar gebruik van één budgetplafond voor alle aanvragers. Dit verplichtingenbudget wordt voorafgaand aan de opening van de SDE+(+) vastgelegd. Zo was er bijvoorbeeld voor de SDE+

Element uit de SDE(+)	Betekenis
	in 2019 een budget van 10 miljard euro vastgesteld. Dit houdt in dat alle projecten die een SDE+ beschikking kregen, gezamenlijk ten hoogste 10 miljard euro aan subsidie ontvangen gedurende de looptijden van de projecten. Het verplichtingenbudget gaat uit van de maximale subsidie (verschil tussen basisbedrag en basisenergieprijs).
Gefaseerde openstelling	De SDE+(+) wordt in fases opengesteld. Tijdens de eerste fase kan alleen subsidie worden aangevraagd voor projecten met een subsidiebehoefte tot een bepaald subsidiebedrag/ton CO ₂ . Tijdens de volgende fases wordt dit maximale subsidiebedrag/ton CO ₂ stapsgewijs opgehoogd. In het model spelen fases een rol bij een beperkend budget. Bij een beperkend budget wordt de penetratie van technieken naar beneden geschaald, beginnend bij technieken uit de laatste fase, totdat er geen budgetoverschrijding meer is.
Kasuitgaven	De werkelijke subsidieuitgaven aan projecten die onder SDE+(+) energie produceren. De kasuitgaven kunnen van jaar op jaar variëren door variatie in energieproductie en de marktwaaarde van energie.
Maximale kasuitgaven	In projecties van hernieuwbare energie wordt er gewerkt met maximale kasuitgaven. De maximale kasuitgaven zijn de subsidieuitgaven voor alle SDE+(+)-projecten gezamenlijk. Dit betreft niet alleen SDE+(+) uitgaven voor projecten uit één specifiek openstellingsjaar, maar van alle jaren dat de SDE+(+) open is gesteld. In de modellering wordt hier rekening mee gehouden door de openstellingsruimtes voor toekomstige jaren dusdanig aan te passen dat de kasuitgaven niet meer dan 1% afwijken van de maximale kasuitgaven.

Een schematische werking van de SDE+(+) en de relatie tussen een aantal elementen uit de SDE+(+) is weergegeven in Figuur 1. Te zien is dat het subsidiebedrag gelijk is aan het basisbedrag (een maat voor de productiekosten per eenheid opgewekte energie) minus het correctiebedrag (een maat voor de marktwaaarde van de opgewekte energie). Het subsidiebedrag is echter nooit hoger dan het basisbedrag minus de basisenergieprijs; dat is het risico voor de producent (te zien in de jaren 7, 8 en 10, waar het correctiebedrag onder de basisenergieprijs is gezakt). In de jaren 13, 14 en 15 wordt geen subsidie uitgekeerd, omdat de elektriciteitsprijs hoger is dan het basisbedrag.



Figuur 1: Schematische werking van de SDE+(+)

Energie- en CO₂-prijzen

De verwachte prijsontwikkelingen omvatten: aardgas, elektriciteit, biomassa, kolen en CO₂. Met uitzondering van die van biomassa worden de prijzen ingelezen uit de database van het NEV-RekenSysteem (NEV-RS). Waar ze van toepassing zijn houdt RESolve-E rekening met belastingen en heffingen op deze prijzen. Deze belastingen en heffingen komen eveneens uit de NEV-RS database.

Bron voor de aardgas- en kolenprijzen is altijd de meest recente KEV; elektriciteitsprijzen worden berekend met het COMPETES-model. Voor huidige biomassaprijzen vormen de SDE+(+)-eindadviezen (Lensink et al., 2017; Lensink, 2019; Lensink en Schoots, 2021) een belangrijke bron. De toekomstprojecties van biomassaprijzen komen uit de KEV.

1.3 Werking

Algemeen

RESolve-E is een simulatiemodel waarbij voor elk opeenvolgend jaar wordt uitgerekend wat er aan hernieuwbare productie in bedrijf is. Om uit te rekenen wat er in jaar n aan productiecapaciteit in bedrijf is, houdt het model bij wat er in jaar $n-1$ aan productiecapaciteit is gerealiseerd, wat er in jaar n uit productie gaat en berekent het welke nieuwe productiecapaciteit er bij kan komen. Het model maakt hiervoor gebruik van een zogenaamde jaargangenbenadering. Naast zichtjaren (een toekomstig jaar waarvoor een berekening wordt gemaakt) gebruikt het model daarom ook constructiejaren (waarin de productiecapaciteit is opgeleverd). Het model levert resultaten voor de periode 2002 tot en met 2050.

Het model verwerkt informatie over steun vanuit beleid (bijvoorbeeld subsidie) voor niet-ren-dabele technieken. In het geval van hernieuwbare energie in Nederland is de SDE+(+) momenteel het belangrijkste instrument.

RESolve-E benadert vraag naar en aanbod van hernieuwbare energie als een markt. Het model ziet beleid gericht op hernieuwbare energie hierbij als een vraag naar (een specifieke soort) hernieuwbare energie met een bepaalde vraagprijs (in SDE+(+)-termen de onrendabele topsubsidie). De vraagprijs wordt hierbij bepaald door het (maximale) subsidieniveau. De verschillende aanbieders van hernieuwbare energie concurreren met elkaar om de door het beleid geboden vergoeding. Een aanbieder zal daarbij streven naar een zo hoog mogelijke vergoeding terwijl het beleid zal streven naar een zo laag mogelijke vergoeding (zo veel mogelijk hernieuwbaar voor zo min mogelijk geld). In Nederland heeft dat laatste geleid tot het systeem in de SDE+(+) waarin elke techniek voor een specifieke maximale vergoeding per eenheid productie in aanmerking komt. RESolve-E behandelt in dit geval elke SDE+(+)-categorie als een aparte deelmarkt, met een eigen vraag en aanbod⁴. Het model bepaalt op grond van de te verwachten vergoeding per eenheid productie de investeringen in nieuwe capaciteit.

RESolve-E wordt gekalibreerd op een zo lang mogelijke reeks van historische gegevens. Het startpunt hiervan is 2001, het eerste jaar waarvoor complete historische gegevens beschikbaar zijn. De statistische productiecijfers (Eurostat) voor hernieuwbare energie in de EU28 lidstaten (inclusief het Verenigd Koninkrijk) voor het jaar 2001 zijn exogeen in het model gezet. Deze gegevens vormen uiteindelijk een startpunt voor de projectie. Om te bepalen wanneer capaciteit weer uit productie wordt gehaald, is het nodig om te weten wat het constructiejaar van deze capaciteit is. Van de capaciteit van voor 2001 is dat niet precies bekend. Daarom wordt er voor de capaciteitsdata in 2001 een grove verdeling van constructiejaren gesimuleerd: bepaalde capaciteit komt uit 1978, uit 1985, enz. Hiervoor is een zogenaamde 'history generator' gebruikt, die gebaseerd is op onderzoek door ECN naar de constructiejaren van de opgestelde capaciteit in 2001 (Uyterlinde 2003).

Vanaf 2002 wordt de productie uitgerekend volgens het principe van vraag en aanbod. De ingroei van technieken kan plaatsvinden wanneer er een match is tussen vraag en aanbod. Hiervoor zijn een aantal randvoorwaarden van belang:

- De vergoeding die de techniek krijgt moet minstens gelijk zijn aan de onrendabele top. Met andere woorden: de subsidie (of in andere landen andere ondersteuning) moet voldoende zijn om de productiekosten minus de referentieprij⁵ te vergoeden.
- Als er voor een bepaalde techniek meerdere beleidssegmenten (SDE+(+) categorieën) zijn waar hij onder kan vallen, dan kiest het model voor die techniek het meest aantrekkelijke beleidssegment.

Potentiëlen en groeisnelheid

De jaarlijkse mogelijke uitbreiding van een techniek is niet ongelimiteerd, maar is begrensd door potentiëlen. Het model maakt onderscheid naar de volgende typen potentiëlen:

- **Realistisch potentieel:** wat is er maximaal mogelijk *en* acceptabel in 2040/2050. Bij biomassa geldt bijvoorbeeld dat het duurzaam moet zijn, bij wind en zon dat er ruimte moet zijn, windmolens mogen niet te dicht bij bebouwing staan, bij geothermie speelt ook nabijheid van afnemers een rol, etc.
- **Dynamisch realistisch potentieel:** het realistisch potentieel gecorrigeerd voor de stand der techniek: voor jaar n gecorrigeerd voor technische parameters voor jaar n . Bijv. het beschikbare oppervlakte voor wind op land blijft hetzelfde, maar de technisch haalbare vollasturen zijn jaarspecifiek.

⁴ Het model houdt er dus rekening mee als een bepaald type hernieuwbare energie alleen in aanmerking komt voor een bepaald soort beleid, of - bijvoorbeeld in de SDE+(+) - voor een bepaald maximaal vergoedingsniveau. In andere landen gelden vaak andere, soms meer generieke beleidsinstrumenten, zoals een afnameverplichting met een bijbehorende evenwichtsprijs. Ook die vertaalt het model in een vraagprijs.

⁵ Vergoeding voor energie volgens marktprijs of vermeden kosten bij eigen gebruik

- **Nog beschikbaar dynamisch realistisch potentieel:** Dynamisch realistisch potentieel gecorrigeerd voor het potentieel dat al in gebruik is.
- **Jaarlijks realiseerbaar potentieel:** wat kan er, voor een bepaald jaar, nieuw in de vraag-aanbod curve komen. Hierbij spelen beperkingen in de groeisnelheid een rol.

Het *jaarlijks realiseerbaar potentieel* is het potentieel dat in het vraag-aanbod algoritme wordt gebruikt. Het is de maximale hoeveelheid die er in jaar n nieuw kan worden bijgebouwd. Deze nieuwbouw kan het model alleen daadwerkelijk realiseren als de vergoedingen vanuit de SDE+(+) voldoende zijn en voor zover er SDE+(+)-budget beschikbaar is.

Om het jaarlijks realiseerbaar potentieel te bepalen wordt gebruik gemaakt van het nog beschikbare dynamisch realistische potentieel en van twee hoofdmechanismes die de snelheid van de ingroei bepalen:

1. Pijplijn en slagingskans: Het model bepaalt – zowel voor de korte als de lange termijn – wat in de ‘pijplijn’ zit⁶ en bepaalt hoeveel van dit potentieel succesvol kan worden gerealiseerd. Dit wordt gedaan door een percentage te nemen van het resterende beschikbare dynamisch realistische potentieel. Dit percentage hangt mede af van de gemiddelde inkomsten die technieken in de voorbije jaren hebben gekregen, en het reflecteert dat ook investeerders daar niet allemaal op dezelfde manier op reageren. Dit percentage is een belangrijke kalibratieparameter: de instelling van deze parameter hangt mede af van de ijking van het model op de historische groei.
2. Volwassenheid van de keten: Hierbij is de gehele keten van belang: de productiecapaciteit voor bijvoorbeeld windturbines, omvang van de installatiesector, aantal jaren dat een techniek wordt gebruikt, enz. De volwassenheid en de aard van de techniek bepaalt de maximale groei van een techniek. Hierbij houdt het model ook rekening met ontwikkelingen elders in Europa: als in Nederland nog nauwelijks gebruik wordt gemaakt van een bepaalde techniek maar deze in andere landen in Europa al grootschalig wordt ingezet, kan hij in Nederland daardoor ook relatief snel groeien. Bij dit mechanisme geldt: hoe meer er al staat, des te sneller kan het groeien. Dit mechanisme laat dan ook een exponentieel gedrag zien.

De twee mechanismes zorgen er voor dat model geen binair, abrupt gedrag vertoont als dat ook in werkelijkheid niet te verwachten is. Het model kijkt welke van de twee mechanismes snelheidsbeperkend is. Vaak is de volwassenheid van de keten in de eerste jaren dat een techniek op de markt is de snelheidsbepalende factor, maar worden het potentieel dat in de pijplijn zit en de slagingskans de beperkende factoren als een techniek eenmaal wat grootschaliger wordt ingezet. Omdat over het algemeen bij een volwassen techniek een steeds kleiner deel van het potentieel beschikbaar blijft, neemt de groeisnelheid op een gegeven moment weer af. Uitgedrukt over een reeks jaren vertaalt dat zich in een groeicurve die de vorm van een ‘S’ heeft (een S-curve).

Naast deze twee mechanismes is er nog een derde mogelijkheid waarmee de voorgaande mechanismes buiten spel worden gezet: de gebruiker van het model kan een bepaalde maximale groei er voor een bepaald jaar ook handmatig in zetten. De reden om dit incidenteel toe te passen is dat bepaalde technieken abrupt kunnen groeien, zoals biomassameestook. Dit soort gedrag is moeilijk te reproduceren met het model.

⁶ Bijvoorbeeld verkenningen voor nieuwe projecten en projecten in voorbereiding.

1.4 Wat komt er uit?

De belangrijkste output die resulteert uit de match tussen vraag en aanbod is de additionele nettoproductie (in GWh output). Daarnaast zijn er allerlei bijproducten en tussenresultaten die het model genereert om tot die output te komen: bij een techniek-band-combinatie horen immers allerlei techno-economische data, er is beleid, en er worden prijzen gebruikt voor de marktprijs van de opgewekte energie. Combinatie van de netto energieproductie met inputparameters geeft de volgende output:

- Totale productie per energiedrager;
- Totale capaciteit;
- Bruto eindverbruik hernieuwbare energie⁷;
- Benodigde biomassa input, per type biomassa;
- Totale uitgaven aan investeringen;
- Totale uitgaven aan O&M;
- Totale uitgaven aan biomassa;
- Hoeveelheid additionele input (bijv. elektriciteit);
- Totale SDE+(+)-budgetbeslag;
- Totale subsidie-uitgaven aan MEP, SDE en SDE+(+) (kasuitgaven).

1.5 Belangrijkste invoergegevens

De volgende parameters hebben de meeste invloed op de uitkomsten van het model:

- De potentiëlen van de technieken;
- Historische realisatie;
- Parameters die de onrendabele top van een techniek bepalen;
- Parameters die de groeisnelheid bepalen;
- Beleid dat de onrendabele top dekt, en de mate waarin beleid dat doet;
- Openstellingsruimte van de SDE+(+) (jaarlijks budget);
- ODE reeks: door het Ministerie van EZK verwachte toekomstige opbrengsten uit de ODE.

1.6 Beperkingen en verdere ontwikkeling

Zoals alle modellen heeft ook RESolve-E beperkingen. Zo is er logischerwijs een beperkte verfijning in de opsplitsing van technieken in techniek-banden, in het aantal typen biomassa en in geografisch detail⁸. Beperkingen zijn er ook in de manier waarop de variatie binnen een bepaalde categorie wordt gerepresenteerd: per type biomassa is er één prijs, per techniek-band is er één financieel rendement en één referentieprij van het energieproduct. De ingroeibeperking houdt overigens wel rekening met de variatie binnen een categorie, bijvoorbeeld bij het gedrag van investeerders.

Het model heeft geen directe relatie met sectoren. Voor een aantal techniek-band combinatie is er wel een 1 op 1 relatie met een sector. Zo kan mestvergisting voor 100% worden toegekend aan de landbouwsector. Er zijn echter ook techniek-band combinaties die aan meerdere sectoren kunnen worden toegekend, zoals bijvoorbeeld middelgrote houtpelletketels.

⁷ Dit is ook waar de Europese doelstelling voor het percentage hernieuwbaar betrekking op heeft. Hiervoor geldt een specifieke definitie die door Europa is vastgesteld (RED, 2009).

⁸ Het model onderscheidt bijvoorbeeld 6 subcategorieën voor wind op land op basis van de gemiddelde, gebiedsafhankelijke windsnelheid.

Het model is verder aanbodgedreven, en gaat er standaard vanuit dat er voor de hernieuwbare productie die uit het model komt altijd een vraag is. Als dat niet het geval is moet de gebruiker van het model daar rekening mee houden. De onzekerheidsbandbreedte die in de KEV vastgesteld wordt houdt overigens wel rekening met de beperkingen die het model heeft en de onzekerheid in de resultaten die daaruit voorkomt.

Vanwege de laatste twee beperkingen - in het klimaatakkoord wordt gestuurd op sectorale CO₂ reducties en hernieuwbare energie wordt steeds groter - is er eind 2019 besloten om het RESolve-E model uit te faseren. In 2020 zullen hernieuwbare energietechnieken in de industrie en landbouw naar SAVE-Productie worden overgeheveld. In 2021 zullen grootschalige hernieuwbare elektriciteitstechnieken worden overgeheveld naar het elektriciteitsmarktmodel COMPETES en hernieuwbare technieken in de gebouwde omgeving naar SAVE-Services en SAWEC.

Voor 2020 zijn daarom alleen nog de techno-economische parameters voor de SDE++ 2020 aangepast voor technieken die in 2020 nog door RESolve-E zijn doorgerekend, en zijn er geen structurele verbeteringen aan het model doorgevoerd.

Technische modelsamenenvatting

Een compact overzicht van de karakteristieken van het RESolve-E model is weergegeven in Tabel 2.

Tabel 2: Overzicht van de karakteristieken van het RESolve-E model

Item	Omschrijving
Wat doet het model? En wat zijn de toepassingen?	Het model geeft een projectie van bijna alle hernieuwbare energiecategorieën in Nederland. Potentiële, maximale groeisnelheid, techniekkosten en subsidies zijn hierbij belangrijk. Het model wordt elk jaar in de KEV/ NEV gebruikt en is in het verleden ook in verschillende Europese projecten gebruikt.
Functie en opbouw Type model: Doel: Geografische scope: Temporele scope: Bouwstenen: Top-down of bottom-up?:	Simulatie Projectie van hernieuwbare energie In principe alle lidstaten van de EU28, Nederland in het bijzonder 2002 – 2050, met stappen van een jaar Technieken en sectoren, beleidsinstrumenten Bottom-up
Hoe werkt het model? Input: Basisprincipes: Output:	Kosten van hernieuwbare technieken, potentiële, historische realisatie van technieken en beleid Vraag en aanbod en een jaargangenbenadering Productie en capaciteit van hernieuwbare technieken, SDE+ (+) budgetbeslag en jaarlijkse subsidie-uitgaven.
Toepassingen	Europese projecten m.b.t. wind op zee en biomassa. Nationaal: de NEV/KEV en ondersteuning bij andere projecten, zoals de analyse van de SDE+ door de Algemene Rekenkamer en de doorrekening klimaatakkoord 2019.
Beperkingen	Beperkte verfijning in uitsplitsing in techniek-banden, representatie actoren, aantal typen biomassa en sectoren. Aanbodgedreven model.
Gebruik met andere modellen	Het model communiceert in het NEV project via de database van het NEV-RekenSysteem. Het model heeft met name interactie met het COMPETES model.
Beschikbaarheid model en/of data	Het model is geschreven in AIMMS en niet open source. De database is ook niet open source.
Rapporten met eerdere toepassingen	Uytterlinde (2003) Uytterlinde (2007) Cameron, van Stralen en Veum (2011) Uslu (2012) Van Stralen, Uslu and Panoutsou (2016) Verdonk en Wetzels (2012) ECN/PBL/CBS (2014, 2015, 2016, 2017)

Item	Omschrijving
	PBL/CBS/ECN-TNO (2019, 2020)
Belangrijkste bronnen in de wetenschappelijke literatuur	Voogt (2001) Daniëls en Uytterlinde (2005) Van Stralen (2013) Huber (2006)

Uitgebreide modelbeschrijving

3.1 Functie en opbouw

3.1.1 Werkingsprincipes

RESolve-E is een simulatiemodel dat gebruik maakt van het principe van vraag en aanbod. Het aanbod is hierbij de potentiële productie van hernieuwbare energie tegen bepaalde kosten. De vraag is hierbij een door overheidsbeleid georganiseerde vergoeding voor een al dan niet expliciet gelimiteerde hoeveelheid hernieuwbare energie, of -als een hernieuwbare energie techniek rendabel is zonder beleid- een ongelimiteerde vraag tegen marktprijzen.

3.1.2 Geografische scope, ruimtelijk detail

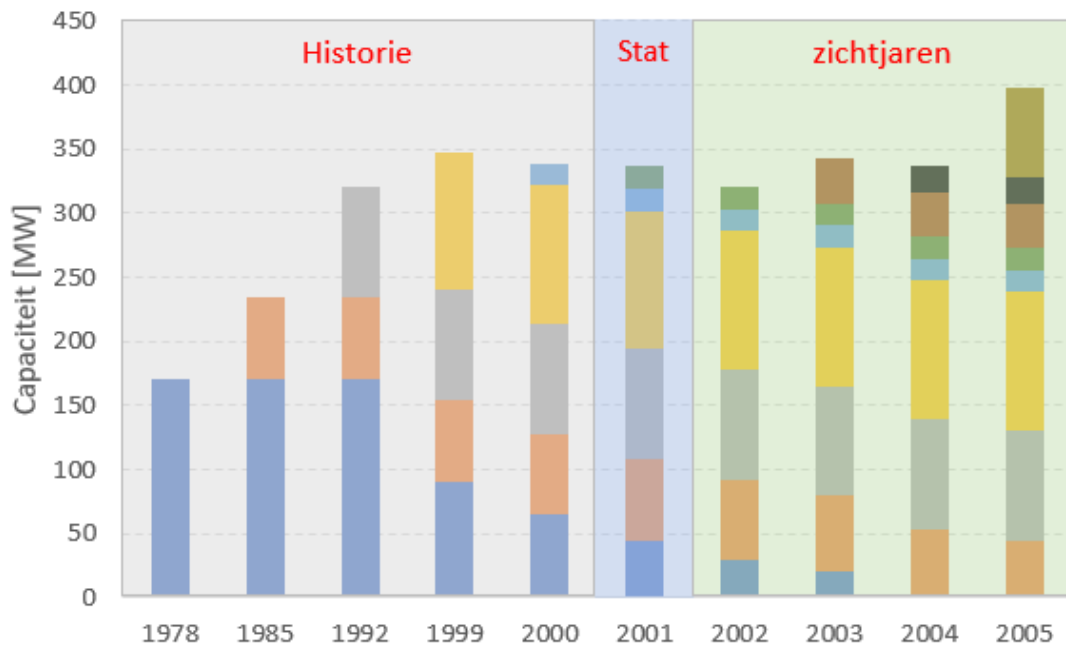
Het model kan van alle individuele lidstaten van de Europese Unie een projectie maken van de hernieuwbare elektriciteitsproductie, en van Nederland ook van andere vormen van hernieuwbare energie. Het geografische detailniveau is dat van landen. Provincies of regio's worden niet onderscheiden. Omdat technieken onderverdeeld kunnen worden in banden, leent de structuur van het model er zich wel voor om eventueel regio's binnen een land te onderscheiden. "Banden" bieden namelijk de mogelijkheid om binnen een techniek verder te differentieren naar bijvoorbeeld locatie, biomassatype, etc. In het geval van bijv. windenergie in Nederland is het bijvoorbeeld mogelijk om elke provincie een eigen band geven, of op een andere manier regionaal te differentieren.

3.1.3 Temporele scope, statisch/dynamisch, temporeel detail

De simulatie begint vanaf het jaar 2002. Daarbij wordt gebruikt gemaakt van een jaargangenbenadering. Dit betekent dat het model bijhoudt in welk jaar capaciteit is geïnstalleerd en in welk jaar het weer uit productie wordt genomen. De jaargangenmethodiek in RESolve-E is geïllustreerd in Figuur 2. De simulatie begint al vanaf het jaar 2002 omdat zo het moment waarop bestaande capaciteit uit productie gaat beter kan worden gemodelleerd.

Het model begint vanaf 2002 niet blanco, maar bevat voor dat jaar productiecapaciteit met een bepaalde leeftijdsopbouw. De jaargangenbenadering heeft namelijk een startpunt nodig waarvoor van alle capaciteit het bouwjaar bekend is. Voor de periode vóór 2002 ontbreken echter vaak feitelijke gegevens over bouwjaren. Daarom maakt het model eerst een reconstructie van de leeftijdsopbouw van het opgestelde vermogen: de 'history-generator'. Als input wordt gebruikt gemaakt van de statistiek voor het jaar 2001. Van elke techniek-band wordt vanuit statische gegevens voor het jaar 2001 bepaald hoeveel opgesteld vermogen er in dat jaar was. Zo is er voor wind op land, band 5 bepaald hoeveel capaciteit er in 2001 was opgesteld aan de hand van de capaciteit per provincie in 2001. Vervolgens is met behulp van een veronderstelde verdeling bepaald welk deel van de capaciteit komt uit respectievelijk 1978, 1985, 1992, 1999, 2000 en 2001; het model hanteert hierbij dus een grovere tijdsresolutie dan voor de toekomst. Zo valt te zien in Figuur 2 dat de capaciteit in 2001 is opgebouwd uit capaciteiten van al deze jaren. Als we nu kijken naar de capaciteit die volgens deze methode is geïnstalleerd in 1978, dan zien we dat deze nog volledig aanwezig is in 1985 en 1992 (de blauwe balken). Voor wind op land wordt er namelijk vanuit gegaan dat de

technische levensduur gemiddeld 20 jaar is. In de jaargangenbenadering wordt echter van een normaalverdeling van levensduren uitgegaan, sommige windmolens worden dus al eerder afgedankt, andere later. De maximale spreiding is +/- 5 jaar. Vandaar dat de capaciteit van constructiejaar 1978 niet in 1999 abrupt naar nul gaat, maar in de periode tot 2004 geleidelijk naar nul gaat. In 2003 is een laatste fractie van constructiejaar 1978 nog in bedrijf, vanaf 2004 is alles uit bedrijf. In het geval van wind op land betekent dat de ruimte van windturbines die uit bedrijf zijn genomen weer beschikbaar is voor nieuwe windturbines.



Figuur 1: Illustratie van de jaargangen aanpak in RESolve-E voor wind op land, band 5. 1978-2000 zijn historische jaren. 2001, 'Stat', is het jaar waarvoor data uit de statistiek zijn gebruikt. 2002 en verder zijn zichtjaren. De kleur hangt af van wanneer een bepaalde capaciteit is gebouwd.

3.1.4 Bouwstenen, ingrediënten, structuur

Het perspectief dat RESolve-E gebruikt is dat van een investeerder of projectontwikkelaar: is het interessant om hernieuwbare capaciteit te installeren (en in productie te houden)? Wie deze actor is, verschilt per techniek-band. In het geval van mestvergisting is dit meestal een boer, in het geval van zon-PV bij de huishoudens een consument, en in het geval van een wind op zee park is dit niet precies duidelijk: het kan een consortium zijn, een investeringsmaatschappij of een groot energiebedrijf. Voor RESolve-E maakt dit in principe niet uit. Wel is het zo dat de financiële parameters (bijv. aandeel vreemd vermogen, rendementseisen) sectorspecifiek kunnen zijn.

Zoals eerder genoemd hebben technieken een extra index: banden. De betekenis van banden verschilt per techniek. Bij sommige technieken is er een expliciete 1-op-1 relatie van een band met een sector, maar bij biomassa heeft een band betrekking op een type biomassa. In Tabel 3 staan alle technieken die in RESolve-E worden gebruikt met de betekenis van de banden.

Tabel 3: Overzicht van in RESolve-E gebruikte technieken, het aantal banden per techniek en de betekenis van banden per techniek.

Techniek	Aantal banden	Betekenis banden
Biomassa ketel ≥ 5 MWth	3	Type biomassa
Biomassa ketel ≥ 5 MWth voor warmtenet	2	Type biomassa
Biomassa ketel 0,5 – 5 MWth	5	Type biomassa
Biomassa ketel 100 – 500 kWth	4	Type biomassa
Biomassa ketel 50 – 100 kWth	4	Type biomassa
Biomassa ketel voor bio-gas	8	Type biomassa
Biomassa WKK, met laag aandeel warmte	5	Type biomassa
Biomassa WKK 10 – 100 MW	3	Type biomassa
Biomassa WKK ≤ 10 MW	2	Type biomassa
Biomassa meestook in kolencentrales	4	Type biomassa
Biomassa verbranding voor enkel elektriciteit	7	Type biomassa
Biomass vergisting WKK, met laag aandeel warmte	9	Type biomassa
Biomassa vergisting WKK	8	Type biomassa
Biomassa vergassing IGCC	1	Type biomassa
Biomassa vergassing SNG	2	Type biomassa
Groen gas uit vergisting	9	Type biomassa
Afvalverbrandingsinstallatie	1	De band slaat op gemengd huishoudelijk- en bedrijfsafval (type biomassa)
Geothermie	3	Een band is een sector
Zonthermie	1	Dienstensector, niet gespecificeerd per subsector
Waterkracht > 10 MW	1	Geen betekenis
Waterkracht < 10 MW	1	Geen betekenis
Osmose	1	Geen betekenis
Zon-PV	68	Indeling is gebaseerd op sector + oriëntatie + een gedragscomponent ⁹ + onderscheid groot- en kleinverbruiker. Voor huishoudens wordt er bovendien een onderscheid gemaakt tussen grote en kleine woningen.

⁹ Er wordt aangenomen dat er een normaalverdeling is voor het rendement op eigen vermogen (RoE). Deze continue normaalverdeling wordt echter in drieën gesplitst: de populatie tussen $-\sigma$ en $+\sigma$ neemt genoeg met een gemiddelde RoE, de populatie aan de linkerkant van $-\sigma$ neemt genoeg met een lage RoE en de populatie aan de rechterkant van $+\sigma$ neemt alleen genoeg met een hoge RoE.

Techniek	Aantal banden	Betekenis banden
Wind op Land	8	Verdeling naar windsnelheidscategorie en naar type locatie: op land, op dijk of in meer
Wind op Zee	19	In sommige gevallen aangewezen gebieden (bijv. Borssele) en in sommige gevallen generiek naar afstand tot de kust + waterdiepte + windsnelheidscategorie

De soorten energiedragers die hernieuwbare energietechnieken in RESolve-E kunnen produceren zijn elektriciteit, warmte en (groen) gas. Er zijn een paar technieken die elektriciteit nodig hebben om te kunnen functioneren: geothermie en groen gas¹⁰. RESolve-E kent een divers aanbod van biomassa als input voor verbranding, vergassing en vergisting. Ze zijn gegeven in Tabel 4. De bandnummers zijn de nummers zoals gebruikt in RESolve-E. Sommige bandnummers ontbreken, dit betreft typen biomassa waarvan het potentieel in Nederland nul is (bijvoorbeeld black liquor) of typen biomassa die momenteel niet meer in het model worden meegenomen (zoals getorreficeerde houtpellets).

Tabel 4: typen biomassa in RESolve-E die gebruikt worden in de Nederlandse context

Band nr	Type biomassa	In model toegestaan voor
1	Houtpellets	Verbranding en vergassing
2	Zaagsel	Verbranding
6	Snoeihout uit de fruitteelt	Verbranding
8	Dierlijke vetten	Verbranding
9	Palmolie	Verbranding
11	Gemengd huishoudelijk- en bedrijfsafval	Verbranding
12	Droge mest	Verbranding
13	Natte mest met co-substraat	Vergisting
14	Andere natte stromen uit de landbouw	Vergisting
15	Snijmais	Vergisting
16	Berm gras	Vergisting
17	Natte mest	Vergisting
18	Stortgas	Vergisting
19	Biogas uit rioolwaterzuiveringen	Vergisting
20	Natte stromen uit de voedings- en genotmiddelen industrie	Vergisting
21	GFT	Vergisting
22	Diermeel	Verbranding
23	Vaste agro-residuen (stro, enz.)	Verbranding
24	B-hout	Verbranding
25	Snoui- en dunningshout (chips)	Verbranding en vergassing
26	Houtblokken	Verbranding
27	Cacaodoppen en andere vaste stromen uit de agro-industrie	Verbranding

¹⁰ Elektriciteitsconsumptie leidt in dit geval tot additionele variabele kosten, welke jaarlijks kunnen veranderen afhankelijk van de jaargemiddelde elektriciteitsprijs.

De belangrijkste betekenis die het onderscheid in sectoren voor de resultaten van RESolve-E heeft is dat de prijs van energiedragers per sector kan verschillen (elektriciteit, warmte of gas) en de financieringsparameters. Voor zon-PV worden ook sectorale dak- en landoppervlaktes gebruikt om een sectoraal potentieel te bepalen.

De sectoren die direct in RESolve-E een betekenis hebben vanwege energieprijzen of potentieel zijn gegeven in Tabel 5. Dit is een subset van sectoren die in het NEV-RekenSysteem (NEV-RS) worden gebruikt. Hoe RESolve-E zijn resultaten omzet naar de sectorspecifieke data die het NEV-RS nodig heeft, is beschreven in sectie 3.6.

Tabel 5: sectoren die binnen RESolve-E een betekenis hebben

Sector
Energie
Handel en horeca
Overheid en onderwijs
Overige non-profit
Overige zakelijke dienstverlening
Huishoudens
Landbouw
Industrie groot
Industrie klein

3.2 Hoe werkt het model?

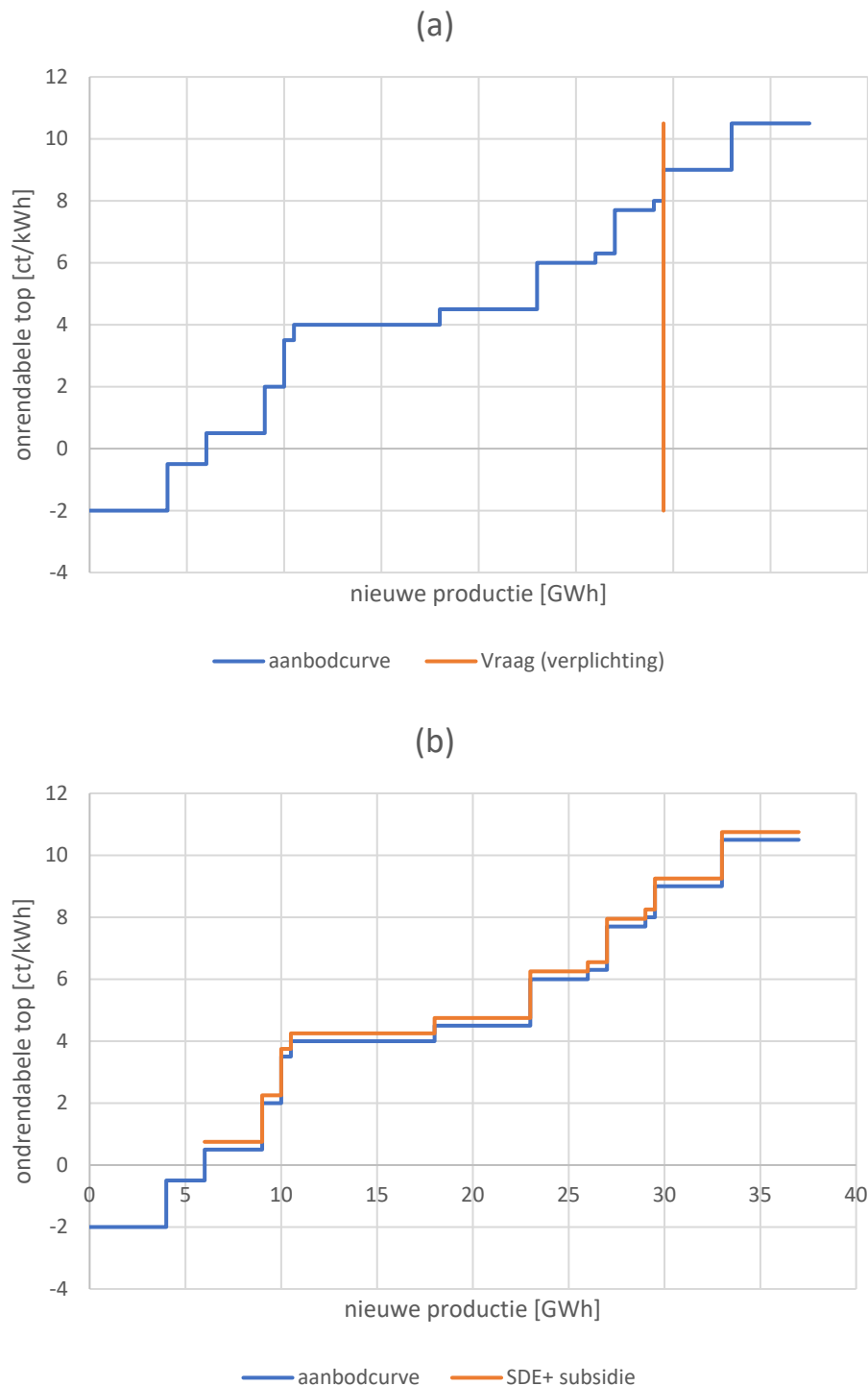
3.2.1 Wat gaat er in en hoe wordt het gebruikt?

Matching van vraag en aanbod

De kern van RESolve-E is de matching tussen vraag en aanbod. Het aanbod is hierbij de potentiële productie van hernieuwbare energie waarbij kostprijs de minimale vergoeding is waarvoor een investeerder wil investeren. Implicitiet in deze kostprijs zit een voor de investeerder acceptabel rendement op de investering. De vraag is hierbij een door overheidsbeleid georganiseerde vergoeding, of -als een hernieuwbare energie techniek rendabel is - een ongelimiteerde vraag tegen marktprijzen. Het model combineert vraag en aanbod door iedere techniek-band te koppelen aan het beleid waarvoor dat aanbod in aanmerking komt. In Figuur 3 zijn vraag en aanbod schematisch weergegeven.

De groei van technieken kan plaatsvinden wanneer er een match is tussen vraag en aanbod. Hiervoor is van belang dat kostprijs van een aanbodsegment lager of gelijk is aan de geboden vergoeding vanuit het vraagsegment, met andere woorden: de prijs die vraag/beleid biedt moet hoger zijn dan de kostprijs (inclusief rendement dat verlangd wordt) van de techniek. Merk op dat er binnen de SDE+ een begrenzing was van 13 ct/kWh. Voor bijv. osmotische energie geeft het SDE+ eindadvies 2019 aan dat 57,4 ct/kWh nodig is (Lensink, 2018). Voor osmotische energie kon de SDE+ daarom niet uit.

Een speciaal geval zijn rendabele technieken (de onrendabele top is negatief), deze kunnen vrij groeien zonder beleid.



Figuur 3: Voorbeelden van matching tussen vraag en aanbod. (a) is het geval van een verplichtingssysteem, waarbij de oranje verticale niveau de verplichting aangeeft. (b) is het geval van de SDE+(+).

Door de matching van vraag en aanbod is het met het RESolve-E model mogelijk om verschillende typen beleid door te rekenen. In Figuur 3 is de matching van vraag en aanbod voor twee typen beleid geïllustreerd: een verplichtingssysteem en het SDE+(+) systeem. In het geval van een verplichtingssysteem moet er een bepaalde hoeveelheid worden ingevuld (oranje verticale lijn) en de marginale optie bepaalt de marktprijs voor certificaten. In het geval van de SDE+(+) is er ook een matching van vraag en aanbod, maar moet deze matching minder als een markt worden gezien, vandaar dat de grafiek er ook niet uit ziet als een

klassiek vraag-aanbod figuur. Voor elke SDE+(+) categorie is er een (of potentieel meer) aanbod dat hieraan gekoppeld kan zijn. In termen van de SDE+(+) is het mogelijk enigszins verwarrend om over vraag en aanbod te praten. Omdat RESolve-E een wat generiekere aanpak heeft dan in principe alleen voor de SDE+(+) nodig is, worden de aanbod- en vraagcurven toch verder uitgelegd. In het vervolg van deze subsectie worden eerst de karakteristieken en de totstandkoming van de aanbodkant beschreven, gevolgd door de vraagkant.

Aanbodkant

Figuur 3 laat zien dat de aanbodcurve is opgebouwd uit segmenten (een vlak stuk in de curve). Voor deze gesegmenteerde aanbodcurve zijn drie aspecten relevant:

1. Het detailniveau oftewel het aantal segmenten;
2. De hoogte van de segmenten;
3. De breedte van de segmenten.

Elk van deze afzonderlijke aspecten wordt hieronder behandeld.

Detailniveau van de aanbodkant

Zoals in sectie 3.1 is beschreven, zijn technieken onderverdeeld in banden. Elke techniek-band combinatie vormt een uniek segment in de aanbodcurve, het detailniveau van de aanbodcurve wordt dus ook bepaald door het aantal techniek-band combinaties. Een overzicht van technieken en banden is te vinden in sectie 3.1.4, Tabel 3.

Hoogte van de segmenten: kosten

De hoogte van een segment (de verticale positie), wordt bepaald door de kosten van een techniek per geproduceerde eenheid energie. In het model wordt in de aanbodcurve gewerkt met de onrendabele top: wat is er extra nodig, bovenop de marktwaaarde van de geproduceerde energie, om de techniek financieel rendabel te laten zijn. De onrendabele top wordt uitgerekend met behulp van een cash-flow berekening. De onrendabele top is gegeven in onderstaande vergelijking, en in meer detail beschreven in de Noord en van Sambeek (2003).

$$OT = \frac{E \cdot (C_0 - IP_0) - \sum_{t=1}^n \frac{(1-\tau)(Q_t(WE_t - VK_t) - FK_t) + \tau(DEP_t + R_t) - A}{(1+r_e)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{Q_t(1-\tau)}{(1+r_e)^t}} \quad (1)$$

Met:

OT:	Onrendabele top [ct/kWh]
E:	Aandeel eigen vermogen in de investering [%]
C ₀	Investeringsbedrag [€/kW]
IP ₀	Investeringssubsidie [%]
n	Levensduur van een project of de beleidsduur van een project [jr]
t	Bedrijfsjaar 0 < t ≤ n
τ	Vennootschapsbelasting [%]
Q _t	Energieproductie in jaar t [kWh]
WE _t	Marktwaaarde van de energieproductie per eenheid in jaar t [ct/kWh]
VK _t	Variabele kosten in jaar t [ct/kWh]
FK _t	Vaste kosten in jaar t [€/kW]
DEP _t	Afschrijving in jaar t [€]
R _t	Rentebetalingen in jaar t [€]
A	Annuïteit van de lening [€]
r _e	Vereiste rendement op eigen vermogen [%]

In RESolve-E wordt er niet vanuit gegaan dat de investeerder perfect foresight over prijzen heeft. De investeerder in RESolve-E baseert zijn beslissing dus op de actuele prijzen, die gecorrigeerd zijn voor inflatie. Dit betekent dat:

$$WE_t = WE_{t=0} \cdot Inf(t = 0, t) \quad (2)$$

De marktwaarde die voor de energie wordt gebruikt in de onrendabele top berekening is de waarde uit jaar t=0 gecorrigeerd voor inflatie, $Inf(t=0,1)$. Jaar t=0 is hierbij het jaar van SDE(+) aanvraag. Voor VK_t en FK_t geldt hetzelfde. Een nadeel van het toepassen van perfect foresight in de OT formule zou zijn dat de OT van een historisch jaar dan afhankelijk wordt van een jaar dat nog in de toekomst ligt. Hierdoor kunnen de resultaten van historische jaren veranderen bij verandering van toekomstige energieprijzen. Dit maakt de kalibratie van het model aan statistiek minder zinvol. Ook is het gebruik van actuele prijzen realistischer.

De afleiding van vergelijking 1 kan gevonden worden in de Noord en van Sambeek (2003). In Tabel 6 staan alle parameters weergegeven die nodig zijn om de onrendabele top berekening te kunnen doen. Parameters waarbij 'specifiek' staat zijn niet voor alle technieken van toepassing.

Tabel 6: Benodigde parameters om de onrendabele top uit te rekenen.

Technische parameters	Generiek	Vollasturen
		Economische levensduur
	Specifiek	Vollasturen elektriciteit, vollasturen warmte (voor WKK)
		Energetische rendementen voor elektriciteits- en/of warmteproductie
		Additionele elektriciteitsvraag
		Rendement gaszuivering (voor groen gas)
Kosten	Generiek	Investeringskosten
		O&M kosten (vast en/of variabel)
	Specifiek	Contractkosten energielevering
		Elektriciteitskosten
Opbrengsten		Kosten van biomassa
	Generiek	Marktwaarde van het product
	Specifiek	Correctie op de marktwaarde. Bijv. onbalans- en profielcorrecties voor wind op land
Financieringsparameters		Aandeel eigen vermogen in investering
		Rente lening (vreemd vermogen)
		Vereiste rendement op eigen vermogen
		Vennootschapsbelasting
		Inflatie
		Termijn van de lening

	Afschrijvingstermijn
	Levensduur of beleidsduur van een project

Breedte van de segmenten: potentiëlen en groeisnelheid

Technieken kunnen niet ongelimiteerd groeien maar zijn begrensd door potentiëlen.

Het is relevant om een onderscheid te maken in de volgende typen potentiëlen:

- **Realistisch potentieel:** wat is er maximaal mogelijk *en* acceptabel in 2040/2050
- **Dynamisch realistisch potentieel:** hetzelfde als het realistisch potentieel, maar dan voor jaar n gecorrigeerd voor technische parameters voor jaar n . Bijv. het oppervlakte voor wind op land is het zelfde, echter de technisch haalbare vollasturen zijn jaar-specifiek.
- **Nog beschikbare dynamisch realistische potentieel:** Dynamisch realistisch potentieel gecorrigeerd voor het potentieel dat al in gebruik is.
- **Jaarlijks realiseerbaar potentieel:** wat kan er nieuw, voor een bepaald jaar, in de vraag-aanbod curve komen

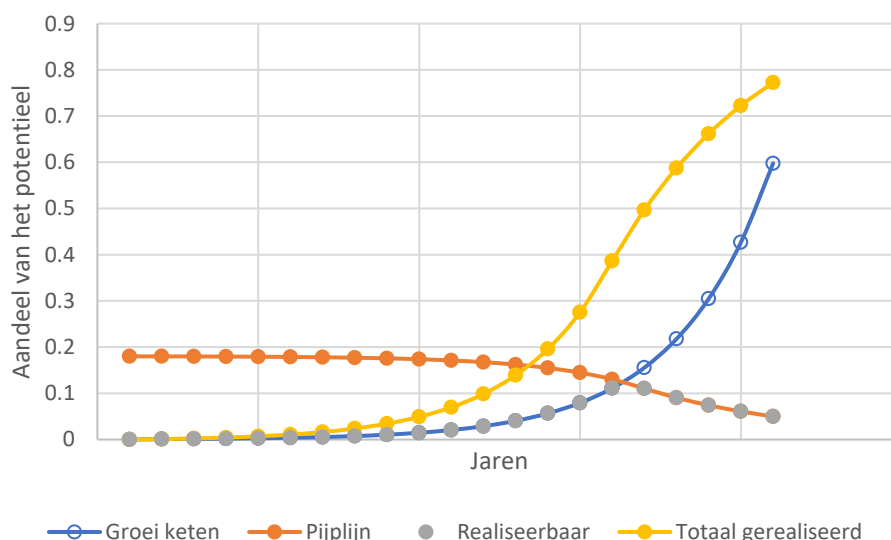
Het jaarlijks realiseerbaar potentieel voor een techniek-band segment is het potentieel dat in de vraag-aanbod procedure wordt gebruikt. Het kan geïnterpreteerd worden als de maximale hoeveelheid die er in jaar n nieuw bij kan komen. Opgemerkt dient te worden dat dit in het model niet daadwerkelijk gerealiseerd hoeft te worden. Het kan best zijn dat de vergoeding vanuit de SDE+(+) niet voldoende is of dat bijvoorbeeld het totale budget voor de SDE+(+) een beperkende factor is.

Het realistisch potentieel is een combinatie van het technisch en maatschappelijk haalbare potentieel. Een voorbeeld hiervoor is wind op land: het technisch potentieel is in Nederland groot, het potentieel wordt meer beperkt door het maatschappelijk draagvlak. Het realistisch potentieel is datgene wat exogeen in het model gaat en dient als startpunt om het jaarlijks realiseerbaar potentieel te bepalen.

Hoe wordt het jaarlijks realiseerbare potentieel bepaald? Ten eerste wordt het nog beschikbare dynamisch realistische potentieel bepaald. Er wordt dus rekening gehouden met het potentieel dat al in gebruik is. Vervolgens wordt bepaald hoe snel dit beschikbare dynamisch realistische potentieel ontsloten kan worden. Modelmatig wordt er hiervoor naar twee groei-beperkende mechanismes gekeken:

1. Pijplijn en slagingskans: Er wordt een potentieel bepaald dat in de pijplijn zit en vervolgens wordt bepaald hoeveel er succesvol doorheen kan komen. Niet het volledige potentieel wordt namelijk serieus door ontwikkelaars bekeken, maar een gedeelte. Voor dit mechanisme geldt: des te meer er al van het potentieel is gebruikt, des te minder kan er gerealiseerd worden.
2. Volwassenheid van de keten: Er wordt gekeken naar de groei van de gehele keten: de productiecapaciteit voor windturbines, de installatiesector, enz. De groei wordt bepaald door de volwassenheid en de aard van de techniek. Naast de ontwikkelingen in Nederland, wordt er ook rekening gehouden met de ontwikkeling in Europa. Als in Nederland nog nauwelijks gebruik wordt gemaakt van een bepaalde techniek, maar in andere landen in Europa al grootschalig wordt ingezet, kan het in Nederland daarvoor ook relatief snel groeien. Bij dit mechanisme geldt: des te meer er al staat, des te sneller kan het groeien. Dit mechanisme laat dan ook een exponentieel gedrag zien.

Voor beide mechanismes geldt dat ze niet gevat zijn in een enkele formule, maar gevat zijn in een reeks van stappen. Het model kijkt welke van de twee mechanismes snelheidsbepalend is. Vaak is de volwassenheid van de keten in de eerste jaren de snelheidsbepalende factor, als een techniek eenmaal wat grootschaliger wordt ingezet is echter het potentieel dat in de pijplijn zit en de slagingskans de beperkende factor. Als eenmaal een significant deel van het potentieel is uitgeput treedt verzadiging (de curve vlakt af). Uitgedrukt over een reeks jaren vertaalt dat zich in een groeicurve die meestal de vorm van een 'S' heeft (een S-curve), dit effect is geïllustreerd in Figuur 4.



Figuur 4 Illustratie van de verandering van realiseerbaar potentieel door middel van twee hoofmechanismes die het realiseerbaar potentieel bepalen (groeï keten en pijplijn). Totaal gerealiseerd is het werkelijk gerealiseerde potentieel (exclusief effect realisatietijd)

Soms kan een techniek wel abrupt met grote hoeveelheden tegelijk in productie gaan. Een voorbeeld hiervan is meestook van biomassa in elektriciteitscentrales. De ingroei van biomassameestook heeft geen geleidelijk oplopend karakter, maar verloopt meer sprongsgewijs. Daarom is er nog een derde mogelijkheid om de groei van technieken te maximaliseren. De gebruiker kan een bepaalde maximale groei voor een bepaald jaar ook handmatig invoeren, omdat abrupte ingroei verder moeilijk te modelleren is. Zo zal er door de tijdelijke openstelling van biomassameestook die gekoppeld is met een plafond zoals vastgelegd in het Energieakkoord, een tijdelijke abrupte ingroei van biomassameestook zijn. Dit is veel accurater handmatig in de projectie te krijgen dan via de twee mechanismes die boven zijn beschreven, omdat die twee mechanismes bij meestook geen rol van betekenis spelen.

Vraagkant

Voor de vraagkant zijn dezelfde drie aspecten relevant als voor de aanbodkant: detailniveau, de breedte van de segmenten en de hoogte van de segmenten. Als technieken nog niet rendabel zijn o.b.v. marktprijzen, moet vraag vanuit het beleid komen. In het geval van hernieuwbare energie in Nederland is de SDE++ hierbij momenteel het belangrijkste instrument, en daarvoor de SDE+. Hoewel binnen de NEV en KEV ook ander hernieuwbaar beleid dan de SDE+(+) wordt meegenomen, beperken we ons hieronder in de voorbeelden tot de SDE+(+).

Het detailniveau van het beleid wordt bepaald door het aantal SDE+(+) categorieën. De mate van detail van het beleid kan voor het model niet groter zijn dan die van de techniekband combinaties in de aanbodcurve. Het kan natuurlijk ook zo zijn dat er meerdere banden

van een techniek onder een vraagsegment vallen. Denk bijvoorbeeld aan meerdere wind-op-zee banden die vallen onder een wind-op-zee tender.

De hoogte (verticale positie) van een segment wordt bepaald door de hoogte van het basisbedrag van de SDE+(+) categorie. Net als bij de aanbodcurve wordt deze uitgedrukt in het model als een onrendabele top (maar dan de vergoeding).

De breedte van een vraagsegment kan bepaald worden door het beleid, maar dat hoeft niet (denk aan de MEP regeling, dat was een open einde regeling). Als de breedte van het vraagsegment niet door het beleid wordt beperkt, wordt deze bepaald door het maximale corresponderende aanbod uit de aanbodcurve. Binnen de SDE (de voorloper van de SDE+) werd de breedte van een segment op categorieniveau beperkt. Binnen de SDE+(+) is er een overkoepelend budget dat er voor kan zorgen dat relatief dure technieken helemaal niet meer aan bod komen.

3.2.2 Wat komt er uit?

De hoofdoutput die resulteert uit de matching van vraag en aanbod is de additionele netto-productie (in GWh output). Doordat er bij een techniek-band echter allerlei techno-economische data horen, er beleid is, en er prijzen gebruikt worden voor de marktprijs van het product, kan allerlei additionele output gegenereerd worden (per techniek-band):

- Totale productie per energiedrager;
- De totale capaciteit;
- Het bruto eindverbruik;
- Benodigde biomassa input, per type biomassa;
- Totale uitgaven aan investeringen;
- Totale uitgaven aan O&M;
- Totale uitgaven aan biomassa;
- Additionele hulpproducten als input (bijv. elektriciteit);
- Totale beslag op SDE+(+) budget;
- Totale kasuitgaven voor MEP, SDE en SDE+(+).

Berekening bruto eindgebruik

Een belangrijke indicator voor het Nederlandse energiesysteem is het aandeel hernieuwbaar volgens de methode zoals beschreven in de renewable energy directive (RED, 2009). Het aandeel hernieuwbare energie wordt als volgt berekend:

$$\text{Aandeel hernieuwbare energie} = \frac{\text{Totaal eindverbruik hernieuwbare energie}}{\text{Totaal bruto energetisch eindverbruik}} \quad (3)$$

Aangezien RESolve-E niet alle hernieuwbare energie van het Nederlandse energiesysteem beschrijft en de noemer niet kent, kan met alleen RESolve-E niet het aandeel hernieuwbare energie uitgerekend worden. Alleen voor de technieken die RESolve-E wel beschrijft kan het bruto eindverbruik berekend worden. Om deze berekening te doen wordt gebruik gemaakt van het protocol monitoring hernieuwbare energie (RVO, 2015). Het bruto eindverbruik hernieuwbare energie wordt in de post-processing fase van het model berekend.

3.3 Toepassingen

De laatste toepassing van RESolve-E binnen de Europese context was in het Biomass Policies project (van Stralen, 2016). In dit project is het model voor 11 EU landen gebruikt en enkel voor die 11 EU landen is het beleid up-to-date gemaakt en doorgetrokken naar de toekomst. Na dit project is het beleid voor andere landen dan Nederland niet meer aangepast. Updaten en aanpassen van het model binnen de Europese context is zeer tijdrovend en alleen haalbaar als er een concreet Europees project is waarin het model gebruikt kan worden.

Als concrete toepassing wordt daarom hier verder alleen het gebruik van RESolve-E voor Nederlandse projecten –met name de KEV – beschreven.

Algemeen gebruik binnen de KEV

Binnen de KEV is de belangrijkste toepassing van RESolve-E om de ontwikkeling te beschrijven van (het grootste deel van) de te verwachten hoeveelheid hernieuwbare energie. Dat is een belangrijke bouwsteen om te kunnen vaststellen of een aantal belangrijke doelen kon of kan worden gehaald. Dat zijn:

- Het doel van 14% hernieuwbare energie in 2020 dat is afgesproken binnen de Europese Unie (EC, 2009) en binnen het Energieakkoord uit 2013 (SER, 2013).
- Het doel van 16% hernieuwbare energie in 2023 uit het Energieakkoord 2013.
- 6000 MW geïnstalleerd vermogen wind-op-land in 2020 uit het Energieakkoord 2013.

Hierbij gelden de volgende randvoorwaarden:

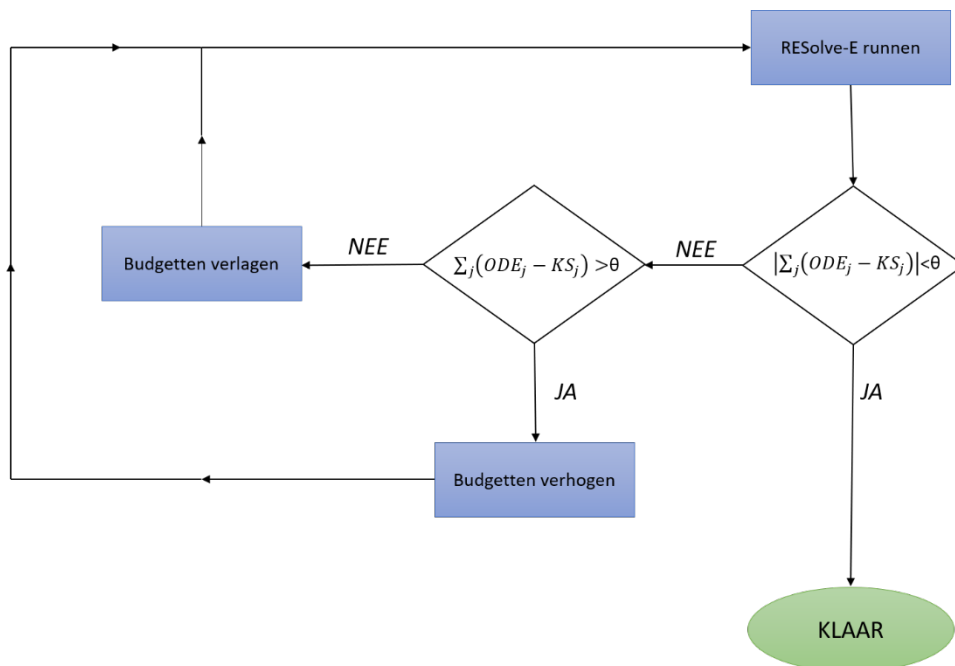
- Maximaal 25 PJ bruto energetisch eindverbruik (elektriciteit) voor meestoken van biomassa in kolencentrales (SER, 2013);
- Jaarlijkse SDE+(+) budgetplafonds voor historische jaren en - voor zover deze door EZK zijn aangegeven - voor toekomstige jaren;
- De kasuitgaven dienen, gesommeerd over de jaren waarvoor de ODE reeks¹¹ is gegeven, in balans te zijn met de ODE-reeks van EZK. In andere woorden: uiteindelijk moeten de (kas)uitgaven in balans zijn met de inkomsten (ODE).

Voor toekomstige jaren is de meest recente SDE+(+) regeling leidend, tenzij er vanuit het vastgestelde of voorgenomen beleid vanuit de KEV beleidswijzigingen bekend zijn. Een voorbeeld van het leidend zijn van de laatste SDE+(+) is bijvoorbeeld het stimuleren van mest-covergisting. In de SDE+ 2018, en de jaren daarvoor, waren er altijd specifieke basisbedragen voor mest-covergisting. In de SDE+ 2019 zijn deze specifieke basisbedragen verdwenen. Er wordt in dat geval vanuit gegaan dat ook in de SDE++ rondes na 2019 er geen specifiek basisbedrag meer is voor mest-covergisting.

Over het algemeen zijn er in de KEV twee rekenrondes, waarbij tussen de twee rekenrondes kritisch naar de resultaten gekeken wordt en daar waar nodig aanpassingen in rekenronde 2 kunnen worden doorgevoerd. Binnen een rekenronde wordt het RESolve in drie iteraties gedraaid, waarbij *na* RESolve-E achtereenvolgens het SAVE-Productie (industrie en landbouw) en het COMPETES (elektriciteitsmarkt) model worden gedraaid. Vóór of gedurende de eerste iteratie wordt het model gekalibreerd, zie sectie 3.4. Als het model voldoende is gekalibreerd wordt het meerdere keren gerund totdat de ODE en kasuitgaven in balans zijn. De modelgebruiker kan de kasuitgaven in balans brengen met de ODE-reeks door de budgetplafonds in de toekomst aan te passen¹², zie de flowchart in Figuur 5. De ODE-reeks is in dit proces een exogene input voor RESolve-E en de kasuitgaven een output van RESolve-E.

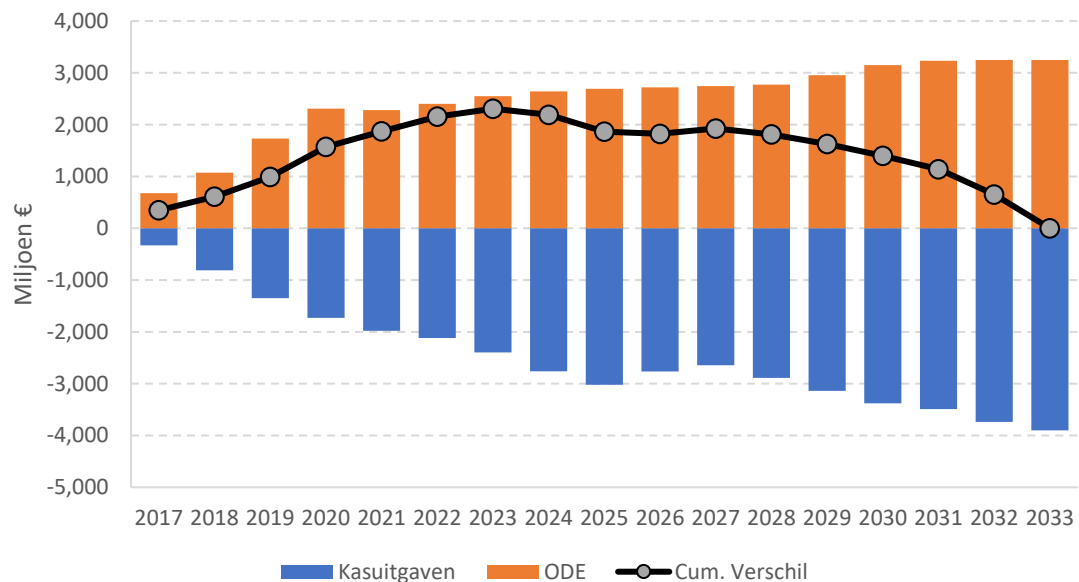
¹¹ De ODE-reeks uit het huidige regeerakkoord loopt door t/m 2033. In de KEV is de reeks t/m 2030 gebruikt.

¹² Specifieker: vanaf de jaren waarvoor EZK het budgetplafond nog niet heeft vastgelegd of heeft aangedragen om mee te nemen voor de NEV.



Figuur 5: Het aanpassen van toekomstige budgetplafonds om de Kasuitgavenreeks, KS_j , in balans te laten zijn met de ODE reeks, ODE_j . θ is een threshold waarde.

De resulterende kasuitgaven en ODE-reeks en het cumulatieve verschil zijn geïllustreerd in Figuur 6 voor de tweede rekenronde van de NEV 2017. De resultaten corresponderen met de variant Vaststaand en Voorgenomen beleid. Zoals te zien is in Figuur 6 zijn er in het begin van de reeks meer inkomsten uit de ODE dan subsidie-uitgaven. Dit komt omdat het een aantal jaren duurt voordat projecten zijn gerealiseerd.



Figuur 6: Kasuitgaven, ODE en cumulatief verschil in miljoen € zoals geraamd in de NEV 2017 (Vastgesteld en Voorgenomen beleid).

Een completer overzicht met historische toepassingen is te vinden in sectie 3.7.

3.4 Validatie en kalibratie

Kalibratie

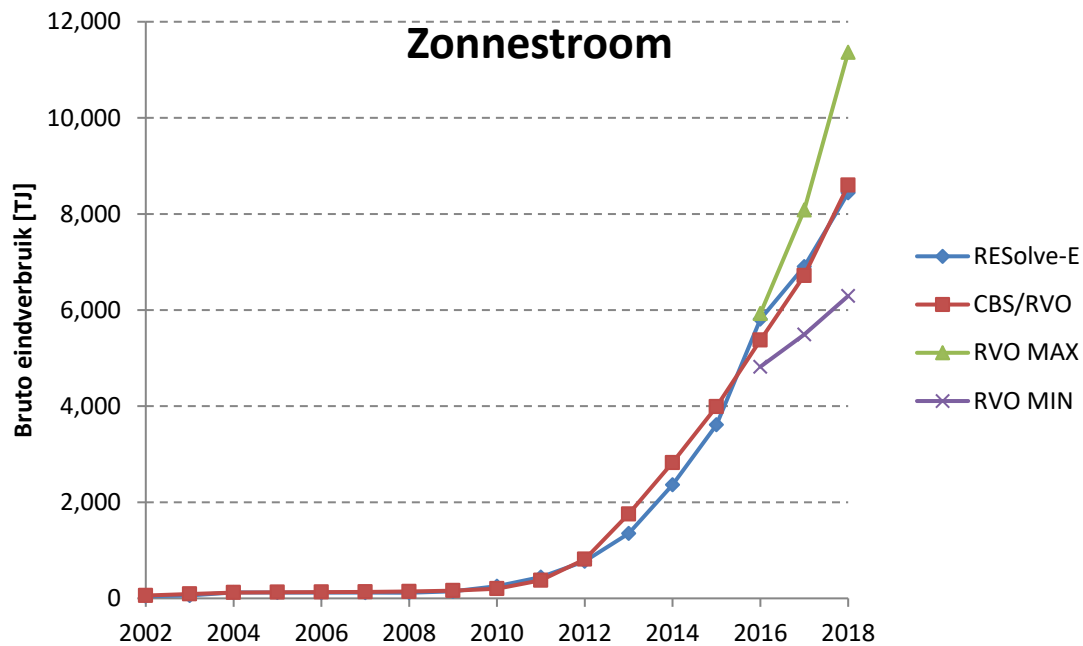
Om de robuustheid van de projectie van de toekomstige groei te verbeteren, wordt het model geijkt op gegevens voor historische jaren. Naast statistische gegevens die beschikbaar zijn via het CBS maakt RESolve-E in de NEV ook gebruik van de kortetermijnprojectie van RVO.nl. RVO.nl heeft inzicht welke projecten er binnen enkele jaren in productie zullen gaan en maakt voor de NEV een kwantitatieve inschatting van het huidige jaar en tot twee jaar vooruit. Binnen de NEV kunnen de gegevens van RVO.nl dus als extra datapunten worden gebruikt om de betrouwbaarheid van het model te controleren. De kalibratie vindt hierbij plaats op het bruto eindverbruik hernieuwbare energie die CBS presenteert in zijn publicatie (zie bijv. CBS (2018)) en op dezelfde categorie-indeling als het CBS gebruikt.

Om de statistische datapunten zo goed mogelijk te reproduceren wordt het model gekalibreerd. De volgende parameters worden handmatig gevarieerd om de match tussen statistiek en de modeluitkomsten zo goed mogelijk te laten zijn:

- Parameters die relevant zijn voor de groeisnelheid van de keten (zie de twee hoofdmechanismes in paragraaf 3.2);
- Handmatig variëren van de maximale groei (gebruikt voor abrupte veranderingen);
- Aanpassingen van het realistisch potentieel van een techniek-band;
- Nagaan of er flankerend beleid mist of de kosten verkeerd zijn ingeschat;
- Realisatietijden aanpassen.

Het kan soms gebeuren dat een techniek volgens het model in bepaalde jaren helemaal niet groeit, terwijl dat volgens de statistische gegevens wel zo is. Dan heeft variatie van bovenstaande stuurparameters geen zin. In dit geval wordt eerst gekeken of er überhaupt wel een match is tussen vraag en aanbod, m.a.w. of de techniek in het model wel in aanmerking komt voor het beleid waarvan het in werkelijkheid ondersteuning heeft gekregen. Ook kan - zeker in het geval van een nieuwe techniek, waar nog weinig productiecapaciteit van is - het voorkomen dat deze techniek in werkelijkheid is ingegroeid doordat er bijvoorbeeld innovatiesubsidies of regionale subsidies waren. In dit soort gevallen wordt nagegaan of er beleid ontbreekt in de beleidstabel. Als dit zo is, kan deze worden toegevoegd. Als dit niet te achterhalen is, dan kan er eventueel fictief beleid worden toegevoegd of kunnen de kosten voor een paar jaar verlaagd worden om de waargenomen groei te reproduceren.

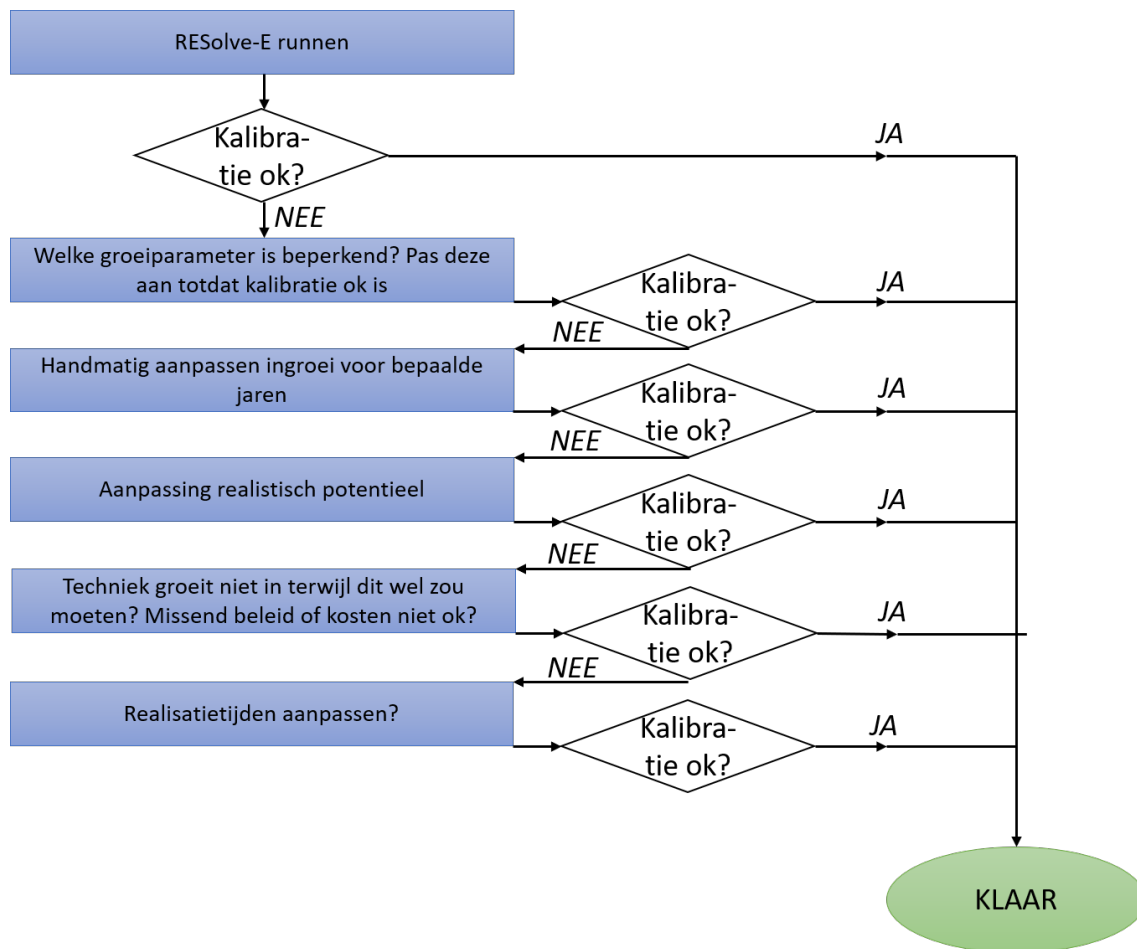
RVO.nl levert - voor de drie jaren waarvoor zij data oplevert - naast een middenwaarde ook een boven- en onderwaarde aan. Bij de kalibratie wordt geprobeerd om zo dicht mogelijk bij de middenwaarde te blijven. Een voorbeeld uit de NEV 2016 is gegeven in Figuur 7.



Figuur 7: Kalibratie van het bruto eindverbruik voor zonnestroom op historische data van CBS en de kortetermijnprojectie van RVO.nl zoals gebruikt in de NEV 2016 (ECN/PBL/CBS, 2016).

Het kalibreren van het model kan tijdrovend zijn, met name wanneer de kortetermijnprojectie behoorlijk verandert. De kalibratie van het model is niet geautomatiseerd en ook niet geformaliseerd. Het kalibreren is een manueel proces, waarbij actief gezocht wordt naar nieuwe gegevens die het verschil tussen waarneming en modelresultaat kunnen verklaren. Omdat het aantal categorieën dat gekalibreerd moet worden beperkt is (het zijn er 13) is dit nog uitvoerbaar. Om het model goed te kalibreren worden de stappen zoals aangegeven in Figuur 8 doorlopen voor elke hernieuwbare energie categorie.

De kalibratie van het model is natuurlijk ook een goede stap om te kijken of de resultaten plausibel zijn.



Figuur 8: Flowchart voor de kalibratie van hernieuwbare energie categorieën

Validatie

RESolve-E wordt gevalideerd door het te gebruiken (bijvoorbeeld binnen de KEV). Het is belangrijk dat de modelleur hierbij kritisch naar de resultaten kijkt, samen met andere deelnemers aan het project en beleidsmakers. Omdat er binnen de KEV twee rekenrondes zijn is er na rekenronde 1 een mogelijkheid om inputwaarden in het model aan te passen en de resultaten bij te sturen. Na een KEV kan ook geconcludeerd worden dat de resultaten van de modelrun te veel afwijken van verwachtingen. Er zijn geen criteria gedefinieerd om modelresultaten aan te passen, maar dit gaat op ad hoc basis.

Tot nu toe is er nog niet gekeken of prognoses die gemaakt zijn ook stroken met de daadwerkelijke realisatie. In het algemeen is het lastig om hiervoor een goede vergelijking te maken omdat het SDE+(+) beleid van jaar op jaar nogal wat veranderingen laat zien, zo is bijvoorbeeld tijdens de NEV 2017 niet voorzien dat er vanaf de SDE+ 2019 geen specifieke ondersteuning meer zou zijn voor mest co-vergisting. De prognose heeft daarom vooral waarde vanuit het huidige beleid en voorgenomen beleid. Dit is ook de rol van de KEV.

3.5 Beperkingen

Zoals alle modellen heeft ook RESolve-E zijn beperkingen. Hieronder wordt een overzicht gegeven van de belangrijkste beperkingen. Zoals in 1.6 aangegeven wordt het RESolve-E model uitgefaseerd en waarschijnlijk niet meer gebruikt voor de KEV vanaf 2021. In 2020 worden er daarom ook geen beperkingen van het model aangepakt.

- Beperkte resolutie van potentiëlen: Bijv. het potentieel voor wind op zee is ingedeeld in 19 techniek-banden, gebaseerd op verschillende gemiddelde windsnelheden, waterdiepte en afstand tot de kust.
- Beperkt aantal typen biomassa: De onderverdeling van biomassa naar biomassatypen kan op verschillende detailniveau's worden gedaan. Om het model beheersbaar te houden, is biomassa onderverdeeld in biomassatypen die onderling significant verschillen op gebied van toepassingsmogelijkheden, volumestromen, en prijs;
- Per type biomassa één prijs: Voor biomassa is er per type (per jaar) één prijs. In werkelijkheid is er vaak niet één enkele prijs (vanwege regionale verschillen, bilaterale contracten, enz.);
- Het model vertoont binair gedrag: Als een techniek financieel uit kan (inclusief eventuele subsidie), dan kan hij volgens het model groeien. Is een techniek te duur, dan groeit hij helemaal niet, zelfs in het geval van een marginaal verschil. In werkelijkheid is er vaak een spreiding in het rendement waarmee investeerders genoeg nemen: sommige investeerders nemen met een lager rendement genoeg, bijvoorbeeld omdat andere overwegingen meespelen. Voor zon-PV is dit een reden geweest om de banden op te splitsen in meerdere rendementscategorieën.
- Keuze voor representatieve marktwaaarde energie: In het model wordt er per techniek-band combinatie een sector aangewezen die bepalend is voor de marktwaaarde van de geproduceerde energie. Dezelfde techniek kan in werkelijkheid soms gebruikt worden binnen verschillende sectoren, met ieder hun eigen sectorspecifieke marktwaaarde;
- Geen inpassingstoets: Het model beschikt niet over informatie waarmee het kan toetsen of er wel een afzet is voor de geproduceerde energie. Met name voor warmte is dit relevant, omdat warmte vaak alleen lokaal gebruikt kan worden. Ook gebrek aan netcapaciteit kan een rol spelen bij bijvoorbeeld zonneparken. De gebruiker van het model moet dit daarom zelf toetsen aan de hand van externe informatie, zoals uit de andere modellen.¹³;
- Relatie tussen techniek-band en sectoren: Voor enkel een paar technieken hebben de banden een 1-op-1 relatie met sectoren. Om het hernieuwbare aanbod per band over de sectoren te verdelen worden verdeelsleutels gebruikt. Meer over de verdeling over sectoren is te vinden in sectie 3.6;
- Alleen nationaal beleid: Er wordt alleen gebruik gemaakt van nationaal beleid en niet van regionaal beleid. Regionale stimulering van bijv. zon-PV wordt hierdoor niet expliciet meegenomen. Omdat regionaal beleid vaak flankerend is en het model wel wordt gekalibreerd met behulp van CBS en RVO.nl data wordt regionaal beleid wel impliciet meegenomen;
- Kalibratie op bruto eindverbruik: Tot en met de NEV 2017 is er alleen gekalibreerd op bruto eindverbruik. Daar waar gegevens beschikbaar zijn, is het mogelijk om de kalibratie te verbeteren door ook te vergelijken met onderliggende grootheden zoals de capaciteiten, nettoproductie en het biomassagebruik;
- Kalibratie niet geautomatiseerd: Zoals aangegeven in sectie 3.4 is de kalibratie niet geformaliseerd en ook niet geautomatiseerd. Omdat het om een beperkt aantal categorieën gaat is dit nog hanteerbaar.

¹³ Met een klein aandeel hernieuwbare warmte is dit niet zo een groot probleem. Verder kan het potentieel ook ingeperkt worden, zodat het beter is afgestemd op de vraag.

- Omvat niet alle hernieuwbare energie: Het grootste gedeelte van alle hernieuwbare energie wordt beschreven door RESolve-E. Echter om een compleet beeld van hernieuwbare energie in Nederland te vormen zijn een paar elementen uit andere modellen nodig die binnen de NEV worden gebruikt. RESolve-E beschrijft de volgende (deel)categorieën *niet* omdat ze niet vanuit de SDE+ ondersteund werden en de groei beter te modelleren is vanuit de modellen voor de betreffende sectoren:
 - Biobrandstoffen;
 - Warmtepompen (gebouwde omgeving en industrie) ;
 - Biomassaverbruik bij huishoudens;
 - Zon-PV die tot stand komt via EPC normering in de gebouwde omgeving;
 - Zonthermisch in de gebouwde omgeving;
- Geen vrije categorie SDE+: Met uitzondering van de goedkoopste technieken was het binnen de SDE+ mogelijk een aanvraag in te dienen in een eerdere fase dan de fase die hoorde bij het maximale basisbedrag. Dit betekent dat de ontwikkelaar een lagere subsidie zou krijgen, maar dat de kans dat de aanvraag gehonoreerd werd veel groter is. De openstelling van de SDE+ was namelijk in volgorde van fases en bij overschrijding van het budget sloot de openstelling van de SDE+¹⁴. Als een ontwikkelaar in een eerdere fase indiende, werd dit de 'vrije categorie' genoemd. Deze vrije categorie wordt niet gemodelleerd in RESolve-E. Met name bij relatief lage budgetten, zoals in de periode 2011-2015, kan het een optie zijn om in de vrije categorie in te dienen. Na 2015 zijn de SDE+-budgetten verhoogd en is het aantal fases vermindert. Er was daardoor minder reden om dan in de vrije categorie in te dienen;
- Geen onderscheid voor- en najaarsronde SDE+: Sinds 2016 kende de SDE+ twee openingsrondes. Voor de ene helft van het totale budgetplafond kon in het voorjaar worden ingediend. Voor de andere helft in het najaar. Dit is gedaan om rekening te kunnen houden met de snelle verandering in basisbedragen van zon-PV. Behalve bij zon-PV zijn alle basisbedragen voor voor- en najaarsronde identiek. RESolve-E kent het onderscheid in voor-en najaarsronde niet. RESolve-E neemt voor zon-PV de basisbedragen en techno-economische parameters van zon-PV die horen bij de voorjaarsronde. Dit leidt tot een (zeer) lichte overschatting van de kosten van zon-PV; Middeling van voor- en najaar wordt niet gedaan, omdat de basisbedragen en techno-economische parameters van zon-PV tijdens de NEV/KEV nog niet bekend zijn.
- Geografische resolutie: Het model kan alleen de penetratie van hernieuwbare energie voor heel Nederland bepalen en niet aanwijzen waar technieken geplaatst gaan worden. Wel is in een aantal gevallen geografische informatie besloten in de banden (wind op land, wind op zee);
- Volledige productie voor nieuwe capaciteit: Nieuw geïnstalleerde capaciteit is het eerste jaar volledig beschikbaar, alsof alle nieuwe installaties op 1 januari in gebruik worden genomen. In werkelijkheid wordt nieuwe capaciteit gedurende het hele jaar in gebruik genomen. Een betere representatie zou zijn om ervan uit te gaan dat installaties per 1 juli in gebruik worden genomen en daardoor het eerste jaar slechts de helft van de vollasturen kunnen realiseren;
- Curtaiment wordt niet meegenomen: bij capaciteiten zon-PV en wind energie kan het zijn dat een gedeelte van alle zon-PV installaties en turbines op bepaalde uren van het jaar moet worden afgeschakeld. Dit heeft een effect op de vollasturen van

¹⁴ Zie voor meer informatie over de SDE+: <https://www.rvo.nl/subsidies-regelingen/stimulering-duurzame-energieproductie/aanvragen-sde/berekening-sde>

deze technieken en daardoor rentabiliteit. Dit effect wordt door RESolve-E niet meegenomen. Het COMPETES kan dit effect wel bepalen;

- Geen volledige controle op beschikbaarheid biomassa: RESolve-E representeert niet de volledige biomassaconsumptie in Nederland. Houtstook van biomassa bij huishoudens en het gebruik van biomassa voor productie van biobrandstoffen vallen namelijk buiten RESolve-E. Het gevolg hiervan is dat er binnen het NEV-RS geen model is dat de biomassapotentiëlen en de inzet van biomassa volledig overziet. De biomassa inzet buiten RESolve-E levert echter momenteel geen problemen op doordat:
 - Biomassaverbruik bij huishoudens een speciaal geval is. Het gebruik ligt al jaren rond de 18-19 PJ aan hout. Met deze hoeveelheid kan makkelijk rekening worden gehouden met de potentiëlen die RESolve-E als beschikbaar ziet.
 - Biomassa die momenteel nog voor biobrandstoffen worden gebruikt niet interfereert met het gebruik voor verbranding en vergisting. De biomassa die voor biobrandstoffen worden gebruikt zijn namelijk vooral specifieke gewassen en frituurvetten.

Verder wordt een gedeelte van deze beperkingen afgevangen door de onzekerheidsanalyse die er binnen de KEV gedaan wordt. Binnen de onzekerheidsanalyse wordt er gekeken naar onzekerheden die te maken hebben met bijv. mondiale ontwikkelingen (energieprijzen), maar ook met specifieke modelonzekerheden (van der Welle, 2017).

3.6 Interactie met andere modellen

Communicatie tussen modellen binnen NEV/KEV projecten vindt plaats via het NEV-RekenSysteem (NEV-RS). Een overzicht van de interacties tussen alle modellen is te vinden in Volkers (2013).

Informatie van andere modellen voor RESolve-E

Naast input voor RESolve-E die in de database van het model verwerkt is, gebruikt RESolve-E ook input die afkomstig is van andere modellen. Tabel 7 geeft een overzicht van input afkomstig uit de database van het NEV-RS die door RESolve-E wordt gebruikt.

Tabel 7: Exogene input voor RESolve-E afkomst uit andere modellen of data binnen de NEV/KEV

Data item	Relevant voor
Kolenprijs	Meestook
CO ₂ prijs	Meestook
Sectorspecifieke gasprijs	Ketels, WKK, groen gas, Geothermie
Piekprijs elektriciteit	Zon-PV commercieel
Sector specifieke elektriciteitsprijs	Kleinschalige zon-PV (< 15 kWp) die in aanmerking komt voor salderen
Groothandelsprijs elektriciteit	Alle elektriciteitsopties, behalve zon-PV
Profieffecten	Berekenen correctiebedrag windenergie en zon-PV
Vollasturen kolencentrales	Meestook
Rendementen kolencentrales	Meestook
Inflatiecijfers	Alle kosten en prijzen

Informatie van RESolve-E voor andere modellen

RESolve-E schrijft de output zoals aangegeven in Tabel 8 naar de database van het NEV-RS.

Tabel 8: Resultaten die RESolve-E naar de centrale, NEV-RS, database schrijft

Data item	Relevant voor
Capaciteit per hernieuwbare techniek (per sector)	Berekening hoeveelheid hernieuwbare energie binnen het gehele energiesysteem (inclusief aandeel hernieuwbaar). Elektriciteitsprijzen door het COMPETES model
Capaciteitsfactor per hernieuwbare techniek	
Verhouding warmte/elektriciteit voor bio-WKK	Berekening energiebalans voor het gehele energiesysteem en aandelen hernieuwbare elektriciteit en warmte
Kasuitgaven SDE+(+)	Berekening kosten energiesysteem
Investering hernieuwbare technieken	Werkgelegenheidsberekeningen
Biomassa meestookpercentage per kolen-centrale	Het COMPETES model

Iteraties tussen RESolve-E, SAVE-Productie en COMPETES

Binnen een rekenronde vinden er drie iteratieslagen plaats tussen RESolve-E, SAVE-Productie en COMPETES omdat de groei van hernieuwbare elektriciteit effect heeft op de elektriciteitsprijzen, welke weer effect hebben op decentrale WKK (SAVE-Productie).

Verdeling over sectoren

Binnen het NEV-RS is het energiesysteem onderverdeeld in verschillende sectoren. Het NEV-RS heeft informatie op sectorniveau nodig over de inzet van hernieuwbare energie. Voor sommige techniek-band combinaties is er een directe 1-op-1 link met een sector, zoals bij zon-PV. Bij andere technieken en met name bij biomassaketels ontbreekt deze 1-op-1 link. In dit geval wordt er een verdeelsleutel toegepast. Dit betekent dat de inzet van bijvoorbeeld een Biomassa ketel 0,5 – 5 MWth die houtpellets gebruikt wordt verdeeld over sectoren, waarbij de totale verdeling optelt tot 100%. Deze verdeling over sectoren kan per jaar gevarieerd worden. Voor historische jaren zijn de verdeelsleutels zo gezet dat ze de historische verdeling over sectoren zo goed mogelijk representeren. Voor toekomstige jaren is de verdeling zo gezet dat de resultaten in lijn zijn met wat maximaal haalbaar is in een sector en in welke sector nog veel ruimte is om biomassa toe te passen. Deze inschattingen zijn gebaseerd op sectordeskundigen binnen het KEV consortium.

3.7 Verwijzingen naar rapporten met eerdere toepassingen

De eerste toepassingen van het model, destijds Admire-Rebus geheten, zijn beschreven in Uytterlinde (2003). Het betrof simulaties van hernieuwbare elektriciteit in de EU15. Vervolgens is het model toegepast om te kijken wat de implicaties zijn van techniekkostenontwikkelingen op de diffusie van hernieuwbare elektriciteitstechnieken in de EU15 tot en met 2020 (Uytterlinde, 2007). Omdat de ontwikkelingen in het model een aantal jaren grotendeels stil hebben gelegen is de volgende rapportage met toepassingen pas uit 2011. In het WindSpeed project (Cameron, 2011) is met behulp van verschillende ruimtelijke scenario's gekeken naar

zowel het ruimtelijke als het economische potentieel voor wind-op-zee op de Noordzee tot en met 2030 voor België, Denemarken, Duitsland, Nederland, Noorwegen en het Verenigd Koninkrijk. Vlak daarna is in het RES-4-LESS project gekeken naar nationale hernieuwbare energiedoelstellingen voor de verschillende lidstaten en of er potentie is om de doelstelling in een land (bijvoorbeeld Nederland) met relatief dure hernieuwbare energie gedeeltelijk in andere lidstaten te laten realiseren en administratief toe te laten kennen aan het land met relatief dure hernieuwbare energie (Dalla Longa, 2012). De volgende en tot nu toe laatste toepassingen van het model in een Europese context zijn op het gebied van biomassa voor energie (Uslu, 2012; van Stralen, 2016). RESolve-E wisselde hierbij informatie uit met het RESolve-Biomass model, dat naast elektriciteit uit biomassa ook warmte uit biomassa en bio-brandstoffen beschrijft (van Stralen, 2013).

Sinds de actualisatie van de Referentieramingen (Verdonk en Wetzels, 2012) wordt RESolve-E ook in de Nederlandse context gebruikt. Na de Referentieramingen volgde de Nationale Energie Verkenningen van 2014 t/m 2017 (ECN/PBL/CBS, 2014-2017). Met behulp van de NEV 2014 als basis, zijn er in opdracht van de Algemene Rekenkamer allerlei varianten door-gerekend om de haalbaarheid en betaalbaarheid van de beleidsdoelen in 2020 door te lichten (Algemene Rekenkamer, 2015a, 2015b).

3.8 Wetenschappelijke literatuur

Zoals aangegeven in de inleiding (sectie 1.1) bouwt RESolve-E voort op op een model voor simulatie van hernieuwbare elektriciteit in de EU15: Admire-Rebus (Daniëls & Uyterlinde, 2005). Het model dat destijds is ontwikkeld heeft elementen gebruikt van het REBUS model (Voogt, *et al*, 2001).

Tijdens de ontwikkeling van het Admire-Rebus is gedurende dezelfde periode een vergelijkbaar model ontwikkeld door een ander consortium, het Green-X model (Huber, Faber and Resch, 2006; Held, *et al*, 2018).

Invoerdata en rol in model

4.1 Kort overzicht van gebruikte databases

Het RESolve-E model leest input uit vier verschillende MS Access databases in:

1. Een lokale database die geen connecties met andere modellen heeft. De data uit deze database wordt in dit hoofdstuk verder toegelicht;
2. De centrale database van het NEV-RS¹⁵. De centrale NEV-RS database speelt voor elk energiemodel dat binnen de KEV wordt gebruikt een belangrijke rol. In het geval van RESolve-E is in sectie 3.6 beschreven welke data voor RESolve-E relevant is;
3. Een lokale database die gebruikt wordt voor de koppeling tussen RESolve-E en de database van het NEV-RS. De database wordt gebruikt om de RESolve-E techniek-bandens te koppelen aan de SELPE codes van het NEV-RS.
4. Een lokale database die gebruikt wordt voor de koppeling tussen RESolve-E en het COMPETES model. Met behulp van deze database kan er een koppeling gemaakt worden tussen de RESolve-E techniek-bandens en de technieken en energiedragers die binnen COMPETES gebruikt worden. Alle overige informatie-uitwisseling tussen RESolve-E en COMPETES loopt verder via de NEV-RS database.

Dit hoofdstuk is gewijd aan de belangrijkste input die gehaald wordt uit de database vermeld onder 1. De databases zoals vermeld onder 2 tot en met 4 worden in dit hoofdstuk verder niet beschreven.

De specifieke database van RESolve-E onder punt 1 bevat ruim 90 tabellen. Het voert te ver om die allemaal afzonderlijk te gaan behandelen. Alleen de meest relevante invoerdata wordt hier besproken. Data die moet worden ingevoerd om de vraagkant (het beleid) goed door RESolve-E te kunnen bepalen wordt beschreven in sectie 4.2. In sectie 4.3 wordt de belangrijkste data besproken die nodig is om de onredabele top uit te rekenen. Invoerdata voor realistische potentiëlen is beschreven in sectie 4.4. Andere relevante invoerdata wordt beschreven in sectie 4.5.

4.2 Beleidsgerelateerde invoerdata

Tabel 8 laat een paar voorbeelden zien van beleidsinvoer voor Nederland. De eerste rij laat de ISDE uit 2016 zien. De rijen daarna zijn voorbeelden van de SDE+.

Omdat er typen beleid zijn die op een heel scala aan technieken van toepassing zijn wordt er in deze tabel niet direct met de techniek-bandens van RESolve-E gewerkt. In de eerste kolom wordt de hoofdcategorie genoemd waar het beleid op van toepassing is. In geval van bij-

¹⁵ De database van het NEV-RS is onderverdeeld in drie individuele MS Access databases

voorbeeld een verplichtingensysteem zou dit bijvoorbeeld de naam 'Alle hernieuwde elektriciteit' kunnen hebben. De kolom wordt gebruikt om de beleidsmaatregel techniekspecifiek te maken. Dit kan nog steeds een verzameling van techniek-banden zijn.

De kolom OpenstellingsJaar wordt gebruikt om aan te geven wanneer het beleid wordt opengesteld voor aanvraag. In de kolom SluitingsJaar wordt aangegeven wat het laatste jaar is van het betreffende beleid. In geval van zowel ISDE en SDE+ worden de subsidieniveaus en andere aspecten elk jaar aangepast, vandaar dat het SluitingsJaar gelijk is aan het OpenstellingsJaar. In het geval van de SDE+(+) is er een beleidsduur: er is een vergoeding op de productie gedurende het jaar van in gebruik name, t , tot en met $t + \text{Beleidsduur} - 1$. In het geval van een investeringssubsidie, zoals de ISDE, wordt er eenmalig een subsidie verstrekt en is de beleidsduur irrelevant.

RESolve-E kent een aantal typen stimulering, deze moet gekozen worden in de kolom 'Type Stimulering'. Elk stimuleringsprogramma krijgt een eigen naam, ISDE, SDE+ 2015, SDE+ 2016, enz. Zowel 'Mono digestion of Manure - GG' als 'Wind onshore: 7,5 - 8 m/s' vallen binnen de SDE+ 2015. Voor het model onderscheiden ze zich door de naam in de tweede kolom.

Eenheden van de maatregel kunnen niet willekeurig gekozen worden. Er zijn een paar keuzemogelijkheden. In het geval van de ISDE is dit uitgedrukt in €/kW, maar voor een investeringssubsidie kan dit ook als %. De SDE+ is uitgedrukt in €/kWh omdat het een vergoeding per geproduceerde hoeveelheid energie betreft. De kolommen Basisbedrag, Basisprijs en SDE+ fase zijn specifiek voor de SDE+. Voor een betekenis van deze termen, zie RVO SDE+. Voor een investeringssubsidie in €/kW is een aparte kolom: Investeringsubsidie.

In Tabel 9 wordt nog geen connectie gemaakt met de techniek-banden van RESolve-E. Er is daarom een tabel in de database die de verbinding legt tussen de TechnologieCategorie en BeleidsTechnologieID (de eerste twee kolommen van Tabel 9) en de techniek-banden. Deze verbinding is weergegeven in Tabel 10.

Tabel 9: Voorbeeld data voor de ISDE en SDE+

Technologie-Categorie	BeleidsTechnologieID	Openstel- lingsJaar	Slui- tings- Jaar	Beleids- duur	Type stimule- ring	Program- maNaam	Een- heid	Basis- bedrag	Basis- prijs	Investerings- subsidie	SDE+ fase
Biomass Heat	Middelgrootte houtpellet ketel (50-500 kWth)	2016	2016		Investerings Subsidie	ISDE 2016	€/kW			80	
Biomassa groen gas	Mono vergisting van mest - GG	2015	2015	12	Feed-in Pre- mium	SDE+ 2015	€/ct/k Wh	11.8	2		9
Biomassa groen gas	Mono vergisting van mest - GG	2016	2016	12	Feed-in Pre- mium	SDE+ 2016	€/ct/k Wh	10.6	2		4
Biomassa groen gas	Mono vergisting van mest - GG	2017	2017	12	Feed-in Pre- mium	SDE+ 2017	€/ct/k Wh	8.8	1.5		3
Biomassa groen gas	Mono vergisting van mest - GG	2018	2018	12	Feed-in Pre- mium	SDE+ 2018	€/ct/k Wh	9.2	1.6		3
Biomassa groen gas	Mono vergisting van mest - GG	2019	2019	12	Feed-in Pre- mium	SDE+ 2019	€/ct/k Wh	9.5			3
Wind	Wind op land: 7,5 - 8 m/s	2015	2015	15	Feed-in Pre- mium	SDE+ 2015	€/ct/k Wh	8.1	2.9		3
Wind	Wind op land: 7,5 - 8 m/s	2016	2016	15	Feed-in Pre- mium	SDE+ 2016	€/ct/k Wh	7.6	3		1
Wind	Wind op land: 7,5 - 8 m/s	2017	2017	15	Feed-in Pre- mium	SDE+ 2017	€/ct/k Wh	7	2.5		1
Wind	Wind op land: 7,5 - 8 m/s	2018	2018	15	Feed-in Pre- mium	SDE+ 2018	€/ct/k Wh	5.9	2.2		1
Wind	Wind op land: 7,5 - 8 m/s	2019	2019	15	Feed-in Pre- mium	SDE+ 2019	€/ct/k Wh	5.8			1

Tabel 10: Voorbeeld koppelingen tussen beleidscategorieën en RESolve-E techniek-banden

TechnologieCategorie	BeleidsTechnologieID	Technologie	Band	Koppeling
Biomassa groen gas	Mono vergisting van mest - GG	Biomassa groen gas	17	1
Biomassa warmte	Middelgrootte houtpellet ketel (50-500 kWth)	Biomassa ketel 50 – 100 kWth	1	1
Biomassa warmte	Middelgrootte houtpellet ketel (50-500 kWth)	Biomassa ketel 50 – 100 kWth	1	1
Wind	Wind op land: 7,5 - 8 m/s	Wind op land	6	1

Een essentieel element van de SDE+ is de openstellingsruimte (of budget). Elk jaar wordt de SDE+ opengesteld voor een bepaald bedrag. Deze hoeveelheid geld wordt gebudgeteerd en betreft een maximale hoeveelheid subsidie die er aan de SDE+ aan projecten die dat jaar hebben aangevraagd kan worden uitgegeven. De openstellingsruimte is een invoer in de database en is gegeven in Tabel 11. Ook voor toekomstige jaren heeft de openstellingsruimte een waarde.

Tabel 11: Openstellingsruimte SDE+ per jaar [M€]

SDE+ jaar	Budget [M€]
2011	1.500
2012	1.700
2013	3.000
2014	3.500
2015	3.500
2016	9.000
2017	12.000
2018	12.000
...	...

4.3 Invoerdata voor onrendabele top

Voor elke techniek-band combinatie wordt voor elk simulatiejaar een onrendabele top berekend. De data die nodig is, is dezelfde data die nodig is om een basisbedrag te berekenen van een hernieuwbare techniek (Lensink *et al.*, 2017; Lensink, 2019) en de data die nodig is om het definitieve correctiebedrag uit te rekenen (van de Welle en Lensink, 2019). Als voorbeeld wordt hieronder in tabel 12 de data gegeven die nodig is om de onrendabele top voor wind op land, ≥ 8 m/s volgens de SDE+ 2019 uit te rekenen (Lensink, 2019). Voor de berekening van het basisbedrag, zie het OT model op PBL OT.

Tabel 12 Parameters om het basisbedrag en het correctiebedrag te berekenen

Parameters om het basisbedrag te berekenen (Lensink, 2019)		
Parameter	Eenheid	Waarde
Vollasturen	Uren/jr	3480
Investeringskosten	€/kWoutput	1160
Jaarlijkse vaste O&M kosten	€/kWoutput	12,3

Variabele O&M-kosten (incl. contract-kosten)	€/kWh_output	1,48
Rente lening	-	2,5%
Vereiste return on equity	-	15%
Aandeel equity (eigen vermogen)	-	20%
Economische levensduur	jr	20
Termijn lening	jr	15
Afschrijvingstermijn	jr	15
Niet techniek-specifieke parameters		
Inflatie	-	2,0% ^a
Vennootschapsbelasting	-	25%
Parameters om het correctiebedrag (marktwaaarde) uit te rekenen (van de Welle en Lensink, 2019)		
Elektriciteitsprijs (APX basislast)	€/kWh	5,25 ^b
Profiel-en onbalanseffect	-	0,88 ^b

^aIn de berekening in RESolve-E is de waarde voor inflatie afkomstig van de NEV-RS database. Deze kan afwijken van de 2,0% die is aangenomen in Lensink (2019)

^bBinnen de KEV komt de elektriciteitsprijs uit het COMPETES model. Deze wordt door RESolve-E ingelezen uit de NEV-RS database. Voor wind op land (en wind op zee en zon-PV) berekent COMPETES een specifieke elektriciteitsprijs voor wind op land. Het Profiel-en onbalans zoals deze afkomstig is uit de berekeningen van de definitieve correctiebedragen wordt hiervoor gecorrigeerd.

4.4 Invoerdata voor realistische potentiën

De realistische potentiën (zie ook sectie 1.3) worden bepaald per techniek, bijvoorbeeld windenergie per band. De potentiën staan min of meer vast en worden uitgedrukt (qua eenheid) in de limiterende factor. Een voorbeeld: in het geval van zonne-energie is dat oppervlakte, aangezien rendement kan verbeteren. Aan de andere kant wordt voor biomassa energie gebruikt als limiterende grootte, omdat het een energiedrager is en er verschillende technieken zijn om de biomassa te verwerken die verschillende opbrengst hebben. De potentiën worden bepaald per band en voor een bepaald jaar. De data wordt geactualiseerd met voortschrijdende kennis. Voorbeelddata worden weergegeven in Tabel 13 en Tabel 14, voor respectievelijk niet-biomassa en biomassa.

Tabel 13: Voorbeelddata voor potentiën

Techniek	Band	Jaar	Potentieel	Eenheid
Geothermie	1	2050	221	MW
Geothermie	2	2050	1.042	MW
Geothermie	3	2050	397	MW
Zon-PV	5	2050	53.6	km ²
Zon-PV	6	2050	3.4	km ²
Wind op land	5	2050	900	MW
Wind op land	6	2050	1.800	MW

Tabel 14: Voorbeeld data voor biomassa potentiën [TJ]

Band	Jaar	Potentieel [TJ]
Houtpellets	2050	87000

Band	Jaar	Potentieel [TJ]
Gemengd huishoudelijk- en bedrijfsafval	2050	40000
Natte mest	2050	11700
B-hout	2050	13000

4.5 Andere relevante invoerdata

Naast specifieke data (bijv. de investeringskosten) is er ook generieke, meer beschrijvende data-invoer. Voor techniek-banden is deze te vinden in Tabel 15. In deze tabel staan voor Biomassa ketels ≥ 5 MWth en Biomassa meestook alle beschikbare banden gegeven. Voor zon-PV is een subset gegeven. Het referentieproduct voor elke techniek-band moet worden gegeven, en als de techniek-band direct op een enkele sector van toepassing is ook de sector. In het geval van zon-PV wordt de informatie uit de kolommen Referentie product en Sector gezamenlijk gebruikt om te bepalen welke elektriciteitsprijs het beste als referentie kan dienen voor een bepaalde band. In de kolom Recept Bruto Eindverbruik dient de gebruiker aan te geven welke methode moet worden gebruikt om het bruto eindverbruik van de te techniek-band uit te rekenen (RVO, 2015). Voor zon-PV is het bovendien relevant om te weten of het een kleinverbruikersaansluiting betreft (zie kolom Kleinverbruiker PV). Dit is van belang vanwege salderen van zonnestroom.

Tabel 15: Voorbeeld data beschrijving techniek-band combinaties voor biomassa en zon-PV

Technologie	Band	Omschrijving	Referentie product	Recept Bruto Eind-verbruik	Sector	Kleinver-bruiker PV
Biomassa ketel ≥ 5 MWth	1	Hout pellets	Warmte uit gas WKK	Biomassa input	-	NEE
Biomassa ketel ≥ 5 MWth	8	Dierlijke vetten	Warmte uit gas ketel	Biomassa input	-	NEE
Biomassa ketel ≥ 5 MWth	25	Snoei- en dunningshout (chips)	Warmte uit gas WKK	Biomassa input	-	NEE
Biomassa meestook	1	Biomassa meestook van houtpellets	Elektriciteit uit kolen-centrale	Bruto productie	-	NEE
Biomassa meestook	2	Biomassa meestook van zaagsel	Elektriciteit uit kolen-centrale	Bruto productie	-	NEE
Biomassa meestook	22	Biomassa meestook van diermeel	Elektriciteit uit kolen-centrale	Bruto productie	-	NEE
Biomassa meestook	23	Biomassa meestook van agro residuen	Elektriciteit uit kolen-centrale	Bruto productie	-	NEE
Zon-PV	5	Huishoudens: Groot, Zuid, Gem. rendement	Elektriciteit in de huishoudsector	Bruto productie	Huishoudens	JA
Zon-PV	6	Huishoudens: Klein, Zuid, Gem. rendement	Elektriciteit in de huishoudsector	Bruto productie	Huishoudens	JA
Zon-PV	11	Handel en Horeca:Grootverbruiker,Z, Gem. Rendement	Elektriciteitsprijs voor dienstensector, grootverbruikers	Bruto productie	Handel en Horeca	NEE
Zon-PV	12	Handel en Horeca:Grootverbruiker, Z, Laag Rendement	Elektriciteitsprijs voor dienstensector, grootverbruikers	Bruto productie	Handel en Horeca	NEE

Technologie	Band	Omschrijving	Referentie product	Recept Bruto Eind- verbruik	Sector	Kleinver- bruiker PV
Zon-PV	18	Handel en Horeca:Grootverbruiker, Z, Hoog Rendement	Elektriciteitsprijs voor dienstensector, grootverbruikers	Bruto productie	Handel en Horeca	NEE
Zon-PV	19	Huishoudens: SAWEC (EPC norm, nieuwe woningen)	Elektriciteit in de huishoudsector	Bruto productie	Huishoudens	JA
Zon-PV	24	Huishoudens: Groot, Zuid, Laag rendement	Elektriciteit in de huishoudsector	Bruto productie	Huishoudens	JA
Zon-PV	25	Huishoudens: Klein, Zuid, Laag rendement	Elektriciteit in de huishoudsector	Bruto productie	Huishoudens	JA
Zon-PV	26	Handel en Horeca:Grootverbruiker, O/W, Gem. Rendement	Elektriciteitsprijs voor dienstensector, grootverbruikers	Bruto productie	Handel en Horeca	NEE
Zon-PV	27	Handel en Horeca:Grootverbruiker, O/W, Laag Rendement	Elektriciteitsprijs voor dienstensector, grootverbruikers	Bruto productie	Handel en Horeca	NEE
Zon-PV	29	Handel en Horeca:Grootverbruiker, O/W, Hoog Rendement	Elektriciteitsprijs voor dienstensector, grootverbruikers	Bruto productie	Handel en Horeca	NEE
Zon-PV	30	Huishoudens: Groot, Zuid, Hoog rendement	Elektriciteit in de huishoudsector	Bruto productie	Huishoudens	JA
Zon-PV	31	Huishoudens: Klein, Zuid, Hoog rendement	Elektriciteit in de huishoudsector	Bruto productie	Huishoudens	JA
Zon-PV	32	Handel en Horeca:Kleinverbruiker, Z, Gem. Rendement	Elektriciteitsprijs voor dienstensector, kleinverbruikers	Bruto productie	Handel en Horeca	JA

Technologie	Band	Omschrijving	Referentie product	Recept Bruto Eindverbruik	Sector	Kleinverbruiker PV
Zon-PV	33	Handel en Horeca: Kleinverbruiker, Z, Laag Rendement	Elektriciteitsprijs voor dienstensector, kleinverbruikers	Bruto productie	Handel en Horeca	JA
Zon-PV	35	Handel en Horeca: Kleinverbruiker, Z, Hoog Rendement	Elektriciteitsprijs voor dienstensector, kleinverbruikers	Bruto productie	Handel en Horeca	JA
Zon-PV	36	Huishoudens: Groot, O/W, Gem. rendement	Elektriciteit in de huishoudsector	Bruto productie	Huishoudens	JA
Zon-PV	37	Huishoudens: Klein, O/W, Gem. rendement	Elektriciteit in de huishoudsector	Bruto productie	Huishoudens	JA
Zon-PV	38	Handel en Horeca: Kleinverbruiker, O/W, Gem. Rendement	Elektriciteitsprijs voor dienstensector, kleinverbruikers	Bruto productie	Handel en Horeca	JA
Zon-PV	39	Handel en Horeca: Kleinverbruiker, O/W, Laag Rendement	Elektriciteitsprijs voor dienstensector, kleinverbruikers	Bruto productie	Handel en Horeca	JA
Zon-PV	40	Huishoudens: Groot, O/W, Laag rendement	Elektriciteit in de huishoudsector	Bruto productie	Huishoudens	JA
Zon-PV	41	Huishoudens: Klein, O/W, Laag rendement	Elektriciteit in de huishoudsector	Bruto productie	Huishoudens	JA
Zon-PV	42	Handel en Horeca: Kleinverbruiker, O/W, Hoog Rendement	Elektriciteitsprijs voor dienstensector, kleinverbruikers	Bruto productie	Handel en Horeca	JA
Zon-PV	43	Overige zakelijke dienstverlening: Grootverbruiker, Z, Gem. Rendement	Elektriciteitsprijs voor dienstensector, grootverbruikers	Bruto productie	Overige zakelijke dienstverlening	NEE

Technologie	Band	Omschrijving	Referentie product	Recept Bruto Eindverbruik	Sector	Kleinverbruiker PV
Zon-PV	44	Huishoudens: Groot, O/W, Hoog rendement	Elektriciteit in de huishoudsector	Bruto productie	Huishoudens	JA
Zon-PV	45	Huishoudens: Klein, O/W, Hoog rendement	Elektriciteit in de huishoudsector	Bruto productie	Huishoudens	JA
Zon-PV	46	Overige zakelijke dienstverlening: Grootverbruiker, Z, Laag Rendement	Elektriciteitsprijs voor dienstensector, grootverbruikers	Bruto productie	Overige zakelijke dienstverlening	NEE
Zon-PV	47	Overige zakelijke dienstverlening: Grootverbruiker, Z, Hoog Rendement	Elektriciteitsprijs voor dienstensector, grootverbruikers	Bruto productie	Overige zakelijke dienstverlening	NEE
Zon-PV	48	Facade: Z, Gem. Rendement	Elektriciteitsprijs voor dienstensector, kleinverbruikers	Bruto productie	Overige zakelijke dienstverlening	NEE
Zon-PV	49	Overige zakelijke dienstverlening: Grootverbruiker, O/W, Gem. Rendement	Elektriciteitsprijs voor dienstensector, grootverbruikers	Bruto productie	Overige zakelijke dienstverlening	NEE
Zon-PV	50	Facade: Z, Laag Rendement	Elektriciteitsprijs voor dienstensector, kleinverbruikers	Bruto productie	Overige zakelijke dienstverlening	NEE
Zon-PV	51	Overige zakelijke dienstverlening: Grootverbruiker, O/W, Laag Rendement	Elektriciteitsprijs voor dienstensector, grootverbruikers	Bruto productie	Overige zakelijke dienstverlening	NEE
Zon-PV	52	Facade: Z, Hoog Rendement	Elektriciteitsprijs voor dienstensector, kleinverbruikers	Bruto productie	Overige zakelijke dienstverlening	NEE

Technologie	Band	Omschrijving	Referentie product	Recept Bruto Eindverbruik	Sector	Kleinverbruiker PV
Zon-PV	53	Overige zakelijke dienstverlening: Grootverbruiker, O/W, Hoog Rendement	Elektriciteitsprijs voor dienstensector, grootverbruikers	Bruto productie	Overige zakelijke dienstverlening	NEE
Zon-PV	55	Overige zakelijke dienstverlening: Kleinverbruiker, Z, Gem. Rendement	Elektriciteitsprijs voor dienstensector, kleinverbruikers	Bruto productie	Overige zakelijke dienstverlening	JA
Zon-PV	57	Overige zakelijke dienstverlening: Kleinverbruiker, Z, Laag Rendement	Elektriciteitsprijs voor dienstensector, kleinverbruikers	Bruto productie	Overige zakelijke dienstverlening	JA
Zon-PV	59	Overige zakelijke dienstverlening: Kleinverbruiker, Z, Hoog Rendement	Elektriciteitsprijs voor dienstensector, kleinverbruikers	Bruto productie	Overige zakelijke dienstverlening	JA
Zon-PV	61	Overige zakelijke dienstverlening: Kleinverbruiker, O/W, Gem. Rendement	Elektriciteitsprijs voor dienstensector, kleinverbruikers	Bruto productie	Overige zakelijke dienstverlening	JA
Zon-PV	63	Overige zakelijke dienstverlening: Kleinverbruiker, O/W, Laag Rendement	Elektriciteitsprijs voor dienstensector, kleinverbruikers	Bruto productie	Overige zakelijke dienstverlening	JA
Zon-PV	65	Overige zakelijke dienstverlening: Kleinverbruiker, O/W, Hoog Rendement	Elektriciteitsprijs voor dienstensector, kleinverbruikers	Bruto productie	Overige zakelijke dienstverlening	JA

Als een techniek aanspraak maakt op de SDE+, uit bijvoorbeeld 2017, betekent dit niet dat hij direct hernieuwbare energie produceert in dat jaar. Er is een vertraging. Dit worden realisatietijden genoemd. Deze waarden zijn in RESolve-E gehele jaren en kunnen in principe per techniek-band en ook per jaar gespecificeerd worden. Waarden kunnen per jaar gespecificeerd worden omdat de realisatietijd van sommige technieken fluctueert. In het geval van, bijvoorbeeld, wind op zee is de realisatie sneller dan een aantal jaren geleden. De gebruiker heeft de mogelijkheid om dit dan ook in te stellen, waarbij enkel het jaar van verandering wordt aangegeven. Bijvoorbeeld voor Wind op land band 8: vanaf 2011 is de realisatietijd 2 jaar, maar vanaf 2017 is de realisatietijd 1 jaar, zie Tabel 16.

Tabel 16: Realisatietijd voor wind op land per band vanaf 2011

Technologie	Band	Jaar	Realisatietijd
Wind op land	5	2011	4
Wind op land	6	2011	3
Wind op land	7	2011	3
Wind op land	8	2011	2
Wind op land	8	2017	1
Wind op land	10	2011	4
Wind op land	11	2011	4
Wind op land	12	2011	4
Wind op land	13	2011	4

Voor een aantal technieken is er een soortgelijke tabel als Tabel 16 maar dan zonder de kolom 'Band'. Bijvoorbeeld voor wind op zee wordt er vanuit gegaan dat voor alle banden de realisatietijd hetzelfde is. Verder is er ook nog een tabel waar naast de kolom Band ook de kolom Jaar ontbreekt. Bijvoorbeeld voor waterkracht wordt aangenomen dat de realisatietijd altijd 3 jaar is. De realisatietijden worden in lijn gebracht met de realisatietijden die RVO.nl aangeeft in de Korte Termijn Raming (KTR) die RVO.nl elk jaar uitvoert voor de KEV.

Andere belangrijke parameters die nodig zijn om de dynamiek tussen de SDE+ openstellingsruimte en de werkelijke hernieuwbare productie goed te krijgen zijn realisatiepercentages. Een realisatiepercentage geeft de kans weer dat een project dat een SDE+ toekenning heeft daadwerkelijk gaat produceren. De percentages worden niet binnen het model zelf uitgerekend, maar zijn afkomstig van de KTR van RVO.nl. Ze kunnen per techniek-band en jaar verschillen. In Tabel 17 zijn de realisatiefactoren te vinden voor grootschalige biomassa-boilers die snoei- en dunningshout als brandstof gebruiken. Zoals valt te zien fluctueert het realisatiepercentage behoorlijk.

Tabel 17: Realisatiefactoren voor Biomassaketels ≥ 5 MWth voor band 25 (snoei- en dunningshout).

Technologie	Band	Jaar	RealisatieFactor
Biomass boiler ≥ 5 MWth	25	2011	0.8
Biomass boiler ≥ 5 MWth	25	2012	0.65
Biomass boiler ≥ 5 MWth	25	2013	0.69
Biomass boiler ≥ 5 MWth	25	2014	0.51
Biomass boiler ≥ 5 MWth	25	2015	0.87
Biomass boiler ≥ 5 MWth	25	2016	0.87
Biomass boiler ≥ 5 MWth	25	2017	0.64

Deze realisatiepercentages worden in het model gebruikt voor het budgetbeslag: welk deel van het SDE+ budget neemt een techniek-band in beslag. Hieronder staat een rekenvoorbeeld om dit te verduidelijken.

Rekenvoorbeeld:

Volgens de SDE+ brochure van RVO uit 2017 (RVO, 2017) gold er voor de categorie 'Ketels op vaste of vloeibare biomassa ≥ 5 MWth' een basisbedrag van 4,3 €/kWh. De basisenergieprijs was 1,2 €/kWh. Dit betekent dat de onrendabele top die gebruikt wordt voor de budgetberekening $4,3 - 1,2 = 3,1$ €/kWh is. Dit is gelijk aan 31 €/MWh. Als RESolve-E berekent dat er vanuit de SDE+ 2017 350.000 MWh/jaar productie kan worden geleverd door middel van deze ketels op snoei- en dunningshout betekent dit dat er:

$$350.000 \text{ MWh} \times 12 \times 31 \text{ €/MWh} = 130.200.000 \text{ €}$$

is 130,2 Miljoen € moet worden gereserveerd. Hierbij betekent de 12 dat er gedurende 12 jaar SDE+ subsidie wordt verstrekt. Echter, dit betreft projecten die tot realisatie komen. Omdat voor deze categorie in de SDE+ een realisatiepercentage van 64% geldt, hebben er $1/0.64$ keer zoveel projecten een aanvraag gedaan. Dit betekent dat er: $130,2 \text{ Miljoen €} / 64\% = 203,4 \text{ Miljoen €}$ moet worden gereserveerd. Van de totale openstellingruimte van 12.000 Miljoen €, wordt en dus een beslag van ruim 200 Miljoen gedaan door grote biomassaketels op snoei- en dunningshout.

Referenties

Algemene Rekenkamer (2015a), **Stimulering duurzame energie productie (SDE+) – Haalbaarheid en betaalbaarheid van beleidsdoelen**. Internet: <https://www.rekenkamer.nl/onderwerpen/klimaat-energie-en-milieu/documenten/rapporten/2015/04/16/stimulering-van-duurzame-energieproductie>

Algemene Rekenkamer (2015b), **Modelberekening ECN – Achtergronddocument bij het rapport 'Stimulering duurzame energie productie (SDE+) – Haalbaarheid en betaalbaarheid van beleidsdoelen'**. Internet: <https://www.rekenkamer.nl/onderwerpen/klimaat-energie-en-milieu/documenten/publicaties/2015/04/16/modelberekening-ecn>

Cameron, L.R., J. van Stralen en K.C. Veum (2011), **WindSpeed D6.1 Scenarios for off-shore wind including spatial interactions and grid issues**, ECN-O--11-066. Internet: <https://www.ecn.nl/publicaties/ECN-O--11-066>

CBS (2018), **Hernieuwbare energie in Nederland 2017**, ISBN 978-90-357-2560-7. Internet: <https://www.cbs.nl/nl-nl/publicatie/2018/40/hernieuwbare-energie-in-nederland-2017>.

Dalla Longa, F. (2012), **Cost-efficient and Sustainable Deployment of Renewable Energy Sources towards the 20% target by 2020, and beyond**. Internet: https://ec.europa.eu/energy/intelligent/projects/sites/iee-projects/files/projects/documents/res4less_report_on_possible_valleys_of_opportunity_en.pdf

Daniëls, B.W. & M.A. Uytterlinde (2005), **ADMIRE-REBUS: modeling the European market for renewable electricity**, Energy 30: 2596-2616, doi:10.1016/j.energy.2004.07.013. Internet: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544204003093>.

De Noord, M. & E.J.W. van Sambeek (2003), **Onrendabele top berekeningsmethodiek**, ECN-C--03-077. Internet: <https://www.ecn.nl/publicaties/PdfFetch.aspx?nr=ECN-C--03-077>.

ECN/PBL/CBS (2014), **Nationale Energieverkenning 2014**, Projectcoördinatie Michiel Hekkenberg en Martijn Verdonk. Internet: http://www.pbl.nl/sites/default/files/cms/publicaties/pbl-2014-nationale-energieverkenning-2014_01364.pdf

ECN/PBL/CBS (2015), **Nationale Energieverkenning 2015**, Projectcoördinatie Koen Schoots en Pieter Hammingh. Internet: http://www.pbl.nl/sites/default/files/cms/publicaties/pbl-2015-nationale-energieverkenning-2015_01712.pdf

ECN/PBL/CBS (2016), **Nationale Energieverkenning 2016**, Projectcoördinatie Koen Schoots, Michiel Hekkenberg en Pieter Hammingh. Internet: http://www.pbl.nl/sites/default/files/cms/publicaties/pbl-2016-nationale-energieverkenning-2016_2070.PDF

ECN/PBL/CBS (2017), **Nationale Energieverkenning 2017**, Projectcoördinatie: Koen Schoots; Michiel Hekkenberg; Pieter Hammingh. Internet: http://www.pbl.nl/sites/default/files/cms/publicaties/pbl-2017-nationale-energieverkenning-2017_2625.PDF

EZK (2018a), **Kamerbrief Stimuleren Duurzame Energieproductie (SDE+) 2019**, 21 december 2018. Kenmerk: 18291100. Internet: <https://www.rijksoverheid.nl/ministeries/ministerie-van-economische-zaken-en-klimaat/documenten/kamerstukken/2018/12/21/kamerbrief-over-stimuleren-duurzame-energieproductie-sde-2019>

EZK (2018b), **Kamerbrief Verbreding van de SDE+**, 16 november 2018. Kenmerk: 18268728. Internet: <https://www.rijksoverheid.nl/documenten/kamerstukken/2018/11/26/kamerbrief-over-verbreding-van-de-sde>

Elbersen, B.S., I. Strarisky, G. Hengeveld & L. Jeurissen (2015), **Outlook of spatial biomass value chains in EU28**. Deliverable 2.3 of the Biomass Policies project. IEE 12 835 SI2. 645 920.

Fristzsche, U.R. & L. Iriarte (2014), **Cost supply curves for medium- to longer-term potentials for sustainable biomass and bioenergy (pellets, biomethane, liquid biofuels) imports to the EU-27**. Deliverable 2.5 of the Biomass Policies project. IEE 12 835 SI2. 645 920.

Held, A., M. Ragwitz, F. Senfuß, G. Resch, L. Olmos, A. Ramos, M. Rivier (2018), **How can the renewables targets be reached cost-effectively? Policy options for the development of renewables and the transmission grid**. Energy Policy 116: 112-126, doi: 10.1016/j.enpol.2018.01.025. Internet: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030142151830034X>.

Huber, C., T. Faber and G. Resch (2006), **Prospects of Renewable Energy Development in the European Electricity Sector: Results of the simulation Tool Green-X**, Energy & Environment 17(6): 929-950, doi:10.1260/095830506779398920. Internet: <https://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1260/095830506779398920>

IEA (2017), World Energy Outlook 2017

Lensink, S.M. & C.L. van Zuijlen (2014), **Eindadvies basisbedragen SDE+ 2015**. ECN. Oktober 2014. ECN-E--14-035. Internet: <https://www.ecn.nl/publicaties/PdfFetch.aspx?nr=ECN-E--14-035>.

Lensink, S.M., Cleijne, J.W., Beurskens, L.W.M., Uslu, A., Cremers, M., Lemmens, J., Mast, E., Schulze, P., Mijnlief, H. (2017) **Eindadvies basisbedragen SDE+ 2018**, ECN-E--17-048. Internet: <https://www.ecn.nl/publicaties/ECN-E--17-048>.

Lensink, S. (2019), **Eindadvies basisbedragen SDE+ 2019**, PBL-3342, PBL: Den Haag. Internet: <https://www.pbl.nl/publicaties/eindadvies-basisbedragen-sde-2019>.

Lensink, S. en K. Schoots (2021), **Eindadvies basisbedragen SDE++ 2021**, PBL-4032, PBL: Den Haag. Internet: <https://www.pbl.nl/publicaties/eindadvies-basisbedragen-sde-plus-plus-2021>.

PBL/CBS/ECN-TNO (2018), **Klimaat- en Energieverkenning 2019**, Projectcoördinatie Pieter Hammingh, Marijke Menkveld, Bert Daniëls, Paul Koutstaal, Klara Schure, Michiel Hekkenberg. Internet: <https://www.pbl.nl/sites/default/files/downloads/pbl-2019-klimaat-en-energieverkenning-2019-3508.pdf>.

PBL/CBS/ECN-TNO (2020), **Klimaat- en Energieverkenning 202-**, Projectcoördinatie

Koen Schoots en Pieter Hammingh. Internet: <https://www.pbl.nl/sites/default/files/downloads/pbl-2020-klimaat-en-energieverkenning2020-3995.pdf>.

PBL OT. Internet: <https://www.pbl.nl/sde/datasets>

RED (2009), **European Parliament and the Council. Directive 2009/29/EC: On the promotion of the use of energy from renewable sources**. Internet: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32009L0028&from=EN>.

RVO SDE+. Internet: <https://www.rvo.nl/subsidies-regelingen/stimulering-duurzame-energieproductie>.

RVO (2015) **Protocol Monitoring Hernieuwbare Energie – herziening 2015**, publicatienummer: RVO-268-1501/BR-DUZA. <https://www.rvo.nl/sites/default/files/Protocol%20Monitoring%20HE%20Interactief%20V3.pdf>

RVO (2017) **SDE+ voorjaar 2017**. Internet: <https://www.rvo.nl/sites/default/files/2017/02/Brochure%20SDE%20voorjaar%202017.pdf>.

SER (2013) **Energieakkoord voor duurzame groei**. Internet: <https://www.ser.nl/-/media/ser/downloads/overige-publicaties/2013/energieakkoord-duurzame-groei.pdf>.

Van Stralen, J., A. Uslu and C. Panoutsou (2016) **Future policy formation towards resource efficiency - Effects of policy measures on selected priority value chains in eleven Member States**. Deliverable 2.3 of the Biomass Policies project. IEE 12 835 SI2. 645 920.

Van Stralen, J. U. Uslu, F. Dalla Longa and C. Panoutsou (2013) **The role of biomass in heat, electricity, and transport markets in the EU27 under different scenarios** BioFPR 7(2): 147-163. Internet: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/bbb.1381>

Verdonk, M. en W. Wetzels. **Referentieraming energie en emissies: actualisatie 2012. Energie en emissies in de jaren 2012, 2020 en 2030**, PBL-publicatienummer: 500278001. Internet: https://www.pbl.nl/sites/default/files/cms/publicaties/PBL_2012_Referentieraming-energie-en-emissies-2012_500278001.pdf

Uslu, A., J. van Stralen, L.W.M. Beurskens, F. Dalla Longa (2012) **Use of sustainable biomass to produce electricity, heat and transport fuels in EU27**, ECN-E--12-021. Internet: <https://www.ecn.nl/publicaties/ECN-E--12-021>

Uyterlinde, M.A., et al.(2003) **Renewable Electricity Market Developments in the European Union**, ECN-C--003-082. Internet: <https://www.ecn.nl/publicaties/ECN-C--03-082>

Uyterlinde, M.A., M. Junginger, H.J. de Vries, A.P.C. Faaij and W.C. Turkenburg (2007) **Implications of technological learning on the prospects of specific renewable energy technologies in Europe**, Energy Policy 35: 4072-4087, doi.org/10.1016/j.enpol.2007.02.004. Internet: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421507000444>

Volkers, C.H. (2013) **Leaflet Nationale Energy Outlook Modelling System**, ECN-F--13-046. Internet: <https://www.ecn.nl/publicaties/PDFfetch.aspx?nr=ECN-F--13-046>.

Voogt, M.H., M.A. Uytterlinde, M. de Noord, K. Skytte, L.H. Nielsen, M. Leonardi, M. Whiteley, M. Chapman (2001) **Renewable energy burden sharing – REBUS. Effects of burden sharing and certificate trade on the renewable electricity market in Europe**, ECN-C--01-030. Internet: <https://www.ecn.nl/publicaties/ECN-C--01-030>

Van der Welle A.J., et al. (2017) **Achtergronddocument onzekerheden Nationale Energieverkenning 2017**, ECN-E—17-049. Internet: https://www.pbl.nl/sites/default/files/rest/cms/publicaties/ecn-pbl-2017-achtergronddocument-onzekerheden-nev-2017_3202.pdf

Van der Welle A. en S. Lensink (2019) **Definitieve correctiebedragen 2018 voor de SDE+**, PBL-3648, PBL: Den Haag. Internet: https://www.pbl.nl/sites/default/files/downloads/pbl-2019-definitieve-correctiebedragen-2018-sde-plus_3648.pdf