

Van: Max Hilhorst [REDACTED]
Verzonden: maandag 31 maart 2025 05:26
Aan: Griffie Nijmegen <griffie@nijmegen.nl>
Onderwerp: Kernenergie

You don't often get email from [REDACTED]

Geachte griffier,

Wilt u deze mail met aangehechte documenten onder de aandacht brengen van al uw gemeenteraadsleden?

Vriendelijke groet,
Max Hilhorst

Geacht raadslid,

De provincie Gelderland heeft voorlopig enkele regio's geïdentificeerd die op basis van technische criteria in aanmerking zouden kunnen komen voor de vestiging van een kleine kerncentrale (SMR). Ook uw gemeente kan hierbij bestuurlijk en/of ruimtelijk betrokken raken.

Of u nu voor of tegen kernenergie bent: het is een serieuze optie die steeds nadrukkelijker op de politieke agenda staat. Een goed besluit vraagt om inzicht in techniek, veiligheid, kosten, marktwerking en geopolitieke aspecten. Over techniek en veiligheid is al veel gepubliceerd. Minder aandacht is er voor kosten, marktwerking en geopolitiek – juist op die onderdelen gaan de bijgevoegde analyses in.

Als onafhankelijke Gelderse burger en gepensioneerd energie- en klimaatexpert heb ik de belangrijkste feiten overzichtelijk op een rij gezet, met duidelijke bronvermeldingen voor wie zich verder wil verdiepen.

De aangehechte studies behandelen:

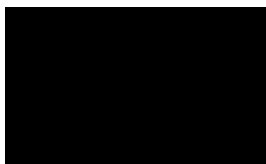
- Wat kernenergie werkelijk kost – en waarom het niet zonder staatssteun kan.
- Waarom het lastig inpasbaar is in een vrije energiemarkt – en wat dat betekent voor die markt.
- Hoe SMR's zich verhouden tot zon, wind en opslag – qua kosten en realisatietijd.
- Wat de belangrijkste geopolitieke implicaties zijn.

Mijn conclusie: gemeenten doen er verstandig aan om tijdig een standpunt te bepalen. Anders wordt het besluit voor u genomen. Juist uw visie, als raadslid, is van groot belang voor een zorgvuldige afweging.

Voor vragen of een toelichting ben ik uiteraard bereikbaar.

Vriendelijke groeten,
Max Hilhorst

Dr. Max A. Hilhorst



Invloed Economie en Geopolitiek op Kernenergie.



Dr. Max A. Hilhorst, Maart 2025

Invloed Economie en Geopolitiek op Kernenergie.

Samenvatting

De energietransitie verandert fundamenteel hoe energie wordt geproduceerd, geconsumeerd en gefinancierd. Hernieuwbare energiebronnen zoals wind en zon worden steeds concurrerender zonder structurele staatssteun, terwijl kernenergie afhankelijk blijft van aanzienlijke overheidsfinanciering. Dit werpt vragen op over de economische haalbaarheid en strategische rol van kernenergie, zeker in vergelijking met de opkomst van hernieuwbare alternatieven en energieopslagtechnologieën.

Energieopslag wordt steeds cruciaal binnen de transitie. Batterijopslag, pompaccumulatie en waterstofopslag helpen om de variabiliteit van hernieuwbare energie te beperken en maken zowel hernieuwbare bronnen als kerncentrales flexibeler, door vraag en aanbod beter te balanceren. Dit bevordert netstabiliteit en vermindert de afhankelijkheid van dure baseload-systemen.

Kernenergie biedt voordelen zoals CO₂-arme productie en stabiele energieopwekking, maar creëert tegelijkertijd nieuwe afhankelijkheden. Uraniumlevering en nucleaire technologie worden wereldwijd gedomineerd door een handvol landen, waaronder Rusland, Kazachstan en China. Dit vergroot de kwetsbaarheid van kernenergie voor geopolitieke spanningen en handelsrestricties. Rusland en China benutten kernenergie ook als strategisch machtsmiddel door via Rosatom en het Belt and Road Initiative langdurige contracten en politieke invloed te realiseren. Westerse landen blijven ondertussen deels afhankelijk van Amerikaanse technologie en brandstoffen.

Economisch gezien kent kernenergie hoge opstartkosten, lange bouw tijden (15-20 jaar) en aanzienlijke langetermijnverplichtingen, zoals de ontmanteling van centrales en de opslag van kernafval. Hernieuwbare energie daarentegen profiteert van kostendalingen en schaalvoordelen, terwijl opslagtechnologieën de betrouwbaarheid vergroten.

Deze studie onderzoekt de economische, technologische en geopolitieke dimensies van kernenergie en de rol ervan binnen de energiemarkt. De centrale vraag is of langdurige staatssteun voor kernenergie gerechtvaardigd is, zeker nu hernieuwbare energie en opslagoplossingen technologische en economische voordelen blijven behalen.

De conclusie is duidelijk: kernenergie blijft zonder overheidssteun financieel onaantrekkelijk. Hoewel kernenergie voordelen biedt op het vlak van leveringszekerheid en CO₂-reductie, wegen de hoge kosten, de langdurige afhankelijkheid van geopolitieke machtsblokken en de lange ontwikkeltijd zwaar. Een toekomstgericht energiebeleid vraagt om investeringen in hernieuwbare energie, slimme netwerken en opslagtechnologieën om een flexibel en veerkrachtig energiesysteem te realiseren dat zonder een nucleaire baseload kan.

Hand-out voor het inspreekmoment van Provinciale staten Gelderland op 26 maart 2025 om 13:00 uur in Het Huis der Provincie, Arnhem.

Dr. Max A. Hilhorst, 



Inleiding: Een Veranderend Energielandschap

Energie is zowel een economische factor als een geopolitiek instrument. Terwijl landen streven naar energieonafhankelijkheid en een stabiele energievoorziening, staan beleidsmakers voor de uitdaging om te bepalen welke energiebronnen economisch en strategisch houdbaar zijn. Sommige technologieën floreren binnen een vrije markt, terwijl andere sterk afhankelijk blijven van staatssteun.

Kernenergie neemt hierin een bijzondere positie in. Ondanks de beloften van leveringszekerheid en lage CO₂-uitstoot, blijft de sector wereldwijd afhankelijk van overheidsfinanciering. In tegenstelling tot wat vaak wordt beweerd, vergroot kernenergie niet per definitie de energieonafhankelijkheid, maar introduceert het juist nieuwe afhankelijkheden. Landen met kerncentrales zijn grotendeels aangewezen op een beperkt aantal nucleaire brandstof leveranciers, wat strategische kwetsbaarheden blootlegt.

De geopolitieke invloed van kernenergie leidt tot economische en politieke afhankelijkheden. Deze dynamiek heeft gevolgen voor de energiepoltiek van Europa en uiteindelijk ook van Gelderland, die verder onder druk is komen te staan door handelsconflicten en de energiecrisis die werd verergerd door de Russische invasie van Oekraïne in 2022. Als reactie hierop heeft de EU haar energiebeleid aangepast en investeert zij versneld in duurzame energiebronnen, energie-efficiëntie en infrastructuur voor waterstof. Energieopslag speelt hierin een steeds grotere rol om schommelingen in hernieuwbare energieproductie op te vangen, waardoor de afhankelijkheid van kernenergie als stabiele energiebron afneemt. Tegelijkertijd maakt energieopslag het mogelijk om kernenergie flexibeler in te zetten, waardoor overproductie in daluren wordt voorkomen en piekvraag efficiënter wordt opgevangen. Hierdoor wordt de concurrentiepositie van hernieuwbare energie versterkt en wordt de afhankelijkheid van dure baseload-systemen zoals kernenergie verminderd.

In een wereld waarin energiezekerheid, marktwerking en geopolitiek steeds meer vervlochten raken, is het cruciaal om de rol van kernenergie kritisch te analyseren. Deze studie beoordeelt of kernenergie een economisch en strategisch verantwoorde keuze blijft, of dat alternatieven zoals hernieuwbare energie in combinatie met opslagtechnologieën op de lange termijn duurzamer en veerkrachtiger zijn.



1. Energiemarkt en de Overheid.

Sinds de privatiseringsgolven van de twintigste eeuw heeft de energiesector een transformatie doorgemaakt. Vrije marktprincipes, gedreven door concurrentie en technologische innovatie, hebben geleid tot efficiëntere en goedkopere vormen van energieproductie. Hernieuwbare energiebronnen zoals zonne- en windenergie floreren binnen deze dynamische markt, waarin bedrijven zoals Tesla, Ørsted en NextEra Energy innovatieve modellen ontwikkelen die inspelen op economische en geopolitieke veranderingen [1, 2].

Volgens klassieke economische principes bevordert marktwerking innovatie en kostenreductie:

- Schumpeter's creatieve destructie (1942): Efficiëntere technologieën verdringen oudere systemen en stimuleren voortdurende verbetering [3].
- Adam Smith's onzichtbare hand (1776): Concurrentie verlaagt prijzen en versnelt technologische vooruitgang [4].
- Opportunity cost (1980): Investerings in energie moeten worden afgewogen tegen alternatieve bestedingen, zoals infrastructuur en industrieontwikkeling [5].

Toch blijkt in de praktijk dat kernenergie zich niet aan deze marktmechanismen conformeert. Wereldwijd zijn meer dan 674 kerncentrales gebouwd en geen enkele functioneert zonder substantiële staatssteun. Kernenergie blijft afhankelijk van overheidssubsidies, staatsleningen en prijsgaranties [6].

1.1. Economische Uitdagingen en Vergelijking met Hernieuwbare Energie

De bouw van kerncentrales vereist miljardeninvesteringen en kent doorlooptijden van tien tot twintig jaar voordat operationele winst kan worden gerealiseerd. Deze hoge initiële kosten en lange terugverdientijden maken kernenergie weinig aantrekkelijk voor private investeerders zonder substantiële overheidsinterventie [7]. Tegelijkertijd is er sprake van een aanzienlijke kostendaling bij hernieuwbare energiebronnen. Volgens het Internationaal Energieagentschap (IEA) zijn de kosten per megawattuur voor windenergie in de afgelopen tien jaar met 60% en voor zonne-energie met 80% gedaald, terwijl kernenergie in dezelfde periode duurder is geworden door verscherpte regelgeving en strengere veiligheidsnormen [8].

Naast deze kostenontwikkeling speelt de technologische vooruitgang op het gebied van energieopslag een steeds belangrijkere rol. Kernenergie wordt traditioneel beschouwd als een stabiele bron van baseloadcapaciteit vanwege de weersafhankelijkheid van wind- en zonne-energie. De opkomst van grootschalige opslagtechnologieën, zoals batterijsystemen, waterstofopslag en pompaccumulatie, vergroot echter de betrouwbaarheid van hernieuwbare energiebronnen in toenemende mate. Hierdoor wordt de noodzaak om kernenergie in te zetten als continue baseload-leverancier geleidelijk gereduceerd.

Hernieuwbare energie, in combinatie met deze opslagoplossingen, biedt bovendien meer flexibiliteit op de energiemarkt dan kerncentrales. Wind- en zonne-energie kunnen dankzij de integratie van moderne opslagtechnologieën beter inspelen op schommelingen in vraag en aanbod, waardoor de netbalans efficiënter en kosteneffectiever kan worden gegarandeerd [9]. De noodzaak voor een baseload in de vorm van kernenergie verdwijnt hierdoor steeds verder uit zicht.

1.2. Verborgen Kosten van Kernenergie

Naast de directe bouw- en operationele kosten brengt kernenergie extra langetermijnverplichtingen met zich mee:

1. Ontmantelingskosten: De ontmanteling van een kerncentrale kan oplopen tot 10-20% van de oorspronkelijke bouwkosten, waarbij veel staten onvoldoende reserves opbouwen om deze kosten te dekken [10].
2. Opslag van radioactief afval: Hoogradioactief afval vereist veilige opslag voor duizenden jaren. De bouw en het beheer van geologische opslagfaciliteiten zijn extreem duur en vergen voortdurende staatsinmenging [11].
3. Verzekering en aansprakelijkheid vormen een structureel probleem binnen de kernenergiesector. Geen enkele private verzekeraar dekt volledig de risico's van een kernramp. Overheden moeten daarom garant staan voor schadeclaims, wat betekent dat de financiële risico's van kernenergie grotendeels op de samenleving worden afgewenteld [12]. Hierdoor ligt de werkelijke kostprijs van kernenergie per kilowattuur aanzienlijk hoger dan de

marktprijs die consumenten betalen. Deze verborgen kosten worden vaak niet meegenomen in standaardkostenanalyses van kernenergieprojecten. Bovendien leidt dit systeem tot moreel risico: exploitanten van kerncentrales worden minder financieel geprikkeld om maximale veiligheid te waarborgen, aangezien de grootste schadeclaims uiteindelijk door de overheid worden gedekt [16].

1.3. Overheidssteun: Onmisbaar voor Kernenergie

Gezien de hoge kapitaalkosten en langetermijnrisico's van kernenergie is structurele overheidssteun onvermijdelijk. In landen zoals Frankrijk en Finland nemen private investeerders deel aan kernenergieprojecten, maar worden hun investeringen ondersteund door overheidswaarborging van leningen en prijsgaranties [13]. Een ander voorbeeld is het Contracts for Difference-model, zoals toegepast bij Hinkley Point C in het Verenigd Koninkrijk. Dit mechanisme garandeert een vaste prijs per megawattuur, waardoor kernenergie aantrekkelijker wordt voor investeerders, terwijl de financiële risico's grotendeels bij de overheid blijven liggen [14]. Daarnaast verstrekke de Amerikaanse federale overheid miljarden dollars aan directe subsidies en staatsleningen voor de bouw van nieuwe reactoren, zoals Vogtle Units 3 & 4. Zonder deze financiële ondersteuning zouden dergelijke projecten niet rendabel zijn geweest [15].

Conclusie

Kernenergie blijft financieel afhankelijk van staatsinterventie, terwijl hernieuwbare energie zich met steeds minder structurele subsidies verder ontwikkelt. De combinatie van hoge kosten, lange bouwtijden maakt kernenergie economisch minder aantrekkelijk dan hernieuwbare alternatieven zoals wind, zon en opslagtechnologieën. Terwijl kernenergie alleen kan bestaan binnen een gereguleerde staatsmarkt, blijven hernieuwbare energiebronnen zich ontwikkelen binnen een competitieve, private sector die steeds goedkoper en efficiënter wordt.

Referenties

1. International Energy Agency. (2023). World Energy Investment 2023.
2. Europese Commissie. (2024). Marktwerving en energiebeleid in Europa.
3. Schumpeter, J. (1942). Capitalism, Socialism and Democracy.
4. Smith, A. (1776). An Inquiry into the Nature and Causes of the Wealth of Nations.
5. Friedman, M., & Becker, G. (1980). Free to Choose: A Personal Statement.
6. Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung (DIW Berlin). (2023). Economie en financiering van kernenergie wereldwijd.
7. WISE Nederland. (2024). De verborgen kosten van kernenergie.
8. International Energy Agency. (2023). Cost Trends in Renewable Energy and Nuclear Energy.
9. Rijksdienst voor Ondernemend Nederland (RVO). (2024). Opslagtechnologieën en netstabiliteit.
10. International Atomic Energy Agency. (2023). Ontmanteling van kerncentrales.
11. Euratom. (2023). Uraniumvoorziening en nucleaire brandstofproductie.
12. BloombergNEF. (2024). De economische risico's van kernenergie.
13. Rijksoverheid. (2024). Publiek-private financiering van energieprojecten.
14. UK Government. (2023). Hinkley Point C and Contracts for Difference (CfD) Mechanisms.
15. U.S. Department of Energy. (2024). Federal Loan Guarantees for Nuclear Energy.
16. Greenpeace. (2024). Financiering kerncentrales: Een straatje zonder eind voor de belastingbetaler



2. Een Evenwichtige Energiemarkt

2.1. Beleidskeuzes en subsidies voor een evenwichtige energiemarkt

Een eerlijke en concurrerende energiemarkt vereist evenwichtige beleidsmaatregelen. Kernenergie wordt vaak gepresenteerd als een stabiele energiebron met lage CO₂-uitstoot, maar de economische verschillen met hernieuwbare energie blijven aanzienlijk. Wereldwijd ontvangt kernenergie aanzienlijke staatssteun om hoge financieringskosten te dekken. Dit kan investeringen in goedkopere en schaalbare alternatieven, zoals wind- en zonne-energie, beperken. Als hernieuwbare energie geen vergelijkbare subsidies ontvangt, kan dit leiden tot marktverstoring, waardoor concurrentie en innovatie worden geremd [6].

Om dit te voorkomen, kunnen beleidsmakers kiezen uit verschillende strategieën:

1. Technologieneutrale subsidies – Toekenning op basis van kosteneffectiviteit en milieu-impact in plaats van politieke voorkeuren, zodat alle energiebronnen op eerlijke wijze worden beoordeeld.
2. Gelijke behandeling van subsidies – Een evenwichtige verdeling van financiële steun voor zowel kernenergie als hernieuwbare energie, waardoor een level playing field ontstaat en marktverstoringen worden voorkomen [2].
3. Tijdelijke staatsgaranties met een afbouwschema – Ondersteuning van kernenergieprojecten om investeringen op gang te helpen zonder langdurige marktverstoring [1].
4. Publiek-private samenwerkingen (PPS) – Partnerschappen waarbij de overheid financiële risico's beperkt en private partijen innovatie en exploitatie stimuleren [3].
5. Fiscale prikkels voor investeerders – Kapitaalstromen naar hernieuwbare energie stimuleren zonder langdurige staatssteun, zodat marktwerking behouden blijft [7].

Door deze maatregelen strategisch in te zetten, kunnen overheden een evenwichtige en duurzame energiemarkt bevorderen, waarin zowel innovatie als economische efficiëntie centraal staan.

2.2. Kapitaalkosten en schaalbaarheid

Een gebalanceerde energiemarkt vereist niet alleen eerlijke concurrentie tussen kernenergie en hernieuwbare bronnen, maar ook een realistische afweging van langetermijnkosten en baten. Volgens het Internationaal Energieagentschap (IEA) zijn de gemiddelde kapitaalkosten per opgewekte megawattuur (MWh) voor kernenergie de afgelopen decennia gestegen door strengere veiligheidsvoorschriften, terwijl zonne- en windenergie respectievelijk met 80% en 60% in kosten zijn gedaald [4].

Daarnaast is kernenergie minder flexibel: reactoren draaien continu en kunnen niet eenvoudig op- of afgeschaald worden, terwijl hernieuwbare energiebronnen beter inspelen op fluctuaties in de elektriciteitsvraag en gecombineerd kunnen worden met opslagtechnologieën [5].

Omdat hernieuwbare energie aantrekkelijk blijft voor private investeerders en kernenergie afhankelijk blijft van overheidssteun, moeten beleidsmakers afwegen of langetermijninvesteringen in kernenergie opwegen tegen het groeipotentieel van hernieuwbare bronnen.

2.3. De Rol van de Markt en Overheidsinterventie

Historisch gezien heeft kernenergie zich nooit ontwikkeld als een volledig marktgedreven sector. De bouw en exploitatie van kerncentrales vereisen enorme kapitaalinvesteringen en lange terugverdientijden, waardoor staatssteun essentieel blijft [8, 9]. Hernieuwbare energiebronnen zoals wind en zon kunnen zonder structurele staatssteun concurreren, terwijl kernenergie afhankelijk blijft van overheidsfinanciering [10, 11]. In landen zoals Frankrijk en Finland worden kerncentrales deels gefinancierd door private investeerders, maar met overheidswaarborgen en minimumprijsafspraken [12]. Hoge initiële kosten, strenge regelgeving en langetermijnrisico's zoals ontmanteling en afvalbeheer maken kernenergie onaantrekkelijk voor private investeerders zonder staatsgaranties [13, 14]. Volgens een uitgebreide studie van het Duitse instituut DIW naar alle 674 ooit gebouwde kerncentrales wereldwijd, kon geen enkele zonder substantiële staatssteun functioneren. Ook leed elke kerncentrale een verlies van 5 miljard euro of meer, waarmee kernenergie structureel onrendabel bleek binnen een vrije markt [12].

2.4. Kernenergie in Nederland: Uitdagingen en Beleidsopties

Nederland staat op een kruispunt in haar energiebeleid. De regering heeft besloten te investeren in nieuwe kerncentrales, maar blijft geconfronteerd met zowel economische als geopolitieke uitdagingen. De bouw van nieuwe centrales vereist miljardeninvesteringen en langdurige staatssteun [12]. Bovendien vergen kerncentrales 15 tot 20 jaar om operationeel te worden, wat hun effectiviteit in de energietransitie vertraagt [13]. Daarnaast wordt de stille uitrol van Small Modular Reactors (SMR's) door Den Haag, provincies en sommige gemeenten, gestimuleerd. Zie voor meer details over SMR's hoofdstuk 7. Een maximale inzet op kernenergie vereist volledige overheidsfinanciering en lange termijninvesteringen, wat economische risico's met zich meebrengt. Een tweede optie is een hybride model waarin kernenergie fungeert als stabilisator in een energiemix met hernieuwbare energie en opslagtechnologieën. Ten slotte kan Nederland kiezen voor minimale kernenergie-investeringen met een maximale focus op wind, zon en opslagtechnologieën.

Conclusie

Om een eerlijke en duurzame energiemarkt te waarborgen, moeten beleidsmakers een evenwicht vinden tussen marktwerking en overheidsinterventie. Kernenergie blijft een stabiele maar kapitaalintensieve optie die zonder substantiële staatssteun moeilijk concurrerend is. Tegelijkertijd winnen hernieuwbare energiebronnen steeds meer terrein dankzij dalende kosten en schaalvoordelen.

Een toekomstbestendig energiebeleid vereist technologie neutrale subsidies, strategische investeringen in opslagtechnologieën en een evenwichtige verdeling van financiële prikkels tussen kernenergie en hernieuwbare bronnen. Door publieke en private middelen effectief te combineren en de flexibiliteit van het elektriciteitssysteem te vergroten, kunnen overheden marktverstoring minimaliseren en innovatie stimuleren.

Het uiteindelijke doel moet zijn om een robuust, concurrerend en duurzaam energiesysteem te creëren waarin langetermijninvesteringen in hernieuwbare energie niet worden belemmerd door onevenwichtige subsidieregelingen. Een strategische en transparante aanpak kan bijdragen aan een energiemarkt die zowel economisch efficiënt als ecologisch verantwoord is.

Referenties

1. International Energy Agency. (2023). World Energy Investment 2023. <https://www.iea.org/reports/world-energy-investment-2023>
2. Europese Commissie. (2024). Marktwerking en energiebeleid in Europa.
3. Rijksoverheid. (2024). Publiek-private financiering van energieprojecten.
4. International Energy Agency. (2023). Cost Trends in Renewable Energy and Nuclear Energy.
5. Rijksdienst voor Ondernemend Nederland. (2024). Opslagtechnologieën en netstabiliteit.
6. BloombergNEF. (2024). Subsidieverdeling en marktverstoring in de energiesector.
7. WindEurope. (2024). Economische voordelen van hernieuwbare energie versus kernenergie.
8. Ministerie van Financiën. (2020). Speelbal of spelverdeler? Concurrentiekracht en nationale veiligheid in een open economie. <https://www.rijksoverheid.nl/documenten/rapporten/2020/09/16/speelbal-of-spelverdeler>
9. Europese Commissie. (2022). Richtsnoeren staatssteun ten behoeve van klimaat, milieubescherming en energie 2022. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/NL/TXT/?uri=CELEX%3A52022XC0218%2801%29>
10. Clingendael Instituut. (2024). Trendrapport: Nationale veiligheid en energievoorziening. <https://www.clingendael.org>
11. International Atomic Energy Agency. (2023). Nuclear Fuel and Geopolitical Risks. <https://www.iaea.org/topics/nuclear-fuel-cycle>
12. Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung. (2023). Wirtschaftlichkeit der Kernenergie weltweit.
13. Rosatom. (2023). Strategic Contracts and Geopolitical Influence through International Nuclear Projects. <https://rosatom.ru>
14. International Atomic Energy Agency. (2023). Uranium Supply and Market Developments. <https://www.iaea.org/topics/uranium-resources>
15. BloombergNEF. (2024). De invloed van sancties op nucleaire energievoorziening.
16. WindEurope. (2024). Belemmeringen voor de energietransitie door investeringen in SMR's. <https://windeurope.org>



3. Geopolitiek en Kernenergie

Kernenergie wordt vaak gepresenteerd als een stabiele energiebron die kan bijdragen aan de energiezekerheid van landen. De werkelijkheid is echter complexer. Achter de economische en technische voordelen gaan aanzienlijke geopolitieke risico's schuil. De afhankelijkheid van een beperkt aantal landen voor uranium, nucleaire technologie en verrijking capaciteit maakt kernenergie kwetsbaar voor internationale spanningen, wat de strategische autonomie van afnemerslanden onder druk zet. Tegelijkertijd benutten sommige grootmachten kernenergie als geopolitiek machtsmiddel via exportkredieten, technologieoverdracht en langlopende contracten. Dit hoofdstuk onderzoekt de geopolitieke afhankelijkheden die gepaard gaan met kernenergie, de risico's die hieruit voortvloeien voor Europa en Nederland, en de mogelijke beleidsopties om deze afhankelijkheden te verkleinen.

3.1. geopolitieke

De energiemarkt functioneert niet als een volledig vrije markt; geopolitieke belangen spelen een bepalende rol. Staten die kernenergie gebruiken, zijn afhankelijk van uraniumimport, nucleaire technologie en geopolitieke stabiliteit. Drie grootmachten domineren deze sector:

- China zet kernenergie strategisch in als exportproduct en beïnvloedt de wereldwijde markt door grootschalige investeringen in reactoren, vaak gefinancierd met goedkope staatsleningen [1].
- Rusland gebruikt kerntechnologie als geopolitiek instrument. Rosatom is een van de weinige bedrijven die kerncentrales 'turnkey' kan leveren, inclusief brandstofvoorziening en operationele ondersteuning [2].
- De Verenigde Staten herzien recent hun internationale samenwerkingsverbanden, wat ex-bondgenoten dwingt hun energieafhankelijkheid opnieuw te evalueren [3].

Deze geopolitieke dynamiek plaatst kernenergie in een uitzonderingspositie. Hoewel kernenergie als middel voor energieonafhankelijkheid wordt gepresenteerd, creëert het in werkelijkheid nieuwe afhankelijkheden die sterk worden beïnvloed door geopolitieke machtsverhoudingen. Energie speelt een cruciale rol in de mondiale machtsverhoudingen. De transitie naar een duurzamere energiemix gaat gepaard met complexe economische en geopolitieke vraagstukken, waarbij kernenergie een strategisch discussiepunt blijft. Hoewel kernenergie vaak wordt gepresenteerd als een stabiele energiebron, introduceert het nieuwe afhankelijkheden die in tijden van geopolitieke spanningen problematisch kunnen zijn. Europese kerncentrales die afhankelijk zijn van Russische brandstof en technologie lopen het risico operationele verstoringen te ondervinden bij sancties of geopolitieke escalaties [4]. Binnen de EU en NAVO groeit het besef dat strategische autonomie en energiezekerheid vereist dat deze afhankelijkheden worden verminderd. Dit heeft geleid tot oproepen om te investeren in lokale opwek van hernieuwbare energie en in technologieën die de flexibiliteit van het elektriciteitsnet vergroten [5,6]. Grootschalige nucleaire projecten, die gepaard gaan met geopolitieke afhankelijkheden, kunnen hierdoor op gespannen voet staan met bredere Europese doelstellingen op het gebied van energieonafhankelijkheid en veiligheid.

3.2. Afhankelijkheid van Uraniumimport

Landen die kernenergie inzetten, zijn in hoge mate afhankelijk van een beperkt aantal uraniumleveranciers. Kazachstan, Canada en Australië zijn samen verantwoordelijk voor meer dan 60% van de wereldwijde uraniumproductie [4]. Europese landen, waaronder Nederland, importeren vrijwel al hun uranium en zijn daardoor kwetsbaar voor geopolitieke spanningen en handelsbeperkingen. Daarnaast heeft Rusland via Rosatom een dominante rol in de uraniumverrijking en brandstofverwerking. Hierdoor zijn zelfs landen zonder Russische reactoren deels afhankelijk van Russische nucleaire brandstof, waardoor sancties tegen Rusland direct gevolgen kunnen hebben voor de operationele capaciteit van westerse kerncentrales [5,7].

3.3. Opslag radioactief afval

Een bijkomende structurele uitdaging is de langdurige en kostbare verantwoordelijkheid voor de veilige opslag van hoogradioactief afval, waarvan de financiële lasten grotendeels op overheden drukken en zelden volledig worden

meegenomen in economische analyses [4]. Het verminderen van deze geopolitieke kwetsbaarheden vraagt om versterkte investeringen in alternatieven zoals batterijopslag, waterstof en slimme netwerken [6,8], die kunnen bijdragen aan een veerkrachtigere en minder geopolitiek afhankelijke energiemix.

3.4. Geopolitieke afhankelijkheden van SMR technologie

De inzet van SMR-technologie brengt geopolitieke afhankelijkheden met zich mee, vooral op het gebied van splijtstoflevering. De meeste SMR's vereisen High-Assay Low-Enriched Uranium (HALEU), dat momenteel slechts door een beperkt aantal landen wordt geproduceerd, waaronder Rusland en de VS [9]. Door recente geopolitieke ontwikkelingen is de afhankelijkheid van deze landen niet gewenst. Nederland en de EU zoeken daarom actief naar alternatieve leveranciers om de afhankelijkheid van geopolitiek gevoelige landen te verminderen. Hierbij wordt onder meer samengewerkt met landen als Canada en Australië, die plannen hebben aangekondigd om hun productie van HALEU op te schalen [10,11]. Daarnaast wordt binnen Europa gekeken naar een consortium van Franse en Finse nucleaire instellingen die de ontwikkeling van eigen verrijkingsfaciliteiten onderzoeken [2]. Recente ontwikkelingen tonen aan dat de VS in 2024 zes bedrijven heeft geselecteerd om de productie van HALEU-brandstof op te schalen [12]. Ook TerraPower werkt aan de ontwikkeling van een HALEU-leveringsketen voor zijn geavanceerde reactoren. Deze initiatieven kunnen op termijn bijdragen aan de Nederlandse strategie om minder afhankelijk te worden van Russische en Amerikaanse leveranciers.

3.5. Technologische Afhankelijkheid en Kernenergie als Geopolitiek

Machtsmiddel Kernenergie brengt strategische afhankelijkheden met zich mee, met name op het gebied van grondstoffen, technologie en geopolitieke invloed. Europese landen zijn bij de bouw en exploitatie van kerncentrales afhankelijk van buitenlandse bedrijven zoals EDF uit Frankrijk, Westinghouse uit de Verenigde Staten en KEPCO uit Zuid-Korea [13,14]. Politieke spanningen of handelssancties kunnen de levering van cruciale reactoronderdelen beïnvloeden [13]. Daarnaast gebruiken Rusland en China kernenergie actief als geopolitiek machtsmiddel. Rusland levert via Rosatom 'turnkey' kerncentrales en langdurige energiecontracten, waarmee het geopolitieke afhankelijkheden creëert [6,15]. China financiert reactoren via het Belt and Road Initiative en vergroot zo zijn invloed in opkomende markten [9,2]. Door deze afhankelijkheden verkleint kernenergie de strategische autonomie van West-Europese landen eerder dan dat deze wordt vergroot. De VS speelt daarbij een onzekere rol in de kernenergiemarkt, wat Europese landen ertoe dwingt alternatieven te zoeken bij Chinese en Russische technologiebedrijven, met alle bijbehorende veiligheids- en soevereiniteitsrisico's [10].

3.6. Veiligheidsrisico's en Nucleaire Proliferatie

Kernenergieprojecten kunnen een dekmantel vormen voor nucleaire proliferatie, vooral in landen met beperkte controlemechanismen. De verspreiding van nucleaire technologie vergroot de kans op geopolitieke spanningen en mogelijk militair misbruik. • Iran heeft een civiel kernenergieprogramma, maar wordt geconfronteerd met zware sancties vanwege verdenking van nucleaire wapenontwikkeling [9]. • Noord-Korea begon met een civiel nucleair programma voordat het kernwapens ontwikkelde [2]. • Saoedi-Arabië en andere opkomende kernenergieprogramma's worden kritisch gevolgd vanwege mogelijke militaire implicaties [15].

3.7. Strategische Gevolgen voor Europa

Het protectionistische beleid van president Trump ondermijnt internationale samenwerking op nucleair gebied, waarbij exportrestricties en een protectionistische houding investeringen in kernenergie compliceren [8,11]. Dit dwingt Europa tot heroverwegingen over strategische energieonafhankelijkheid en alternatieve toeleveringsketens. Door de onzekere geopolitieke situatie en de koerswijzigingen onder Trump is Europa genoodzaakt haar energiebeleid te herzien en alternatieve strategische allianties te smeden, zoals nauwere samenwerking binnen Euratom en met bondgenoten zoals Canada en Australië [11].

Conclusie

De geopolitieke afhankelijkheden binnen de kernenergiesector ondermijnen het idee van energieonafhankelijkheid en bevestigen dat kernenergie geen volledig soevereine oplossing biedt. Hoewel landen kernenergie promoten als een stabiele energiebron, ontstaan er nieuwe afhankelijkheden van uraniumleveranciers, technologische partners en geopolitieke machtsblokken. De dominantie van China, Rusland en de Verenigde Staten binnen deze sector dwingt andere landen tot strategische keuzes die niet alleen economische, maar ook politieke en veiligheidsimplicaties hebben. Voor Europa brengt deze situatie aanzienlijke geopolitieke risico's met zich mee. De concentratie van uraniumlevering en nucleaire technologie in een beperkt aantal landen, waaronder Rusland, vergroot de kwetsbaarheid van de Europese energievoorziening, vooral in tijden van internationale spanningen. Tegelijkertijd staat deze afhankelijkheid haaks op het streven van de EU naar strategische autonomie en energieonafhankelijkheid. Hoewel SMR-technologie (Small Modular Reactors) in de toekomst kan bijdragen aan de energietransitie, creëert deze op korte termijn vergelijkbare afhankelijkheden, met name op het gebied van splijtstofvoorziening. Overheidsingrijpen blijft daarom noodzakelijk om een balans te vinden tussen energiezekerheid, geopolitieke autonomie en de risico's van nucleaire proliferatie. Om deze risico's te beperken, moet Europa inzetten op de diversificatie van leveranciers, de versterking van de eigen nucleaire ketens en vooral op schaalbare alternatieven zoals hernieuwbare energie en

energieopslag. Alleen door deze maatregelen kan de EU haar energiezekerheid versterken en haar kwetsbaarheid voor geopolitieke druk verminderen.

Referenties

1. International Energy Agency. (2023). World Energy Investment 2023. <https://www.iea.org/reports/world-energy-investment-2023>
2. International Energy Agency. (2023). World Energy Investment 2023. <https://www.iea.org/reports/world-energy-investment-2023>
3. Clingendael Instituut. (2024). Geopolitieke afhankelijkheden in de energiemarkt. <https://www.clingendael.org>
4. Euratom. (2023). Nucleaire brandstof en geopolitieke risico's.
5. International Atomic Energy Agency. (2023). Uraniumvoorziening en marktontwikkeling. <https://www.iaea.org/topics/uranium-resources>
6. BloombergNEF. (2024). De invloed van sancties op nucleaire energievoorziening.
7. WindEurope. (2024). Geopolitieke impact van kernenergiecontracten. <https://windeurope.org>
8. World Nuclear Association. (2024). Nuclear Fuel Report: Global Market Trends. <https://www.world-nuclear.org>
9. TNO. (2024). Opslagtechnologieën en netstabiliteit. <https://www.tno.nl>
10. International Renewable Energy Agency. (2023). De geopolitieke invloed van China en Rusland op kernenergie. <https://www.irena.org>
11. Rijksdienst voor Ondernemend Nederland. (2024). Technologische afhankelijkheid en strategische risico's van kernenergie. <https://www.rvo.nl>
12. Europese Commissie. (2025). Strategisch plan voor alternatieve HALEU-leveranciers. <https://ec.europa.eu>
13. U.S. Department of Energy. (2024). HALEU Availability and Supply Chain Initiatives. <https://www.energy.gov>
14. EDF. (2023). Internationale samenwerking kernenergie. <https://www.edf.fr>
15. KEPCO. (2023). Annual Report: Global Partnerships in Nuclear Energy. <https://home.kepco.co.kr>



4. Opslagtechnologie en Netstabiliteit

De energietransitie vereist nieuwe opslagtechnologieën om fluctuaties in de hernieuwbare energieproductie op te vangen en de netstabiliteit te waarborgen. Terwijl kernenergie een stabiele basislast biedt, maken innovatieve opslagmethoden een flexibeler energiesysteem mogelijk. Dankzij energieopslag kunnen zowel kerncentrales als zonne- en windparken efficiënter opereren en piekbelastingen beter worden opgevangen. Hier volgen enkele van de vele lopende initiatieven en bewezen technologieën. De verwachting is dat deze lijst in de toekomst verder zal groeien.

4.1. Pompaccumulatie

Pompaccumulatiecentrales (waterbekkens) zijn een van de meest efficiënte methoden voor grootschalige energieopslag. In Nederland wordt gewerkt aan het Delta21-project, waarbij een valmeer van 20 km² bij de Maasvlakte dient als een grootschalige ‘waterbatterij’ met een opslagcapaciteit van 34 GWh en een vermogen van 1,8 GW. De kosten worden geschat op €50-100 per MWh, wat het een concurrerende opslagmethode maakt.[1] In Schotland wordt een ondergronds pompaccumulatieproject uitgebreid met 600 MW extra capaciteit.[2]

4.2. Batterijopslag

Batterijtechnologie evolueert snel en wordt steeds goedkoper. Lithium-ion en solid-state batterijen maken het mogelijk om schommelingen in zonne- en windenergie op te vangen. Inmiddels worden grote batterijparken operationeel en beginnen sommige landen batterijen grootschalig in te zetten om netstabiliteit te verbeteren. In Australië draait de Hornsdale Power Reserve, een lithium-ionbatterijpark van 150 MW / 193,5 MWh, dat helpt bij netbalancing. In Nederland wordt gewerkt aan O-PAC, een ondergrondse batterijcentrale van 1,4 GW.[3] In Zwitserland is de Nant de Drance-centrale (900 MW) operationeel als een van de grootste waterbatterijen.[4] De kosten voor batterijopslag variëren tussen €150-250 per MWh, afhankelijk van de schaal en technologie.[5]

4.3. Waterstofopslag

Groene waterstof biedt een oplossing voor langdurige energieopslag. Hernieuwbare energie kan worden omgezet in groene waterstof, wat kan dienen als een lange termijn opslagmethode bij hernieuwbare energiebronnen, maar ook om kernenergie flexibeler te maken.[7]

4.4. Vehicle-to-Grid (V2G)

Elektrische auto's kunnen dienen als gedistribueerde opslag door energie terug te leveren aan het net. In Utrecht is een V2G-project gestart met 500 Renault 5 E-Tech voertuigen, die samen tot 10% van de benodigde netflexibiliteit in de regio Utrecht kunnen leveren.[8] In Arnhem loopt een experiment met 15 slimme laadpalen en een totale teruglevercapaciteit van 150 kW.[9] Internationale projecten, zoals Frederiksberg Forsyning in Denemarken en het V2G Balearen Project in Spanje, tonen het potentieel van V2G-technologie.[10]

4.5. Opslag als voordeel voor kernenergie

Traditionele kerncentrales hebben een constante energieproductie, wat soms leidt tot overproductie bij lage vraag. Door efficiënte opslagtechnologieën kan kernenergie flexibeler worden ingezet, waardoor het net minder wordt belast en kerncentrales economisch efficiënter kunnen opereren.[11]

4.6. Alternatieve Opslagtechnieken

- Vliegwielen: In Amsterdam beheert S4 Energy een 3 MW vliegwielininstallatie voor snelle energieopslag en -afgifte.[12]
- Thermische opslag: In Middenmeer wordt restwarmte opgeslagen in een ondergronds aquifer met een capaciteit van 20 MWth.[13]
- Offshore energieopslag: Het Nederlandse OESTER-project onderzoekt opslagoplossingen geïntegreerd in offshore windparken.[14]

4.7. Slimme netwerken en vraagsturing

Digitale technologieën maken dynamische prijsmodellen mogelijk, waarbij piekvraag en overproductie efficiënter worden beheerd. Dit voorkomt verspilling en maakt een beter gebruik van beschikbare energiebronnen mogelijk zonder de noodzaak van grootschalige kerncentrales.[15]

Conclusie

De snelle ontwikkeling van opslagtechnologieën vergroot de flexibiliteit en kostenefficiëntie van het energiesysteem. Batterijopslag is in sommige markten al economisch rendabel, terwijl pompaccumulatie, waterstof en innovatieve oplossingen zoals vehicle-to-grid en slimme netwerken op grotere schaal in opkomst zijn. Deze technologieën maken niet alleen hernieuwbare energiebronnen zoals wind en zon stabiel, maar verbeteren ook de inzetbaarheid van kernenergie. De dalende kosten en bredere toepassing van opslagoplossingen maken het mogelijk om de afhankelijkheid van continue basislast, zoals kernenergie, te verkleinen. Investerings in opslagcapaciteit vormen daarmee een essentieel fundament voor een toekomstbestendig, flexibel en minder gecentraliseerd energiesysteem.

Referenties:

1. Delta21. (2025). Projectdocumentatie en energieopslaganalyse.
2. WindEurope. (2024). Schotse pompaccumulatie-uitbreiding.
3. Tesla. (2023). Hornsdale Power Reserve en batterijopslag in Australië. [cite turn0search1](#)
4. Innovation Origins. (2024). Waterbatterijen in Zwitserland.
5. International Energy Agency. (2023). Kostenontwikkelingen in batterijopslag.
6. North2. (2024). Waterstofproductie en energieopslag.
7. BloombergNEF. (2024). Kostenanalyse van waterstofopslag.
8. Renault Group. (2025). Vehicle-to-Grid in Utrecht.
9. Gemeente Arnhem. (2024). Smart Grid en V2G-projecten.
10. European Commission. (2024). V2G-projecten in Denemarken en Spanje.
11. International Energy Agency. (2024). Opslagtechnologieën en kernenergie.
12. S4 Energy. (2024). Vliegwielttechnologie in Nederland.
13. ECW Energy. (2024). Thermische opslag in Middenmeer.
14. TNO. (2025). Offshore energieopslag in windparken.
15. Clingendael Instituut. (2024). Slimme netwerken en vraagsturing.



5. Kosten Energiebronnen 2050

De energietransitie vereist een afweging tussen verschillende energiebronnen op basis van kosten, leveringszekerheid en flexibiliteit. Kernenergie wordt vaak gepresenteerd als een stabiele en schone energiebron, maar brengt hoge kosten, lange ontwikkeltijden en afhankelijkheid van staatssteun met zich mee. Tegelijkertijd worden hernieuwbare energiebronnen zoals wind- en zonne-energie steeds kostenefficiënter en flexibeler door technologische vooruitgang en schaalvoordelen. Dit hoofdstuk analyseert de totale kosten van kernenergie, vergelijkt deze met alternatieve energieopties en onderzoekt de rol van opslagtechnologieën en netstabiliteit.

5.1. Kostenvergelijking tussen kernenergie en hernieuwbare bronnen

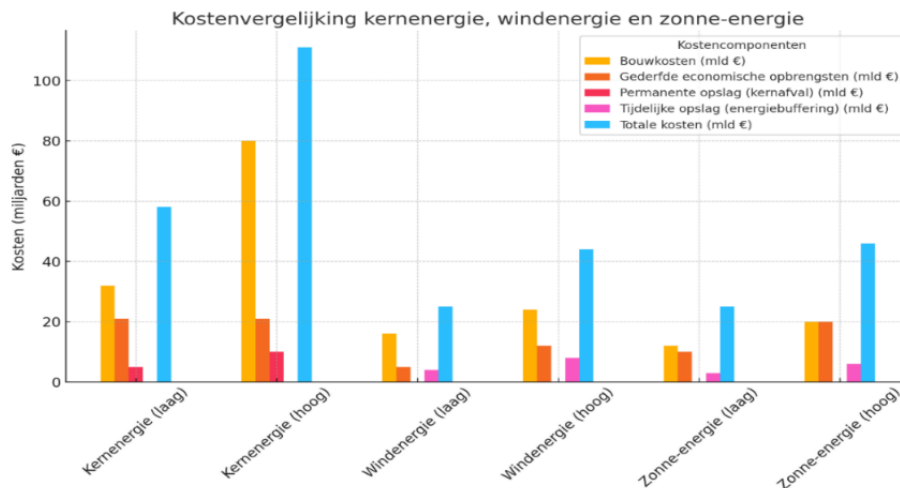
Bij de evaluatie van verschillende energiebronnen spelen kosten een cruciale rol. Kernenergie heeft traditioneel hoge bouwkosten en lange bouwzeiten, maar biedt een stabiele elektriciteitsvoorziening zonder de noodzaak van tijdelijke opslag [1, 2]. Wind- en zonne-energie zijn sneller en goedkoper te bouwen, maar vereisen opslag om fluctuaties in de elektriciteitsproductie te balanceren [3].

5.2. Bouwkosten en infrastructuur

De bouw van een kerncentrale vergt enorme kapitaalinvesteringen, variërend van 10 tot 20 miljard euro per centrale. De gemiddelde bouwzeit bedraagt 15-20 jaar, waardoor rendement op investering pas na decennia zichtbaar wordt [1, 2]. De aanleg van wind- en zonneparken vergt minder kapitaal en heeft kortere realisatietijden. Wind op zee kost gemiddeld €35-€55 per megawattuur (MWh) en zonneparken €30-€70 per MWh, waarmee ze financieel aantrekkelijker zijn dan kernenergie (€90-€160 per MWh) [3]. Uit Figuur 1 blijkt dat kernenergie aanzienlijk duurder is in aanleg, vooral door de lange bouwzeit en hoge initiële investeringen. Daarentegen zijn wind- en zonne-energie goedkoper te realiseren, maar brengen ze extra kosten met zich mee door de noodzaak van tijdelijke opslag, zoals batterijen of vraagsturing binnen het elektriciteitsnet [4]. Bovendien is geen enkele kerncentrale ter wereld zonder staatssteun gerealiseerd. Volgens DIW Berlin leed elke kerncentrale een gemiddeld verlies van 5 miljard euro en was volledige marktwerking nooit mogelijk [5]. Naast de hoge bouwkosten brengen kerncentrales ook aanzienlijke langetermijnkosten met zich mee voor de ontmanteling van installaties en het beheer van radioactief afval [6]. Deze uitgaven worden vaak pas na tientallen jaren zichtbaar en worden grotendeels door overheden gedragen [6, 7]. Daarnaast worden indirecte kosten, zoals voor verzekeringen en afvalbeheer, vaak onderschat, wat een extra financiële last vormt voor toekomstige generaties [7, 8].

5.3. Opslagbehoeften en netstabiliteit

Een fundamenteel verschil tussen kernenergie en hernieuwbare energie is de behoefte aan opslag. Kernenergie levert een constante stroom en heeft daardoor geen tijdelijke opslag nodig om schommelingen op te vangen, al kan buffering tijdens daluren nuttig zijn [2, 9]. Wind- en zonne-energie produceren daarentegen variabel, waardoor tijdelijke buffering noodzakelijk is om tekorten of overschotten in de elektriciteitsvoorziening te balanceren [3]. Tijdelijke opslagtechnieken, zoals batterijopslag en waterstofproductie, zijn daarom essentieel om de variabiliteit van hernieuwbare energiebronnen op te vangen [10, 11]. De kosten van deze technologieën zijn sterk afhankelijk van technologische ontwikkelingen en schaalgrootte [12]. Zoals blijkt uit Tabel 1 spelen investeringen in opslagtechnologieën een doorslaggevende rol bij de succesvolle integratie van hernieuwbare energie [13, 14].



Figuur 1: Kostenvergelijking kernenergie, windenergie en zonne-energie

Tabel 1: Kostenvergelijking kern-, wind- en zonne-energie (in miljarden euro's voor 4,8 GW capaciteit)

Kostencomponent	Kernenergie (laag-hoog)	Windenergie (laag-hoog)	Zonne-energie (laag-hoog)
Bouwkosten	32 - 80	16 - 24	12 - 20
Gederfde economische opbrengsten	21 - 21	5 - 12	10 - 20
Permanente opslag (kernafval)	5 - 10		-
Energie opslag	-	4 - 8	3 - 6
Totale kosten	58 - 111	25 - 44	25 - 46

Opmerking: De kosten zijn gebaseerd op schattingen en kunnen variëren afhankelijk van specifieke projectomstandigheden.

5.4. Rekenvoorbeeld energiemix-2050 met en zonder kernenergie

Als voorbeeld berekenen we de kosten van twee scenario's: één waarbij het energiesysteem in 2050 volledig uit wind- en zonne-energie bestaat, en één waarin wind, zon én kernenergie gecombineerd worden. Beide scenario's worden doorgerekend alsof ze in 2050 volledig operationeel moeten zijn. Deze vergelijking laat zien welke rol kernenergie kan spelen binnen de toekomstige energiemix. Het is belangrijk om te benadrukken dat dit een hypothetische analyse betreft, waarbij we geen rekening houden met de geleidelijke opbouw naar 2050 (bijvoorbeeld het gefaseerd plaatsen van windturbines). Voor de berekeningen hanteren we kosten op basis van prijsniveaus in 2025.

In het Nederlandse energiesysteem van 2050 zal naar verwachting 85% tot 90% van de elektriciteit worden opgewekt met zon en wind. Dit betekent dat een volledig zon-wind-systeem, zonder kernenergie, een oplossing moet bieden voor perioden waarin zon en wind gedurende maximaal twee maanden onvoldoende elektriciteit leveren. Voor deze perioden is seizoensopslag noodzakelijk [15]. De resterende 10% tot 15% van de elektriciteit kan worden geleverd door kernenergie.

In een volledig geëlektrificeerde economie wordt de jaarlijkse elektriciteitsvraag in Nederland in 2050 geschat op 400 tot 500 TWh [16]. In een scenario met alleen zon en wind is voor de winterperiode circa 60 tot 80 TWh aan seizoensopslag nodig, afhankelijk van de weersomstandigheden [17]. Momenteel is waterstofopslag de enige realistische technologie voor opslag op deze schaal [18]. Om netto 70 TWh elektriciteit te kunnen leveren uit waterstofopslag is, vanwege het lage rendement van het proces (30-50% van elektriciteit → waterstof → elektriciteit), ongeveer 140 TWh aan overtollige productie uit zon en wind vereist [19].

5.5. Kosten van een volledig zon-wind-systeem inclusief opslag:

Zon- en windinfrastructuur (85-90% van de vraag): circa €180-200 miljard [20].

Seizoensopslag (elektrolyzers, waterstofopslag, herconversie): circa €60-95 miljard [22].

Totale kosten volledig zon-wind-systeem met opslag: €240 tot €295 miljard.

5.6. Scenario met 15% kernenergie en minder opslag:

In een alternatief scenario, waarin 15% van de elektriciteit uit kernenergie komt en 85% uit zon en wind, kan de benodigde seizoensopslag met circa 25% tot 30% worden verminderd [22].

Zon- en windinfrastructuur (85% van de vraag): circa €160-170 miljard [20].

Kerncentrales (15% van de vraag, inclusief bouw en ontmanteling): circa €30-40 miljard [9].

Verminderde opslagbehoefte: circa €45-65 miljard [21].

Totale kosten zon-wind + 15% kernenergie + opslag: €235 tot €275 miljard.

Tabel 2 Kosten rekenvoorbeeld

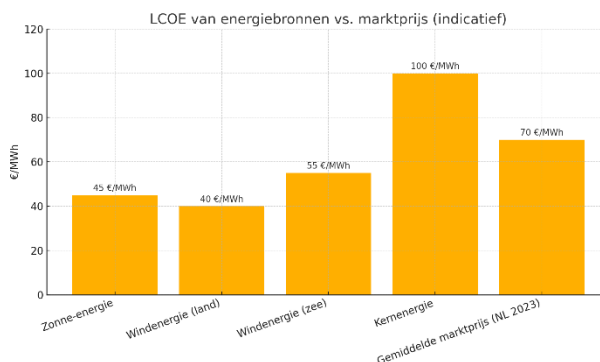
Scenario	Zon & wind	Kernenergie	Opslag	Totale systeemkosten
100% zon-wind + opslag	€180-200 mld	-	€60-95 mld	€240-295 mld
85% zon-wind + 15% kern + opslag	€160-170 mld	€30-40 mld	€45-65 mld	€235-275 mld

De kostenverschillen tussen beide scenario's zijn beperkt. Het scenario met kernenergie is circa 5% tot 10% goedkoper, vooral door de lagere opslagbehoefte. Toch blijft grootschalige seizoensopslag noodzakelijk in beide gevallen, aangezien kernenergie slechts een deel van de energievraag in de winter kan dekken [22, 23].

5.7. Energiebronnen vs. Marktprijs

De figuur 2 vergelijkt de geschatte gemiddelde productiecosten van verschillende energiebronnen met de huidige marktprijs van elektriciteit. Deze vergelijking is relevant om te begrijpen waarom bepaalde technologieën aantrekkelijker zijn voor investeerders dan andere.

De grafiek toont indicatief dat de productiecosten, uitgedrukt als de Levelized Cost of Electricity (LCOE) [30] — de gemiddelde kostprijs per opgewekte megawattuur elektriciteit, inclusief investerings-, operationele en kapitaalkosten over de levensduur van de centrale — van kernenergie aanzienlijk hoger liggen (ca. €100/MWh) dan zowel de marktprijs (ca. €70/MWh) als de kosten van hernieuwbare energie zoals zon (€45/MWh) en wind op land (€40/MWh). Dit maakt duidelijk dat kernenergie zonder aanvullende steun of garanties nauwelijks rendabel is voor private investeerders. In tegenstelling tot zon en wind, die onder de marktprijs produceren, kan kernenergie haar hogere vaste kosten niet terugverdienen via vrije marktmechanismen.



Figuur 2. LCOE van energiebronnen vs. marktprijs (indicatief)

5.8. Ontwikkeling van bouwtijd en kosten voor energieopwekking en opslag

De bouwtijd en kostenontwikkeling van verschillende energieopwekkingstechnologieën en energieopslag laten duidelijke trends zien over de afgelopen jaren.

Kernenergieprojecten kennen doorgaans lange doorlooptijden. De realisatie van een kerncentrale vergt gemiddeld tussen de 15 en 20 jaar. Bovendien stijgen de bouwkosten van kerncentrales jaarlijks met circa 3% [24], mede door steeds strengere veiligheidseisen, technologische complexiteit en regelmatige vertragingen tijdens de bouwphase [25]. Duurzame technologieën zoals wind- en zonne-energie worden daarentegen aanzienlijk sneller gerealiseerd, met een gemiddelde bouwtijd van 3 tot 5 jaar [26]. Daarnaast laten deze technologieën een structurele kostendaling zien van gemiddeld 8% per jaar [27]. Dit is grotendeels toe te schrijven aan technologische innovatie, schaalvergroting en optimalisatie van productie- en installatieprocessen.

Ook de kosten voor energieopslag zijn sterk gedaald. Met name de prijs van lithium-ion batterijen is sinds 2010 jaarlijks met ruim 10% afgenomen [28]. Deze trend wordt verklaard door verbeterde batterij-efficiëntie, een toename van de wereldwijde productiecapaciteit en een groeiende markt voor elektrische voertuigen en grootschalige netopslag [29].

Tabel 3. De belangrijkste kengetallen voor bouwtijd en kostenontwikkeling kernenergie.

Technologie	Bouwtijd (gemiddeld)	Kostenontwikkeling per jaar
Kernenergie	15-20 jaar	+3%
Wind- en zonne-energie	3-5 jaar	-8%
Energieopslag (batterijen) -		-10% of meer

Conclusie

De analyse van beide scenario's laat zien dat het verschil in totale kosten tussen een volledig zon-wind-systeem en een mix met 15% kernenergie beperkt blijft. Het scenario met kernenergie is circa 5% tot 10% goedkoper, voornamelijk door de reductie in benodigde seizoensopslag. Echter, zelfs met kernenergie blijft grootschalige opslag essentieel om perioden van lage productie uit zon en wind op te vangen.

Kernenergie kent als nadeel dat de bouwtijd aanzienlijk langer is (15 tot 20 jaar) en dat de kosten structureel met circa 3% per jaar stijgen door oplopende veiligheids- en bouwvereisten. Dit maakt kernenergie financieel minder flexibel en afhankelijk van langetermijnplanning en overheidssteun.

Wind- en zonne-energie bieden daarentegen kortere bouw tijden (3 tot 5 jaar) en profiteren van dalende kosten met gemiddeld 8% per jaar, mede door schaalvergroting en technologische innovatie. De kosten voor energieopslag – met name lithium-ion batterijen – dalen zelfs met meer dan 10% per jaar. Deze dalingen verhogen de economische aantrekkelijkheid van hernieuwbare energie, zeker in combinatie met investeringen in opslagoplossingen zoals batterijen en waterstof.

Hoewel kernenergie een bijdrage kan leveren aan de diversificatie van de energiemix, blijkt uit de berekeningen dat het geen gamechanger is in termen van kostenbesparing. Het verlaagt de opslagbehoefte, maar elimineert deze niet. Beide scenario's blijven afhankelijk van forse investeringen in seizoensopslag voor de wintermaanden.

Daarom lijkt een strategie waarin prioriteit wordt gegeven aan hernieuwbare energiebronnen – ondersteund door flexibele en steeds goedkoper wordende opslagtechnologieën – financieel aantrekkelijker en beter schaalbaar. Zeker gezien de snelle bouw tijd en de dalende kosten van wind- en zonne-energie, biedt deze aanpak ook meer wendbaarheid om tijdig in te spelen op veranderende energievraag en innovaties in opslagtechnologie.

De sleutel tot een robuust en toekomstbestendig energiesysteem ligt dan ook niet uitsluitend bij kernenergie, maar in de combinatie van grootschalige inzet van wind- en zonne-energie, in combinatie met flexibele opslagoplossingen en slimme netwerken.

Referenties

1. International Energy Agency. (2023). World Energy Investment 2023. <https://www.iea.org/reports/world-energy-investment-2023> Hoofdstuk 4, pagina 137.
2. International Energy Agency. (2023). Flexibility of Nuclear Power and Storage. <https://www.iea.org/reports/nuclear-power-and-secure-energy-transitions> Hoofdstuk 2, pagina 25.
3. Europese Commissie. (2024). Kostenvergelijking energieopwekking in Europa. Hoofdstuk 5, tabel 5.1, pagina 48.
4. Rijksdienst voor Ondernemend Nederland. (2023). Opslagtechnologieën en netstabiliteit. <https://www.rvo.nl> Hoofdstuk 3, pagina 27
5. Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung. (2023). Economische haalbaarheid van kernenergie wereldwijd. Hoofdstuk 6, pagina 62.
6. Internationaal Atoomenergieagentschap. (2023). Kosten kernenergie en afvalbeheer. <https://www.iaea.org> Hoofdstuk 4, pagina 35.
7. Greenpeace. (2024). Financiering kerncentrales: een straatje zonder eind voor de belastingbetaler. <https://www.greenpeace.org/belgium/nl/persbericht/57872/nieuw-rapport-financiering-kerncentrales-is-straatje-zonder-eind-voor-belastingbetaler/> Hoofdstuk 3, pagina 21.
8. WISE Nederland. (2024). De verborgen kosten van kernenergie. <https://www.wise.nl> Hoofdstuk 2, pagina 14.
9. Milieu Centraal. (2023). Kosten en baten van zonne- en windenergie. <https://www.milieucentraal.nl> Hoofdstuk 5, pagina 40.
10. Energy Storage NL. (2024). Batterijopslag als alternatief voor kernenergie. <https://www.energystoragenl.nl>
11. TNO. (2024). Waterstof als energieopslag. <https://www.tno.nl>
12. BloombergNEF. (2024). De marktontwikkeling van grootschalige energieopslag. <https://about.bnef.com>
13. Clingendael Instituut. (2024). Slimme netwerken en energie-efficiëntie. <https://www.clingendael.org>
14. Energy Storage Europe. (2024). Opslagtechnologie en de toekomst van energievoorziening. <https://www.esexpo.com>
15. International Energy Agency. (2023). World Energy Outlook 2023. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023> Hoofdstuk 6, sectie "Electricity Security", pagina 294.
16. Rijksdienst voor Ondernemend Nederland. (2024). Energiesysteem Nederland 2050. <https://www.rvo.nl> Hoofdstuk 3, pagina 45.

17. TNO. (2024). Dunkelflaute-scenario's in Noordwest-Europa. <https://www.tno.nl> Hoofdstuk 4, pagina 32.
18. North2. (2024). Grootschalige waterstofopslag en conversie in Nederland. <https://www.north2.eu> Hoofdstuk 2, pagina 15.
19. BloombergNEF. (2024). Waterstofketens en rendementen. <https://about.bnef.com> Hoofdstuk 5, pagina 50.
20. WindEurope. (2024). Investeringskosten offshore wind en zonne-energie. <https://windeurope.org> Hoofdstuk 3, pagina 22.
21. Energy Storage NL. (2024). Kostenraming waterstofopslag in zoutcavernes. <https://www.energystoragenl.nl> Hoofdstuk 4, pagina 30.
22. Clingendael Instituut. (2024). Kernenergie en systeemefficiëntie in de energietransitie. <https://www.clingendael.org> Hoofdstuk 6, pagina 55.
23. Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung. (2023). Financiële en structurele kosten kerncentrales in Europa.
24. Lovering, J. R., Yip, A., & Nordhaus, T. (2016). Historical construction costs of global nuclear power reactors. *Energy Policy*, 91, 371-382. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2016.01.011>
25. Sovacool, B. K., Gilbert, A., & Nugent, D. (2014). Risk, innovation, electricity infrastructure and construction cost overruns: Testing six hypotheses. *Energy*, 74, 906-917. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.07.070>
26. International Renewable Energy Agency. (2023). Renewable Power Generation Costs in 2022. <https://www.irena.org/publications/2023/Jul/Renewable-Power-Generation-Costs-in-2022>
27. BloombergNEF. (2023). New Energy Outlook 2023. <https://about.bnef.com/new-energy-outlook/>
28. BloombergNEF. (2023). Battery Price Survey 2023. <https://about.bnef.com>
29. International Energy Agency. (2023). Global EV Outlook 2023. <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2023>
30. International Energy Agency (IEA). (2023). Projected Costs of Generating Electricity 2023. Paris: OECD/IEA.



6. Beleidsaanbevelingen en Toekomstscenario's

De energietransitie vraagt om strategische beleidskeuzes die niet alleen economisch verantwoord zijn, maar ook geopolitieke stabiliteit waarborgen. Kernenergie, hernieuwbare energie en opslagtechnologieën spelen hierbij elk een eigen rol, afhankelijk van langetermijnvisies en investeringsprioriteiten. Dit hoofdstuk bespreekt mogelijke strategieën en beleidsopties voor Nederland en Europa om een veerkrachtig en duurzaam energiesysteem te realiseren.

6.1. Drie Mogelijke Strategieën voor Nederland

Nederland kan verschillende beleidsrichtingen volgen op het gebied van kernenergie en hernieuwbare energie. Maximale inzet op kernenergie: Een optie is de grootschalige bouw van meerdere kerncentrales, gecombineerd met de uitrol van Small Modular Reactors (SMR's) om een stabiele basislast te garanderen. Dit vergt volledige overheidsfinanciering vanwege de hoge kapitaalkosten en lange bouw tijden. Echter, deze strategie brengt aanzienlijke risico's met zich mee, zoals hoge kosten, afhankelijkheid van buitenlandse uraniumleveranciers en de mogelijke verdringing van investeringen in hernieuwbare energie [1, 2].

Hybride model: Kernenergie als stabilisator: Een alternatief is een beperkte bouw van kerncentrales die dienen als stabiele back-up voor hernieuwbare energie. Dit model combineert kernenergie met grootschalige batterij- en waterstofopslag, waardoor de variabele opwek van wind- en zonne-energie beter wordt opgevangen. Financiering kan plaatsvinden via publiek-private samenwerkingen en technologie-neutrale subsidies [3, 4].

Minimalistisch kernenergiebeleid: Een derde mogelijkheid is een minimale investering in kernenergie, met maximale inzet op hernieuwbare energie en slimme netwerken. Door de versnelde uitrol van batterijopslag, waterstof en demand-side response wordt de netstabiliteit verbeterd. De energietransitie wordt daarbij ondersteund door snelle ontwikkelingen in opslagtechnologieën, die de nadelen van hernieuwbare energie, zoals variabiliteit, steeds verder reduceren. Tegelijkertijd maakt opslag het mogelijk om de starheid van kerncentrales te compenseren, waardoor deze efficiënter kunnen opereren.

De keuze tussen kernenergie en hernieuwbare energie is daardoor niet langer zwart-wit. Grootschalige investeringen in opslagtechnologieën kunnen de economische en strategische aantrekkelijkheid van hernieuwbare energie versterken en tegelijkertijd de afhankelijkheid van kernenergie verkleinen. Als er net zoveel wordt geïnvesteerd in opslagtechnologie als in kernenergie, kan de benodigde opslagcapaciteit veel eerder beschikbaar zijn dan een nieuwe kerncentrale [5, 6].

6.2. Politieke en Maatschappelijke Discussie in Nederland

De discussie over kernenergie in Nederland is zowel politiek als maatschappelijk verdeeld. Hoewel de regering heeft besloten te investeren in nieuwe kerncentrales, blijft de haalbaarheid en wenselijkheid hiervan onderwerp van debat. Politieke standpunten: Binnen de politiek zijn de meningen sterk verdeeld. VVD, CDA en PVV steunen de bouw van nieuwe kerncentrales als onderdeel van een brede energiemix. D66 en GroenLinks/PvdA zijn sceptisch en pleiten voor versnelde investeringen in hernieuwbare energie. De SP en Partij voor de Dieren zijn uitgesproken tegen kernenergie, vanwege de hoge kosten, lange bouw tijden en het probleem van kernafval [7].

Publieke opinie: Uit peilingen blijkt dat ongeveer 50% van de Nederlanders kernenergie steunt, terwijl 30% tegen is en de rest neutraal blijft. De steun is de afgelopen jaren toegenomen door zorgen over energiezekerheid en hoge gasprijzen, maar blijft fragiel. Tegelijkertijd is er weinig maatschappelijk debat over de langetermijngevolgen van kernenergie en de vraag of hernieuwbare energie een economisch aantrekkelijker alternatief biedt [8].

Lopende beleidsmaatregelen: Nederland heeft besloten om naast de bestaande kerncentrale in Borssele te investeren in twee nieuwe kerncentrales [9]. Daarnaast stimuleert de overheid provincies om Small Modular Reactors (SMR's) te overwegen. De financiering blijft echter onzeker, aangezien nog niet duidelijk is of de kosten gedragen worden door de overheid, private investeerders of een combinatie van beide.

6.3. Geopolitieke en Economische Overwegingen

Kernenergie is duur, traag te realiseren en maakt landen afhankelijk van geopolitieke machtsverhoudingen. De levering van uranium en reactoronderdelen komt grotendeels uit geopolitiek instabiele of strategisch kwetsbare regio's zoals Rusland, Kazachstan en de VS [10].

Op korte termijn is hernieuwbare energie veel eenvoudiger en goedkoper uit te rollen. Wind- en zonne-energie kunnen snel worden opgeschaald met behoud van nationale autonomie, zonder langdurige afhankelijkheid van geopolitieke krachten. Windturbines op zee bieden hierbij aanzienlijke voordelen ten opzichte van installaties op land. Ze produceren tot twee keer zoveel energie per turbine dankzij stabielere windpatronen en hogere windsnelheden [11]. Bovendien kunnen ze op zee veel groter worden gebouwd, wat de energieopbrengst verder verhoogt zonder ruimtelijke beperkingen of landschapsvervuiling [12].

Daarnaast zijn offshore windparken nauwelijks zichtbaar vanaf de kust, waardoor ze geen horizonvervuiling veroorzaken. Nieuwe technologieën, zoals drijvende windturbines en zonnepanelen op zee, maken energieopwekking in diepere wateren mogelijk, waar traditionele funderingen niet toepasbaar zijn. Deze drijvende installaties maken gebruik van flexibele ankertechnologieën en kunnen energie leveren in gebieden waar vaste windturbines niet kunnen worden gebouwd [13].

6.4. Relativering klassieke argumenten vóór kernenergie

Hoewel kernenergie in sommige landen wordt overwogen als onderdeel van de energiemix, worden de klassieke argumenten door de huidige technologische mogelijkheden in Nederland geheel overbodig gemaakt.

1. Kernenergie levert stabiele baseload voor het energiesysteem.
 - In Nederland is baseload overbodig. Dankzij bewezen technologieën voor opslag (batterijen, waterstof) en vraagsturing kan een volledig hernieuwbare energiemix de leveringszekerheid garanderen zonder kernenergie.
2. Kernenergie zorgt voor extra diversificatie van de energiemix.
 - Nederland heeft al een diverse energiemix via sterke interconnecties met buurlanden en een groeiende inzet van opslag- en flexibiliteitsopties. Extra diversificatie via kernenergie voegt weinig toe.
3. Kernenergie is noodzakelijk voor CO₂-reductie en klimaatdoelen.
 - Nederland kan haar elektriciteitssector volledig CO₂-neutraal maken met hernieuwbare energie en flexibele opslagoplossingen. Kernenergie is hiervoor niet vereist.
4. Kernenergie bevordert geopolitieke onafhankelijkheid.
 - Voor Nederland geldt het omgekeerde: kernenergie vergroot de afhankelijkheid van buitenlandse leveranciers van splijtstof en technologie. Hernieuwbare energie benut lokale bronnen en versterkt de energie-autonomie.
5. Kernenergie ondersteunt de nationale kenniseconomie en industrie.
 - Nederland heeft geen strategisch belang in een kernenergie-industrie. De Nederlandse kracht ligt juist in hernieuwbare energie, offshore wind, waterstoftechnologie en netinnovaties.
6. Kernenergie biedt stabiliteit door een lange levensduur (60-80 jaar).
 - Juist die lange levensduur beperkt de flexibiliteit. Hernieuwbare energie en opslag kennen kortere investeringscycli, waardoor Nederland sneller kan profiteren van nieuwe technologieën.

Concluderend kunnen we zeggen dat de klassieke kernenergie-argumenten door de huidige stand van techniek in de Nederlandse context volledig kunnen worden weerlegd. Hernieuwbare energie in combinatie met opslag en flexibiliteit is voldoende om zowel de klimaatdoelen te halen als de leveringszekerheid te waarborgen.

Conclusie

Een toekomstbestendig energiebeleid vereist een zorgvuldig evenwicht tussen kosten, leveringszekerheid en geopolitieke stabiliteit. Kernenergie kan een stabiele basislast leveren, maar blijft duur en afhankelijk van staatssteun. Daarentegen worden hernieuwbare energiebronnen en opslagtechnologieën steeds kostenefficiënter en bieden ze op termijn meer flexibiliteit. Wind- en zonne-energie op zee zijn efficiënter en minder belastend voor het landschap dan vergelijkbare installaties op land.

Een hybride strategie, waarbij kernenergie als back-up dient en hernieuwbare energie wordt geoptimaliseerd met opslag en slimme netwerken, biedt een robuuste oplossing. Toch kunnen opslagtechnologieën, mits voldoende gefinancierd, veel sneller beschikbaar komen dan nieuwe kerncentrales. Hierdoor vermindert de afhankelijkheid van fossiele of nucleaire baseload.

Gezien de huidige technologische ontwikkelingen en geopolitieke onzekerheden lijkt een energiesysteem dat volledig gebaseerd is op hernieuwbare bronnen, ondersteund door robuuste opslag- en netwerktechnologieën, de meest haalbare en duurzame oplossing voor de lange termijn.

Referenties

1. Ministerie van Financiën. (2018). Speelbal of spelverdeler? Concurrentiekracht en nationale veiligheid in een open economie

2. Europese Commissie. (2022). Richtsnoeren staatssteun ten behoeve van klimaat, milieubescherming en energie 2022.
3. International Energy Agency. (2023). World Energy Investment 2023. <https://www.iea.org/reports/world-energy-investment-2023>
4. Clingendael Instituut. (2024). Energiebeleid en geopolitieke afhankelijkheden.
5. TNO. (2024). Opslagtechnologieën en netstabiliteit.
6. BloombergNEF. (2024). De marktontwikkeling van grootschalige energieopslag.
7. Peil.nl. (2024). Publieke opinie over kernenergie in Nederland.
8. Rabobank. (2024). Waarom kernenergie geen korte termijnoplossing is.
9. Rijksoverheid. (2024). Investeren in kernenergie en hernieuwbare energie.
10. Euratom. (2023). Uraniumvoorziening in Europa.
11. WindEurope. (2024). Offshore wind energy efficiency compared to onshore.
12. International Renewable Energy Agency. (2023). Floating wind and solar: expanding renewable energy offshore.
13. Rijksdienst voor Ondernemend Nederland. (2024). Hybride energieopwekking met drijvende wind- en zonneparken.



7. De Small Modulaire Reactor (SMR)

Kleine Modulaire Reactor (SMR) technologie wordt wereldwijd gezien als een veelbelovende aanvulling op bestaande energiebronnen [1]. In Nederland groeit de interesse in SMR's, zowel op provinciaal als gemeentelijk niveau [2, 3]. Ondanks deze belangstelling bevinden SMR's zich nog in een experimenteel stadium en is de implementatie in Nederland een langdurig proces. Dit document beschrijft de huidige status van SMR-plannen in Nederland en de geschatte tijdlijn voor de eerste operationele eenheid.

7.1. Status SMR's in Nederlandse Provincies en Gemeenten

Het kabinet heeft in 2024 aangegeven het aantal geplande nieuwe kerncentrales uit te breiden van twee naar vier, met als doel bij te dragen aan de CO₂-reductiedoelstellingen, de energietransitie en de leveringszekerheid van energie [31]. Deze ambitie sluit aan bij de bredere Europese klimaatdoelen die streven naar een CO₂-neutrale energievoorziening in 2050 en het versterken van de energiezekerheid binnen de EU. In het coalitieakkoord van het kabinet-Rutte IV was eerder al besloten om de bestaande kerncentrale in Borssele langer open te houden en de bouw van twee nieuwe kerncentrales voor te bereiden [4]. Met het aantreden van het kabinet-Schoof is dit verhoogd naar vier nieuwe kerncentrales [5]. Voor de financiering van deze plannen heeft de overheid €5 miljard gereserveerd uit het Klimaatfonds [30]. Uit een rapport van BNP Paribas blijkt echter dat een aanzienlijk deel van de investering waarschijnlijk door de overheid moet worden gedragen, omdat private partijen terughoudend zijn vanwege het hoge risicoprofiel [6]. Aanvullend wordt gezocht naar samenwerkingen met private investeerders en alternatieve financieringsopties, waaronder publieke-private samenwerking [31]. Naast de bouw van grootschalige kerncentrales stimuleert het kabinet ook de ontwikkeling van Small Modular Reactors (SMR's) [7]. Samen met provincies en gemeenten worden momenteel mogelijke locaties verkend voor zowel grote kerncentrales als SMR's. Zo is Borssele door het Rijk aangewezen als voorkeurslocatie voor de eerste twee nieuwe kerncentrales [8], waarbij provincies een belangrijke uitvoerende rol spelen.

Provinciale en gemeentelijke initiatieven:

- Gelderland: Vier zoekgebieden zijn aangewezen voor de mogelijke plaatsing van SMR's: Arnhem-Nijmegen, Rivierenland (inclusief West-Betuwe), IJssel-Zuid (Rheden, Brummen, Bronckhorst) en Randmeren (Harderwijk). Sommige gemeenten, zoals Renkum en Arnhem, hebben aangegeven geen kerncentrale binnen hun grenzen te willen [9, 15, 28].
- Noord-Brabant: De provincie investeert vier miljoen euro in de ontwikkeling van een gesmoltenzoutreactor door Thorizon, een Nederlandse onderneming [10, 28].
- Zeeland: De provincie heeft een consultatietraject uitgevoerd en een pakket voorwaarden opgesteld voor kernenergieprojecten. Dit is in april 2024 aan het Rijk overhandigd [11, 29]. Terneuzen wordt door de overheid genoemd als mogelijke locatie voor een nieuwe kerncentrale vanwege de aanwezigheid van energie-intensieve industrie zoals Dow. Dow zelf heeft echter geen plannen voor kernenergie en focust op verduurzaming via waterstof en elektrificatie. In de regio zijn gemengde reacties: sommige agrariërs maken zich zorgen over de impact op hun bedrijfsvoering, terwijl de industrie kernenergie als een mogelijke oplossing ziet voor stabiele en betaalbare energievoorziening. De gemeente Borsele staat onder voorwaarden open voor de bouw van nieuwe kerncentrales, waarbij lokale participatie en een pakket aan eisen op het gebied van veiligheid, leefomgeving en duurzaamheid leidend zijn.
- Overijssel: De Provinciale Staten hebben een motie aangenomen om de inzet van SMR's als onderdeel van de energiemix te onderzoeken, met aandacht voor bestuurlijke, politieke en maatschappelijke aspecten [12].

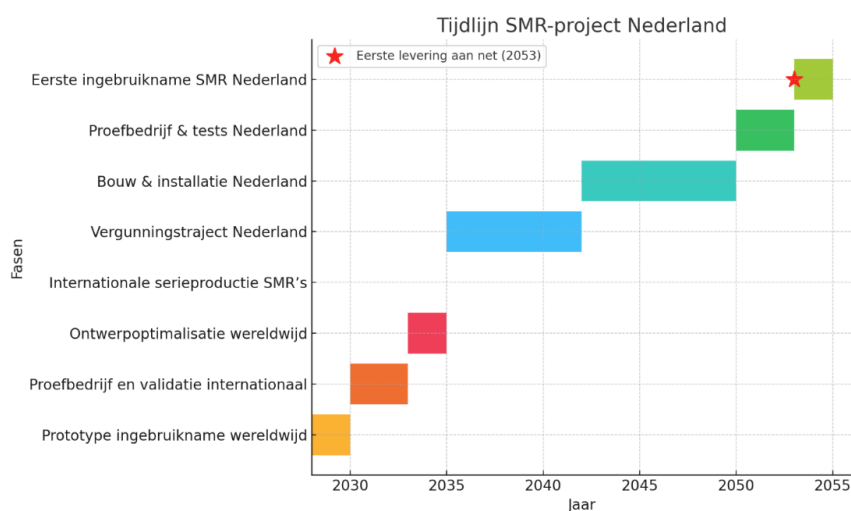
- Utrecht: De gemeente Woerden erkent kernenergie als een stabiele, regelbare en uitstootvrije energiebron. De VVD pleit voor draagvlak en een open dialoog over voor- en nadelen [13].
- Noord-Holland: In Den Helder loopt een haalbaarheidsonderzoek naar de bouw van een SMR en Opmeer heeft een intentieverklaring ondertekend voor een soortgelijk project [28].
- Drenthe: De gemeente Hoogeveen onderzoekt de mogelijkheden van een SMR en organiseert informatiesessies om de bevolking te informeren [28].
- Friesland en Groningen: In Friesland en Groningen zijn er momenteel geen concrete plannen voor de bouw van kerncentrales. Toch tonen sommige politieke partijen interesse in verdere verkenning van kernenergie. Zo staat Volt Fryslân open voor onderzoek naar de mogelijkheden voor kernenergie en wil hierbij samenwerken met de provincies Drenthe, Friesland, Groningen en de Duitse deelstaat Nedersaksen [32]. Daarnaast heeft de JOVD Friesland aangegeven positief te staan tegenover de bouw van een kerncentrale in Fryslân en ziet de provincie graag als koploper in de energietransitie [25]. In Groningen is er binnen de provinciale politiek echter weinig steun voor de komst van een kerncentrale. Zo blijkt uit een inventarisatie door Greenpeace dat er nauwelijks politieke steun is voor een kerncentrale in Groningen [26].
- Limburg: De provincie verkent de haalbaarheid en potentie van SMR-projecten, zonder concrete locaties te hebben vastgesteld [28].
- Flevoland: De provincie richt zich momenteel op andere duurzame energiebronnen en heeft geen kernenergieplannen [18].
- Zuid-Holland: De Tweede Maasvlakte wordt onderzocht als mogelijke locatie voor één of twee nieuwe kerncentrales. Lokale partijen uiten zorgen over de impact op ruimte en havenactiviteiten [19, 20, 21, 28].

7.2. Internationale Ontwikkelingen en Beschikbaarheid

Op basis van de huidige internationale en nationale ontwikkelingen is de verwachting dat de eerste operationele SMR in Nederland, waarschijnlijk een gesmoltenzoutreactor ontwikkeld door het consortium van Thorizon, DEMCON en VDL Groep, pas na 2053 in bedrijf zal gaan. De inschatting is bijgesteld naar aanleiding van recente ervaringen met internationale SMR-projecten [1, 6, 22, 23]. In Figuur 3 is de volledige tijdlijn opgenomen die de stappen visualiseert vanaf de internationale ontwikkeling van SMR-technologie tot en met de ingebruikname van de eerste reactor in Nederland. Hieruit blijkt dat de levering van elektriciteit aan het net naar verwachting pas rond 2053 zal starten, na een langdurige vergunning-, bouw- en testfase.

De auteur verwacht dat de meest optimistische fasering richting ingebruikname in Nederland als volgt is:

- Ingebruikname eerste prototype SMR wereldwijd (~2028-2030)
- Internationale testfase en validatie (~2030-2033)
- Herontwerp en optimalisatie wereldwijd (~2033-2035)
- Start commerciële serieproductie SMR's (~2035+)
- Vergunningstraject Nederland (~2035-2042)
- Bouw en installatie eerste SMR in Nederland (~2042-2050)
- Proefbedrijf en tests in Nederland (~2050-2053)
- Ingebruikname en eerste levering aan het Nederlandse net (~2053)



Figuur 3: Tijdlijn tot ingebruikname van de eerste SMR in Nederland. Overzicht van de verwachte fasen tot aan de ingebruikname van de eerste Small Modular Reactor (SMR) in Nederland. Het schema toont de stappen vanaf de internationale validatie van de eerste SMR-prototypes tot en met de test- en inbedrijfstellingsfase in Nederland. De rode ster geeft het moment aan waarop de eerste reactor vanaf circa 2053 naar verwachting elektriciteit zal leveren aan het Nederlandse energienet. Sommigen spreken over 2030 tot 2040, deze exercitie relateert deze al te optimistische schatting.

In Nederland ligt de focus momenteel op verschillende typen SMR-technologieën, waarvan gesmoltenzoutreactoren het verst gevorderd zijn in termen van nationale betrokkenheid. Het consortium van DEMCON, Thorizon en VDL Groep werkt aan de ontwikkeling van een gesmoltenzoutreactor, waarvoor de hier gepresenteerde tijdlijn met ingebruikname rond 2053 realistisch is [27]. Deze technologie bevindt zich nog in een vroege ontwikkelingsfase, maar wordt door betrokken partijen gezien als een kansrijke optie voor veilige, schaalbare kernenergie in de tweede helft van de eeuw. Voor andere typen SMR's die in Nederland in beeld zijn, zoals drukwaterreactoren (PWR's) van buitenlandse ontwikkelaars zoals Rolls-Royce SMR en GE Hitachi's BWRX-300, ligt de situatie anders. Hoewel deze reactorontwerpen internationaal verder zijn gevorderd en op korte termijn mogelijk elders in gebruik worden genomen, geldt dat Nederland vooralsnog niet direct betrokken is bij de realisatie van deze projecten. Voor deze buitenlandse reactoren is de verwachting dat Nederland eerst de internationale validatie zal afwachten en pas later vergunningen zal verlenen. Dit betekent dat de ingebruikname van dergelijke reactoren in Nederland waarschijnlijk na 2055 zal plaatsvinden. De verschillen in technologische rijpheid en de Nederlandse besluitvormingstrajecten zorgen er dus voor dat gesmoltenzoutreactoren voorlopig de meest realistische optie vormen binnen de huidige nationale context [27].

7.3. Financiering en Markttuitdagingen

De financiering van SMR-projecten is een cruciale factor voor de realisatie ervan [6, 8]. Omdat SMR's nog in ontwikkeling zijn en de kosten per megawatt hoger liggen dan die van traditionele kerncentrales, zijn aanzienlijke investeringen nodig vanuit zowel de overheid als de particuliere sector. De hoge opstartkosten en lange terugverdientijd maken het lastig om private investeerders aan te trekken zonder garanties of subsidies. Veel SMR-ontwikkelaars, zoals Rolls-Royce en NuScale, zijn afhankelijk van overheidssteun om hun reactoren commercieel levensvatbaar te maken [1]. Daarnaast hebben enkele bedrijven die zich richten op de verkoop van elektriciteit uit SMR's, zoals NuScale in de VS, recent te maken gekregen met ernstige financiële problemen. Hun projecten zijn geannuleerd vanwege de onrendabele kostenstructuur en het ontbreken van grootschalige investeerders.

Conclusie

Hoewel de belangstelling voor SMR-technologie in Nederland toeneemt, is de praktische uitvoering nog ver weg. De combinatie van langdurige vergunningstrajecten, complexe bouwprocessen en onzekere financieringsmodellen zorgt ervoor dat de eerste Nederlandse SMR waarschijnlijk pas tussen 2045 en 2055 operationeel zal zijn. Bovendien vormt de afhankelijkheid van publieke middelen en geopolitieke factoren een rem op de grootschalige toepassing. Hierdoor zullen SMR's naar verwachting geen significante bijdrage leveren aan de Nederlandse klimaatdoelstellingen voor 2030 of zelfs 2050. Voor een versnelde CO₂-reductie blijft Nederland voorlopig aangewezen op alternatieve oplossingen zoals wind- en zonne-energie, energieopslag en de optimalisatie van bestaande kernenergie-infrastructuur.

Referenties

1. Internationale Atoomenergieagentschap (IAEA). (2023). Small Modular Reactors: Advances in SMR Developments 2024.
2. Provincie Gelderland. (2024). Onderzoek naar SMR-locaties in Gelderland.
3. Rijksoverheid. (2024). Nationaal Programma Kernenergie en SMR-beleid.
4. Rijksoverheid. (2022). Kernenergie: Waarom Nederland inzet op nieuwe kerncentrales.
5. Overkernenergie.nl. (2024). Kabinet-Schoof: vier nieuwe kerncentrales in Nederland.
6. Tweede Kamer. (2024). Financieringsopties voor nieuwe kerncentrales – Rapport BNP Paribas.
7. Overkernenergie.nl. (2024). SMR's in Nederland: de visie van het kabinet.
8. Rijksoverheid. (2024). Nieuwe kerncentrales in Borssele – Rijk-Regiopakket.
9. Provincie Gelderland. (2025). Onderzoek zoekgebieden SMR's.
10. Binnenlands Bestuur. (2024). Noord-Brabant investeert in gesmoltenzoutreactor.
11. Provincie Zeeland. (2024). Rijk-Regiopakket kernenergie Borssele.
12. Nieuwe Energie Overijssel. (2024). SMR's als mogelijke aanvulling op energievoorziening.
13. VVD Woerden. (2024). Standpunt kernenergie binnen gemeente Woerden.
14. NOS. (2024). Provincies en gemeenten tonen interesse in kleine kerncentrales.
15. De Gelderlander. (2024). Arnhem en Renkum tegen kernenergieplannen provincie.
16. Binnenlands Bestuur. (2024). Kernreactors: de ene gemeente schrikt, de andere niet.
17. Provincie Limburg. (2024). Afwegingsnotitie Chemelot-locatie voor SMR's.
18. Provincie Flevoland. (2024). Energiebeleid Flevoland.
19. Ministerie van Klimaat en Groene Groei. (2024, november 15). Minister Hermans informeert Kamer over stand van zaken nieuwbouw kerncentrales.
20. Algemeen Dagblad. (2024, april 5). Weinig positieve reacties op plan voor kerncentrale op Maasvlakte.
21. Nieuwsblad Transport. (2024, april 5). Havenbedrijf: grote kerncentrale op Maasvlakte onlogisch vanwege schaarse ruimte.

22. International Atomic Energy Agency. (2023). Commissioning and Start-up Testing of Nuclear Power Plants: Safety Reports Series No. 98.
23. Nuclear Energy Agency (NEA). (2023). Advanced Nuclear Fuel Cycles and Radioactive Waste Management. OECD-NEA. Hoofdstuk 6: Lessons learned from FOAK reactors and design iteration cycles.
24. Volt Nederland. (2024). Standpunten Volt Fryslân – Kernenergie en duurzame energie.
25. JOVD Friesland. (2024). JOVD Friesland positief over kerncentrale in Fryslân.
26. Greenpeace Nederland. (2024). Greenpeace: Geen politieke steun voor kerncentrale in Groningen.
27. Nucleair Nederland. (2024). Samenwerking DEMCON, Thorizon en VDL Groep bij ontwikkeling van gesmoltenzoutreactor.
28. NOS. (2024, maart 13). Provincies en gemeenten hebben oren naar de bouw van kleine kerncentrales. Geraadpleegd op 20 maart 2025, van <https://nos.nl/artikel/2558255-provincies-en-gemeenten-hebben-oren-naar-de-bouw-van-kleine-kerncentrales>
29. Rijksoverheid. (2024, september 11). Volgende stap voorbereiding nieuwe kerncentrales: intentieverklaring voor Rijk-Regiopakket en onderzoek nieuwe gebieden. Geraadpleegd op 20 maart 2025, van <https://www.rijksoverheid.nl/actueel/nieuws/2024/09/11/volgende-stap-voorbereiding-nieuwe-kerncentrales-intentieverklaring-voor-rijk-regiopakket-en-onderzoek-nieuwe-gebieden>
30. ABN AMRO. (2024, januari 22). Hoe haalbaar zijn de Nederlandse plannen voor kernenergie? Geraadpleegd op 20 maart 2025, van <https://www.abnamro.com/research/nl/onze-research/esg-en-economie-hoe-haalbaar-zijn-de-nederlandse-plannen-voor-kernenergie>
31. Overkernenergie.nl. (2024). Kabinet-Schoof: vier nieuwe kerncentrales in Nederland. Geraadpleegd op 20 maart 2025, van <https://www.overkernenergie.nl/plannen-van-het-kabinet/vier-nieuwe-kerncentrales>
32. Volt Nederland. (2024). Standpunten Volt Fryslân – Kernenergie en duurzame energie. Geraadpleegd op 20 maart 2025, van <https://volt nederland.org/standpunten/mens-natuur/europese-inzet-op-kernenergie>



8. Knelpunten van Kernenergie en Hernieuwbare Energie

Op te lossen	Kernenergie (toelichting)	Hernieuwbare Energie (toelichting)	Kernenergie (oplosbaarheid)	Hernieuwbaar (oplosbaarheid)
Betrouwbaarheid & Intermitterend Karakter	Constante baseload, weinig afhankelijk van externe factoren	Afhankelijk van weersomstandigheden	3	1
Opslag- en Netproblematiek	Relatief beperkt door constante productie	Vereist grootschalige opslag en netverzwaring	3	2
Ruimtebeslag en Milieu-impact	Klein ruimtebeslag, maar hogere milieu-impact	Groter ruimtebeslag, lagere milieu-impact, horizonvervuiling	2	2
Materiaalgebruik & Grondstoffen	Relatief beperkt materiaalgebruik	Hoge behoefte aan zeldzame metalen en grondstoffen	2	2
Kosten & Economische Uitdagingen	Hoge initiële kosten en lange terugverdientijd	Dalende kosten door technologische ontwikkeling	1	3
sociale en Politieke Weerstand	> 50% geen bezwaar, maar publieke zorgen blijven bestaan	Lokale weerstand bij projecten (bijv. windmolens)	2	2
veiligheidsrisico's & Ongevallen	Kans op ernstige incidenten klein, maar met grote potentiële gevolgen	Lage risico's, beperkt tot lokale milieuproblemen	1	3
Afval verwerking	Probleem met langdurig radioactief afval	Beperkte afvalstromen, voornamelijk bij einde levensduur	1	2
Geopolitieke Afhankelijkheden	Afhankelijk van import van uranium	Lokale productie mogelijk, minder geopolitiek afhankelijk	1	3
Flexibiliteit in de Energietransitie	Lange ontwikkeltijd, beperkte flexibiliteit	Kan snel opgeschaald worden en gediversifieerd worden	1	3
Private Investeringsen	Beperkte private investeringen zonder staatsgaranties	Stijgende private investeringen	1	3
Milieu-impact en Waterverbruik	Hoog waterverbruik voor koeling, impact op lokale ecosystemen	Laag waterverbruik, mits goed ingepast in landschap	1	3
Technologische Rijpheid	Bewezen technologie, wereldwijd toegepast	Nog deels afhankelijk van innovaties en marktontwikkeling	3	2
Onderhouds- en Exploitatiekosten	Hoge kosten door veiligheidszorgen en personeel	Lage kosten door eenvoudige exploitatie (bv. zonnepanelen)	2	3
Levensduur van Installaties	Lange levensduur (40-60 jaar) bij kerncentrales	Kortere levensduur (20-30 jaar), afhankelijk van technologie en onderhoud	3	2
Systeemintegratie en netstabiliteit	Beperkte rol in piek/dal-belasting, minder geschikt voor flexibiliteit	Flexibel inzetbaar mits gecombineerd met opslag en vraagsturing	2	3
Publieke perceptie & draagvlak	Negatief beïnvloed door veiligheidszorgen en afvalproblematiek	Overwegend positief, met lokale bezwaren	2	3
Leveringszekerheid op lange termijn	Constante productie bij voldoende brandstof	Afhankelijk van weersomstandigheden, maar kan divers worden	3	2
		Totaalscore	34	44

In deze studie ligt de nadruk vaak op de nadelen en risico's van kernenergie, omdat deze in het maatschappelijke debat prominent aanwezig zijn. Om echter een zo objectief mogelijke vergelijking te kunnen maken tussen kernenergie en hernieuwbare energiebronnen, zijn de belangrijkste aspecten systematisch naast elkaar gezet. Dit is gedaan aan de hand van een overzichtelijke tabel, waarbij elk relevant criterium zorgvuldig is beoordeeld op oplosbaarheid. Goed oplosbaar is een 3, slecht oplosbaar een 1. Hiermee wordt op transparante wijze inzichtelijk hoe de twee energiebronnen zich daadwerkelijk tot elkaar verhouden. De score voor hernieuwbare energie is hoger dan voor kernenergie, maar een volledig objectieve beoordeling blijft lastig voor slechts één beoordeelaar.



Conclusie

Kernenergie blijft een strategisch en politiek beladen technologie binnen de energietransitie. De economische haalbaarheid ervan wordt ondermijnd door hoge investeringskosten, langdurige ontwikkeltrajecten en een structurele afhankelijkheid van staatssteun. Geopolitiek creëert kernenergie nieuwe afhankelijkheden, met name door de concentratie van uraniumproductie en nucleaire technologie in een klein aantal landen zoals Rusland, China en Kazachstan, wat de energieautonomie van afnemerslanden onder druk zet.

Daartegenover staan hernieuwbare energiebronnen zoals wind en zon, die door kostendalingen en innovaties in opslag en netbeheer steeds aantrekkelijker worden. Opslagtechnologieën – waaronder batterijen, waterstof en pompaccumulatie – verbeteren niet alleen de flexibiliteit van hernieuwbare energie, maar verzwakken ook de traditionele noodzaak voor kernenergie als stabiele baseload.

De vraag voor beleidsmakers is of de voordelen van kernenergie, zoals leveringszekerheid en lage CO₂-uitstoot, opwegen tegen de geopolitieke kwetsbaarheden, de economische lasten en het risico op marktverstoring. Alternatieve strategieën, die gericht zijn op de versnelde uitrol van hernieuwbare energie in combinatie met grootschalige investeringen in opslag en infrastructuur, bieden mogelijk een kostenefficiënter en geopolitiek robuuster pad naar energiezekerheid en onafhankelijkheid.

Een vergelijk tussen twee scenario's "wind-zon-opslag" en "wind-zon-opslag-kernenergie" laat zien dat het op dit moment niet de kosten zijn waarom je voor of tegen kernenergie zou moeten zijn.

Een toekomstbestendig beleid vereist een kritische afweging waarin geopolitieke autonomie, kostenbeheersing en snelheid van implementatie centraal staan. Investerings in opslagtechnologieën en slimme netwerken kunnen de sleutel vormen tot een flexibeler en duurzamer energiesysteem dat minder afhankelijk is van nucleaire baseloadcapaciteit.

Vraag voor de politiek: weegt het aandeel (10 -15%), de stabiliteit en lage CO₂-uitstoot van kernenergie op tegen de noodzakelijke staatssteun, geopolitieke afhankelijkheden en veiligheidsrisico's, terwijl hernieuwbare alternatieven steeds rendabeler worden?



Aanbevelingen voor verdieping

Aanbevelingen voor verdieping

Naast de lijst met referenties raad ik de volgende literatuur aan voor een diepgaander inzicht in de economische en geopolitieke aspecten van kernenergie binnen het veranderende energielandschap. Deze bronnen behandelen financieringsmodellen, beleidskeuzes, strategische afhankelijkheden en de rol van opslagtechnologie in een toekomstbestendig energiesysteem.

Economische en financiële aspecten van kernenergie

- *Onderzoek financieringsconstructies kernenergie* – Rijksoverheid: analyse van financieringsmodellen voor kerncentrales in Nederland, met aandacht voor staatssteun en economische risico's.
- *Scenariostudie kernenergie* – Witteveen+Bos: onderzoek naar verschillende toekomstscenario's voor kernenergie in Nederland met economische en strategische impact.
- *Kernenergie – standpunt PME*: beschouwing van de voorwaarden waaronder het Pensioenfonds Metaal en Techniek investeert in kernenergie, met nadruk op risicobeheersing.

Geopolitieke invloed en strategische afhankelijkheden

- *Heropleving kernenergie* – Internationaal Energieagentschap (IEA): analyse van mondiale trends in kernenergie en geopolitieke gevolgen.
- *De rol van energie in de Russisch-Chinese relaties*: academisch onderzoek naar de geopolitieke inzet van energie (waaronder kernenergie) door Rusland en China.
- *Kernreactor mag opnieuw geld putten uit een lege staatskas*: kritische analyse van overheidsinvesteringen in nucleaire onderzoeksreactoren en hun economische haalbaarheid.

Aanvullend

- *Opslagtechnologie en energietransitie* – TNO: overzicht van de rol van batterijopslag en waterstofopslag binnen de energietransitie en hun impact op geopolitieke afhankelijkheden en systeemflexibiliteit.

Maatschappelijke kostenvergelijking van energiemixen: met of zonder kernenergie



Dr. Max A. Hilhorst, 29-03-2025, 0651173225, m.a.hilhorst@gmail.com

Summary

Dit rapport presenteert een maatschappelijke kostenvergelijking van verschillende energiemixen voor de Nederlandse elektriciteitsvoorziening, met als centrale vraag: wel of geen kernenergie? Gekeken is naar drie scenario's:

- (1) 100% hernieuwbaar (zon en wind in een 50/50-mix),
- (2) 85% hernieuwbaar + 15% kernenergie (SMR), en
- (3) 100% wind op zee als zelfstandige hernieuwbare optie.

De analyse is uitgevoerd per terawattuur (TWh) en omvat opwekkosten, systeemkosten (zoals netaanpassing, opslag en balancerings), technologische trends en maatschappelijke factoren zoals ruimtebeslag, realisatiesnelheid en geopolitieke afhankelijkheid.

De resultaten tonen dat de totale maatschappelijke kosten per MWh vergelijkbaar zijn voor alle drie scenario's, variërend van 0,09 tot 0,13 €/kWh. Wind op zee blijkt structureel goedkoper dan zonne-energie en kernenergie, en iets duurder dan wind op land, maar kent een lagere opslagbehoefte en stabielere productie.

De keuze tussen de opties wordt daardoor niet primair bepaald door kosten, maar door beleidsmatige randvoorwaarden zoals snelheid van realisatie, ruimtelijke inpasbaarheid, systeemflexibiliteit en geopolitieke afhankelijkheid. Een mix van hernieuwbare energie, zonder kernenergie, scoort daarbij gunstig — vooral op het gebied van schaalbaarheid, investeringsstructuur en energie-autonomie, met minder politieke afhankelijkheid van grootmachten bij de aanvoer van brandstoffen of strategische materialen.

Het rapport concludeert dat een energiemix zonder kernenergie economisch haalbaar blijft, mits voldoende wordt geïnvesteerd in systeemflexibiliteit. Wind op zee speelt daarin een steeds belangrijkere rol. De rol van kernenergie kan aanvullend zijn, maar vereist langdurige besluitvorming, hoge publieke investeringen, stabiel beleid over meerdere kabinetsperiodes én een oplossing voor het kernafval en zou bij voorkeur via marktmechanismen moeten plaatsvinden, zonder directe staatsdeelname.

Aanvullend advies:

De overheid kan zich beperken tot het ontwikkelen van een geschikte infrastructuur, waar alle aanbieders gebruik van maken en waarin kernenergie geen voorkeurspositie krijgt maar wel kan toetreden zodra dit economisch haalbaar blijkt. Onderzoeksreactoren of demonstratieprojecten kunnen apart, met publieke middelen, worden ondersteund vanuit het belang van kennisontwikkeling.

Inleiding

In deze analyse is een kostenvergelijking gemaakt van drie strategieën: (1) 100% hernieuwbare energie (zon en wind in een 50/50-mix), (2) 85% hernieuwbaar plus 15% kernenergie (SMR), en (3) 100% wind op zee als zelfstandige hernieuwbare optie met hoge vollasturen en beperkte opslagbehoefte [9]. De analyse is uitgevoerd per TWh, inclusief investeringen, systeemkosten, opslag, publieke bijdragen en technologische trends. Doel is om inzicht te geven in de maatschappelijke kostprijs van elektriciteit en de beleidsimplicaties daarvan [1][2][3].

Totale kosten zonder systeemkosten

Onderstaande tabel toont de totale kosten per technologie in euro per TWh, uitgesplitst naar opbouwkosten, overige kosten en het totaal zonder systeemkosten. De opbouwkosten omvatten de investeringskosten in de energie-infrastructuur, zoals turbines, zonnepanelen of kernreactoren, inclusief installatie en aansluiting op het net. De overige kosten (ook wel "rest" genoemd) bestaan uit exploitatie- en onderhoudskosten, brandstofkosten (voor kernenergie), en afschrijving. Voor de hernieuwbare opties is in de opbouwkosten tevens de benodigde energieopslag inbegrepen om het wisselende aanbod van wind en zon te kunnen balanceren. De optie "Hernieuwbaar 50/50" betreft een combinatie van 50% wind en 50% zon, inclusief opslag. De optie "85% hernieuwbaar + 15% kern" combineert hernieuwbare opwekking met een beperkt aandeel kernenergie voor basislastvoorziening.

Aanvullend is wind op zee als aparte optie opgenomen, gezien de stijgende bijdrage in de Nederlandse energiemix en het onderscheidende kostenprofiel ten opzichte van wind op land.

Tabel 1. Totale opwek- en restkosten per technologie (exclusief systeemkosten)

Technologie	Opbouwkosten (M€)	Overige kosten (M€)	Totaal zonder systeemkosten (M€)
Kernenergie (SMR)	100	18	118
Wind op land	45	4	49
Wind op zee	70	6	76
Zonnepanelen (PV)	43	2	45
Hernieuwbaar 50/50	44	3	47
85% hernieuwbaar + 15% kernenergie	58	7	65

(De kosten zijn omgerekend van miljoen euro per terawattuur (M€/TWh) naar euro per kilowattuur (€/kWh). Daarbij staat M voor miljoen (10^6), T voor tera (10^9), en k voor kilo (10^3).)

Systeemkosten

Systeemkosten zijn de extra kosten die nodig zijn om het energiesysteem betrouwbaar, stabiel en efficiënt te laten functioneren bij de integratie van verschillende opwekopties. Deze kosten komen bovenop de directe opwek- en overige kosten per technologie en hangen sterk af van de mate waarin een technologie flexibel kan worden ingezet of juist afhankelijk is van weersomstandigheden.

Totale kosten omgerekend naar M€/kWh geven inzicht in wat de verschillende energieopties uiteindelijk kosten per eenheid geleverde elektriciteit. Hierbij zijn de totale kosten (inclusief opbouw-, overige en systeemkosten) omgerekend van euro per terawattuur (M€/TWh) naar eurocent per kilowattuur (M€/kWh), wat een gebruikelijkere eenheid is voor consumenten en beleidsmakers.

De omgerekende kosten maken de technologieën beter onderling vergelijkbaar en geven een indicatie van de potentiële stroomprijs bij kostendekkende exploitatie, exclusief belastingen en winstmarges.

Door deze conversie wordt duidelijk welke technologie het goedkoopst is per geproduceerde eenheid stroom wanneer alle kostencomponenten worden meegenomen. Zo kan blijken dat hernieuwbare energie, ondanks hogere systeemkosten, nog steeds concurrerend is vanwege de lage opwek- en overige kosten, terwijl kernenergie mogelijk duurder uitvalt door hoge investerings- en exploitatiekosten.

Wind op zee vereist substantiële netinvesteringen (zoals zeekabels en offshore platforms), maar heeft daarentegen een gunstiger opslagprofiel dankzij de relatief stabiele productie, vooral in de wintermaanden.

Tabel 2. Systeemkosten per technologie

Energieoptie	Opslagkosten	Netkosten	Balanskosten	Totaal systeemkosten
Kernenergie (SMR)	2	5	3	10
Wind op land	50	25	15	90
Wind op zee	40	30	10	80
Zonnepanelen (PV)	80	35	10	125
Hernieuwbaar 50/50	60	18	5	83
85% hernieuwbaar + 15% kern	40	16	8	64

Eenheid: M€/TWh = miljoen euro per terawattuur geleverde elektriciteit.

Beschouwing bij de kostenprognoses tot 2050

De geprojecteerde kostencurven voor hernieuwbare energie en kernenergie tot 2050 zijn gebaseerd op een reeks aannames en gevoeligheden die in belangrijke mate de uitkomsten beïnvloeden. Hoewel de modellen robuust zijn opgezet, blijft de uitkomst sterk afhankelijk van externe factoren en beleidskeuzes. In deze beschouwing worden

enkele van de belangrijkste factoren toegelicht die van invloed zijn op de betrouwbaarheid en interpretatie van de prognoses.

Gevoeligheid voor rente, bouwtijd en technologische ontwikkeling

De kostprijs van energieprojecten is bijzonder gevoelig voor het rentepeil, aangezien zowel kerncentrales als grootschalige hernieuwbare energieprojecten kapitaalintensief zijn. Hoge rentestanden vergroten de kapitaalslast, vooral bij langlopende projecten zoals kernenergie. Ook de bouwtijd is van grote invloed: bij kerncentrales loopt deze op tot 15 à 20 jaar, waardoor kosten langdurig op de balans drukken en blootstaan aan onzekerheden. Hernieuwbare technologieën daarentegen kunnen doorgaans binnen 2 tot 5 jaar worden gerealiseerd, wat sneller rendement mogelijk maakt en flexibeler inspeelt op veranderende omstandigheden.

De technologische ontwikkeling speelt eveneens een sleutelrol. Terwijl zon en wind de voorbije jaren al een sterke leercurve vertoonden met significante kostendalingen, wordt verwacht dat deze trend – zij het in afvlakkende mate – doorzet. Voor kernenergie zijn de verwachtingen minder eenduidig: SMR-technologie (Small Modular Reactors) kan op termijn schaalvoordelen bieden, maar bevindt zich in veel gevallen nog in het prototype- of demonstratiestadium. Dit betekent dat het moment van grootschalige inzet van SMR's onzeker blijft zonder aanzienlijke publieke investering en versnelde vergunningstrajecten.

Realisatiesnelheid en schaalbaarheid

De relatief korte realisatietijd van hernieuwbare projecten maakt ze aantrekkelijk in het licht van klimaatdoelstellingen op middellange termijn. Bovendien kunnen zonne- en windprojecten modulair worden opgeschaald, waardoor aanbod sneller aangepast kan worden aan de vraag of beleidsveranderingen. Kernenergie daarentegen vereist langdurige vergunningsprocedures, uitgebreide veiligheidsanalyses en grootschalige investeringen vooraf. Dat maakt het minder geschikt om snel in te spelen op veranderingen in de energievraag.

Ruimtebeslag en ruimtelijke impact

Een vaak over het hoofd geziene factor is het fysieke ruimtebeslag. Hoewel kerncentrales per opgewekte eenheid energie relatief weinig ruimte nodig hebben, vereist de veiligheidszone rondom een centrale een buffergebied van circa 10 km², waarin geen grootschalige woningbouw of economische activiteit plaatsvindt. Ter vergelijking: dat staat gelijk aan de ruimte voor ongeveer 40.000 woningen. Hernieuwbare bronnen nemen meer verspreide ruimte in beslag, maar kunnen vaak gecombineerd worden met landbouw, infrastructuur (bijv. zonneparken langs snelwegen) of worden geïntegreerd op daken.

Geopolitieke afhankelijkheden

De afhankelijkheid van grondstoffen verschilt wezenlijk tussen beide opties. Kernenergie is afhankelijk van uranium, dat grotendeels uit een beperkt aantal landen wordt geïmporteerd, waaronder Kazachstan, Canada en Rusland. Dit brengt geopolitieke risico's met zich mee, zeker bij toenemende spanningen of exportbeperkingen. Hernieuwbare technologieën maken gebruik van kritieke metalen zoals lithium, kobalt en

neodymium, die eveneens geopolitiek gevoelig zijn, maar in meer uiteenlopende vormen voorkomen en waarvoor alternatieve technologieën en recycling mogelijk zijn.

Investeringsstructuur en financierbaarheid

Tot slot verschilt de aard van de benodigde investeringen fundamenteel. Hernieuwbare energie trekt steeds vaker private investeerders aan, mede dankzij de voorspelbaarheid van opbrengsten, lagere risico's en kortere terugverdientijden. Kernenergie daarentegen vereist doorgaans publieke garanties of staatsdeelname, vanwege de hoge initiële investeringskosten, lange bouwtijd en maatschappelijke risico's. Dit maakt kernenergie politiek gevoeliger en afhankelijker van stabiel overheidsbeleid over meerdere kabinetsperiodes heen.

Kernenergie vereist doorgaans publieke garanties of staatsdeelname, vanwege de hoge initiële investeringskosten, lange bouwtijd en maatschappelijke risico's. Een alternatief is echter mogelijk: de overheid kan zich richten op het faciliteren van een open infrastructuur die alle opwekopties, inclusief kernenergie, gelijk behandelt. Private investeerders kunnen dan – zonder voorkeurspositie – toetreden tot de markt wanneer kernenergie zich economisch bewijst. Zo blijft het energiesysteem marktgestuurd en wordt publieke financiering gericht op collectieve infrastructuur, in plaats van specifieke technologieën.

Samenvattende, hoewel de kostenprojecties tot 2050 een duidelijke trend laten zien waarin hernieuwbare energie economisch aantrekkelijker wordt dan kernenergie, blijven de uitkomsten afhankelijk van meerdere factoren. In het bijzonder de bouwtijd, technologische onzekerheden, geopolitieke afhankelijkheden en investeringsstructuur kunnen in de praktijk sterk doorwerken op zowel de kosten als de maatschappelijk-politieke haalbaarheid van de verschillende energieopties. De weergegeven onzekerheidsmarges in de prognosegrafiek weerspiegelen deze dynamiek en onderstrepen de noodzaak tot regelmatige herijking van de scenario's.

Totale maatschappelijke kosten per kWh

De totale kosten per energieoptie zijn omgerekend van euro per terawattuur (M€/TWh) naar euro per kilowattuur (€/kWh), een gebruikelijke rekeneenheid voor beleidsmakers, investeerders en consumenten. Deze conversie geeft inzicht in de maatschappelijke kostprijs per geleverde kilowattuur en maakt het mogelijk om verschillende technologieën beter met elkaar te vergelijken.

Let op: deze kostenrepresentatie betreft niet de marktprijs die de consument betaalt, maar de totale maatschappelijke kostprijs per kilowattuur – inclusief investerings- en systeemkosten die uiteindelijk deels via belastingen of subsidies op de eindgebruiker verhaald zullen worden.

De omgerekende eenheidskosten vormen een belangrijke basis voor beleidsafwegingen, investeringsbeslissingen en systeemoptimalisatie, maar mogen niet worden verward met de marktprijs die consumenten op hun energierekening zien.

Door alle kostencomponenten – opwek, opslag, infrastructuur en balans – mee te nemen, wordt zichtbaar welke technologie per geproduceerde kilowattuur het voordeligst is bij kostendekkende exploitatie, exclusief belastingen en winstmarges. Zo blijkt dat

hernieuwbare energie, ondanks hogere systeemkosten, vaak concurrerend blijft door de lage opwek- en exploitatiekosten, terwijl kernenergie duurder kan uitvallen door hoge investerings- en onderhoudslasten.

De toevoeging van wind op zee als zelfstandige optie laat zien dat deze qua maatschappelijke kostprijs tussen wind op land en de 50/50 zon-windmix in ligt, en structureel goedkoper blijft dan kernenergie en zonne-energie.

Leveringszekerheid, geopolitiek en netstabiliteit.

Leveringszekerheid, geopolitieke onafhankelijkheid en netstabiliteit zijn essentiële aanvullende criteria bij de beoordeling van energieopties, naast puur economische overwegingen.

Leveringszekerheid heeft betrekking op de mate waarin een energiesysteem continu in staat is om te voldoen aan de elektriciteitsvraag. Kernenergie levert een stabiele baseload, onafhankelijk van het weer, en kan daarmee een stabiliserende rol vervullen in een energiesysteem dat sterk leunt op variabele bronnen zoals zon en wind. Hernieuwbare energie vereist daarentegen voldoende opslagcapaciteit, slimme vraagsturing en flexibele back-upvoorzieningen om ook tijdens perioden met weinig zon en wind de leveringszekerheid te waarborgen.

Geopolitieke onafhankelijkheid betreft de afhankelijkheid van geïmporteerde energiebronnen of grondstoffen. Kernenergie is afhankelijk van uraniumimport, vaak uit landen met instabiele geopolitieke verhoudingen of autoritaire regimes. Hernieuwbare technologieën maken gebruik van kritieke metalen zoals lithium, kobalt en zeldzame aardmetalen, die eveneens geopolitiek gevoelig zijn, maar waarvan de bronnen geografisch meer gespreid zijn en waarvoor meer alternatieven en recyclingopties beschikbaar zijn. Bovendien biedt hernieuwbare opwekking, eenmaal gerealiseerd, een grotere mate van energieautonomie op nationaal of lokaal niveau.

Netstabiliteit verwijst naar de technische betrouwbaarheid van het elektriciteitsnet. Kerncentrales leveren constante vermogensstromen, maar zijn weinig flexibel in het snel op- of afregelen van productie. In een energiesysteem met veel variabele hernieuwbare bronnen kan dit leiden tot spanningen in het net. Hernieuwbare bronnen zijn juist flexibel inzetbaar qua schaal en locatie, maar stellen hogere eisen aan netsturing, opslag en infrastructuur om fluctuaties effectief op te vangen.

Wind op zee levert doorgaans meer constante vermogens dan wind op land en zon, wat bijdraagt aan de voorspelbaarheid van aanbod, al vereist het net wel robuuste infrastructuur op zee.

Zie Tabel 3 voor een overzicht van de totale kosten per technologie omgerekend naar €/kWh. De omgerekende kosten per kilowattuur maken niet alleen de economische haalbaarheid inzichtelijk, maar nodigen ook uit tot een bredere beoordeling van de maatschappelijke wenselijkheid van verschillende energiemixen. Daarbij moeten kostenefficiëntie, duurzaamheid en systeemfunctie steeds in samenhang worden bekeken.

Tabel 3 Totale maatschappelijke kosten per technologie omgerekend naar €/kWh.

Technologie	Opbouwkosten (M€/TWh)	Restkosten (M€/TWh)	Systeemkosten (M€/TWh)	Totale kosten (M€/TWh)	Totale kosten (€/kWh)
Kernenergie (SMR)	100	18	10	128	0,13
Wind op land	45	4	40	89	0,09
Wind op zee	70	6	80	156	0,11
Zonnepanelen (PV)	43	2	125	170	0,17
Hernieuwbaar 50% zon / 50% wind	44	3	83	130	0,13
85% hernieuwbaar + 15% kernenergie	58	7	64	129	0,13

Prognose kostenontwikkeling tot 2050

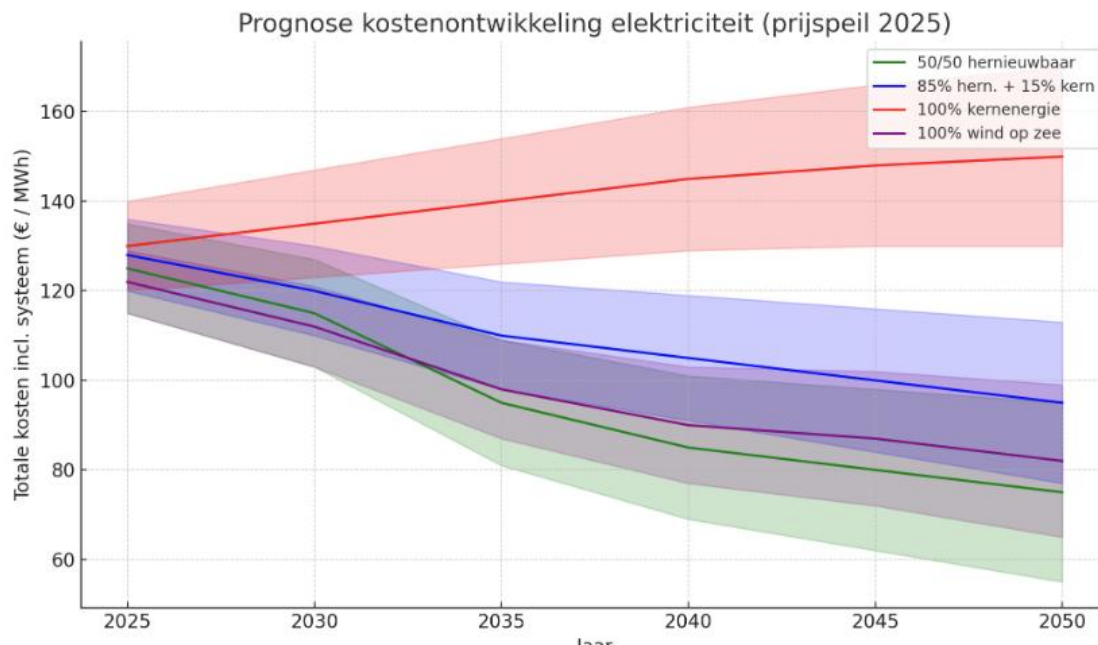
De kostencurven voor hernieuwbare energie en kernenergie zijn opgesteld op basis van een combinatie van historische kostenreeksen, technologische trends, schaalvoordelen, beleidsontwikkelingen en internationale projecties. Voor hernieuwbare bronnen is rekening gehouden met verdere kostendalingen als gevolg van massaproductie, technologische innovatie en dalende financieringskosten. Bij kernenergie zijn factoren zoals langere bouw tijden, hogere kapitaalslasten, strengere veiligheidsnormen en maatschappelijke acceptatie meegewogen, inclusief de mogelijke impact van Small Modular Reactors (SMR's).

Rond het jaar 2025 wordt een omslagpunt verwacht waarbij hernieuwbare elektriciteit (zon en wind, inclusief opslag) goedkoper wordt dan nieuwe kernenergie. Deze kruising van de kostencurven is gebaseerd op projecties waarin de LCOE (Levelized Cost of Energy) van hernieuwbare bronnen sneller daalt, terwijl die van kernenergie relatief constant blijft of zelfs stijgt vanwege de complexiteit en lange realisatietijd van nieuwe installaties.

De onzekerheidsmarges in deze prognoses nemen toe naarmate de tijd vordert. Voor 2025 is de onzekerheid nog beperkt (circa $\pm 5\%$) dankzij recente marktdata en concrete projecten. Richting 2050 lopen de onzekerheidsbanden op tot ongeveer $\pm 20\%$, onder invloed van factoren zoals schommelende grondstofprijzen, technologische doorbraken, beleidswijzigingen, geopolitieke ontwikkelingen en veranderende maatschappelijke voorkeuren. Deze onzekerheid is in de prognosegrafiek weergegeven met grijze banden rond de centrale kostencurves.

Hoewel deze prognoses geen exacte voorspellingen zijn, geven ze wel een onderbouwde inschatting van de verwachte kostenontwikkeling op basis van plausibele aannames. Het blijft essentieel om dergelijke projecties regelmatig te actualiseren aan de hand van de nieuwste markt- en technologiegegevens.

De grafiek toont het kantelpunt rond 2025 waarbij hernieuwbare elektriciteit (zon en wind, inclusief opslag) goedkoper wordt dan nieuwe kernenergie. De grijze banden representeren de toenemende onzekerheid in de kostenprojecties richting 2050.



Figuur 1. Geprojecteerde ontwikkeling van de opwekkosten (LCOE) voor verschillende energiemixen tot 2050, inclusief onzekerheidsmarges. Wind op zee is toegevoegd als afzonderlijke curve en toont een gunstig kostenverloop door schaalvoordelen en stabiele productie.

Conclusie

De totale maatschappelijke kosten per MWh blijken vergelijkbaar voor meerdere scenario's: 100% hernieuwbaar (zon en wind in een 50/50-mix), 85% hernieuwbaar + 15% kernenergie, en – op termijn – ook 100% wind op zee. Wind op zee laat een gunstig kostenverloop zien dankzij hoge vollasturen, afnemende investeringskosten en beperkte opslagbehoefte, al blijven de systeemkosten door netinfrastructuur relatief hoog [4][5][6].

De keuze tussen deze opties wordt daarmee in toenemende mate bepaald door niet-koste gerelateerde factoren, zoals:

- snelheid van realisatie (voordeel voor zon en wind),
- ruimtebeslag (voordeel voor wind op zee en kernenergie),
- leveringszekerheid en flexibiliteit (voordeel voor combinaties),
- en geopolitieke afhankelijkheid (waarbij hernieuwbaar gunstiger scoort) [7][8].

De analyse onderstreept het belang van een diverse mix, waarin wind op zee een steeds centralere rol kan spelen in het toekomstige Nederlandse energiesysteem, naast zon, wind en kernenergie.

Aanvullend advies: een marktconforme benadering van kernenergie

In de huidige beleidsdiscussie wordt kernenergie vaak benaderd als een strategische technologie waarvoor directe overheidsdeelname of een staatsbedrijf noodzakelijk zou zijn. Vanuit een conservatieve invalshoek wordt dit gelegitimeerd door leveringszekerheid, nationale controle en lange terugverdientijden. Toch kleven aan een staatsbedrijf of directe overheidsdeelname belangrijke nadelen, zoals marktverstoring, financiële risico's voor de belastingbetaler en verminderde prikkels tot efficiëntie.

Een alternatief is een marktconforme benadering, waarin de overheid zich richt op de ontwikkeling van een open, toekomstbestendige energie-infrastructuur, die geschikt is voor alle typen opwekking – inclusief kernenergie. Denk hierbij aan het realiseren van robuuste netaansluitingen, flexibele opslag en balanceringscapaciteit, waar zowel hernieuwbare als conventionele bronnen op kunnen aansluiten. Deze infrastructuur wordt beheerd door de netbeheerder, die de kosten factureert aan alle gebruikers op basis van transparante tarieven.

Binnen dat systeem kan kernenergie worden toegelaten als **optie voor private investeerders, zonder voorkeurspositie of directe staatsfinanciering**. Wanneer kernenergie zich economisch kan bewijzen, zal deze vanzelf toetreden tot de markt. Zo blijft het energiebeleid in lijn met het vrije marktmechanisme en wordt vermeden dat de overheid onnodige financiële risico's neemt of concurrentie vervalst.

Een uitzondering blijft mogelijk voor onderzoek en innovatie. De staat kan en moet investeren in fundamenteel onderzoek, bijvoorbeeld via een kleinschalige onderzoeksreactor of testfaciliteiten, zoals gebruikelijk is in andere technologische domeinen. Dat is geen marktverstoring, maar een publiek belang in kennisontwikkeling.

Kortom, geef de markt de ruimte om te kiezen wat rendabel is, en zorg als overheid voor een infrastructuur waarin die keuze eerlijk kan plaatsvinden.

Referenties

1. Ministerie van EZK. (2024). Kamerbrief Kernenergie & SMR's. Tweede Kamer, vergaderjaar 2023–2024, 32645 nr. 130.
2. Stichting Laka. (2023). Nieuwe, kleinere kerncentrales (SMR) in Nederland.
3. CE Delft. (2023). Kosten hernieuwbare opwek en opslagtechnologieën in Nederland.
4. IRENA. (2022). Renewable Power Generation Costs.
5. BloombergNEF. (2023). New Energy Outlook.
6. NVDE / Ecofys. (2023). Kostendalingen zon en wind in Nederland.
7. OECD/NEA. (2020). The Costs of Decarbonisation: System Costs with High Shares of Nuclear and Renewables.
8. TNO. (2022). Energie in Nederland: markt en beleid in transitie.
9. TNO. (2023). Kosten en systeemeffecten van offshore wind in Nederland.