

Systemkosten versus het aandeel Kernenergie

Serie: Inzichten uit de internationale vakliteratuur

CleanEnergy&Co

Maart 2025



OVER DE SERIE *'Inzichten..'*

Onze opdrachtgevers hebben vaak onvoldoende tijd om de vakliteratuur bij te houden.

Met deze serie *'Inzichten uit de internationale vakliteratuur'* hopen wij de inzichten van wetenschappers en vakexperts samen te vatten, om zo een bijdrage te leveren aan discussies over de energietransitie.

Documenten uit onze serie *'Inzichten uit de internationale vakliteratuur'* bevatten geen vertrouwelijke informatie van opdrachtgevers en mogen algemeen worden gedeeld.

OVER DIT DOCUMENT

Dit document gaat in op internationale onderzoeken waarin scenario's voor energiesystemen met een hoog en een laag aandeel kernenergie worden gesimuleerd .

Dit document is het vervolg van

"Energiekosten: Opwek- en Systeemkosten, LCOE, VALCOE en LFSCOE".

Daaruit bleek dat de methoden om de elektriciteitskosten van zon, wind en kernenergie te berekenen sterk zijn geëvolueerd.

CleanEnergy&Co

Wij zijn een adviesbureau dat zich richt op schone elektriciteit en warmte.

Onze opdrachtgevers zijn bedrijven, overheidsorganisaties en financiers.

Wij maken objectieve, technologieneutrale analyses en adviezen.

Bezoek ons op: www.cleanenergyco.nl

Colofon

Versie: 1.0

Publicatiedatum: 10 maart 2025

Vragen naar aanleiding van dit document?

Neem graag contact op via: team@cleanenergyco.nl

Inhoudsopgave

Inhoudsopgave	iii
Samenvatting	1
I. Massachusetts Institute of Technology	4
II. OECD – The cost of decarbonisation	6
III. Rice University, 2022	7
IV. Quantified Carbon, 2024	8
V. Sepulveda - Decarbonization of Power Systems	10
Bronnen	12



Samenvatting

Introductie

Nederland streeft net als andere andere EU landen naar een fossielvrij energiesysteem in 2050. De afgelopen jaren zijn er vele plannen en scenario's gemaakt door diverse organisaties¹, meestal in opdracht van het Ministerie van Economische Zaken en Klimaat. Al die scenario's gaan uit van 0% of maximaal 10% kernenergie.

De opdracht om ook scenario's met 50% en 75% kernenergie te onderzoeken is niet gegeven. Terwijl Frankrijk hèt voorbeeld is in Europa, met de laagste CO₂ emissies en de laagste elektriciteitskosten². Het succes van het Franse systeem – met 75% kernenergie - maakt het des te opvallender dat scenario's met meer dan 10% kernenergie nooit zijn onderzocht.

De scenario's die wel zijn onderzocht gebruiken een mix van 90-95% uit zon en wind. Deze mix is onbewezen en bestaat nog nergens ter wereld. Er is zelfs geen land dat de 50% haalt. Met 47% elektriciteitsopwek uit wind en zon in 2024 is Nederland recordhouder, al ondervindt Nederland nu ook uitdagingen zoals hoge energiekosten en netcongestie.

De vraag is daarom: wat zeggen de ervaringen en de scenario's uit het buitenland?

Elektriciteitsprijzen in landen met een hoog en een laag aandeel kernenergie

Door de groothandelsprijzen³ te vergelijken tussen twee groepen landen:

- I. Veel kernenergie, weinig zon en wind (Frankrijk, Zweden, Finland)
 - II. Veel zon en wind, weinig kernenergie (Nederland, Denemarken, Duitsland, Engeland)
- ..blijkt dat de eerste groep de afgelopen jaren steeds de goedkoopste elektriciteit had.

Er is een sterke correlatie - al is causaliteit daarmee niet bewezen. Andere factoren spelen ook een rol: intrinsieke verschillen tussen landen; de hoeveelheid opwek via waterkracht en biomassa; de rol van de hoge gasprijs.

Onderzoeken uit het buitenland

In andere landen zijn gelukkig wel scenario's geanalyseerd van de elektriciteitskosten met een hoog aandeel kernenergie versus geen kernenergie. Via gedetailleerde modellen van de werkelijkheid en het simuleren van scenario's kunnen conclusies worden getrokken over de vraag welke mix de laagste kosten heeft: met veel of juist weinig kernenergie.

¹ TNO, PBL, Tennet en de netbeheerders, het Expert Team EnergieSysteem, Berenschot.

² Bovendien hebben Franse kerncentrales het Duitse energiesysteem al door vele dunkelflautes heen geholpen.

³ De gewogen gemiddelde day-ahead uurprijzen per jaar via de EPEX en vergelijkbare spotmarkten.

Geen enkele simulatie is perfect; rekenmodellen vereenvoudigen de werkelijkheid. De modellen verschillen in de aannames en in de factoren die wel en niet worden meegenomen. Ook de gesimuleerde jaren en locaties verschillen. Lokale factoren spelen een grote rol in de kosten: bevolkingsdichtheid, de aanwezigheid van stuwmeren, de kracht van wind en zon, het vraagprofiel enzovoorts. De resultaten voor land A gelden niet precies voor land B.

Ondanks de verschillen leiden veel onderzoeken tot dezelfde conclusie.

In dit rapport worden vijf onderzoeken kort samengevat:

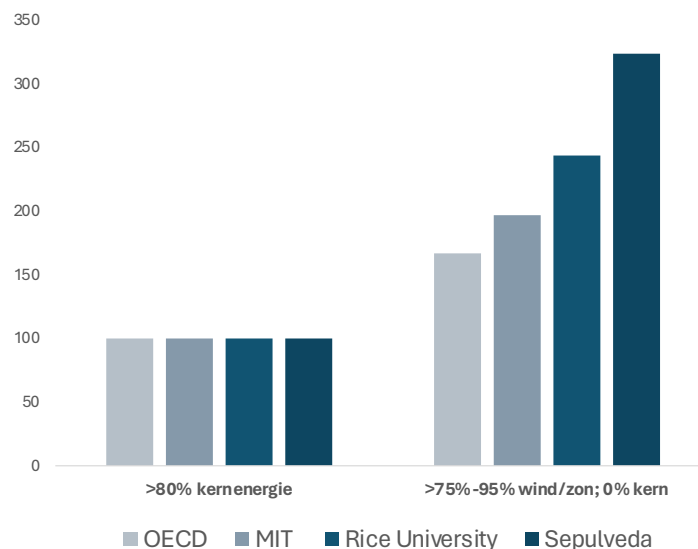
- I. *MIT* - een groot onderzoek naar verschillende regio's, waaronder Engeland
- II. *OECD NEA* - verschillende mixen van nucleair en hernieuwbaar voor Frankrijk
- III. *Rice University* - simulaties voor Texas en Duitsland
- IV. *Sepulveda* - scenario's voor onder meer het noordoosten van de VS dat qua bevolkingsdichtheid en opwek van zon en wind redelijk lijkt op Nederland
- V. *Quantified Carbon* - gericht op Duitsland; een mix met 0% en 40% kernenergie

Resultaten

In alle vijf onderzoeken is een systeem op basis van kernenergie goedkoper dan een systeem op basis van zon en wind. Het kostenverschil is verrassend groot: het gaat niet om 10% of 20% maar om een **factor 2 à 3**. Figuur 1 vat deze resultaten samen.

Vergelijking van elektriciteitskosten met en zonder kernenergie

NB: Genormaliseerde kosten (> 80% kernenergie = 100)



Figuur 1: Overzicht resultaten diverse onderzoeken waarin de kosten van >80% kernenergie zijn gedefinieerd als 100. Volgens deze onderzoeken is een vrijwel fossielvrije elektriciteitsmix op basis van wind en zon 2-3 keer zo duur t.o.v. een mix uit grotendeels kernenergie.

Het onderzoek van Quantified Carbon bevat geen mix met >80% kernenergie en is daarom niet opgenomen in de grafiek. Maar ook bij Quantified Carbon blijkt een mix met 40% kernenergie goedkoper dan een mix zonder kernenergie.

Uit deze studies blijkt ook consequent dat een mix op basis van zon en wind 8-9 keer meer opgesteld vermogen vergt dan een mix op basis van kernenergie. Dit verklaart het grote kostenverschil.

Kanttekening bij deze onderzoeken

De onderzoeken houden meestal géén rekening met de netwerkkosten (extra kabels naar zonnenvelden en windturbines) en ook niet met onbalanskosten. Ook zijn de aannames vaak gunstig voor wind en zon en ongunstig voor kernenergie. In werkelijkheid is het verschil in kosten mogelijk nog hoger.

Wat betekent dit voor Nederland?

Op basis van deze onderzoeken is het waarschijnlijk dat ook in Nederland een systeem op basis van kernenergie tot 2 tot 3 keer lagere elektriciteitskosten heeft dan een systeem op basis van zon en wind (zoals het huidige NPE).

Nederland in diverse opzichten ongunstiger dan andere landen voor opwek met zon en wind: de capaciteitsfactor van zonPV is laag, er is weinig vrije ruimte beschikbaar en we hebben geen stuwmeren voor elektriciteitsopslag.

Ook vanuit klimaatperspectief is kernenergie gunstiger. De totale broeikasgasemissies over een periode van 60 jaar zijn voor een systeem op basis van kernenergie 10 keer lager⁴.

Gezien de 2-3 keer lagere kosten en 10 keer lagere BKG-emissies lijkt het verstandig om de Nederlandse beleidsfocus op zon en wind aan te passen naar een focus op kernenergie. Ook lijkt het verstandig om de stimulering en subsidiëring van ZonPV en Wind-op-Zee onthoud te zetten. Hierdoor neemt ook netcongestie af en volstaan minder investeringen in het net (nu begroot op € 200 Miljard).

⁴ Zie de studie: *Klimaat effecten Wind en Zon versus Kernenergie*, Mensink, Februari 2025.

I. Massachusetts Institute of Technology

Een groot interdisciplinair team van de Amerikaanse Universiteit *Massachusetts Institute of Technology* publiceerde in 2018 een zeer uitgebreid onderzoek met vele scenario's [MIT-2018]. Deze analyse is ook interessant omdat deze niet alleen kijkt naar de Verenigde Staten maar ook naar andere landen waaronder het Verenigd Koninkrijk. Het VK is zeer relevant voor Nederland omdat de opwek uit zon en wind vergelijkbaar is met het VK.

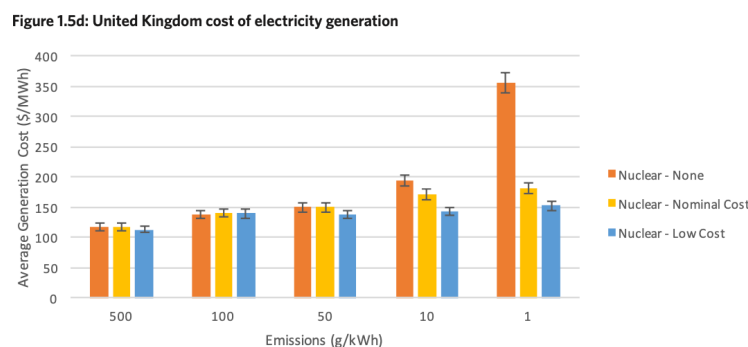
Methode

Het simulatiemodel van MIT berekent de kosten-optimale elektriciteitsmix voor een specifieke *carbon intensity* – voor bijvoorbeeld 1, 10 en 50 gram CO₂-eq per kilowattuur⁵.

Het model berekent de mix met de laagste kosten om die carbon intensity te bereiken, met als randvoorwaarde dat kernenergie *wel* of *juist niet* is toegestaan. Gezien de onzekerheid en uiteenlopende prognoses van de bouwkosten van een kerncentrale, heeft het model ook varianten met hoge en lage bouwkosten van de kerncentrales.

Resultaten

Figuur 2 toont de resultaten voor het VK: de elektriciteitsmix zonder kernenergie is in *alle gevallen duurder* dan de mix met kernenergie; bij de emissievrije mix *twee keer* zo duur.



Figuur 2: Elektriciteitskosten UK voor verschillende scenario's

Opbouw van fossielvrije mix A) met en B) zonder kernenergie

Nederland streeft naar een 'netto-nul' economie voor 2050 en al eerder naar een fossielvrije elektriciteitsmix. Het doel van 1 gram CO₂/kWh komt het dichtst bij de 'netto-nul' of fossielvrije mix en daarom is dit de meest relevante vergelijking.

Het model van MIT komt tot de twee kostenoptimale opties voor dit doel: eentje met en eentje zonder kernenergie.

⁵ NB men heeft hierbij alleen gekeken naar de scope 1 emissies (direkt uit de schoorsteen), niet de scope 2 en 3 emissies (oa de bouw en bouwmaterialen).

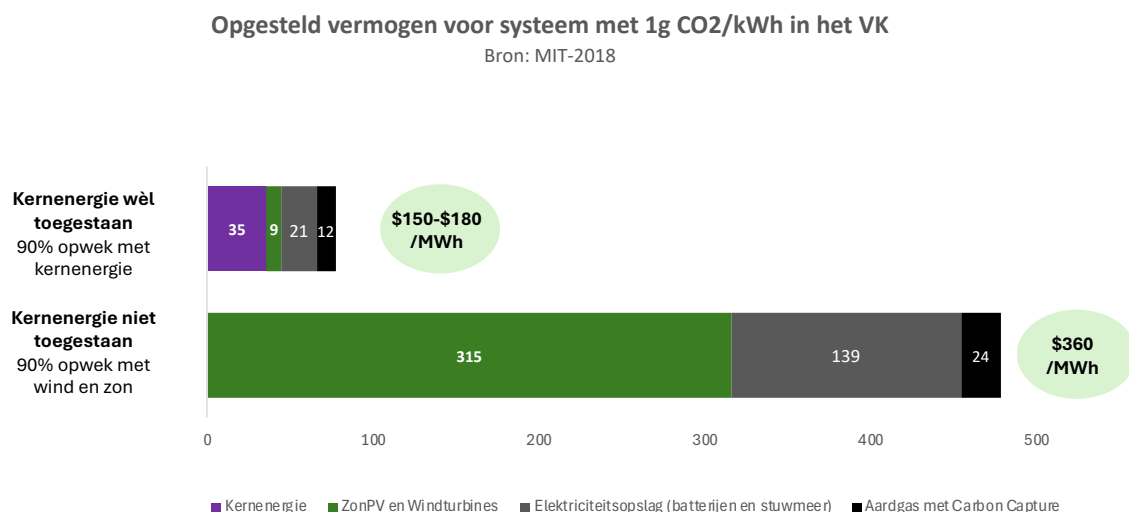
Zoals getoond in Figuur 2 zijn de elektriciteitskosten van de mix zonder kernenergie twee keer zo hoog als de mix met kernenergie (\$360/MWh en \$150-180/MWh).

Figuur 3 toont de samenstelling van de optimale fossielvrije mix *met* en *zonder* kernenergie. In de mix met kernenergie blijkt het kostenoptimaal om niet 100% maar 90% op te wekken met kernenergie; 7% komt van wind en zon en 3% van gascentrales met CCS.

Opvallend is het grote verschil in het benodigde vermogen tussen de twee opties:

- Met kernenergie volstaat 35 GW aan kerncentrales voor 90% van de opwek.
- Zonder kernenergie is er 315 GW nodig aan wind en zon – 9 keer zoveel!
Bovendien is er zes keer zoveel opslag nodig en twee keer zoveel gascentrales met CCS nodig.

Het wekt daarom geen verbazing dat kernenergie leidt tot 2-3 keer lagere kosten.



Figuur 3: Opgesteld vermogen (in GW) voor fossielvrije energiemix in het Verenigd Koninkrijk met en zonder kernenergie.

Opmerkingen

Netwerkkosten worden niet meegenomen in het model van MIT. De werkelijke kosten van een systeem zonder kernenergie liggen daardoor iets hoger dan hier gepresenteerd.

Voor de elektriciteitsopslag gaat men uit van grotendeels stuwmeren (die zijn beschikbaar in het VK) en een kleiner aandeel batterijen. In Nederland zijn er geen stuwmeren beschikbaar.

II. OECD – The cost of decarbonisation

De Organisation for Economic Cooperation and Development (OECD) is een grote internationale organisatie waarin 37 Westerse landen samenwerken op diverse terreinen. Het Nuclear Energy Agency is een dochterorganisatie van de OECD. Een groot team van beide organisaties heeft gewerkt aan het onderzoek en het gedetailleerde (224 pag) en sterk onderbouwde rapport [OECD-2019].

Opzet

In dit rapport worden vele scenario's geanalyseerd voor onder meer Frankrijk, met een focus op de verwachte elektriciteitsvraag in het midden van de eeuw.

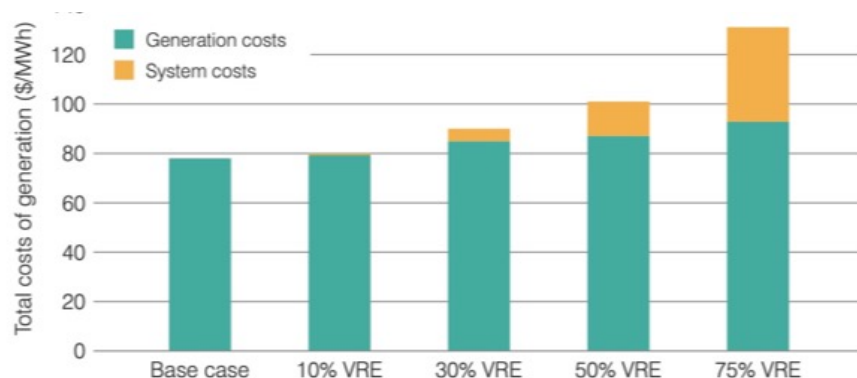
Er worden diverse scenario's geanalyseerd, waaronder:

- *Base case* - vergelijkbaar met de huidige situatie – 75% opwek met kernenergie.
- *50% VRE* – (Variable Renewable Energy = zon en wind) en 25% met kernenergie
- *75% VRE* – 75% zon en wind en 0% kernenergie

In alle scenario's wordt ca 10% opgewekt met waterkracht en 15% met gascentrales.

Resultaten

De kosten van de verschillende scenario's worden getoond in Figuur 4 en spreken voor zich: hoe minder kernenergie en hoe meer zon en wind, hoe duurder. Vooral door systeemkosten.



Note: Figure shows total generation costs for five main scenarios characterized by different levels of electricity generation from variable renewable energy (0%, 10%, 30%, 50% and 75%) for a region with an annual electricity demand of 537 TWh, corresponding to the expected demand of a country the size of France in 2050. Around 80% of electricity generation in the base case (0% VRE) is from nuclear, progressively decreasing to 0% nuclear generation in the 75% VRE case. Costs are in 2013 currency.

Source: The Costs of Decarbonisation: System Costs with High Shares of Nuclear and Renewables, OECD Nuclear Energy Agency (2019)

Figuur 4: Elektriciteitskosten bij oplopend aandeel hernieuwbaar. Bron: OECD-2019.

Opmerkingen

Belangrijk is dat in deze analyse 15% van de energie nog wordt opgewekt met gascentrales. Als je die 15% ook met zon en wind opwekt stijgen de kosten snel. Bovendien beschikt Frankrijk over een groot vermogen aan stuwmeren. De kosten van elektriciteitsopslag zouden in Nederland fors hoger liggen.

III. Rice University, 2022

Rice University is een grote en gerenommeerde universiteit uit Texas. In 2022 maakte de onderzoeksgroep onder leiding van Robert Idel een uitgebreid model voor het simuleren en analyseren van totale elektriciteitskosten, beschreven in een publicatie [Rice, 2022].

Opzet van het onderzoek

In deze scenario's wordt steeds 95% door één type opwekker en de resterende 5% door een gascentrale; dat is volgens Idel de goedkoopste 'dispatchable' opwek.

Het model rekent zowel Texas door als Duitsland. En de resultaten voor Duitsland zijn redelijk representatief voor Nederland vanwege de vergelijkbare profielen van de vraag en de opwek van zon en wind.

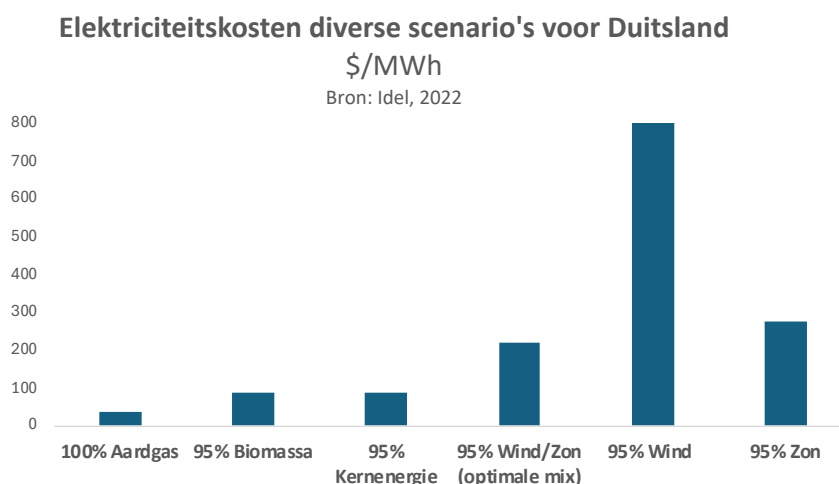
Relevant is verder dat de variant '95% zon&wind' sterk lijkt op het Nederlandse 'Nationaal Plan Energiesysteem 2050'. In het NPE wordt 90% opgewekt door zon en wind en 10% met kernenergie.

Resultaten

Volgens de analyse van Idel – zie Figuur 5- kost elektriciteit ca \$90/MWh in het scenario met 95% kernenergie en \$220/MWh bij 95% wind/zon. Het hernieuwbare systeem is daarmee **244%** duurder dan een systeem op basis van kernenergie.

Conclusie voor Nederland

Voor Nederland geldt waarschijnlijk ook dat een energiemix volgens het NPE minimaal twee keer zo duur is als een mix op basis van 95% kernenergie.



Figuur 5: Elektriciteitskosten diverse scenario's. Bron: Idel, 2022.

IV. Quantified Carbon, 2024

Quantified Carbon is een Zweeds energie-onderzoeksburo. Het simuleerde in 2024 enkele scenario's om te voorzien in de energievraag in Duitsland in 2045 [QC-2024].

Nederland en Duitsland lijken met betrekking tot energie veel op elkaar. Daarom is ook deze studie zeer relevant voor Nederland en de plannen voor het energiesysteem richting 2050.

Methode

Net als MIT en OECD gebruikt Quantified Carbon een uitgebreid rekenmodel met vraag- en opwek profielen op uurbasis, en gedetailleerde, actuele gegevens over de bouwkosten en operationele kosten van de diverse opwekkers en de kosten van CO₂ emissies (via het ETS).

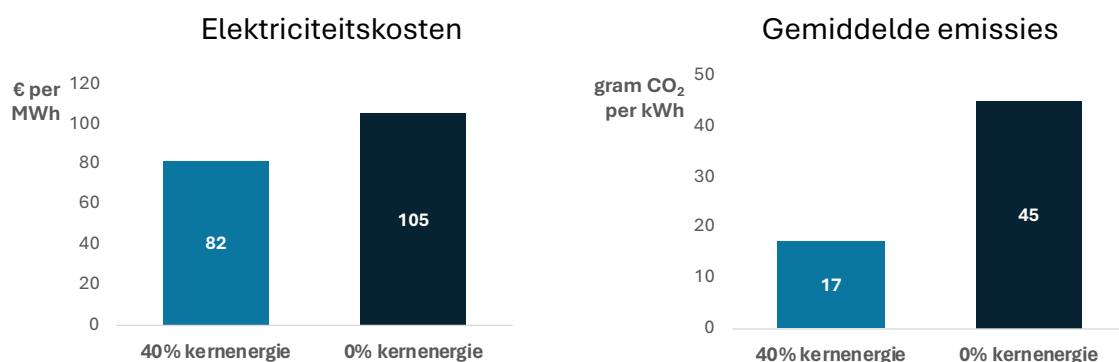
Ook dit rekenmodel berekent de kostenoptimale mix aan de hand van een randvoorwaarde: ofwel geen kernenergie, of maximaal 40% kernenergie. Fossielvrije elektriciteit was geen randvoorwaarde. Wel berekent het model de scope 1 CO₂-emissies⁶ van beide scenario's.

De twee scenario's en resultaten

De twee scenario's zijn:

- I. *0% kernenergie*. De optimale mix is dan 90% zon en wind, 10% hydro/biomassa/gas
- II. *Maximaal 40% kernenergie*. De optimale mix is dan 40% kernenergie, 52% zon en wind en 8% hydro/biomassa/gas.

De resultaten worden getoond in Figuur 6. Bij 40% kernenergie dalen de elektriciteitskosten van €105 naar €82 per MWh; bijna 30% lager. De klimaatemissies zijn bijna 3 keer lager.

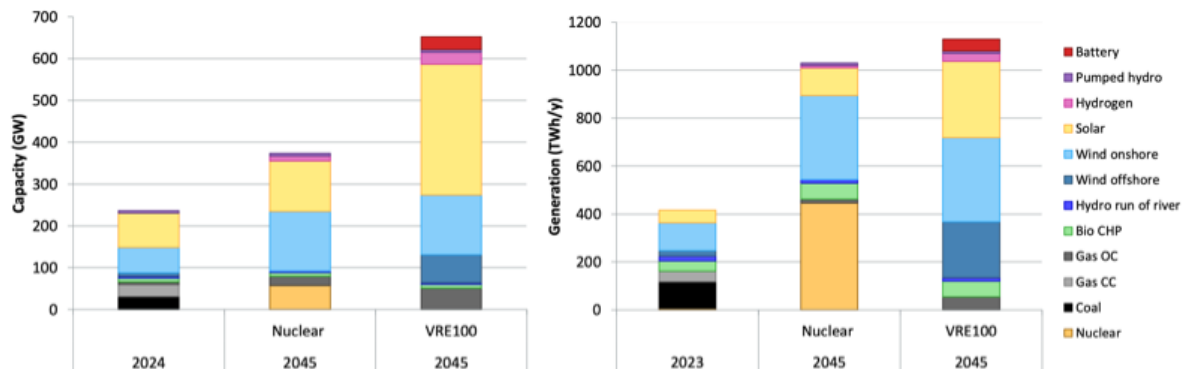


Figuur 6: Elektriciteitskosten en gemiddelde emissies van beide scenario's. Bron: Quantified Carbon, 2024.

⁶ Scope 1 broeikasgasemissies zijn de emissies die 'direkt uit de pijp' komen. Scope 2 emissies zijn indirecte binnenlandse emissies (via bijvoorbeeld auto's van werknemers). Scope 3 emissies zijn de emissies die vrijkomen tijdens productie en sloop, bijvoorbeeld het produceren van het beton, staal en koper benodigd voor een windturbine, plus assemblage en transport, en de emissies tijdens de sloop en afvalverwerking.

Opgesteld vermogen en de opwek per scenario

Figuur 7 toont links het opgestelde vermogen en rechts de elektriciteitsopwek per type opwekker. Het scenario 'VRE100' (0% kernenergie) vereist twee keer meer opgesteld vermogen ten opzichte van het scenario 'Nuclear' (maximaal 40% kernenergie).



Figuur 7: Opgesteld vermogen (links) en opgewekte elektriciteit (rechts) volgens de beide scenario's. Bron: QC-2024.

Kostenvergelijking met Nederland anno 2024

De gemiddelde stroomkosten met 40% kernenergie zijn 82 € per MWh – ofwel ca 8,2 cent per kWh. Deze kosten zijn ongeveer 20% *lager* dan de gemiddelde stroomprijzen in Nederland afgelopen jaar (ca 10 ct/kWh). Volgens deze analyse maakt een mix met 40% kernenergie onze elektriciteit goedkoper. Helaas is er geen scenario met 60% of 80% kernenergie onderzocht.

Opmerkingen

Quantified Carbon heeft gunstige aannames gebruikt voor zon en wind en ongunstige aannames voor kernenergie:

- hoge bouwkosten voor kernenergie (€7 MRD/GW)
- lage bouwkosten voor PV installaties (€0,57/Wp)
- een onrealistisch lange gemiddelde levensduur voor zonnepanelen (30 jaar)
- PV installaties zijn 'optimaal zuid' georiënteerd en omvormers hebben 100% AC/DC verhouding. Hierdoor is de opbrengst ca 25% hoger dan in de praktijk.
- Er zijn geen netwerkkosten voor zon, onshore en offshore wind meegenomen

Met betrekking tot broeikasgasemissies zijn de Scope-3 emissies (voor productie van de benodigde materialen en de bouw) niet meegenomen in deze analyse. In dat geval zouden de verschillen een stuk groter zijn in het voordeel van de mix kernenergie.

V. Sepulveda - Decarbonization of Power Systems

In dit Amerikaanse promotieonderzoek uit 2016 werd net als in de bovengenoemde studies een uitgebreid en gedetailleerd simulatiemodel ontwikkeld [Sepulveda-2016]. Het is al wat ouder maar we noemen dit onderzoek hier wel omdat het veel groter aantal scenario's heeft doorgerekend waaruit duidelijke trends naar voren komen.

Methode

Het rekenmodel is gebaseerd op werkelijke vraag- en opwekprofielen op uurbasis en een lijst met aannames over de bouwkosten en operationele kosten van de diverse opwekkers. Belangrijk is dat er vele scenario's worden doorgerekend met steeds als randvoorwaarde een bepaalde emissie-intensiteit. En ook dit rekenmodel berekent dan de kostenoptimale mix.

Er zijn twee regio's bekeken: Texas en New England (het noordoosten van de VS).

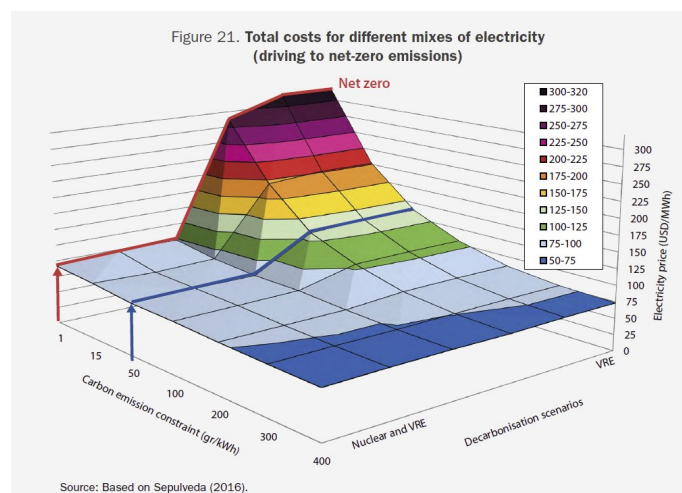
Nederland lijkt met betrekking tot de vraag en de opwekprofielen uit zon en wind veel meer op New England dan op Texas.

Resultaten

Voor New England is een fossielvrije mix op basis van zon en wind drie keer zo duur als een mix op basis van grotendeels kernenergie (30ct/kWh respectievelijk 9ct/kWh).

Dankzij het grote aantal scenario's bij verschillende emissie-intensiteiten kon men de illustratie in Figuur 8 maken. Deze illustratie maakt in één oogopslag inzichtelijk:

- 1) hoe meer kernenergie des te goedkoper de elektriciteit – in alle scenario's;
- 2) hoe minder emissies zijn toegestaan, des te harder stijgen de kosten van zon en wind.

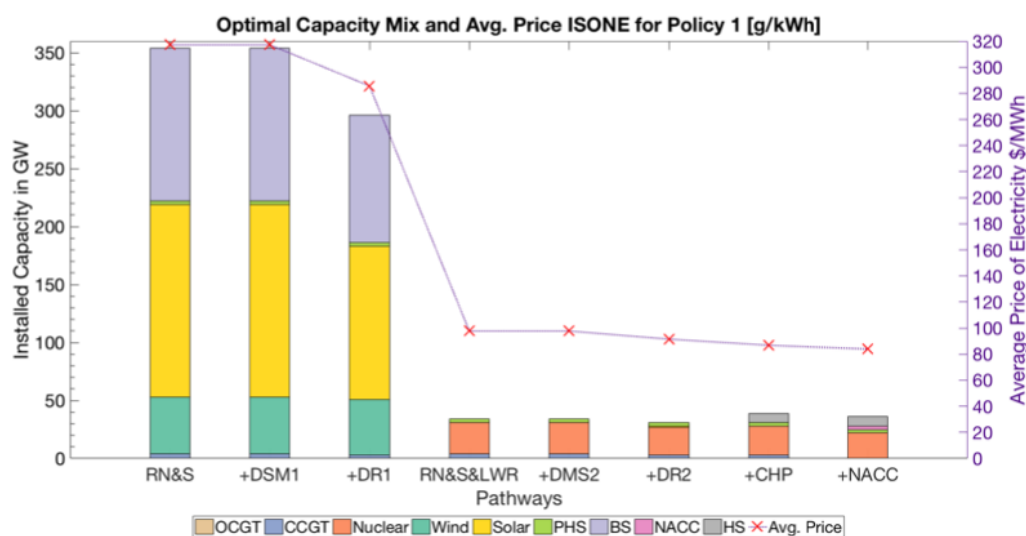


Figuur 8: Elektriciteitskosten als een functie van de toegestane emissies en het percentage kernenergie. Bron: Sepulveda, 2016.

Figuur 9 toont de benodigde vermogens (linker y-as) van diverse varianten van een kostenoptimale fossielvrije mix voor New England, en de resulterende elektriciteitskosten (rechter y-as).

Zodra kernenergie wordt toegestaan levert het meer dan 95% van de opwek, in alle vijf varianten aan de rechterkant. In deze vijf variaties wordt de hoeveelheid vraag-respons (afschakelen bij hoge uurprijzen) gevarieerd en de typen kerncentrales.

Net als in de vorige studies blijkt ook hier dat een mix op basis van zon en wind 8 tot 9 keer meer opgesteld vermogen nodig heeft ten opzichte van de mix op basis van kernenergie. Daarmee wordt direct evident waarom een mix op basis van zon en wind zoveel duurder is.



Figuur 9: Vergelijking scenario's zonder (de 3 scenario's links) en met kernenergie (de vijf scenario's rechts) voor New England, VS.

Opmerkingen

Een belangrijke opmerking is dat dit onderzoek uit 2016 stamt en dat veel aannames niet meer kloppen. De kosten van zon, wind en batterij-opslag zijn flink gedaald. De onbalans- en netkosten zijn echter niet meegenomen in deze studie, en die kosten zijn in de praktijk vooral groot voor zon en wind. Daarom geeft Figuur 8 waarschijnlijk een redelijk representatief beeld van de actuele verhouding in kosten.

Bronnen

- MIT -2018 The Future of Nuclear Energy in a Carbon-Constrained World - an interdisciplinary MIT study, MIT, 2019. [Weblink](#).
- OECD-2019 *The Costs of Decarbonisation: System Costs with High Shares of Nuclear and Renewables*, OECD Nuclear Energy Agency, 2019. [Weblink](#).
- Rice-2022 *Levelized Full System Costs of Electricity*, R. Idel, Rice University, 2022. [Weblink](#)
- QC-2024 Role of Nuclear in Germany's Decarbonisation, Quantified Carbon, 2024 [Weblink](#)
- Sepul-2016 *Decarbonization of Power Systems: Analyzing Different Technological Pathways*, N. A. Sepulveda, September 2016. [Weblink](#)