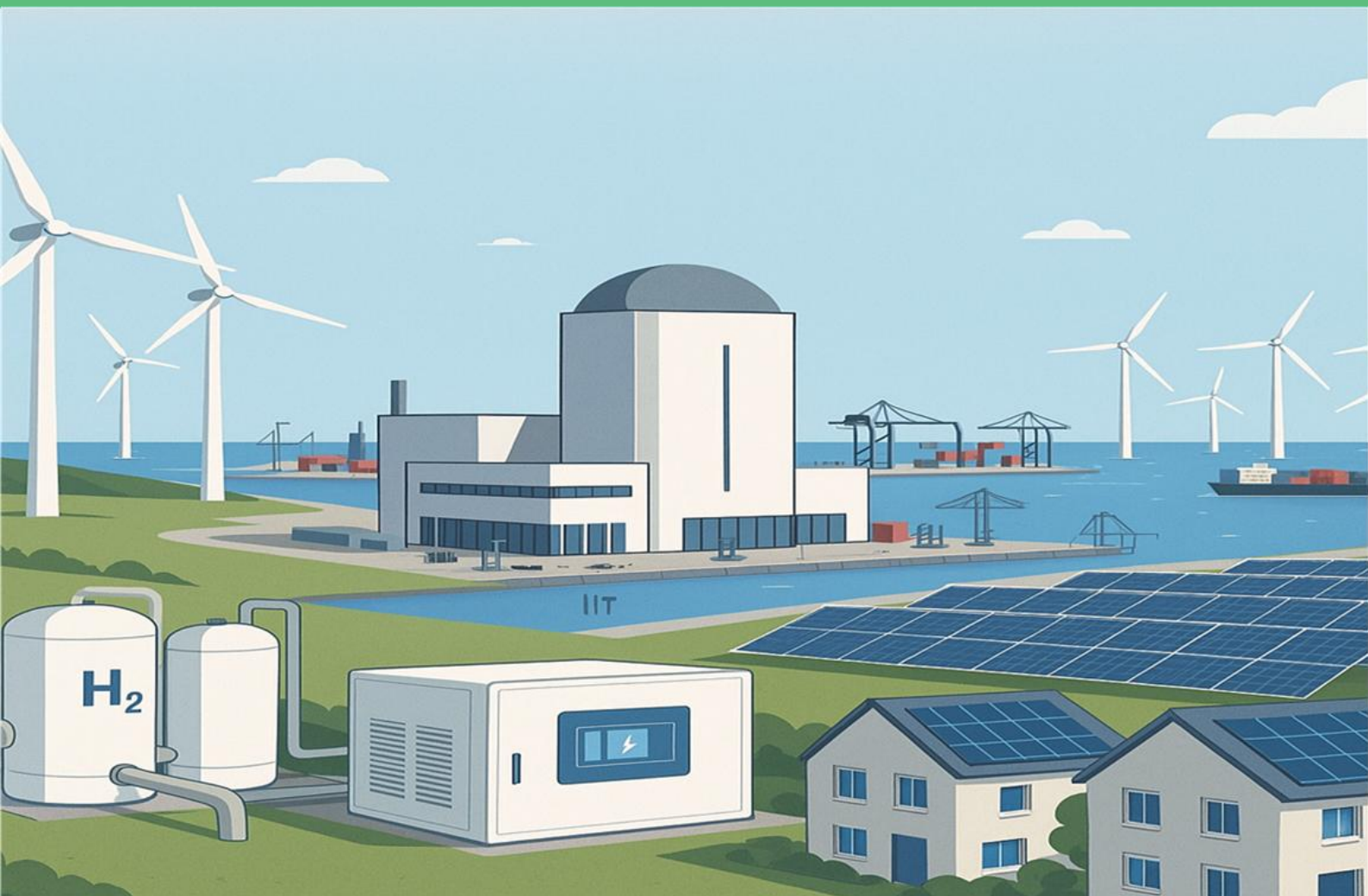




RAPPORT

Milieuimpactanalyse kernenergie in de energiemix

Klant: Ministerie van Klimaat en Groene Groei

Referentie: 724276

Status: Definitief/02

Datum: 30 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
Ondertitel:	
Referentie:	724276
Status:	Definitief/02
Datum:	30 juli 2025
Projectnaam:	Milieuimpactanalyse kernenergie in de energiemix
Projectnummer:	724276
Auteur(s):	Martijn ten Klooster, Cato van de Meeberg, Joeri Vendrik, Marieke Nauta, Joppe van Gemert
Klant:	Ministerie van Klimaat en Groene Groei. Projectleider: Kjell Spillekom
Datum:	
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.

Samenvatting

Aanleiding en doel

De Nederlandse overheid heeft als doelstelling een klimaatneutraal energiesysteem in 2050. In het coalitieakkoord van kabinet-Rutte IV (2021) werd vastgelegd dat kernenergie een grotere rol moet krijgen binnen de energiemix.¹ Dit omvat zowel de verlenging van de levensduur van de bestaande kerncentrale in Borssele als de bouw van twee nieuwe centrales. In het regeerakkoord van kabinet-Schoof (2024) is deze ambitie voortgezet, met aanvullend de aankondiging van de voorbereiding op voor nog twee extra nieuwe kerncentrales.²

Bij de besluitvorming over uitbreiding van de kernenergiecapaciteit spelen uiteenlopende aspecten een rol, zoals kosten, ruimtelijke inpassing, systeemimpact, milieueffecten, technologische ontwikkelingen en geopolitieke overwegingen. Het doel van dit onderzoek is op strategisch afwegingsniveau inzicht te bieden in de verschillen in milieueffecten van een klimaatneutraal energiesysteem met een variërend aandeel kernenergie in de mix van verschillende energiebronnen.

Invulling energiemix in 2050

Het onderzoek, gebaseerd op bestaande onderzoeken, vergelijkt een energieproductiemix in 2050 met vier scenario's voor het aandeel kernenergie:

- Scenario 1: Alleen de bestaande kerncentrale Borssele (0,5 GW);
- Scenario 2: Borssele + 2 nieuwe kerncentrales (totaal 3,7 GW);
- Scenario 3: Borssele + 4 nieuwe kerncentrales + 7 SMR's (totaal 8,3 GW);
- Scenario 4: Geen kernenergie (nul alternatief).

In deze scenario's zal ook gekeken worden naar de samenstelling van de volledige energieproductiemix om tot een klimaatneutraal energiesysteem voor Nederland in 2050. Dit betreft onder meer energie opwek met windturbines en zonnepanelen. De toekomstige energieproductiemix vereist daarnaast aanvullend ondersteunende installaties voor onder meer conversie en opslag van energie. Deze zijn onderdeel van de scenario's. De hoeveelheid kernenergie heeft impact op de benodigde installaties van andere energie opwek technologieën en ondersteunende installaties, maar het is onzeker welke installaties het meer of mindere aan kernenergie opvangen. Er is niet één alternatief aan te wijzen per kernenergie-scenario. Daarom is in drie variaties per scenario in beeld gebracht waarmee het meerdere of mindere aan kernenergie wordt opgevangen:

- Variant A: kernenergie varieert met zon en wind op land;
- Variant B: kernenergie varieert met wind op zee;
- Variant C: kernenergie heeft geen impact op hoeveelheid zon en wind (op zee en op land)

In alle varianten geldt dat de elektriciteitsvraag sterk toeneemt ten opzichte van nu. Hierdoor is – ongeacht de mate van inzet van kernenergie – een forse uitbreiding nodig van de capaciteit van wind en zon, batterijen, elektrolyse en waterstofopslag. In de variant met de meeste kernenergie (scenario 3) wordt circa 10% van de elektriciteitsproductie door kernenergie geleverd.

¹ [Coalitieakkoord 'Omzien naar elkaar, vooruitkijken naar de toekomst' | Publicatie | Rijksoverheid.nl](#)

² [Regeerprogramma kabinet-Schoof | Publicatie | Rijksoverheid.nl](#)

Onderzochte milieueffecten

In deze studie zijn per energiesysteemvariant eerst afzonderlijk de verschillende onderdelen van het energiesysteem beoordeeld op vooraf geselecteerde milieuaspecten. De onderzochte onderdelen zijn windenergie (op land en op zee), zonne-energie en kernenergie. Voor de productie van elektriciteit op grote schaal zijn op grond van de huidige stand der techniek geen andere bronnen van hernieuwbare energie realistisch gezien de kenmerken van Nederland. Daarnaast zijn ondersteunende installaties meegenomen die bijdragen aan de leveringszekerheid van het energiesysteem, zoals systeembatterijen, elektrolyzers, waterstofcentrales en waterstofopslag. Hierna worden de milieuaspecten toegelicht.

Geluid

Voor alle onderdelen van de energiemix – met uitzondering van wind op zee – geldt dat zij in meer of mindere mate geluid produceren richting gevoelige objecten, zoals woningen. Wind op land en systeembatterijen kunnen door hun omvang en verspreide aantallen mogelijk tot meer geluid leiden, wat hinder kan veroorzaken voor omwonenden. Zonne-energie daarentegen veroorzaakt nauwelijks geluid. Installaties zoals kerncentrales, elektrolyzers en waterstofcentrales bevinden zich doorgaans op een beperkt aantal, veelal industriële, locaties en kennen een beperkte geluidhindercontour. Wanneer deze installaties op een industrieterrein worden geplaatst, is deze contour in een aantal gevallen al vastgelegd voor het gehele terrein. Varianten met minder wind op land en meer kernenergie scoren om die reden beter op dit aspect.

Ecologie

Negatieve ecologische effecten kunnen ontstaan door ruimtebeslag, emissies (zoals stikstofuitstoot en het lozen van koelwater), en verstoring van flora en fauna. Windturbines kunnen aanvaringsslachtoffers veroorzaken onder vogels en vleermuizen; bij wind op zee speelt daarnaast verstoring door onderwatergeluid een rol. Het gebruik van koelwater bij kerncentrales en waterstofinstallaties kan de waterkwaliteit en -temperatuur beïnvloeden, met mogelijke gevolgen voor daarmee samenhangende ecosystemen. In alle energiesysteemvarianten worden aanzienlijke ecologische effecten verwacht, voornamelijk door het grote aantal benodigde installaties. Om die reden zijn de energiesysteemvarianten gelijk beoordeeld op dit milieuaspect.

Ruimtelijke functies

De plaatsing van energie-installaties kan gevolgen hebben voor het bestaande ruimtegebruik en toekomstige ontwikkelmogelijkheden in de omgeving. Installaties zoals zonneparken op land vergen veel ruimte en zijn lastig te combineren met andere functies, wat zich vertaalt in een negatieve score op dit aspect. Windparken op land laten zich beter integreren met bestaande functies, zoals landbouw, maar kunnen tegelijkertijd de ontwikkeling van andere ruimtelijke functies – bijvoorbeeld woningbouw – belemmeren. Windparken op zee kennen door hun omvang potentieel een grotere impact op bestaande maritieme activiteiten, aangezien aanpassing of herschikking van deze functies noodzakelijk kan zijn. Andere onderdelen van het energiesysteem, zoals kerncentrales en waterstofopslag, hebben een beperktere invloed op ruimtelijke functies op nationaal niveau, vanwege het relatief geringe aantal installaties, ondanks de ruimtelijke footprint per installatie. Energiesysteemvarianten met relatief veel zon op land en wind op zee scoren daardoor minder goed op dit aspect in vergelijking met andere varianten.

Externe en nucleaire veiligheid

De beoordeling van externe en nucleaire veiligheid is gebaseerd op twee factoren: de kans op een incident en het mogelijke effectbereik bij een incident. Installaties zoals zon-PV, windturbines en elektrolyzers hebben doorgaans een beperkt effectbereik en lage faalkansen. Eventuele incidenten blijven over het algemeen lokaal en goed beheersbaar. Grotere installaties, zoals waterstofcentrales en grootschalige waterstofopslag, kunnen in uitzonderlijke situaties bovenlokale effecten veroorzaken – met name door brand of ophoping van waterstof bij lekkage. Kerncentrales hebben potentieel het grootste

effectbereik bij een ernstige calamiteit, met mogelijk landelijke tot internationale gevolgen, zoals radioactieve besmetting. De kans op een dergelijk incident is echter uiterst klein, dankzij strikte internationale veiligheidsnormen en het ontwerpprincipe van 'defence-in-depth'.

Energiesysteemvarianten met een hoger aandeel kernenergie scoren op dit aspect lager, vanwege het grotere aantal kernenergie-installaties en het daarmee theoretisch verhoogde cumulatieve risico. Hoewel de kans op ernstige incidenten zeer beperkt blijft, brengen kerncentrales een uniek risicoprofiel met zich mee ten opzichte van andere energietechnologieën.

Landschap en cultuurhistorie

Landschapsstructuren en cultuurhistorische elementen worden beschermd vanwege hun bijzondere waarde. De plaatsing van energie-installaties kan deze waarden aantasten, bijvoorbeeld door het verwijderen van karakteristieke elementen of door landschappelijke veranderingen. De mate van aantasting verschilt per techniek, afhankelijk van het aantal installaties, de benodigde ruimte (zoals bij zonneparken op land) en de visuele impact (bijvoorbeeld door de hoogte van windturbines). Zon en wind op land scoren relatief ongunstig op dit milieuaspect: zonneparken beslaan grote oppervlakten weiland, terwijl windturbines het landschap visueel kunnen domineren. Andere onderdelen van het energiesysteem, zoals kerncentrales en waterstofinstallaties, worden meestal op industrieterreinen geplaatst en omvatten een beperkter aantal installaties, waardoor hun nationale impact op landschappelijke waarden geringer is.

Aangezien in alle scenario's een substantiële inzet van zon op land noodzakelijk is, zijn de varianten op dit aspect gelijk beoordeeld. Varianten met een sterke focus op opwek op land hebben echter relatief gezien een grotere impact, doordat ook het aandeel wind op land hoger ligt in vergelijking met andere varianten.

Water

Kerncentrales, elektrolyzers en waterstofcentrales maken gebruik van koelwater, dat wordt onttrokken, ingezet voor koeling en vervolgens weer geloosd. Deze lozing kan gevolgen hebben voor zowel de waterhuishouding als de waterkwaliteit. Bij alle drie de installatievormen kunnen vergelijkbare thermische en chemische emissies via het koelwater optreden. Energiesysteemvarianten die uitgaan van vier nieuwe kerncentrales en zeven Small Modular Reactors (SMR's) – zoals in scenario 3 – verbruiken relatief meer koelwater dan andere varianten. Daarom scoren deze varianten minder gunstig op dit milieuaspect.

Radioactief afval

Kernenergie is de enige energietechnologie die gepaard gaat met radioactief afval. De productie van kernenergie genereert afval dat langdurig en veilig moet worden opgeslagen. Voor scenario's met een beperkte inzet van kernenergie is de bestaande opslagcapaciteit binnen het terrein van COVRA voldoende. In scenario 3, waarin vier nieuwe grote kerncentrales en zeven Small Modular Reactors (SMR's) zijn voorzien, zal naar verwachting uitbreiding buiten de huidige terreinbegrenzing van COVRA nodig zijn. Dit resulteert in een hogere impactscore op dit aspect.

Straling

Kerncentrales en de opslag van radioactief afval brengen een potentiële blootstelling aan ioniserende straling met zich mee. Uit de analyse blijkt dat de stralingstoename bij uitbreiding van kernenergie verwaarloosbaar is ten opzichte van de bestaande natuurlijke achtergrondstraling in Nederland. In alle scenario's met kernenergie blijft de blootstelling minimaal ten opzichte van reeds aanwezige natuurlijke bronnen.

CO₂-emissies

Historisch werd energie voornamelijk opgewekt uit fossiele bronnen, wat leidde tot aanzienlijke CO₂-uitstoot en klimaatverandering. Ook duurzame energie-installaties veroorzaken CO₂-emissies, bijvoorbeeld bij de winning van grondstoffen, de bouw, het transport en de ontmanteling.

Uit de analyse blijkt dat alle onderzochte technologieën minstens 94,6% minder CO₂ uitstoten dan kolencentrales. Hoewel kernenergie op dit vlak het beste scoort, zijn de onderlinge verschillen tussen de duurzame opties klein in vergelijking met fossiele opwek. Alle energiesysteemvarianten zijn daarom gelijk beoordeeld op dit aspect.

Materiaalgebruik

De bouw en exploitatie van energie-installaties vereisen aanzienlijke hoeveelheden en uiteenlopende grondstoffen, zoals zeldzame metalen, uranium en beton. De winning en verwerking van deze materialen kunnen elders tot aanzienlijke milieueffecten leiden. In deze studie is de benodigde hoeveelheid materiaal per geproduceerde terawattuur (TWh) vergeleken met die van kolencentrales. Zowel zonne-energie, windenergie als kernenergie blijken aanmerkelijk minder materialen te vergen dan kolen. Om die reden zijn alle energiesysteemvarianten gelijk beoordeeld op dit aspect. Kernenergie scoort daarbij relatief het best, gezien de lage absolute materiaalbehoefte en het beperkte verbruik van zeldzame grondstoffen.

Scores en belangrijkste bevindingen

Voor elk milieuaspect is per energiesysteemvariant een totaalscore toegekend over de potentiële milieugevolgen. Deze scores zijn samengevat in de onderstaande tabel en lopen van 0 (geen of verwaarloosbare impact) tot 3 (grote impact). Na de tabellen worden de belangrijkste uitkomsten van de milieueffecten van kernenergie en daarna van de verschillende energiesysteem varianten in zijn geheel toegelicht.

Tabel: Overzicht milieueffecten kernenergie bij verschillende scenario's

Milieuaspecten	Scenario 1: 0,5 GW kern	Scenario 2: 3,7 GW kern	Scenario 3: 8,3 GW kern	Scenario 4: 0 GW kern
Geluid	0	1	1	0
Ecologie	0	1	2	0(+)
Ruimtelijke functies	0	1	1	0
Externe & nucleaire veiligheid: reikwijdte bij incidenten	0	3	3	0(+)
Externe & nucleaire veiligheid: kans op incidenten	0	1	2	0(+)
Landschap en cultuurhistorie	0	1	1	0
Water	0	2	3	0(+)
Radioactief afval	1	2	3	0
Straling	0	0	0	0
CO ₂ -emissies	0	1	1	0
Materiaalgebruik	0	1	1	0

Tabel: Totaaloverzicht milieueffecten energiesysteem varianten

Milieuaspecten	Scenario 1: 0.5 GW kern			Scenario 2: 3,7 GW kern			Scenario 3: 8,3 GW kern			Scenario 4: 0 GW kern		
	1A	1B	1C	2A	2B	2C	3A	3B	3C	4A	4B	4C
Geluid	3	2	2	3	2	2	2	2	2	3	2	2
Ecologie	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Ruimtelijke functies	3	2	2	3	2	2	2	2	2	3	2	2
Externe & nucleaire veiligheid	2	2	2	2	2	2	3	3	3	2	2	2
Landschap en cultuurhistorie	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Water	2	2	2	2	2	2	3	3	3	2	2	2
Radioactief afval	1	1	1	2	2	2	3	3	3	0	0	0
Straling	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CO2-emissies	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Materiaalgebruik	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Milieueffecten kernenergie

Bij een groter aandeel kernenergie nemen de potentiële milieueffecten toe ten opzichte van nu met name door het aantal extra benodigde installaties. Belangrijke aandachtspunten zijn:

- De hoeveelheid radioactief afval en bijbehorende opslagcapaciteit;
- De aanzienlijke koelwaterbehoefte en de mogelijke impact ervan op oppervlaktewater en daarvan afhankelijke ecologie door koelwaterlozing;
- De theoretische toename van het veiligheidsrisico als gevolg van meerdere kerncentrales (hoewel de kans op calamiteiten in alle gevallen zeer klein blijft).

Hoewel de kans op calamiteiten beperkt blijft, is het potentiële effectbereik bij een dergelijk kernongeval groot. De analyse toont echter geen belemmering voor beleidskeuzes: de aandachtspunten zijn beheersbaar en technisch te mitigeren.

Milieueffecten verschillende energiesysteem varianten

Alle varianten vragen om een forse inzet van hernieuwbare energie en ondersteunende systemen (zoals opslag en elektrolyse). Zelfs bij het hoogste aandeel kernenergie blijft circa 90% van de stroomproductie afkomstig van zon en wind. Dat leidt ertoe dat er geen grote verschillen zijn in de potentiële milieueffecten van de onderzochte varianten.

Voor geen van de scenario's wordt op voorhand verwacht dat deze niet uitvoerbaar zijn. Wel verdienen het gebruik van koelwater en potentiële ecologische effecten bijzondere aandacht. De impact op deze aspecten is voor het aspect ecologie met name relevant bij offshore wind en voor het aspect water door koelwaterlozing bij diverse installaties met hoge waterbehoefte. De naleving van milieukaders vraagt daarom om zorgvuldige inpassing, ontwerp, mitigatie en technische optimalisatie.

De verschillen tussen scenario's zijn vooral zichtbaar op de aspecten externe & nucleaire veiligheid, koelwatergebruik en opslag van radioactief afval—allemaal direct verbonden aan de inzet van

kernenergie. Bij grotere inzet van hernieuwbare opwek op land nemen juist geluidsoverlast en effecten op ruimte, landschap en cultuurhistorie toe.

Tot slot blijkt dat duurzame energieopties, inclusief kernenergie, aanzienlijk beter scoren op materiaalgebruik en CO₂-emissies dan energie opwek uit fossiele bronnen als kolen en gas. Kernenergie presteert hierin zelfs iets beter dan zon en wind.

Algemene conclusie

Op strategisch niveau leidt het onderzoek tot de volgende algemene inzichten over de milieugevolgen van varianten met een verschillend aandeel kernenergie in de energiemix.

- **Diversiteit in energiebronnen is noodzakelijk**

Gezien de omvang van de energietransitie en de uiteenlopende milieueffecten van verschillende bronnen, is het niet realistisch om te streven naar een klimaat neutrale, robuuste energievoorziening op basis van één enkele technologie.

- **Elke energiebron kent specifieke milieueffecten**

Zowel kernenergie als wind- en zonne-energie brengen potentieel aanzienlijke milieueffecten met zich mee bij de inzet die nodig is om doelstellingen in het energie- en klimaatbeleid te realiseren. Bij zonne-energie betreft dit met name landgebruik, bij wind op land landschap en geluidshinder, bij wind op zee ruimtegebruik en ecologie en bij kernenergie koelwater en externe veiligheid. Deze effecten verschillen in aard en schaal, en kennen eigen specifieke aandachtspunten bij ruimtelijke plaatsing en projectrealisatie.

- **Zorgvuldige afweging en mitigatie zijn essentieel**

De inzet van grootschalige energieopwekking vereist een integrale benadering waarbij milieueffecten vroegtijdig worden onderzocht en mitigerende maatregelen worden verkend en toegepast.

- **Milieuafweging op systeemniveau biedt meerwaarde**

Door milieueffecten van het energiesysteem als geheel in beeld te brengen, ontstaat een realistisch beeld van de opgave en aandachtspunten voor milieuaspecten. Deze vormen de basis voor afwegingen op verschillende niveaus.

Inhoudsopgave

1.	Inleiding	10
1.1	Aanleiding en doelstelling onderzoek	10
1.2	Uitvoering en betrokken partijen	11
1.3	Relevante projecten en ontwikkelingen	11
1.4	Reikwijdte en detailniveau onderzoek	11
1.5	Leeswijzer	12
2	Beleidskaders ontwikkeling energiesysteem	13
3	Onderzochte energiesysteem varianten	15
3.1	Rol kernenergie in het energiesysteem	15
3.2	Aanpak en onderzochte varianten	16
3.3	Uitgangspunten en methodiek	17
3.4	Resultaten per variant	18
3.4.1	Varianten A: Kernenergie in plaats van wind op land en zon	19
3.4.2	Varianten B: Kernenergie in plaats van wind op zee	20
3.4.3	Varianten C: Gelijke productie overige bronnen	21
3.5	Samenvatting kwantitatieve resultaten	22
3.6	Kwalitatieve beschouwingen	23
3.6.1	Impact op energie-infrastructuur	23
3.6.2	Impact op leveringszekerheid voor alle varianten	24
4	Methodiek milieueffectenbeoordeling	26
4.1	Beoordelingsmethodiek	26
4.1.1	Onderdelen van energiesysteem en eenheden	26
4.1.2	Invulling van locaties	30
4.1.3	Omvang huidige installaties en repowering	31
4.2	Milieuaspecten en beoordelingskader	32
4.3	Milieueffecten buiten beschouwing	37
5	Toelichting milieuaspecten en effectrelaties	39
5.1	Geluid	40
5.1.1	Introductie	40
5.1.2	Beleidskader	40
5.1.3	Onderscheidende effecten	41
5.2	Ecologie	43
5.2.1	Introductie	43
5.2.2	Beleidskader	43
5.2.3	Onderscheidende effecten	44
5.3	Ruimtelijke functies	46

5.3.1	Introductie	46
5.3.2	Beleidskader	47
5.3.3	Onderscheidende effecten	47
5.4	Externe en nucleaire veiligheid	52
5.4.1	Introductie	52
5.4.2	Beleidskader	53
5.4.3	Onderscheidende effecten	54
5.5	Landschap en cultuurhistorie	56
5.5.1	Introductie	56
5.5.2	Beleidskader	57
5.5.3	Onderscheidende effecten	57
5.6	Water	59
5.6.1	Introductie	59
5.6.2	Beleidskader	60
5.6.3	Onderscheidende effecten	61
5.7	Radioactief afval	62
5.7.1	Introductie	62
5.7.2	Beleidskaders	64
5.7.3	Onderscheidende effecten	65
5.8	Straling	67
5.8.1	Introductie	67
5.8.2	Beleidskaders	67
5.8.3	Onderscheidende effecten	68
5.9	CO ₂ -emissies	68
5.9.1	Introductie	68
5.9.2	Beleidskader	69
5.9.3	Onderscheidende effecten	69
5.10	Materiaalgebruik	71
5.10.1	Introductie	71
5.10.2	Beleidskader	72
5.10.3	Onderscheidende effecten	73
6	Effectbeoordeling	77
6.1	Geluid	77
6.1.1	Beoordeling energie opwekkers	77
6.1.2	Beoordeling ondersteunende installaties	78
6.1.3	Totaalbeoordeling varianten	79
6.2	Ecologie	80
6.2.1	Beoordeling energie opwekkers	80
6.2.2	Beoordeling ondersteunende installaties	81
6.2.3	Totaalbeoordeling varianten	82
6.3	Ruimtelijke functies	82
6.3.1	Beoordeling energie opwekkers	82
6.3.2	Beoordeling ondersteunende installaties	84

6.3.3	Totaalbeoordeling varianten	84
6.4	Externe en nucleaire veiligheid	85
6.4.1	Beoordeling energie opwekkers	85
6.4.2	Beoordeling ondersteunende installaties	87
6.4.3	Totaalbeoordeling varianten	88
6.5	Landschap en cultuurhistorie	89
6.5.1	Beoordeling energie opwekkers	89
6.5.2	Beoordeling ondersteunende installaties	90
6.5.3	Totaalbeoordeling varianten	91
6.6	Water	91
6.6.1	Kernenergie	92
6.6.2	Elektrolyzers	92
6.6.3	Waterstofcentrales	92
6.6.4	Totaalbeoordeling varianten	92
6.7	Radioactief afval	93
6.8	Straling	94
6.9	CO ₂ -emissies	95
6.10	Materiaalgebruik	96
6.10.1	Beoordeling energie opwekkers	96
6.10.2	Totaalbeoordeling varianten	96
7	Conclusie	97
7.1	Milieueffecten kernenergie	97
7.2	Milieueffecten verschillende energiesysteem varianten	98
7.3	Onzekerheden & Leemten in kennis	100

Bijlagen

Bijlage 1- Vermogens en aantal installaties per energiesysteem variant

Bijlage 2- Verdiepende memo energiesysteem scenario's

Bijlage 3- Verdere verdieping bepaalde milieueffecten

1. Inleiding

1.1 Aanleiding en doelstelling onderzoek

In het coalitieakkoord van het toenmalige kabinet-Rutte IV (2021) is uitgesproken dat kernenergie een grotere rol moet krijgen in de Nederlandse energiemix.³ Dit omvat enerzijds de verlenging van de bedrijfsduur van de bestaande kerncentrale Borssele en anderzijds de ontwikkeling van twee nieuwe kerncentrales. In het meest recente regeerakkoord van kabinet-Schoof (2024) is de ambitie van Rutte IV voortgezet, maar is ook de voorbereidingen van twee extra nieuwe kerncentrales aangekondigd.⁴

Bij de besluitvorming over het toevoegen van kernenergiecapaciteit zijn verschillende aspecten relevant in de afweging, zoals kosten, de omgeving, de impact op het energiesysteem, milieueffecten, toekomstige ontwikkelingen en geopolitieke verhoudingen. Tot op heden is er nog geen expliciete milieuafweging op systeemniveau gemaakt over de keuze voor kernenergie als onderdeel van de energiemix. De Commissie voor de milieueffectrapportage (hierna: Commissie mer) adviseert om voorafgaand aan een eerste besluit over kernenergie een dergelijke afweging op te stellen, waarbij milieuarargumenten die relevant zijn bij de ontwikkeling van kernenergie een expliciete rol spelen.⁵ Tevens is in de zienswijzen op de procedure voor de bedrijfsduurverlenging van de kerncentrale Borssele door meerdere indieners verzocht om ook het nul-alternatief (dus geen opwek van elektriciteit door middel van kernenergie) te onderzoeken.⁶

Het ministerie van Klimaat en Groene Groei (KGG) heeft verzocht een onderzoek uit te voeren gericht op de vraag naar de implicaties van een verschillend aandeel van kernenergie in de energieproductiemix op het milieu. Met dit onderzoek is aanvullende informatie beschikbaar ten behoeve van toekomstige besluitvorming over kernenergieprojecten.

Doel onderzoek

Dit onderzoek had als doel om op strategisch afwegingsniveau inzicht te bieden in de verschillen in milieueffecten van het energiesysteem bij een variërend aandeel kernenergie in de mix aan energiebronnen. Zo zijn de gevolgen van verschillende beleidskeuzeopties voor potentiële milieuaspecten zoals natuur, landschap en hinder betrokken bij besluitvorming. Het onderzoek richt zich op een variërend aandeel kernenergie in de totaal benodigde energieproductiecapaciteit en de overige benodigde productiecapaciteit. De overige capaciteit betreft grotendeels opwek uit duurzame energiebronnen zoals wind- en zonne-energie in overeenstemming met vastgesteld beleid en wettelijke kaders gericht op een CO₂-vrij energiesysteem in 2050. Verschillende varianten van het gehele energiesysteem zijn beoordeeld voor de relevante milieuaspecten in deze analyse om inzicht te bieden in specifieke en potentieel aanzienlijke milieueffecten. Voor dit doel zijn meerdere realistische⁷ en vergelijkbare⁸ varianten van het energiesysteem opgesteld en doorerekend met een variërend aandeel kernenergie.

³ *Coalitieakkoord 'Omzien naar elkaar, vooruitkijken naar de toekomst' | Publicatie | Rijksoverheid.nl*

⁴ *Regeerprogramma kabinet-Schoof | Publicatie | Rijksoverheid.nl*

⁵ *Commissie mer, 'Levensduurverlenging kerncentrale Borssele. Tussentijds toetsingsadvies over het milieueffectrapport'.*

⁶ *Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, 'Reactienota zienswijzen concept-Notitie Reikwijdte en Detailniveau. Kernenergie wetherziening t.b.v. bedrijfsduurverlenging kerncentrale Borssele'.*

⁷ *De varianten moeten 'kloppen', wat betekent dat ten alle tijden aan de vraag naar energie voldaan moet worden. Daar is naast opwek ook opslag, vraagsturing en conversie voor nodig. Daarnaast is ervoor gezorgd dat de varianten aansluiten bij de huidige beleidscontext en dat ruimtelijke/fysieke beperkingen meegewogen zijn.*

⁸ *Dit is cruciaal om een eerlijke vergelijking te kunnen maken tussen varianten met verschillende hoeveelheden kernenergie. Hiervoor is van belang dat elk van de varianten in hetzelfde 'doel' voorziet, namelijk het invullen van de toekomstige energievraag.*

1.2 Uitvoering en betrokken partijen

Het onderzoek is uitgevoerd door een samenwerkingsverband van:

- Pondera Consult & Haskoning – Deskundig op het gebied van milieubeoordelingen van hernieuwbare energie;
- CE Delft – Deskundig in energiemodellering en analyses van het energiesysteem;
- The Binding Energy (België) – Deskundig op het gebied van nucleaire veiligheid, radioactief afval en stralingsbescherming.

1.3 Relevante projecten en ontwikkelingen

Momenteel werkt de Directie Kernenergie van het ministerie van KGG aan verschillende projecten gericht op het vergroten van het opgesteld vermogen aan kernenergie in Nederland. Het eerste project betreft het mogelijk maken van bedrijfsduurverlenging van de kerncentrale Borssele via een wetswijziging. Op grond van het huidige wettelijk kader mag deze centrale uiterlijk tot en met 2033 elektriciteit opwekken. Daarnaast wordt gewerkt aan de voorbereidingen voor een locatiebesluit voor twee nieuw te bouwen kerncentrales.

Naast deze initiatieven wordt verdere uitbouw van het opgesteld vermogen van kernenergie verkend. Uitbouw wordt voorzien door middel van de bouw twee extra kerncentrales of door kerncentrales van een kleiner vermogen, zogenaamde Small Modular Reactors (SMR's), die een flexibelere en schaalbare inzet van kernenergie kunnen bieden. Deze ontwikkelingen zijn betrokken bij de onderzochte varianten die in deze analyse gebruikt zijn voor de effectbeoordeling.

1.4 Reikwijdte en detailniveau onderzoek

Onderdelen energiesysteem

Het onderzoek is gericht op de energieproductiemix voor elektriciteit aangezien kerncentrales gebouwd worden voor elektriciteitsproductie. Productie van waterstof en warmte is een nevenresultaat. Vanwege de nauwe samenhang tussen elektriciteit en waterstof in het toekomstige energiesysteem is ook de impact op het waterstofsysteem meegenomen in de analyses. In dit rapport is over het 'energiesysteem' en over 'energieproductie' gesproken en daarmee wordt verwezen naar het elektriciteitsdeel en waterstofdeel van het energiesysteem.

In hoofdstuk 3 is een toelichting gegeven op de uitgangspunten en onderdelen van de energieproductiemix voor de opwek van elektriciteit. Het onderzoek is gericht op een realistisch systeem, dat wil zeggen dat het energiesysteem functioneert zoals verwacht mag worden en ten alle tijden aan de vraag naar energie voldaan wordt. De samenstelling van de productiebronnen is van invloed op de benodigde energie-infrastructuur en op de benodigde bronnen van flexibiliteit, zoals opslag en conversie. Dit komt doordat de productiebronnen verschillende (technische) eigenschappen hebben. Een duidelijk voorbeeld is opwek uit zon. Energie uit zonnepanelen wordt over dag opgewekt en is niet afgestemd op de vraag naar energie. Opwek met kerncentrales is wel afgestemd op de vraag naar energie.

Ruimtelijke plaatsing

De beleidsmatige ruimtelijke plaatsingsstrategie voor de energieproductiemix staat centraal in specifieke beleidsplannen, -programma's en projecten. Dit ligt buiten de doelstelling van dit onderzoek. De effectbeoordeling voor dergelijke keuzes vindt plaats in het onderzoek dat ten grondslag ligt aan bijvoorbeeld het Programma Noordzee en het Programma Energiehoofdstructuur (PEH). Wel is een globale beschrijving gegeven van typische locaties van de energieproductie installaties of infrastructuur.

Dit is betrokken bij de effectbeoordeling én op basis van expert judgement is beoordeeld of de omvang realistisch (consequent uitvoerbaar) wordt geacht.

Benutting bestaande onderzoeken

Rondom de verschillende energieproductie installaties en -infrastructuur is uitgebreid effectonderzoek uitgevoerd. Dit betreft onder meer de uitbreiding van wind op zee (VAWOZ⁹, Programma Noordzee), bedrijfsduurverlenging van de kerncentrale Borssele, algemeen energiebeleid (Nationaal Plan Energiesysteem) en programmering van energie infrastructuur (Programma Energiehoofdstructuur). Dit rapport over de gevolgen van een variërend aandeel kernenergie in de mix is gebaseerd op expert judgement waarbij gebruik is gemaakt van de diverse recente studies die beschikbaar zijn. Er zijn geen aanvullend detailonderzoek of berekeningen uitgevoerd. Dit heeft geen toegevoegde waarde gezien de onderzoeksopgave. Daarnaast zijn ruimtelijke plaatsing/plaatsingsstrategieën en technische uitvoeringsopties van de technologieën en installaties geen onderdeel van de reikwijdte van deze studie.

Op grond van de doelstelling van deze studie is het onderzoek gericht op de potentiële milieueffecten die mogelijk tot onderscheidende effecten leiden. Effecten waarvan geen onderscheidende milieueffecten worden verwacht, of effecten die bijzonder locatie specifiek zijn dan wel met mitigatie relatief eenvoudig kunnen worden beperkt, zijn buiten beschouwing gelaten. Hier is in hoofdstuk 4 nader op ingegaan. Voor specifieke projecten zal vanzelfsprekend een nadere gedetailleerde effectbeoordeling noodzakelijk zijn ten behoeve van besluitvorming over de locatie en uitvoering van het betreffende plan, programma of project.

1.5 Leeswijzer

Hoofdstuk 2 gaat dieper in op relevante beleidskaders met betrekking tot het Nederlandse energiesysteem en kernenergie. In hoofdstuk 3 zijn de onderzochte energiesysteemvarianten toegelicht.

Hoofdstuk 4 behandelt de methodiek van de effectbeoordeling, inclusief de scoringsmethode, de scope van de milieuaspecten en het beoordelingskader huidige situatie van het energiesysteem. Vervolgens geeft hoofdstuk 5 een nadere toelichting op de milieuaspecten die in de effectbeoordeling zijn meegenomen. Daarnaast wordt uitgelegd welke effecten de energie opwekkers en ondersteunende installaties hebben op de milieuaspecten.

Hoofdstuk 6 presenteert de daadwerkelijke milieueffectbeoordeling. Hierin zijn de energie opwekkers en ondersteunende installaties beoordeeld en is per energiesysteem variant een totaalscore toegekend. Daarna wordt er een totaalbeoordelingstabel gepresenteerd.

In hoofdstuk 7 volgt de conclusie. Hierin wordt weer uitgezoomd: welke verschillen in aandachtspunten komen naar voren uit hoofdstuk 6 tussen de verschillende energiesysteem varianten? En welke kennisleemten zijn binnen dit onderzoek geïdentificeerd?

In bijlage 1 bij dit rapport zijn de uitgangspunten van de verschillende energiesysteemvarianten opgenomen. Hierin staan per onderdeel van het energiesysteem de vermogens en het bijbehorende aantal installaties van de standaardeenheid, zoals in dit rapport gehanteerd. In bijlage 2 wordt uitgebreid toegelicht hoe de energiesysteemvarianten zijn opgebouwd en tot stand zijn gekomen. Deze bijlagen worden in hoofdstuk 3 nader toegelicht. In bijlage 3 worden enkele milieueffecten of gevoeligheden toegelicht die buiten de scope van deze studie vallen, om een beeld te schetsen van het bredere geheel. Een nadere toelichting volgt in paragraaf 3.4, en bij milieuaspecten die hiermee verband houden wordt naar de bijlage verwezen.

⁹ Met VAWOZ wordt bedoeld op Programma Verbindingen Aanlanding Wind Op Zee 2031-2040.

2 Beleidskaders ontwikkeling energiesysteem

Om de markt te sturen en te ondersteunen bij de ontwikkeling van energieproductieprojecten, is nationaal beleid opgesteld. Dit beleid voldoet aan de wensen van het kabinet en de verplichtingen uit internationale verdragen, zoals het Klimaatverdrag van 1992, aangevuld met onder andere het Verdrag van Parijs (2015), evenals Europese regelgeving, waaronder de Richtlijn voor Duurzame Energie (richtlijn 2009/28/EG, herzien in 2018 en 2023). Daarnaast bieden beleid en wetgeving een kader voor de beoordeling van aanvaardbare milieueffecten.

Nationaal Plan Energiesysteem

Het Nationaal Plan Energiesysteem (NPE) is het beleidskader voor de ontwikkeling van de Nederlandse energievoorziening tot 2050 en benadrukt een maximale inzet op duurzame energiebronnen, energiebesparing en systeemintegratie in lijn met de doelstellingen uit de Klimaatwet.¹⁰ In het NPE staat een langetermijnvisie op het energiesysteem in 2050, de route hiernaartoe en welke bijdrage(n) de Rijksoverheid en andere overheden (zoals gemeenten) moeten leveren. Elke vijf jaar wordt het NPE waar nodig aangepast en geactualiseerd om goed in te kunnen spelen op innovaties en maatschappelijke ontwikkelingen.

Het NPE schetst de verwachte groei van kernenergie binnen de energiemix. Binnen dit kader wordt voor kernenergie een rol voorzien als stabiele en CO₂-vrije energiebron, die bijdraagt aan de leveringszekerheid in een energiesysteem met veel weersafhankelijke bronnen zoals wind- en zonne-energie. In het NPE is een groei voorzien van de capaciteit van kernenergie van 0,5 GW nu naar 3,5 GW in 2035 en mogelijk 7 GW in 2050.¹¹ Naast kernenergie bevat het NPE ook de verwachte groei van de overige onderdelen van het energiesysteem (energievraag, hernieuwbare opwek, opslag, conversie) geschetst. Bij de energiesysteem varianten wordt hierbij aangesloten.

Programma Energiehoofdstructuur

Het Programma Energiehoofdstructuur (PEH) biedt een kader voor de ruimtelijke inpassing van nationale energie-infrastructuur benodigd voor de toekomstige energievoorziening.¹² Het PEH is erop gericht om tijdig te zorgen voor voldoende ruimte voor de nationale energiehoofdstructuur, op basis van een integrale afweging met andere opgaven en belangen. Het PEH hanteert als tijdshorizon de periode 2030 tot 2050 en betreft het gehele Nederlandse grondoppervlak met uitzondering van de Noordzee. Voor de Noordzee wordt in het programma Verkenning Aanlanding Windenergie op Zee (in voorbereiding) de energie infrastructuur geprogrammeerd.

Het PEH beschrijft de ruimtelijke voorwaarden en indicaties voor mogelijke kerncentrale locaties. Dit beleid bouwt voort op bestaande ruimtelijke kaders en bevestigt Borssele en de Maasvlakte als waarborglocaties voor kernenergieproductie.¹³ Het PEH benadrukt het belang van veiligheid, bereikbaarheid en minimale impact op de leefomgeving bij de selectie van locaties voor kerncentrales.

¹⁰ Rijksoverheid (2023), *Nationaal Plan Energiesysteem*.

¹¹ De doelstelling vanuit het NPE ligt iets lager dan de bovengrens aan kernenergie die binnen de scenario's bekeken is. De bovengrens binnen de onderzochte scenario's ligt op 8,3 GW en is gebaseerd op het Programma Energiehoofdstructuur.

¹² Rijksoverheid (2024), *Programma Energiehoofdinfrastructuur*.

¹³ Hoewel het PEH aanvankelijk de Eemshaven uitsloot als toekomstige kernenergielocatie, wordt deze locatie momenteel nog onderzocht door het kabinet waarmee de locatie nog niet is uitgesloten. Daarnaast wordt Terneuzen onderzocht als potentiële locatie voor nieuwe kerncentrales. Op de waarborglocaties worden bepaalde ontwikkelingen, zoals woningbouw, uitgesloten of beperkt indien deze de geschiktheid van deze locaties voor kerncentrales kunnen beperken.

Nationaal Programma Regionale Energiestrategie

Het Nationaal Programma Regionale Energiestrategie (NPRES) ondersteunt de dertig Nederlandse RES-regio's bij het opstellen en uitvoeren van hun regionale energiestrategieën (RES).¹⁴ Het programma is ontstaan uit het Klimaatakkoord van 2019 en heeft als doel om de overgang naar duurzame energie in Nederland te versnellen door samenwerking tussen rijk, provincies, gemeenten, waterschappen en netbeheerders te faciliteren.

In de RES'en maken regio's plannen voor het opwekken van elektriciteit uit zon en wind, de inzet van warmtebronnen en het inpassen van deze opwekking in het landschap en de energie-infrastructuur. Het NPRES ondersteunt dit proces met kennis, monitoring, procesbegeleiding en het delen van ervaringen tussen regio's. Het NPRES signaleert ook knelpunten, zoals netcongestie, ruimtelijke inpassing, natuurbehoud en maatschappelijke zorgen, en stimuleert regio's om samen met het Rijk en andere partijen tot oplossingen en keuzes te komen om de energietransitie haalbaar en uitvoerbaar te maken. Een belangrijk doel is om in 2030 gezamenlijk minimaal 35 terawattuur (TWh) aan duurzame elektriciteit op te wekken, zoals afgesproken in het Klimaatakkoord.

Programma Noordzee

Het Programma Noordzee 2022-2027 is het beleidsplan van de Nederlandse overheid voor het gebruik en de ruimtelijke indeling van de Noordzee in de periode 2022-2027.¹⁵ Het programma beschrijft hoe verschillende functies en belangen – zoals natuur, visserij, energie, scheepvaart, zandwinning en veiligheid – in de Noordzee op een duurzame en efficiënte manier op elkaar worden afgestemd. Belangrijke thema's zijn het versterken van het ecosysteem, de overgang naar duurzame voedsel- en energievoorziening (zoals windparken), en het behoud van een goede milieutoestand in een van de drukst gebruikte zeeën ter wereld. Het programma bevat ook een structuurvisiekaart waarop onder meer nieuwe windenergiegebieden zijn aangewezen, passend bij de klimaatdoelstellingen tot 2030. Daarnaast geeft het Programma Noordzee invulling aan Europese verplichtingen voor maritieme ruimtelijke planning en vormt het een integraal onderdeel van het Nationaal Waterprogramma.

Kaders omgevingseffecten

Op internationaal, nationaal, regionaal en gemeentelijk niveau zijn regelgeving, programma's en richtlijnen van kracht die doelstellingen en/of grenzen stellen aan aanvaardbare milieueffecten. Bijvoorbeeld normen ten aanzien van geluid, natuurdoelstellingen, etc. Deze regelgeving is relevant bij de beoordeling van de milieueffecten. In hoofdstuk 5 van dit rapport wordt per milieuaspect ingegaan op de hoofdlijnen van de relevante kaders die in het kader van deze studie relevant zijn om te benoemen.

¹⁴ [Nationaal Programma Regionale Energiestrategie](#).

¹⁵ [Programma Noordzee 2022-2027](#).

3 Onderzochte energiesysteem varianten

Deze studie heeft als doel om inzicht te bieden in de verschillen in milieueffecten van het energiesysteem bij een variërend aandeel kernenergie in de mix aan energiebronnen. Hiervoor zijn verschillende varianten voor de invulling van het energiesysteem, met verschillende hoeveelheden kernenergie, gemodelleerd. In dit hoofdstuk wordt besproken welke varianten uitgewerkt zijn, wat de uitgangspunten en gehanteerde methodiek zijn en wat de resultaten zijn per variant. Daarvoor wordt eerst een algemene beschouwing op de (potentiële) rol van kernenergie in het energiesysteem gegeven.

3.1 Rol kernenergie in het energiesysteem

Nederland heeft het doel om in 2050 klimaatneutraal te zijn. Voor het bereiken van klimaatneutraliteit is een transitie van het energiesysteem voorwaardelijk, omdat het gebruik van fossiele energiebronnen gepaard gaat met uitstoot van broeikasgassen. De transitie vraagt aanpassingen aan zowel de aanbod- als vraagkant. Er zijn alternatieve energiebronnen nodig die bij gebruik weinig of geen broeikasgassen uitstoten en daarnaast moeten aan de infrastructuur en aan de gebruikerskant aanpassingen gedaan worden.

Elektriciteit speelt al lang een belangrijke rol in het energiesysteem en deze rol zal naar verwachting met de energietransitie alleen maar groter worden. Het is namelijk een energiedrager die goed zonder gebruik van fossiele energiebronnen geproduceerd kan worden. Systemen en toepassingen kunnen veelal goed ingericht worden voor het gebruik van elektriciteit (denk aan bijvoorbeeld elektrische auto's, warmtepompen voor verwarming van huizen) en processen op elektriciteit zijn ook efficiënt (meestal efficiënter dan de huidige fossiele processen).

Er zijn verschillende mogelijke bronnen van niet-fossiele elektriciteit, waarvan kernenergie er één is.¹⁶ Met name windturbines en zonnepanelen worden al steeds meer gebruikt en vormen een substantieel aandeel in de elektriciteitsvoorziening in Nederland. In 2024 kwam de elektriciteitsproductie voor ongeveer 45% van zonnepanelen en windturbines.¹⁷ Omdat de elektriciteitsvraag richting 2050 drie tot vier keer zo groot wordt, zal ook het aanbod van elektriciteit nog sterk moeten groeien. Welke bronnen tegen 2050 allemaal een rol spelen en de mate waarin is onzeker, en hiervoor is ook niet één goed antwoord. Naast wind en zon kunnen elektriciteitsproductie van kerncentrales, waterstofcentrales, biomassacentrales en fossiele energieproductie met CCS (Carbon Capture and Storage (CO₂-afvang en opslag)) en beperkt beschikbare bronnen zoals waterkracht en geothermie ook een rol spelen.

Hoewel kerncentrales een deel van de energiemix kunnen vormen in 2050, zal het aandeel in de totale elektriciteitsproductie beperkt zijn. De ontwikkeling van een kerncentrale kost namelijk veel tijd (ongeveer 15 jaar). Zelfs als naast de bestaande kerncentrale in Borssele er nog vier nieuwe grote kerncentrales gebouwd zijn (en eventueel nog een aantal SMRs), zal de totale elektriciteitsproductie niet veel meer dan 10% van de elektriciteitsvraag in 2050 kunnen invullen. Dit betekent dat er ook bij de ontwikkeling van nieuwe kerncentrales nog een forse groei van het aantal windturbines en zonnepanelen nodig is.

Een belangrijke voorwaarde voor een goed functionerend energiesysteem is dat vraag en aanbod altijd in balans moeten zijn. Het is voor de verduurzaming van het energiesysteem namelijk niet alleen van belang dat er voldoende productie is van niet-fossiele bronnen, maar ook dat deze elektriciteit op het juiste moment geproduceerd wordt. Afnemers willen namelijk op elk moment van het jaar elektriciteit kunnen gebruiken. Windturbines en zonnepanelen hebben allebei een fluctuerend productieprofiel doordat het aanbod van wind en zon varieert over tijd. Kerncentrales zijn, doordat de inzet niet beperkt wordt door de

¹⁶ Naast toepassing voor de productie van elektriciteit kunnen kerncentrales ook ingezet worden voor productie van warmte en waterstof, maar productie van elektriciteit zal de hoofdtoepassing zijn.

¹⁷ [Helpt elektriciteitsproductie uit hernieuwbare bronnen | CBS](#)

beschikbaarheid van de bron (uranium), een constantere of meer flexibele energiebron.¹⁸ Vanwege hoge investeringskosten is het wenselijk om kerncentrales gedurende een groot deel van het jaar te laten draaien.

Kernenergie heeft dus een andere wijze van inzet binnen het energiesysteem dan windturbines en zonnepanelen. Zowel in een systeem met meer kernenergie als in een systeem meer windturbines en zonnepanelen zullen ondersteunende installaties nodig zijn om vraag en aanbod van energie in balans te brengen. Dit zijn bijvoorbeeld batterijen, elektrolyzers (voor productie van waterstof), waterstofcentrales (voor productie van elektriciteit uit waterstof op momenten van schaarste) en waterstofopslag (voor het balanceren van vraag en aanbod van waterstof). Voor het balanceren van vraag en aanbod op korte termijn zullen waarschijnlijk vooral (systeem)batterijen gebruikt worden. Om de onbalans tussen vraag en aanbod van elektriciteit voor langere periodes op te vangen zijn elektrolyzers logischer om in te zetten. De geproduceerde waterstof kan vervolgens weer terug omgezet worden naar elektriciteit (met waterstofcentrales) of kan als zodanig gebruikt worden (als brand- of grondstof). De mate waarin opslag en omzetting van elektriciteit nodig zijn is afhankelijk van de productiemix en dus ook van de mate waarin kerncentrales een rol hebben in het systeem. In een energiesysteem met meer kerncentrales zullen minder ondersteunende installaties nodig zijn dan in een systeem met meer windturbines en zonnepanelen, doordat de inzet van kerncentrales beter af te stemmen is op de vraag naar elektriciteit.

3.2 Aanpak en onderzochte varianten

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

1. Behoud van de bestaande kerncentrale in Borssele (KCB) – 0,5 GW¹⁹
2. Behoud bestaande KCB-centrale en twee nieuwe centrales van het grootste type – 3,7 GW
3. Uitrol volgens het 'Zeer Sterke Knopen met Kernenergie'-scenario van PEH – 8,3 GW
4. Geen kerncentrales

Om een goed beeld te krijgen van de milieueffecten door inzet van kerncentrales, is het nodig om een beeld te hebben van een realistische alternatieve situatie van het energiesysteem. Hiervoor wordt het volledige energiesysteem doorgerekend. Onder het volledige energiesysteem wordt het geheel van vraag, aanbod en flexibiliteit verstaan, voor alle sectoren en alle energiedragers (elektriciteit, waterstof, groengas, warmte). Dit alles wordt op uurbasis doorgerekend. Het gehanteerde zichtjaar is 2050, om een beeld te geven van de effecten voor het eindbeeld van een klimaat neutrale energievoorziening.

Het is te verwachten dat wanneer er niet of minder op kerncentrales ingezet gaat worden, alternatieve bronnen zoals zonnepanelen en windturbines meer gebruikt zullen worden. Voor elk van de hierboven genoemde kernenergie scenario's zijn drie soorten variaties voor de overige invulling aan de opwekkant bekeken:

- 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 er meer kernenergie juist minder wind op zee wordt gerealiseerd, en vice versa.

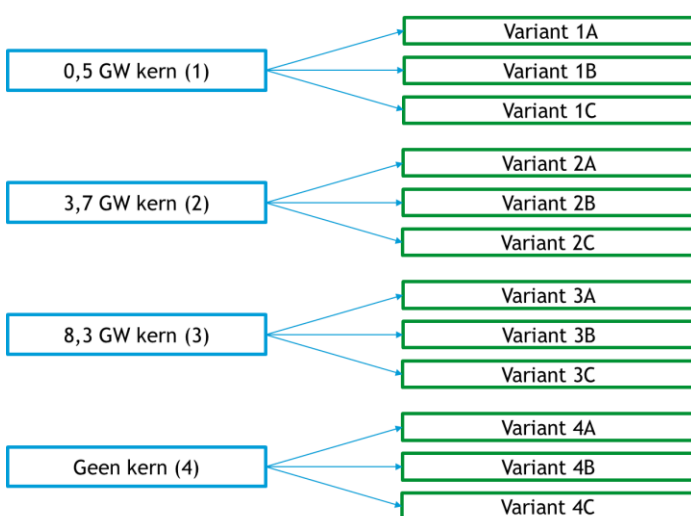
¹⁸ Er zijn wel technische beperkingen waardoor kerncentrales niet volledig stuurbaar zijn.

¹⁹ Volgens de huidige kernenergiewet mag de kerncentrale in Borssele tot einde 2033 energie opwekken. Het huidige kabinet zet in op het langer in bedrijf houden van de kerncentrale, hiervoor is een wetswijziging nodig. Hoe veel langer de kerncentrale open zal blijven is nog niet besloten. In dit onderzoek wordt uitgegaan van 20 jaar voor de scenario's 1, 2 en 3. Bij scenario 4 wordt ervan uitgegaan dat de kerncentrale sluit in 2033.

- 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 bij meer kernenergie en af bij minder kernenergie. Bij de C varianten is de totale productie van elektriciteit dus anders dan bij de A en B varianten.

In Figuur 3-1 staat een schematisch overzicht van de verschillende onderzochte varianten van het energiesysteem.

Figuur 3-1 Overzicht onderzochte varianten van het energiesysteem



3.3 Uitgangspunten en methodiek

Om tot realistische alternatieven te komen, is een volledige doorrekening van energetische varianten met en zonder kernenergie gedaan. Hiervoor is het onafhankelijke integrale energiemodel genaamd Energy Transition Model (ETM) van Quintel gebruikt. 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.

De belangrijkste uitgangspunten waarvan uit is gegaan voor de modellering zijn:

- De analyses zijn uitgevoerd voor zichtjaar 2050. Tussentijdse jaren zijn niet onderzocht. Door het zichtjaar 2050 te hanteren geeft het onderzoek de effecten voor het eindbeeld van een klimaat neutrale energievoorziening.
- Er is bij de A- en B-varianten aangenomen dat 1 TWh productie van kernenergie 1 TWh alternatieve productie 'vervangt'. Daarbij is gecorrigeerd 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 is dus aangenomen dat de totale energievraag die ingevuld wordt met wind (op land en op zee), zon en kernenergie hetzelfde blijft. Zo zijn de varianten eerlijk te vergelijken. Bij de C-varianten blijft de opwek van zon en wind gelijk bij verschillende hoeveelheden kernenergie en is dit niet het geval.

- Om de effecten van verschillende hoeveelheden kerncentrales te bepalen, is een beeld nodig van een uitgangssituatie van de energievraag, in het zichtjaar 2050. Hiervoor is gebruik gemaakt van een recent gepubliceerde scenariostudie van Netbeheer Nederland, waarin een beeld geschetst is van hoe het energiesysteem van Nederland zich kan ontwikkelen (Netbeheer Nederland, 2025). Er wordt uitgegaan van het scenario 'Koersvaste Middenweg', welke aansluit bij de huidige ontwikkelingen en beleidscontext en daarmee de beste inschatting van de verwachte energievraag in 2050 geeft.
- Voor de manier waarop kerncentrales op de elektriciteitsmarkt ingezet worden (wanneer ze draaien, opstartsnelheden, mate van flexibiliteit inzet et cetera), kunnen verschillende aannames gedaan worden. Er wordt aangesloten bij de wijze van inzet van de kerncentrale(s) van het basisscenario, het scenario 'Koersvaste Middenweg' van de recent gepubliceerde scenariostudie van Netbeheer Nederland (Netbeheer Nederland, 2025). De inzet van kerncentrales in dit scenario is bepaald in het ETM en is gebaseerd op een merit-order inzet: hierbij worden productie-installaties van elektriciteit ingezet op basis van hun marginale kosten en een dergelijke inzet is economisch optimaal.
- Met de modellering wordt, naast de inzet van energie opwekkers, ook de inzet van flexibele installaties (deze worden in het vervolg ondersteunende installaties genoemd) bepaald. Dit zijn systeembatterijen, elektrolyzers, waterstofcentrales en waterstofopslag. Het effect van de inzet van andere onderdelen van het energiesysteem (bijvoorbeeld power-to-heat) is niet bepaald, omdat deze bij de gedane aannames niet sterk afhankelijk zijn van de inzet van verschillende hoeveelheden kerncentrales.
- Er is een kwalitatieve analyse gedaan naar de effecten bij een andere ontwikkeling van de energievraag en andere manier van inzet van kerncentrales.

3.4 Resultaten per variant

Met bovenstaande uitgangspunten is het volledige energiesysteem (paragraaf 3.2 beschrijft wat hieronder verstaan wordt) doorerekend voor de twaalf varianten, voor het zichtjaar 2050.

De voornaamste algemene bevindingen zijn:

- 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, elektrolyse en waterstofopslag. 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 regelbare centrales (in de vorm van 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).²⁰
- 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

²⁰ Dit komt doordat kerncentrales (ongeveer) even flexibel inzetbaar zijn als waterstofcentrales en daarmee een vergelijkbare functie in het energiesysteem vervullen. Ze kunnen beide ingezet worden op momenten van tekort van elektriciteit.

opslag varieert enigszins tussen de varianten, doordat deze afhankelijk is van de mate van inzet van elektrolyzers en regelbare centrales.

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 elektriciteitsopwekking 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).

Achtereenvolgens worden hieronder de resultaten voor de Varianten A, B en C besproken.

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

In Tabel 3-1 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 3-1 Vermogens (GW) en hoeveelheid waterstofopslag (TWh) in varianten A

	Huidig (2024)	1A	2A	3A	4A	
Energie opwekkers						
Zon-pv ²¹	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

²¹ 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 ii3050-scenario's).

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 vollasturen²² (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 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 bestuurbaar 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.

3.4.2 Varianten B: Kernenergie in plaats van wind op zee

In Tabel 3-2 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 3-2 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

²² 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.

	Huidig (2024)	1B	2B	3B	4B	
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.

3.4.3 Varianten C: Gelijke productie overige bronnen

In Tabel 3-3 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 3-3 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-varianten 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. Bij meer kernenergie (variant 3C) vindt 9 TWh export en 36 TWh import van elektriciteit plaats, terwijl zonder kernenergie (variant 4C) 4 TWh export en 47 TWh import van elektriciteit 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.

3.5 Samenvatting kwantitatieve resultaten

Voor de realisatie van de doelstellingen voor het toekomstige energiesysteem geldt in alle varianten ten opzichte van nu (los van de mate van inzet van kerncentrales) een flinke toename van wind op land, wind op zee, zon-pv (op land en/of op dak), opslag, elektrolyse en waterstofopslag. 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.

Binnen zowel de A- als B-varianten is het absolute verschil in vermogens van kerncentrales tussen de varianten veel kleiner dan het absolute verschil in hernieuwbare opwek, ofwel 1 GW kerncentrales concurreert met een significant groter vermogen aan hernieuwbare opwek (met name zon). Daarnaast varieert de totale hoeveelheid opgesteld vermogen aan energie-opwekinstallaties significant binnen de A- en B-varianten. In de A-varianten is de variatie in wind op land tussen de variant met veel en weinig kerncentrales (3A versus 4A) een factor 2, en voor zon-pv is het verschil zo'n 30%. In de B-varianten is het relatieve verschil in geïnstalleerd vermogen van wind op zee tussen de varianten met veel en weinig kerncentrales (3B versus 4B) zo'n 20%.

Deze verschillen hebben vooral te maken met lagere vollasturen en daarnaast met hogere verliezen door meer opslag, elektrolyse en curtailment bij meer hernieuwbare opwek. Dit komt doordat hernieuwbare opwek minder goed aansluit op de vraag dan kernenergie en bovendien een sterker fluctuerend opwekpatroon kent.

In de A- en B-varianten leidt inzet van kerncentrales er ook toe dat minder ondersteunende installaties (opslag, elektrolyse, waterstofopslag) nodig zijn. Als er alleen kernenergie bijkomt en er geen andere opwek afgaat (C-varianten) zijn er meer overschotten wat leidt tot meer elektrolyse en waterstofopslag. In dat geval wordt Nederland ook minder afhankelijk van import van energie uit andere landen.

3.6 Kwalitatieve beschouwingen

In deze paragraaf worden een aantal aspecten kwalitatief beschouwd. Dit zijn aspecten die niet kwantitatief doorgerekend zijn in de varianten. Allereerst wordt ingegaan op de impact van de verschillende varianten op infrastructuur en vervolgens de impact op leveringszekerheid. Dan volgen twee kaders waarin kort wordt ingegaan op respectievelijk het effect van een andere manier van inzet van kerncentrales en een andere ontwikkeling van de vraag en overig aanbod.

3.6.1 Impact op energie-infrastructuur

De impact van een energiesysteem op infrastructuur hangt af van de regionale invulling van het energiesysteem en lokale kenmerken van de infrastructuur. Deze 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. Wel is er kwalitatief iets over te zeggen:

- Kerncentrales worden aangesloten op het 380kV hoogspanningsnet. De impact is erg afhankelijk van de locatie waar ze geplaatst worden: als dit is op een locatie waar al veel opwek is (bijvoorbeeld aanlandlocaties wind op zee), is er een risico dat uitbreidingen aan het hoogspanningsnet nodig zijn. Echter als dit is op een locatie met veel elektriciteitsvraag en weinig andere opwek, kunnen kerncentrales er ook voor zorgen dat juist minder uitbreidingen nodig zijn.
- Hernieuwbare opwek op land en dak worden vooral aangesloten op de laagspannings- en middenspanningsnetten. Dit betekent dat in de A-varianten een verschil te zien is in impact op deze netten, waarbij de impact groter is bij meer hernieuwbare opwek (en dus minder kernenergie).
- Windparken op zee worden net als kerncentrales aangesloten op het 380 kV hoogspanningsnet, en hiervoor zullen uitbreidingen op land en op zee nodig zijn. Dit betekent dat in de B-varianten een verschil te zien is in impact op deze netten, waarbij er meer netten op zee nodig zijn in de varianten met minder kernenergie (en dus meer wind op zee).
- In de C-varianten leidt extra inzet van kerncentrales tot meer export, wat via 380kV hoogspanningskabels verloopt. Met name als kerncentrales ver van de interconnectiepunten met het buitenland geplaatst worden, zal er extra belasting op het elektriciteitsnet zijn.
- Ten slotte: het productieprofiel van kerncentrales is vraagvolgend. Productie uit windturbines en zonnepanelen hangt samen met het moment van de dag en de aanwezigheid van voldoende wind of zon. 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 dichterbij vraag en aanbod bij elkaar gelokaliseerd zijn, hoe beperkter de impact omdat de elektriciteit dan minder ver getransporteerd hoeft te worden. Die impact wordt kleiner naarmate het opwekpatroon beter bij het vraagpatroon aansluit.

3.6.2 Impact op leveringszekerheid voor alle varianten

De doorgerekende varianten hebben allemaal een leveringszekerheid van bijna 100%, aangezien dit het uitgangspunt is geweest bij het opstellen van de energiesysteem varianten.²³ De leveringszekerheid verschilt dus niet tussen de verschillende varianten. 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 vermogen²⁴ (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 is in de varianten.

²³ 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.

²⁴ Vermogen van installaties die stuurbaar zijn, en daarmee flexibel in te zetten.

Kader 3-1 Impact inzet kernenergie en vraagontwikkeling op resultaten

In de varianten zijn aannames gemaakt over de wijze van inzet van kerncentrales en de ontwikkeling van de energievraag. Dit is gelijk voor alle varianten. Deze aspecten kunnen echter wel impact hebben op de rol van kernenergie in het energiesysteem. Hieronder wordt kwalitatief de impact van de inzet van kerncentrales en vraagontwikkeling op de resultaten besproken.

Inzet kerncentrales

Het is de verwachting dat, economisch gezien, de aangenomen (flexibele) inzet 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. In dat geval vervangen ze mogelijk meer wind of zon, maar leiden ze ook tot hogere energieverliezen bij overschotten. Dit maakt het onduidelijk of kernenergie netto meer of minder hernieuwbare energie vervangt. Daarnaast vereist een must-run-scenario meer inzet van flexibele bronnen: bij overschotten omdat kerncentrales niet snel terug geregeld kunnen worden, en bij tekorten omdat ze niet snel genoeg kunnen opschakelen. 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.

Andere ontwikkeling energievraag en overige opwek

Er zijn onzekerheden rondom de ontwikkeling van de energievraag (inclusief flexibiliteit) en de opwek van overige bronnen (wind op land, wind op zee en zon). Die hebben een grote impact op de invulling van de energiemix, en kunnen ervoor zorgen dat deze energiemix flink anders uitvalt. Zo zal bij een lagere energievraag minder opwek nodig zijn, zowel van hernieuwbare bronnen als van kernenergie. Maar bij de varianten A en B zijn de verschillen tussen de varianten met meer en minder kernenergie robuust, doordat bij minder vraag de vraag naar aanbod in alle scenario's gelijkmatig afneemt en bij meer vraag vice versa. 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 en/of meer opwek van overige bronnen is er dan minder noodzaak voor kernenergie, en bij meer vraag en/of minder opwek van overige bronnen meer noodzaak voor kernenergie.

Een lagere energievraag zorgt daarnaast voor minder onzekerheid in de haalbaarheid van de benodigde vermogens energie-opwekinstallaties, infrastructuur en ondersteunende installaties in de varianten. Bij minder vraag is er minder infrastructuur nodig, zijn minder energie-opwek installaties nodig en zullen waarschijnlijk ook minder regelbare centrales, elektrolyzers en opslag van waterstof nodig zijn. Voorbeelden van factoren die bijdragen aan de onzekerheid over de haalbaarheid zijn: snelheid van uitrol van infrastructuur, snelheid van realisatie van zonne- en windparken, snelheid van realisatie van elektrolyzers en de beschikbaarheid van ruimte. Doordat de hoeveelheden benodigde vermogens energie-opwekinstallaties, infrastructuur en ondersteunende installaties verschillen tussen de varianten, zijn deze factoren ook in verschillende mate relevant in de verschillende varianten.

4 Methodiek milieueffectenbeoordeling

De in het vorige hoofdstuk beschreven varianten van het energiesysteem zijn in deze studie beoordeeld op diverse milieuaspecten. Dit hoofdstuk beschrijft de elementen van het energiesysteem die zijn geanalyseerd, de relevante milieuaspecten en het gehanteerde beoordelingskader. Eerst wordt de methodiek van de effectbeoordeling toegelicht in paragraaf 4.1. In paragraaf 0 wordt vervolgens het beoordelingskader toegelicht voor de relevante milieuaspecten. Tot slot wordt in paragraaf 4.3 besproken welke milieuaspecten buiten beschouwing bleven in deze studie en hierbij is tevens toegelicht wanneer deze aspecten wel nader onderzocht worden.

4.1 Beoordelingsmethodiek

De milieueffecten van de verschillende energie opwekkers en ondersteunende installaties binnen het energiesysteem zijn beoordeeld aan de hand van een vier-puntenschaal. De invulling van deze schaal verschilt per milieuaspect, afhankelijk van de specifieke kenmerken en de wijze waarop effecten optreden. In de kern wordt een viertal niveaus onderscheiden die samenhangen met de kans op een meer of minder relevante impact op het betreffende milieuaspect. De impact is daarbij een combinatie van *de mogelijke ernst* en *de omvang van het optreden van milieugevolgen*:

- **0** = Geen, verwaarloosbare of zeer beperkte impact op betreffende milieuaspect
- **1** = Beperkte impact
- **2** = Aanzienlijke impact
- **3** = Grote impact

Voor de 12 varianten (vier overkoepelende scenario's met een variërend aandeel kernenergie met elk drie varianten) zijn de individuele onderdelen binnen een variant beoordeeld. In hoofdstuk 6 wordt per milieuaspect toegelicht hoe de verschillende energiesysteemvarianten als geheel én per energieopwekker en ondersteunende installatie binnen die variant zijn beoordeeld.

4.1.1 Onderdelen van energiesysteem en eenheden

Als uitgangspunt voor deze studie geldt een realistisch energiesysteem. Bij verschillende aandelen van kern-, zon- of windenergie zijn daarom ook ondersteunende installaties nodig zoals opslag van elektriciteit en conversie naar een andere energievorm. Niet alle onderdelen van de doorgerekende energiesystemen zijn beoordeeld op milieueffecten. De onderdelen van het energiesysteem waarvoor mogelijk aanzienlijke milieueffecten kunnen optreden die wél in de milieueffectbeoordeling zijn meegenomen, zijn opgenomen in Tabel 4-1.

De inzet van de installaties, het aantal vollasturen per jaar, hangt samen met energiebeleid en de energiemarkt. Een centrale die in principe alleen in bedrijf komt in periodes met een beperkt aanbod van energie uit zon- en windkracht zal bijvoorbeeld niet constant in bedrijf kunnen zijn. Batterijopslag is mogelijk met name actief bij meer zon- en/of windproductie dan de actuele vraag. Voor de milieueffectenbeoordelingen is conservatief aangenomen dat alle installaties in principe in bedrijf zijn.

Het uitgangspunt is geweest dat de installaties voldoen aan wet- en regelgeving. Aangenomen mag worden dat bij de plaatsing en het ontwerp rekening wordt gehouden met bijvoorbeeld geluidsnormen. De beoordeling vindt dan ook plaats over de potentiële effecten die optreden vanuit de situatie dat voldaan wordt aan gestelde normen. Voor een aantal aspecten geldt dat mitigatie niet standaard onderdeel is van de uitvoering of exploitatie en dat mogelijk extra aanpassing en/of aanvullend mitigatie vereist is. Dit wordt betrokken bij de beoordeling van de ernst van een effect.

De potentiële milieueffecten hangen tevens samen met de omvang van installatie. Ten behoeve van de beoordeling is om die reden een richtinggevende omvang per installatie (per kerncentrale, windpark, zonnepark, etc.) bepaald. De volgende tabel geeft een indicatie van de aangenomen eenheid per installatie. Deze eenheden zijn gebruikt om een indicatie te geven van het aantal installaties per variant. De indicatie van het aantal installaties per variant is opgenomen in bijlage 1. Deze indicaties zijn gebruikt om de schaal van de nog te realiseren installaties beter te duiden en mee te nemen in de effectbeoordeling. Daarnaast is aan de hand van het aantal (of de opgetelde omvang van de) installaties beoordeeld of plaatsing ruimtelijk gezien uitvoerbaar is.²⁵

Tot slot is in de tabel ook beschreven waaruit de technologie bestaat en welke aanvullende infrastructuur nodig is naast de bouw van de installatie zelf. In de effectbeoordeling is primair ingegaan op de installaties zelf, maar waar relevant is ook de impact van de direct benodigde infrastructuur beschreven.

Tabel 4-1 Onderdelen energiesysteem die beoordeeld zijn op de milieuaspecten met toelichting van de techniek en benodigde infrastructuur

Onderdeel energiesysteem	Eenheid	Onderdelen techniek en benodigde infrastructuur
Energie opwekkers		
Zon-PV	Zon op land: 20-50 MW per installatie (gemiddeld 35 MW) Zon op dak: grote verschillen in omvang geen standaard eenheid.	• Zonnepanelen • Onderconstructies/montagesystemen: metalen of betonnen draagstructuren om de panelen op de juiste hellingshoek en oriëntatie te plaatsen • Omvormers: apparaten die de opgewekte gelijkstroom (DC) omzetten naar wisselstroom (AC) voor netinvoeding • DC-bekabeling tussen de zonnepanelen en omvormers • AC-bekabeling tussen de omvormers, transformatoren en het aansluitpunt op het elektriciteitsnet Bij zon op land eventueel ook: • Transformatorstations: om de spanning te verhogen zodat de elektriciteit efficiënt naar het net kan worden getransporteerd • Toegangsweg
Wind op land	Windparken met 5-10 windturbines van 6 MW. 30-60 MW per installatie (gemiddeld 45 MW)	• Windturbines • Betonnen fundering • Transformatorstation: verhoogt de spanning van de opgewekte stroom zodat deze efficiënt kan worden vervoerd • Interne bekabeling: ondergrondse kabels die de turbines verbinden met het transformatorstation. • Netaansluiting kabel • Toegangswegen naar turbines • Kraanopstelplaatsen: verharde terreinen bij elke turbine om zware kranen op te stellen voor installatie en onderhoud
Wind op zee	Windparken van 65 windturbines van 15 MW. 1 GW per installatie	• Windturbines • Fundering: monopiles (meest gangbaar) dit zijn stalen buispalen die in de zeebodem worden geheid • Interne parkbekabeling: onderzeese wisselstroomkabels (AC) verbinden de turbines met een offshore transformatorstation • Offshore transformatorstation: verhoogt de spanning om energieverlies te minimaliseren bij transport. Vaak op een platform op zee

²⁵ Zie paragraaf 6.3.

		• Exportkabels naar land: kabels worden in de zeebodem ingegraven om schade te voorkomen • Landstation: aansluitpunt waar de elektriciteit wordt omgezet naar de juiste spanning voor integratie in het landelijke elektriciteitsnet
Kernenergie	1,6 GW per kerncentrales ²⁶ 0.5 GW Borssele kerncentrale 200 MW per SMR's	• Nucleaire reactor: de plek waar kernsplijting plaatsvindt • Containmentgebouw: een zwaarbeveiligde structuur die radioactieve materialen insluit en beschermt tegen externe invloeden • Koelcircuit: een gesloten systeem waarin reactorwater onder hogedruk warmte afvoert, waarna het wordt omgezet in stoom om een turbine aan te drijven en vervolgens weer wordt afgekoeld tot water voor hergebruik • Stoomturbines en generatoren: de opgewekte warmte drijft een stoomturbine aan die elektriciteit genereert • Transformatorstations: verhogen de spanning voor transport naar het elektriciteitsnet • Netwerkaansluiting kabel • Back-up energievoorziening: dieselgeneratoren en/of batterijopslag om de benodigde koelsystemen van de centrale draaiende te houden bij een netstoring. Deze zijn niet gericht op continueren van het opwekken van energie • Koelwaterbron, pompstations en leidingen: leidingen vanaf rivier/meer/zee die koelwater transporteren van en naar de centrale • Koeltorens (indien nodig): verdampen een deel van het koelwater en verminderen thermische belasting (toevoer van warm water) bij de waterbron • Beveiligingszones, controlekamers, werkplaatsen en magazijnen, kantoren en personeelsfaciliteiten • Opslag van radioactief afval: vaak op een andere locatie. In Nederland in COVRA. Dit wordt apart van de installatie beoordeeld in dit onderzoek • Toegangswegen/terreinverharding
Ondersteunende installaties		
(Systeem)-Batterijen	200 MW per installatie	• Batterijmodules in behuizing: deze kunnen verschillende technologieën bevatten, zoals lithium-ion, zoutwaterbatterijen of andere chemische opslagmethoden, afhankelijk van het type systeem • Omvormers: om de gelijkstroom (DC) die door de batterijen wordt opgeslagen om te zetten naar wisselstroom (AC) voor gebruik in het net of het specifieke systeem • Transformatoren: verhogen of verlagen de spanning van de energie die uit de batterijen wordt gehaald, afhankelijk van de aansluiting op het elektriciteitsnet • DC-bekabeling voor het verbinden van de batterijmodules met de omvormers • AC-bekabeling voor het verbinden van de omvormers met het elektriciteitsnet of de eigen installatie • Onderhoudsruimte • Luchtventilatoren: om de temperatuur binnen het systeem te reguleren • Toegangsweg
Elektrolyzers	500 MW per installatie	• Elektrolysercel: waarin water wordt gesplitst in water- en zuurstof door middel van elektriciteit

²⁶ Uitgaande van Gen III reactoren die doorstroomkoelingssysteem gebruiken. Gen IV-reactoren (de nieuwste in ontwikkeling) zouden mogelijk ook met andere methodes zoals lucht of warmteput gekoeld kunnen worden. Deze laatste generatie is nog in ontwikkeling, maar in dit geval valt de noodzaak voor grote hoeveelheden (koud) koelwater weg en zal de impact van warmte emissie naar lucht of ondergrond beoordeeld moeten worden.

		• Omvormers: om de stroom die uit het elektriciteitsnet of een hernieuwbare bron (zoals zonne- of windenergie) komt, om te zetten naar de vereiste DC-stroom voor de elektrolyse • DC-bekabeling: Voor het transport van de gelijkstroom van de omvormer naar de elektrolyse-eenheid • Waterpomp- en filtratiesysteem: het filteren en toevoeren van water (meestal gedemineraliseerd water) naar de elektrolyser • Opslagtanks: na de productie beperkte opslag van waterstof in hogedruk- of cryogene tanks vortransport of invoeding • Compressie- en koelsystemen: voor efficiënte opslag, transport of invoeding • Waterstofdistributiesysteem: pijpleidingen of tankwagens om de waterstof naar de eindgebruiker te transporteren • Koelsystemen om oververhitting te voorkomen • Onderhoudsruimte • Opslagfaciliteiten voor reserveonderdelen • Personeelsfaciliteiten: inclusief controlekamers en werkruimtes • Toegangswegen/terreinverharding
Waterstof-centrales	1 GW per installatie	Deze zetten in tegenstelling tot elektrolyzers juist waterstof om naar elektriciteit. • Waterstofverbrandingssysteem/waterstofturbines/brandstofceltechnologie: gasgestookte turbines of ketels of speciale turbines zonder gas voor verbranding waterstof. Alternatief afgesloten ruimte voor elektrochemische reacties waar waterstof zonder verbranding wordt omgezet. • Omvormers en transformatoren: voor het omzetten van de opgewekte elektriciteit van DC (in het geval van brandstofcellen) naar AC en verhogen of verlagen de spanning afhankelijk van het netwerk waarop de elektriciteit wordt aangesloten • Netaansluiting kabel • Pijpleidingen en waterstofopslag: voor de toevoer van waterstof • Koelsystemen om oververhitting te voorkomen • Onderhoudsruimte • Opslagfaciliteiten voor reserveonderdelen • Personeelsfaciliteiten: inclusief controlekamers en werkruimtes • Toegangswegen/terreinverharding
Waterstofopslag	0,25 TWh per zoutcaverne/ >1 TWh/ leeg gasveld	• Boorputten en ondergrondse opslagruimte in zoutcaverne of leeg gasveld • Compressoren: waterstof moet vaak worden gecomprimeerd voordat het ondergronds wordt opgeslagen om het volume van de opslag te optimaliseren • Pijpleidingen: voor het transport van waterstof van de productie-eenheden naar de opslagfaciliteit (of omgekeerd, voor distributie) • Waterstofinjectie- en verwijderingsinstallaties: injecteren en uithalen van waterstof in waterstofopslagruimte • Koelsystemen: waterstof kan worden opgeslagen bij lage temperaturen of hoge druk, dus koelsystemen zijn nodig om de temperatuur te regelen, met name tijdens het injecteren van gas • Onderhouds- en inspectieruimtes • Opslagfaciliteiten voor reserveonderdelen • Personeelsfaciliteiten: inclusief controlekamers en werkruimtes • Toegangsweg

4.1.2 Invulling van locaties

Zoals in hoofdstuk 1 aangegeven gaat deze studie niet in op potentiële spreiding of plaatsing van installaties. Wel is er een globaal beeld meegenomen in de beoordeling van geëigende locaties voor de installaties. Dit is betrokken bij de beoordeling van de potentiële impact op bepaalde milieuaspecten. Deze uitgangspunten zijn beschreven in Tabel 4-2.

Tabel 4-2 Indicatie locaties installaties

Onderdeel energiesysteem	Uitgangspunt locatie
Energie opwekkers	
Zon-PV	Zonnevelden worden grotendeels gerealiseerd op agrarische gronden, maar ook in de berm van snelwegen, spoorwegen, of op onbenutte industrieterreinen en braakliggende terreinen. Een beperkt deel zal worden aangelegd op wateroppervlakken in de vorm van drijvende zonneparken. Daarnaast wordt zonne-energie op grotere schaal gerealiseerd op industriële en commerciële daken, evenals op woningen voor eigen gebruik.
Wind op land	Windparken op land worden voornamelijk gerealiseerd op agrarische gronden. Daarnaast worden windturbines ook geplaatst op industrieterreinen.
Wind op zee	Windparken op zee worden gerealiseerd op zee op ruime afstand (kilometers) uit de kust op aangewezen windkavels. Bij de aanwijzing van de kavels wordt rekening gehouden met bestaande functies en gebruik zoals scheepvaartroutes, natuurgebieden en olie- en gasplatforms.
Kernenergie	Kerncentrales worden geplaatst op of nabij industrieterreinen nabij grote waterlichamen (zee, meren of rivieren) in verband met koelwaterbehoefte en in afgelegen of minder dichtbevolkte gebieden.
Ondersteunende installaties	
(Systeem)-batterijen	Plaatsing op industrieterreinen, nabij grootschalige energieproductie installaties of standalone op agrarische gronden, veelal in de nabijheid van hoogspanningsstations en elektriciteitsnetknooppunten om bij te dragen aan netbalanceren.
Elektrolyzers	Plaatsing op industriegebieden en havens waar waterstof een grondstof is voor sectoren zoals de staalindustrie, chemische industrie en transportsector. Nabij voldoende grote waterlichamen in verband met koelwater en waterbehoefte. Daarnaast wordt in beleid voorzien dat een deel van de elektrolyse capaciteit op zee wordt geplaatst. Tot slot wordt er mogelijk een deel van de elektrolyzers gerealiseerd bij hernieuwbare opwek op land.
Waterstof-centrales	Plaatsing op industrieterreinen. Omdat waterstofcentrales grotendeels gebruikmaken van vergelijkbare technologie als conventionele energiecentrales (gas en kolen), kunnen bestaande locaties benut voor de transitie naar waterstof, wat hergebruik van bestaande energie-infrastructuur en locaties mogelijk maakt. Op dit moment heeft Nederland 18,7 GW aan gascentrales en 4 GW aan kolencentrales ²⁷ .
Waterstofopslag	In dit onderzoek wordt alleen gekeken naar grootschalige ondergrondse waterstofopslag. Dit is kansrijk in lege zoutcavernes en gasvelden. De bestaande putten en installatie locaties uit de aardgasindustrie kunnen grotendeels worden hergebruikt voor waterstofopslag.

²⁷ [ENTSO-E Transparency Platform](#) – cijfers van 2024.

De aanwezigheid van lege gasvelden en zoutcavernes is een gegeven en potentiële locaties kunnen volgen uit bereikbare gasvelden en zoutcavernes. Als uitgangspunt geldt dat de pomplocaties voornamelijk in agrarisch grondgebied zijn gelegen.

Het uitgangspunt in dit onderzoek is dus dat er waterstof opgeslagen gaat worden in lege gasvelden en bestaande zoutcavernes. Er is nog onzekerheid momenteel of opslag van waterstof in lege gasvelden voldoende economisch rendabel is. Mocht opslag in lege gasvelden toch economisch onvoldoende rendabel zijn dan dienen er extra zoutcavernes gecreëerd te worden om de benoemde hoeveelheden waterstof te kunnen opslaan. Dit zou meer milieueffecten tot gevolg hebben.

4.1.3 Omvang huidige installaties en repowering

In de huidige situatie zijn reeds installaties aanwezig in het energiesysteem. Bij de beoordeling is er rekening mee gehouden dat een deel van de benodigde capaciteiten reeds aanwezig is. Dit betreft bijvoorbeeld bestaande installaties voor wind-, zonne- en kernenergie. Voor de invulling van locaties voor de installaties in 2050 zal het niet alleen gaan om nieuwe locaties. Een deel van de locaties van bestaande installaties zal in 2050 worden opgeschaald, een deel van de bestaande installaties zal ook worden verwijderd zonder vervanging. Voorgaande geldt beperkt tot niet voor ondersteunende installaties zoals (systeem)batterijen, elektrolyzers, waterstofcentrales en waterstofopslag.

Alle milieueffecten die voortvloeien uit de uitbreiding van deze energiecomponenten zijn beoordeeld. Tabel 4-3 geeft het geïnstalleerde vermogen eind 2024.

Tabel 4-3 Huidige stand energiesysteem

Onderdeel energiesysteem	Huidige situatie (eind 2024) ²⁸
Energie opwekkers	
Zon-PV	24.359 MW, circa 35 km ² op veld en 105 km ² op dak
Wind op land	6.953 MW, circa 3.000 windturbines
Wind op zee	4.748 MW, circa 500 windturbines
Kernenergie	485 MW, kerncentrale Borssele
Ondersteunende installaties in energiesysteem	
(Systeem)batterijen	Circa 250 MW
Elektrolyzers	Minimaal (< 1 GW)
Waterstofcentrales	0 MW
Waterstofopslag	0 TWh

²⁸ Cijfers huidige situatie wind en zon komen van CBS.

4.2 Milieuaspecten en beoordelingskader

De energieproductie technologieën en de relevante bijbehorende energie infrastructuur vormen een ingreep in de bestaande situatie en leiden daarmee tot effecten op de fysieke leefomgeving. De milieueffecten die mogelijk aanzienlijk kunnen zijn, door een installatie op zichzelf of door de optelsom van het aantal benodigde installaties, zijn met dit onderzoek beoordeeld. Tabel 4-4 toont de beoordelingscriteria en de schaalverdeling voor de verschillende milieuaspecten die beoordeeld zijn. Na de tabel is een korte toelichting gegeven op de milieuaspecten. In hoofdstuk 5 en 6 wordt hierop verder ingegaan.

Tabel 4-4 Beoordelingskader milieuaspecten

Milieuaspect	Toelichting	Beoordelingscriteria	Beoordeling potentie effect
Geluid	Impact op geluidgevoelige objecten in de omgeving	Mate waarin geluidshinder bij geluidgevoelige objecten optreedt	0 Geen relevante tot zeer beperkte geluidshinder bij een beperkt aantal geluidgevoelige objecten
			1 Kans op beperkte hinder bij geluidgevoelige objecten in de directe omgeving van een beperkt aantal installaties
			2 Kans op ernstige hinder bij geluidgevoelige objecten in de directe omgeving van een of enkele installaties, of kans op beperkte hinder bij een groot aantal installaties (verspreid over Nederland)
			3 Kans op ernstige hinder bij geluidgevoelige objecten in de ruime omgeving
Ecologie	Impact op beschermde natuurgebieden en soorten	Kans op negatieve effecten op natuurdoelstellingen (Natura 2000, beschermde soorten en NNN)	0 Geen relevante tot zeer beperkte impact op natuurdoelstellingen
			1 Kans op negatieve effecten op natuurdoelstellingen zonder aantasting doelbereik
			2 Kans op negatieve effecten op natuurdoelstellingen met mogelijke aantasting doelbereik maar met aanvullend mitigatiepotentieel
			3 Kans op negatieve effecten natuurdoelstellingen met mogelijke aantasting van doelbereik en beperkt aanvullend mitigatiepotentieel
Ruimtelijke functies	Impact op huidige en toekomstige ruimtelijke functies (industrie, wonen, (water)infrastructuur)	Mate waarin bestaande ruimtelijke functies worden vervangen of beperkt, en/of toekomstige	0 Geen relevante beperking van bestaande of toekomstige ruimtelijke functies en weinig ruimtebeslag voor hoeveelheid energie die opgewekt wordt.

		ontwikkelingen worden beïnvloed	1	Beperkte beperking van bestaande en/of toekomstige functies in de directe nabijheid van een installatie en beperkt ruimtebeslag voor hoeveelheid energie die opgewekt wordt.
			2	Aanzienlijke beperkingen voor bestaande en/of toekomstige functies in de omgeving van een installatie en/of relatief veel ruimtebeslag voor hoeveelheid energie die opgewekt wordt.
			3	Grote beperkingen of beperkingen in een groot gebied voor bestaande en/of toekomstige functies rondom een installatie of aanzienlijke hoeveelheid ruimtebeslag voor de hoeveelheid energie die opgewekt wordt.
Externe & nucleaire veiligheid²⁹	Verandering van veiligheidsrisico's voor kwetsbare objecten ³⁰ en infrastructuur	Effectbereik bij incidenten	0	Geen tot verwaarloosbare lokale effecten bij incidenten
			1	Lokaal effectbereik bij incidenten
			2	Mogelijk bovenlokaal of regionaal effectbereik bij incidenten
			3	Mogelijk (inter)nationaal effectbereik bij incidenten
		Faalkans incidenten met ernstige gevolgen bij kwetsbare of beperkte kwetsbare objecten	0	Verwaarloosbare kans op incidenten
			1	Zeer lage kans op incidenten
			2	Lage kans op incidenten
			3	Gematigde kans op incidenten
Landschap en cultuurhistorie	Impact op landschappelijke en cultuurhistorische waarden (inclusief zichtbaarheid overdag en 's nachts)	Mate van beïnvloeding van landschappelijke en/of cultuurhistorische waarden in uniciteit en schaal	0	Minimale invloed op landschappelijke en/of cultuurhistorische waarden
			1	Kans op lokale, omkeerbare aantasting van landschappelijke en/of cultuurhistorische waarden
			2	Kans op bovenlokale, omkeerbare aantasting of lokale onomkeerbare aantasting van landschappelijke en/of cultuurhistorische waarden

²⁹ Het effectbereik bij incidenten en de kans op incidenten zijn eerst apart beoordeeld. Deze twee scores zijn vervolgens gebruikt om een algehele score te geven voor het thema externe en nucleaire veiligheid. De totaalscore is gebaseerd op basis van de hoogste scores op deze deelcriteria.

³⁰ Gebouwen en locaties waar mensen voor een groot deel van de dag kunnen verblijven.

			3	Kans op bovenlokale, onomkeerbare aantasting van landschappelijke en/of cultuurhistorische waarden
Water	Impact van koelwater op de waterhuishouding	De impact thermische, chemische of radioactieve emissies van koelwater op de waterkwaliteit	0	Geen of verwaarloosbare invloed op de lokale waterhuishouding of waterkwaliteit
			1	Beperkte invloed op de lokale waterhuishouding en/of laag risico op emissies voor de waterkwaliteit
			2	Aanzienlijke invloed op de lokale waterhuishouding, beperkte verstoring op bovenlokale schaal van waterhuishouding en/of middelgroot risico op emissies met een bovenlokale impact de waterkwaliteit
			3	Grote verstoring waterhuishouding op bovenlokale schaal en/of hoog risico op significante emissies op waterkwaliteit op bovenlokale of regionale schaal
Radioactief afval	Impact op de totale hoeveelheid radioactief afval	Toename van radioactief afval en opslagbehoefte	0	Geen of verwaarloosbare toename jaarlijkse hoeveelheid radioactief afval, geen verandering opslagcapaciteit behoefte
			1	Beperkte toename jaarlijkse hoeveelheid radioactief afval, passend binnen bestaande opslagcapaciteit COVRA
			2	Toename jaarlijkse hoeveelheid radioactief afval, uitbreiding afvalopslag binnen de huidige terreingrenzen COVRA nodig
			3	Grote toename jaarlijkse hoeveelheid radioactief afval, onvoldoende uitbreiding binnen huidige terreingrenzen mogelijk
Straling	Impact van stralingsniveau op gevoelige objecten in de omgeving tijdens reguliere exploitatie	Toename stralingsniveaus bij gevoelige objecten	0	Geen of verwaarloosbare toename van stralingsniveaus
			1	Beperkte toename van stralingsniveaus bij gevoelige objecten in de directe omgeving van installatie(s)
			2	Aanzienlijke toename stralingsniveaus bij gevoelige objecten in de directe omgeving van installatie(s) of beperkte toename van stralingsniveaus op bovenlokaal niveau

			3	Grote toename van stralingsniveaus op bovenlokaal of regionaal niveau
CO₂-emissies	Impact op CO ₂ uitstoot	Omvang van CO ₂ -emissies gedurende de levenscyclus van installaties ten opzichte van fossiele energieproductie uit gas	0	Geen of verwaarloosbare CO ₂ -emissies (>95% minder uitstoot dan bij kolencentrale)
			1	Er zijn CO ₂ -emissies maar grote verbetering t.o.v. kolencentrale (90-95% minder uitstoot dan bij kolencentrale))
			2	Er zijn CO ₂ -emissies maar verbetering t.o.v. kolencentrale (70-95% minder uitstoot dan bij kolencentrale)
			3	Er zijn CO ₂ -emissies en er is sprake van verbetering t.o.v. kolencentrale maar veel mogelijkheden om dit aantal verder te verminderen (<75% minder uitstoot dan bij kolencentrale)
Materiaalgebruik	Impact op grondstoffen wereldwijd	Hoeveelheid materiaal benodigd per TWh t.o.v. conventionele energieproductie ³¹	0	Geen of verwaarloosbare gebruik van materialen
			1	Gebruik van materialen maar aanzienlijk mindere hoeveelheid t.o.v. kolencentrales (<5% van benodigde kilo materiaal per TWh bij kolencentrale).
			2	Gebruik van materialen maar mindere hoeveelheid t.o.v. kolencentrales (<50% van benodigde kilo materiaal per TWh bij kolencentrale).
			3	Gebruik van materialen vergelijkbare of gering mindere hoeveelheid t.o.v. kolencentrales (<90% van benodigde kilo materiaal per TWh bij kolencentrale).

Toelichting

De selectie van de beoordeelde milieuaspecten is gebaseerd op gelijksoortige effectbeoordelingen en op basis van *expert judgement*. Gezien het abstractieniveau van de beoordeling is bepaald of er op een milieuaspect in zijn algemeenheid een relevant effect kan optreden. Bij nadere beoordeling in het kader van toekomstige kernenergieprojecten zal, indien relevant, een gedetailleerde beoordeling op milieuaspecten wenselijk (of zelfs verplicht) zijn die meer specifiek potentiële effecten binnen een milieuaspect betreft. Hierna zijn de milieuaspecten die zijn meegenomen in dit rapport kort toegelicht.

³¹ Om een indicatie te krijgen van het gebruik van grondstoffen is een vergelijking gemaakt met een kolencentrale, aangezien hierbij zowel voor de installatie als voor de energieproductie grondstoffen zijn benodigd. Kolencentrales kunnen in dit opzicht gezien worden als een worst case scenario.

Geluid

Voor alle onderdelen van de energiemix, behalve wind op zee, geldt dat er in meer of mindere mate sprake is van geluid naar gevoelige objecten (zoals woningen). Hierdoor kunnen mensen in de omgeving het gebruik van een installatie opmerken en daar hinder van ondervinden. Geluid wordt bij deze beoordeling maatgevend geacht voor potentiële hinder.

Ecologie

Als gevolg van de ingenomen ruimte, emissies naar de omgeving (zoals stikstof, koelwater) of directe effecten op soorten (zoals verstoring of aanvaringsslachtoffers bij windturbines) kunnen negatieve effecten optreden. Deze effecten verschillen per type installatie.

Ruimtelijke functies

De plaatsing van een installatie heeft invloed op het bestaande ruimtegebruik en is mede afhankelijk van de geldende beleidskaders voor bijvoorbeeld geluid en veiligheid. Hierdoor kunnen toekomstige ontwikkelmogelijkheden in de omgeving mogelijk worden beperkt.

Externe en nucleaire veiligheid

Voor een aantal installaties, zoals kerncentrales en windturbines, geldt dat deze veiligheidscontouren hebben. De faalkans en het mogelijk effectbereik bij een calamiteit verschilt tussen de installaties. De faalkans en het effectbereik zijn eerst apart beoordeeld om de verschillen die hierin bestaan bij de verschillende installaties inzichtelijk te maken. Deze twee scores zijn vervolgens gebruikt om een algehele score te geven voor het milieuaspect externe en nucleaire veiligheid.

Landschap en cultuurhistorie

Landschapsstructuren en cultuurhistorische elementen worden beschermd vanwege hun bijzondere waarde. De plaatsing van een installatie kan deze waarden aantasten, bijvoorbeeld door het verwijderen van karakteristieke elementen of doordat de aanwezigheid van een installatie het aanzicht van het landschap verandert. De mate van aantasting verschilt per techniek en hangt af van het aantal installaties, de oppervlakte die ze innemen (zoals bij zonneparken op land), de locatie of de hoogte (zoals bij windturbines).

Water

Voor kerncentrales, elektrolyzers en waterstofcentrales wordt voor de koeling koelwater onttrokken, gebruikt en weer geloosd. De lozing van koelwater kan een effect hebben op de waterhuishouding en -kwaliteit.

Radioactief afval

Bij de productie van kernenergie komt radioactief afval vrij dat voor een lange tijd afgeschermd moet worden opgeslagen om effecten naar de fysieke leefomgeving te voorkomen. De hoeveelheid radioactief afval die geproduceerd wordt en mogelijke benodigde uitbreidingen van opslaglocaties is beoordeeld.

Straling

Bij kerncentrales en bij opslag van radioactief afval kan sprake zijn van vrijkomende ioniserende straling die, afhankelijk van het niveau, in potentie schadelijk kan zijn en derhalve beoordeeld is. Daarbij is het niveau van de straling en het bereik ervan relevant.

CO₂-emissies

De energievoorziening heeft een lange tijd voornamelijk plaatsgevonden met behulp van fossiele energiebronnen. Door verbranding werd energie opgewekt, maar dit ging gepaard met de uitstoot van broeikasgassen, hier vertaald naar CO₂-emissies. Deze emissies dragen bij aan klimaatverandering en luchtverontreiniging. De transitie naar een andere energieproductiemix is het gevolg van nationaal en

internationaal beleid dat gericht is op het terugdringen van CO₂-emissies. Ook bij de verschillende installaties voor duurzame energie komen CO₂-emissies vrij, bijvoorbeeld door het gebruik van grondstoffen, transport voor bouw en exploitatie, en bij de verwijdering van installaties aan het einde van hun levensduur. Omdat deze emissies een belangrijke aanleiding vormen voor de verandering van de energieproductiemix, was het relevant om deze te beoordelen.

Materiaalgebruik

De realisatie van een installatie vereist materiaal en soms ook grondstoffen tijdens de exploitatie. De winning en productie van materialen leidt tot milieueffecten op andere plaatsen en deze kunnen in schaal verschillen afhankelijk van de hoeveelheid materiaal dat is benodigd, de levensduur van installaties en het gebruik van grondstoffen tijdens de exploitatie.

4.3 Milieueffecten buiten beschouwing

De volgende tabel geeft een overzicht van de milieuaspecten die buiten beschouwing zijn gelaten aangezien deze naar verwachting niet aanzienlijk onderscheidend zijn. Daarnaast zijn sommige milieuaspecten dermate locatie-specifiek dat bij een goede locatiekeuze of voorbereiding, effecten relatief eenvoudig zijn te voorkomen. Dit betreft bijvoorbeeld het aspect archeologie.

De hieronder opgesomde milieuaspecten worden wel onderzocht in andere studies die in een latere fase plaatsvinden, zoals locatiestudies voor grote projecten, omgevingsbesluiten en/of milieueffectrapportages (MER). Een uitzondering hierop vormen de effecten in de materiaalketen elders in de wereld; deze worden eerder onderzocht en meegenomen als onderdeel van nationale en Europese normen voor materialen en producten.

In bijlage 3 van deze studie wordt een aanvullende verdieping gegeven op enkele milieuaspecten die niet direct van invloed zijn op de beoordeling in deze studie, maar wel bijdragen aan het bredere perspectief. Naast een verdieping op de milieuaspecten die wél binnen de reikwijdte van deze studie vallen, wordt ook kort ingegaan op verschillen in hinder tijdens de bouwphase en op effecten in de mondiale grondstoffenketen. Deze onderwerpen zijn in de praktijk relevant, maar vallen buiten de scope om in deze studie uitvoerig te behandelen.

Tabel 4-5 Milieueffecten die buiten beschouwing zijn gelaten in het onderzoek

Milieuaspect	Onderbouwing waarom buiten beschouwing
Hinder bouwphase	De hinder tijdens de bouw varieert sterk per type installatie. Kernenergie vereist een langdurige en intensieve bouwphase, terwijl zonne- en windenergie een beperkte impact hebben door een kortere bouwperiode. Omdat het effect tijdelijk en lokaal van aard is, is het niet een onderscheidend aspect voor de beoordeling gericht op de keuze voor een verschillende aandelen van energie opwekkers. Er is een tekst opgenomen over dit onderwerp in bijlage 3 om de verschillen wel te duiden.
Verkeer en mobiliteit	Dit aspect is niet beoordeeld, omdat voor alle installaties geldt dat er geen significante toename van verkeersbewegingen te verwachten is gedurende de exploitatie. Bouwverkeer kan tijdelijk hinder veroorzaken, zie ook het vorige aspect en hetgeen hierover opgenomen in bijlage 3. Effecten op natuur ten gevolge van stikstofemissies zijn onderdeel van het aspect ecologie.
Waterkwaliteit	Er vindt geen lozing van emissies naar water plaats, anders dan via koelwater wat beoordeeld wordt onder milieuaspect 'water'. Andere mogelijke effecten tijdens de bouwphase van de installaties zijn tijdelijk en naar verwachting niet aanzienlijk. Wel brengen een aantal installaties verhoogde risico's met zich mee brengen op chemische vervuiling door lekkages. Deze risico's zijn hieronder kort benoemd maar niet meegenomen in de effectbeoordeling omdat deze incidenteel zouden zijn en dus niet onderdeel zijn van de normale bedrijfsvoering. Het gaat om:

	• (Systeem)batterijen bevatten metalen zoals lithium, kobalt en nikkel die bij lekkage schadelijk kunnen zijn voor grondwaterkwaliteit. Hoewel moderne batterijsystemen beveiligd zijn tegen lekkage, blijft het risico bij schade aanwezig. • Waterstofcentrales en elektrolyzers maken gebruik van katalysatoren en membranen die zware metalen of chemische componenten kunnen bevatten. Incidenten kunnen leiden tot chemische verontreiniging. • Waterstofopslag in zowel vloeibare als gasvormige staat vereist robuuste infrastructuur om lekkages te voorkomen. Ten tijde van een lekkage kan dit leiden tot verspreiding van chemicaliën in het grondwater.
Bodem	Bij de verschillende technologieën is geen sprake van gebruik van bodembedreigende stoffen op een schaal die relevant is voor de weging van verschillende energieproductietechnieken. Ten aanzien van aanwezige bodemverontreinigingen en de impact hierop geldt dat dit bijzonder locatie specifiek is en niet onderscheidend voor de verschillende technieken waardoor ook vanuit dit oogpunt het aspect voor deze studie niet relevant is.
Archeologie	Archeologische waarden zijn locatie-specifiek. Beoordeling van dit aspect voor de weging van verschillende energieproductietechnieken is niet relevant. Daarbij is de waarde veelal dermate locatie specifiek dat dit niet onderscheidend is voor de technieken. Met de locatiekeuze of juiste voorbereiding zijn mogelijke effecten goed mitigeerbaar waardoor geen aanzienlijke effecten hoeven te worden verwacht.
Luchtkwaliteit	Tijdens de exploitatie is bij alle technieken geen sprake van relevante emissies naar de lucht, behalve mogelijk waterdamp. Tijdens de bouwphase kunnen bouwwerktuigen tijdelijke emissies genereren (zoals stikstof en fijnstof: NO ₂ , PM10, PM2.5). De stikstofemissies zijn meegenomen onder het thema ecologie.
Gezondheid	Potentiële gezondheidseffecten zijn beoordeeld via de belangrijkste relevante milieueffecten die een gezondheidsimpact kunnen hebben, zoals geluid, externe & nucleaire veiligheid en straling. Omdat deze effecten bij andere milieuaspecten al zijn meegewogen wordt dit niet als apart milieuaspect beschouwd in deze analyse.
Slagschaduw	De hinder door slagschaduw van windturbines is afhankelijk van de locatie en de nabijheid van gevoelige objecten. Omdat het effectgebied grotendeels overeenkomt met het effectbereik van geluid, is de potentiële hinder dus indirect onderdeel van de beoordeling onder 'geluid'. Daarnaast kan slagschaduw effectief worden beperkt door technische maatregelen, zoals automatische stilstandsregeling.
Verharding van de ondergrond	Installaties zoals kerncentrales en waterstofcentrales leiden lokaal tot aanzienlijk oppervlak aan verharding van de ondergrond, wat invloed heeft op het lokale watersysteem. Potentiële effecten zijn gerelateerd aan de specifieke locatie en bodemgesteldheid en bijzonder goed mitigeerbaar. Er is om deze reden geen aanleiding om aanzienlijke milieueffecten te verwachten die voor de onderzoeksvraag van deze studie relevant zijn.
Magneetvelden	Magneetvelden ontstaan bij alle elektrische installaties. Blootstelling aan relevante magneetveldniveau's blijft echter grotendeels beperkt tot de terreingrenzen van installaties zelf door strikte wettelijke normen. Hierdoor worden geen aanzienlijke milieueffecten verwacht die relevant zijn voor deze studie.
Overige afvalstoffen	Bij de exploitatie van de beschouwde energie opwekkers en -dragers komen geen relevante hoeveelheden afvalstoffen en/ of gevaarlijke afvalstoffen vrij die niet recyclebaar zijn vrij waardoor dit geen relevant aspect is voor de vergelijking van technieken. Alleen voor kerncentrales geldt dat er een relevante onverwerkbaar gevaarlijke afvalstroom is in de vorm van radioactief afval. Dit is als milieuaspect meegenomen in de effectbeoordeling onder 'radioactief afval'.
Effecten in de materialenketen elders in de wereld	In dit onderzoek zijn alleen de milieueffecten in Nederland beoordeeld. Mogelijke effecten op de leefomgeving, anders dan CO ₂ -emissies, in de materialenketen elders in de wereld worden in beleid geadresseerd maar zijn voor de beoordeling van de energieproductiemix in Nederland niet onderscheidend. Voor alle technieken geldt dat grondstoffen/ materialen worden ingezet met een materiaalketen die in effecten op de leefomgeving elders in de wereld kennen. Deze effecten gelden in het algemeen voor de productiewijze in de betreffende werelddelen en de keuze voor de onderzochte technieken leidt niet tot een relevante verandering van de potentiële effecten. Er is een tekst opgenomen in bijlage 3.

5 Toelichting milieuaspecten en effectrelaties

In dit hoofdstuk is uiteengezet op welke wijze de verschillende onderdelen van het energiesysteem invloed kunnen hebben op de leefomgeving. Dit is uitgesplitst naar de milieuaspecten uit het vorige hoofdstuk. Per milieuaspect is een algemene toelichting gegeven. Vervolgens zijn de relevante beleidskaders kort toegelicht, waarna is ingegaan op de potentiële effecten van de onderdelen van het energiesysteem op het aspect, inclusief onderlinge verschillen. Aangezien keuzes met betrekking tot ruimtelijke locatie en technische uitvoeringswijze pas in een later stadium aan de orde komen, zijn de beschrijving en beoordeling gericht op een hoger abstractieniveau, zoals weergegeven in hoofdstuk 4. Daarbij wordt uitgegaan van realistisch-conservatieve uitgangspunten, bijvoorbeeld ten aanzien van de wijze van koeling van kerncentrales en elektrolyse-installaties.

Tabel 5.1 geeft een overzicht van de milieuaspecten waarop de energie opwekkers en ondersteunende installaties zijn beoordeeld. Dit betreft de milieuaspecten waarvoor potentieel belangrijke milieueffecten kunnen ontstaan. Voor onderdelen van het energiesysteem geldt dat een aantal milieuaspecten niet of juist wel in potentie belangrijke milieueffecten met zich mee kunnen brengen. Zo is stralingsimpact uitsluitend relevant voor kernenergie, terwijl wind, zon en waterstof technologieën geen stralingsrisico's met zich meebrengen.

Tabel 5-1 Milieuaspecten die beoordeeld zijn per onderdeel van het energiesysteem

	Zon-PV	Wind op land	Wind op zee	Kern-energie	Systeem batterijen	Elektrolyzers	Waterstof-centrale	Waterstof-opslag
Geluid	X	X		X	X	X	X	X
Ecologie	X	X	X	X	X	X	X	X
Ruimtelijke functies	X	X	X	X	X	X	X	X
Externe & nucleaire veiligheid	X	X		X	X	X	X	X
Landschap en cultuurhistorie	X	X	X	X	X	X	X	X
Water				X		X	X	
Radioactief afval				X				
Straling				X				
CO ₂ -emissies	X	X	X	X				
Materiaal gebruik	X	X	X	X				

5.1 Geluid

5.1.1 Introductie

Geluid is een vorm van trillingen die zich door de lucht of water verspreidt. Geluid is een vanzelfsprekend onderdeel van het dagelijks leven maar overmatig of ongewenst geluid kan hinder veroorzaken. Geluidhinder ontstaat wanneer geluid als storend of belastend wordt ervaren. Dit kan variëren van lichte irritatie tot gezondheidsklachten, zoals stress, slaapverstoring en concentratieproblemen. De mate van hinder hangt af van verschillende factoren, waaronder het geluidsniveau, de frequentie, de duur en het tijdstip waarop het geluid optreedt.

Geluidhinder kan zowel door natuurlijke als door menselijke bronnen worden veroorzaakt. Denk bijvoorbeeld aan verkeer, industrie, bouwactiviteiten, muziek of windturbines. Vooral langdurige of onverwachte geluiden kunnen als storend worden ervaren.

Om geluidhinder te beperken, zijn bij ontwikkelingen die mogelijk geluidsoverlast veroorzaken vaak maatregelen vereist. Dit kan onder meer bestaan uit geluidsisolatie, afstandsregels en het naleven van geluidsnormen. Daarnaast kunnen een doordachte infrastructuur en ruimtelijke planning bijdragen aan een betere balans tussen geluidsproductie en leefbaarheid in de omgeving.

In dit onderzoek is onder meer de potentiële geluidshinder van verschillende onderdelen van het energiesysteem beoordeeld. Daarbij zijn relevante geluidsnormen en de reikwijdte van het geluid bepalend. Er is bij de effectbeoordeling van dit onderzoek alleen gekeken naar permanente geluidhinder in de exploitatiefase voor de verschillende onderdelen van het energiesysteem. Er zijn wel verschillen in de potentiële hinder tijdens de bouwfase, onder meer vanwege verschil in duur. Een beschrijving hierover is opgenomen in bijlage 3

Windparken op zee veroorzaken geen relevante geluidhinder voor de fysieke leefomgeving. Deze energieopwekker is dan ook niet beoordeeld op geluid.

5.1.2 Beleidskader

In deze paragraaf is het beleidskader voor geluid uiteengezet. Voor wind op land is er een apart beleid hierover gemaakt.

Wind op land

Voor windparken (3 windturbines of meer) gelden geen uniforme landelijke geluidsnormen maar wordt aansluiting gezocht bij de verwachte normen die hierna zijn genoemd. In het Ontwerpbesluit Windturbines Leefomgeving³² zijn uniforme normen voor potentiële hinder door geluid en slagschaduw gegeven.³³ Voor geluid zijn standaardwaarden van 45 dB Lden en 39 dB Lnight op de gevel van geluidsgevoelige objecten (zoals woningen) voorzien met een afwijkingsmogelijkheid tot 47 dB Lden en 41 dB Lnight. De normen zijn gebaseerd op onderzoek naar de hinderlijkheid van geluid door windturbines.

³² Rijksoverheid (2024), *Nationale concept windturbinebepalingen leefomgeving*.

³³ Voor deze conceptnormen waren geluidsnormen van 47 dB Lden en 41 dB Lnight het uitgangspunt. Dit werd gereguleerd in het voormalige gereguleerd Activiteitenbesluit milieubeheer en de Activiteitenregeling milieubeheer. Omdat de vaststelling van deze normen niet conform de juiste procedure is verlopen zijn deze niet meer geldig.

Tabel 5-2 concept uniforme geluidsnormen voor windturbines

Langtijdgemiddelde beoordelingsniveau	Lden (gemiddeld geluid dag-avond-nacht)	23.00-07.00 uur Lnight (gemiddeld geluid in deze periode)
Standaardwaarden	45 dB	39 dB
Grenswaarden	47 dB	41 dB

Andere onderdelen van het energiesysteem

Voor kerncentrales, (systeem)batterijen, elektrolyzers, waterstofcentrales en waterstofopslag gelden geen specifieke, afzonderlijke geluidsnormen. Er gelden algemene normen bij de gevel van geluidsgevoelige objecten voor industrieel geluid, vanuit de gedachte dat het type geluid en daarmee de mate van hinderlijkheid vergelijkbaar is. Met de invoering van de Omgevingswet zijn er in het Besluit kwaliteit leefomgeving (Bkl) en de omgevingsplannen van gemeenten standaard geluidsnormen opgenomen. De standaard geluidsnormen, die met de invoering van de Omgevingswet automatisch in hoofdstuk 22 van gemeentelijke omgevingsplannen terecht zijn gekomen, mogen binnen bepaalde bandbreedtes door gemeenten worden aangepast. De standaardnormen zijn de basis voor de beoordeling. Lokaal kunnen dus strengere of soepelere normen gelden.

Tabel 5-3 Standaard geluidsnormen

Langtijdgemiddelde beoordelingsniveau $L_{A,r,LT}$	07.00-19.00 uur	19.00-23.00 uur	23.00-07.00 uur
Bij geluidsgevoelige objecten buiten bedrijventerrein	50 dB(A)	45 dB(A)	40 dB(A)
Bij geluidsgevoelige objecten op bedrijventerrein	55 dB(A)	50 dB(A)	45 dB(A)

5.1.3 Onderscheidende effecten

Ten behoeve van de beoordeling is de gemiddelde richtafstand gehanteerd per onderdeel van het energiesysteem waarbij kan worden aangenomen dat aan de normen kan worden voldaan.

Dit inzicht biedt een beeld van de reikwijdte van geluidseffecten en daarmee een maat voor potentiële hinder.

Bij vergelijking van de verschillende onderdelen van het energiesysteem heeft zon-PV de minste geluidsimpact. Systeembatterijen en elektrolyzers kennen onderling een vergelijkbare geluidsimpact. Windturbines, kerncentrales, waterstofcentrales en waterstofopslag kunnen tot op grotere afstand geluidsbelasting veroorzaken en daarmee een grotere impact op de geluidsbeleving in de omgeving.

Tabel 5-4 Duiding geluidseffecten bij de verschillende onderdelen van het energiesysteem

Onderdeel energiesysteem	Effecten	Indicatie afstand vanaf grens installatie waar aan geluidsnormen wordt voldaan ³⁴
Energie opwekkers		
Zon-PV	Zeer minimale klikgeluiden van omvormers. Bij grotere installaties wordt soms een transformatorstation geplaatst dat geluid produceert.	• 20 meter bij alleen omvormers • 50 meter bij omvormers + transformatorstation³⁵
Wind op land	Windturbines produceren een zwiepend, ritmisch geluid, vooral hoorbaar in de nacht. Daarom gelden 's nachts strengere normen. Ook het transformatorstation produceert geluid, maar dit is minder maatgevend dan het geluid van de turbine zelf.	500-600 meter ³⁶
Wind op zee	Als gevolg van de plaatsing op meerdere kilometers uit de kust is er geen hinder naar gevoelige objecten.	n.v.t.
Kernenergie	Kerncentrales produceren voornamelijk mechanisch en laagfrequent geluid. Geluidsbronnen zijn onder meer pompen, ventilatoren (constante brom/zoem) en transformatoren.	400-600 meter ³⁷
Ondersteunende installaties		
(Systeem)batterijen	Mechanisch geluid tijdens laden/ontladen. Belangrijkste bronnen zijn ventilatoren van koelsystemen en omvormers (klikgeluid bij schakelmomenten).	200-500 meter ³⁸
Elektrolyzers	Mechanisch en pompende geluiden van ventilatoren, compressoren en pompen.	300-500 meter. ³⁹ Een deel van de elektrolyzers wordt op zee gerealiseerd. Voor deze installaties geldt dat er geen relevante geluidseffecten zijn naar de leefomgeving.
Waterstofcentrales	Mechanisch geluid en laagfrequent gebrom van verbrandingsmotoren, compressoren, ventilatoren en transformatoren.	500–1.600 meter zonder maatregelen. Met isolatie en geluidschermen: 500–1.000 meter. ⁴⁰

³⁴ De informatie is gebaseerd op expert judgement in combinatie met bestaande studies van TNO en RIVM.

³⁵ Op basis van expert judgement gebaseerd op praktijkervaring.

³⁶ Op basis van expert judgement door akoestisch expert in windenergieprojecten.

³⁷ Bij kerncentrale Borssele worden bij de dichtstbijzijnde woning, gelegen op circa 500 meter afstand vanaf het midden van het terrein, geluidsniveaus gemeten van maximaal 44 dB(A). Bij een grotere kerncentrale met meer vermogen kan deze afstand toenemen maar is ook de oppervlakte van de installatie aanmerkelijk groter waardoor beperkt grotere afstanden nodig zullen zijn vanaf de rand van het terrein van de installatie.

³⁸ Op basis van expert judgement

³⁹ Gebaseerd op de uitgangspunten die worden aangehouden voor elektrolyzers in VAWOZ. In VAWOZ wordt een afstand van 580 meter aangehouden voor een installatie van 1000 MW. In dit onderzoek wordt uitgegaan van installaties van 500 MW. Hierdoor wordt de richtafstand ingeschat op tussen de 300-500 meter.

⁴⁰ Door gebrek aan data over waterstofcentrales is als uitgangspunt genomen het geluid van aardgascentrale gebruikt omdat deze vergelijkbare installaties gebruiken. Het gaat dus om een grove inschatting.

Waterstofopslag	Mechanisch geluid en laagfrequent gebrom van compressoren, ventilatie en drukontlasting via leidingen/ventielen. Doordat delen van de installatie ondergronds zijn, reikt het geluid minder ver.	500–1000 meter ⁴¹
-----------------	--	------------------------------

5.2 Ecologie

5.2.1 Introductie

Energieprojecten kunnen negatieve effecten op natuurwaarden veroorzaken. De potentiële effecten verschillen per type project. Effecten kunnen optreden tijdens de bouwphase door de verstoring van aanwezige soorten door aanlegwerkzaamheden, aantasting van leefgebied van flora en fauna door verandering van grondgebruik (onder meer door vrijkomen van stikstofemissies) en tijdens de exploitatie kan de aanwezigheid of bedrijfsvoering leiden tot bijvoorbeeld verstoring van fauna of aanvaringsslachtoffers onder vogels en vleermuizen.

5.2.2 Beleidskader

Omgevingswet

De Omgevingswet regelt de bescherming van natuur en biodiversiteit binnen de fysieke leefomgeving en is sinds 1 januari 2024 in werking.⁴² Deze wet vervangt de Wet natuurbescherming en integreert ecologische bescherming binnen ruimtelijke ordening en vergunningverlening. De bescherming van natuur wordt binnen de Omgevingswet verder uitgewerkt in het Besluit kwaliteit leefomgeving (Bkl)⁴³ en het Besluit activiteiten leefomgeving (Bal).⁴⁴ Hierin wordt bepaald aan welke eisen moet worden voldaan om negatieve milieueffecten te beperken.

De Omgevingswet maakt een onderscheid tussen gebiedsbescherming en soortenbescherming, waarmee zowel de instandhouding van kwetsbare ecosystemen als de bescherming van individuele diersoorten wordt gewaarborgd.

Gebiedsbescherming

De Omgevingswet voorziet in de aanwijzing en bescherming van natuurgebieden met een bijzondere ecologische waarde. Hieronder vallen onder andere:

- **Natura 2000-gebieden**, maken onderdeel uit van een Europees netwerk van natuurgebieden die aangewezen zijn op basis van de Europese Vogelrichtlijn en Habitatrichtlijn. Per gebied zijn instandhoudingsdoelen voor kwetsbare soorten en habitats gesteld. Activiteiten die deze gebieden aantoonbaar kunnen schaden, vereisen een passende beoordeling toegestaan indien is aangetoond dat instandhoudingsdoelstellingen niet in gevaar komen;
- **Natuurnetwerk Nederland (NNN)**, een nationaal netwerk van natuurgebieden met als doel het versterken van biodiversiteit en ecologische verbindingen. Binnen het NNN gelden strikte regels om achteruitgang van de wezenlijke kwaliteiten en waarden te voorkomen en activiteiten met potentieel negatieve effecten vereisen beoordeling en goedkeuring;
- **KRM-gebieden** (Kaderrichtlijn Mariene Strategie) zijn beschermde mariene gebieden. Vanuit Europees beleid zijn deze gebieden aangewezen met als doel de gebieden te beschermen, herstellen en duurzaam te gebruiken. Voor projecten dient beoordeeld te worden of de goede

⁴¹ Op basis van *milieueffectrapport* voor HyStock project waterstofopslag bij Zuidwending.

⁴² *Omgevingswet*.

⁴³ *Besluit kwaliteit leefomgeving (Bkl)*.

⁴⁴ *Besluit activiteiten leefomgeving (Bal)*.

toestand van het mariene leefmilieu kan worden aangetast. De KRM is relevant voor de potentiële activiteiten op zee, windparken en elektrolyse op zee;

- **Nationale parken** en **provinciaal beschermde natuurgebieden**, die aanvullend op Europees beschermde gebieden een ecologische en recreatieve functie hebben en binnen provinciaal beleid worden beschermd.

Soortenbescherming

Naast gebiedsbescherming regelt de Omgevingswet ook de bescherming van inheemse dier- en plantensoorten. Voor projecten met potentieel negatieve effecten dient onderzocht te worden of er een invloed kan zijn op de gunstige staat van instandhouding van de populaties van beschermde soorten.

5.2.3 Onderscheidende effecten

Energieprojecten kunnen ecologische impact hebben door directe effecten op soorten of indirect via aantasting van leefgebied. De mate waarin effecten optreden is gerelateerd aan het type installatie, het aantal installaties en de locaties van installaties aangezien natuurwaarden verschillen per locatie.

Voor alle activiteiten op land geldt dat ten gevolge van de aanleg lokaal verstoring of aantasting kan optreden indien beschermde flora en fauna aanwezig is. De ruimtelijke schaal van installaties en de duur van aanlegwerkzaamheden zijn hierin bepalend. In het algemeen betreft dit tijdelijke en lokale effecten welke voor de vergelijking van onderschikt belang zijn.

Uitzondering hierop betreft het optreden van onderwatergeluid bij heiwerkzaamheden voor de bouw van windturbines op zee. Als gevolg van het aantal windturbines en de mogelijke opeenvolging van aanleg van windparken kan grootschalige verstoring populatie-effecten veroorzaken op geluidsgevoelige soorten als de bruinvis. De strikte normstelling voor onderwatergeluid en de ontwikkeling in geluid reducerende technologieën zorgen ervoor dat dit aspect een aandachtspunt is maar vooralsnog niet bepalend wordt gezien voor beoordeling van het aandeel kernenergie. Een tweede uitzondering betreft de potentiële emissie van stikstof ten gevolge van langdurige bouwwerkzaamheden voor een kerncentrale. Stikstofemissies komen vrij bij gebruik van werktuigen aangedreven door fossiele brandstof. Aangezien een groot aantal natuurgebieden stikstof overbelast is met negatieve gevolgen voor aanwezige flora en daarvan afhankelijke fauna kan een langdurige emissie van stikstof een beperking vormen voor de uitvoerbaarheid. Gezien de snelle ontwikkeling van emissievrije werktuigen de afgelopen jaren is dit een aandachtspunt, maar vooralsnog niet bepalend voor de beoordeling van het aandeel kernenergie. Dit geldt daarmee ook voor andere installaties waar sprake is van een kortere bouwperiode en derhalve kleinere potentiële emissies van stikstof.

De voornaamste ecologische effecten zijn directe effecten in de exploitatiefase, zoals verstoring, verlies van leefgebied of aanvaringsslachtoffers of indirect door emissies naar de omgeving, zoals emissie van koelwater.

Tabel 5-5 Effecten op ecologie van de verschillende onderdelen van het energiesysteem

Onderdeel energiesysteem	Effecten
Energie opwekkers	
Zon-PV	Zon op dak heeft geen relevante impact op ecologische waarden. Zonnevelden op de grond worden vaak in agrarisch gebied gerealiseerd en kunnen daardoor lokale flora en fauna verstoren en leefgebied beperken. Er is relatief veel ruimte nodig voor zon-PV in vergelijking met andere energie opwekkers. Vooral leefgebied van soorten die akker- en weides benutten, zoals vogels kunnen negatieve effecten optreden wanneer landbouwgrond grootschalig ingezet wordt voor zonnevelden.
Wind op land	Windturbines worden vaak op agrarische gronden, langs infrastructuur of bij industrieterreinen gerealiseerd. Dit kan in of in de nabijheid van natuurterreinen zijn. Tijdens de gebruiksfase is potentieel sprake van verstoring (aantasting leefgebied) door de aanwezigheid van windturbines en kunnen aanvaringsslachtoffers optreden onder vogel- en vleermuissoorten.
Wind op zee	Wind op zee heeft net als wind op land tijdens de gebruiksfase ecologische effecten vanwege kans op verstoring en aanvaringsslachtoffers onder vogels en vleermuizen. Daarnaast kunnen de effecten tijdens de bouwfase aanzienlijk zijn door onderwatergeluid ten gevolge van heien van fundaties.
Kernenergie	Kerncentrales worden in Nederland momenteel vooral in industriële omgevingen geprojecteerd nabij grote hoeveelheden water. De bouw van een kerncentrale kent een relatief lange periode waardoor potentieel gedurende lange periode stikstofemissies optreden. Het voornaamste potentiële negatieve ecologische effect betreft het onttrekken en lozen van koelwater.⁴⁵ Bij de inname van koelwater bestaat het risico dat organismen worden beschadigd of gedood door inzuiging. Lozing van warm water kan leiden tot beïnvloeding van soorten op populatieniveau en verstoring van interacties binnen het (lokale) ecosysteem, met name voor soorten die macrofauna en/of vis als hoofdvoedsel hebben. Het lozen van verwarmd koelwater veroorzaakt lokaal een verandering in abiotische factoren (watertemperatuur). Sommige soorten zijn tolerant voor deze omstandigheden of geven er zelfs de voorkeur aan, terwijl andere soorten deze omstandigheden vermijden. Dit kan lokaal leiden tot veranderingen in dichtheden, biomassa en soortensamenstelling. Rondom koelwater inname en lozing vinden periodiek baggerwerkzaamheden plaats om de capaciteit van inname en lozingspunten te behouden. Dit leidt lokaal potentieel tot verstoring van lokaal aanwezige soorten leidt door bodemroering, vertroebeling en geluid.. In het koelwater kunnen resten voorkomen van chemische stoffen die worden gebruikt om corrosie en aangroei van organismen in het koelwatersysteem te voorkomen. Het gaat hierbij expliciet niet om radioactieve stoffen. De stoffen die vrijkomen, kunnen lokaal tot negatieve effecten leiden voor individuen en populaties, mogelijk leidend tot verminderde reproductie- of overlevingskansen.⁴⁶
Ondersteunende installaties	
(Systeem)batterijen	(Systeem)batterijen worden veelal op industriële terreinen gerealiseerd, maar ook in agrarisch gebied nabij hoogspanning stations en bij opweklocaties van wind en zon op land.

⁴⁵ Uitgaande van Gen III-reactoren in dit rapport die doorstroomkoelingssysteem gebruiken. Gen IV-reactoren (de nieuwste in ontwikkeling) zouden mogelijk ook met andere methodes zoals lucht of warmteput gekoeld kunnen worden. Deze laatste generatie is nog in ontwikkeling en derhalve geen uitgangspunt voor de beoordeling.

⁴⁶ Zie ook het ecologisch onderzoek wat gedaan is voor het MER van kerncentrale Borssele.

	Effecten zijn beperkt tot beperkte verstoring in de direct omgeving naast de algemeen geldende effecten van gebiedsverandering en effecten door aanleg.
Elektrolyzers	De elektrolyzers worden naar verwachting gerealiseerd op industrieterreinen en op zee. Tijdens de exploitatiefase kunnen er negatieve ecologische effecten ontstaan door het onttrekken en lozen van koelwater. ⁴⁷ De potentiële effecten komen overeen met de effecten door koelwater zoals beschreven bij 'kernenergie' in deze tabel.
Waterstofcentrales	Net als (systeem)batterijen en elektrolyzers worden waterstofcentrales veelal op industriële terreinen gerealiseerd Tijdens de exploitatiefase kunnen er negatieve ecologische effecten ontstaan door het onttrekken en lozen van koelwater. De potentiële effecten komen overeen met de effecten door koelwater zoals beschreven bij 'kernenergie' in deze tabel.
Waterstofopslag	Grootschalige waterstofopslag, waarnaar in dit rapport wordt gekeken, is voorzien in al bestaande ondergrondse zoutcavernes of lege gasvelden. Hiervoor kunnen grotendeels de bestaande boorputten en installaties uit de aardgasindustrie worden hergebruikt. Er zullen daarom geen grote ecologische effecten optreden. Wellicht zullen er enkele aanpassingen/toevoegingen aan de al bestaande installaties moeten worden gedaan, waardoor tijdens de bouwfase algemene effecten optreden zoals aan het begin van de alinea beschreven.

5.3 Ruimtelijke functies

5.3.1 Introductie

Bij het milieuaspect ruimtelijke functies is gekeken naar de verhouding ruimtebeslag tot de energie opwekkers en de beperkingen die een installatie vormt voor bestaande en toekomstige ruimtelijke functies in de omgeving. Andere ruimtelijke functies zijn bijvoorbeeld landbouw, wonen, recreatie, defensie, natuur of industrie. De ontwikkeling naar een energieneutraal Nederland in 2050 heeft ingrijpende gevolgen voor de ruimtelijke inrichting van ons land.

Conflicterende ruimteclaims

De energietransitie kan een beperking vormen voor andere ruimtelijke opgaven, zoals:

- Woningbouw
- Verduurzaming van de landbouw
- Natuurontwikkeling
- Klimaatadaptatie (zoals waterbeheer en hittestress in stedelijk gebied)

Deze conflicterende claims vragen om integrale afweging en ruimtelijke prioritering. Binnen dit thema is daarom gekeken naar het ruimtebeslag van verschillende onderdelen van het energiesysteem. Dit betreft niet alleen het fysieke grondgebruik, maar ook de potentiële ruimtelijke beperkingen van een activiteit voor de omgeving. Een voorbeeld is de benodigde afstand tussen woningen en een kerncentrale: zodra een locatie vanuit het waarborgbeleid is aangewezen als mogelijke locatie voor een kerncentrale, geldt een beperking voor het maximaal aantal woningen binnen een vastgelegde contour.⁴⁸ Bij de beschrijving van de onderscheidende effecten van de onderdelen van het energiesysteem, is het ruimtebeslag en eventuele regels ten aanzien van afstand tot andere ruimtelijke functies nader uitgelegd.

⁴⁷ Dit is met name bij een doorstroomkoelingssysteem. In een gesloten koelsysteem is de impact op ecologie minder groot omdat er dan minder koelwater wordt onttrokken en geloosd. In dit rapport is conservatief uitgegaan van een doorstroomkoelingssysteem. Zie ook paragraaf 5.6 voor meer informatie.

⁴⁸ Waarborgingsbeleid kernenergie actualisatierapport.

5.3.2 Beleidskader

Sinds de inwerkingtreding van de Omgevingswet in 2024 staat het principe van een evenwichtige toedeling van functies aan locaties (ETFAL) centraal. Dit vraagt om een integrale afweging van maatschappelijke opgaven en ruimtelijke belangen, met het oog op een toekomstbestendige inrichting van Nederland. In dit milieuaspect is hierop ingegaan door te kijken naar het ruimtebeslag dat een installatie direct inneemt, evenals de beperkingen die deze oplegt aan andere functies in de omgeving, zoals woningen.

Relevante beleidskaders zijn de nationale, provinciale en gemeentelijke ruimtelijke beleidskaders die doelstellingen en opgaves formuleren voor onder meer duurzame energie, natuur, landbouw, woningbouw en economie, zoals in de Nationale Omgevingsvisie (NOVI) en het Programma Energiehoofdstructuur (PEH).⁴⁹ Voor de beoordeling in deze studie is relevant in welke mate een ruimtelijke claim en een beperking voor alternatieve ontwikkelingen wordt gelegd op een locatie.

Het PEH biedt richting aan de ontwikkeling van de nationale energie-infrastructuur tot 2050 en schetst ruimtelijke ontwikkelrichtingen voor onderdelen van nationaal belang, zoals hoogspanningsnetten, grootschalige energietransformatie, buisleidingen en energieopslag. De NOVI bevat de lange termijnvisie van het Rijk op de ruimtelijke inrichting van Nederland, waaronder ook de energietransitie en de daarbij horende ruimteclaims. Op provinciaal en gemeentelijk niveau wordt invulling aan deze rijkskaders gegeven via omgevingsvisies, omgevingsverordeningen en omgevingsplannen.

5.3.3 Onderscheidende effecten

De onderdelen van het energiesysteem die in dit onderzoek zijn beschouwd hebben op verschillende wijzen een 'claim' op ruimte. In Tabel 5-6 is uiteengezet hoeveel ruimte er nodig is voor een bepaalde eenheid van de installatie en wat het opwekpotentieel daarvan is per hectare. In Kader 5-1 is, met als voorbeeld zonne-energie, nader verklaard waarom de verschillen in opwek per hectare tussen de verschillende opwekkers zo groot kunnen zijn.

Tabel 5-6 ruimtebeslag, opbrengsten per hectare en beperkingen voor andere ruimtelijke functies uitgelegd voor de onderdelen van het energiesysteem

Onderdeel energiesysteem	Ruimtebeslag installatie op land in exploitatiefase	Hoeveel hectare per GWh per jaar ⁵⁰	Andere relevante beperkingen voor andere functies
Energie opwekkers			
Zon op dak	n.v.t.	n.v.t	Zon op dak heeft geen relevante impact op andere ruimtelijke functies. Er is geen extra ruimtegebruik, omdat zonnepanelen worden geplaatst op daken of op overkappingen die geen belemmering vormen voor de onderliggende functie.
Zonneveld (35 MW)	~35 hectare (ha) per installatie. ⁵¹	1,114 ha/GWh/jaar	Zonneparken worden primair op landbouwgrond gerealiseerd. Dit

⁴⁹ *Programma Energiehoofdinfrastructuur en Nationale Omgevingsvisie.*

⁵⁰ Dit is berekend op basis van uitgangspunten aantal hectares, vermogen van de installaties en de vollasturen die gangbaar zijn in Nederland voor deze energievorm.

⁵¹ Met moderne zonnepanelen kan uitgegaan worden van 1 hectare per MW. Dit cijfer kan variëren afhankelijk van de gebruikte type zonnepanelen.

			leidt tot tijdelijk of permanent verlies van agrarische productiefunctie voor de betreffende percelen. In sommige gevallen is multifunctioneel gebruik te realiseren, waarbij landbouwactiviteiten zoals begrazing of gewasgroei naast de zonnepanelen plaatsvinden. De ruimte kan ook niet worden gebruikt voor andere functies zoals woningbouw of industriële ontwikkelingen. Er zijn geen wettelijke veiligheidszones rond zonneparken. Andere functies (woningbouw, industrie) kunnen direct grenzen aan zonnevelden.
Wind op land (45 MW)	~3-5 ha per installatie. ⁵² Gerekend met 4 ha.	0,029 ha/GWh/jaar	Windturbines worden vooral op agrarische gronden geplaatst, met een beperkte fysieke voetafdruk (~0,5 ha per turbine). Bestaande landbouwactiviteiten rondom de turbines kunnen onbelemmerd worden voortgezet. Dit geldt ook voor de functionele impact op gebiedsgebruik zoals voor radarsystemen en vliegroutes. Er is sprake van een beperking door indirecte ruimtegebruik omdat met name woningbouw binnen een afstand van 500-600 meter niet of beperkt mogelijk is. Door de onderlinge afstand van windturbines van circa 4 maal de rotordiameter geldt deze beperking aan ontwikkelperspectief voor een relatief groot gebied per windpark. Dit betreft met name een beperking van grootschalige woningbouw.
Wind op zee (1 GW)	n.v.t. ⁵³	n.v.t.	Geen directe ruimtelijke beperkingen op land. Er is wel een impact op ruimtelijke functies op zee. Bij de aanwijzing van windparklocaties wordt rekening gehouden met bestaande aangewezen functies (zoals vaarroutes en militaire gebieden). De aanwezigheid van een windpark vormt een beperking

⁵² Uitgaande van multifunctioneel ruimtegebruik. Er is vanuit gegaan dat het bestaande grondgebruik van de omliggende gronden voortgezet wordt. Alleen de grond die verloren gaat aan de opstelplaats en windturbine fundering (samen circa 0,35 hectare) en toegangsweg (uitgegaan van 0,15 hectare, dit verschilt per locatie) zijn meegerekend. Voor opbrengstberekening uitgegaan van 0,5 hectare per windturbine ruimtebeslag.

⁵³ Er is alleen gekeken naar ruimtebeslag op land. Er zal wel een inkoopstation op land worden gebouwd maar dit wordt hier niet beschouwd omdat dit niet representatief is voor het ruimtegebruik van wind op zee.

			voor het vrij gebruik voor visserij en scheepvaart. Visgronden kunnen (tijdelijk) onbereikbaar worden bij het hanteren van veiligheidszones rond windparken. De ontwikkeling om medegebruik toe te staan leidt ertoe dat het windpark slechts een beperkte beperking hoeft te vormen. Door de grote aantallen windturbines zullen bestaande functies echter te maken kunnen krijgen met aanvullende gebruikseisen, zoals aangepaste vaarroutes.
Kernenergie (1,6 GW)	~60 ha per installatie.	0,006 ha/GWh/jaar	De realisatie van een kerncentrale heeft aanzienlijke invloed op diverse ruimtelijke functies, waarbij vanwege de schaal, strenge veiligheidsvoorschriften en maatschappelijke gevoeligheid een zorgvuldige afweging noodzakelijk is. In het verleden zijn er verschillende onderzoeken uitgevoerd naar geschikte locaties voor kerncentrales.⁵⁴ Hieruit zijn locaties geselecteerd waar bepaalde ruimtelijke ontwikkelingen, zoals woningbouw, worden tegengehouden om toekomstige bouw van kerncentrales niet te belemmeren. Dit waarborgingsbeleid is vastgelegd in het Besluit kwaliteit leefomgeving, artikel 5.158, waarin de waarborglocaties Borssele/Vlissingen, Eemshaven en Maasvlakte I geografisch zijn afgebakend.⁵⁵ Binnen een straal van één kilometer rondom deze locaties mag het omgevingsplan niet toestaan dat het aantal inwoners boven de 5.000 uitkomt, noch de bouw van andere kwetsbare of zeer kwetsbare gebouwen, met uitzondering van strikt noodzakelijke voorzieningen. Daarnaast geldt dat in verband met geluidsnormen een afstand van 400-600 meter gehouden moet worden tot gevoelige objecten zoals woningen.
Kernenergie (0,5 GW) (kerncentrale Borssele)	46 ha	0,015 ha/GWh/jaar	
Kernenergie (SMR, 200 MW)	~ 4-8 ha per installatie. Gerekend met 6 ha.	0,005 ha/GWh/jaar	

⁵⁴ [*Waarborgingsbeleid kernenergie actualisatierapport.*](#)

⁵⁵ [*Samenvatting waarborgingsbeleid door Antea Group.*](#)

			Kerncentrales worden doorgaans gesitueerd in industriële zones nabij water, wat gunstig is voor energie-intensieve industrieën of de benutting van restwarmte. Tegelijkertijd brengt dit beperkingen met zich mee voor andere industriële activiteiten in de directe omgeving.
Ondersteunende installaties			
(Systeem)batterijen 200 MW	~3-6 ha per 200 MW ⁵⁶ Uitgangspunt 4 ha.	N.v.t.	In verband met geluidsnormen geldt een beperking voor realisatie van woningen (geluidsgevoelige objecten) binnen een afstand van circa 200-550 meter van de systeembatterij. Daarnaast dient een beperkte veiligheidszone gehanteerd te worden die kleiner is dan deze afstand
Elektrolyzers (500 MW)	~5-10 ha per installatie ⁵⁷ Uitgangspunt 8 ha.	N.v.t.	In verband met geluidsnormen geldt een beperking voor realisatie van woningen (geluidsgevoelige objecten) binnen een afstand van circa 300-500 meter van een installatie. Daarnaast dient een beperkte veiligheidsafstand te worden gehanteerd die in principe niet groter is dan genoemde afstand. Een deel van de elektrolyzers wordt op zee gerealiseerd. Voor deze installaties geldt dat de impact op andere ruimtelijke functies minimaal is.
Waterstofcentrales (1 GW)	~10-15 ha per installatie ⁵⁸ Uitgangspunt 12 ha.	N.v.t.	In verband met geluidsnormen geldt een beperking voor realisatie van woningen (geluidsgevoelige objecten) binnen een afstand van circa 500-1.600 meter van een installatie. Daarnaast dient een beperkte veiligheidsafstand te worden gehanteerd die in principe niet groter is dan genoemde afstand. Voor waterstofcentrales wordt gekeken naar de ombouw van bestaande gascentrales. Indien hiervoor gekozen zou worden is het extra ruimtebeslag beperkt.

⁵⁶ Gebaseerd op projectplannen, waaronder een 200 MW batterijsysteem in de gemeente Dronten (6 hectare) en een 250 MW systeem in de Noordoostpolder (4 hectare).

⁵⁷ Gebaseerd op uitgangspunten studie RHDHV naar waterstof voor ministeries van EZK en I&W. Vergelijkbare uitgangspunten zijn gehanteerd in programma VAWOZ.

⁵⁸ Rotterdam Maasvlakte 1 GW waterstoffabriek gaat uit van 11 hectare en in de Eemshaven is dit geschat op 12 hectare.

Waterstofopslag (0,25 TWh)	~ 10 ha per locatie ⁵⁹	N.v.t.	Er zal veelal naar bestaande locaties gekeken worden waar met boorputten gewerkt wordt in bestaande gasvelden en zoutcavernes. ⁶⁰ Ten opzichte van het huidige gebruik is extra ruimtebeslag en dus beperkingen voor andere ruimtelijke ontwikkeling beperkt. Het pompstation voor het vullen en benutten van de velden /cavernes veroorzaakt een geluidsimpact naar de omgeving met een beperking voor woningen (geluidsgevoelige objecten) van circa 500-1000 meter.
----------------------------	-----------------------------------	--------	---

⁵⁹ Gebaseerd op groottes van bestaande boorlocaties gasvelden en zoutcavernes.

⁶⁰ De verwachting is dat er zowel opslag plaats gaat vinden in lege gasvelden als bestaande zoutcavernes. Mocht opslag in lege gasvelden toch economisch onvoldoende rendabel zijn dan dienen er extra zoutcavernes gecreëerd te worden om de beoogde hoeveelheden waterstof te kunnen opslaan. Dit zou meer milieueffecten tot gevolg hebben.

Kader 5-1 ruimtebeslag en efficiëntie uitgelegd, voorbeeld zonne-energie.

Ruimtebeslag en efficiëntie van zonne-energie

Het ruimtebeslag per eenheid productie van zonne-energie is relatief hoog in vergelijking met andere energiebronnen. Dit komt door de lage energiedichtheid, wat direct samenhangt met het beperkte aantal vollasturen (~900 per jaar in Nederland).

Wat zijn vollasturen?

Vollasturen geven aan hoeveel uur een installatie theoretisch op vol vermogen (100%) zou moeten draaien om dezelfde hoeveelheid energie op te wekken als ze in werkelijkheid produceert.

Als een zonnepaneel van 1 kW in Nederland jaarlijks 900 kWh produceert:
 900 kWh / 1 kW = 900 vollasturen

Dit komt overeen met een capaciteitsfactor van ~10% (900/8.760 uur), wat betekent dat maar circa 10% van het maximale opwekkingspotentieel wordt benut. De beperkte vollasturen bij zonne-energie zijn het gevolg van:

- Weerafhankelijkheid: Zonnepanelen produceren alleen bij daglicht en zijn gevoelig voor bewolking.
- Seizoen variatie: In wintermaanden is de opbrengst aanzienlijk lager.
- Dag-nachtcyclus: 's Nachts wordt geen energie opgewekt.

De combinatie van twee factoren zorgt voor het grotere ruimtebeslag van zonne-energie:

- Lager vermogen per eenheid: Zonnepanelen hebben een intrinsiek lagere vermogensdichtheid (~150-200 W/m²) vergeleken met andere energiebronnen.
- Beperkte productietijd: ~900 vollasturen in Nederland (t.o.v. ongeveer 3.000 voor wind op land en 6.000-6.500 voor kernenergie).

Dit dubbele effect - lagere vermogensdichtheid én minder productieve uren - verklaart waarom zonne-energie 40× meer ruimte vereist ten opzichte van wind op land, en tot wel 200× meer dan kernenergie voor een vergelijkbare energieproductie per jaar.

5.4 Externe en nucleaire veiligheid

5.4.1 Introductie

Externe veiligheid heeft betrekking op de risico's voor mens en milieu als gevolg van incidenten met gevaarlijke stoffen of installaties. Nucleaire veiligheid betreft het veilig functioneren van kernenergie-installaties en het voorkomen van radioactieve emissies naar de omgeving.

De toename van activiteiten zoals grootschalige waterstofproductie en -opslag, batterijopslag en de mogelijke bouw van nieuwe kerncentrales vraagt om een zorgvuldige afweging van deze veiligheidsrisico's, mede in relatie tot ruimtelijke ordening en maatschappelijke acceptatie. Wind op zee is in deze studie niet beoordeeld op dit milieuaspect omdat er geen relevant externe veiligheidsrisico's zijn voor de leefomgeving anders dan aanvaringskansen voor scheepvaart.

In de effectbeoordeling in hoofdstuk 6 is gekeken naar de feitelijke veiligheidsrisico's. Hiertoe wordt eerst in

Kader 5-2 nader uitleg gegeven over veiligheidsmaatregelen bij kerncentrales. In bijlage 3 is toegelicht dat de veiligheidsbeleving of -perceptie niet hetzelfde is als de feitelijke situatie. Daarnaast is het relevant om op te merken dat bij de beoordeling van veiligheidsrisico's ook de omgeving van een installatie een belangrijke rol speelt. In deze studie zijn geen locaties aangewezen waardoor dit niet kon worden

meegenomen, dit principe is wel nader toegelicht in Bijlage 3. Tot slot is bij de beoordeling van de veiligheid van installaties uitgegaan van de kans op onbedoelde (niet-bewuste) incidenten. Gevoeligheid voor geopolitieke ontwikkelingen en opzettelijke sabotage of andere bewuste menselijk acties zijn niet meegenomen in de effectbeoordeling, maar komt wel aan bod in bijlage 3.

Kader 5-2 Nucleaire veiligheidsmaatregelen uitgelegd⁶¹

Nucleaire veiligheid: hoe houden we kerncentrales in Nederland veilig?

Nederlandse kerncentrales zijn veilig omdat ze moeten voldoen aan strenge nationale en internationale veiligheidseisen. Dit betekent dat ze bestand zijn tegen extreme situaties zoals aardbevingen en overstromingen. De kans op een ernstig ongeval is daardoor zeer klein.

Hoe wordt die veiligheid gegarandeerd?

- Kerncentrales zijn ontworpen volgens het principe van 'gelaagde veiligheid'. Dit houdt in dat er meerdere onafhankelijke technische, organisatorische, procedurele en administratieve lagen zijn die elkaar aanvullen. Als er iets misgaat in één laag, vangen de andere lagen het op. Hierdoor faalt bij een mankement nooit in één keer het volledige veiligheidssysteem, maar is er altijd een onafhankelijke achterliggende laag. Zo blijft het veiligheidssysteem altijd functioneren.
- De Autoriteit Nucleaire Veiligheid en Stralingsbescherming (ANVS) houdt continue streng toezicht. Zij stelt regels op, verleent vergunningen, controleert de naleving en grijpt in als dat nodig is. De ANVS ziet erop toe dat de nucleaire veiligheid en stralingsbescherming in Nederland voldoen aan de hoogste eisen. Nieuwe inzichten die in de loop der tijd worden opgedaan, al dan niet door ontwikkelingen bij andere centrales in de wereld, kunnen leiden tot nieuwe eisen aan kerncentrales.
- Elke tien jaar worden kerncentrales grondig geëvalueerd en aangepast aan de nieuwste technische inzichten. Deze toetsing heet de 10EVA. Ook worden internationale ervaringen en nieuwe ontwikkelingen meegenomen in de veiligheidsmaatregelen.
- Er zijn uitgebreide noodplannen en oefeningen om voorbereid te zijn op ongevallen. De minister van Infrastructuur en Waterstaat en de overige betrokken ministers zijn verantwoordelijk voor de voorbereiding van de organisatie voor een doelmatige bestrijding van kernongevallen. In dit kader is onder meer het Landelijk Crisisplan Straling geschreven.

5.4.2 Beleidskader

In Nederland is het waarborgen van de veiligheid van mens en milieu een belangrijk uitgangspunt bij de ruimtelijke inpassing van risicovolle activiteiten. Het beleid voor externe veiligheid is gericht op het beheersen van risico's voor de omgeving als gevolg van het gebruik, de opslag en het transport van gevaarlijke stoffen, evenals van risicovolle installaties. Bij nucleaire veiligheid gaat het specifiek om het voorkomen van incidenten met stralingsgevaar, met name bij kerncentrales en andere nucleaire inrichtingen.

Externe veiligheid

Het externe veiligheidsbeleid is vastgelegd in verschillende wetten, besluiten en richtlijnen. De kern hiervan is het Besluit kwaliteit leefomgeving (Bkl), onderdeel van de Omgevingswet.⁶² Dit besluit stelt risicogrenzen aan activiteiten die externe veiligheidsrisico's met zich meebrengen. Centraal staan hierin het plaatsgebonden risico (PR) – de kans per jaar dat iemand op een bepaalde plaats overlijdt door een ongeval – en het groepsrisico (GR) – de kans op een ongeval met meerdere slachtoffers.

⁶¹ Zie voor meer informatie ook de webpagina hierover van de [Rijksoverheid](#), de [ANVS](#) en het [Landelijk Crisisplan Straling](#).

⁶² [Besluit Kwaliteit Leefomgeving](#).

Voor risicovolle activiteiten, zoals chemische fabrieken of installaties voor waterstofproductie, zijn veiligheidsafstanden vastgelegd. Binnen deze afstanden mogen bepaalde kwetsbare of beperkt kwetsbare objecten (zoals woningen, ziekenhuizen of scholen) niet worden gerealiseerd, tenzij er zwaarwegende argumenten en mitigerende maatregelen zijn. Ook voor het vervoer van gevaarlijke stoffen over spoor, weg, water en buisleidingen gelden normen op basis van dezelfde risicobenadering.

Nucleaire veiligheid

Het nucleaire veiligheidsbeleid wordt vormgegeven in lijn met internationale normen met als basis Europese richtlijn voor nucleaire veiligheid (2014/87/Euratom) en verder aangevuld met standaarden van het Internationaal Atoomenergieagentschap (IAEA). In Nederland wordt de uitvoering van het nucleaire toezicht en beleid geregeld via de Kernenergiewet (Kew). Hierin zijn onder andere de vergunningsprocedures, veiligheidseisen en toezichtmechanismen vastgelegd. De Kew is een raamwet, hetgeen inhoudt dat in de wet alleen de hoofdlijnen staan en dat een aantal onderwerpen nader geregeld wordt in een algemene maatregel van bestuur (AmvB) en/of een ministeriele regeling. Voorbeelden daarvan zijn het Besluit kerninstallaties, splijtstoffen en ertsen (Bkse), het Besluit basisveiligheidsnormen stralingsbescherming (Bbs) en de Regeling nucleaire veiligheid kerninstallaties (Rnvk).

Op grond van de wet moet elke kerncentrale een veiligheidsanalyse uitvoeren en maatregelen nemen om de kans op ernstige ongevallen zo klein mogelijk te maken. Daarbij horen ook eisen aan crisisbeheersing en rampenplannen in samenwerking met veiligheidsregio's. De Autoriteit Nucleaire Veiligheid en Stralingsbescherming (ANVS) is de toezichthouder voor nucleaire veiligheid en stralingsbescherming.

Beleidsontwikkeling in de context van de energietransitie

De energietransitie brengt nieuwe situaties voor het veiligheidsbeleid met zich mee, bijvoorbeeld door de opkomst van grootschalige waterstofproductie, batterijopslag en nieuwe vormen van energieopwekking en -opslag. De Rijksoverheid werkt daarom aan een actualisatie van veiligheidsnormen en -instrumenten die passen bij de veranderende aard van het energiesysteem. Ook is in de Nationale Omgevingsvisie (NOVI) vastgelegd dat veiligheid structureel moet worden meegewogen in ruimtelijke keuzes.

5.4.3 Onderscheidende effecten

Het overzicht van Tabel 5-7 beschrijft de potentiële impact van incidenten per onderdeel van het energiesysteem, ingedeeld naar effectbereik (lokaal, bovenlokaal of nationaal⁶³), de kans op incidenten en de bijbehorende risico's en veiligheidsmaatregelen.

Wanneer gekeken wordt naar verschillen in effectbereik is te zien dat systemen zoals zon-PV, wind en elektrolyzers een lokaal effect kunnen hebben. Het kan gaan om brand door defecte omvormers, bladbreuk of waterstoflekken. De risico's bij windturbines en elektrolyzers zijn goed beheersbaar met veiligheidsprotocollen. Grotere installaties zoals waterstofcentrales of grootschalige waterstofopslag kunnen in potentie bij incidenten leiden tot bovenlokale effecten. Bij een incident met een waterstofcentrale kan er door de omvang van de locatie bij een brand sprake zijn van bovenlokale effecten. Bij grootschalige waterstofopslag worden grootschalige lekkages niet aannemelijk geacht. Echter omdat het om zeer grote volumes waterstof gaat, kan een incident, waarbij er waterstof vrij zou komen, in potentie veel langer kunnen duren en/of kunnen er hogere concentraties van waterstof zich ophopen. In dit worst-case scenario, waar een zeer kleine kans op is, kan gesproken worden over mogelijke bovenlokale effecten bij een incident. Kernenergie kan bij ernstige incidenten potentieel landelijke of zelfs internationale gevolgen hebben. Kernongevallen kunnen leiden tot radioactieve besmetting over grote afstanden.

⁶³ In deze context betekent lokaal incidenten beperkt tot directe omgeving, bovenlokaal impact op meerdere gemeenten/regio's en nationaal impact op landelijk niveau.

Als gekeken wordt naar de kans op incidenten dan is deze op grond van ontwerpveiligheidsnormen het laagste bij kerncentrales. Kerncentrales hebben extreem lage faalkansen doordat kerncentrales ontworpen zijn volgens het 'defence-in-depth'-principe en voldoen aan strikte internationale normen (IAEA). Voor de andere onderdelen van het energiesysteem geldt dat er sprake is van een iets grotere – maar nog steeds minimale – kans op incidenten (ingeschat als 'laag'). Voor waterstofcentrales wordt een beperkt hoger risico op brand of explosies voorzien, welke echter beheersbaar is door toepassing van geavanceerde koel- en detectiesystemen.

Tabel 5-7 Veiligheid bij verschillende onderdelen van het energiesysteem⁶⁴

Onderdeel energiesysteem	Effectbereik bij incidenten (lokaal, bovenlokaal of (inter)nationaal)	Kans op incidenten	Specifieke risico's en mitigerende maatregelen
Energie opwekkers			
Zon-PV	Lokaal	Laag	Brandrisico bij defecte omvormers of slechte kabelverbinding
Wind op land	Lokaal	Laag	Mechanische falen (bv. bladbreuk), ijsafworp; veiligheidsbuffers om risico's van vallende onderdelen te beperken
Wind op zee	n.v.t.		
Kernenergie	Internationaal	Zeer laag	Vrijkomen radioactiviteit door beschadiging. Kernenergiewet, IAEA-normen en bescherming tegen externe dreigingen (bestand tegen o.a. vliegtuiginslag, cyberbeveiliging)
Ondersteunende installaties			
(Systeem)batterijen	Lokaal - bovenlokaal	Laag ⁶⁵	Brand- en ontploffingsgevaar lithium-ion; koel- en beveiligingssystemen vereist
Elektrolyzers ⁶⁶	Lokaal	Laag	Waterstoflekken (explosierisico); ATEX-zonering en geavanceerde lekkagedetectie om

⁶⁴ Er is onder meer gebruik gemaakt van een onderzoek van expert judgement, het *Nederlandse Instituut Publieke Veiligheid over veiligheidsaspecten in de energietransitie* en pilot door Gasunie en TNO inzake waterstofopslag bij Zuidwending.

⁶⁵ Sinds het uitkomen van het rapport van het Nederlandse Instituut Publieke Veiligheid, zijn nationale veiligheidsrichtlijnen (PGS37-1) opgesteld waardoor het veiligheidsrisico bij systeembatterijen lager is geworden.

⁶⁶ Een deel van de elektrolyzers wordt op zee gerealiseerd en vormt daarmee geen gevaar voor leefomgeving ten aanzien van externe veiligheid.

			explosierisico's te minimaliseren
Waterstofcentrales	Bovenlokaal	Matig	Grootschalige brandpreventie; veiligheidsprotocollen vergelijkbaar met aardgasinstallaties
Waterstofopslag ⁶⁷	Lokaal - bovenlokaal	Laag	Waterstoflekken (explosierisico); lekdichtheidssystemen zoals bij aardgas

5.5 Landschap en cultuurhistorie

5.5.1 Introductie

Voor het milieuaspect landschap en cultuurhistorie is gekeken naar de impact van de verschillende onderdelen van het energiesysteem op deze thema's.⁶⁸

Landschap

Landschap heeft betrekking op de onderlinge samenhang tussen elementen in een gebied en de relatie met het gebruik ervan. Het is geen statisch begrip, maar voortdurend in verandering door natuurlijke processen en menselijk handelen. De waarneming en beleving door mensen spelen hierbij een cruciale rol. Elementen zoals dorps- en stadssilhouetten, bebouwingslinten, zichtlijnen en groene structuren dragen bij aan de herkenbaarheid en karakteristiek van een landschap.

Grote energieprojecten kunnen deze samenhang beïnvloeden, zowel door fysieke ingrepen als door veranderingen in de ruimtelijke beleving. De toevoeging van nieuwe structuren kan verstoringen veroorzaken in bestaande landschappelijke patronen en invloed hebben op schaal, openheid en zichtlijnen. Daarnaast kan lichtvervuiling het karakter van een gebied veranderen.

Cultuurhistorie

Cultuurhistorische waarden omvatten zowel bouwkundige als historische geografische structuren die door menselijk handelen zijn ontstaan. Dit omvat beschermde monumenten, historische bebouwingspatronen, oude dijkstructuren en verkavelingspatronen die bepalend zijn voor de identiteit van een gebied. Grote ruimtelijke ingrepen kunnen deze waarden aantasten, zowel fysiek als visueel, waardoor de historische samenhang van het landschap wordt verstoord. Onder dit kopje worden niet archeologische waarden verstaan. Zoals omschreven in paragraaf 4.3 zijn de effecten op mogelijke archeologische waarden dermate locatie-specifiek dat deze geen onderdeel vormen van deze studie.

⁶⁷ Uit onderzoek blijkt dat het technisch mogelijk is om waterstof veilig op te slaan in zoutcavernes, maar om de risico's goed te kunnen beheersen is aanvullend onderzoek noodzakelijk. Er zijn nog onzekerheden over bijvoorbeeld het gedrag van het zout op lange termijn en de invloed van waterstof op de integriteit en stabiliteit van de caverne. Voor grootschalige opslag van waterstof in lege gasvelden lopen momenteel diverse (internationale) onderzoeksprojecten, zoals EUH2STARS. Deze projecten richten zich onder meer op het aantonen van de technische en maatschappelijke haalbaarheid, veiligheid en betaalbaarheid van waterstofopslag in gasvelden.

⁶⁸ Nieuwe hoogspanningsverbindingen kunnen in de toekomst ook een aanzienlijke invloed hebben op het landschap. In dit onderzoek is echter uitsluitend gekeken naar energie opwekkers en ondersteunende installaties.

5.5.2 Beleidskader

Erfgoedwet

De Erfgoedwet bundelt sinds 2016 alle regelgeving omtrent het behoud en beheer van cultureel erfgoed in Nederland.⁶⁹ De wet omvat onder andere de bescherming van museale objecten, monumenten en archeologische vindplaatsen. Waar de Omgevingswet zich richt op de omgang met erfgoed binnen de fysieke leefomgeving, regelt de Erfgoedwet specifiek de duiding en instandhouding van cultuurgooederen in overheidsbezit. Deze wet vormt, samen met de Omgevingswet, de basis voor een integrale benadering van erfgoedbescherming in Nederland.

Omgevingswet en onderliggende besluiten

De omgang met cultureel erfgoed in de fysieke leefomgeving wordt geregeld in de Omgevingswet.⁷⁰ Dit omvat onder andere de vergunningverlening voor rijksmonumenten, de aanwijzing van beschermde stads- en dorpsgezichten en de integratie van erfgoed in omgevingsplannen. De bescherming van erfgoed is verder vastgelegd in het Besluit activiteiten leefomgeving (Bal), de omgevingsverordening en het omgevingsplan. De Omgevingswet schrijft voor dat overheden zelf regels en afwegingen kunnen maken over de ruimtelijke inpassing. Overheden kunnen zo via een Omgevingsvisie, Omgevingsplan of Omgevingsverordening bepalen welke landschappelijke en cultuurhistorische waarden zij belangrijk vinden en welke eisen ze willen stellen aan de inpassing van ontwikkelingen. Hierbij valt bijvoorbeeld te denken aan locatie, hoogte, omvang of opstelling. Overheden kunnen ook een omgevingswaarde vastleggen, waarmee ze een kwaliteit vastleggen die ze voor de fysieke leefomgeving wil bereiken/behouden.

Nationale Omgevingsvisie

De Nationale Omgevingsvisie (NOVI) schetst het langetermijnbeleid voor de fysieke leefomgeving in Nederland en biedt richtlijnen tot 2050.⁷¹ Binnen deze visie is 'nationaal belang 19' van toepassing op landschap en cultuurhistorie. Dit richt zich op het behouden en versterken van cultureel erfgoed en landschappelijke waarden van (inter)nationaal belang.

5.5.3 Onderscheidende effecten

Voor het aspect landschap en cultuurhistorie is er een duidelijk onderscheid tussen de verschillende onderdelen van het energiesysteem in de mate en wijze waarop landschappelijke waarden (onomkeerbaar) worden aangetast (zie Tabel 5-8). Factoren zoals locatie, schaal, zichtbaarheid en ruimtelijke inpassing bepalen in hoeverre een installatie bestaande structuren beïnvloedt.

Tabel 5-8 Onderscheidende effecten landschap en cultuurhistorie per onderdeel van het energiesysteem

Onderdeel energiesysteem	Effecten
Energie opwekkers	
Zon-PV	Zon op dak heeft een minimale impact op landschap en cultuurhistorie. Zonnepanelen zijn niet toegestaan op daken van rijksmonumenten. Zonnenvelden veranderen open landschappen doordat bestaande gebiedsgebruik wordt omgezet in zonneparken. Dit is op zichzelf een aantasting en kan leiden tot verstoring van bestaande ruimtelijke patronen. De impact is te beperken door bijvoorbeeld een natuurlijke

⁶⁹ *Erfgoedwet*

⁷⁰ *Omgevingswet*

⁷¹ *Nationale Omgevingsvisie (2020)*.

	omheining, echter zal voor zonnevelden altijd een hoog ruimtebeslag in het landschap blijven gelden.
Wind op land	Windturbines zijn tot op grote afstand zichtbaar en hebben daardoor met name een negatieve impact op het bestaande landschap van open landschappen door de hoogte van de windturbines en bewegende rotor. Dit kan onder meer de beleving, rust en zichtlijnen beïnvloeden en schaalverschillen veroorzaken. Ook kan er sprake zijn zichtbare verlichting die op de windturbines ten behoeve van de luchtvaart. Recent is de ontwikkeling van vliegtuigdetectie dermate dat bij toepassing van dergelijke technieken verlichting uitgeschakeld kan blijven indien er geen vliegtuigen in de nabijheid zijn. Naast de benodigde onderdelen zoals funderingen, kraanopstelplaatsen en toegangswegen, blijft het bestaande landschap grotendeels onaangetast aanwezig.
Wind op zee	Windturbines op zee kunnen het landschap op zee beïnvloeden. Bij het deel van de windparken dat op grote(re) afstand van de kust ligt, is de impact op landschap zoals deze wordt beleefd minimaal (beperkt tot varenden). Ook hier kan er sprake zijn van zichtbare verlichting waarvoor hetzelfde geldt als bij wind op land.
Kernenergie	Kerncentrales kunnen beschikken over reactorgebouwen en koeltorens die aanzienlijk groot zijn en daardoor goed zichtbaar zijn in het landschap. Koeltorens zijn echter niet altijd noodzakelijk bij kerncentrales. Omdat het in dit geval om een beperkt aantal installaties gaat, die doorgaans op industriële locaties worden geplaatst, blijft de verstoring van het landschap en het cultuurhistorisch erfgoed relatief beperkt tot de lokale situatie.
Ondersteunende installaties	
(Systeem)batterijen	(Systeem)batterijen zijn compact en hebben een minimale visuele impact, vooral wanneer in industriegebieden worden gerealiseerd. Er zullen ook systeembatterijen gerealiseerd in weilanden nabij hoogspanning stations of bij zon- en wind opwekinstallaties. In dit geval is de impact op het landschap groter. Als er zo veel mogelijk aangesloten wordt bij de bestaande installaties kan de extra belasting op het landschap zo veel mogelijk beperkt worden.
Elektrolyzers	Elektrolyzers zijn compact en hebben een minimale visuele impact, vooral wanneer deze in industriegebieden of op zee worden gerealiseerd. Een beperkt deel van de elektrolyzers wordt mogelijk gerealiseerd bij opwek op land door zon of wind. Deze elektrolyzers kunnen dan wel in een landelijk gebied staan. Door aansluiting bij bestaande installaties is de impact op landschap minimaal
Waterstofcentrales	Waterstofcentrales hebben in vergelijking met andere ondersteunende installaties meer ruimte nodig. De verwachting is dat deze in industriële gebieden geplaatst worden. Er wordt voorzien dat er voornamelijk gebruik wordt gemaakt van al bestaande gas- en kolencentrales, waardoor er naar verwachting geen tot weinig nieuwe centrales bij hoeven te komen. De impact op landschappelijke en cultuurhistorische waarden zal daarom beperkt zijn.
Waterstofopslag	Waterstofopslag is kansrijk in lege zoutcavernes en gasvelden. De bestaande boorputten en installaties uit de aardgasindustrie kunnen grotendeels worden hergebruikt voor waterstofopslag. Er is sprake van minimale impact op landschappelijke en cultuurhistorische waarden.

5.6 Water

5.6.1 Introductie

Koelwater wordt benut voor het veilig en efficiënt functioneren van kerncentrales, elektrolyzers en waterstofcentrales in Nederland. Ter illustratie kerncentrale Borssele gebruikt 71.200 m³/uur koelwater per uur.⁷² De nieuwe kerncentrales zullen per centrale circa 234.000 m³/uur koelwater gebruiken.⁷³ Small Modular Reactors van 200 MW hebben circa 36.000 m³/uur nodig.⁷⁴ Voor elektrolyzers geldt dat de hoeveelheid water die nodig is sterk afhankelijk is van het koelingssysteem. Bij een doorstroomkoeling systeem kan een elektrolyser van 500 MW 20.000-25.000 m³/uur koelwater gebruiken.⁷⁵ Hierbij wordt koelwater opgenomen uit een rivier of zee en daarna weer warmer terug geloosd. Bij elektrolyzers is een gesloten (recirculatie) koeling optioneel waarbij water wordt hergebruikt en slechts voor een klein deel met (spuiwater) aangevuld. Het verbruik ligt dan rond de 150-200 m³/uur bij een installatie van 500 MW. In dit onderzoek wordt uitgegaan van een conservatief scenario bij 500 MW elektrolyzers met een koelwatergebruik van 20.000-25.000 m³/uur. Elektrolyzers gebruiken daarnaast gedemineraliseerd water als grondstof. Het gaat om 115-250 m³/uur bij een installatie van 500 MW. Deze hoeveelheid is relatief beperkt. In de beoordeling staat om die reden het koelwatergebruik centraal. Waterstofcentrales hebben een koelbehoefte voor een centrale van 1 GW van indicatief 180.000 m³/uur.⁷⁶

Het koelwater wordt gebruikt om de warmte die vrijkomt bij het opwekken van elektriciteit af te voeren, zodat de reactor of verbrandingsmotor niet oververhit raakt. Gebruik (en lozing) van koelwater kan een impact hebben op de waterkwaliteit en het mariene leven in oppervlaktewateren door chemische en thermische emissies (zie voor meer informatie Kader 5-3). In Nederland zijn voor kerncentrales alleen locaties aangewezen waar voldoende koelwater beschikbaar is, zoals Borssele en de Maasvlakte. Deze locaties zijn geselecteerd op basis van hun ligging aan grote wateren, die voldoende capaciteit bieden voor de benodigde koeling.

Door klimaatverandering stijgt de zeespiegel en wordt neerslag minder voorspelbaar, met als gevolg drogere zomers en nattere winters. Deze extremere weersomstandigheden kunnen het functioneren van kerncentrales, elektrolyzers en waterstofcentrales beïnvloeden.⁷⁷ Hogere watertemperaturen vormen een belemmering om oppervlaktewater te gebruiken voor koeling, omdat het koelwater dan minder effectief is en het risico op overschrijding van de maximaal toegestane lozingstemperatuur toeneemt.⁷⁸ Dit kan ertoe leiden dat er minder water mag worden onttrokken of dat centrales tijdelijk hun productie moeten beperken. Daarnaast neemt, als gevolg van klimaatverandering, de kans op droogte en een afname van de beschikbaarheid van grond- en oppervlaktewater toe. Dit heeft negatieve gevolgen voor zowel de waterkwaliteit als de waterkwantiteit. Tijdens perioden van droogte en lage rivierafvoer kunnen de concentraties van (chemische) stoffen in het koelwater te hoog oplopen, waardoor er minder koelwater mag worden gebruikt. Beperkingen in het gebruik van koelwater hebben directe gevolgen voor de opwekkingscapaciteit en daarmee voor de exploitatie van de centrales. Dergelijke situaties kunnen zich sneller voordoen bij installaties die afhankelijk zijn van binnenlandse rivieren.

⁷² MER-bedrijfsduurverlenging Borssele.

⁷³ Moderne Hinkley Point centrales (2x 1650 MW) in Verenigd Koninkrijk als uitgangspunt gebruikt voor bepalen koelwaterbehoefte nieuwe kerncentrales. Uitgangspunt zijn van Gen III-reactoren in dit rapport die een doorstroomkoelingssysteem gebruiken. Gen IV-reactoren (de nieuwste in ontwikkeling) zouden mogelijk ook met andere methodes zoals lucht of warmteput gekoeld kunnen worden. Deze laatste generatie is nog in ontwikkeling, maar in dit geval valt de noodzaak voor grote hoeveelheden (koud) koelwater weg.

⁷⁴ NRG Pallas, Kennismodule Small Modular Reactors, in opdracht van ministerie Klimaat en Groene Groei.

⁷⁵ Uitgangspunten uit studie naar milieueffecten van waterstof op zee door Witteveen en Bos, voor ministerie EZK 2024. Zie ook onderzoek door Royal Haskoning 2024 naar de relatie tussen waterbeschikbaarheid en grootschalige elektrolyse.

⁷⁶ Er is uitgegaan van een vergelijkbare koelbehoefte als bij een aardgascentrale door het gebruik van vergelijkbare installaties. Er is nog niet veel bekend over waterstofcentrales en de benodigde hoeveelheden koelwater.

⁷⁷ Zie ook tekst hierover in paragraaf 9.5 van MER bedrijfsduurverlenging Borssele.

⁷⁸ Dit speelt vooral voor locaties die gebruiken maken van koelwater uit rivieren en meren, maar het kan ook bij locaties aan zee voorkomen.

In het beleid wordt gestreefd naar locaties waar ruime koelmogelijkheden aan oppervlaktewater aanwezig zijn, om het gebruik van koeltorens en de bijbehorende ruimtelijke impact zoveel mogelijk te vermijden. Echter is niet te voorkomen dat de elektrolyzers, kern- en waterstofcentrales een impact zullen hebben op de waterhuishouding en waterkwaliteit.

Kader 5-3 Impact van kerncentrales op waterkwaliteit

Impact op waterkwaliteit uitgelegd

Koelwater kan een impact hebben op de waterkwaliteit (onder meer de chemische en ecologische toestand van water). De impact van koelwater op ecologie op zichzelf is onder het milieuaspect ecologie beoordeeld. In dit thema gekeken naar een drietal emissies die zich kunnen voordoen en die een impact hebben op de waterkwaliteit:

- Thermische emissies: na gebruik wordt het koelwater, dat door het koelproces is opgewarmd, weer terug in het oppervlaktewater gebracht. Hierdoor kan de temperatuur van het ontvangende water stijgen. Om negatieve gevolgen voor het watermilieu te voorkomen, zijn er strikte regels voor de maximale temperatuurstijging van het geloosde water. In warme periodes, wanneer het oppervlaktewater al relatief warm is, kan dit ertoe leiden dat kerncentrales tijdelijk hun productie moeten verminderen of stilleggen om overschrijding van de temperatuurgrenzen te voorkomen. Dit beleid is bedoeld om te waarborgen dat de thermische belasting van het watermilieu beperkt blijft.
- Chemische emissies: het koelwater kan kleine hoeveelheden chemicaliën bevatten, bijvoorbeeld als gevolg van het gebruik van anti-corrosiemiddelen of reinigingsmiddelen in het koelsysteem. Deze stoffen mogen alleen in zeer beperkte concentraties in het oppervlaktewater terechtkomen en worden gereguleerd via vergunningen en monitoring.
- Radioactieve emissies: het koelwater bij kerncentrales komt nooit direct in contact met de reactor of de splijtstof. Er zijn gescheiden circuits, waardoor het koelwater niet radioactief wordt besmet. Desondanks wordt het koelwater continu gemonitord op mogelijke radioactieve stoffen. De lozing van radioactieve stoffen via koelwater is bij normale bedrijfsvoering zeer gering en blijft ruim binnen de wettelijke normen. De belangrijkste radioactieve stoffen die via water kunnen worden geloosd zijn tritium (^3H) en enkele andere radionucliden. Dit kan gebeuren door lekkage of diffusie in het primair koelingscircuit. Deze concentratie zijn extreem klein. De monitoring van radioactieve deeltjes in het secundair koelingscircuit is vooral aanwezig om lekken in het primair circuit tijdig op te sporen.

5.6.2 Beleidskader

Kaderrichtlijn Water (KRW) en Kaderrichtlijn Maritiem (KRM)

De Kaderrichtlijn Water (KRW) en de Kaderrichtlijn Maritiem (KRM) zijn Europese richtlijnen die tot doel heeft de kwaliteit en kwantiteit van waterlichamen, waaronder oppervlaktewater en grondwater, te beschermen en verbeteren. De KRW richt zich op binnenwateren en de kustzone. De KRM op open zee. De richtlijn stelt dat water geen handelswaar is, maar een erfgoed dat duurzaam beheerd moet worden. Lidstaten moeten maatregelen treffen om een goede ecologische en chemische toestand van water te bereiken en achteruitgang te voorkomen. In Nederland is de KRW uitgewerkt in de Omgevingswet⁷⁹ en Bkl⁸⁰, waarin eisen worden gesteld aan zowel de kwantitatieve als chemische toestand van water.

Grondwaterrichtlijn

De Grondwaterrichtlijn is een aanvulling op de KRW en richt zich specifiek op de bescherming van grondwater. Deze richtlijn introduceert drempelwaarden voor verontreinigende stoffen en stelt eisen om te

⁷⁹ Omgevingswet.

⁸⁰ Besluit kwaliteit leefomgeving (Bkl).

voorkomen dat grondwateronttrekking en infiltratie negatieve effecten hebben op de waterkwaliteit. In Nederland is de richtlijn verwerkt in de Omgevingswet en draagt bij aan de bescherming van drinkwaterbronnen en de instandhouding van grondwaterafhankelijke ecosystemen.

Waterwet

De Waterwet regelt het beheer van watersystemen, waaronder waterkeringen, oppervlaktewater- en grondwaterlichamen, evenals activiteiten in, op of met deze watersystemen. Het doel van de Waterwet is het voorkomen en beperken van waterschaarste, wateroverlast, overstromingen en het verbeteren van de waterkwaliteit.

Nationaal Waterprogramma (NWP)

Het Nationaal Waterprogramma⁸¹ (NWP) vormt de basis voor het nationale waterbeleid en het beheer van de rijkswateren en vaarwegen. Het programma vertaalt de Nationale Omgevingsvisie naar concrete doelen en maatregelen voor waterbeheer en adresseert de groeiende uitdagingen die samenhangen met klimaatverandering, bodemdaling, milieuverontreiniging en ruimtedruk.

Het NWP kent drie hoofdambities:

- Een veilige en klimaatbestendige delta: Bescherming tegen overstromingen en klimaatadaptatie om Nederland weerbaar te maken tegen de gevolgen van klimaatverandering.
- Een concurrerende, duurzame en circulaire delta: Zorgen voor voldoende zoetwater, duurzaam scheepvaartvervoer en ondersteuning van economische activiteiten binnen de grenzen van het watersysteem.
- Een schone en gezonde delta met hoogwaardige natuur: Verbetering van de waterkwaliteit en bescherming van waterafhankelijke ecosystemen.

Om deze ambities te realiseren, bevat het NWP verschillende beleidskaders, zoals de stroomgebiedbeheerplannen en het overstromingsrisicobeheerplan. Daarnaast worden er maatregelen genomen om de beschikbaarheid en kwaliteit van waterbronnen te waarborgen, met aandacht voor strategische watervoorziening voor de industrie en energieopwekking.

5.6.3 Onderscheidende effecten

Bij zowel kerncentrales, elektrolyzers als waterstofcentrales kunnen vergelijkbare thermische en chemische emissies via het koelwater optreden. Kerncentrale Borssele gebruikt 71.200 m³ koelwater per uur. Voor een nieuwe kerncentrale met een vermogen van 1,6 GW wordt uitgegaan van een koelwaterbehoefte van 234.000 m³/uur per centrale. Small Modular Reactors (SMR's) van 200 MW hebben circa 36.000 m³/uur koelwater nodig. Voor kernenergie wordt gerekend met circa 6.000 tot 6.500 vollasturen per jaar, afhankelijk van de energiesysteemvariant, wat overeenkomt met 68-75% van het jaar.

Voor elektrolyzers wordt in dit onderzoek uitgegaan van een koelwatergebruik van 20.000 tot 25.000 m³/uur per installatie van 500 MW.⁸² Het aantal vollasturen per jaar van de elektrolyzers varieert van circa 3.700 tot 4.300 afhankelijk van de energiesysteemvariant. Beleidsmatig is de insteek om meer dan de helft van de elektrolyse capaciteit op zee te realiseren. Hoewel de elektrolyzers op zee geen impact hebben op de beschikbaarheid van zoet water, zijn er ook hier thermische en chemische emissies die een impact kunnen hebben.

⁸¹ Rijksoverheid (2022). *Nationaal Water Programma 2022-2027*.

⁸² Er is voor elektrolyzers gerekend met een koelwaterbehoefte van 22.500 m³/uur voor een elektrolyser van 500 MW.

Ook waterstofcentrales hebben een aanzienlijke koelbehoefte: voor een centrale van 1 GW wordt gerekend met 180.000 m³/uur. In alle varianten is het aantal vollasturen beperkt tot 1.200 à 1.600 vollasturen per jaar, oftewel 15-18% van het jaar.

In de volgende tabel is een indicatie van de jaarlijkse hoeveelheden koelwater per onderdeel van het energiesysteem weergegeven voor de onderzochte varianten. Hierbij is rekening gehouden met het aantal vollasturen per variant. Het betreft een grove inschatting, gebaseerd op het koelwatergebruik van de installatie per uur, het aantal vollasturen en het aantal installaties.

Tabel 5-9 jaarlijkse koelwaterbehoefte per variant en per onderdeel van het energiesysteem (x mln. m³)

	Scenario 1: 0.5 GW kern			Scenario 2: 3,7 GW kern			Scenario 3: 8,3 GW kern			Scenario 4: 0 GW kern		
	1A	1B	1C	2A	2B	2C	3A	3B	3C	4A	4B	4C
Kerncentrales en SMR's	430	430	426	3.431	3.422	3.462	8.059	8.112	7.938	0	0	0
Elektrolyzers op land	2.565	2.560	2.103	2.631	2.625	2.389	2.535	2.534	2.149	2.741	2.740	2.087
Elektrolyzers op zee	4.031	4.022	3.329	3.947	3.938	3.492	3.901	3.704	3.305	4.203	4.018	3.305
Waterstof centrales	4.966	5.172	5.908	4.377	4.439	4.737	3.951	4.012	3.863	4.914	5.108	5.932
Totaal	11.992	12.184	11.766	14.386	14.424	14.080	18.446	18.362	17.255	11.858	11.866	11.324

5.7 Radioactief afval

5.7.1 Introductie

Voor het milieuaspect radioactief afval is gekeken naar de toename van radioactief afval door kernenergie in Nederland bij verschillende scenario's. Radioactief afval is afval dat ioniserende straling uitzendt en daardoor risico's kan opleveren voor mens en milieu. Het ontstaat vooral bij het opwekken van kernenergie, maar ook bij medische, industriële en onderzoeksactiviteiten. In Nederland wordt al het radioactieve afval centraal verzameld, verwerkt en opgeslagen door COVRA in Zeeland. In Kader 5-4 is uitgelegd welke soorten radioactief afval er zijn.

Momenteel wordt al het Nederlandse radioactieve afval bovengronds opgeslagen bij COVRA. Radioactief afval blijft soms tienduizenden tot honderdduizenden jaren gevaarlijk. Voor radioactief afval wat nog lang radioactief blijft wordt op termijn eindberging voorbereid. Eindberging zorgt ervoor dat het afval veilig en stabiel blijft opgeslagen, zelfs als toekomstige generaties er niet meer actief toezicht op houden. Meer informatie hierover is gegeven in kader 5-9.

Kader 5-4 soorten radioactief afval

Soorten radioactief afval

Er zijn drie hoofdsoorten radioactief afval:

- **Natuurlijk radioactief afval (NORM):** Dit ontstaat bij industriële processen waarbij natuurlijke radioactieve stoffen worden geconcentreerd. Het is de grootste groep van radioactief afval en kent de minste radioactiviteit. Het grootste deel van het NORM-afval wordt doorlopend afgevoerd naar de daarvoor aangewezen deponieën. Een merendeel hiervan is dan ook niet bij COVRA opgeslagen, toch vertegenwoordigd NORM afval 65,1% van het totale opgeslagen volume afval en maar 0,02% van de radioactiviteit bij COVRA.
- **Laag- en middelradioactief afval (LMRA):** Dit bestaat uit onder andere beschermingsmaterialen, gereedschappen, laboratoriumafval en medische restanten. Dit type afval wordt verzameld in roestvrijstalen vaten, die vervolgens worden samengeperst en overgebracht in een stalen vat. Dit stalenvat wordt vervolgens gecementeerd waardoor het afval geïmmobiliseerd is in een cementen matrix. Op deze wijze kan het langdurig veilig opgeslagen worden. COVRA heeft diverse gebouwen voor de bovengrondse opslag van dit type afval. Ongeveer 80% van het LMRA afval in Nederland is bij COVRA opgeslagen en het vertegenwoordigt ongeveer 34,6% van het opgeslagen volume afval en 0,22% van de radioactiviteit bij COVRA.
- **Hoogradioactief afval (HRA):** Dit afval komt vooral uit kerncentrales en onderzoeksreactoren en bevat hoogradioactieve stoffen die langdurig gevaarlijk blijven. De gebruikte splijtstof van kerncentrale Borssele wordt in Frankrijk eerst verwerkt in een proces dat 'opwerking' genoemd wordt. Met dit proces wordt het grootste deel van het uranium en plutonium aan de splijtstof onttrokken en recyclet. Er ontstaan ook twee vormen van hoogradioactief afval die in twee verschillende typen vaten stabiel worden opgeslagen. HRA gebruikte in 2022 0,3% in van het totale volume van opgeslagen afval bij COVRA. Dit afval vertegenwoordigt wel 99,76% van de totale radioactiviteit die wordt opgeslagen op de locatie. Het is dus veel radioactiever dan LMRA of NORM afval.

Kader 5-5 eindberging radioactief afval
Eindberging radioactief afval

In Nederland wordt radioactief afval nu minimaal 100 jaar bovengronds opgeslagen bij COVRA. Daarna blijft een groot deel van het afval nog steeds radioactief en gevaarlijk voor mens en milieu. Daarom werkt Nederland aan plannen, zoals de routekaart in het NPRA, voor eindberging: het definitief opslaan van radioactief afval diep onder de grond, bijvoorbeeld in klei- of zoutlagen. Dit wordt gezien als de veiligste en meest verantwoorde lange termijn oplossing. Al sinds de jaren 70 wordt er onderzoek gedaan naar de mogelijkheden hierin voor Nederland. In het NPRA wordt daarnaast ook gekeken naar de optie van oppervlakteberging van radioactief afval. Er wordt dus niet alleen naar diepe eindberging gekeken momenteel. De overheid onderzoekt, in het Nationaal Programma Radioactief Afval (NPRA), samen met COVRA en andere partijen hoe en waar eindberging kan plaatsvinden.

Het kabinet heeft in september 2024 aangekondigd om eerder te besluiten over het definitief opslaan van radioactief afval – de zogeheten eindberging. Eigenlijk zou dit pas in 2100 gebeuren. Het kabinet wil eerder een besluit nemen over de vorm en locatie van de eindberging. Dit gebeurt in een zeer zorgvuldig en stapsgewijs proces dat na 2027 wordt gestart. Alle belanghebbenden, zoals omwonenden, krijgen de ruimte om hierover mee te praten. Uiteindelijk is het de bedoeling om rond 2050 tot een keuze voor de locatie te komen. Tot dat eindberging locatie operationeel is blijft COVRA verantwoordelijk voor de veilige bovengrondse opslag van al het radioactieve afval.

Bij diepe eindberging wordt het afval verpakt in speciale vaten en geplaatst in een ondergrondse faciliteit met meerdere barrières, zodat radioactieve stoffen niet kunnen ontsnappen. Na afsluiting van de opslag is er geen actief beheer meer nodig en blijft het afval veilig geïsoleerd voor duizenden jaren.

5.7.2 Beleidskaders

Het Nationaal Programma Radioactief Afval (NPRA)⁸³

Het NPRA gaat over het beheer van radioactief afval en verbruikte splijtstoffen in Nederland. Dit programma is verplicht op grond van de Europese richtlijn 2011/70/Euratom en moet elke tien jaar worden geactualiseerd en bij de Europese Commissie worden ingediend. De huidige versie uit 2016 loopt af in 2025. Uiterlijk augustus 2025 moet Nederland een nieuw NPRA vaststellen, inclusief een actuele inventarisatie van de hoeveelheid en herkomst van radioactief afval, en een langetermijnvisie op veilige opslag en eindberging.

Het NPRA beschrijft het beleid voor het ontstaan, beheer, opslag en de uiteindelijke eindberging van radioactief afval, met veiligheid als belangrijkste uitgangspunt om mens en milieu te beschermen. Het programma bevat:

- Kaders voor veilige opslag, afvalminimalisatie en hergebruikopties;
- Richtlijnen voor het beheer van alle afvalstromen, inclusief laag-, middel- en hoogradioactief afval, tot 2035 en daarna;
- Een langetermijnvisie op geologische eindberging, inclusief een eerste routekaart naar eindberging en de benodigde kennis, besluitvorming, betrokken partijen en participatie.

Het NPRA houdt rekening met de actuele ontwikkelingen in de nucleaire sector, zoals de mogelijke uitbreiding van kernenergie, de verlenging van de bedrijfsduur van bestaande centrales, en de bouw van twee nieuwe kerncentrales en SMR's. Scenario's voor veilige opslag, afvalreductie en hergebruik worden hierin meegenomen.

⁸³ Nationaal Programma Radioactief Afval (NPRA).

COVRA is verantwoordelijk voor de centrale opslag van radioactief afval in Nederland en beschikt volgens de huidige inzichten over voldoende opslagcapaciteit tot na 2050, en met uitbreidingen zelfs tot circa 2100, afhankelijk van de toekomstige omvang van het afval. Voor de lange termijn blijft geologische eindberging het uitgangspunt. Onderzoek naar de veiligheid en haalbaarheid van eindberging in diepe klei- of zoutlagen wordt voortgezet, onder meer via het COPERA-programma.⁸⁴

De Kernenergiewet vormt het juridische kader voor het beheer van radioactief afval in Nederland. De wet regelt het gebruik, de opslag, het vervoer en de verwerking van radioactieve stoffen en splijtstoffen, met als doel mens en milieu te beschermen tegen de risico's van ioniserende straling.

Voor vrijwel alle handelingen met radioactieve stoffen, waaronder het produceren, opslaan, vervoeren en verwerken van radioactief afval, geldt op grond van de Kernenergiewet een vergunning- of registratieplicht. De wet schrijft voor dat radioactief afval zo snel mogelijk moet worden afgevoerd van de plaats van ontstaan naar een centrale opslagfaciliteit, in de praktijk COVRA. COVRA wordt na overdracht eigenaar van het afval en is verantwoordelijk voor het veilige beheer en de opslag, die minimaal 100 jaar bovengronds plaatsvindt.

Kernenergiewet en onderliggende besluiten

De Kernenergiewet en onderliggende besluiten, zoals het Besluit kerninstallaties, splijtstoffen en ertsen (Bkse) en het Besluit basisveiligheidsnormen stralingsbescherming (Bbs), bevatten onder meer:

- Eisen voor het veilig beheer, transport en opslag van radioactief afval;
- Regels voor financiële zekerheden voor buitengebruikstelling en ontmanteling van kerninstallaties;
- Criteria voor wanneer stoffen als radioactief afval worden aangemerkt en hoe daarmee moet worden omgegaan;
- Voorschriften voor tijdelijke opslag, vervalopslag en vrijgave van afval dat binnen een bepaalde periode niet meer radioactief is.

Het beleid is gericht op minimalisatie van het ontstaan van radioactief afval, veilig beheer zolang er risico's zijn, het voorkomen van onredelijke lasten voor toekomstige generaties en het principe dat de veroorzaker betaalt voor het beheer. De Kernenergiewet wordt aangevuld met lagere regelgeving en sectorale plannen, en sluit aan bij internationale en Europese verplichtingen.

5.7.3 Onderscheidende effecten

Recent zijn door het RIVM de radioactieve rest- en afvalstromen in Nederland in kaart gebracht.⁸⁵ COVRA heeft in haar Inventarisrapport 2022 voor bepaalde scenario's van groei in kernenergievermogen en bouw onderzoeksreactoren geschetst wat dat betekenen kan voor de hoeveelheid afval die uiteindelijk in COVRA en daarna eindberging moet worden opgeslagen.⁸⁶ In de tabel hierna zijn de verwachtingen omtrent radioactief afval opgenomen voor de verschillende scenario's.

⁸⁴ COPERA (COVRA's Onderzoeksprogramma voor Eindberging van Radioactief Afval). COPERA is in november 2020 gestart en bouwt voort op de resultaten van het eerdere OPERA programma. Het programma richt zich op de verdere ontwikkeling van natuurwetenschappelijke kennis over eindberging en loopt tot 2025.

⁸⁵ Onderzoek RIVM radioactieve rest- en afvalstromen in Nederland.

⁸⁶ Inventarisrapport radioactief afval door COVRA. Het scenario van het nieuwe kabinet met 4 nieuwe kerncentrales, 7 SMR's en de kerncentrale van Borssele is niet onderzocht in de inventarisatie maar de hoeveelheden afval zijn met de cijfers van het rapport wel te berekenen.

Tabel 5-10 verwachtingen radioactief afval voor verschillende scenario's

Scenario	Hoeveelheid LMRA ⁸⁷ in m3 per jaar door kernenergie	Hoeveelheid HRA ⁸⁸ in m3 per jaar door kernenergie	Hoeveelheid HRA in m3 in 2130 (huidige installaties+ kernenergie) ⁸⁹
Borssele langer open (gerekend met periode van 20 jaar) ⁹⁰	140	5,6	191 (huidige installaties excl. Borssele) + 112 = 303
Borssele en twee nieuwe kerncentrales	140 + 500 = 640	5,6 + 37 = 42,6	303 + 2.960 = 3.263 ⁹¹
Borssele, vier nieuwe kerncentrales en 7 SMR's	640 + 500 + 220 ⁹² = 1360	42,6 + 37 + 14 ⁹³ = 93,6	3.263 + 4.080 = 7.343 ⁹⁴

Capaciteit COVRA

Tot voor kort werd uitgegaan van realisatie van eindberging voor radioactief afval in Nederland rond 2130. In het Nationaal Programma Radioactief Afval (NPRA) is dit beleidsvoornemen echter losgelaten en is gekozen voor een stapsgewijze, participatieve aanpak.⁹⁵ Dit betekent dat het tijdspad voor eindberging flexibeler wordt en mogelijk eerder tot besluitvorming kan worden gekomen.

Voor de tussenliggende periode is het relevant om inzicht te hebben in de hoeveelheid radioactief afval die tot het moment van eindberging zal vrijkomen, en in de opslagcapaciteit en uitbreidingsmogelijkheden bij COVRA. Volgens het Masterplan Radioactief Afval 2050 is er tot na 2050, en met gerichte uitbreidingen zelfs tot circa 2100, voldoende ruimte op het bestaande terrein van COVRA om al het Nederlandse radioactief afval veilig te verwerken en op te slaan.⁹⁶ Dit geldt ook bij een scenario met verlenging van de bedrijfsduur van kerncentrale Borssele, de bouw van twee nieuwe kerncentrales en enkele SMR's (Small Modular Reactors).⁹⁷

De verwachte stijging van de hoeveelheid radioactief afval vraagt om gerichte investeringen in uitbreiding van opslaggebouwen en optimalisatie van opslagmethoden. Zo wordt de inzet van een plasmaoven voorbereid, waarmee het volume van laag- en middelradioactief afval (LMRA en NORM) aanzienlijk kan worden gereduceerd. Dit leidt tot efficiënter ruimtegebruik, lagere kosten en extra veiligheid. Voor hoogradioactief afval (HRA) is volumereductie met plasmaovens niet mogelijk, maar optimalisatie van de opslagmethode kan het ruimtebeslag wel beperken.

Het Masterplan 2050 voorziet in tijdige uitbreidingen van opslagfaciliteiten. Door deze uitbreidingen en strategische terreinuitbreiding kan COVRA de opslagcapaciteit verlengen tot circa 2100. In scenario's met

⁸⁷ LMRA: Laag en middelradioactief afval

⁸⁸ HRA: hoogradioactief afval

⁸⁹ Er dient ook nog rekening gehouden te worden met de komst van SHINE en PALLAS. Een isotopenfabriek en een medische isotopenreactor. Deze twee installaties zijn nu buiten beschouwing gelaten in de cijfers maar zullen ook een bijdrage leveren in HRA en LMRA.

⁹⁰ Hoelang kerncentrale Borssele langer openblijft, is nog niet besloten. In dit onderzoek is uitgegaan van een verlenging met 20 jaar.

⁹¹ Uitgaande van een ingebruikname periode van 80 jaar tot 2130 voor nieuwe kerncentrales.

⁹² De hoeveelheid afval die deze SMR-reactoren produceren verhoudt zich grofweg tot het vermogen van de reactor. Een reactor van 200 MW creëert circa 31m3 LMRA en 2m3 HRA per jaar. Zie ook onderzoek door NRG Pallas in opdracht van KGG.

⁹³ Zie hierboven.

⁹⁴ Uitgaande van ingebruikname periode van 80 jaar tot 2130 voor alle nieuwe kerncentrales en de SMR's.

⁹⁵ Nationaal Programma Radioactief Afval (NPRA).

⁹⁶ Masterplan 2050 Radioactief Afval.

⁹⁷ De ontmanteling van enkele bestaande installaties, waar vooral LMRA afval bij ontstaat, meegenomen in deze berekening.

vier nieuwe kerncentrales en zeven SMR's moet mogelijk gekeken worden naar aanvullende locaties buiten de huidige terreingrenzen van COVRA.

5.8 Straling

5.8.1 Introductie

Voor het milieuaspect straling wordt gekeken naar de toename van stralingsniveaus in de omgeving door de komst van kerncentrales. Kerncentrales maken gebruik van ioniserende straling om energie op te wekken. Ioniserende straling kan het DNA in lichaamscellen beschadigen, wat op lange termijn het risico op kanker verhoogt. Voor stralingsbeschermingsdoeleinden gaat men ervan uit dat er een lineair verband bestaat tussen de stralingsdosis en de kans op het ontstaan van kanker. Bij zeer hoge doses, zoals bij een ernstig kernongeval, kunnen ook acute gezondheidsklachten optreden, zoals misselijkheid, vermoeidheid en stralingsziekte.⁹⁸ Daarom gelden er in Nederland strenge regels en toezicht om blootstelling aan straling voor werknemers en omwonenden tot een minimum te beperken.

In Nederland ontvangen mensen jaarlijks gemiddeld 2,9 millisievert aan straling, wat relatief laag is vergeleken met andere Europese landen.⁹⁹ Deze blootstelling komt voornamelijk door medische onderzoeken en natuurlijke bronnen van straling in huis, zoals radon, thoron en externe straling.

Tabel 5-11 Vergelijking met andere stralingsbronnen¹⁰⁰

Bron	Gemiddelde dosis (mSv)
Straling door kerncentrale Borssele (op de terreingrens)	0,0008 per jaar
Totale natuurlijke achtergrondstraling in NL Onder meer door:	1,7–2,5 per jaar
- Radon in het buitenmilieu - Radon in het binnenmilieu	0,02-0,03 per jaar 0,44- 0,83 per jaar
Kosmische straling leefniveau (binnen- en buitenmilieu)	0,22 per jaar
Thoron in binnenmilieu	0,20- 0,54 per jaar
Natuurlijke activiteit lichaam	0,43 per jaar
Gammastraling bouwmaterialen	0,34 per jaar
Medische diagnostiek (NL, gemiddeld)	1,2 per jaar
Vliegen (retour Amsterdam–New York) ¹⁰¹	0,072 per retourtje

5.8.2 Beleidskaders

Kernenergiewet en onderliggende richtlijnen, besluiten en regelingen

De bescherming tegen straling is in Nederland vastgelegd in de Kernenergiewet (Kew) en uitgewerkt in onderliggende besluiten en regelingen, zoals het Besluit kerninstallaties, splijtstoffen en ertsen (Bkse) en

⁹⁸ RIVM: gevolgen en maatregelen bij stralingsincidenten.

⁹⁹ RIVM: straling rond kerncentrale Borssele.

¹⁰⁰ RIVM: Blootstelling aan natuurlijke bronnen van ioniserende straling in Nederland.

¹⁰¹ Tijdens een trans-Atlantische vlucht ontvangt een passagier ongeveer 0,07 mSv door kosmische straling op grote hoogte. Dit is bijna honderd keer meer dan de jaardosis aan de rand van een kerncentrale Borssele. Dit komt doordat op grote hoogte kosmische straling minder wordt afgeschermd door de atmosfeer waardoor mensen tijdelijk bloot staan aan een hogere dosis kosmische straling dan op zeeniveau.

het Besluit basisveiligheidsnormen stralingsbescherming (Bbs). Deze kaders stellen limieten aan de hoeveelheid straling die mensen mogen ontvangen, zowel bij normaal bedrijf als bij incidenten.

Op Europees niveau wordt volgens Richtlijn 2013/59/Euratom een totale extra blootstelling van maximaal 1 millisievert (mSv) per jaar voor het publiek door activiteiten en installaties bij normale bedrijfsvoering als acceptabel beschouwd.¹⁰² Per individuele bron (de combinatie van handelingen op één locatie onder verantwoordelijkheid van een ondernemer) geldt een grenswaarde van maximaal 0,1 mSv per jaar. Dit is in Nederlandse wet opgenomen in het Besluit kerninstallaties, splijtstoffen en ertsen.¹⁰³ De daadwerkelijk gemeten waarden bij kerncentrale Borssele liggen zelfs nog ruim onder deze norm; in 2021 was de hoogste jaarwaarde slechts 0,0008 mSv.¹⁰⁴ In Nederland worden jaarlijks metingen gedaan bij kerncentrales door het RIVM om de straling levels te meten. Daarnaast wordt er toezicht gehouden door de Autoriteit Nucleaire Veiligheid en Stralingsbescherming (ANVS).

5.8.3 Onderscheidende effecten

Alleen voor kerncentrales geldt dat potentieel straling optreedt naar de omgeving. Dit betreft een lokaal effect. De hoeveelheid straling die vrijkomt bij kerncentrales is zeer gering in vergelijking met de natuurlijke achtergrondstraling waaraan mensen dagelijks worden blootgesteld.

5.9 CO₂-emissies

5.9.1 Introductie

Bij het milieuaspect CO₂-emissies is gekeken naar de hoeveelheid CO₂ die duurzame energie opwekkers gedurende hun volledige levenscyclus uitstoten, in vergelijking met conventionele methoden zoals gas- en kolencentrales. CO₂ en andere broeikasgassen zijn bepalend voor klimaatverandering, waarbij energiesystemen een cruciale rol spelen. Emissies ontstaan in alle levensfasen: bouw, exploitatie en ontmanteling van installaties, evenals in de materiaalketen. De mate van uitstoot verschilt echter sterk per technologie. Sommige technologieën leiden tot uitstoot tijdens de aanleg- en ontmantelingsfase, terwijl energieproductie uit fossiele energiebronnen als kolen en gas ook tijdens de exploitatie significante hoeveelheden CO₂-emissies blijven uitstoten. Ook bij productie van grijze waterstof, waarbij waterstofproductie plaatsvindt met aardgas zonder CO₂-afvang, vindt een significante uitstoot tijdens exploitatie plaats.

Vanaf 2050 mogen in overeenstemming met het Klimaatakkoord, alleen nog CO₂-arme energiebronnen worden ingezet in Nederland. Het gaat om zonne-energie, windenergie en kernenergie als energie opwekkers. Volledig CO₂-vrije bronnen bestaan niet: zelfs bij deze duurzame opties ontstaan emissies tijdens productie en winning van bouwmaterialen (staal, beton), bouw, onderhoud en ontmanteling omdat daarvoor op dit moment nog fossiele energiebronnen worden ingezet (werktuigen, fabrieken). De aantallen zijn echter veel lager dan bij conventionele energiebronnen. De CO₂-uitstoot van duurzame energiebronnen kan verder dalen door het gebruik van elektrische bouwvoertuigen, het elektrificeren van materiaal productieprocessen en hergebruik van materialen (circulaire economie).

Bij dit milieuaspect ligt de focus op de CO₂-reductie bij duurzame energie opwekkers ten opzichte van conventionele methoden, zoals kolen- en gascentrales, die fossiele brandstoffen gebruiken. Hiervoor is gebruikgemaakt van bestaande onderzoeken die de hoeveelheid CO₂-emissies per opgewekte kWh in kaart brengen. Deze analyse is uitsluitend relevant voor de energie opwekkers. Om deze reden zijn de ondersteunende installaties (batterijen en waterstof gerelateerde installaties) niet beoordeeld op dit milieuaspect.

¹⁰² Richtlijn 2013/59/Euratom

¹⁰³ Besluit kerninstallaties, splijtstoffen en ertsen.

¹⁰⁴ RIVM: metingen Borssele 2021.

Hieronder is eerst ingegaan op de meest relevante beleidskaders, voordat de verschillen in CO₂-emissies zijn gepresenteerd.

5.9.2 Beleidskader

Klimaatakkoord van Parijs

Het Klimaatakkoord van Parijs uit 2015 vormt de internationale basis voor de reductie van broeikasgasemissies. Nederland heeft, samen met 195 andere landen, afgesproken de wereldwijde temperatuurstijging ruim onder de 2°C te houden en te streven naar maximaal 1,5°C. Ieder land stelt een 'Nationally Determined Contribution' (NDC) op, waarin de nationale emissiereductiedoelstellingen en maatregelen worden vastgelegd.

Nationaal Klimaatakkoord (NKA)

In Nederland zijn de doelstellingen uit het Klimaatakkoord van Parijs vertaald naar het Nationaal Klimaatakkoord (NKA), dat in 2019 is vastgesteld.¹⁰⁵ Het akkoord beschrijft per sector de benodigde CO₂-reductie en bevat afspraken over de transitie naar een klimaat neutrale energievoorziening. De belangrijkste doelstelling is een reductie van 49% CO₂-uitstoot in 2030 ten opzichte van 1990, met verdere aanscherping richting klimaatneutraliteit in 2050.

Nationaal Programma Regionale Energiestrategie (NPRES)

Om de doelstellingen uit het NKA regionaal te vertalen, zijn in het NPRES 30 Regionale Energiestrategieën regio's (RES-regio's) aangewezen.¹⁰⁶ Decentrale overheden werken hierin samen met maatschappelijke organisaties, netbeheerders en bedrijven om plannen te ontwikkelen voor de opwekking van duurzame energie en CO₂-reductie. Een centrale doelstelling binnen de NPRES is het realiseren van 35 TWh duurzame energie op land in 2030, wat een directe bijdrage levert aan de vermindering van CO₂-uitstoot.

Nationaal Plan Energiesysteem (NPE)

Het Nationaal Plan Energiesysteem (NPE) uit 2023 beschrijft de langetermijnvisie voor de Nederlandse energievoorziening tot 2050, met als centraal doel een CO₂-neutraal energiesysteem.¹⁰⁷ Dit plan richt zich op het afbouwen van fossiele energiebronnen en de maximale inzet van CO₂-vrije energiebronnen zoals hernieuwbare elektriciteit, waterstof en duurzame warmte. Om de CO₂-uitstoot structureel te verlagen, zet het NPE in op de versnelling van duurzame elektriciteitsopwekking en een toenemende elektrificatie van industrie, mobiliteit en gebouwde omgeving. Daarnaast wordt ingezet op energiebesparing en de ontwikkeling van bijvoorbeeld grootschalige waterstofproductie, met een beoogde elektrolysecapaciteit van 15-20 GW in 2040. Dit draagt bij aan het verminderen van CO₂-uitstoot in sectoren die moeilijk volledig te elektrificeren zijn.

5.9.3 Onderscheidende effecten

Energie opwekkers verschillen in de mate en fase waarin ze CO₂ uitstoten. De impact varieert per technologie en kan optreden tijdens de bouw, exploitatie en ontmanteling.

Voor dit rapport zijn geen nieuwe berekeningen of onderzoeken uitgevoerd. Voor de beoordeling van CO₂-emissies is gebruikgemaakt van bestaande onderzoeken. Twee relevante actuele bronnen zijn de UNECE (United Nations Economic Commission for Europe) en het IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change).¹⁰⁸ Beide onderzoeken geven inzicht in de

¹⁰⁵ [Klimaatakkoord \(2019\)](#).

¹⁰⁶ [Nationaal Programma Regionale Energiestrategie \(NPRES\)](#).

¹⁰⁷ [Nationaal plan energiesysteem \(2023\)](#).

¹⁰⁸ [Onderzoek van IPCC \(2014, p. 7\)](#) en [onderzoek door UNECE \(2022\)](#).

hoeveelheid CO₂-emissies per opgewekte kWh, waarbij de volledige levenscyclus van het product is meegenomen: van grondstoffenketen en bouwfase tot en met de exploitatie en ontmanteling. Dit worden ook wel levenscyclus-emissies genoemd. CO₂-emissies als gevolg van materiaalgebruik, zoals de productie van beton en staal, zijn hierin ook meegenomen, aangezien deze een significant deel van de totale uitstoot over de levenscyclus vormen. De totale emissies zijn gedeeld door het verwachte aantal opgewekte kWh gedurende de gehele levensduur van de installatie. In dit rapport zijn deze resultaten gebruikt om het percentage verbetering in CO₂-uitstoot per energieopwekker ten opzichte van kolen en gas te berekenen. Dit is gedaan voor beide studies en opgenomen in Tabel 5-12 en

Tabel 5-13. Belangrijk om te benoemen is dat de CO₂-uitstoot van duurzame energiebronnen richting 2050 verder zal dalen. De cijfers zullen dus naar verwachting lager uitvallen dan in de tabellen gepresenteerd door het gebruik van elektrische bouwvoertuigen, het elektrificeren van materiaal productieprocessen en hergebruik van materialen (circulaire economie).

Wanneer deze percentages naast elkaar worden gelegd, blijkt dat de verschillen tussen de onderzoeken klein zijn. Beide studies geven een vergelijkbaar beeld. Hernieuwbare energie en kernenergie laten in beide studie een relatief vergelijkbaar lage uitstoot zien. In de UNECE-studie is dit voor kernenergie lager dan wind op land, terwijl dit in de IPCC-studie juist andersom is. In beide studies scoren wind op zee en zon-PV eveneens lager maar iets hoger dan kernenergie en wind op land. De verschillen in CO₂-uitstoot tussen wind op land, wind op zee en kernenergie zijn relatief klein. Windenergie op zee heeft een iets hogere CO₂-uitstoot dan windenergie op land, vooral door de productie en plaatsing van funderingen, onderzeese bekabeling en het transport via schepen van materialen en personeel. Zon-PV kent voor deze bronnen een relatief hoge uitstoot hetgeen samenhangt met de energieproductie per eenheid zon-PV.

Tabel 5-12 Resultaten UNECE studie CO₂ uitstoot per kWh en % verbetering bij duurzame energie opwekkers¹⁰⁹

Energieopwekker	CO ₂ uitstoot gram/kWh	Mediaan	% minder CO ₂ uitstoot t.o.v. kolen	% minder CO ₂ uitstoot t.o.v. gas
Kolen	751-1.095	923	-	-
Gas	403-513	458	-	-
Zon-PV	9,2-83	46,1	95,0%	89,9%
Wind op land	7,8-16	11,9	98,7%	97,4%
Wind op zee	12-23	17,5	98,1%	96,2%
Kernenergie	5,1-6,4	5,75	99,4%	98,7%

Tabel 5-13 Resultaten IPCC-studie CO₂ uitstoot per kWh en % verbetering bij duurzame energie opwekkers¹¹⁰

Energieopwekker	CO ₂ uitstoot gram/kWh (mediaan genoemd in onderzoek)	% minder CO ₂ uitstoot t.o.v. kolen	% minder CO ₂ uitstoot t.o.v. gas
Kolen	820	-	-

¹⁰⁹ Onderzoek door UNECE (2022).

¹¹⁰ Onderzoek van IPCC (2014, p. 7).

Gas	490	-	-
Zon-PV	41-48 (mediaan op dak/land 44,5)	94,6%	90,9%
Wind op land	11	98,7%	97,8%
Wind op zee	12	98,5%	97,6%
Kernenergie	12	98,5%	97,6%

In beide studies zijn aannames gedaan om de berekeningen te kunnen uitvoeren. Voor elke energieopwekker zijn het vermogen van een installatie, het aantal vollasturen en de duur van de exploitatiefase vastgesteld. Daarbij zijn enkele kanttekeningen te plaatsen. Zo is voor het aantal vollasturen uitgegaan van een wereldwijd gemiddelde, wat kan afwijken van de Nederlandse situatie. Voor wind op zee ligt het aantal vollasturen in Nederland waarschijnlijk hoger dan het wereldwijde gemiddelde, terwijl dit voor zon-PV mogelijk lager is.

De UNECE-studie gaat voor wind op land uit van 2,5 MW-turbines met een exploitatiefase van 20 jaar. Voor offshore wind betreft het 5 MW-turbines met een exploitatiefase van 25 jaar. Door recente marktontwikkelingen is het voor het energiesysteem van 2050 aannemelijker om te rekenen met turbines van 6 MW op land en 15 MW op zee, met een verwachte levensduur van respectievelijk 25-35 jaar en 30-35 jaar. Deze grotere turbines gebruiken bovendien minder materiaal per opgewekt vermogen en zijn in die zin efficiënter. Dit geldt in mindere mate ook voor zonne- en kernenergie. Hierdoor zijn de werkelijke verschillen in emissies waarschijnlijk nog groter dan in de tabellen gepresenteerd wordt. Daarnaast zullen naar verwachting ook de emissies in de productieketen van wind-, zon- en kerninstallaties verder dalen omdat het energiesysteem en bouwprocessen verduurzamen.

Aan de andere kant geldt dat in een duurzaam energiesysteem ook meer ondersteunende installaties nodig zijn om op elk moment aan de energievraag te kunnen voldoen. Dit gebeurt bijvoorbeeld met batterijen en waterstofinstallaties. Ook deze installaties moeten worden gebouwd en veroorzaken CO₂-emissies, vooral in de grondstoffenketen, bouwfase en bij de ontmanteling.¹¹¹ Hoewel de energie opwekkers zelf bijvoorbeeld 98% minder CO₂ uitstoten ten opzichte van gas of kolen, kan het totale energiesysteem, wanneer ook de ondersteunende installaties worden meegerekend, een iets lager reductiepercentage laten zien ten opzichte van een conventioneel energiesysteem. In deze studie is voor de beoordeling gekeken naar de energie opwekkers zelf en het aandeel daarvan binnen de energiemix.

5.10 Materiaalgebruik

5.10.1 Introductie

De impact van materiaalgebruik is in deze studie beoordeeld op basis van de hoeveelheid benodigd materiaal per opgewekte terawattuur (TWh) elektriciteit. Bij duurzame energiebronnen betreft dit voornamelijk de materialen die nodig zijn voor de bouw van installaties, zoals zonnepanelen, windturbines of kerncentrales. Bij conventionele methoden, zoals kolen- en gascentrales, is er daarnaast sprake van aanzienlijk materiaalgebruik, in de vorm van kolen en gas, tijdens de gebruiksfase.

¹¹¹ Ook voor deze installaties geldt dat de footprint van materialen en bouw steeds lager wordt door de verduurzaming van de processen in landen waar deze gemaakt worden en elektrische bouwvoertuigen.

Om de beoordeling van materiaalgebruik in perspectief te plaatsen, is het benodigde materiaal per TWh van duurzame energie opwekkers vergeleken met dat van conventionele methoden. Hierbij is rekening gehouden met de levensduur van de verschillende installaties. Wind- en zonne-energie-installaties hebben doorgaans een kortere levensduur dan kerncentrales, waardoor deze over een langere periode vaker vervangen moeten worden. De levensduur van een specifieke energieopwekker is daarom meegenomen in de berekening van het materiaalgebruik per TWh.

Omdat deze vergelijking uitgaat van het materiaalgebruik per opgewekte TWh, zijn ondersteunende installaties zoals batterijen en elektrolyzers buiten beschouwing gelaten, aangezien zij zelf geen energie opwekken.

Voor grootschalige energie-infrastructuur wordt vaak gebruikgemaakt van materialen als staal, beton en zeldzame metalen, die energie-intensief zijn om te winnen en te verwerken. Minerale en fossiele grondstoffen, die zichzelf niet aanvullen, zoals bepaalde zeldzame aardmetalen in batterijen en windturbines, kunnen extra milieudruk veroorzaken door milieubelastende mijnbouwprocessen. In de effectbeoordeling wordt echter geen onderscheid gemaakt tussen verschillende typen materialen; alle materialen tellen even zwaar mee in het aantal kilogram per TWh. Dit betekent dat aspecten als zeldzaamheid, milieubelasting van productieprocessen, effecten in de grondstoffenketen en recyclebaarheid niet zijn meegenomen in de kwantitatieve beoordeling.

Deze factoren kunnen relevant zijn bij de afweging van materiaalgebruik. In de sectie 'onderscheidende effecten' van deze paragraaf is nader ingegaan op het gebruik van zeldzame materialen per energieopwekker, evenals op het materiaalgebruik van ondersteunende installaties. Daarbij dient in acht te worden genomen dat bij diverse technieken er een ontwikkelrichting is om minder zeldzame materialen te gebruiken.

De milieu- en sociale effecten in de grondstoffenketen van landen van herkomst zijn niet meegenomen in de effectbeoordeling, maar krijgen wel nadere toelichting in Bijlage 3. Tot slot kan ook de recyclebaarheid van materialen relevant zijn; hiervoor zijn doelen gesteld richting 2050. Dit aspect is ook nader besproken in Bijlage 3.

5.10.2 Beleidskader

Programma Nederland Circulair in 2050, Nationaal Programma Circulaire Economie (NPCE) en de Nationale Grondstoffenstrategie

Het Rijksprogramma Nederland Circulair in 2050 vormt de basis voor de transitie naar een volledig circulaire economie.¹¹² Het doel van het programma is om in 2050 een economie te realiseren waarin grondstoffen efficiënt worden ingezet en hergebruikt, zonder schadelijke emissies naar het milieu. Producten en materialen worden zo ontworpen dat ze kunnen worden hergebruikt met zo min mogelijk waardeverlies. Als tussendoel is vastgesteld dat in 2030 het gebruik van primaire grondstoffen (mineralen, metalen en fossiele grondstoffen) met 50% moet zijn verminderd ten opzichte van het huidige niveau. Dit wordt bereikt door productieprocessen efficiënter in te richten, meer gebruik te maken van hernieuwbare en secundaire grondstoffen, en de ontwikkeling van circulaire productiemethoden te stimuleren..

Hoewel er buiten het Rijksbrede programma Nederland Circulair in 2050 nog geen direct beleid is voor circulaire materiaalinzet binnen de energietransitie, groeit de aandacht voor de strategische

¹¹² [Nederland circulair in 2050](#)

beschikbaarheid van grondstoffen snel.¹¹³ Geopolitieke spanningen en de afhankelijkheid van landen buiten de EU, zoals China, voor kritieke mineralen en metalen vergroten de urgentie om minder afhankelijk te worden van externe leveranciers. Voor de energietransitie zijn bijvoorbeeld lithium, kobalt, nikkel en zeldzame aardmetalen essentieel voor de productie van batterijen, windturbines en elektrolyzers. Deze afhankelijkheid brengt leveringsrisico's met zich mee en kan de concurrentiekracht van Nederland en Europa onder druk zetten.

Nederland en de EU nemen daarom maatregelen om de leveringszekerheid van kritieke grondstoffen te vergroten, onder meer door het aanleggen van strategische voorraden, het stimuleren van recycling en het ontwikkelen van alternatieve materialen en circulaire productiemethoden. Het Nationaal Programma Circulaire Economie (NPCE) en de Nationale Grondstoffenstrategie bevatten hiervoor concrete maatregelen en doelstellingen, zoals het verhogen van de raffinage- en recyclingcapaciteit binnen Europa en het verminderen van de afhankelijkheid van één enkel land voor de toelevering van een strategische grondstof.¹¹⁴

5.10.3 Onderscheidende effecten

Hoeveelheid materiaal

Onderzoek naar de hoeveelheid materiaal die nodig is voor verschillende energie opwekkers laat zien dat er grote verschillen bestaan tussen duurzame energie opwekkers en conventionele methoden.¹¹⁵ De resultaten van dit onderzoek zijn weergegeven in de volgende tabel. Voor duurzame energie opwekkers betreft het materiaalgebruik vooral bouwmaterialen zoals staal, beton, aluminium en koper. Voor kernenergie zijn ook splijtstoffen, met onder meer uranium, nodig als brandstof tijdens de exploitatie.

Bij het materiaalgebruik voor kolen- en gascentrales is in het onderzoek alleen gekeken naar de benodigde hoeveelheid kolen en gas als brandstof. De materialen die nodig zijn voor de bouw van de centrales zelf zijn buiten beschouwing gelaten, waardoor het daadwerkelijke materiaalgebruik voor deze conventionele methoden in werkelijkheid hoger zal liggen dan in de tabel is weergegeven. Voor duurzame energie opwekkers is alleen gekeken naar het materiaalgebruik van de installatie zelf; omliggende infrastructuur voor aansluiting op het elektriciteitsnet en de bouw van ondersteunende installaties (zoals batterijen, elektrolyzers of netverzwaring) zijn niet meegenomen in de analyse. Hierdoor zijn de weergegeven cijfers een onderschatting van het totale materiaalgebruik dat nodig is om een volledig functionerend energiesysteem te realiseren.

De volgende tabel is te zien dat alle energie opwekkers veel minder kilo materiaal gebruiken per TWh. Kernenergie gebruikt aanzienlijk minder materiaal dan de andere duurzame energie opwekkers. Deze getallen zijn gebruikt bij de effectbeoordeling in hoofdstuk 6.

Tabel 5-14 Materiaalgebruik per onderdeel van het energiesysteem per TWh (exclusief benodigde techniek netaansluiting)¹¹⁶

	Kolen	Gas	Zon-PV	Wind op land	Wind op zee ¹¹⁷	Kern-energie
Hoeveelheid ton materiaal per TWh	373.000	127.700	1.800	7.150	1.950	1.100

¹¹³ Onder meer door het Nederlands Materialen Observatorium (NMO), een initiatief van het ministerie van Economische Zaken.

¹¹⁴ Nationaal Programma Circulaire Economie (NPCE) en Nationale Grondstoffenstrategie.

¹¹⁵ Breakthrough Institute 2024: Mining Footprints and Raw Material Needs for Clean Energy.

¹¹⁶ Voor de aantallen is gebruik gemaakt van Breakthrough Institute 2024: Mining Footprints and Raw Material Needs for Clean Energy.

¹¹⁷ Met name bij windparken op zee vormt het materiaalgebruik van omliggende techniek een aanzienlijk deel van het totale materiaalgebruik. Dit betreft vooral de kabels die de windturbines verbinden met het offshore transformatorplatform, waar de opgewekte stroom wordt verzameld en vervolgens via lange zeekabels naar het vasteland wordt getransporteerd. Voor een windpark van 1 GW gaat het om tientallen kilometers aan kabels, waarvoor grote hoeveelheden koper en aluminium nodig zijn.

% t.o.v. kolen	n.v.t.	n.v.t.	0,48%	1,92%	0,52%	0,29%
----------------	--------	--------	-------	-------	-------	-------

Gebruik van kritieke mineralen

Daarnaast geldt dat sommige installaties kritieke of moeilijk te winnen materialen vereisen, terwijl andere vooral gebruikmaken van veelvoorkomende (niet-kritieke) materialen.¹¹⁸ Bij kritieke en moeilijke winbare materialen kan de impact hoger zijn doordat er meer energie, brandstoffen en activiteiten nodig zijn om kritieke materialen te winnen. Voor kritieke materialen geldt dat de beschikbaarheid op zichzelf naar verwachting niet beperkend is maar wel onevenwichtig verdeeld geografisch waardoor er een geopolitieke dimensie is verbonden aan de beschikbaarheid.¹¹⁹ Dit is ook één van de redenen dat er veel onderzoek wordt gedaan naar alternatieven, bijvoorbeeld voor lithium als grondstof voor batterijen. In de tabel hierna is per onderdeel van het energiesysteem aangegeven welke (kritieke) materialen benodigd zijn en hoeveel ton kritieke materialen per TWh nodig is. Hierbij is rekening gehouden met de materialen die nodig zijn om de installatie te kunnen aansluiten op het elektriciteitsnet, zoals kabels. Uit de tabel blijkt dat kernenergie minder kritieke materialen vereist dan zon- en windinstallaties.¹²⁰

Tabel 5-15 (kritiek) materiaalgebruik per onderdeel van het energiesysteem

¹¹⁸ Verschillende metalen/ mineralen worden als 'zeldzaam' aangeduid ('rare earth materials') aangezien gedacht werd dat deze maar beperkt winbaar waren. Deze aanduiding is niet meer helemaal correct. Er wordt tegenwoordig gesproken over 'kritieke grondstoffen'. Grondstoffen die belangrijk zijn voor veel alledaagse producten die belangrijk zijn voor het functioneren van de maatschappij. Voor een deel van de stoffen geldt dat Europa afhankelijk is van slechts één of enkele landen. Meer informatie over huidige beleid ten aanzien van kritieke mineralen: <https://www.consilium.europa.eu/nl/infographics/critical-raw-materials/>

¹¹⁹ International Energy Agency, 2024 en <https://www.consilium.europa.eu/nl/infographics/critical-raw-materials/>

¹²⁰ In de voor dit rapport gebruikte studie wordt de totale hoeveelheid zeldzame of kritieke materialen in installaties kwantitatief opgeteld, zonder verdere weging van de mate van schaarste of de impact op grondstoffenuitputting per materiaal. Andere studies, zoals onderzoeken van CE Delft, hanteren daarentegen een gewogen analyse. Hierbij wordt rekening gehouden met factoren zoals beschikbaarheid en de milieugevolgen van winning en verwerking. In dergelijke benaderingen scoren windturbines vaak slechter en is het verschil met zoninstallaties groter.

Onderdeel energiesysteem	Onderscheidend materiaalgebruik	Benodigde kritieke materialen kilo/TWh ¹²¹
Kool	-	100-200
Gas	-	50-100
Duurzame energie opwekkers		
Zon-PV	Zon installaties bestaan met name uit staal, aluminium, koper en silicium. De onderconstructies/montagesystemen kunnen ook van beton zijn in plaats van staal. Daarnaast worden er verschillende andere materialen gebruikt in kleinere hoeveelheden. Koper, tellurium, germanium, cadmium, selenium, indium, zilver en gallium zijn de voornaamste kritieke materialen die nodig zijn.	5.000-15.000
Wind op land	Windparken bestaan met name uit beton, staal, ijzer en zink. Daarnaast zijn nog verscheidende andere materialen nodig zoals koper, mangaan, chroom, aluminium, nikkel, molybdeen en wat kleinere hoeveelheden van andere materialen. Onder andere koper, zink, nikkel, mangaan, chroom en molybdeen zijn de voornaamste kritieke materialen die door windturbines gebruikt worden.	2.000-6.000
Wind op zee	Wind op zee gebruikt minder beton voor de fundering doordat over het algemeen grote monopiles gebruikt worden die vooral bestaan uit staal. Hierdoor is het aandeel van staal relatief groot is. Verder is het (kritiek) materiaalgebruik vergelijkbaar als met wind op land qua windturbines. Wind op zee heeft alleen veel meer koper nodig dan wind op zee voor de lange kabels die aangelegd moeten worden binnen het windpark en naar land toe.	6.000-15.000
Kernenergie	Kerncentrales bestaan met name uit beton, staal, koper. Daarnaast zijn nog verscheidende andere materialen nodig zoals chroom, aluminium, nikkel en molybdeen en wat kleinere hoeveelheden van andere materialen. Kernenergie gebruikt splijtstoffen met verrijkt uranium in de exploitatiefase om energie op te wekken. Koelwater is ook nodig. Koper, nikkel, mangaan, chroom en zink zijn de voornaamste kritieke materialen die gebruikt worden bij kerncentrales.	500-1.500
Ondersteunende installaties		
(Systeem)-batterijen	Batterijensystemen bestaan veelal uit staal, koper, aluminium, grafiet en lithium naast wat kleinere hoeveelheden van andere materialen. Kritieke materialen die gebruikt worden zijn onder andere koper, kobalt, nikkel en lithium. Lithium is een kritiek essentieel materiaal dat ook gebruikt wordt voor de accu's van auto's en telefoons.	n.v.t.
Elektrolyzers	Elektrolyzers bestaan veelal uit staal, nikkel en aluminium. Koper, nikkel, zirkonium, lanthanum, yttrium, iridium en platina zijn zeldzame materialen die gebruikt worden. Water is nodig in de exploitatiefase.	n.v.t.
Waterstof-centrales	Waterstofcentrales bestaan veelal uit staal, aluminium en koper. Koper is een kritiek materiaal wat nodig is. Koelwater is nodig in de exploitatiefase. De verwachting is dat er gedeeltelijk gebruikt gemaakt kan worden van bestaande locaties van kolen- en gascentrales en de daar aanwezige installaties.	n.v.t.

Waterstof-opslag	Met waterstofopslag wordt in dit kader bedoelt opslag in lege gasvelden of zoutcavernes. Hierdoor is er niet veel (kritiek) materiaal nodig. De verwachting is dat er deels gebruik gemaakt kan worden van bestaande locaties en installaties.	n.v.t.
------------------	--	--------

¹²¹ Bron rapport van International Energy Agency (IEA) uit 2021. In dit onderzoek zijn uitgangspunten genomen t.a.v. vermogen per installatie, aantal vollasturen en de levensduur van de installaties. In de windsector maar ook in zon zijn er de laatste jaren veel ontwikkelingen geweest waardoor de opwek per windturbine of paneel omhoog is gegaan met relatief weinig extra materiaal gebruik. Het daadwerkelijke benodigde materiaal per TWh zal dus wat lager dan in onderstaande tabel is gepresenteerd. Niettemin zal kernenergie aanmerkelijk beter scoren dan wind en zon.

6 Effectbeoordeling

In het vorige hoofdstuk is meer achtergrond en duiding gegeven bij de milieuaspecten en de effectrelaties tussen verschillende onderdelen van het energiesysteem en deze aspecten. In dit hoofdstuk zijn eerst de onderdelen van het energiesysteem per variant beoordeeld op de verschillende milieuaspecten. Vervolgens is elk energiesysteemvariant een totaalscore toegekend per milieuaspect. In hoofdstuk 7 wordt een tabel gepresenteerd met alle totaalscores van de varianten op de milieuaspecten.

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).

6.1 Geluid

Voor dit milieuaspect is bij de effectbeoordeling gekeken naar de afstand die gehouden moet worden tot gevoelige objecten om te kunnen voldoen aan de geluidsnormen. Daarbij speelt het aantal installaties een rol naast de reikwijdte van het relevante geluidsniveau. De reikwijdte van het geluid per onderdeel van het energiesysteem is beschreven in paragraaf 5.1 van dit rapport.

In deze paragraaf zijn eerst de onderdelen van het energiesysteem apart beoordeeld en vervolgens is een totaalscore aan elk energiesysteemvariant toegekend.

6.1.1 Beoordeling energie opwekkers

Tabel 6-1 beoordelingstabel energie opwekkers op milieuaspect geluid

Energieopwekker	Scenario 1: 0,5 GW kern			Scenario 2: 3,7 GW kern			Scenario 3: 8,3 GW kern			Scenario 4: 0 GW kern		
	1A	1B	1C	2A	2B	2C	3A	3B	3C	4A	4B	4C
Zon-PV	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Wind op land	3	2	2	3	2	2	2	2	2	3	2	2
Wind op zee	n.v.t. (geen geluidseffecten naar leefomgeving)											
Kernenergie	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0

Voor zon-PV, op land en dak, geldt dat de omvormers en een eventuele transformator beperkt geluid produceren. Dit geluid is tot op enkele tientallen meters afstand waarneembaar. Omdat er buiten de zoninstallatie vrijwel geen geluidseffecten zijn, is zon-PV voor alle varianten neutraal (score 0) beoordeeld, ongeacht het aandeel in de energiemix.

Voor wind op land geldt dat er een afstand van 500 tot 600 meter tot gevoelige objecten indicatief moet worden aangehouden om te voldoen aan de geluidsnormen. Door deze afstand en de omvang van een windpark wordt in de praktijk over een relatief groot gebied geluid aan de omgeving toegevoegd. Variant

4A kent het hoogste aandeel windenergie op land, waarvoor 509 installaties nodig zijn.¹²² Variant 3A kent het laagst aandeel windenergie op land (254 installaties). Bij het bepalen van de scores voor wind op land geldt voor alle varianten een 2 als score, vanwege de benodigde geluidsruimte bij windparken. De varianten waarbij meer windparken van de standaardeenheid gerealiseerd moeten worden dan het aantal gemeenten in Nederland (342 gemeenten¹²³), krijgen een score 3 op grond van het cumulatieve effect dat ontstaat bij het plaatsen van dit aantal windparken. Dit geldt voor variant 1A (491 installaties), 2A (394 installaties) en 4A (509 installaties).

Voor kerncentrales geldt dat er een afstand van 400-600 meter tot gevoelige objecten moet worden aangehouden om aan de geluidsnormen te kunnen voldoen. Bij SMR's kan deze afstand korter zijn. Hierdoor ontstaat er net als bij windenergie voor een relatief groot gebied geluid naar de omgeving. Echter, het aantal installaties is beperkt ten opzichte van bijvoorbeeld windparken op land of systeembatterijen. In scenario 1 betreft het alleen kerncentrale Borssele, die al onderdeel is van de huidige situatie en daarom neutraal (score 0) is. In scenario 4 is het uitgangspunt dat er geen kerncentrales in de energiemix zitten, het wegvallen van kerncentrale Borssele als geluidsbron is een verwaarloosbaar effect gezien de locatie en omgeving.

In scenario 2 gaat het om de huidige situatie plus de bouw van twee nieuwe installaties, en in scenario 3 om de huidige situatie plus vier nieuwe kerncentrales en zeven SMR's. In deze scenario's is het aantal installaties, en dus de hoeveelheid geluidsruimte die wordt ingenomen op nationaal niveau, alsnog zeer beperkt. Het betreft een lokaal effect dat slechts op enkele locaties in Nederland merkbaar zal zijn. De varianten onder deze scenario's zijn daarom beoordeeld met een score 1.

6.1.2 Beoordeling ondersteunende installaties

Tabel 6-2 beoordelingstabel ondersteunende installaties op milieuaspect geluid

Ondersteunende installaties	Scenario 1: 0,5 GW kern			Scenario 2: 3,7 GW kern			Scenario 3: 8,3 GW kern			Scenario 4: 0 GW kern		
	1A	1B	1C	2A	2B	2C	3A	3B	3C	4A	4B	4C
(Systeem)batterijen	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Elektrolyzers	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Waterstofcentrales	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Waterstofopslag	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Een deel van de elektrolyzers wordt op zee gerealiseerd en heeft daarmee geen effect op de leefomgeving op land. Op land gaat het om een relatief beperkt aantal installaties, variërend tussen de 24 en 29. Voor een elektrolyser van 500 MW geldt dat een afstand van 300 tot 500 meter tot geluidsgevoelige objecten nodig is om aan de geluidsnormen te voldoen.

Voor waterstofcentrales (1 GW) dient aan afstanden van 500 tot 1.600 meter tot geluidsgevoelige objecten gedacht te worden om aan de geluidsnormen te voldoen. Het aantal benodigde centrales is tussen de 14 en 22. Bovendien zullen deze centrales deels op bestaande energiecentrale-locaties worden gerealiseerd, waar al rekening wordt gehouden met geluid. Hoewel ze veel geluidsruimte vragen, blijft het aantal locaties beperkt.

¹²² Met installaties wordt bedoeld op de standaard eenheid die in dit onderzoek is aangehouden per onderdeel van het energiesysteem zoals gepresenteerd in paragraaf 4.1 van dit rapport. Voor wind op land gaat het om een windpark van 45 MW met 7 of 8 windturbines. 509 installaties betekent dus 509 windparken met 7 of 8 turbines in dit kader.

¹²³ CBS, gemeentelijke indeling op 1 januari 2025.

Voor waterstofopslag zijn een beperkt aantal locaties nodig, voornamelijk op bestaande locaties voor zout- en gaswinning. Ook hier is het aantal installaties beperkt en zijn de locaties doorgaans al ingericht op industriële activiteiten. Er is een afstand van 500 tot 1000 meter tot geluidsgevoelige objecten nodig om aan de geluidsnormen te voldoen.

Voor elektrolyzers, waterstofcentrales en waterstofopslag geldt in alle varianten een score 1. In deze gevallen is er sprake van een kans op beperkte hinder bij geluidsgevoelige objecten in de directe omgeving van een beperkt aantal installaties. Door het beperkte aantal en de spreiding van de installaties blijven de geluidseffecten in alle varianten beperkt en scoren de varianten daarom gelijk op dit aspect voor deze onderdelen.

Voor systeembatterijen is een afstand van 200 tot 550 meter tot geluidsgevoelige objecten vereist om aan de geluidsnormen te voldoen bij een installatie van 200 MW. Het aantal benodigde systeembatterijen is echter aanzienlijk groter dan bij de andere ondersteunende installaties, met 179 tot 212 installaties verspreid over het hele land. Door dit grotere aantal kunnen systeembatterijen in alle varianten beperkte hinder veroorzaken bij relatief veel geluidsgevoelige objecten, verspreid over Nederland. Om deze reden scoren alle varianten op dit onderdeel een 2. De relatief grote hoeveelheid installaties vergroot de kans op geluidshinder ten opzichte van de andere ondersteunende installaties, maar omdat het aantal benodigde batterijen in alle varianten vergelijkbaar is, zijn de scores onderling gelijk.

6.1.3 Totaalbeoordeling varianten

Tabel 6-3 totaalscore varianten op milieuaspect geluid

	Scenario 1: 0,5 GW kern			Scenario 2: 3,7 GW kern			Scenario 3: 8,3 GW kern			Scenario 4: 0 GW kern		
	1A	1B	1C	2A	2B	2C	3A	3B	3C	4A	4B	4C
Totaalscore variant	3	2	2	3	2	2	2	2	2	3	2	2

Zoals hierboven beschreven, zullen met name wind op land en systeembatterijen een grote impact hebben op het milieuaspect geluid in Nederland. Zonne-energie veroorzaakt weinig geluid, en voor kernenergie, elektrolyzers, waterstofcentrales en waterstofopslag geldt dat deze installaties op een beperkt aantal locaties verspreid over Nederland worden gerealiseerd. Hierdoor blijven de effecten op dit thema op nationaal niveau beperkt.

Systeembatterijen zijn in alle varianten gelijk beoordeeld, omdat de verschillen in het aantal installaties beperkt zijn. Voor wind op land is wel onderscheid gemaakt in scores. De varianten met relatief veel wind op land (1A, 2A en 4A) kenmerken zich door een grootschalige inzet van windturbines. Het aantal windturbineparken, uitgedrukt in de standaardeenheid die in dit rapport wordt gehanteerd, overstijgt zelfs het aantal gemeenten in Nederland. Dit kan leiden tot ernstige hinder in bepaalde gevallen door de omvangrijke uitbreiding van windenergie op land. Daarom zijn deze varianten beoordeeld met een score 3, welke ook is meegenomen in de totaalscore. Alle andere varianten scoren een 2 op het milieuaspect geluid.

Wanneer de focus wordt gelegd op kernenergie, valt op dat deze energiebron op nationaal niveau weinig geluidshinder veroorzaakt, omdat het om slechts enkele locaties gaat en het effect daardoor beperkt blijft. Als kernenergie wordt ingezet ter vervanging van windturbines op land, heeft dit een positief effect op het milieuaspect geluid binnen het energiesysteem.

6.2 Ecologie

Voor het milieuaspect ecologie is beoordeeld of er kans is op negatieve effecten op natuurdoelstellingen. Zoals omschreven in paragraaf 5.2 verschillen de effecten per onderdeel van het energiesysteem. Daarnaast varieert de impact tussen (tijdelijke) effecten tijdens de bouwphase en effecten tijdens de gebruiksfase.

6.2.1 Beoordeling energie opwekkers

Tabel 6-4 beoordelingstabel energie opwekkers op milieuaspect ecologie

Energieopwekker	Scenario 1: 0,5 GW kern			Scenario 2: 3,7 GW kern			Scenario 3: 8,3 GW kern			Scenario 4: 0 GW kern		
	1A	1B	1C	2A	2B	2C	3A	3B	3C	4A	4B	4C
Zon-PV	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Wind op land	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Wind op zee	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Kernenergie	0	0	0	1	1	1	2	2	2	0(+)	0(+)	0(+)

Zon op dak heeft een minimale impact op ecologie, zon op land kan daarentegen wel een aanzienlijke impact hebben op ecologie. Er is een score 2 toegekend aan zon-PV voor alle varianten. Dit komt voornamelijk door het ruimtebeslag op grond, waardoor leefgebied wordt veranderd. Zon op land kan onder meer negatieve effecten hebben op weidevogels. Deze impact is gedeeltelijk te mitigeren door zon-PV-installaties buiten beschermde gebieden te realiseren en, waar nodig, de opstelling van de zonnepanelen aan te passen tot natuur inclusieve zonnevelden. Bij dergelijke zonnevelden wordt rekening gehouden met natuurinclusiviteit, biodiversiteit en bodemkwaliteit, hoewel de exacte effecten hiervan nog worden onderzocht.¹²⁴ Er zijn verschillen in aantallen, de variant met de meeste zon op land (variant 4A) versus degene met het minste zon op land (variant 3A) is circa 24%. In beide gevallen is er heel veel zon op land nodig en daarom wordt er geen onderscheid gemaakt tussen varianten in de beoordeling van zon-PV.

Voor zowel wind op land als wind op zee geldt dat er sprake is van verstoring en aanvaringsslachtoffers tijdens de gebruiksfase. Hierdoor kunnen de effecten op de ecologie aanzienlijk zijn. Er zijn echter verschillende mitigerende maatregelen mogelijk, zoals stilstand voorzieningen voor trekvogels. Specifiek voor wind op zee geldt dat tijdens de bouwphase de effecten van met name onderwatergeluid een relevante impact kunnen hebben op instandhoudingsdoelstellingen van bijvoorbeeld bruinvissen. Significant negatieve effecten en/of negatieve effecten op de gunstige staat van instandhouding gezien de hoeveelheid windenergie op zee niet op voorhand worden uitgesloten waarbij ook de bijdrage van mitigatie uitdagend is. Wind op zee is daarom beoordeeld met een score 3, terwijl wind op land wordt beoordeeld met score 2 gezien de meer beperkte omvang van het aantal windturbines. Omdat wind op zee en land in alle alternatieven met veel vermogen voorkomen, is er geen onderscheid gemaakt in de beoordeling van de verschillende alternatieven. Desalniettemin geldt dat variant 3A aanzienlijk minder wind op land kent dan variant 4A. In variant 4A worden meer dan twee keer zoveel windturbines op land gerealiseerd als in variant 3A. Bij wind op zee zijn de verschillen in aantallen tussen de varianten kleiner. Het verschil in aantallen tussen de variant met de meeste wind op zee (4B) en het minste wind op zee (3B), is circa 19%.

¹²⁴ RVO (2024). Zonne-energie op velden.

Ecologische effecten van kernenergie ontstaan vooral tijdens de langdurige bouwphase door stikstofdepositie maar dit is relatief lokaal en relatief goed te mitigeren (naar de toekomst). Tijdens de bedrijfsfase kunnen negatieve effecten optreden door het onttrekken en lozen van koelwater, zoals het doden van organismen, verandering/verstoring van ecosystemen en veranderingen in soortensamenstelling. Baggerwerkzaamheden bij koelwaterinlaatkanalen, zoals in Borssele, veroorzaken vertroebeling en kunnen lokaal de ecologie beïnvloeden. Ook kunnen in het koelwater resten van niet-radioactieve stoffen voorkomen, die schadelijk kunnen zijn voor flora en fauna. In scenario 4 worden geen nieuwe kerncentrales gebouwd en stopt Borssele, wat resulteert in neutrale (0+) score met een licht positief effect voor deze varianten. In scenario 1 blijft Borssele langer open, wat een voortzetting is van de huidige situatie, om deze reden wordt dit ook neutraal (0) beoordeeld. In scenario 2 komen er nog twee nieuwe kerncentrales naast kerncentrale Borssele bij op één locatie. Omdat het gaat om de toevoeging op één nieuwe locatie zijn de varianten onder dit scenario beoordeeld met een score 1. In scenario 3 worden vier nieuwe centrales en zeven SMR's gebouwd, waardoor verspreid over Nederland aanzienlijk meer impact wordt verwacht bij deze varianten. Deze varianten krijgen daarom de score 2.

6.2.2 Beoordeling ondersteunende installaties

Tabel 6-5 beoordelingstabel ondersteunende installaties op milieuaspect ecologie

Ondersteunende installaties	Scenario 1: 0,5 GW kern			Scenario 2: 3,7 GW kern			Scenario 3: 8,3 GW kern			Scenario 4: 0 GW kern		
	1A	1B	1C	2A	2B	2C	3A	3B	3C	4A	4B	4C
(Systeem)batterijen	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Elektrolyzers	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Waterstofcentrales	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Waterstofopslag	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Tijdens de bouwphase van ondersteunende installaties kan stikstof vrijkomen, wat mogelijk effect heeft op beschermde natuurgebieden. Deze effecten zijn echter tijdelijk van aard en, doordat de meeste installaties op industrieterreinen zullen worden gerealiseerd, is de impact op de natuur beperkt. Bovendien geldt voor waterstofcentrales en waterstofopslag dat voornamelijk gebruik wordt gemaakt van bestaande industriële locaties of zelfs bestaande installaties. Hierdoor is er weinig aanleg van nieuwe voorzieningen nodig en blijven de effecten op de natuur minimaal.

Voor systeembatterijen en waterstofopslag geldt dat zij tijdens de gebruiksfase geen grote negatieve ecologische effecten veroorzaken. Vanwege de beperkte ecologische impact van deze onderdelen van het energiesysteem in alle varianten, is hiervoor een score 1 ('beperkte impact') toegekend.

Voor elektrolyzers en waterstofcentrales kunnen, naast de mogelijke effecten tijdens de bouwphase, ook ecologische effecten optreden door het gebruik van koelwater. Tijdens de bedrijfsfase kunnen negatieve effecten ontstaan als gevolg van het onttrekken en lozen van koelwater, zoals het doden van organismen, verstoring van ecosystemen en veranderingen in de soortensamenstelling. Daarnaast kunnen in het koelwater restanten van stoffen aanwezig zijn die schadelijk zijn voor flora en fauna. Het opnemen en lozen van koelwater vindt plaats op verschillende locaties in Nederland en op zee. De omvang van de ecologische effecten is mede afhankelijk van de specifieke locatie van deze installaties.

Omdat in deze studie geen concrete locaties worden aangewezen, is uitgegaan van een worst-case scenario. Hoewel het bij elektrolyzers en waterstofcentrales om kleinere hoeveelheden koelwater gaat dan bij kerncentrales, betreft het wel meerdere installaties met een aanzienlijke koelbehoefte die verspreid over Nederland kunnen worden gerealiseerd. Daarom is aan elektrolyzers en waterstofcentrales een

score 2 toegekend. De verschillen in koelwaterhoeveelheden tussen de varianten zijn beperkt, waardoor voor alle varianten dezelfde score (2) is gehanteerd.

6.2.3 Totaalbeoordeling varianten

Tabel 6-6 totaalscore varianten op milieuaspect ecologie

	Scenario 1: 0,5 GW kern			Scenario 2: 3,7 GW kern			Scenario 3: 8,3 GW kern			Scenario 4: 0 GW kern		
	1A	1B	1C	2A	2B	2C	3A	3B	3C	4A	4B	4C
Totaalscore variant	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3

De verschillende varianten zijn allemaal beoordeeld met score 3. Dit komt voornamelijk doordat in elk variant wind op zee de slechtst scorende factor is. Dit is het gevolg van het risico op aanvaringsslachtoffers en het feit dat significant negatieve effecten op bepaalde instandhoudingsdoelstellingen, zoals die voor bruinvispopulaties, niet op voorhand kunnen worden uitgesloten.

De verschillende onderdelen van het energiesysteem brengen uiteenlopende typen ecologische effecten met zich mee. Een groter aandeel kernenergie kent zowel ecologische voor- als nadelen. Het belangrijkste verschil is echter dat een toename van kernenergie leidt tot een lager aandeel windenergie, waardoor de impact van aanvaringsslachtoffers onder vogels en vleermuizen afneemt.

6.3 Ruimtelijke functies

Voor dit milieuaspect is bij de effectbeoordeling gekeken naar impact op huidige en toekomstige ruimtelijke functies (industrie, wonen, (water)infrastructuur). Hiervoor is gekeken naar het ruimtebeslag van de installatie zelf in verhouding tot het opgewekte vermogen en de eventuele beperkingen voor andere ruimtelijke functies in de omgeving rondom de installatie. Bij het beoordelen van de verschillende varianten is ook gekeken naar het aantal installaties om iets te kunnen zeggen over het totale ruimtegebruik. De cijfers van het aantal installaties zijn opgenomen in bijlage 1. In deze paragraaf zijn eerst de onderdelen van het energiesysteem apart beoordeeld en vervolgens is de totaalscore per energiesysteemvariant verklaard.

6.3.1 Beoordeling energie opwekkers

Tabel 6-7 beoordelingstabel energie opwekkers op milieuaspect ruimtelijke functies

Energieopwekker	Scenario 1: 0,5 GW kern			Scenario 2: 3,7 GW kern			Scenario 3: 8,3 GW kern			Scenario 4: 0 GW kern		
	1A	1B	1C	2A	2B	2C	3A	3B	3C	4A	4B	4C
Zon-PV	3	2	2	3	2	2	2	2	2	3	2	2
Wind op land	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Wind op zee	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Kernenergie	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0

Hoewel zon op dak juist goed samengaat met bestaande ruimtelijke functies, geldt het tegenovergestelde voor zon op land. Zon op land neemt, in verhouding tot windenergie en kernenergie, relatief veel ruimte in waarbij bestaand gebruik niet meer mogelijk is. In hoofdstuk 5 is hier uitgebreid op ingegaan. Buiten de grenzen van het zonnepark zijn er geen verdere beperkingen voor andere functies. Wanneer gekeken

wordt naar de verschillende energiesysteemvarianten, zijn er duidelijke verschillen in het aantal installaties voor zon op dak en zon op land. In dit kader zijn vooral de verschillen in zon op land relevant. De varianten 1A, 2A en 4A maken relatief veel gebruik van zon op land, wat leidt tot een ruimtebeslag van circa 400 km² voor variant 2A en circa 450 km² voor variant 1A en 4A. Dit is meer dan 1% van het totale landoppervlak van Nederland, dat al erg vol is. Deze drie varianten zijn daarom beoordeeld met een score 3. De overige varianten maken ook gebruik van zon op land en nemen dus eveneens veel ruimte in (circa 360 km²), zij het in mindere mate; deze zijn daarom met een score 2 beoordeeld.

Wind op land neemt relatief weinig ruimte in beslag. Windturbines kunnen goed gecombineerd worden met landbouwactiviteiten, waardoor het daadwerkelijke ruimtebeslag beperkt blijft. Door de geluidsnormen voor windturbines op land is vaak niet mogelijk om gevoelige objecten (zoals woningen, onderwijs- of zorginstellingen) te realiseren binnen 400-600 meter van een windturbine. In die zin leggen windturbines beperkingen op aan toekomstige functies in de omgeving. Voor andere soorten objecten geldt dat kleinere afstanden kunnen worden aangehouden, zo staan op veel bedrijventerreinen windturbines. In de praktijk is niet te verwachten dat omvangrijke nieuwbouw (woningen of bedrijven) is voorzien op locaties geschikt voor wind op land. Mede gezien het aantal installaties, is voor alle varianten van wind op land een score 1 toegekend.

Wind op zee neemt, afgezien van een mogelijk landstation, geen ruimte in beslag op land. Wel kan de scheepvaart en visserij hinder ondervinden van windparken op zee. Bij het aanwijzen van mogelijke locaties voor wind op zee wordt hiermee rekening gehouden om de effecten te beperken. Zo worden scheepvaartroutes vrijgehouden van windparken en worden viszones aangewezen. Een windturbine heeft een beperkte ruimte die fysiek wordt ingenomen. Door rekening te houden met bestaande functies worden bestaande functies beperkt geraakt. Echter voor de gehele Noordzee geldt dat activiteiten zoals scheepvaart, visserij en luchtvaart op veel locaties rekening moeten houden met aanwezige windturbines. Dit kan leiden toterschikking of additionele gebruikseisen (zoals routes). Alle varianten voor wind op zee zijn om die reden met een 2 op het milieuaspect ruimtelijke functies gescoord.

Kernenergie neemt, in verhouding tot de opgewekte energie, zeer weinig ruimte in beslag. Variërend van 0 tot circa 7 km² bij de verschillende varianten. Met slechts enkele locaties in Nederland kan veel energie worden opgewekt. Wat betreft de impact op andere ruimtelijke functies geldt dat er een maximaal aantal woningen binnen een straal van 1 kilometer rondom kerncentrales mag worden gerealiseerd. Om te waarborgen dat er voor mogelijke toekomstige kerncentrales geschikte locaties blijven, is voor een aantal locaties een waarborgbeleid opgesteld. Hier mag niet altijd meer een woning worden gebouwd binnen deze 1 kilometer radius. Door het beperkte ruimtegebruik en het beperkte aantal locaties waarvoor deze beperkingen gelden, zijn de varianten met nieuwe kerncentrales beoordeeld met een score 1. De varianten zonder kernenergie, of alleen met Borssele, krijgen een neutrale score (0), omdat er in die gevallen geen nieuwe kerncentrales bijkomen, waardoor er geen verandering optreedt ten opzichte van de bestaande situatie. In de varianten onder scenario 4 wordt de kerncentrale Borssele in 2033 gesloten. Het positieve effect hiervan op ruimtelijke functies op nationaal niveau is echter verwaarloosbaar.

6.3.2 Beoordeling ondersteunende installaties

Tabel 6-8 beoordelingstabel ondersteunende installaties op milieuaspect ruimtelijke functies

Ondersteunende installaties	Scenario 1: 0,5 GW kern			Scenario 2: 3,7 GW kern			Scenario 3: 8,3 GW kern			Scenario 4: 0 GW kern		
	1A	1B	1C	2A	2B	2C	3A	3B	3C	4A	4B	4C
(Systeem)batterijen	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Elektrolyzers	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Waterstofcentrales	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Waterstofopslag	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Elektrolyzers, waterstofcentrales en waterstofopslaginstallaties nemen relatief weinig ruimte in beslag, omdat de aantallen van deze ondersteunende installaties in alle varianten beperkt blijft. Gezamenlijk beslaan deze installaties in alle varianten tussen de 7 en 10 km². Bij systeembatterijen gaat het wel over een groot aantal installaties. Hierdoor nemen systeembatterijen tussen de circa 7 en 8,5 km² ruimte in beslag afhankelijk van de variant. De verschillen tussen de varianten zijn klein.

Voor alle installaties geldt dat er vanwege geluid en veiligheidsregels beperkingen worden opgelegd aan andere functies in de directe omgeving. Bij systeembatterijen, elektrolyzers en waterstofopslaglocaties gaat het om enkele honderden meters. Voor waterstofcentrales kan deze afstand nog groter zijn, afhankelijk van de specifieke veiligheidscontouren.

Gezien het beperkte aantal installaties en/of de relatief kleine contour waarbinnen beperkingen gelden voor andere functies, zijn alle ondersteunende installaties in alle varianten beoordeeld met een score 1.

6.3.3 Totaalbeoordeling varianten

Tabel 6-9 totaalscore varianten op milieuaspect ruimtelijke functies

	Scenario 1: 0,5 GW kern			Scenario 2: 3,7 GW kern			Scenario 3: 8,3 GW kern			Scenario 4: 0 GW kern		
	1A	1B	1C	2A	2B	2C	3A	3B	3C	4A	4B	4C
Totaalscore variant	3	2	2	3	2	2	2	2	2	3	2	2

Er zijn geen aanwijzingen dat er in Nederland onvoldoende ruimte is om deze energiesysteemvarianten te realiseren. Wel is het mogelijk dat de benodigde ruimte ten koste gaat van andere functies, zoals landbouwgrond, waardoor de druk op deze functies kan toenemen.

Wanneer gekeken wordt naar de invloed op ruimtelijke functies, valt op dat vooral zon op land en wind op zee een grote impact heeft vanwege het aanzienlijke ruimtegebruik. Hoewel andere energievormen en ondersteunende installaties ook beperkingen opleggen aan andere functies, met name buiten de terreingrenzen, blijft het effect op ruimtelijke functies relatief beperkt.

De totaalscore van de varianten is dan ook grotendeels gebaseerd op de laagste scores die zijn toegekend aan wind op zee en zon (op land). De varianten met veel zon op land (1A, 2A en 4A) gebruiken dermate meer ruimte dat het totale ruimtebeslag in deze varianten 40 tot 110 km² hoger ligt dan bij de andere varianten. Deze varianten zijn daarom beoordeeld met een score 3. De overige varianten krijgen

een score 2; ook hierbij is sprake van aanzienlijk ruimtegebruik en worden er beperkingen opgelegd aan andere functies, zij het in mindere mate.

Kerncentrales nemen, in verhouding tot de hoeveelheid opgewekte energie, relatief weinig ruimte in beslag. Het opnemen van kernenergie in de energiemix leidt er daardoor toe dat er minder ruimte nodig is voor het energiesysteem als geheel, waardoor er meer ruimte beschikbaar blijft voor andere functies. Kernenergie heeft daarmee een positief effect op het milieuaspect 'ruimtelijke functies' binnen het energiesysteem.

6.4 Externe en nucleaire veiligheid

Voor het milieuaspect externe en nucleaire veiligheid is gekeken naar zowel de reikwijdte als de kans op incidenten. In hoofdstuk 5 is het onderscheid tussen deze aspecten en de effecten per type installatie toegelicht. In deze paragraaf zijn de verschillende onderdelen van het energiesysteem eerst afzonderlijk beoordeeld op de reikwijdte van het effect bij incidenten en daarna op de kans op het optreden van incidenten. Hierbij wordt ook gekeken naar het aantal installaties dat geplaatst wordt per variant van het energiesysteem. Deze cijfers zijn opgenomen in bijlage 1. Vervolgens is per energiesysteemvariant een totaalscore voor het milieuaspect externe & nucleaire veiligheid toegekend.

6.4.1 Beoordeling energie opwekkers

Tabel 6-10 beoordelingstabel energie opwekkers op milieuaspect externe & nucleaire veiligheid: mogelijke reikwijdte bij incidenten

Energieopwekker	Scenario 1: 0,5 GW kern			Scenario 2: 3,7 GW kern			Scenario 3: 8,3 GW kern			Scenario 4: 0 GW kern		
	1A	1B	1C	2A	2B	2C	3A	3B	3C	4A	4B	4C
Zon-PV	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Wind op land	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Wind op zee	n.v.t.											
Kernenergie	0	0	0	3	3	3	3	3	3	0(+)	0(+)	0(+)

Tabel 6-11 beoordelingstabel energie opwekkers op milieuaspect externe & nucleaire veiligheid: kans op incidenten

Energieopwekker	Scenario 1: 0,5 GW kern			Scenario 2: 3,7 GW kern			Scenario 3: 8,3 GW kern			Scenario 4: 0 GW kern		
	1A	1B	1C	2A	2B	2C	3A	3B	3C	4A	4B	4C
Zon-PV	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Wind op land	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Wind op zee	n.v.t.											
Kernenergie	0	0	0	1	1	1	2	2	2	0(+)	0(+)	0(+)

Bij zon-PV is brand een potentieel risico. Dit betreft een lokaal effect zonder directe risico's voor personen buiten de locatie van de brand. Daarom is voor de reikwijdte bij incidenten een score 1 toegekend. De kans op een dergelijk incident is klein, maar wel groter dan bij andere installaties zoals kerncentrales. Dit komt mede doordat in alle varianten veel installaties worden geplaatst. Daarom krijgt zon-PV een score 2 voor de kans op incidenten. In de varianten 1A, 2A en 4A zijn er relatief meer zon-installaties, waardoor de kans op een incident met een zonnenveld of zonnepanelen op daken toeneemt. Dit heeft echter geen invloed op de aard of de reikwijdte van de mogelijke incidenten. De score voor zon-PV blijft daarom gelijk

voor alle energiesysteem varianten, zowel wat betreft de reikwijdte van de gevolgen bij incidenten als de kans op incidenten.

Bij wind op land vormen mechanische storingen, zoals brand of bladbreuk, een mogelijk risico. Daarnaast bestaat er een risico op ijsafworp. Dit zijn incidenten met een lokaal effectbereik. Daarom is voor de reikwijdte bij incidenten een score 1 toegekend. Om het risico op incidenten te beperken, geldt rondom windturbines een veiligheidszone waarin de kans op een incident niet groter mag zijn dan 10^{-6} per jaar, dit is kleiner dan de afstand tot geluidsgevoelige objecten om te kunnen voldoen aan geluidsnormen. Om aan deze norm te voldoen, mogen binnen een bepaalde straal rond de windturbine geen andere gebouwen of objecten worden gerealiseerd. Hierdoor is de kans op een incident met dodelijke afloop zeer klein. Omdat er bij alle varianten veel installaties geplaatst worden en de kans op een incident bij kerncentrales nog kleiner is, krijgt wind op land de score 2 voor de kans op incidenten. In de varianten 1A, 2A en 4A zijn er relatief meer windparken op land, waardoor de kans op een incident in Nederland toeneemt. Dit heeft echter geen invloed op de aard of de reikwijdte van de mogelijke incidenten. De score voor wind op land blijft daarom gelijk voor alle energiesysteemvarianten, zowel wat betreft de reikwijdte van de gevolgen bij incidenten als de kans op incidenten.

Kerncentrales brengen risico's met zich mee door het gebruik van radioactieve materialen. Voor deze installaties gelden zeer strenge veiligheidseisen, gebaseerd op internationale normen van het IAEA. Door deze hoge veiligheidsstandaarden is de kans op incidenten bij kerncentrales aanzienlijk lager dan bij andere onderdelen van het energiesysteem die in dit rapport zijn beoordeeld. Daarom is kernenergie voor de kans op incidenten in de varianten met nieuwe kerncentrales beoordeeld met een score 1. Voor de varianten onder scenario 1, waarin de huidige situatie met alleen kerncentrale Borssele wordt voortgezet, worden geen nieuwe risico's toegevoegd en geldt een neutrale score (0). De varianten onder scenario 4 krijgen een neutrale beoordeling met een plusje (0+), omdat kerncentrale Borssele dan minder lang operationeel is, wat een lichte verbetering betekent ten opzichte van de huidige situatie.

De kans op een incident neemt toe naarmate er meer kerncentrales worden gerealiseerd. In scenario 1 betreft het alleen kerncentrale Borssele, in scenario 2 gaat het om Borssele en twee nieuwe kerncentrales, en in scenario 3 gaat het om Borssele, vier nieuwe kerncentrales en zeven SMR's. Hierdoor is in scenario 3 de kans op een incident meer dan tien keer groter dan in scenario 1. Vanwege deze cumulatie van kansen is scenario 3 voor de kans op incidenten beoordeeld met een score 2 in plaats van 1.

Het mogelijke effectbereik bij een incident met een kerncentrale kan zeer groot zijn. Bij een kernramp waarbij radioactief materiaal vrijkomt, kan de impact reiken tot op nationaal of internationaal niveau. Dit effectbereik is aanmerkelijk groter dan bij andere onderdelen van het energiesysteem en vormt daarmee een ander type risico. Om deze reden zijn de varianten met kernenergie voor het effectbereik bij incidenten beoordeeld met een score 3. Varianten zonder kernenergie zijn beoordeeld met een neutrale plus score (0+) en de voortzetting van de huidige situatie met kerncentrale Borssele met een neutrale score (0).

6.4.2 Beoordeling ondersteunende installaties

Tabel 6-12 beoordelingstabel ondersteunende installaties op milieuaspect externe & nucleaire veiligheid: mogelijke reikwijdte bij incidenten

Ondersteunende installaties	Scenario 1: 0,5 GW kern			Scenario 2: 3,7 GW kern			Scenario 3: 8,3 GW kern			Scenario 4: 0 GW kern		
	1A	1B	1C	2A	2B	2C	3A	3B	3C	4A	4B	4C
(Systeem)batterijen	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Elektrolyzers	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Waterstofcentrales	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Waterstofopslag	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2

Tabel 6-13 beoordelingstabel ondersteunende installaties op milieuaspect externe & nucleaire veiligheid: kans op incidenten

Ondersteunende installaties	Scenario 1: 0,5 GW kern			Scenario 2: 3,7 GW kern			Scenario 3: 8,3 GW kern			Scenario 4: 0 GW kern		
	1A	1B	1C	2A	2B	2C	3A	3B	3C	4A	4B	4C
(Systeem)batterijen	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Elektrolyzers	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Waterstofcentrales	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Waterstofopslag	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2

Bij systeembatterijen bestaan risico's op brand. Beveiligingssysteem zijn daarom vereist om deze risico's te verkleinen. De effecten van een incident met systeembatterijen zijn voornamelijk lokaal. Bovenlokale risico's kunnen zich voordoen als er een lekkage van oliën naar het grondwater optreedt, maar hiervoor kunnen passende veiligheidsmaatregelen worden genomen. Om deze reden is voor de reikwijdte van effecten bij incidenten een score 1 toegekend aan systeembatterijen. Om het risico op incidenten te beperken, geldt rondom batterijsystemen een veiligheidszone waarin de kans op een incident niet groter mag zijn dan 10^{-6} per jaar. Hierdoor is de kans op een incident met dodelijke afloop zeer klein. Omdat er veel installaties geplaatst worden in alle varianten en de kans op een incident bij kerncentrales nog kleiner is, krijgen systeembatterijen een score 2 voor de kans op incidenten. In de varianten 1A, 2A en 4A zijn er iets meer systeembatterijen, waardoor de kans op een incident in Nederland toeneemt. Dit heeft echter geen invloed op de aard of de reikwijdte van de mogelijke incidenten. De score voor systeembatterijen blijft daarom gelijk voor alle energiesysteemvarianten, zowel wat betreft de reikwijdte van de gevolgen bij incidenten als de kans op incidenten.

Bij elektrolyzers bestaat het risico op explosies. Door toepassing van ATEX-zonering en geavanceerde lekkagedetectie worden deze explosierisico's echter sterk geminimaliseerd. Mocht er toch een incident plaatsvinden, dan zijn de effecten voornamelijk lokaal. Om deze reden krijgen elektrolyzers voor alle varianten een score 1 voor de reikwijdte van de effecten bij incidenten. Om het risico op incidenten te beperken, geldt rondom elektrolyzers een veiligheidszone waarin de kans op een incident niet groter mag zijn dan 10^{-6} per jaar. Hierdoor is de kans op een incident met dodelijke afloop zeer klein. Omdat de kans op een incident bij kerncentrales nog een factor 10 tot 100 kleiner is, krijgen elektrolyzers een score 2 voor de kans op incidenten. In de varianten 1A, 2A, 4A, 1B, 2B en 4B zijn er grotere aantallen elektrolyzers, waardoor de kans op een incident in Nederland toeneemt. Dit heeft echter geen invloed op de aard of de reikwijdte van de mogelijke incidenten. De score voor elektrolyzers blijft daarom gelijk voor

alle energiesysteemvarianten, zowel wat betreft de reikwijdte van de gevolgen bij incidenten als de kans op incidenten.

Bij waterstofcentrales bestaat er een risico op brand en explosies. Er gelden strenge veiligheidsprotocollen vergelijkbaar met aardgasinstallaties om de risico's te minimaliseren. Bij een incident kan er door de omvang van de locatie bij een brand sprake zijn van bovenlokale effecten en daarom is aan waterstofcentrales de score 2 gegeven voor de reikwijdte van effecten bij incidenten. Om het risico op incidenten te beperken, geldt rondom waterstofcentrales een veiligheidszone waarin de kans op een incident niet groter mag zijn dan 10^{-6} per jaar. Hierdoor is de kans op een incident met dodelijke afloop zeer klein. Omdat er meer installaties geplaatst worden en de kans op een incident bij kerncentrales nog kleiner is, krijgen waterstofcentrales een score 2 voor de kans op incidenten. Met name bij de varianten 1A, 4A, 1B, 4B en 4C zijn er grotere aantallen waterstofcentrales, waardoor de kans op een incident in Nederland toeneemt. Dit heeft echter geen invloed op de aard of de reikwijdte van de mogelijke incidenten. De score voor waterstofcentrales blijft daarom gelijk voor alle energiesysteemvarianten, zowel wat betreft de reikwijdte van de gevolgen bij incidenten als de kans op incidenten.

Bij ondergrondse waterstofopslag in lege gasvelden of zoutcavernes bestaat een laag risico op waterstoflekkages die kunnen leiden tot explosiegevaar.¹²⁵ Dit risico wordt verder geminimaliseerd door het toepassen van lekdictheidsystemen. Grootschalige lekkages worden niet aannemelijk geacht. Echter omdat het om zeer grote volumes waterstof gaat, kan een incident, waarbij er waterstof vrij zou komen, in potentie veel langer kunnen duren en/of kunnen er hogere concentraties van waterstof zich ophopen. In dit worst-case scenario, waar een zeer kleine kans op is, kan gesproken worden over mogelijke bovenlokale effecten bij een incident. Daarom is waterstofopslag beoordeeld met een score 2 voor de mogelijke reikwijdte van effecten bij incidenten. Om het risico op incidenten te beperken, geldt rondom ondergrondse waterstofopslaglocaties een veiligheidszone. Hierdoor is de kans op een incident met dodelijke afloop zeer klein. Omdat de kans op een incident bij kerncentrales nog een factor 10 tot 100 kleiner is, krijgen deze opslaglocaties een score 2 voor de kans op incidenten. Met name in de varianten 1A, 4A en 3C zijn er iets meer opslaglocaties, waardoor de kans op een incident in Nederland toeneemt. Dit heeft echter geen invloed op de aard of de reikwijdte van de mogelijke incidenten. De score voor waterstofopslaglocaties blijft daarom gelijk voor alle energiesysteemvarianten, zowel wat betreft de reikwijdte van de gevolgen bij incidenten als de kans op incidenten.

6.4.3 Totaalbeoordeling varianten

Tabel 6-14 totaalscore varianten op milieuaspect externe & nucleaire veiligheid

	Scenario 1: 0,5 GW kern			Scenario 2: 3,7 GW kern			Scenario 3: 8,3 GW kern			Scenario 4: 0 GW kern		
	1A	1B	1C	2A	2B	2C	3A	3B	3C	4A	4B	4C
Totaalscore variant	2	2	2	2	2	2	3	3	3	2	2	2

In bovenstaande tabel zijn de totaalscores per variant weergegeven voor het milieuaspect externe en nucleaire veiligheid. Geconcludeerd kan worden dat de keuze voor meer of minder opwek op land of zee (optie A, B of C) geen verschil maakt in de beoordeling van de verschillende varianten binnen één scenario. De verschillen in aantallen zijn daarvoor onvoldoende groot of onderscheidend.

¹²⁵ Uit onderzoek blijkt dat het technisch mogelijk is om waterstof veilig op te slaan in zoutcavernes, maar om de risico's goed te kunnen beheersen is aanvullend onderzoek noodzakelijk. Voor grootschalige opslag van waterstof in gasvelden lopen nog onderzoeken naar de veiligheid en financiële haalbaarheid.

De varianten onder scenario 4 bevatten geen kernenergie en hebben op geen enkel onderdeel de score 3 gekregen. Wel is regelmatig de score 2 toegekend, bij een hogere kans op incidenten bij andere onderdelen van het energiesysteem en de mogelijke bovenlokale reikwijdte van effecten bij waterstofcentrales en -opslag. De varianten onder scenario 4 krijgen daarom een score 2 op externe & nucleaire veiligheid.

De varianten onder scenario 1 en 2 hebben ook een totaalscore van 2 gekregen. Binnen deze varianten is wel kernenergie aanwezig op een enkele of tweetal locaties. Verder gelden voor deze varianten dezelfde aandachtspunten als bij scenario 4. Voor kernenergie geldt dat de reikwijdte van de effecten bij een incident veel groter is dan bij andere energievormen. Dit veiligheidsrisico wordt echter geminimaliseerd tot een zeer kleine kans en heeft betrekking op een beperkt aantal installaties, waardoor ook voor deze varianten een totaalscore van 2 is toegekend.

De varianten onder scenario 3 hebben een totaalscore van 3 gekregen. Dit scenario omvat de meeste kerncentrales die verspreid over verschillende locaties gerealiseerd zullen worden. Hierdoor neemt het risico op een incident op nationaal niveau toe ten opzichte van de scenario's met minder kerncentrales. Ook hier gelden dezelfde aandachtspunten als bij scenario 4. Hoewel het veiligheidsrisico bij kernenergie tot een extreem kleine kans wordt geminimaliseerd, is er een grotere kans op een kernincident door het grotere aantal installaties toe ten opzichte van de situatie met alleen kerncentrale Borssele. Elke installatie op zichzelf heeft een initiële faalkans en bij meerdere centrales neemt de kans op falen toe met het aantal centrales. Aangezien er sprake is van een groot effectbereik voor elk individueel potentieel incident is voor de totaalscore 3 toegekend op het milieuaspect externe & nucleaire veiligheid.

Een groter aandeel kernenergie in het energiesysteem vergroot de kans op incidenten met een (inter)nationale impact. Hoewel de kans op dergelijke incidenten zeer klein is, en kleiner dan bij andere onderdelen van het energiesysteem, betreft het wel een ander type risico.

6.5 Landschap en cultuurhistorie

Het aspect landschap en cultuurhistorie is beoordeeld aan de hand van de mate van beïnvloeding van landschappelijke en/of cultuurhistorische waarden in uniciteit en schaal. In paragraaf 5.5 zijn de effecten van de verschillende onderdelen van het energiesysteem besproken. De te verwachten effecten van de verschillende onderdelen van het energiesysteem zijn in deze paragraaf per variant beoordeeld.

6.5.1 Beoordeling energie opwekkers

Tabel 6-15 beoordelingstabel energie opwekkers op milieuaspect landschap en cultuurhistorie

Energieopwekker	Scenario 1: 0,5 GW kern			Scenario 2: 3,7 GW kern			Scenario 3: 8,3 GW kern			Scenario 4: 0 GW kern		
	1A	1B	1C	2A	2B	2C	3A	3B	3C	4A	4B	4C
Zon-PV	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Wind op land	2	1	1	2	1	1	1	1	1	2	1	1
Wind op zee	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Kernenergie	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0

De impact van zon op dak op landschap en cultuurhistorie is minimaal. Daarentegen kan de impact van grote zonnevelden op het landschap en de bijbehorende cultuurhistorische waarden aanzienlijk zijn. Vanwege het grote oppervlak dat zon op land inneemt in het landschap wordt zon op land in alle varianten beoordeeld met een score van 2.

Voor wind op land geldt dat de turbines goed zichtbaar zijn, ook vanaf grote afstanden. Bovendien zijn windturbines vaak voorzien van verlichting, waardoor ze ook 's nachts zichtbaar zijn. Dit kan een aantasting vormen van bepaalde landschappelijke en cultuurhistorische waarden. Het betreft echter geen onomkeerbare gevolgen; wanneer de windturbines worden verwijderd, kan het landschap en de cultuurhistorische waarde grotendeels worden hersteld. Voor de energiesysteem varianten met een maximale hoeveelheid kernenergie of veel wind op zee is het aantal installaties voor windenergie op land significant kleiner dan bij een focus voor productie op land. In de scores is dit tot uiting gebracht door de variaties met focus voor productie op land met een 2 te scoren en de andere varianten met een 1.

Windparken op zee bevinden zich doorgaans ver uit de kust, waardoor ze vanaf land meestal niet zichtbaar zijn. De effecten op landschap en cultuurhistorische waarden zullen daarom beperkt zijn. Wel worden de turbines op zee geplaatst met een monopile als fundering in de zeebodem. De zeebodem kan cultuurhistorische waarden en structuren bevatten die hierdoor worden aangetast, maar de funderingen zijn relatief klein. Ook de bekabeling van windparken op zee kan lokaal effect hebben op cultuurhistorische waarden van de zeebodem. Omdat deze effecten zeer lokaal blijven, wordt wind op zee beoordeeld met een score van 1.

De effecten van kernenergie op landschappelijke en cultuurhistorische waarden zijn relatief beperkt. Een kerncentrale is een omvangrijk bouwwerk, maar het aantal installaties blijft gering en ze worden doorgaans op industrieterreinen gerealiseerd. De impact blijft daardoor vooral lokaal. Om deze reden krijgen de varianten in scenario 2 en 3 (waarin nieuwe kerncentrales worden gerealiseerd) een score van 1. In scenario's 1 en 4 worden geen nieuwe kerncentrales gebouwd, waardoor er geen verdere impact is op landschappelijke of cultuurhistorische waarden ten opzichte van de bestaande situatie; deze scenario's krijgen daarom een neutrale beoordeling (0). In de varianten onder scenario 4 wordt de kerncentrale Borssele in 2033 gesloten. Het positieve effect hiervan op landschap en cultuurhistorie op nationaal niveau is echter verwaarloosbaar.

6.5.2 Beoordeling ondersteunende installaties

Tabel 6-16 beoordelingstabel ondersteunende installaties op milieuaspect landschap en cultuurhistorie

Ondersteunende installaties	Scenario 1: 0,5 GW kern			Scenario 2: 3,7 GW kern			Scenario 3: 8,3 GW kern			Scenario 4: 0 GW kern		
	1A	1B	1C	2A	2B	2C	3A	3B	3C	4A	4B	4C
(Systeem)batterijen	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Elektrolyzers	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Waterstofcentrales	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Waterstofopslag	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Voor de ondersteunende installaties geldt dat naar verwachting zowel (systeem)batterijen, elektrolyzers als waterstofcentrales voornamelijk op industriële locaties zullen worden gesitueerd. Hoewel er effecten kunnen zijn op landschappelijke en cultuurhistorische waarden, blijven deze effecten vanwege de keuze voor voornamelijk industriële locaties beperkt. Een deel van elektrolyzers wordt op zee gerealiseerd. Deze installaties hebben een minimale impact op landschap en cultuurhistorie. Daarnaast geldt voor

waterstofcentrales en waterstofopslag¹²⁶ dat er vooral gebruik zal worden gemaakt van bestaande structuren. Mogelijk zijn er aanpassingen of aanvullende bouwwerken nodig, waardoor enige impact op het landschap kan optreden, maar deze zal niet groot zijn. De verschillende ondersteunende installaties zijn daarom beoordeeld met een score van 1 voor alle varianten.

6.5.3 Totaalbeoordeling varianten

Tabel 6-17 totaalscore varianten op milieuaspect landschap en cultuurhistorie

	Scenario 1: 0,5 GW kern			Scenario 2: 3,7 GW kern			Scenario 3: 8,3 GW kern			Scenario 4: 0 GW kern		
	1A	1B	1C	2A	2B	2C	3A	3B	3C	4A	4B	4C
Totaalscore variant	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2

De totaalbeoordeling van de verschillende varianten wordt grotendeels bepaald door de inzet van zon- en windenergie op land. Zon op land vraagt om grote oppervlakken, terwijl windturbines – vooral in open gebieden – sterk zichtbaar zijn in het landschap. Dit leidt tot bovenlokale, maar omkeerbare, effecten op het landschap en de cultuurhistorische waarden. In alle varianten worden veel installaties gerealiseerd, waardoor op veel locaties aantasting van het landschap optreedt. Om deze reden krijgen alle varianten voor dit aspect een score 2.

Kerncentrales beschikken over een hoog opwekvermogen, waardoor met een beperkt aantal locaties een aanzienlijke hoeveelheid energie kan worden geproduceerd. Wanneer kerncentrales worden ingezet ter vervanging van energieopwekking op land, zoals wind- en zonneparken, heeft dit een positief effect op de score van het energiesysteem op de milieuaspecten 'landschap' en 'cultuurhistorie'.

6.6 Water

Tabel 6-18 beoordelingstabel milieuaspect water

Onderdeel energiesysteem	Scenario 1: 0,5 GW kern			Scenario 2: 3,7 GW kern			Scenario 3: 8,3 GW kern			Scenario 4: 0 GW kern		
	1A	1B	1C	2A	2B	2C	3A	3B	3C	4A	4B	4C
Energie opwekkers												
Zon-PV	n.v.t.											
Wind op land	n.v.t.											
Wind op zee	n.v.t.											
Kernenergie	0	0	0	2	2	2	3	3	3	0(+)	0(+)	0(+)
Ondersteunende installaties												
(Systeem)batterijen	n.v.t.											
Elektrolyzers	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Waterstofcentrales	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Waterstofopslag	n.v.t.											
Totaalscore variant	2	2	2	2	2	2	3	3	3	2	2	2

¹²⁶ De verwachting is dat er zowel opslag plaats gaat vinden in lege gasvelden als bestaande zoutcavernes. Mocht opslag in lege gasvelden toch economisch onvoldoende rendabel zijn dan dienen er extra zoutcavernes gecreëerd te worden om de benodigde hoeveelheden waterstof te kunnen opslaan. Dit zou meer milieueffecten tot gevolg hebben.

Voor het milieuaspect water is gekeken naar de hoeveelheid koelwater die nodig is per variant voor kernenergie, elektrolyzers en waterstofcentrales. De hoeveelheden water die benodigd zijn per variant en onderdeel van het energiesysteem zijn vermeld in paragraaf 5.6 onder onderscheidende effecten.

6.6.1 Kernenergie

Wat betreft kernenergie krijgen de varianten onder scenario 1 en 4 een score van 0. In scenario 4 zijn er geen actieve kerncentrales meer, wat een verbetering betekent ten opzichte van de huidige situatie. Er is daarom een plusje geschreven bij de score. Scenario 1 is een voortzetting van de huidige situatie, waardoor er geen wijziging in milieueffecten optreedt ten opzichte van deze huidige situatie. Daarom scoren ook de varianten onder dit scenario een 0 op het milieuaspect water. Kerncentrales hebben een grote koelbehoefte, zoals beschreven in hoofdstuk 5. In scenario 3 is veel koelwater nodig om vijf kerncentrales (Borssele en vier nieuwe kerncentrales) en zeven SMR's te laten draaien. Hoewel de effecten hiervan worden gemitigeerd door vergunningen die de maximale hoeveelheid warmte en chemicaliën beperken, gaat het om aanzienlijk grotere hoeveelheden koelwater dan bij de andere varianten. Er wordt daarmee druk gelegd op de waterhuishouding. Deze effecten zijn verspreid over Nederland en maken gebruik van binnenwateren. Met de toenemende extremen in waterpeilen en de verwachting dat deze door klimaatverandering verder zullen toenemen, wordt daarom een score van 3 gegeven aan de varianten onder scenario 3. Ook bij scenario 2 is er een aanzienlijke toename in de koelwaterbehoefte ten opzichte van de huidige situatie, maar deze bedraagt ongeveer de helft van de koelwater behoefte zoals bij scenario 3. Daarom scoren de varianten onder scenario 2 een 2 op het milieuaspect water voor kernenergie.

6.6.2 Elektrolyzers

Elektrolyzers hebben eveneens koelwater nodig. Hoewel de hoeveelheid water die nodig is aanzienlijk is, ligt deze lager dan bij een kerncentrale. Het aantal vollasturen is ook lager, maar er zijn meer installaties nodig. Hierdoor is de totale hoeveelheid water die nodig is voor elektrolyzers aanzienlijk en vergelijkbaar met die van twee nieuwe kerncentrales en de kerncentrale Borssele. Naar verwachting wordt meer dan de helft van de elektrolyzers op zee gerealiseerd, waardoor deze minder snel beperkingen zullen ondervinden door watertekorten of hogere temperaturen van het te gebruiken water, vooral tijdens de zomerperiode. Desalniettemin kunnen er aanzienlijke effecten zijn op de lokale waterhuishouding en mogelijk ook beperkte verstoringen op bovenlokale schaal door elektrolyzers. Er zijn weinig verschillen in koelwatergebruik door elektrolyzers op land en zee tussen de verschillende varianten. Om deze reden scoren alle varianten een 2 op het milieuaspect water voor elektrolyzers.

6.6.3 Waterstofcentrales

Waterstofcentrales hebben eveneens een aanzienlijke koelbehoefte; voor een centrale van 1 GW wordt gerekend met ongeveer 180.000 m³ koelwater per uur. Doordat waterstofcentrales een beperkt aantal vollasturen hebben en het aantal installaties beperkt is tot 14 tot 22, is de totale hoeveelheid koelwater die jaarlijks nodig is vergelijkbaar met of iets minder dan bij elektrolyzers. Omdat het gaat om aanzienlijke hoeveelheden koelwater met mogelijke bovenlokale effecten en er geen groot onderscheid is tussen de varianten, wordt voor waterstofcentrales in alle varianten een score van 2 gegeven op het milieuaspect water.

6.6.4 Totaalbeoordeling varianten

Voor de totaalbeoordeling is gekeken naar de scores op de verschillende onderdelen van het energiesysteem. In alle varianten is er een aanzienlijke toename van de koelwater behoefte door het toevoegen van deze nieuwe installaties. In de varianten met meer kernenergie is minder inzet van waterstofcentrales. Tegelijkertijd hebben deze varianten meer kerncentrales, wat resulteert in een hogere

koelwaterbehoefte voor dit onderdeel. De varianten met weinig kernenergie hebben logischerwijs minder koelwater voor kerncentrales nodig. Omdat kerncentrales relatief veel koelwater verbruiken, zijn de verschillen in het totaal benodigde koelwater per variant op jaarbasis voornamelijk bepaald door het aantal kerncentrales. Het verschil in totaal koelwatergebruik tussen de varianten onder scenario 1 en 4 vergeleken met de varianten onder scenario 3 bedraagt ongeveer een factor 1.5 (zie ook de tabel in paragraaf 5.6).

De varianten onder scenario 3 scoren daarom een 3 op het milieuaspect water. De overige varianten scoren een 2 op het milieuaspect.

In alle energiesysteemvarianten neemt de vraag naar koelwater toe. Wanneer echter in grotere mate wordt ingezet op kerncentrales in plaats van op wind- en zonne-energie, stijgt deze koelwatervraag aanzienlijk meer.

6.7 Radioactief afval

Tabel 6-19 score varianten op milieuaspect radioactief afval

Onderdeel energiesysteem	Scenario 1: 0,5 GW kern			Scenario 2: 3,7 GW kern			Scenario 3: 8,3 GW kern			Scenario 4: 0 GW kern		
	1A	1B	1C	2A	2B	2C	3A	3B	3C	4A	4B	4C
Energie opwekkers												
Zon-PV							n.v.t.					
Wind op land							n.v.t.					
Wind op zee							n.v.t.					
Kernenergie	1	1	1	2	2	2	3	3	3	0	0	0
Ondersteunende installaties												
(Systeem)batterijen							n.v.t.					
Elektrolyzers							n.v.t.					
Waterstofcentrales							n.v.t.					
Waterstofopslag							n.v.t.					
Totaalscore variant	1	1	1	2	2	2	3	3	3	0	0	0

Voor het thema radioactief afval is gekeken naar de toename van radioactief afval bij de verschillende scenario's en de aanpassingen die nodig zijn om dit afval op te slaan totdat eindberging mogelijk is. De hoeveelheden radioactief afval per scenario zijn beschreven in hoofdstuk 5, evenals de benodigde maatregelen voor opslag.

In het beleid van COVRA is rekening gehouden met het tien jaar langer openblijven van Borssele en de sloop van de centrale daarna. Er blijft een jaarlijkse hoeveelheid radioactief afval ontstaan jaarlijks als de centrale langer openblijft dan 2033. De varianten onder scenario 1 zijn daarom met een score 1 beoordeeld. De varianten onder scenario 4, het nul alternatief voor kernenergie, zijn op het thema radioactief afval neutraal beoordeeld. De kerncentrale Borssele blijft, conform de oorspronkelijke planning, niet langer dan tot 2033 in bedrijf. Na die datum ontstaat er geen radioactief afval meer.

Bij scenario 2, waarbij kerncentrale Borssele langer openblijft en twee nieuwe kerncentrales worden gerealiseerd, neemt de hoeveelheid hoogradioactief afval aanzienlijk toe ten opzichte van het scenario

waarin alleen Borssele langer openblijft. Om deze extra hoeveelheid afval tot aan de eindberging op te slaan, is uitbreiding van de opslagcapaciteit op het COVRA-terrein noodzakelijk. Volgens het Masterplan 2050 is er op het bestaande terrein voldoende uitbreidingscapaciteit om deze toestroom tot circa 2100 te verwerken.¹²⁷ Als de eindberging daadwerkelijk wordt vervroegd (momenteel gepland rond 2130, maar mogelijk eerder), zou deze capaciteit voldoende moeten zijn om de tijdelijke opslag van radioactief afval in Nederland te waarborgen. De varianten onder dit scenario zijn daarom beoordeeld met een score 2.

In scenario 3, waarin wordt uitgegaan van het langer openhouden van kerncentrale Borssele, de bouw van vier nieuwe kerncentrales en zeven Small Modular Reactors (SMR's), ontstaat een aanzienlijke toename van hoogwaardig radioactief afval. Deze situatie is niet meegenomen in het Masterplan Radioactief Afval 2050 van COVRA. Wel is duidelijk dat in dit scenario al ruim vóór 2100 capaciteitsproblemen zullen ontstaan op het COVRA-terrein. Het is daarom noodzakelijk tijdig na te denken over extra opslagcapaciteit buiten de huidige terreingrenzen van COVRA, in afwachting van de geplande eindberging van radioactief afval in Nederland (voorzien in 2130). Omdat er op dit moment onvoldoende uitbreidingsmogelijkheden zijn binnen het bestaande terrein, zijn de varianten in dit scenario beoordeeld met een score 3.

6.8 Straling

Tabel 6-20 beoordeling varianten op milieuaspect straling

Onderdeel energiesysteem	Scenario 1: 0,5 GW kern			Scenario 2: 3,7 GW kern			Scenario 3: 8,3 GW kern			Scenario 4: 0 GW kern		
	1A	1B	1C	2A	2B	2C	3A	3B	3C	4A	4B	4C
Energie opwekkers												
Zon-PV							n.v.t.					
Wind op land							n.v.t.					
Wind op zee							n.v.t.					
Kernenergie	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ondersteunende installaties												
(Systeem)batterijen							n.v.t.					
Elektrolyzers							n.v.t.					
Waterstofcentrales							n.v.t.					
Waterstofopslag							n.v.t.					
Totaalscore variant	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Voor het milieuaspect straling is gekeken naar de toename van stralingsniveaus en het effectbereik daarvan. In hoofdstuk 5 is al beschreven dat de hoeveelheid straling die vrijkomt bij kerncentrales zeer gering is in vergelijking met de natuurlijke achtergrondstraling waaraan mensen dagelijks worden blootgesteld, of met incidentele blootstelling door medisch onderzoek of vliegereizen. Zelfs als iemand zich voortdurend aan de terreingrens van een kerncentrale zou bevinden, is de extra stralingsdosis daar minimaal en nauwelijks hoger dan op andere willekeurige locaties buiten de centrale. Sterker nog, de stralingsniveaus aan de terreingrens van een kerncentrale zijn vaak lager dan de straling die men in een gemiddeld gebouw ontvangt.

¹²⁷ Masterplan 2050 Radioactief Afval.

De extra hoeveelheid straling die bij de bouw van één of meerdere kerncentrales aan de omgeving wordt toegevoegd, is dus verwaarloosbaar. In alle scenario's met kernenergie blijft de toename van blootstelling aan ioniserende straling minimaal ten opzichte van de al bestaande natuurlijke bronnen in Nederland. Het wegnemen van kerncentrale Borssele in scenario 4 leidt hierom niet tot een licht positief effect. Daarom zijn alle varianten neutraal (score 0) beoordeeld op het milieuaspect straling.

6.9 CO₂-emissies

Tabel 6-21 beoordeling varianten op milieuaspect CO₂-emissies

Onderdeel energiesysteem	Scenario 1: 0,5 GW kern			Scenario 2: 3,7 GW kern			Scenario 3: 8,3 GW kern			Scenario 4: 0 GW kern		
	1A	1B	1C	2A	2B	2C	3A	3B	3C	4A	4B	4C
Energie opwekkers												
Zon-PV	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Wind op land	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Wind op zee	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Kernenergie	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0
Ondersteunende installaties												
(Systeem)batterijen, elektrolyzers, waterstofcentrales en waterstofopslag	n.v.t											
Totaalscore variant	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

In hoofdstuk 5 is gebruikgemaakt van bestaande onderzoeken om inzichtelijk te maken met hoeveel procent duurzame energie opwekkers minder CO₂ uitstoten ten opzichte van gas en kolen. Uit deze analyses blijkt dat alle duurzame energie opwekkers ten minste 94,6% minder CO₂ uitstoten dan kolencentrales. Ten opzichte van gascentrales ligt de reductie op minimaal 90%. Wind op land, wind op zee en kernenergie laten onderling vergelijkbare cijfers zien wat betreft CO₂-uitstoot. Zon-PV presteert in vergelijking met conventionele methoden ook zeer goed, maar scoort ten opzichte van wind- en kernenergie wel minder gunstig.

De verschillen tussen de duurzame opties onderling zijn echter beperkt wanneer ze worden afgezet tegen de conventionele opwekkers; alle duurzame energiebronnen realiseren immers een CO₂-reductie van 90% of meer. Daarom krijgen alle energie opwekkers en de verschillende energiesysteemvarianten in deze studie een score van 1 op dit aspect. In alle gevallen is sprake van een aanzienlijke verbetering ten opzichte van het gebruik van fossiele brandstoffen. Alleen voor kernenergie krijgen de varianten onder scenario 1 en 4 geen negatieve score, omdat in deze gevallen geen nieuwe installaties worden gebouwd. De ontmanteling van kerncentrale Borssele moet ook in de huidige situatie plaatsvinden en heeft daarom geen invloed op de score.

Deze resultaten benadrukken het belang van de transitie naar duurzame energie, aangezien de keuze voor vrijwel elke duurzame opwekker leidt tot een forse vermindering van de CO₂-uitstoot en daarmee een positieve bijdrage levert aan het behalen van klimaatdoelstellingen.

6.10 Materiaalgebruik

6.10.1 Beoordeling energie opwekkers

Tabel 6-22 beoordelingstabel energie opwekkers op milieuaspect materiaalgebruik

Energie opwekkers	Scenario 1: 0,5 GW kern			Scenario 2: 3,7 GW kern			Scenario 3: 8,3 GW kern			Scenario 4: 0 GW kern		
	1A	1B	1C	2A	2B	2C	3A	3B	3C	4A	4B	4C
Zon-PV	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Wind op land	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Wind op zee	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Kernenergie	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0

Voor het milieuaspect materiaalgebruik is gekeken naar de hoeveelheid benodigd materiaal bij de duurzame energieweekers ten opzichte van conventionele methoden. Zon-PV, wind op land, wind op zee en kernenergie vereisen elk minder dan 2% van de totale hoeveelheid materiaal (in kilogrammen) die nodig is bij een kolencentrale voor het opwekken van eenzelfde hoeveelheid elektriciteit. De energie opwekkers zijn daarom voor alle varianten beoordeeld met score 1. Kernenergie gebruikt aanzienlijk minder materiaal dan de andere duurzame energie opwekkers per TWh (factor 1.6 of meer afhankelijk van gekozen duurzame opwekker).

Omdat in scenario 1 en scenario 4 geen nieuwe kerncentrales bijgebouwd hoeven te worden, zijn de varianten onder deze scenario's met score 0 beoordeeld voor kernenergie. Bij scenario 4 is kerncentrale Borssele korter in gebruik, het gaat om minimale afname in materiaalgebruik ten opzichte van scenario 1 waardoor er geen onderscheid wordt gemaakt in de score.

6.10.2 Totaalbeoordeling varianten

Tabel 6-23 totaalscore varianten op milieuaspect materiaalgebruik

	Scenario 1: 0,5 GW kern			Scenario 2: 3,7 GW kern			Scenario 3: 8,3 GW kern			Scenario 4: 0 GW kern		
	1A	1B	1C	2A	2B	2C	3A	3B	3C	4A	4B	4C
Totaalscore variant	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Zowel zon-, wind- als kernenergie vormen een aanzienlijke verbetering ten opzichte van de verbranding van kolen of gas wat betreft de hoeveelheid materiaal die nodig is voor de opwekking van energie. Alle energiesysteem varianten hebben daarom een score 1 gekregen. Dit betekent dat in alle varianten het materiaalverbruik in kilo's ten opzichte van een systeem met kolencentrales aanzienlijk lager is (minder dan 2% van totale hoeveelheid materiaal bij een systeem met kolencentrales).

7 Conclusie

Het behouden en uitbouwen van kernenergie in de energieproductiemix is voorzien als één van de ontwikkelrichtingen om te komen tot een energievoorziening die broeikasgasvrij is en afhankelijkheid beperkt. Om de gestelde doelen te bereiken kan de energiemix op verschillende wijze worden ingevuld met verschillende potentiële consequenties voor de omgeving en het milieu. In dit hoofdstuk worden conclusies getrokken over deze gevolgen bij een variërend aandeel van kernenergie in de energiemix, van geen tot een groot aandeel. Eerst wordt ingegaan op de gevolgen op grond van de kernenergie installaties, vervolgens op de invulling van de energiemix bij een verschillend aandeel kernenergie.

7.1 Milieueffecten kernenergie

In Tabel 7-1 zijn de beoordelingen voor de kernenergie installaties per aspect bij elkaar gezet. De beoordeling van het effect van het aandeel kernenergie in de energiemix kan niet op zichzelf worden gezien. De vergelijking laat zien welk verschil in potentiële effecten samenhangt met het aandeel kernenergie.

Uit de beoordeling volgt logischerwijs dat bij een groter aandeel kernenergie grotere effecten op de omgeving zijn te verwachten. Dit is direct het gevolg van het aantal installaties dat hiervoor benodigd is. Onderscheidend daarbij is dat bij het grootste aandeel kernenergie potentieel aandachtspunten liggen bij de hoeveelheid radioactief afval op grond van de beschikbare afvalopslagcapaciteit en de impact op het aspect water vanwege de grote koelwaterbehoefte en de daarmee verhoudende lozing. Ten aanzien van het aspect externe & nucleaire veiligheid geldt dat er sprake is van een theoretische toename van het veiligheidsrisico aangezien er extra installaties worden gerealiseerd. Het risico op een incident op zichzelf blijft zeer beperkt. De score voor zowel 3,7 als 8,3 GW is gerelateerd aan het effectbereik bij een incident dat bij beide scenario's groot is, maar zegt niks over de kans op een dergelijk effect.

Deze aandachtspunten vormen een beleidskeuze als het gaat om mogelijk maken van ruimte voor opslag en de aanvaardbaarheid van risico's. Op grond van de analyse is er geen aanleiding om een belemmering te verwachten die beleidskeuzes beperkt. Voor het aspect water geldt dat dit een belangrijk aandachtspunt is waarbij potentieel voor mitigatie bestaat waardoor dit een ontwerp-opgave is. Dit geeft dan ook geen aanleiding een belemmering voor de uitvoerbaarheid te verwachten. Ditzelfde geldt voor radioactief afval: bij het grootste kernenergiescenario is er meer radioactief afval waarvan de opslagruimte bij COVRA in de huidige omvang mogelijk niet toereikend is. Dit vergt nader onderzoek naar de mogelijkheden voor uitbreiding COVRA (waarbij een relatie ligt tussen de kernenergieambities en het Nationaal Programma Radioactief Afval waar het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat verantwoordelijk voor is).

Het nul alternatief laat verder op enkele punten wat beperkt positieve effecten zien: er is immers geen ecologische impact meer doordat er geen koelwaterlozingen zijn, het al zeer verwaarloosbare veiligheidsrisico van de centrale valt weg en het radioactief afval uit kerncentrales neemt niet meer toe. De positieve effecten moeten echter niet in een vacuüm beschouwd worden: het wegnemen van kernenergie betekent dat andere energietechnologieën zullen moeten bijspringen, elk met eigen potentiële effecten zoals volgt uit de volgende paragraaf.

Tabel 7-1 Overzicht milieueffecten kernenergie bij verschillende scenario's

Milieuaspecten	Scenario 1: 0,5 GW kern	Scenario 2: 3,7 GW kern	Scenario 3: 8,3 GW kern	Scenario 4: 0 GW kern
Geluid	0	1	1	0
Ecologie	0	1	2	0(+)
Ruimtelijke functies	0	1	1	0
Externe & nucleaire veiligheid: reikwijdte bij incidenten	0	3	3	0(+)
Externe & nucleaire veiligheid: kans op incidenten	0	1	2	0(+)
Landschap en cultuurhistorie	0	1	1	0
Water	0	2	3	0(+)
Radioactief afval	1	2	3	0
Straling	0	0	0	0
CO ₂ -emissies	0	1	1	0
Materiaalgebruik	0	1	1	0

7.2 Milieueffecten verschillende energiesysteem varianten

Kernenergie is onderdeel van de energiemix die verandert in het licht van beleidsdoelstellingen over klimaat en energievoorzieningszekerheid. Het is dan ook relevant het aandeel kernenergie ook te beschouwen in het licht van de verschillende invullingsopties voor deze mix.

In hoofdstuk 3 zijn verschillende combinaties van energiebronnen, met ondersteunende installaties met een scenario-analyse verkent. Daarbij varieerde het aandeel kernenergie van geen tot 8,3 GW aan kernenergie. De technische analyse laat zien dat de beleidsdoelen voor het energiesysteem realistisch zijn in alle onderzochte varianten.

De realisatie van een energiesysteem dat klimaatneutraal en zelfvoorzienend is, kent in elke vorm aandachtspunten. Deze zijn voornamelijk het gevolg van het aantal installaties dat nodig is die tot gevolgen voor het milieu kunnen leiden. Ook bij het grootste aandeel kernenergie geldt dat nog 90% van de elektriciteit wordt opgewekt uit hernieuwbare energiebronnen (zon- en windenergie) en voor alle scenario's zijn een relatief groot aantal ondersteunende installaties vereist voor onder meer opslag en conversie. De omvang van de opgave is groot en dat hangt samen met de grote rol van elektriciteit in het toekomstige energiesysteem als vervanging van de huidige energievoorziening die voor een belangrijk deel gebaseerd is op fossiele brandstoffen zoals olie en gas.

Voor alle onderzochte scenario's en variaties geldt dat er in principe geen aanleiding is te voorzien dat een variant niet uitvoerbaar is. Er is dan ook geen aanleiding op grond van potentiële milieueffecten om wel of niet een specifieke beleidsrichting te volgen voor een bepaalde technologie. Wel geldt als aandachtspunt het aspect water ten gevolge van onttrekking en lozing die verbonden is aan de inzet van kernenergie, waterstofcentrales en elektrolyzers en als aandachtspunt het aspect ecologie in relatie tot impact ten gevolge van offshore windenergie. Op grond van de geldende wettelijke kaders is er geen aanleiding onaanvaardbare gevolgen te verwachten voor deze aspecten aangezien dit niet is toegestaan.

Gezien de omvang van de wateronttrekking en -lozing en het aantal windturbines op zee in onderzochte varianten is de opgave om te voldoen aan deze kaders echter naar verwachting substantieel en vereist stevige inzet op mitigatie en technische ontwikkeling.

Tussen de scenario's met een verschillend aandeel kernenergie is het verschil in potentiële milieueffecten met name gelegen op het vlak van de aspecten nucleaire veiligheid, water en radioactief afval. Dit laatste hangt samen met de beschikbare opslagcapaciteit voor radioactief afval zoals ook in de vorige paragraaf werd aangehaald. Het aandeel kernenergie leidt verder alleen bij het maximum scenario tot een onderscheidend verschil voor het aspect 'ruimtelijke functies'. Dit geldt indien een maximum scenario in de variant waarbij het aandeel duurzame energie op land (uit zonne- en windenergie) minder groeit bij sterke groei van kernenergie. Het aantal installaties op land en de ruimte die hiervoor benodigd is, bij de varianten met nadruk op energie opwek op land (de A-varianten) is bij deze variant (3A) onderscheidend lager en kleiner dan bij de overige scenario's bij varianten A.

Voor alle scenario's geldt een vergelijkbare effectbeoordeling tussen de onderzochte varianten. Bij een grotere inzet voor hernieuwbare opwek op land zijn de potentiële effecten die daarmee samenhangen ook groter (aspecten geluid en ruimtelijke functies). Overige effecten zijn voor de verschillende varianten binnen de scenario's gelijk beoordeeld. Dit als gevolg van de opgave die met of zonder kernenergie een grote inzet vereist van de verschillende opwek en ondersteunende installaties.

Uit de analyse blijkt verder dat, wanneer wordt gekeken naar de milieuaspecten materiaalgebruik en CO₂-emissies, alle onderzochte energie opwekkers aanzienlijk beter scoren dan conventionele methoden. Dit bevestigt de meerwaarde van de verschillende opwek technologieën in het licht van de gestelde doelstellingen.

Tabel 7-2 Totaaloverzicht milieueffecten energiesysteem varianten

Milieuaspecten	Scenario 1: 0,5 GW kern			Scenario 2: 3,7 GW kern			Scenario 3: 8,3 GW kern			Scenario 4: 0 GW kern		
	1A	1B	1C	2A	2B	2C	3A	3B	3C	4A	4B	4C
Geluid	3	2	2	3	2	2	2	2	2	3	2	2
Ecologie	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Ruimtelijke functies	3	2	2	3	2	2	2	2	2	3	2	2
Externe & nucleaire veiligheid	2	2	2	2	2	2	3	3	3	2	2	2
Landschap en cultuurhistorie	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Water	2	2	2	2	2	2	3	3	3	2	2	2
Radioactief afval	1	1	1	2	2	2	3	3	3	0	0	0
Straling	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CO ₂ -emissies	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Materiaalgebruik	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

7.3 Onzekerheden & Leemten in kennis

Het onderzoek dat voorligt is gebaseerd op scenario's en varianten op basis van onderliggende aannames en uitgangspunten over de ontwikkeling van de maatschappij, economie en de stand van de techniek. De potentiële milieugevolgen van de scenario's en varianten zijn gebaseerd op bestaand onderzoek. Er zijn dan ook onzekerheden en leemten in kennis.

- **Milieueffecten en locaties van installaties:** In deze studie zijn geen specifieke locaties aangewezen voor de plaatsing van de installaties. De uiteindelijke locatie van een installatie is een bepalende factor voor de omvang en aard van de milieueffecten. In dit onderzoek is gewerkt met aannames, bijvoorbeeld dat elektrolyzers voornamelijk op zee of op industrieterreinen worden gerealiseerd. Keuzes over de plaatsingsstrategie van specifieke technieken of technische ontwikkelingen kunnen verandering van de potentiële milieugevolgen tot gevolg hebben. Bij besluitvorming gericht op plaats of plaatsingsstrategie is een beoordeling van de potentiële milieugevolgen verbonden aan de actuele locatie en stand der techniek zijn dan ook gewenst voor zorgvuldige besluitvorming.
- **Impact industriële ontwikkeling:** De toekomst van de energie-intensieve industrie is één van de bepalende factoren voor het energiesysteem. De omvang en het energieverbruik van deze sector zijn gerelateerd aan internationale concurrentie, beleid en technologische innovatie. Paragraaf 3.5 bevat een kwalitatieve beschouwing van de impact van de energievraag op de resultaten. Hieruit volgt dat de ontwikkeling van de energievraag erg bepalend is hoe het energiesysteem eruit zal zien, maar dat dit geen grote impact heeft op de verschillen tussen de geanalyseerde varianten.
- **Benodigde veranderingen aan het hoogspanningsnet:** In deze studie is niet gekeken naar de benodigde aanpassingen van het hoogspanningsnet. Tot 2050 geldt een grote opgave voor het hoogspanningsnet, eveneens met potentiële milieugevolgen. Ontwikkelingen zoals in de industrie, beleid en technologie zijn daarbij van belang evenals keuzes over de wijze waarop het gehele energiesysteem wordt aangestuurd. Bijvoorbeeld de plaatsing en aansturing van opslag kunnen een rol spelen in de benodigde aanpassing van het hoogspanningsnet. Paragraaf 3.4 bevat een kwalitatieve beschouwing op de (potentiële) impact van verschillende hoeveelheden kernenergie in de energiemix op het hoogspanningsnet.
- **Dynamiek van beleid en technologie:** De studie is gebaseerd op de huidige stand van beleid en technologie, terwijl beide zich snel ontwikkelen. Hierdoor kunnen de uitkomsten achterhaald raken. Voorbeelden zijn de introductie van thuisbatterijen (al dan niet in combinatie met bidirectionele batterijen in elektrische auto's), stilstandsvoorzieningen bij windturbines ter bescherming van vogels, of technologische ontwikkelingen die de verwerking van radioactief afval verbeteren. Hoewel enkele mitigerende maatregelen in dit onderzoek zijn meegenomen, kunnen toekomstige innovaties de milieueffecten verder beperken. Ook op het vlak van nucleaire technologie is er voortgaande ontwikkeling. Zo wordt een nieuw type reactoren ontwikkelt (Gen IV) die radioactief afval als brandstof kunnen gebruiken (deels). Commerciële toepassing ligt hiervan echter naar verwachting echter pas na 2050.
- **Ontwikkeling Small Modular Reactors (SMR) en rol in energiesysteem:** Er is op dit moment nog veel onzeker over de ontwikkeling van SMR's en de potentiële rol in het energiesysteem. In een deel van de geanalyseerde varianten is een (bescheiden) hoeveelheid SMR's meegenomen, maar het is ook mogelijk dat de rol van SMR's groter wordt door kostendaling.



Haskoning is een internationaal onafhankelijk bureau sinds 1881. We combineren ingenieurs-, ontwerp- en adviesdiensten met software en technologie. We leveren hiermee toegevoegde waarde voor klanten en hebben een positieve impact op mensen en onze leefomgeving. Daarmee dragen we bij aan de Sustainable Development Goals van de Verenigde Naties. Dat is onze drijfveer: Enhancing Society Together. Daar hoort bij dat we onszelf en anderen voortdurend uitdagen om bij te dragen aan duurzame oplossingen voor lokale en wereldwijde vraagstukken in de gebouwde omgeving, infrastructuur en industrie.

In onze snel veranderende wereld wordt de agenda bepaald door onder meer klimaatverandering, geopolitieke spanningen, de energietransitie, de digitale transformatie en een veranderende consumentenvraag. Met onze geïntegreerde duurzame oplossingen willen we bijdragen aan het bredere technologische en maatschappelijke plaatje.

Gesteund door de kennis en ervaring van meer dan 6.800 medewerkers werken we vanuit kantoren in meer dan 25 landen wereldwijd. We ondersteunen klanten om de transitie te maken naar een slimme en duurzame organisatie.

We zijn oprecht, handelen integer en transparant in al onze activiteiten, ook onze bedrijfsvoering. Ons team is divers en inclusief. De veiligheid en het welzijn van mensen, in ons team en daarbuiten, staat onder alle omstandigheden voorop.

In projecten en initiatieven werken we actief samen met overheden en het bedrijfsleven, partners en stakeholders. We zien een belangrijke rol voor onszelf in innovatieve duurzame ontwikkeling en willen bijdragen aan een betere leefomgeving, nu en in de toekomst.

Haskoning is een 'Koninklijk' bedrijf, aangewezen door het Koninklijk Huis van Nederland in 1981. Ons hoofkantoor is gevestigd in Nederland en we hebben kantoren in Europa, Azië, Afrika, Australië en Amerika.



ponderaconsult.com

 **PONDERA**
a company of Haskoning