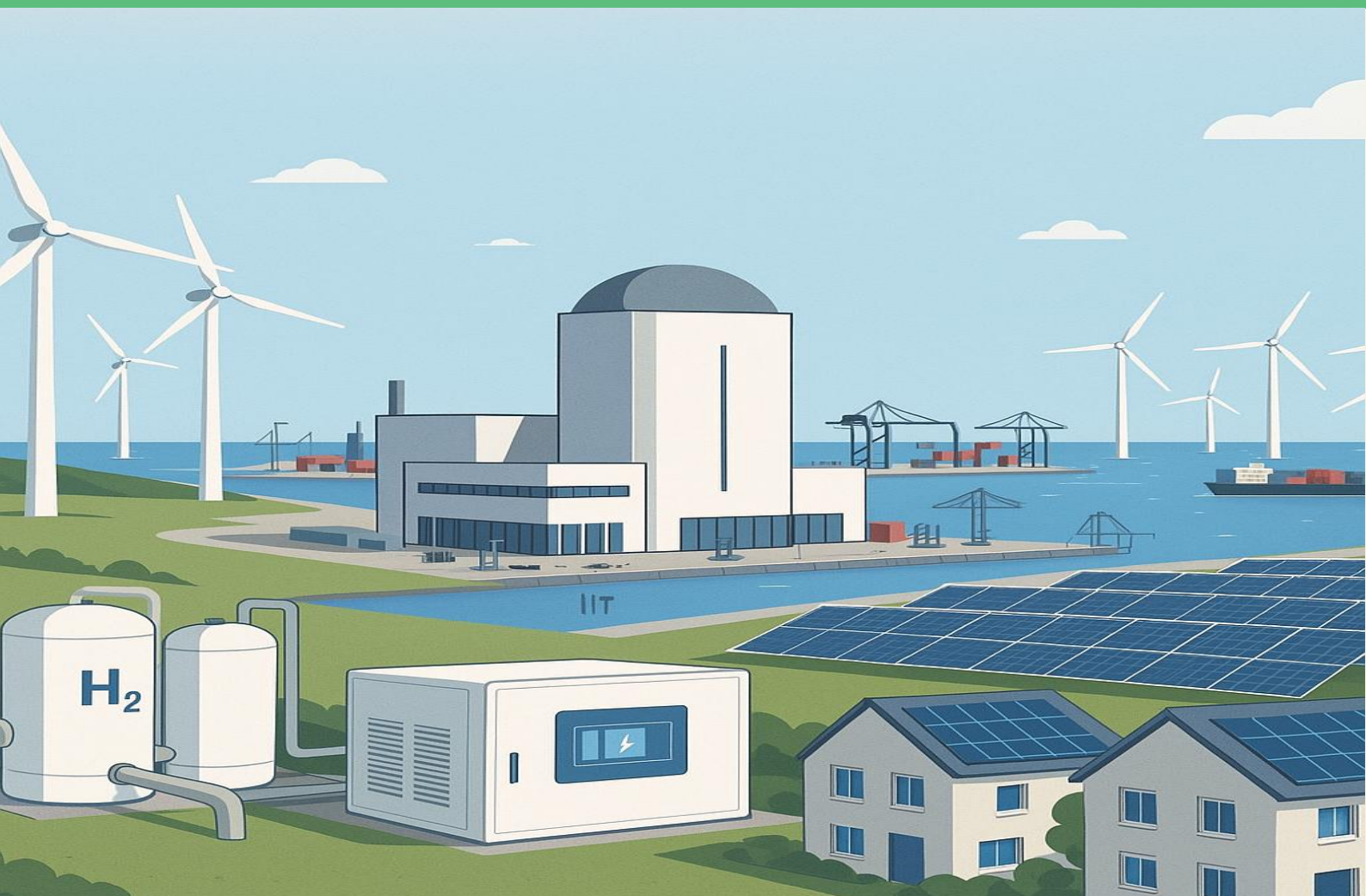




BIJLAGEN

Milieuimpactanalyse kernenergie in de energiemix

Klant: Ministerie van Klimaat en Groene Groei

Projectnummer: 724276

Status: Definitief/1

Datum: 11 juli 2025

PONDERA CONSULT B.V.

Amsterdamseweg 13
6814 CM Arnhem
Netherlands
Industry & Buildings
Kamer van Koophandel nr.: 08156154

Telefoon: +31 (0)88-7663372
E-mail: info@ponderaconsult.com
Website: ponderaconsult.com

Titel document:	Milieuimpactanalyse kernenergie in de energiemix
Projectnummer:	724276
Status:	Definitief/1
Datum:	11 juli 2025
Projectnaam:	Milieuimpactanalyse kernenergie in de energiemix
Projectnummer:	724276
Auteur(s):	Cato van de Meeberg, Martijn ten Klooster, Joeri Vendrik, Marieke Nauta
Classificatie:	Open

Behoudens andersluidende afspraken met de Opdrachtgever, mag niets uit dit document worden verveelvoudigd of openbaar gemaakt of worden gebruikt voor een ander doel dan waarvoor het document is vervaardigd. Pondera Consult B.V. aanvaardt geen enkele verantwoordelijkheid of aansprakelijkheid voor dit document, anders dan jegens de Opdrachtgever.

Let op: dit document bevat mogelijk persoonsgegevens van medewerkers van Pondera Consult B.V. Voordat publicatie plaatsvindt (of anderszins openbaarmaking), dient dit document te worden geanonimiseerd of dient toestemming te worden verkregen om dit document met persoonsgegevens te publiceren. Dit hoeft niet als wet- of regelgeving anonimiseren niet toestaat.

Inhoudsopgave

1	Bijlage – Vermogens en aantal installaties per energiesysteem variant	1
1.1	Vermogens per energiesysteem variant	1
1.2	Aantal installaties per energiesysteemvariant van standaardeenheid	3
2	Bijlage – Verdiepende memo energiesysteem scenario's	5
2.1	Introductie algemeen	5
2.2	Introductie varianten	5
2.3	Keuze toekomstbeelden	6
2.4	Modellering en uitgangspunten	8
2.4.1	Modellering	8
2.4.2	Uitgangspunten	9
2.5	Resultaten	11
2.5.1	Totaaloverzicht vermogens opwek en flexibiliteit	12
2.5.2	Impact op productie energie	16
2.5.3	Impact kernenergie op vermogen (en inzet) flexibele bronnen	18
2.5.4	Impact op importafhankelijkheid	20
2.5.5	Figuren energiemix in verschillende varianten	20
2.6	Kwalitatieve beschouwingen	23
2.6.1	Impact varianten met verschillende hoeveelheid kernenergie op de energie-infrastructuur	23
2.6.2	Impact van wijze van inzet kernenergie op resultaten	24
2.6.3	Impact kernenergie op energiemix bij andere ontwikkeling vraag en (overig) aanbod energie	26
2.6.4	Impact kernenergie op leveringszekerheid energie	27
3	Bijlage – Verdere verdieping bepaalde milieueffecten	29
3.1	Hinder door bouw	29
3.2	Omgevingsfactoren en veiligheid	30
3.3	Veiligheidsperceptie kernenergie	31
3.4	Gevoeligheid voor geopolitieke veranderingen	31
3.5	Impact in de grondstofketen	32
3.6	Recycling van materialen	33

1 Bijlage – Vermogens en aantal installaties per energiesysteem variant

1.1 Vermogens per energiesysteem variant

Varianten A: in de plaats van met wind op land en zon

	0,5 GW kern	3,7 GW kern	8,3 GW kern	0 GW kern
Zon-PV (GW)	144	129	113	147
Op dak (GW)	99	89	78	101
Op land (GW)	45	40	35	46
Wind op land (GW)	22	18	11	23
Wind op zee (GW)	68	68	68	68
Systeembatterijen (GW)	42	39	35	42
Elektrolyzers (GW)	37	35	33	37
Op zee (GW)	22	21	20	23
Op land (GW)	13	14	13	15
Regelbare centrales (GW)	22	18	14	22
Waterstofopslag (TWh)	18	16	15	18

Varianten B: in de plaats van met wind op zee

	0,5 GW kern	3,7 GW kern	8,3 GW kern	0 GW kern
Zon-PV (GW)	117	117	117	117
Op dak (GW)	80	80	80	80
Op land (GW)	36	36	36	36
Wind op land (GW)	13	13	13	13
Wind op zee (GW)	79	73	65	80
Systeembatterijen (GW)	37	36	36	37
Elektrolyzers (GW)	36	35	32	37
Op zee (GW)	22	21	19	22
Op land (GW)	14	14	13	15
Regelbare centrales (GW)	22	18	14	22
Waterstofopslag (TWh)	15	15	14	15

Varianten C: gelijke productie overig

	0,5 GW kern	3,7 GW kern	8,3 GW kern	0 GW kern
Zon-PV (GW)	117	117	117	117
Op dak (GW)	80	80	80	80
Op land (GW)	36	36	36	36
Wind op land (GW)	13	13	13	13
Wind op zee (GW)	68	68	68	68
Systeembatterijen (GW)	36	36	36	36
Elektrolyzers (GW)	31	32	33	31
Op zee (GW)	19	19	20	19
Op land (GW)	12	13	13	12
Regelbare centrales (GW)	22	18	14	22
Waterstofopslag (TWh)	9	10	18	9

1.2 Aantal installaties per energiesysteemvariant van standaardeenheid¹

Varianten A: in de plaats van met wind op land en zon

	0,5 GW kern	3,7 GW kern	8,3 GW kern	0 GW kern
Zon op dak	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.
Zon op land	1288	1153	1010	1308
Wind op land	491	394	254	509
Wind op zee	68	68	68	68
Kernenergie	1	3	12	0
Van 0,5 GW	1	1	1	0
Van 1,6 GW	0	2	4	0
Van 200 MW	0	0	7	0
Systeembatterijen (GW)	210	193	177	212
Elektrolyzers	74	70	65	74
Op zee	45	42	40	45
Op land	29	27	26	29
Regelbare centrales	22	18	14	22

Varianten B: in de plaats van met wind op zee

	0,5 GW kern	3,7 GW kern	8,3 GW kern	0 GW kern
Zon op dak	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.
Zon op land	1042	1042	1042	1042
Wind op land	289	289	289	289
Wind op zee	79	73	65	80
Kernenergie	1	3	12	0
Van 0,5 GW	1	1	1	0
Van 1,6 GW	0	2	4	0
Van 200 MW	0	0	7	0
Systeembatterijen (GW)	184	181	179	185
Elektrolyzers	73	69	64	74

¹ De standaard eenheid per installatie staat beschreven in paragraaf 4.1 van het rapport.

	0,5 GW kern	3,7 GW kern	8,3 GW kern	0 GW kern
<i>Op zee</i>	44	42	39	45
<i>Op land</i>	29	27	25	29
Regelbare centrales	22	18	14	22

Varianten C: gelijke productie overig

	0,5 GW kern	3,7 GW kern	8,3 GW kern	0 GW kern
Zon op dak	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.
Zon op land	1042	1042	1042	1042
Wind op land	289	289	289	289
Wind op zee	68	68	68	68
Kernenergie	1	3	12	0
<i>Van 0,5 GW</i>	1	1	1	0
<i>Van 1,6 GW</i>	0	2	4	0
<i>Van 200 MW</i>	0	0	7	0
Systeembatterijen (GW)	181	181	181	181
Elektrolyzers	62	64	67	62
<i>Op zee</i>	38	39	41	38
<i>Op land</i>	24	25	26	24
Regelbare centrales	22	18	14	22

2 Bijlage – Verdiepende memo energiesysteem scenario's

2.1 Introductie algemeen

Om milieueffecten van de energiemix met verschillende hoeveelheden kerncentrales te kunnen bepalen, is het nodig om te weten wat de uitgangssituatie van het energiesysteem is. Hiertoe zijn verschillende varianten van het energiesysteem gemodelleerd. De varianten dienen als middel om milieueffecten te kunnen bepalen.

Om tot realistische alternatieven te komen is een volledige doorrekening van energetische varianten met en zonder kernenergie gedaan. Deze varianten geven de spreiding aan van mogelijke ontwikkelingen. Daarbij is niet alleen met de hoeveelheid kerncentrales gevarieerd, maar ook met de alternatieve invulling van aanbod van energie: inzet op meer kernenergie kan bijvoorbeeld resulteren in minder windturbines op zee, maar kan ook resulteren in minder opwek op land (wind/zon).

In de modellering zijn alle componenten die relevant zijn voor het bepalen van milieueffecten meegenomen: dat betreft naast energie-opwekinstallaties ook ondersteunende installaties, zoals bijvoorbeeld batterijen en elektrolyzers. Het zichtjaar is 2050 en er is uitgegaan van een klimaat neutraal energiesysteem in dat jaar. In hoofdstuk 2.2 van deze bijlage worden de varianten geïntroduceerd, in hoofdstuk 2.3 wordt ingegaan op de keuze van de onderzochte toekomstbeelden. In hoofdstuk 2.4 wordt de modellering en de belangrijkste uitgangspunten besproken. Hoofdstuk 2.5 bevat de resultaten van de doorgekende varianten en hoofdstuk 2.6 bevat een aantal kwalitatieve beschouwingen.

De belangrijkste bevindingen voor de energetische varianten zijn ook te vinden in hoofdstuk 3 van het hoofdrapport. Deze bijlage is een uitgebreide versie hiervan.

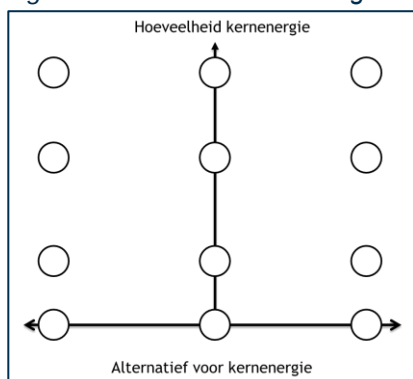
2.2 Introductie varianten

In dit onderzoek zijn vier mogelijke scenario's uitgewerkt, met een verschillende mate van gebruik van kernenergie. Dat gaat om de volgende scenario's:

- Behoud van de bestaande kerncentrale in Borssele (KCB) – 0,5 GW
- Behoud bestaande KCB-centrale en twee nieuwe centrales van het grootste type – 3,7 GW
- Uitrol volgens het 'Zeer Sterke Knopen met Kernenergie'-scenario van PEH – 8,3 GW
- Geen kerncentrales

Er is voor de modellering van de energetische varianten uitgegaan van bovengenoemde vermogens van kerncentrales. Om een goed beeld te krijgen van de milieueffecten van het energiesysteem bij verschillende hoeveelheden kernenergie, is het nodig om een beeld te hebben van een realistische alternatieve situatie van het energiesysteem. Het is te verwachten dat wanneer er niet of minder op kerncentrales ingezet gaat worden, alternatieve bronnen gebruikt zullen worden. Voor de varianten is uitgegaan van een vaste vraag naar elektriciteit in dat jaar, maar is per kernenergie-scenario gevarieerd met de invulling aan de aanbodkant. Hoewel het Nationaal Plan Energiesysteem (NPE) een beeld geeft van de huidige politieke ambitie voor het energiesysteem in 2050, zijn er veel (financiële, beleidsmatige en technische) factoren onzeker voor de periode tot 2050. Daarmee is het onlogisch om één alternatief te geven, per kernenergie-scenario. Dit betekent dat een tweede as toegevoegd wordt, naast de as 'hoeveelheid kernenergie', namelijk de as 'wat als alternatief voor kernenergie'. Dit wordt geïllustreerd in onderstaande figuur.

Figuur 1 – Schematisch weergave ‘assen’ energetische varianten



Door verschillende varianten uit te werken per hoeveelheid kernenergie kan goed in beeld gebracht worden hoe de milieueffecten van een energiesysteem met kernenergie zich verhouden tot die van een energiesysteem zonder kernenergie, bij verschillende variaties. Wel wordt in elk variant uitgegaan van klimaat neutraliteit in 2050 en dat vraag en aanbod op elk moment van het jaar in balans zijn.

2.3 Keuze toekomstbeelden

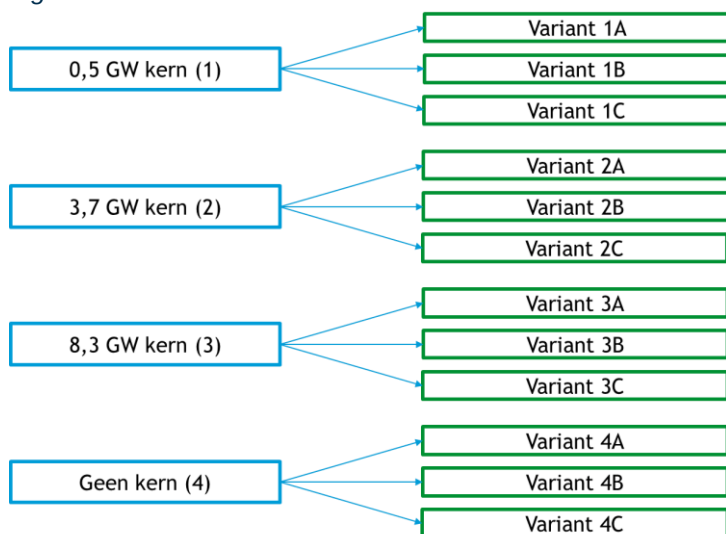
Zoals in de introductie toegelicht, is er voor elk van de vier kernenergie-scenario's uitgegaan van verschillende alternatieve invullingen aan de aanbodkant. Hierbij wordt uitgegaan van wat in onze ogen de meest realistische invulling zal zijn. Dit leidt tot drie mogelijke invullingen:

- **Variant A:** kernenergie in plaats van hernieuwbare wind op land en zon. Dit betekent dat bij meer kernenergie minder hernieuwbare wind op land en zon wordt gerealiseerd, en vice versa. Omdat wind op land en zon-pv complementair aan elkaar zijn, wordt aangenomen dat er van beide minder zal zijn.
- **Variant B:** kernenergie in plaats van wind op zee. Dit betekent dat bij meer kernenergie minder wind op zee wordt gerealiseerd, en vice versa.
- **Variant C:** gelijke productie overige bronnen. Ondanks het gebruik van kernenergie blijft er evenveel geïnstalleerd vermogen van windturbines (op land en op zee) en zonnepanelen. Hierdoor neemt de totale productie van elektriciteit toe (of af bij minder kernenergie). Bij de C varianten is de totale productie van elektriciteit dus anders dan bij de A en B varianten.

Naast opwek zijn flexibele bronnen noodzakelijk om vraag en aanbod van elektriciteit en waterstof elk moment van het jaar in balans te brengen. De hoeveelheid opgesteld vermogen van flexibele bronnen (zoals regelbare centrales, opslag elektriciteit, elektrolyzers, waterstofopslag) en de inzet van deze installaties zien wij als gevolg van de inzet van bronnen van elektriciteit in combinatie met de vraag en de hoeveelheid import en export. Meer hierover volgt in hoofdstuk 2.4.

In Figuur 2 staat een schematisch overzicht van de varianten.

Figuur 2 – Schematisch overzicht varianten



Een korte toelichting bij dit figuur:

- **Variant 1A:** in deze variant is er 0,5 GW geïnstalleerd vermogen aan kern. Doordat kernenergie het opneemt tegen wind op land en zon, zorgt meer kernenergie voor minder hernieuwbare opwek op land en vice versa.
- **Variant 1B:** in deze variant is er 0,5 GW geïnstalleerd vermogen aan kern. Doordat kernenergie het opneemt tegen wind op zee, zorgt meer kernenergie voor minder wind op zee en vice versa.
- **Variant 1C:** in deze variant is er 0,5 GW geïnstalleerd vermogen aan kern. De inzet op kernenergie heeft geen effect op inzet op andere energiebronnen.
- **Variant 2A:** in deze variant is er 3,7 GW geïnstalleerd vermogen aan kern. Doordat kernenergie het opneemt tegen wind op land en zon, zorgt meer kernenergie voor minder hernieuwbare opwek op land en vice versa.
- **Variant 2B:** in deze variant is er 3,7 GW geïnstalleerd vermogen aan kern. Doordat kernenergie het opneemt tegen wind op zee, zorgt meer kernenergie voor minder wind op zee en vice versa.
- **Variant 2C:** in deze variant is er 3,7 GW geïnstalleerd vermogen aan kern. De inzet op kernenergie heeft geen effect op inzet op andere energiebronnen.
- **Variant 3A:** in deze variant is er 8,3 GW geïnstalleerd vermogen aan kern. Doordat kernenergie het opneemt tegen wind op land en zon, zorgt meer kernenergie voor minder hernieuwbare opwek op land en vice versa.
- **Variant 3B:** in deze variant is er 8,3 GW geïnstalleerd vermogen aan kern. Doordat kernenergie het opneemt tegen wind op zee, zorgt meer kernenergie voor minder wind op zee en vice versa.
- **Variant 3C:** in deze variant is er 8,3 GW geïnstalleerd vermogen aan kern. De inzet op kernenergie heeft geen effect op inzet op andere energiebronnen.
- **Variant 4A:** in deze variant zijn er geen kerncentrales. Doordat kernenergie het opneemt tegen wind op land en zon, zorgt meer kernenergie voor minder hernieuwbare opwek op land en vice versa.
- **Variant 4B:** in deze variant zijn er geen kerncentrales. Doordat kernenergie het opneemt tegen wind op zee, zorgt meer kernenergie voor minder wind op zee en vice versa.
- **Variant 4C:** in deze variant zijn er geen kerncentrales. De inzet op kernenergie heeft geen effect op inzet op andere energiebronnen.

Bij de beoordeling van de verschillende varianten dient in acht te worden genomen dat A, B en C variaties uit verschillende varianten (met verschillende hoeveelheden kernenergie) niet zondermeer met elkaar kunnen worden vergeleken. De variaties A, B en C verschillen namelijk niet alleen op de hoeveelheid kernenergie maar ook de invulling van de alternatieve hernieuwbare opwek (A ten opzichte van B) of de totale hoeveelheid energie-opwek (A en B ten opzichte van variatie C).

Het is wel mogelijk om de A, B en C varianten met eenzelfde hoeveelheid kernenergie te vergelijken, om in te schatten wat de (relatieve) milieueffecten zijn van de verschillende alternatieven voor kernenergie (opwek op land, opwek op zee of geen wijzigingen in overige opwek).

Voor de modellering is het Netbeheer Nederland scenario Koersvaste Middenweg, waarin 6,9 GW aan vermogen van kerncentrales is opgenomen (Netbeheer Nederland, 2025), het startpunt. Dat betekent dat variant 1, 2 en 4 een vermindering van de hoeveelheid kerncentrales betekent, en variant 3 juist een toename ten opzichte van dit startpunt.

2.4 Modellering en uitgangspunten

Deze paragraaf gaat in op de modellering van de energetische varianten en bevat de belangrijkste uitgangspunten.

Voor de twaalf varianten is een integrale doorrekening van de energiemix in Nederland gemaakt. Dit houdt in:

- Vraag en aanbod van alle sectoren worden meegenomen.
- Verschillende energiedragers worden meegenomen (elektriciteit, waterstof, methaan, warmte)
- Ook de tijdscomponent wordt meegenomen doordat gerekend wordt met uurlijkse vraag- en aanbodprofielen.
- Er wordt een 'kloppend' energiesysteem doorgerekend waarbij vraag en aanbod op elk moment in balans zijn, voor alle energiedragers. Daarbij wordt doorgerekend welke bronnen van flexibiliteit, en welke inzet hiervan, noodzakelijk is om ten alle tijden aan de vraag te voorzien. Daarbij worden ook import en export meegenomen.
- De inzet van bronnen van productie en flexibiliteit wordt bepaald door de markt, die ook gemodelleerd wordt.

2.4.1 Modellering

Het Energietransitiemodel (ETM)² is een onafhankelijk, integraal energiemodel dat gebruikt wordt om het energiesysteem van gemeenten, provincies, regio's en landen door te rekenen. Het model is volledig *open source*, vrij toegankelijk en wordt gebruikt door overheden, bedrijven, NGO's en onderwijsinstellingen in verschillende landen. Het model wordt ontwikkeld door Quintel en ondersteund door meer dan veertig partners, waaronder EBN, Gasunie, TenneT, Enexis en het ministerie van Economische Zaken en Klimaat.

In het ETM kunnen aannames en plannen ingesteld worden over de ontwikkeling van energievraag, energieaanbod, flexibiliteit en energieprijzen in een regio. Het model rekent vervolgens op uurbasis door wat de impact van deze ontwikkelingen is op het energiesysteem: wat gebeurt er met de energievraag, hoeveel energie wordt er binnen de regio opgewekt en hoeveel komt van buiten, is het systeem in balans,

² <https://energytransitionmodel.com/>

wat zijn de kosten en wat is de CO₂-voetafdruk? Het ETM maakt het mogelijk om plannen voor verschillende sectoren, dragers en gebieden te combineren tot één integraal, transparant en deelbaar beeld.

Het ETM wordt breed gebruikt voor de ontwikkeling van toekomstige energiescenario's, bijvoorbeeld voor de ontwikkeling van het scenario's van Netbeheer Nederland.

2.4.2 Uitgangspunten

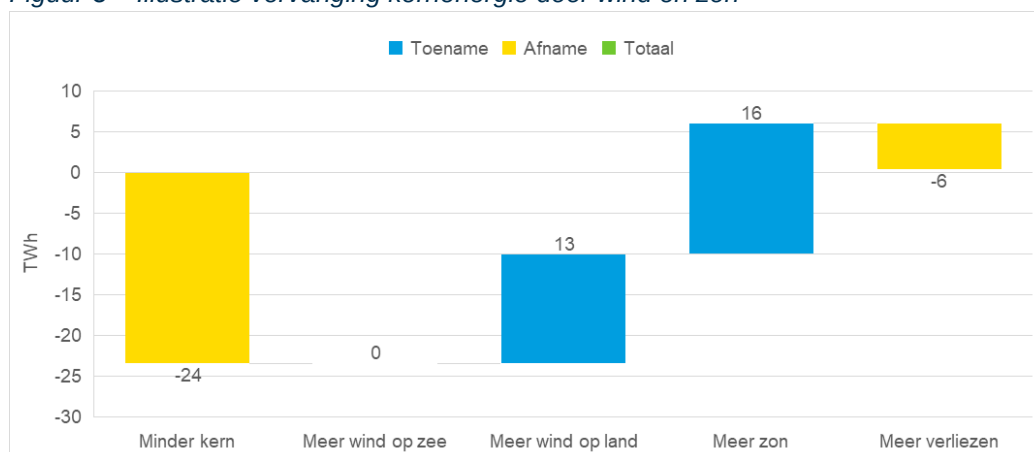
2.4.2.1 Uitgangspunten hoeveelheid opwek

Om de energiemix voor de twaalf varianten te kunnen doorrekenen met het ETM zijn uitgangspunten bepaald. De hoeveelheden opwek van wind (op land en op zee), zon-PV en kernenergie zijn inputs voor het model. Er wordt uitgegaan van een vaste energievraag (zo meer hierover).

Er zijn met 4 scenario's voor het opgestelde vermogen van kerncentrales. Voor de varianten is een aanname gedaan over hoeveel minder wind/zon-pv er zal zijn door de inzet van kerncentrales. Er is aangenomen dat 1 TWh productie 1 TWh alternatieve productie 'vervangt', waarbij gecorrigeerd wordt voor verliezen die optreden door opslag, omzetting en afschakeling (*curtailment*) om de effecten van een ander productieprofiel van kernenergie ten opzichte van wind en zon te ondervangen. In feite wordt dus aangenomen dat de totale hoeveelheid energievraag (in de vorm van elektriciteit, maar mogelijk ook waterstof) die ingevuld wordt met wind (op land en op zee), zon en kernenergie hetzelfde blijft. De reden hiervoor is dat op deze manier alternatieven eerlijk vergelijkbaar zijn, omdat het geheel aan productiebronnen een gelijke energievraag invult.

Dit wordt geïllustreerd in de onderstaande figuur waarbij de productie van wind, zon en kernenergie van variant 4A (zonder kernenergie) met variant 2A (met 3,7 GW kernenergie) vergeleken worden. In variant 4A wordt 24 TWh minder kernenergie geproduceerd, maar de toename van de productie van wind en zon is ongeveer 30 TWh, omdat de energieverliezen in variant 4A 6 TWh hoger liggen. Dat betekent dat 1 TWh kernenergie vervangen wordt door 1,25 TWh alternatieve productie (in dit geval wind op land en zon).

Figuur 3 – Illustratie vervanging kernenergie door wind en zon



Dit is relevant voor de varianten waarin gebruik van kernenergie wordt afgezet tegen gebruik van wind/zon-pv (varianten A en B, zie hoofdstuk 2.3), maar niet in de varianten waarin ondanks het gebruik van kernenergie de hoeveelheid wind/zon-pv niet kleiner wordt (variant C in hoofdstuk 2.3). In die varianten verandert de totale hoeveelheid aanbod van elektriciteit immers hoe dan ook.

2.4.2.2 Benodigde hoeveelheid flexibele bronnen

Flexibele bronnen zijn noodzakelijk om vraag en aanbod van elektriciteit en waterstof elk moment van het jaar in balans te brengen. De hoeveelheid opgesteld vermogen van flexibele bronnen als regelbare centrales, opslag elektriciteit, elektrolyzers, waterstofopslag en de inzet van deze installaties zien wij als gevolg van de inzet van bronnen van elektriciteit in combinatie met de vraag en de hoeveelheid import en export en zijn op de volgende wijze bepaald:

- **Regelbare centrales (in de vorm van waterstofcentrales).** Elke MW kernenergie vervangt één MW waterstofcentrales, aangezien een kerncentrale dezelfde rol kan vervullen (leveren elektriciteit op momenten met weinig wind en zon).
- **Opslag elektriciteit.** Opslag van elektriciteit is noodzakelijk om korte-termijn onbalans tussen vraag en aanbod op te vangen. De onbalans tussen vraag en aanbod bepaalt de inzet van opslag op uurbasis en welk vermogen aan opslag noodzakelijk is.
- **Elektrolyse.** Elektrolyzers zetten lange-termijn overschotten van elektriciteit om in waterstof. Deze zijn niet geschikt voor de pieken aan overschotten (die een beperkt aantal uren per jaar voorkomen), aangezien het vanwege de hoge investeringskosten van elektrolyzers wenselijk is om veel draaiuren te maken. Het vermogen aan elektrolyzers wordt gebaseerd op het gemiddeld vermogen van de overschotten aan elektriciteit.
- **Vraagsturing en power-to-heat.** De vermogens voor vraagsturing en power-to-heat wordt gelijk gehouden ten opzichte van het scenario Koersvaste Middenweg aangezien dit vooral afhankelijk is van de vraag naar energie en niet van het aanbod (en alleen het aanbod wijzigt, niet de vraag).
- **Curtailement.** De inzet van curtailement (afschakelen opwek) wordt bepaald door de marktmodellering in het model. Hier wordt geen aparte aanname voor gemaakt.
- **Waterstofopslag.** Waterstofopslag is noodzakelijk om de onbalans tussen vraag en aanbod van waterstof op te vangen. In tegenstelling tot elektriciteit wordt dit door één type flexibele bron gedaan en niet door meerdere bronnen (opslag, waterstofcentrales, vraagsturing, elektrolyse etc.). Op basis van de uurlijkse vraag en aanbod van waterstof wordt berekend hoeveel opslagcapaciteit noodzakelijk is om vraag en aanbod gedurende het hele jaar te kunnen balanceren. Daar wordt 4 TWh opslagcapaciteit bij opgeteld om ook voldoende opslagcapaciteit te hebben in jaren met andere weersomstandigheden³. Die 4 TWh additionele opslagcapaciteit komt overeen met de aannames in het basisscenario Koersvaste Middenweg.
- **Import en export elektriciteit en waterstof.** De capaciteit voor import en export van elektriciteit van waterstof wordt gelijk gehouden ten opzichte van het basisscenario. De uurlijkse import en export verandert wel en wordt bepaald met de marktmodellering van het ETM.

De uurlijkse inzet van flexibele bronnen wordt bepaald door de marktmodellering in het ETM. Met de marktmodellering wordt ook import en export van elektriciteit en waterstof bepaald.

2.4.2.3 Overige uitgangspunten

Naast de aannames voor opwek worden de volgende overige uitgangspunten gehanteerd:

- **Zichtjaar enkel 2050, geen tussenliggende jaren:** Door het zichtjaar 2050 te hanteren geeft de analyse de effecten weer voor het eindbeeld van een klimaat neutrale energievoorziening.
- **Eén scenario voor de energievraag: Koersvaste Middenweg van Netbeheer Nederland.** Zoals in de introductie aangegeven, wordt uitgegaan van één vraagscenario voor elektriciteit en waterstof.

³ De berekeningen zijn gedaan voor een gemiddeld 'weerjaar'.

Door uit te gaan van een vaste vraag kunnen de varianten goed naast elkaar gelegd worden, en kunnen met name milieueffecten goed met elkaar vergeleken worden doordat het aantal variabelen beperkt is. Voor de vraag naar elektriciteit wordt uitgegaan uit van het scenario 'Koersvaste Middenweg' van de nieuwste Netbeheer Nederland scenario's. Deze variant sluit aan bij de huidige ontwikkelingen en beleidscontext en geeft daarmee de beste inschatting van de verwachte energievraag in 2050. De effecten van andere ontwikkeling van de energievraag worden kwalitatief besproken in paragraaf 2.6.3.

- **Inzet kerncentrales op basis van modellering ETM in het basisscenario:** een kerncentrale kan op verschillende manieren ingezet worden. Zo kan deze 'mustrun' ingezet worden, waarbij de kerncentrale (vrijwel) vollast wordt ingezet maar het is ook een optie om hem flexibel in te zetten in de merit-order, en daartussen zijn nog varianten denkbaar. Daarnaast kan een kerncentrale (naast productie van elektriciteit) ook ingezet worden voor productie van waterstof of warmte. Om het aantal variabelen te beperken wordt één manier van inzet doorgerekend. Hiervoor wordt aangesloten bij de inzet van de kerncentrale(s) van basisscenario, het scenario 'Koersvaste Middenweg' van de nieuwste Netbeheer Nederland scenario's. De inzet van kerncentrales in dit scenario is bepaald in het ETM en is gebaseerd op een merit-order inzet waarbij kerncentrales economisch optimaal ingezet worden⁴. De effecten van andere manieren van inzet wordt kwalitatief besproken in paragraaf 2.6.2.
- **Nationaal scenario, geen regionalisatie.** Voor de modellering van de energetische varianten worden nationale scenario's gemaakt. De studie bevat geen regionalisatie van de scenario's.
- **Impact op de energie-infrastructuur.** De hoeveelheid benodigde energie-infrastructuur wordt kwalitatief ingeschat, omdat die sterk afhankelijk is van de precieze locatie van bronnen van elektriciteit, batterijen et cetera. Deze kwalitatieve beschouwing is te vinden in paragraaf 2.6.1.

2.5 Resultaten

Met bovenstaande modellering wordt het volledige energiesysteem doorgerekend voor de twaalf varianten. Voor vraag, aanbod en flex, voor alle sectoren en voor alle energiedragers wordt de uurlijkse inzet bepaald.

Om de impact van verschillende hoeveelheden kernenergie in het energiesysteem op de milieueffecten eerlijk te vergelijken dienen alle A varianten onderling vergeleken te worden, en ook de B en C varianten alleen onderling. Het vergelijken van bijvoorbeeld variant 1A met variant 2B levert geen eerlijke vergelijking op omdat dan niet alleen de hoeveelheid kernenergie verschilt maar ook de bronnen die in de plaats komen van kernenergie. De A en B varianten kunnen ook niet eerlijk vergeleken worden met de C varianten, omdat de totale hoeveelheid opwek verschilt.

Het is wel mogelijk om de A, B en C varianten met eenzelfde hoeveelheid kernenergie te vergelijken, om in te schatten wat de (relatieve) milieueffecten zijn van de verschillende alternatieven voor kernenergie (opwek op land, opwek op zee of geen wijzigingen in overige opwek).

⁴ De kerncentrales worden in het ETM meegenomen als volledig flexibele centrales, dus op uurbasis volledig af- of op te schalen. In de praktijk zitten er meer beperkingen aan de ramp-up and ramp-down rate en minimale periode dat een centrale aan of uit moet staan, dus in dat opzicht is deze modellering niet perfect. Dit kan ertoe leiden dat de inzet van uur op uur niet altijd realistisch gemodelleerd wordt, maar op jaarbasis komt er qua vollasturen wel een realistisch aantal uit (ordegrootte 7000 uur per jaar). Dit betekent dat de verwachting is dat de aanname van imperfectie van de modellering geen grote impact zal hebben op de uiteindelijke energievarianten en de daaraan gerelateerde milieueffecten. In een kwalitatieve beschouwing wordt hier separaat besproken.

2.5.1 Totaaloverzicht vermogens opwek en flexibiliteit

De onderstaande tabel geeft een overzicht van de vermogens voor opwek (wind, zon, kern) en de verschillende bronnen van flexibiliteit.

2.5.1.1 Totaaloverzicht⁵

Tabel 2-1 Vermogens (GW) en hoeveelheid waterstofopslag (TWh), alle varianten

	Huidig	A. Kernenergie in plaats van hernieuwbare opwek op land				B. Kernenergie in plaats van wind op zee				C. Gelijke productie overige bronnen				
		1A	2A	3A	4A	1B	2B	3B	4B	1C	2C	3C	4C	
Energie opwekkers														
Zon	24,5	144	129	113	147	117	117	117	117	117	117	117	117	GW
(dak/land)		99 / 45	89 / 40	78 / 35	101 / 46	80 / 36	80 / 36	80 / 36	80 / 36	80 / 36	80 / 36	80 / 36	80 / 36	GW
Wind op land	6,9	22	18	11	23	13	13	13	13	13	13	13	13	GW
Wind op zee	4,7	68	68	68	68	79	73	65	80	68	68	68	68	GW
Kernenergie	0,5	0,5	3,7	8,3	0	0,5	3,7	8,3	0	0,5	3,7	8,3	0	GW
Ondersteunende installaties														
Systeembatterijen	0,2	42	39	35	42	37	36	36	37	36	36	36	36	GW
Elektrolyse	Nihil	37	35	33	37	36	35	33	37	31	32	33	31	GW
Waterstofcentrales	22	22	18	14	22	22	18	14	22	22	18	14	22	GW
Waterstof opslag	0	18	16	15	18	15	15	14	15	9	10	18	9	TWh

De voornaamste algemene bevindingen zijn, voor het zichtjaar 2050:

- In alle varianten is er ten opzichte van nu, los van de inzet van kerncentrales een flinke toename van wind op land, wind op zee, zon-pv (op land en/of op dak), opslag van elektriciteit en elektrolyse. Dit komt doordat de rol van elektriciteit in het energiesysteem veel groter wordt.
- Tussen de varianten zijn er wel verschillen in hoeveelheden hernieuwbare opwek, maar ook in varianten met veel kernenergie is er een flinke toename hiervan. Kernenergie voorziet zelfs in de variant met de meeste kernenergie (Variant 3A) slechts 10% van de elektriciteitsproductie.
- De hoeveelheid waterstofcentrales blijft redelijk gelijk ten opzichte van huidige situatie, maar er is wel andere brandstof (nu kolen/aardgas en dan naar verwachting waterstof). De hoeveelheid geïnstalleerd vermogen varieert tussen de varianten afhankelijk van de hoeveelheid kerncentrales (1 GW kerncentrales meer betekent dat 1 GW waterstofcentrales minder nodig is). Dit komt doordat kerncentrales (ongeveer) even flexibel inzetbaar zijn als waterstofcentrales en daarmee een vergelijkbare functie in het energiesysteem vervullen.

⁵ Dit is niet een totaaloverzicht van het energiesysteem in 2050. Er zijn ook nog andere energiedragers zoals warmte, groengas en duurzame brandstoffen. Maar deze onderdelen van het energiesysteem zullen niet (significant) veranderen door de inzet van kernenergie en deze zijn buiten beschouwing gelaten bij de resultaten. Die andere energiedragers worden wel meegenomen in integrale doorrekeningen met het ETM.

- Er is opslag van waterstof nodig in alle varianten (nu is er ook gasopslag, maar voor aardgas), doordat de vraag naar waterstof niet altijd in lijn is met het aanbod. De hoeveelheid benodigde opslag varieert enigszins tussen de varianten, doordat deze afhankelijk is van de mate van inzet van elektrolyzers en waterstofcentrales.

2.5.1.2 Varianten A: Kernenergie in plaats van wind op land en zon

In onderstaande tabel staat een overzicht van de vermogens van energie opwekkers, ondersteunende installaties (systeem batterijen, elektrolyzers en waterstofcentrales) en de hoeveelheid benodigde waterstofopslag voor de A varianten.

Tabel 2-2 Vermogens (GW) en hoeveelheid waterstofopslag (TWh) in Varianten A

	Huidig (2024)	1A	2A	3A	4A	
Energie opwekkers						
Zon-pv ⁶	24,5	144	129	113	147	GW
Waarvan op dak		99	89	78	101	GW
Waarvan op land		45	40	35	46	GW
Wind op land	6,9	22	18	11	23	GW
Wind op zee	4,7	68	68	68	68	GW
Kernenergie	0,5	0,5	3,7	8,3	0	GW
Ondersteunende installaties						
Systeembatterijen	0,2	42	39	35	42	GW
Elektrolyse	Nihil	37	35	33	37	GW
Waterstofcentrales	22	22	18	14	22	GW
Waterstofopslag	0	18	16	15	18	TWh

In de tabel is te zien dat er in variant 3A 8,3 GW aan kerncentrales staat en er in variant 4A geen kerncentrales zijn (een verschil van 8,3 GW). Het verschil in hernieuwbare opwek (wind en zon-pv samen) tussen die varianten is 46 GW. Het absolute verschil in vermogens van kerncentrales tussen de A-varianten is dus veel kleiner dan het absolute verschil in hernieuwbare opwek. Zowel voor wind op land als voor zon geldt dat naast het absolute ook het relatieve verschil in vermogens tussen de varianten significant is. In de variant zonder kernenergie (4A) zijn er dubbel zoveel windturbines als bij de variant met de grootste hoeveelheid kernenergie (3A): 23 GW versus 11 GW. Voor zon (zowel op dak als op land) gaat het om ongeveer 30% meer (respectievelijk 101 GW versus 78 GW en 46 versus 35 GW). ofwel 1 GW kerncentrales concurreert met een significant groter vermogen aan hernieuwbare opwek.

Dit verschil in vermogen komt met name doordat kerncentrales veel hogere vollasturen⁷ (afhankelijk van het scenario, maar tussen 6000 en 6500 uren) kennen dan windturbines op land (rond 3100 uren) en zonnepanelen (rond 900 uren). Windturbines en zonnepanelen hebben een beperkt aantal vollasturen doordat zij beperkt worden door de beschikbaarheid van respectievelijk wind en zon. De hogere

⁶ In de A-varianten is een vaste verhouding tussen zon op dak en zon op land aangehouden (gelijk aan de verhouding in het scenario Koersvaste Middenweg van de Netbeheer Nederland scenario's).

⁷ Het aantal vollasturen is een maatstaf voor de jaaropbrengst van een energiebron. Het aantal vollasturen is het aantal uren dat de installatie op vol vermogen zou moeten draaien om de gerealiseerde productie te behalen.

vollasturen van kerncentrales betekent dat er minder vermogen nodig is om een bepaalde hoeveelheid elektriciteit te produceren.

Naast het verschil in vollasturen speelt ook mee dat bij gebruik van hernieuwbare opwek meer verliezen optreden dan bij het gebruik van kernenergie, waardoor meer vermogen nodig is om aan dezelfde elektriciteitsvraag te kunnen voldoen. De extra verliezen treden op doordat hernieuwbare energie opwekkers een meer fluctuerend opwekpatroon kennen dat minder goed aansluit bij de energievraag dan het opwekpatroon van een kerncentrale, dat meer stuurbaar is. Het meer fluctuerende opwekpatroon van zon en wind zorgen ervoor dat er in de varianten met meer zon en wind op land ook meer ondersteunende installaties nodig zijn. Zo zijn er meer (systeem-)batterijen nodig om korte termijn mismatch van vraag en aanbod op te vangen. Ook zijn er meer elektrolyzers voor waterstofproductie (en daardoor meer waterstofopslag) doordat er meer momenten zijn van overschotten van aanbod. Het omzetten van elektriciteit naar waterstof (en eventueel het weer terug omzetten naar elektriciteit) gaat met verliezen gepaard. Ten slotte zijn er ook momenten in het jaar (met name bij momenten van veel wind en zon) dat windturbines en zonnepanelen afgeschakeld worden en de geproduceerde elektriciteit weggegooid wordt.

2.5.1.3 Varianten B: Kernenergie in plaats van wind op zee

In onderstaande tabel staat een overzicht van de vermogens van energie opwekkers, ondersteunende installaties (systeembatterijen, elektrolyzers en waterstofcentrales) en de hoeveelheid benodigde waterstofopslag voor de B varianten.

Tabel 2-3 Vermogens (GW) en hoeveelheid waterstofopslag (TWh) in Varianten B

	Huidig (2024)	1B	2B	3B	4B	
Energie opwekkers						
Zon	24,5	117	117	117	117	GW
Waarvan op dak		80	80	80	80	GW
Waarvan op land		36	36	36	36	GW
Wind op land	6,9	13	13	13	13	GW
Wind op zee	4,7	79	73	65	80	GW
Kernenergie	0,5	0,5	3,7	8,3	0	GW
Ondersteunende installaties						
Systeembatterijen	0,2	37	36	36	37	GW
Elektrolyse	Nihil	36	35	33	37	GW
Waterstofcentrales	22	22	18	14	22	GW
Waterstofopslag	0	15	15	14	15	TWh

In de tabel is te zien dat er in variant 3B 8,3 GW aan kerncentrales staat en er in variant 4B geen kerncentrales zijn (een verschil van 8,3 GW). Net als bij de A-varianten is in het absolute verschil in vermogens van kerncentrales tussen de B-varianten veel kleiner dan het absolute verschil in hernieuwbare opwek. Ofwel, 1 GW kerncentrales concurreert met een significant groter vermogen aan hernieuwbare opwek. In variant 3B staat er 8,3 GW aan kerncentrales en in variant 4B zijn er geen kerncentrales (een verschil van 8,3 GW). Het verschil in wind op zee tussen die varianten is 15 GW en dus significant hoger. Het relatieve verschil in geïnstalleerd vermogen van wind op zee is tussen de

varianten met veel kerncentrales (3B) en weinig kerncentrales (4B) zo'n 20%. De verschillen zijn wel kleiner dan in de A-varianten. Dat komt doordat wind op zee hogere vollasturen kent (ongeveer 4500) dan wind op land en zon-pv. Toch wordt een deel van het verschil in de vermogens verklaard door het aantal vollasturen dat nog altijd lager ligt dan dat van kerncentrales (tussen 6000 en 6500 uren).

Daarnaast treden er bij meer wind op zee ook meer verliezen op om dezelfde reden als in de A-varianten: er is meer verlies door meer gebruik van systeembatterijen, meer omzetting door elektrolyzers en meer curtailment. Wel zijn deze verliezen kleiner dan in de A-varianten. Dat komt doordat het opwekpatroon van wind op zee minder fluctuerend is (dan wind op land en met name zon) en iets beter aansluit op de vraag. Er zijn dan ook iets minder systeembatterijen en elektrolyzers nodig in vergelijking met de A-varianten. Er zijn wel meer systeembatterijen en elektrolyzers in de variant met meer wind op zee (4C) dan in de variant met meer kerncentrales (3C) en ook is meer waterstofopslag nodig.

2.5.1.4 Varianten C: Gelijke productie overige bronnen

In onderstaande tabel staat een overzicht van de vermogens van energie opwekkers, ondersteunende installaties (systeembatterijen, elektrolyzers en waterstofcentrales) en de hoeveelheid benodigde waterstofopslag voor de C varianten.

Tabel 2-4 Vermogens (GW) en hoeveelheid waterstofopslag (TWh) in Varianten C

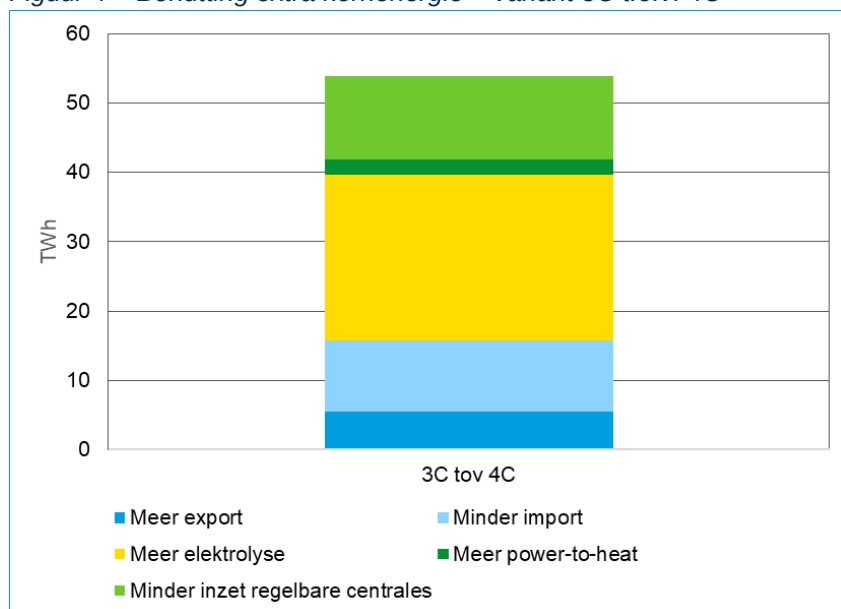
	Huidig (2024)	1C	2C	3C	4C	
Energie opwekkers						
Zon	24,5	117	117	117	117	GW
Waarvan op dak		80	80	80	80	GW
Waarvan op land		36	36	36	36	GW
Kernenergie	0,5	0,5	3,7	8,3	0	GW
Wind op land	6,9	13	13	13	13	GW
Wind op zee	4,7	68	68	68	68	GW
Ondersteunende installaties						
Systeembatterijen	0,2	36	36	36	36	GW
Elektrolyse	Nihil	31	32	33	31	GW
Waterstofcentrales	22	22	18	14	22	GW
Waterstofopslag	0	9	10	18	9	TWh

In de C-varianten varieert de hoeveelheid kerncentrales, maar blijven de overige hoeveelheden energie-opwekinstallaties gelijk. Hierdoor zijn goed afzonderlijke effecten te zien van meer of minder kerncentrales, op inzet van ondersteunende installaties en waterstofopslag. Variatie in de hoeveelheid kerncentrales heeft geen effect op de hoeveelheid systeembatterijen. Dat komt doordat systeembatterijen vooral gebruikt worden voor opvang van korte termijn mismatch tussen vraag en aanbod. Deze mismatch wordt naast het vraagpatroon (dat in de verschillende varianten gelijk is) vooral bepaald door de hoeveelheid hernieuwbare opwek, omdat deze installaties een sterk fluctuerend opwekpatroon kennen. Doordat de hoeveelheid hernieuwbare opwek in de C-varianten gelijk is, is ook de hoeveelheid benodigde systeembatterijen gelijk.

Wel heeft de hoeveelheid kerncentrales een (beperkt) effect op de hoeveelheid elektrolyzers. Dat komt doordat er meer overschotten zijn: deze worden middels elektrolyse omgezet in waterstof en vervolgens als zodanig gebruikt of later weer terug omgezet naar elektriciteit. Er is naarmate er meer elektrolyzers zijn, ook meer waterstofopslag nodig.

Ten slotte varieert in de C-variant de totale hoeveelheid elektriciteitsproductie veel sterker dan in de A- en B-varianten, doordat de overige opwek in deze varianten niet varieert. Dit heeft invloed op de hoeveelheid import en export (zie Figuur 4). Bij meer kernenergie (variant 3C) vindt 9 TWh export en 36 TWh import plaats, terwijl zonder kernenergie (variant 4C) 4 TWh export en 47 TWh import plaatsvindt. Doordat er ook in variant 3C nog steeds momenten zijn van weinig elektriciteitsproductie (bij weinig wind en zon) zal ook hier dus nog wel import plaatsvinden en anderzijds vindt in variant 4C ook nog steeds export plaats doordat ook hier momenten van overschotten zijn (die niet altijd door elektrolyzers worden opgevangen). Daarnaast is in variant 4C 35 TWh meer import van waterstof dan in variant 3C.

Figuur 4 – Benutting extra kernenergie – variant 3C t.o.v. 4C



2.5.2 Impact op productie energie

2.5.2.1 Hoe worden de kerncentrales ingezet in de verschillende varianten?

Voor de inzet van kerncentrales is aangesloten bij de wijze van inzet van het basisscenario, het scenario 'Koersvaste Middenweg' van de nieuwste Netbeheer Nederland scenario's. De inzet van kerncentrales in dit scenario is bepaald in het ETM en is gebaseerd op een merit-order inzet waarbij kerncentrales economisch optimaal ingezet worden⁸.

De onderstaande figuur toont de merit-order voor elektriciteitsproductie in variant 3A. De merit-order laat de marginale kosten zien waarvoor verschillende productiebronnen elektriciteit kunnen produceren. De beschikbare bronnen met de laagste marginale kosten worden als eerst ingezet, en dan de volgende,

⁸ De kerncentrales worden in het ETM meegenomen als volledig flexibele centrales, dus op uurbasis volledig af- of op te schalen. In de praktijk zitten er meer beperkingen aan de ramp-up and ramp-down rate en minimale periode dat een centrale aan of uit moet staan, dus in dat opzicht is deze modellering niet perfect. Dit kan ertoe leiden dat de inzet van uur op uur niet altijd realistisch gemodelleerd wordt, maar op jaarbasis komt er qua vollasturen wel een realistisch aantal uit (ordegrootte 7000 uur per jaar). Dit betekent dat het de verwachting dat dit geen grote impact zal hebben op de uiteindelijke energievarianten en de daaraan gerelateerde milieueffecten. In een kwalitatieve beschouwing wordt dit nog separaat besproken.

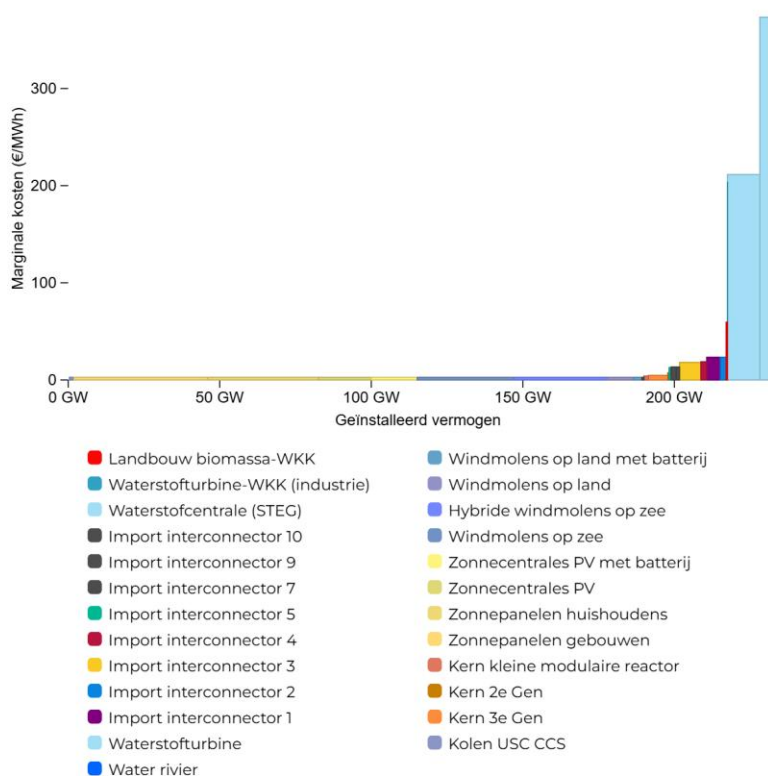
totdat er voldoende productie is om aan de vraag te voldoen. De marginale kosten van de duurste bron die elektriciteit levert bepaalt de elektriciteitsprijs van dat moment.

De merit-order laat zien dat zon en wind de bronnen zijn met de laagste marginale kosten, deze hebben namelijk marginale kosten van €0 (als windturbines of zonnepanelen er staan kost het niets om stroom te produceren). Kerncentrales hebben wel marginale kosten, door het gebruik van de brandstof, maar deze zijn erg laag. De kerncentrales komen daardoor direct na hernieuwbare opwek in de merit-order, en worden eerder ingezet dan bijvoorbeeld import of waterstofcentrales.

Door de lage marginale kosten van kerncentrales worden deze op veel uren ingezet. Alleen op momenten dat er te veel overschotten zijn van hernieuwbare opwek zijn, en curtailment toegepast wordt, worden kerncentrales niet ingezet. In de verschillende varianten draaien kerncentrales tussen de 6.000 en 6.500 vollasturen, wat overeenkomt met een capaciteitsfactor tussen de 70% en 75%.

Figuur 5 – Merit-order capaciteiten en marginale kosten elektriciteitsproductie

Merit order capaciteiten en marginale kosten

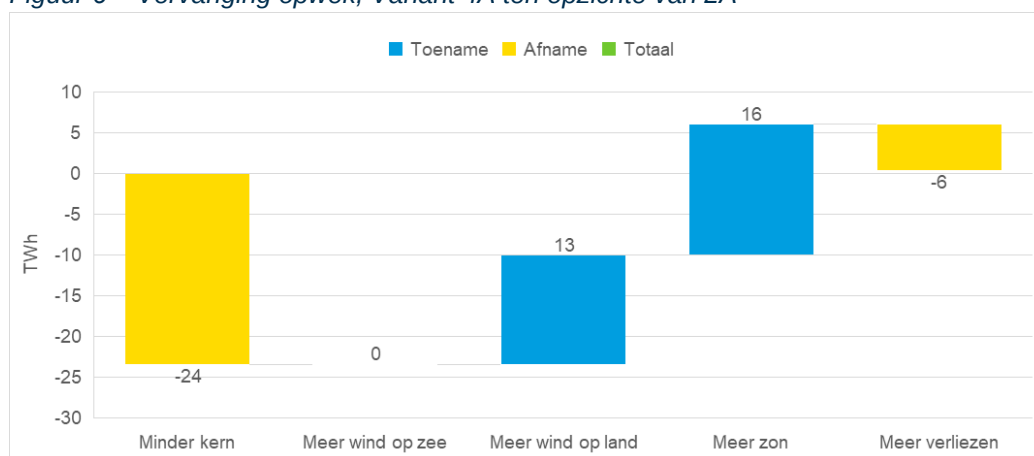


2.5.2.2 Hoeveel extra wind en zon zonder kernenergie?

Voor de varianten is aanname gedaan over hoeveel minder wind/zon-pv er zal zijn door de inzet van kerncentrales. Om dit te bepalen, wordt aangenomen dat 1 TWh productie 1 TWh alternatieve productie 'vervangt', waarbij gecorrigeerd wordt voor verliezen die optreden door opslag, omzetting en curtailment om de effecten van een ander productieprofiel van kernenergie ten opzichte van wind en zon te ondervangen. In feite gaan wordt dus aangenomen dat de totale hoeveelheid energievraag (in de vorm van elektriciteit, maar mogelijk ook waterstof) die ingevuld wordt met wind (op land en op zee), zon en kernenergie hetzelfde blijft. De reden hiervoor is dat er op deze manier alternatieven zijn die eerlijk te vergelijken zijn, omdat het geheel aan productiebronnen een gelijke energievraag invult.

De energieverliezen door opslag, omzetting en curtailment worden groter in varianten met meer wind en zon, ten opzichte van de varianten met meer kernenergie. In de varianten met grote hoeveelheden kernenergie zijn de energieverliezen daardoor kleiner⁹. Bij de varianten 3A en 3B (met 8,3 GW kernenergie) zijn de verliezen door opslag, omzetting en curtailment 52 TWh. Bij de varianten 4A en 4B (met geen kernenergie en dus meer wind en zon) zijn de verliezen door opslag, omzetting en curtailment 65 TWh. Dat is ongeveer 20% hoger.

Figuur 6 – Vervanging opwek, Variant 4A ten opzichte van 2A



Zoals hierboven besproken corrigeren is voor deze extra energieverliezen gecorrigeerd bij het bepalen van de hoeveelheid opwek in de varianten. Hierdoor wordt elke TWh productie kernenergie vervangen door circa 1,2 TWh productie van wind en/of zon. Deze verhouding is vergelijkbaar bij de A-varianten (waarbij kernenergie vervangen wordt door wind op land en zon) en de B-varianten (waarbij kernenergie vervangen wordt door wind op zee).

2.5.3 Impact kernenergie op vermogen (en inzet) flexibele bronnen

Deze paragraaf bespreekt de impact van kerncentrales in het energiesysteem op het vermogen en de inzet van flexibele bronnen.

2.5.3.1 Waterstofcentrales

Elke GW kernenergie vervangt 1 GW waterstofcentrales, omdat deze dezelfde rol kunnen vervullen (dit is een aanname aan de voorkant, maar resultaten bevestigen dat dit een logische aanname is). Alleen op uren dat het aanbod van elektriciteit (productie van wind, zon en kernenergie en aanbod vanuit opslag en import) onvoldoende is voor invulling vraag gaan waterstofcentrales aan. In alle varianten is er een beperkt aantal vollasturen (1200-1500 vollasturen = 15-18% van het aantal uren in het jaar).

2.5.3.2 Elektrolyzers

Er is meer vermogen aan elektrolyzers bij meer wind en zon, doordat het aanbod minder goed aansluit op de basisvraag en er hogere pieken aan overschotten zijn. Daarnaast is er in het algemeen meer opwek (vanwege de correctie die voor verliezen is gedaan). In variant 4A/4B met geen kernenergie en maximaal wind/zon is de hoeveelheid geïnstalleerd vermogen elektrolyzers ongeveer 38 GW, in variant 3A/3B met maximaal kernenergie en minimaal wind/zon is dit ongeveer 33 GW. Er is geen groot verschil tussen A en B variant in het geïnstalleerde vermogen elektrolyzers

⁹ Dit zijn niet de totale energieverliezen in het systeem, maar alleen de verliezen die optreden door het balanceren van vraag en aanbod van elektriciteit. Er treden ook verliezen op bij bijvoorbeeld transport van energie en bij afnemers.

In de varianten met meer kernenergie (en minder wind/zon) is er minder vermogen aan elektrolyzers, maar hebben de elektrolyzers wel meer vollasturen. Dit komt doordat deze opwek gelijkmatiger is, waardoor er meer uren met overschotten zijn ten opzichte van een variant met meer wind/zon. Maar het netto-effect is dat er meer waterstof geproduceerd wordt met elektrolyzers in varianten met meer wind en zon (en minder kern). Daartegenover staat ook dat er meer waterstof nodig is voor waterstofcentrales (in totaal zijn er dus meer energieverliezen, waarvoor gecorrigeerd wordt. Zie paragraaf 2.5.2).

Bij de C varianten (met gelijke hoeveelheid hernieuwbare opwek) neemt vermogen elektrolyzers iets toe bij meer kernenergie. Dit komt doordat er in totaal meer opwek van elektriciteit is en er daardoor meer overschotten zijn. Daarnaast hebben de elektrolyzers ook meer vollasturen in deze varianten.

2.5.3.3 Opslag elektriciteit: systeembatterijen¹⁰

Er is meer vermogen aan opslag bij meer wind en zon, want in deze varianten sluit het aanbod minder goed aan op de vraag. In variant 4A zonder kernenergie en een maximale hoeveelheid wind/zon is het geïnstalleerde vermogen van systeembatterijen ongeveer 42 GW, in variant 3A/3B met een maximale hoeveelheid kerncentrales en minimale hoeveelheid wind/zon is dit vermogen ongeveer 35 GW.

Er is vooral veel meer opslag nodig bij variant A met minder kernenergie, aangezien met name zon erg 'piekerig' is. Wind op zee kent langere periodes met veel opwek en daardoor is opslag (wat gebruikt wordt voor het balanceren van vraag en aanbod op kortere tijdsschalen) minder nodig/geschikt.

Bij varianten C (met allemaal gelijke hernieuwbare opwek) is geen extra opslag nodig bij meer kernenergie, want het opwekpatroon van kerncentrales sluit beter aan bij vraag (er is dus geen extra balancering nodig).

Het aantal vollasturen van systeembatterijen is redelijk vergelijkbaar bij verschillende varianten.

2.5.3.4 Opslag waterstof

Er is meer opslagcapaciteit waterstof nodig in de varianten met meer wind en zon en minder kern. Dit komt doordat er meer flexibel aanbod (vanuit elektrolyzers) en deels ook doordat er meer flexibele vraag (vanuit waterstofcentrales) is. Met name het feit dat de additionele vraag en aanbod flexibel is zorgt dat er meer opslagcapaciteit nodig om vraag en aanbod te balanceren. Bij de A-varianten is een groter verschil dan bij de B-varianten, net als het verschil in elektrolyse tussen deze varianten. Bij de varianten C is meer opslagcapaciteit nodig bij meer kernenergie. Er zijn in deze varianten namelijk meer overschotten, daardoor is er meer elektrolyse en ook meer flexibel aanbod van waterstof.

2.5.3.5 Curtailment

Curtailment (afschakelen opwek) gebeurt als het met beschikbare flexibele bronnen (en export) niet meer mogelijk is om overschotten te benutten. Er is meer curtailment bij meer wind en zon en minder kernenergie, doordat het aanbod de vraag minder goed volgt. Kernenergie leidt bij inzet op basis van de merit-order nooit tot curtailment, want op die uren draait de kerncentrale überhaupt niet. Het verschil in curtailment is dus zichtbaar in de A-varianten en B-varianten, en niet in de C-varianten.

¹⁰ In de studie is er niet gevarieerd met de batterijen achter meter (zoals thuisbatterijen) en EV's. In elk van de varianten is er wel een fors vermogen van deze batterijen.

2.5.4 Impact op importafhankelijkheid

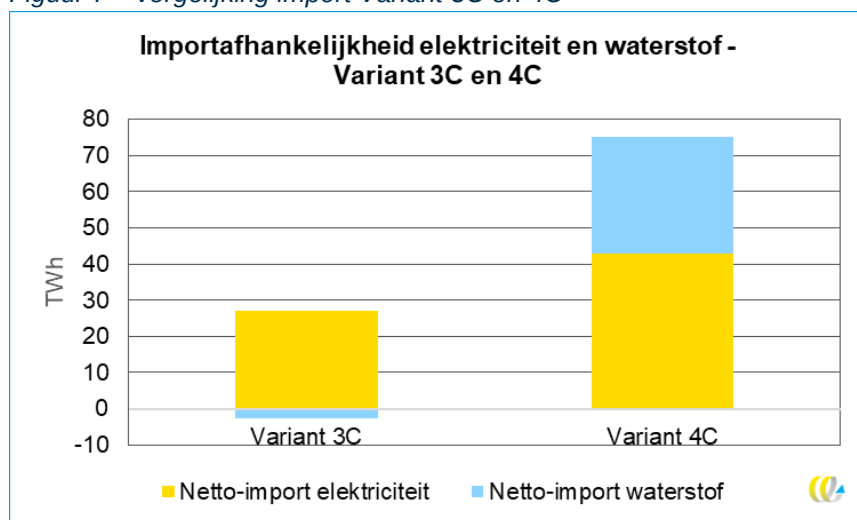
Het Nederlandse energiesysteem staat niet op zichzelf. Er vindt ook import en export van elektriciteit en waterstof plaats. Bij elektriciteit is de uitwisseling van elektriciteit ook belangrijk voor het balanceren van vraag en aanbod van elektriciteit op uurbasis. En bij waterstof kan ook import plaatsvinden voor doorvoer richting het achterland.

In het basisscenario Koersvaste Middenweg is Nederland netto-importeur van elektriciteit. De netto-import is in dat scenario circa 30 TWh, wat overeenkomt met 6% van de totale elektriciteitsvraag (inclusief flexibele vraag van bijvoorbeeld elektrolyzers). Bij waterstof is de import ongeveer gelijk aan de export en is Nederland dus netto zelfvoorzienend.

Bij alle A en B varianten is de importafhankelijkheid (vrijwel) gelijk als bij het scenario Koersvaste Middenweg. Dit komt doordat de totale productie (minus energieverliezen) in elk van deze varianten gelijk is. Ook in deze varianten is Nederland dus netto-importeur van elektriciteit en netto zelfvoorzienend voor waterstof.

In de C varianten verschilt de totale hoeveelheid opwek van kernenergie, maar wordt de opwek van wind (op land en op zee) en zon hiervoor niet gecompenseerd. In deze varianten verschilt de totale hoeveelheid opwek in Nederland dus, wat ook impact heeft op de importafhankelijkheid. De onderstaande figuur toont de importafhankelijkheid bij de varianten 3C (met 8,3 GW kernenergie) en 4C (zonder kernenergie). In variant 4C is de importafhankelijkheid een stuk groter, zowel voor elektriciteit als voor waterstof. Dit betekent ook dat een groter deel van de energievraag in Nederland ingevuld wordt met productie in het buitenland, en dat dus meer milieueffecten in het buitenland plaatsvinden.

Figuur 7 – vergelijking import Variant 3C en 4C



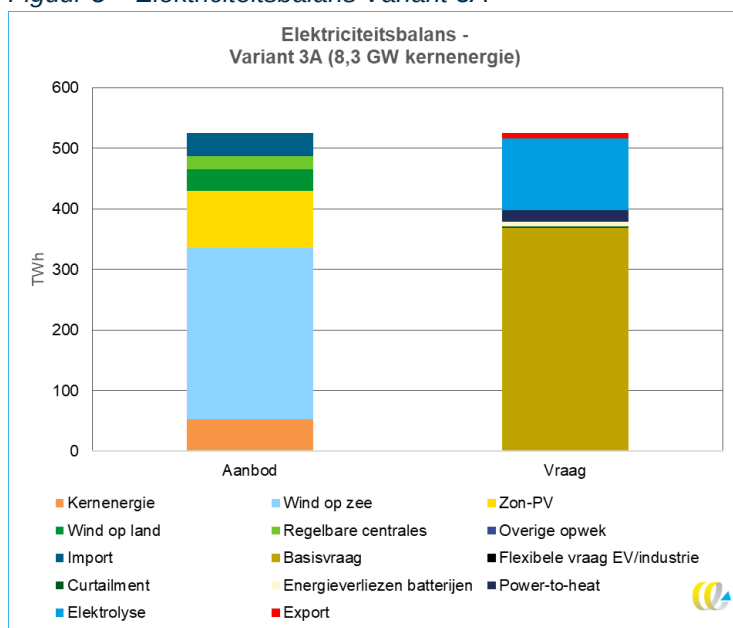
2.5.5 Figuren energiemix in verschillende varianten

De onderstaande figuren geven een overzicht van de elektriciteitsmix voor de varianten 3A (8,3 GW kernenergie) en 4A (geen kernenergie). Deze tonen het aanbod en de vraag naar elektriciteit. Deze figuren laten de volgende aspecten zien:

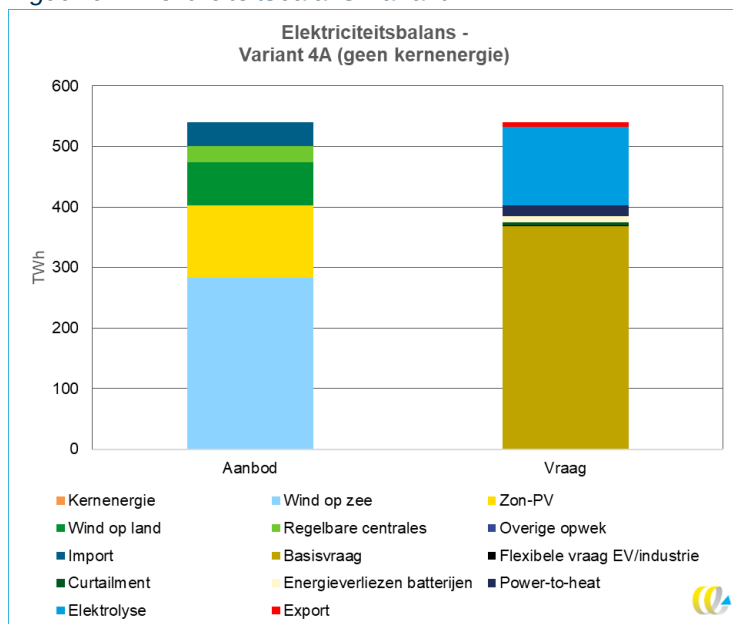
- Wind op zee is de belangrijkste bron van hernieuwbare elektriciteit, gevolgd door zon. Dit geldt voor beide varianten.
- Zelfs in variant 3A, met de grootste hoeveelheid kernenergie, is het aandeel van kernenergie slechts 10% van de totale productie van elektriciteit.

- Van de vraag naar elektriciteit is ongeveer 70% directe vraag naar elektriciteit¹¹. Het overige deel wordt omgezet naar waterstof of warmte (vooral waterstof).
- De totale productie van elektriciteit is iets hoger in variant 4A, om te compenseren voor de hogere energieverliezen bij minder kernenergie en meer hernieuwbare opwek op land (zie paragraaf 2.5.2).

Figuur 8 – Elektriciteitsbalans Variant 3A



Figuur 9 – Elektriciteitsbalans Variant 4A

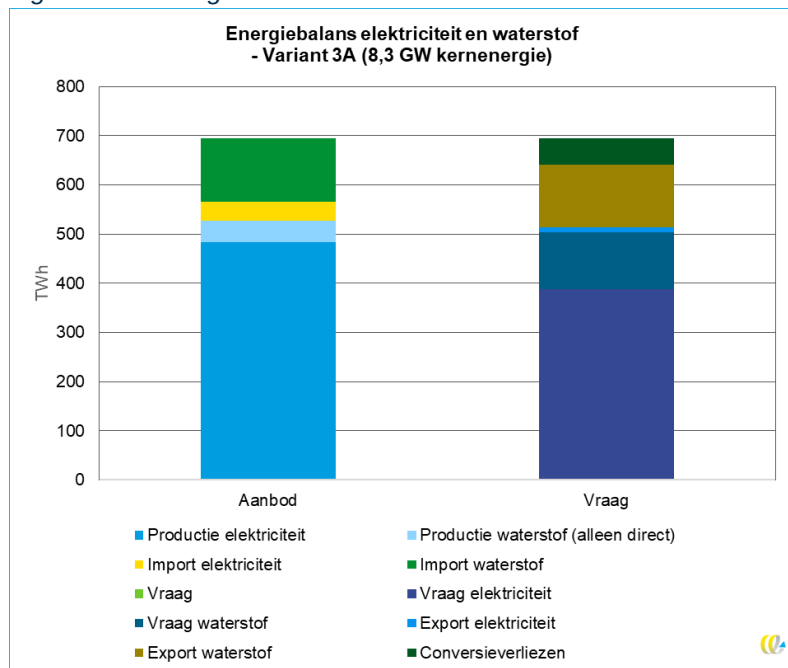


De onderstaande figuren tonen de gezamenlijke energiebalans voor elektriciteit en waterstof. Hierin zijn alleen de directe vraag en opwek van elektriciteit en waterstof opgenomen, conversie van de ene energiedrager naar de andere is niet meegenomen. De figuur laat zien dat het grootste deel van de

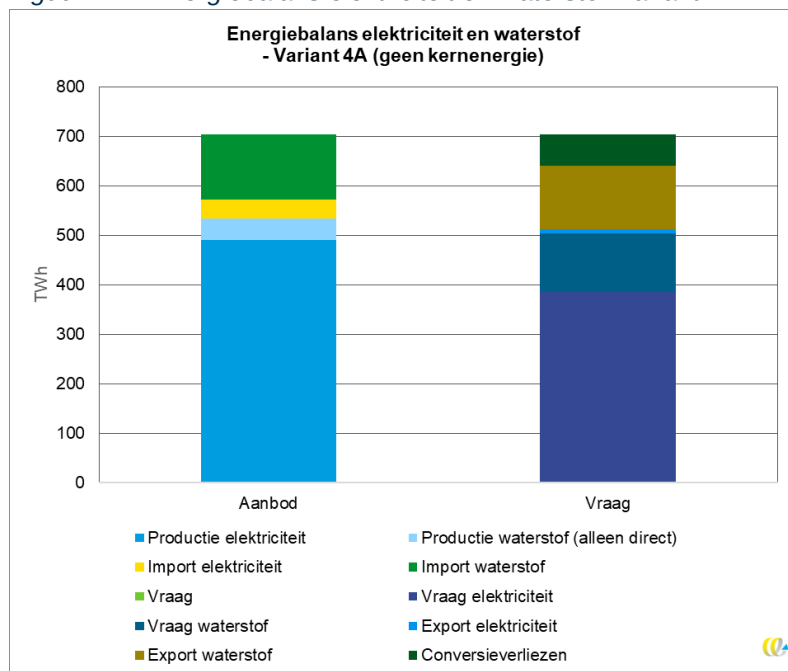
¹¹ Dit is het aandeel waarbij energie in de vorm van elektriciteit afgenomen wordt door afnemers. Achter de meter zal een deel van deze elektriciteit alsnog omgezet worden in warmte of bijvoorbeeld waterstof.

energie in Nederland in de vorm van elektriciteit geproduceerd wordt. De verschillen tussen beide varianten 3A en 4A is beperkt, de totale productie van elektriciteit en de energieverliezen liggen iets hoger bij 4A dan bij 3A (zoals ook eerder besproken).

Figuur 10 – Energiebalans elektriciteit en waterstof Variant 3A



Figuur 11 – Energiebalans elektriciteit en waterstof Variant 4A



2.6 Kwalitatieve beschouwingen

Bovenstaande paragrafen bevatten de kwantitatieve resultaten van de doorgerkende varianten. Er zijn ook enkele onderwerpen waar met een kwalitatieve beschouwing op wordt ingaan. Dit zijn de volgende onderwerpen:

- Impact varianten met verschillende hoeveelheid kernenergie op de energie-infrastructuur
- Impact wijze van inzet kernenergie op resultaten
- Impact kernenergie op energiemix bij andere varianten ontwikkeling energievraag en (overig) aanbod
- Impact kernenergie op leveringszekerheid energie

Deze aspecten worden hieronder besproken.

2.6.1 Impact varianten met verschillende hoeveelheid kernenergie op de energie-infrastructuur

De hoeveelheid kernenergie in de energiemix heeft ook impact op de benodigde energie-infrastructuur, en dan met name op het elektriciteitsnet. Dit is ook relevant op de totale milieueffecten van de varianten, aangezien (met name bovengrondse) energie-infrastructuur ook effect heeft op het milieu en de omgeving. Kernenergie zelf heeft een impact op het elektriciteitsnet, maar ook de opwekkers die vervangen worden door kernenergie (wind en zon) hebben impact op het net. Dat betekent dat de varianten met meer kernenergie (en minder wind en zon) een andere impact hebben op het elektriciteitsnet dan de varianten met minder kernenergie (en meer wind en zon).

De benodigde hoeveelheid elektriciteitsinfrastructuur is afhankelijk van de exacte locatie van productie en vraag. De regionale invulling van het energiesysteem is buiten scope van de studie; de besproken varianten zijn dan ook nationale scenario's die geen regionale uitwerking kennen. Daardoor is de exacte impact van de varianten op het elektriciteitsnet niet te bepalen en kan ook niet eenduidig geconcludeerd worden of varianten met meer kernenergie tot meer of minder elektriciteitsnet leiden. Dit is afhankelijk van de specifieke ruimtelijke invulling. Het is echter wel mogelijk om bepaalde algemene aspecten te benoemen over de impact van de hoeveelheid kernenergie op de benodigde uitbreidingen aan het elektriciteitsnet.

Kernenergie en hernieuwbare opwek hebben een andersoortige impact op het elektriciteitsnet. Dat komt onder andere doordat ze op een ander netvlak aangesloten worden:

- Hernieuwbare opwek op land wordt vooral aangesloten op de laagspannings- en middenspanningsnetten. In het algemeen geldt dat meer hernieuwbare opwek op land ertoe leidt dat meer uitbreidingen nodig zijn aan deze netten, aangezien een groot deel van de lokale opwek niet lokaal benut kan worden. Dit betekent dat bij de A varianten een verschil in impact te zien is. De impact op deze lagere netvlakken is kleiner bij de varianten met meer kernenergie (en minder hernieuwbare opwek op land), dus bijvoorbeeld 3A.
- De voorziene kerncentrales (van circa 1,6 GW) zijn grote puntbronnen van elektriciteit. Deze worden aangesloten op het hoogste niveau van het hoogspanningsnet, het 380kV-net. De impact van kerncentrales op dit niveau is erg afhankelijk van de locatie waar ze geplaatst worden.
 - Als kerncentrales geplaatst worden op locaties met veel andere opwek, zoals de aanlandlocaties van wind op zee, dan bestaat het risico dat de gezamenlijke productie van deze bronnen ertoe leidt dat uitbreidingen aan het 380kV-net nodig zijn (of dat minder wind op zee aangesloten kan worden zonder extra uitbreidingen).

- Als kerncentrales geplaatst worden op locaties met veel elektriciteitsvraag en weinig andere opwek (in het binnenland), dan kan het plaatsen van kerncentrales er zelfs toe leiden dat minder uitbreidingen aan het 380kV-net nodig zijn.
- Voor het aansluiten van windparken op zee is, naast elektriciteitsinfrastructuur op land, ook een elektriciteitsnet op zee nodig. Dit betekent dat bij de B-varianten minder elektriciteitsinfrastructuur op zee nodig is in de varianten met meer kernenergie (en minder wind op zee), bijvoorbeeld variant 3B. De uitbreidingen aan het elektriciteitsnet op zee zijn een significant aandeel van de totale opgave voor uitbreiding van de elektriciteitsinfrastructuur. Wind op zee wordt, net als kernenergie, aangesloten op het 380kV-net. Het is niet eenduidig vast te stellen of wind op zee of kernenergie meer uitbreidingen aan 380kV-infrastructuur vraagt. Kerncentrales hebben wel het voordeel dat het (relatief) makkelijker is om deze nabij de vraag te plaatsen en dat het productieprofiel beter aansluit bij de vraag (zie ook volgend punt).

Een andere reden dat kernenergie en hernieuwbare opwek een andere impact hebben op het elektriciteitsnet is dat het productieprofiel anders is. In algemeen heeft kernenergie ten opzichte van wind en zon het voordeel dat de productie meer vraagvolgend is en de productie, in de tijd, beter aansluit bij de vraag naar elektriciteit. Dit hoeft echter niet te betekenen dat er minder uitbreidingen aan het elektriciteitsnet noodzakelijk zijn. Hiervoor is vooral de (geografische) afstand tussen vraag en aanbod bepalend: hoe dichter vraag en aanbod bij elkaar gelokaliseerd zijn, hoe beperkter de impact omdat simpelweg kortere kabels nodig zijn. Dit betekent dat het in alle gevallen, voor het minimaliseren van de impact op het elektriciteitsnet, belangrijk is om de elektriciteitsvraag (ook van flexibele bronnen zoals elektrolyzers) en de productie zo dicht mogelijk bij elkaar te plaatsen. Daarbij is wel van belang dat de productiebronnen goed passen bij de vraagbronnen, wat betreft inzetprofiel. Dit betekent dat het gunstig is om kernenergie (met veel vollasturen) te realiseren bij industriële elektriciteitsvraag en eventueel elektrolyzers.

In de C varianten, waarbij de opwek van wind en zon gelijk blijft bij verschillende hoeveelheden kernenergie, is te zien dat extra inzet van kerncentrales onder meer leidt tot meer inzet van flexibele bronnen en meer export van elektriciteit. De grotere export van elektriciteit kan tot extra belasting op het elektriciteitsnet, en dan specifiek op het 380kV-net, leiden aangezien dan transporten richting de grens nodig zijn. Dit is met name het geval als kerncentrales ver van de interconnectiepunten met het buitenland geplaatst worden. De extra productie van kerncentrales en extra inzet van flexibele bronnen heffen elkaar op en leiden niet tot meer belasting op het elektriciteitsnet, mits deze bij elkaar in de buurt geplaatst worden.

2.6.2 Impact van wijze van inzet kernenergie op resultaten

Voor de inzet van kerncentrales wordt aangesloten aan bij de wijze van inzet van het basisscenario, het scenario 'Koersvaste Middenweg' van de nieuwste scenario's van Netbeheer Nederland. De inzet van kerncentrales in dit scenario is bepaald in het ETM en is gebaseerd op een merit-order inzet waarbij kerncentrales economisch optimaal ingezet worden. In een merit-order worden beschikbare bronnen met de laagste marginale kosten als eerst ingezet, en dan de volgende, totdat er voldoende productie is om aan de vraag te voldoen. De marginale kosten van de duurste bron die elektriciteit levert bepaalt de elektriciteitsprijs van dat moment.

Wind en zon zijn de bronnen zijn met de laagste marginale kosten, deze hebben namelijk marginale kosten van €0 (als windturbines of zonnepanelen er staan kost het niets om stroom te produceren). Kerncentrales hebben wel marginale kosten, door het gebruik van de brandstof, maar deze zijn erg laag.

De kerncentrales komen daardoor direct na hernieuwbare opwek in de merit-order, en worden eerder ingezet dan bijvoorbeeld import of waterstofcentrales.

Door de lage marginale kosten van kerncentrales worden deze op veel uren ingezet. Alleen op momenten dat er te veel overschotten zijn van hernieuwbare opwek zijn, en curtailment toegepast wordt, worden kerncentrales niet ingezet. In de verschillende varianten draaien kerncentrales tussen de 6.000 en 6.500 vollasturen, wat overeenkomt met een capaciteitsfactor tussen de 70% en 75%.

Het is de verwachting dat dit, economisch gezien, de meest optimale inzet van kerncentrales is. Er zijn echter ook verschillende onderzoeken die aannemen dat kerncentrales must-run zullen draaien, vanwege de hoge kapitaalkosten (wat het wenselijk maakt om veel draaiuren te maken) of omdat flexibele inzet mogelijk technisch uitdagend is. Het is echter de verwachting dat dit economisch gezien niet optimaal is, aangezien kerncentrales dan ook ingezet worden op momenten dat hernieuwbare opwek gecurtailed wordt, met elektriciteitsprijzen die op die momenten (vrijwel) €0 of zelfs negatief zijn. Als kerncentrales must-run draaien heeft dit de volgende effecten op de resultaten:

- De extra inzet van kerncentrales vindt plaats op uren dat er al overschotten van aanbod van elektriciteit zijn. Op die uren leidt de extra inzet van kerncentrales tot extra inzet van flexibele bronnen en meer export. Maar er zal ook meer curtailment plaatsvinden, aangezien niet alle elektriciteit op deze uren benut kan worden.
- Bij must-run inzet neemt de productie per MW kernenergie toe. In de gehanteerde methodiek leidt dit ertoe dat meer wind of zon vervangen wordt door elke MW kernenergie (zie paragraaf 2.4.2). De extra productie van kernenergie leidt echter ook tot meer energieverliezen doordat er alleen meer elektriciteit geproduceerd wordt op momenten dat er al overschotten zijn. Hiervoor wordt gecorrigeerd bij het bepalen hoeveel wind en zon vervangen wordt door kernenergie. Daarom is het niet eenduidig of must-run inzet ertoe leidt dat kernenergie meer of minder wind en zon vervangt (ten opzichte van de huidige resultaten).
- Naar verwachting zullen er bij must-run inzet meer inzet zijn van flexibele bronnen zijn bij varianten met meer kernenergie. Het is onzeker of er ook meer opgesteld vermogen van flexibele bronnen nodig zal zijn.
- De totale impact van must-run op de resultaten zal beperkt zijn, aangezien kerncentrales ook bij de modellering al een groot aantal vollasturen hebben.

Het is in theorie ook mogelijk dat kerncentrales minder uren ingezet worden. In de huidige modellering worden ze ook ingezet voor bijvoorbeeld flexibele vraag van elektrolyzers en opslag. Als dat niet het geval is, dan zullen kerncentrales een stuk minder uren draaien. Maar het is de verwachting dat dit geen realistisch scenario is, vanwege de hoge kapitaalkosten van kerncentrales.

In de doorrekeningen van de varianten zijn technische beperkingen van de inzet van kerncentrales niet meegenomen. De kerncentrales worden in het ETM meegenomen als volledig flexibele centrales, dus op uurbasis volledig af- of op te schalen. In de praktijk zitten er meer beperkingen aan de ramp-up and ramp-down rate en minimale periode dat een centrale aan of uit moet staan, dus in dat opzicht is deze modellering niet perfect. De productie op uurbasis zal daardoor niet altijd kloppen, maar op jaarbasis komt er qua vollasturen wel een realistisch aantal uit (ordegrootte 7000 uur per jaar). Dit betekent dat de aanname van imperfectie van de modellering naar verwachting geen grote impact zal hebben op de uiteindelijke vermogens en daarmee op milieueffecten. Maar het heeft wel wat impact op de resultaten:

- Op uurbasis zal het effect van de technische beperkingen voor de inzet van kerncentrales zijn dat de productie minder goed aansluit bij de vraag naar elektriciteit. Hierdoor zal meer inzet van flexibele bronnen nodig zijn. Dit gebeurt op momenten met uren van overschotten, als kerncentrales toch

(deels) draaien op uren dat ze bij een perfecte economische inzet niet zouden draaien omdat deze niet snel genoeg kunnen terugschakelen of omdat deze niet helemaal terug kunnen schakelen naar 0% productie. Het kan ook gebeuren op momenten met tekorten, doordat kerncentrales niet snel genoeg kunnen opschakelen, waardoor meer import of inzet van waterstofcentrales nodig is. Het is onzeker of door de beperking van de modellering ook het vermogen aan flexibele bronnen (bij varianten met meer kernenergie) onderschat wordt, of dat alleen het aantal uren dat deze bronnen ingezet worden onderschat wordt.

- De beperking in de modellering heeft naar verwachting geen significante impact op de hoeveelheid wind/zon die vervangen wordt door kern. De jaarlijkse productie per MW kernenergie is namelijk ongeveer gelijk. Mogelijk zijn er wel wat meer verliezen in praktijk bij de varianten met meer kernenergie, waardoor de hoeveelheid wind/zon die kernenergie kan vervangen licht overschat wordt. Maar dit effect is naar verwachting beperkt.
- In het algemeen is het dus de verwachting dat de beperking van de modellering van de inzet van kerncentrales geen enorme impact heeft op de resultaten. Alleen het effect van meer kernenergie op de hoeveelheid flexibele bronnen die minder nodig zijn, wordt mogelijk wat te positief ingeschat.

2.6.3 Impact kernenergie op energiemix bij andere ontwikkeling vraag en (overig) aanbod energie

De ontwikkeling van de energievraag, zowel de totale omvang als de verdeling tussen verschillende energiedragers, is een belangrijke factor bij de ontwikkeling van het energiesysteem. In de doorrekening van de varianten wordt uitgegaan van één scenario voor de ontwikkeling van de energievraag, om het aantal onzekerheden te beperken en om de varianten met meer en minder kernenergie eerlijk met elkaar te kunnen vergelijken. Voor de vraag naar elektriciteit wordt uitgegaan van het scenario 'Koersvaste Middenweg' van de nieuwste Netbeheer Nederland scenario's. Deze variant sluit aan bij de huidige ontwikkelingen en beleidscontext en geeft daarmee de beste inschatting van de verwachte energievraag in 2050.

Er zijn ook andere vraagscenario's en scenario's voor (overige) opwek mogelijk. Het scenario Koersvaste Middenweg gaat uit van een forse toename van de elektriciteitsvraag, zowel directe elektriciteitsvraag als indirecte elektriciteitsvraag voor de productie van waterstof en warmte. Op basis daarvan is er ook uitgegaan van een forse groei van de hoeveelheid wind en zon. Het is ook mogelijk dat er minder elektriciteitsvraag komt, bijvoorbeeld door krimp van de industrie, minder elektrificatie of omdat er meer import van waterstof komt. Als die vraag achterblijft is er ook minder opwek nodig, zowel van hernieuwbare bronnen als eventueel van kernenergie. Dit heeft bij de varianten A en B echter geen effect op de verschillen tussen de varianten met een verschillende hoeveelheid kernenergie. De totale opwek is namelijk gelijk in de varianten, aangezien kernenergie vervangen wordt door evenveel hernieuwbare opwek (met een correctie voor energieverliezen). De verschillen tussen de varianten zijn daardoor niet afhankelijk van de ontwikkeling van de elektriciteitsvraag. De totale hoeveelheid wind en zon die nodig is, is wel afhankelijk van de ontwikkeling van de elektriciteitsvraag. Bij de varianten C, waar de hoeveelheid wind en zon gelijk blijft en alleen de hoeveelheid kernenergie varieert, is de ontwikkeling van de elektriciteitsvraag wel van belang. Dan wordt nut en noodzaak voor kernenergie kleiner bij minder elektriciteitsvraag en zal een kleiner aandeel van de productie van kerncentrales direct benut kunnen worden (en benut worden door flexibele bronnen of geëxporteerd worden) en/of zal het aantal vollasturen van de kerncentrales minder worden.

Het is ook mogelijk dat de elektriciteitsvraag hoger uitvalt. In dat geval is ofwel meer wind en zon nodig, of zullen waterstofcentrales meer draaiuren maken en technieken die gebruik maken van overschotten

(zoals elektrolyzers en power-to-heat) minder draaiuren. Hier geldt echter ook weer dat de verschillen tussen de varianten bij de A en B varianten gelijk blijft. Bij de C varianten, waar de hoeveelheid wind en zon gelijk blijft en alleen de hoeveelheid kernenergie varieert, zal nut en noodzaak voor kernenergie groter zijn en kan een groter deel van de productie direct benut worden (ten opzichte van de doorgerekende varianten).

Een belangrijke onzekerheid in de ontwikkeling van het energiesysteem is de rol van waterstof. Het scenario Koersvaste Middenweg, dat gebruikt wordt voor de analyses, voorziet een belangrijke rol voor waterstof. Maar door hoge kosten blijven ontwikkelingen rondom groene waterstof achter en is er discussie of waterstof daadwerkelijk een belangrijke rol zal gaan spelen in het energiesysteem. Als de rol van waterstof in het energiesysteem beperkt blijft, dan heeft dit de volgende effecten:

- De elektriciteitsvraag van elektrolyzers is een significant aandeel van de totale elektriciteitsvraag (circa 20%). Als er minder vraag komt naar groene waterstof, of dit geïmporteerd wordt, dan zal er daarmee ook fors minder elektriciteitsvraag zijn. Dan geldt hetzelfde als hierboven: er is minder opwek in totaal nodig maar de verschillen tussen de varianten (bij varianten A en B) blijft gelijk.
- Daarnaast is waterstof ook de voorziene brandstof van waterstofcentrales die elektriciteit produceren op momenten met weinig wind en zon. In de varianten met meer kernenergie is minder inzet van waterstofcentrales nodig, maar ook in die varianten zijn er wel waterstofcentrales nodig. Anders komt de leveringszekerheid in het geding. Als dit niet met waterstof kan, dan zijn centrales met een andere brandstof nodig, bijvoorbeeld aardgas (met CCS), biomassa of groengas.

Een andere onzekerheid over de invulling van de energiemix is de invulling van de flexibiliteitsbehoefte. Er is een behoefte voor balanceren van vraag en aanbod van verschillende energiedragers. Maar de verhouding tussen verschillende bronnen van flexibiliteit is onzeker, zeker bij elektriciteit. Dat heeft ook impact op de vermogens van flexibele bronnen in de varianten met verschillende hoeveelheden kernenergie, maar het blijft zo dat bij varianten met meer kernenergie (en minder hernieuwbare opwek) minder flexibiliteit nodig is om vraag en aanbod te balanceren.

In het algemeen kan dus gesteld worden dat er onzekerheden zijn rondom de ontwikkeling van de energievraag (en flexibiliteit) die een grote impact hebben op de invulling van de energiemix, en ervoor kunnen zorgen dat deze energiemix aanzienlijk anders uitvalt. Maar bij de varianten A en B zijn de verschillen tussen de varianten met meer en minder kernenergie robuust en nauwelijks afhankelijk van deze ontwikkeling. Bij de varianten C, waar de hoeveelheid wind en zon gelijk blijft en alleen de hoeveelheid kernenergie varieert, is nut en noodzaak voor (meer) kernenergie wel afhankelijk van die overige ontwikkelingen. Bij minder vraag naar elektriciteit is er dan minder noodzaak voor kernenergie, en bij meer vraag meer noodzaak voor kernenergie.

2.6.4 Impact kernenergie op leveringszekerheid energie

Leveringszekerheid houdt in dat op elk moment van het jaar aan de vraag naar energie voorzien kan worden. In het toekomstige energiesysteem wordt leveringszekerheid een belangrijk aandachtspunt, met name voor elektriciteit. Dit is uitdagender in een systeem waarbij het grootste deel van de elektriciteit geproduceerd wordt met windturbines en zonnepanelen. Met name voldoende stroom leveren op momenten met weinig wind en zon is van belang, aangezien het niet kunnen leveren van elektriciteit hoge maatschappelijke kosten oplevert. Om op alle momenten stroom te kunnen leveren zijn verschillende flexibiliteitsbronnen, zoals opslag en regelbare centrales, en import nodig. Daarnaast kan vraagsturing hieraan bijdragen. Er zijn daarnaast ook flexibele bronnen nodig voor overschotten van elektriciteit. Maar het doel daarvan is het nuttig benutten van elektriciteit, het levert geen bijdrage aan leveringszekerheid.

De doorgerekende varianten hebben allemaal een leveringszekerheid van bijna 100%¹², aangezien dit het uitgangspunt is bij het opstellen van de varianten. Dus in dat opzicht varieert de leveringszekerheid niet tussen de varianten met verschillende hoeveelheden kernenergie. Maar het is wel goed om te kijken hoeveel flexibele bronnen nodig zijn hiervoor, aangezien dit een indicatie is hoe uitdagend het is om deze leveringszekerheid te realiseren. In de varianten met meer kernenergie zijn minder waterstofcentrales en minder batterijen nodig. Dit betekent dat in die varianten minder flexibele bronnen nodig zijn om de leveringszekerheid te garanderen. Echter, ook in de varianten met de grootste hoeveelheid kernenergie zijn er significante hoeveelheden waterstofcentrales (14 GW), batterijen (circa 35 GW), vraagsturing en import van elektriciteit nodig. Dit betekent dat kerncentrales een bijdrage leveren aan de leveringszekerheid van elektriciteit, maar alleen kerncentrales onvoldoende zijn om elk moment van het jaar elektriciteit te kunnen leveren.

Een aandachtspunt bij de varianten met meer kernenergie is dat er zowel minder waterstofcentrales als minder batterijen gerealiseerd worden. Daardoor ligt het totale regelbare vermogen (van kerncentrales, waterstofcentrales en batterijen samen) iets lager. Dat betekent dat er bij die varianten een iets groter risico is dat niet altijd aan de vraag voorzien kan worden, zeker als kerncentrales niet altijd beschikbaar zijn. Dit kan worden ondervangen door in de varianten met meer kernenergie grotere hoeveelheden opslag en waterstofcentrales te realiseren, dan wat nu aangenomen wordt in de varianten.

¹² In alle varianten wordt een paar uur per jaar een deel van de elektriciteitsvraag niet ingevuld, en wordt vraag afgeschakeld van de industrie. Uit eerder onderzoek van CE Delft volgt dat een paar uur per jaar vraag afschakelen kosten effectiever is dan nog meer flexibele bronnen realiseren, die slechts voor een paar uur per jaar nodig zijn.

3 Bijlage – Verdere verdieping bepaalde milieueffecten

3.1 Hinder door bouw

De hinder tijdens de bouwphase van verschillende onderdelen van het energiesysteem is niet meegenomen in de effectbeoordeling, maar is wel relevant om te benoemen. De mate van geluids- en verkeershinder varieert voor de deelwerkzaamheden die gedurende de bouwperiode nodig zijn.

Onderdeel energiesysteem	Effecten bouwphase	Duur exploitatiefase
Energie opwekkers		
Zon-PV	De bouwphase duurt gemiddeld enkele weken tot een half jaar. Werkzaamheden bestaan uit transport, aanleg van kabels, plaatsing van funderingen en installatie van draagconstructies en panelen. Beperkte hinder door korte bouwduur, beperkt gebruik van zwaar materieel en tijdelijke toename van verkeer.	25–30 jaar
Wind op land	De bouwphase duurt gemiddeld 1 jaar. Werkzaamheden omvatten transport, heien en storten van betonfunderingen, aanleg van kabels en de opbouw van turbines. Er is sprake van zwaar materieel en intensief vrachtverkeer. Tijdelijke hinder verspreid over een periode van ongeveer één jaar.	25–35 jaar
Wind op zee	De bouwphase duurt gemiddeld 3 tot 4 jaar. Werkzaamheden omvatten transport, heien of boren van monopiles in de zeebodem, aanleg van kabels, constructie van turbines en bouw van een offshore transformatorstation. Bouwmaterialen en materieel voor de onderdelen op zee worden doorgaans per schip aangevoerd. Bij aanlandingspunten kan tijdelijk extra verkeersdruk ontstaan. Geluids- en verkeershinder voor de leefomgeving is beperkt.	30–35 jaar
Kernenergie	De bouwphase van een kerncentrale duurt doorgaans circa 10-15 jaar. Werkzaamheden omvatten transport, aanleg van funderingen, kabels en veiligheidsvoorzieningen, en de bouw van de reactor en koelsystemen. Intensief gebruik van zware machines en continue bouwverkeer veroorzaken langdurige geluid- en trillinghinder, evenals verkeersdruk op de omgeving.	60–80 jaar
Ondersteunende installaties		
(Systeem)batterijen	De bouwphase duurt gemiddeld 6 tot 12 maanden. Werkzaamheden omvatten transport, aanleg van funderingen en infrastructuur (zoals transformatorstations, koelsystemen en kabels), en installatie van batterijmodules. Beperkte hinder door relatief korte duur, beperkt gebruik van zwaar materieel en tijdelijke verkeersdruk.	15-20 jaar
Elektrolyzers	De bouwphase duurt gemiddeld 1,5 tot 2 jaar. Werkzaamheden omvatten transport, aanleg van funderingen, transformatoren en koelsystemen, installatie van stack-	20–30 jaar

Onderdeel energiesysteem	Effecten bouwfase	Duur exploitatiefase
	modules/elektrolytcellen, en aansluiting op elektriciteits-, water- en waterstofnetwerken. Beperkte hinder met beperkt gebruik van zwaar materieel en tijdelijke toename van verkeer.	
Waterstofcentrales	De bouwfase duurt gemiddeld 2 tot 3 jaar. Indien gebruik wordt gemaakt van bestaande locaties (bijv. gas- of kolencentrales), kan bestaande infrastructuur worden hergebruikt. Op nieuwe locaties omvatten de werkzaamheden transport, aanleg van funderingen en koelsystemen, aansluiting op netwerken en installatie van brandstofcellen. Beperkte hinder en beperkte inzet van zwaar materieel.	20–30 jaar
Waterstofopslag	De bouwfase duurt naar verwachting circa 2 jaar. Hierbij wordt veelal gebruikgemaakt van bestaande lege gasvelden of zoutcavernes, waarbij bestaand materieel deels kan worden hergebruikt. Activiteiten omvatten testen en technische aanpassingen zoals het aanbrengen van waterstofbestendige afdichtingen, aanpassen van compressiestations en installeren van monitoringapparatuur. Beperkte hinder door gebruik van bestaande infrastructuur en beperkt zwaar materieel.	30–50 jaar

3.2 Omgevingsfactoren en veiligheid

De veiligheid van een energie-installatie wordt niet alleen bepaald door de technische kenmerken van de installatie zelf, maar ook in belangrijke mate door de omgeving waarin deze is gesitueerd.

Omgevingsfactoren zoals bevolkingsdichtheid, nabijheid van kwetsbare objecten, aanwezige infrastructuur en lokale omstandigheden (zoals windrichting of waterbeschikbaarheid) beïnvloeden zowel de kans op escalatie als de ernst van de gevolgen bij een incident. De mate waarin een kerncentrale, windturbine, elektrolyser of andere energie-installatie gevoelig is voor invloeden uit de omgeving, verschilt per type installatie en situatie.

Aangezien de locaties van toekomstige energieprojecten niet zijn aangewezen in deze studie, zijn deze omgevingsfactoren geen onderdeel van de beoordeling. In de praktijk vormen deze factoren een relevant onderdeel van de beoordeling van externe en nucleaire veiligheid bij locatiekeuze en inpassing. Zo is bij kerncentrales de omgeving bepalend voor de potentiële impact van een ongeval en de mogelijkheden voor crisisbeheersing. Voor windturbines speelt vooral de afstand tot bebouwing een rol bij de beoordeling van risico's zoals het omvallen van een turbine of het losraken van een rotorblad. Bij elektrolyzers en waterstofcentrales zijn het juist risico's zoals explosiegevaar die maken dat de afstand tot woonwijken of andere risicovolle functies van belang is.

In dit onderzoek zijn de veiligheidsrisico's in algemene zin beoordeeld. Voor specifieke onderdelen van het energiesysteem, waarbij in meer of mindere mate sprake is van veiligheidsrisico's, zal per project een nadere beoordeling plaatsvinden in het kader van externe veiligheid. In dergelijke projectstudies worden de relevante omgevingsfactoren wel meegenomen in de analyse en risicoberekeningen. Deze vormen

vervolgens de basis voor vergunningprocedures waarin wordt bepaald of de voorgenomen functie op een bepaalde locatie toelaatbaar is.

3.3 Veiligheidsperceptie kernenergie

Veiligheidsperceptie is geen milieuaspect, maar speelt bij kernenergie wel een grote rol in de publieke acceptatie van kernenergie. Onderzoek van het RIVM en andere instanties toont aan dat percepties van risico's vaak afwijken van de werkelijke dreigingen. Zie voor meer informatie ook informatiepagina van [Rijksoverheid](#) over hoe veiligheid van kerncentrales is gewaarborgd.

Het [RIVM \(2018\)](#) constateert dat burgers de gevolgen van een kernongeval vaak overschatten. Veel mensen denken onterecht dat een incident leidt tot grootschalige sterfgevallen, misvormingen of langdurige ecologische schade, zelfs op grote afstand van de centrale. Onbekende risico's worden [doorgaans](#) als groter ingeschat, wat bij kernenergie leidt tot een verhoogde angst. Dit fenomeen wordt versterkt door mentale beelden en gebrek aan directe ervaring met kernenergie.

Volgens het [Crisislab \(2018\)](#) spelen sociale signalen, zoals mediaberichten en meningen van bekenden, een belangrijke rol in hoe mensen risico's inschatten. Het onderzoek toont aan dat 34% van de respondenten zich zorgen maakt over stralingsrisico's, terwijl 50% aangeeft zich helemaal geen zorgen te maken. De perceptie wordt ook beïnvloed door persoonlijke omstandigheden, zoals het hebben van kinderen.

Het RIVM benadrukt dat vertrouwen in overheidsinstanties cruciaal is om risicopercepties te aligneren met werkelijke dreigingen. Transparante en consistente communicatie kan helpen om publieke angst te verminderen.

3.4 Gevoeligheid voor geopolitieke veranderingen

Energie-infrastructuur vormt een strategisch onderdeel van nationale veiligheid en is daarmee een potentiële kwetsbaarheid voor geopolitieke spanningen en bewuste sabotage. Deze kwetsbaarheid is het grootst bij grootschalige, geconcentreerde installaties zoals kerncentrales en cruciale verbindingen zoals onderzeese kabels. Dergelijke infrastructuur wordt in toenemende mate beschouwd als potentieel doelwit in het geval van internationale conflicten of hybride oorlogsvoering.

De situatie rond de kerncentrale in Zaporizja (Oekraïne) toont aan dat nucleaire faciliteiten kwetsbaar zijn tijdens conflicten. Gevechten in de buurt kunnen leiden tot stroomuitval of beschadiging, met mogelijke stralingsrisico's tot gevolg. Hoewel kerncentrales in Nederland onder streng veiligheidsregime opereren en ontworpen zijn met uitgebreide beveiligingslagen, is het risico op bewuste fysieke of digitale cyberaanvallen aanwezig. De risico's zijn beheersbaar, mits er voldoende maatregelen worden getroffen, zoals fysieke beveiliging, luchtverdediging en robuuste cyberbeveiliging. Bij centrales wordt rekening gehouden met terroristische excessen, zo moet een kerncentrale bijvoorbeeld bestand zijn tegen een vliegtuiginslag. Op basis van de zogeheten vastgestelde 'referentiedreigingen' wordt een pakket aan beveiligingsmaatregelen genomen. Dit wordt beoordeeld door de Autoriteit Nucleaire Veiligheid en Stralingsbescherming (ANVS). Dergelijke risico's worden in de locatiestudie voor de nieuw te bouwen kerncentrales nader onderzocht.

Een relevant aandachtspunt bij kerncentrales vormt het transport radioactieve materialen (zie ook paragraaf 3.2 [MER bedrijfsduurverlenging Borssele](#)). De splijtstof die in Nederlandse kerncentrales wordt gebruikt, wordt na gebruik veelal getransporteerd naar Frankrijk, waar het gedeeltelijk wordt gerecycled voor hergebruik en deels wordt verwerkt tot radioactief afval. De bruikbare grondstoffen worden omgezet in MOX-brandstof en keren vervolgens terug naar Nederland voor verdere voorbereiding en inzet in kerncentrales. Het radioactieve afval wordt vervoerd naar COVRA voor tijdelijke opslag van radioactief afval. Het transport van deze gevaarlijke materialen brengt veiligheidsrisico's met zich mee. Om deze risico's te beperken, gelden er zeer strenge eisen aan het vervoer, zoals het gebruik van zware, beschermende verpakkingen en uitgebreide noodprocedures. Daarnaast valt het materiaal onder het toezicht van het Internationaal Atoomenergie Agentschap (IAEA), dat controleert op naleving van internationale afspraken en proliferatiepreventie.

Ook onderzeese infrastructuur, waaronder elektriciteitsverbindingen en datakabels, vormt een belangrijk aandachtspunt. Deze kabels zijn te saboteren, moeilijk te monitoren, en van groot belang voor de economie, energievoorziening en nationale veiligheid. Statelijke actoren kunnen hierbij een rol spelen, zoals al eerder is gebleken uit vermoedens van sabotageactiviteiten in Europese wateren. Binnen het energiesysteem raakt dit risico met name de grootschalige windparken op zee, die via zeekabels verbonden zijn met het vasteland. Een verstoring hiervan kan leiden tot grote economische schade en verstoringen in de energievoorziening. Om deze risico's te mitigeren, worden innovatieve detectiesystemen ontwikkeld. Zo werkt [TNO](#) aan een monitoringsysteem dat trillingen in glasvezelkabels gebruikt om ongewenste activiteiten van bijvoorbeeld schepen of onderzeeërs vroegtijdig te signaleren. Dergelijke technologieën dragen bij aan een verbeterd risicobeheer en kunnen worden ingezet als onderdeel van een bredere strategie voor maritieme veiligheid.

Hoewel deze geopolitieke risico's relevant zijn voor de robuustheid van het toekomstige energiesysteem, vallen ze buiten de scope van de effectbeoordeling zoals die in deze studie is uitgevoerd. De beoordeling richt zich op onbedoelde (niet-bewuste) incidenten. De gevoeligheid voor opzettelijke acties en externe dreigingen is geen onderdeel van de beoordeling.

3.5 Impact in de grondstofketen

Het materiaalgebruik binnen de keten van verschillende onderdelen van het energiesysteem heeft niet alleen directe milieueffecten, maar ook belangrijke sociale en ecologische gevolgen, vooral bij de winning en verwerking van grondstoffen elders in de wereld. Veel essentiële materialen voor energie-infrastructuur, zoals zeldzame aardmetalen, lithium, kobalt en nikkel, worden gewonnen in landen waar mijnbouw gepaard kan gaan met slechte arbeidsomstandigheden en milieuschade.

In sommige regio's, zoals de [Democratische Republiek Congo](#), zijn er ernstige zorgen over arbeidsomstandigheden door de inzet kinderarbeid en gevaarlijke werkomstandigheden in de kobaltmijnen, die van groot belang zijn voor de productie van batterijen. De winning van lithium, essentieel voor batterijopslag en elektrolyzers, vraagt bovendien om grote hoeveelheden water, wat in droge gebieden kan leiden tot [waterschaarste](#) en aantasting van lokale ecosystemen. Ook bij de winning van nikkel, bijvoorbeeld in [Indonesië](#), worden zowel natuur als lokale gemeenschappen geconfronteerd met directe negatieve effecten van grootschalige mijnbouwactiviteiten.

De realisatie van grootschalige energieopwekking brengt daarmee negatieve ecologische en sociale effecten met zich mee op andere plekken in de wereld. Naast deze effecten is geopolitieke afhankelijkheid van steeds groter belang. De productie en beschikbaarheid van kritische materialen zijn vaak geconcentreerd in een beperkt aantal landen, waardoor leveringsrisico's ontstaan en bepaalde grondstofrijke landen een sterke machtspositie kunnen verwerven.

Het is voor alle behandelde technologieën van belang om bij de transitie naar een duurzaam energiesysteem niet alleen te kijken naar de effecten binnen Nederland, maar ook naar de bredere sociale, ecologische en geopolitieke gevolgen van het internationale grondstoffengebruik.

3.6 Recycling van materialen

Recycling is in dit onderzoek niet direct beoordeeld, maar is wel een aandachtspunt voor de duurzaamheid van energie opwekkers. Recycling is indirect relevant: hoe beter materialen te hergebruiken zijn, hoe minder nieuw materiaal er nodig is voor de bouw van energie-installaties en hoe lager de milieudruk over de gehele levensduur van het systeem.

Materialen zoals staal en koper zijn goed en breed inzetbaar voor recycling en drukken daarmee het uiteindelijke materiaalverbruik van energie opwekkers als wind- en kernenergie. Beton, composieten en bepaalde batterijgrondstoffen zijn daarentegen lastiger te recycleren, wat de circulariteit van deze technologieën beperkt. Recycling beïnvloedt het materiaalgebruik aan de voorkant (voor aanleg) niet, maar verlaagt wel het netto materiaalverbruik over de hele levensduur van een installatie, vooral bij sloop en hergebruik van componenten.

Onderstaande tabel toont indicatief voor de verschillende energie opwekkers in hoeverre ze met de huidige technieken recyclebaar zijn:

	<u>Zonnepanelen</u>	<u>Windturbines</u>	<u>Kerncentrale</u>
Recyclebaarheid in relatie tot totale massa	96%	90%	90- <u>95%</u>

Bij de beoordeling van materiaalgebruik in dit onderzoek wordt gekeken naar het materiaalgebruik per opgewekte TWh ten opzichte van conventionele methoden. Voor conventionele methoden (zoals kolen en gas) is de input – met name fossiele brandstoffen – niet recyclebaar, waardoor een vergelijking op recyclebaarheid met duurzame energie opwekkers niet mogelijk is.

Het thema recyclebaarheid van materialen krijgt steeds meer aandacht in beleid en onderzoek, mede door het streven naar een circulaire economie. Naar verwachting zal de recyclebaarheid van energie opwekkers en ondersteunende installaties in de toekomst verder verbeteren door technologische innovatie en strengere regelgeving. Zo zijn er op Europees en nationaal niveau doelstellingen geformuleerd voor het verhogen van hergebruik en recyclingpercentages richting 2050.

Er kan al veel recyclet worden bij deze duurzame energie opwekkers. Het is echter vaak nog niet commercieel rendabel waarom het nu nog niet volledig gebeurt in de percentages die hierboven beschreven zijn. Met nieuwe normen over circulariteit, stijgingen in grondstofprijzen en een grotere toevoer van installaties die het eind van de levenscyclus bereiken, is de verwachting dat dit wel meer gaat toenemen.