Studie positionering SMR’s



H.J. Compter

Mei 2026

Managementsamenvatting

Deze studie onderzoekt de mogelijke positie van Small Modular Reactors (SMR's) binnen het toekomstige Nederlandse energiesysteem. Daarbij staat niet de technologie op zichzelf centraal, maar de vraag onder welke omstandigheden een langdurige inzet van SMR's technisch, economisch, bestuurlijk en maatschappelijk robuust kan worden geacht.

De analyse laat zien dat de discussie over SMR's plaatsvindt onder omstandigheden van fundamentele onzekerheid. Niet alleen de technologie zelf bevindt zich nog grotendeels in een vroege commerciële en regulatoire ontwikkelingsfase, ook het toekomstige energiesysteem is nog sterk in beweging. Grote onzekerheden bestaan onder meer over:

- de toekomstige elektriciteitsvraag;
- de rol van waterstof en ammoniak;
- de ontwikkeling van opslag;
- de snelheid van elektrificatie;
- de ontwikkeling van wind en zon;
- toekomstige marktordening;
- regelgeving;
- subsidiebeleid;
- renteontwikkeling;
- en de positie van grote kerncentrales.

Juist daardoor ontstaat spanning tussen langjarige, kapitaalintensieve en moeilijk corrigeerbare investeringen enerzijds, en een energiesysteem dat zelf nog fundamenteel in ontwikkeling is anderzijds.

De studie laat zien dat de beoordeling van SMR's sterk afhankelijk is van het schaalniveau waarop de vraag wordt gesteld.

Vanuit lokaal perspectief, zoals voor Voorne aan Zee, lijkt vooralsnog geen evidente robuuste systeemrol aanwezig. De regionale elektriciteits- en warmtevraag is relatief beperkt ten opzichte van de schaal waarop SMR's economisch worden gepositioneerd. Daarnaast bestaan reeds alternatieve warmte- en elektriciteitsvoorzieningen zoals geothermie, warmte infrastructuur, WKK-capaciteit en grootschalige windenergie vanaf de Noordzee. Daardoor ontstaat onzekerheid over benuttingsgraad, schaalvoordelen, warmteafzet en economische robuustheid.

Vanuit provinciaal perspectief verschuift de analyse naar systeemintegratie binnen een reeds sterk transformerend energie- en industriesysteem. Zuid-Holland kent grote aanlanding van windenergie, ontwikkeling van waterstof- en ammoniakinfrastructuur, grootschalige warmtenetten en industriële flexibilisering. Daardoor lijkt de resterende systeemopgave mogelijk minder te liggen bij continue basislastproductie en meer bij flexibiliteit, reservevermogen, opslag, systeemstabiliteit en leveringszekerheid tijdens perioden met lage duurzame productie.

Nationaal blijven strategische argumenten bestaan voor regelbare CO_2-arme productie en leveringszekerheid. Tegelijkertijd ontstaan ook daar fundamentele vragen over:

- de toekomstige systeemfunctie van SMR’s;
- concurrentie met wind, zon en grote kerncentrales;
- de economische houdbaarheid van basislastproductie;
- en de publieke risico’s die langdurig moeten worden gedragen.

Een centrale conclusie van deze studie is dat de beoordeling van SMR’s niet kan plaatsvinden als geïsoleerde technologiebeoordeling. De betekenis van SMR’s kan uitsluitend worden begrepen binnen een integrale systeemanalyse waarin:

- vraagontwikkeling;
- duurzame productie;
- opslag;
- infrastructuur;
- marktordening;
- regelgeving;
- veiligheid;
- financiering;
- susidiering;
- en bestuurlijke risico’s

in onderlinge samenhang worden beschouwd.

Daarnaast laat de studie zien dat veel veronderstelde voordelen van SMR’s momenteel nog grotendeels zijn gebaseerd op ontwerpverwachtingen, modelstudies en toekomstige schaalverwachtingen. Veel bepalende eigenschappen — zoals investeringskosten, bouwtijd, flexibiliteit, onderhoudbaarheid, veiligheid en operationele robuustheid — zijn nog beperkt empirisch gevalideerd in langdurige commerciële praktijk.

Daarmee betreft de huidige discussie niet een bewezen technologie in een onzeker systeem, maar een nog ontwikkelende technologie binnen een eveneens nog ontwikkelend energiesysteem.

De studie concludeert daarom dat besluitvorming over SMR’s primair moet draaien om:

- robuustheid onder onzekerheid;
- behoud van corrigeerbaarheid;
- explicitering van publieke risico’s;
- en zorgvuldige systeemplanning,

en niet uitsluitend om optimalisatie binnen één verondersteld toekomstscenario.

De fundamentele bestuurlijke vraag luidt uiteindelijk niet:
“Kan het technisch?”

maar:

“Onder welke onzekerheden zijn wij bereid ons voor meerdere decennia te verbinden?”

Inhoudsopgave

Studie positionering SMR's 1
Managementsamenvatting 2
Inhoudsopgave 4
1 Inleiding 5
2 Fundamentele systeembeschouwing 6
3 Fundamentele onzekerheid van de technologie zelf 10
4 Conclusies vanuit verschillende schaalniveaus 12
5 Stakeholderperspectief — Voorne aan Zee 15
6 Provinciaal perspectief — Zuid-Holland 19
7 Stakeholderperspectief — Nederland 22
8 Wat aspecten voor de systeem studie SMR 27
9 Slotbeschouwing 31
Bijlage 1 Uitgangspunten voor de studie naar SMR's binnen het toekomstige energiesysteem 32
Bijlage 2 Methodologische analysevolgorde van de studie 38
Bijlage 3 De alternatieven 41
Bijlage 4 De uitgangspunten 42
Bijlage 5 De afbakening van investeringskosten 47
Bijlage 6 Relatie tussen SMR's en grote kerncentrales 50
Bijlage 7 Risico's per productietechniek binnen een toekomstig energiesysteem 52
Bijlage 8 Reflectie op de betekenis van een enquête onder fundamentele onzekerheid 59
Bijlage 9 Historische ontwikkeling 61
Bijlage 10 Invloed keuze van het rijk, de positie van Provincie en gemeenten en particiatie 66
Bijlage 11 Regelvermogen en brandstofprijs 70
Bijlage 11 Literatuurlijst — Studie positionering SMR's 79

1 Inleiding

De discussie over Small Modular Reactors (SMR's) heeft zich de afgelopen jaren ontwikkeld van een voornamelijk technologische discussie naar een bredere vraag over de toekomstige inrichting van het energiesysteem. SMR's worden daarbij regelmatig gepositioneerd als potentiële oplossing voor leveringszekerheid, CO_2-reductie en regelbare energieproductie binnen een energiesysteem met grote hoeveelheden wind- en zonne-energie.

Tegelijkertijd bevindt zowel de technologie zelf als het energiesysteem waarin deze technologie moet functioneren zich nog in een fase van fundamentele ontwikkeling en onzekerheid. Veel bepalende factoren — waaronder elektriciteitsvraag, elektrificatie, opslag, waterstof, ammoniak, marktstructuur, regelgeving, netontwikkeling en maatschappelijke acceptatie — zijn nog onvoldoende uitgekristalliseerd om met grote zekerheid één toekomstbeeld vast te leggen.

Daarmee ontstaat een fundamenteel vraagstuk voor bestuurders, beleidsmakers en samenleving:
hoe kunnen langjarige en kapitaalintensieve energie-investeringen verantwoord worden beoordeeld onder omstandigheden waarin zowel de technologie als het systeem nog in ontwikkeling zijn?

Deze studie vertrekt daarom niet vanuit een vooraf bepaalde voorkeur voor of tegen SMR's, maar vanuit een systeembenadering. De centrale vraag is niet uitsluitend:
"werkt de technologie?"

maar vooral:
"welke systeemfunctie moet de technologie vervullen, onder welke omstandigheden, en hoe robuust blijft zij wanneer uitgangspunten veranderen?"

Vanuit dat perspectief worden SMR's niet geïsoleerd beoordeeld, maar in relatie tot:

- het totale energiesysteem;
- alternatieve technologieën;
- marktontwikkeling;
- bestuurlijke risico's;
- veiligheid;
- infrastructuur;
- en maatschappelijke randvoorwaarden.

Daarbij wordt expliciet rekening gehouden met:

- fundamentele onzekerheid;
- scenario's;
- correlaties tussen parameters;
- en de beperkingen van modellen en voorspellingen.

De studie sluit daarmee aan bij een bredere bestuurskundige en systeemkundige benadering van besluitvorming onder onzekerheid. Niet de precisie van één berekening staat centraal, maar de vraag of keuzes robuust blijven wanneer omstandigheden veranderen.

2 Fundamentele systeembeschouwing

Een fundamentele spanning in de huidige discussie over SMR's is dat nucleaire energie economisch traditioneel het best functioneert in systemen met:

- hoge benuttingsgraad;
- langdurige continue productie;
- stabiele afzet;
- en voorspelbare marktcondities.

Juist het huidige en toekomstige elektriciteitssysteem ontwikkelt zich echter steeds sterker richting:

- grote volumes wind- en zonne-energie met zeer lage marginale kosten;
- sterk fluctuerende marktprijzen;
- toenemende noodzaak tot flexibiliteit;
- opslag;
- vraagsturing;
- en perioden met zeer lage of zelfs negatieve elektriciteitsprijzen.

Daardoor ontstaat een fundamentele systeemspanning:
dezelfde duurzame productie die CO_2-reductie ondersteunt, vermindert tegelijkertijd de economische condities waaronder kapitaalintensieve basislasttechnologieën traditioneel renderen.

Klassieke nucleaire logica	**Toekomstig energiesysteem**
hoge benuttingsgraad	fluctuerende productie
stabiele prijs	prijsvolatiliteit
continue productie	flexibiliteit
lange afschrijving	snelle systeemverandering
voorspelbare vraag	onzekere vraag
stabiele regelgeving	regulatory risk
schaalvoordelen	decentrale diversiteit

Deze spanning wordt versterkt doordat:

- de toekomstige elektriciteitsvraag nog sterk onzeker is;
- de rol van opslag, H2, NH3 en elektrolysers nog open ligt;
- de bepalende technologische, vergunning en economische aspecten SMR's nog onzeker zijn
- technologische ontwikkeling van alternatieven snel verloopt;
- en ook de rol van grote kerncentrales nog onduidelijk is.

Onder dergelijke omstandigheden ontstaat een fundamenteel investeringsvraagstuk:
in hoeverre is het verantwoord om langjarige, kapitaalintensieve en moeilijk corrigeerbare investeringen aan te gaan in een systeem waarvan:

- de uiteindelijke structuur;

- marktwerking;
- benuttingsgraad;
- en concurrentieverhoudingen

nog onvoldoende zijn uitgekristalliseerd?

Daarbij ontstaat een aanvullende spanning wanneer een technologie tegelijkertijd:

- grote onzekerheden kent als technologie
- hoge initiële investeringen vraagt;
- lange afschrijvingstermijnen kent;
- én mede wordt gepositioneerd op basis van toekomstige technologische verbeteringen, schaalvoordelen of nog te realiseren leereffecten.

Juist dan verschuift een deel van de economische rechtvaardiging van empirisch bewezen prestaties naar verwachtingen over toekomstige ontwikkeling.

Daarmee raakt de discussie aan een fundamenteel principe van besluitvorming onder onzekerheid.

Flexibiliteit als systeemwaarde

Een fundamentele ontwikkeling binnen het toekomstige energiesysteem is dat flexibiliteit steeds minder een bijproduct van productie-installaties wordt en steeds meer een zelfstandige systeemwaarde krijgt. In een energiesysteem met grote volumes wind- en zonne-energie ontstaat namelijk niet alleen behoefte aan jaarlijkse energieproductie (kWhe), maar vooral aan:

- regelvermogen;
- reservevermogen;
- snel op- en afregelbaar vermogen;
- spannings- en frequentiestabiliteit;
- en beschikbaarheid tijdens perioden met lage duurzame productie.

Daardoor verschuift de economische betekenis van productie-installaties gedeeltelijk van:
“hoeveel energie wordt geproduceerd?”
naar:
“welke bijdrage levert de installatie aan systeemstabiliteit en leveringszekerheid?”

Juist hierdoor ontstaan toenemende vergoedingen voor systeemdiensten via onder meer TenneT, waarbij flexibiliteit, beschikbaarheid en regelbaarheid expliciet economisch worden gewaardeerd. Daarmee verschuift een deel van de inkomstenbasis van energie-installaties van de klassieke elektriciteitsmarkt naar een systeemmarkt voor stabiliteit en beschikbaarheid.

In feite betekent dit dat het energiesysteem zich gedeeltelijk verwijdert van een puur markt gedreven model gebaseerd op geproduceerde kilowatturen, en zich ontwikkelt richting een hybride systeem waarin ook:

- beschikbaar vermogen;
- responssnelheid;

- reserve capaciteit;
- en systeemondersteuning

economische waarde krijgen.

Daarmee keert feitelijk een oudere systeembenadering terug waarin niet uitsluitend energieproductie, maar ook gegarandeerde capaciteit en beschikbaarheid werden gewaardeerd. Of scherper geformuleerd:

Het toekomstige energiesysteem vraagt mogelijk niet alleen om goedkope kWhe, maar steeds meer om betrouwbare, beschikbare en corrigeerbare kW.

Corrigeerbaarheid als systeemeigenschap

Onder omstandigheden van fundamentele onzekerheid krijgt corrigeerbaarheid een toenemende bestuurlijke en economische betekenis. Traditioneel werden energiesystemen vooral geoptimaliseerd op:

- efficiëntie;
- schaalgrootte;
- benuttingsgraad;
- en minimale kostprijs per geproduceerde kWhe.

In een stabiel en voorspelbaar systeem kan een dergelijke optimalisatie rationeel zijn. Wanneer echter zowel technologie, marktstructuur, regelgeving als vraagontwikkeling onzeker worden, ontstaat een ander beoordelingscriterium:
in hoeverre blijft het systeem aanpasbaar wanneer uitgangspunten veranderen?

Daarmee verschuift de aandacht van maximale efficiëntie naar:

- flexibiliteit;
- faseerbaarheid;
- adaptiviteit;
- en bestuurlijke corrigeerbaarheid.

Juist grote kapitaalintensieve installaties met lange levensduren creëren sterke lock-in. Zij veronderstellen impliciet dat:

- markten;
- regelgeving;
- technologieontwikkeling;
- brandstofprijzen;
- en systeemstructuur

gedurende meerdere decennia voldoende stabiel blijven om de oorspronkelijke businesscase te dragen.

De recente ontwikkeling van het energiesysteem laat echter zien dat dergelijke stabiliteit steeds minder vanzelfsprekend is. Marktmodellen veranderen, regelgeving wijzigt, congestie

ontstaat, technologische ontwikkeling versnelt en geopolitieke omstandigheden verschuiven. Daardoor neemt de waarde toe van oplossingen die:

- sneller aanpasbaar zijn;
- gefaseerd kunnen worden ontwikkeld;
- beperkte lock-in veroorzaken;
- en bestuurlijke handelingsvrijheid behouden.

In dat perspectief wordt flexibiliteit niet langer uitsluitend een technische eigenschap van productie-installaties, maar een fundamentele systeemeigenschap van het gehele energiesysteem.

Of scherper:

Hoe groter de onzekerheid over de toekomst, hoe groter de waarde van corrigeerbaarheid wordt.

Conclusie

Hoe groter de onzekerheid over de toekomstige systeemontwikkeling, hoe terughoudender men moet zijn met investeringen die langdurige lock-in en beperkte corrigeerbaarheid creëren. Juist wanneer de toekomstige systeemstructuur onzeker is, neemt de waarde van flexibiliteit toe en de aantrekkelijkheid van moeilijk corrigeerbare basislastinvesteringen af.

3 Fundamentele onzekerheid van de technologie zelf

Naast de onzekerheden rond het toekomstige energiesysteem bestaat ook onzekerheid over de technologie zelf. Veel SMR-concepten bevinden zich nog in:

- ontwerpstadium;
- prototypefase;
- vergunning ontwikkeling;
- of vroege commerciële voorbereiding.

Daardoor zijn belangrijke eigenschappen nog slechts beperkt empirisch gevalideerd in langdurige commerciële praktijk.

Dit betreft onder meer:

- werkelijke investeringskosten;
- bouwtijd;
- beschikbaarheid;
- onderhoudbaarheid;
- betrouwbaarheid;
- operationele flexibiliteit;
- personeelsbehoefte;
- levensduur;
- ontmantelingskosten;
- afvalbeheer;
- en operationele veiligheid onder commerciële omstandigheden.

Ook veel veronderstelde voordelen van SMR's zijn vooralsnog grotendeels gebaseerd op:

- ontwerpverwachtingen;
- modelstudies;
- simulaties;
- schaalverwachtingen;
- en toekomstige leereffecten.

Juist de economische kernhypothese van SMR's — compensatie van verlies aan klassieke schaalvoordelen door:

- modularisering;
- standaardisatie;
- seriebouw;
- en leereffecten —

is in de civiele nucleaire praktijk nog beperkt empirisch aangetoond.

Daarmee ontstaat een dubbele onzekerheid:

1. onzekerheid over het toekomstige energiesysteem;
2. onzekerheid over de uiteindelijke eigenschappen van de technologie zelf.

Deze combinatie is fundamenteel relevant voor besluitvorming over langjarige en kapitaalintensieve investeringen.

Een bewezen technologie kan mogelijk nog worden beoordeeld binnen een onzeker systeem. Maar wanneer zowel:

- het systeem;
- de marktcondities;
- als de technologie zelf

nog in ontwikkeling zijn, neemt de onzekerheid niet lineair maar cumulatief toe.

Daarmee verschuift de bewijslast:
niet alternatieven moeten aantonen waarom SMR's niet zouden werken,
maar SMR's moeten aantonen dat zij onder reële systeemomstandigheden langdurig:

- technisch;
- economisch;
- organisatorisch;
- en bestuurlijk robuust functioneren.

Conclusie

De huidige discussie betreft niet een bewezen technologie in een onzeker systeem, maar een nog ontwikkelende technologie in een eveneens nog ontwikkelend energiesysteem.

Juist de combinatie van systeemonzekerheid én technologieonzekerheid maakt terughoudendheid bij langjarige lock-in logisch.

4 Conclusies vanuit verschillende schaalniveaus

1. Lokaal perspectief — Voorne aan Zee

Vanuit lokaal perspectief lijkt vooralsnog geen evidente robuuste systeemrol aanwezig voor SMR's. De regionale elektriciteits- en warmtevraag is relatief beperkt ten opzichte van de schaal waarop SMR's economisch worden gepositioneerd. Tegelijkertijd beschikt de regio reeds over meerdere alternatieve energie- en warmtevoorzieningen, waaronder geothermie, bestaande warmte infrastructuur en WKK-capaciteit. Daarnaast ontstaat aan de elektriciteitszijde directe concurrentie van grootschalige windenergie vanaf de Noordzee.

Daardoor ontstaat onzekerheid over de mate waarin een SMR voldoende benuttingsgraad, stabiele warmteafzet en economische robuustheid kan bereiken. Ook is onzeker of voldoende schaalvoordelen gerealiseerd kunnen worden binnen een relatief beperkte regionale systeemvraag.

Voor de gemeente lijkt het primaire belang daarom minder te liggen in het realiseren van eigen nucleaire productie, en meer in het beschermen van publieke belangen, het behouden van bestuurlijke handelingsvrijheid en het voorbereiden op mogelijke nationale ontwikkelingen. Binnen die rol past vooral een zorgvuldige systeemanalyse onder omstandigheden van fundamentele onzekerheid.

2. Provinciaal perspectief — Zuid-Holland

Voor de provincie Zuid-Holland verschuift het perspectief van lokale toepassing naar systeemintegratie binnen een reeds sterk transformerend energie- en industriesysteem. Zuid-Holland kent een zeer grote aanlanding van windenergie vanaf de Noordzee, terwijl tegelijkertijd wordt gewerkt aan de ontwikkeling van waterstof- en ammoniak infrastructuur, grootschalige warmtenetten, benutting van restwarmte en verdere industriële flexibilisering. Daarnaast speelt de mogelijke ontwikkeling van nationale kernenergie een rol.

Binnen dit veranderende systeem lijkt de resterende systeemopgave mogelijk minder te liggen bij continue grootschalige productie, en meer bij flexibiliteit, reservevermogen, opslag, seizoen balans, systeemstabiliteit en leveringszekerheid tijdens perioden met lage duurzame productie.

Daarmee ontstaat de fundamentele provinciale vraag of binnen dit sterk veranderende energiesysteem nog een voldoende grote, stabiele en economisch robuuste systeemrol overblijft voor regionale SMR-toepassingen. De provinciale discussie lijkt daarmee minder te draaien om de vraag "kan het technisch?", en meer om de vraag "welke systeemfunctie blijft werkelijk open?".

3. Nationaal perspectief — Nederland

Voor Nederland ligt de mogelijke betekenis van SMR's op een ander schaalniveau dan voor gemeente of provincie. Nationaal gaat het niet primair om één lokale warmtevraag of één provinciale industrie structuur, maar om de toekomstige inrichting van het gehele energiesysteem. Daarbij staan leveringszekerheid, betaalbaarheid, CO_2-reductie, strategische autonomie, netstabiliteit, importafhankelijkheid en lange termijn robuustheid centraal.

De nationale vraag is daarom niet of SMR's technisch mogelijk zijn, maar welke systeemfunctie zij binnen het Nederlandse energiesysteem zouden moeten vervullen. Die vraag kan pas worden beantwoord wanneer voldoende duidelijk is hoe de elektriciteitsvraag zich ontwikkelt, welke rol elektrificatie, waterstof, ammoniak, opslag, import en export krijgen, en welke productiecapaciteit reeds wordt vastgelegd door wind op zee, zon, regelbare centrales en mogelijke grote kerncentrales. Het is duidelijk dat zonder integraal systeembeeld het positioneren van specifieke technologieën bestuurlijk risicovol is.

Nationaal bestaat een reëel belang bij regelbare, CO_2-arme productie tijdens perioden met weinig wind en zon. Dat belang kan pleiten voor vormen van kernenergie, regelbare centrales op waterstof of ammoniak, opslag, importcapaciteit of vraagsturing. De kernvraag is echter welke optie deze functie het meest robuust vervult onder meerdere toekomstscenario's. Daarbij moet worden meegewogen dat kernenergie economisch traditioneel afhankelijk is van hoge benuttingsgraad en stabiele afzet, terwijl het toekomstige systeem juist wordt gekenmerkt door grote volumes wind en zon met lage marginale kosten en sterke prijsvolatiliteit.

Voor SMR's ontstaat daardoor een fundamentele spanning. Indien Nederland grootschalig inzet op wind op zee, opslag, elektrolysers en mogelijk grote kerncentrales, kan de resterende markt voor kleinere nucleaire eenheden beperkt worden. Grote kerncentrales profiteren van schaalvoordelen en kunnen, zeker bij publieke risicodeling, de marktpositie van SMR's onder druk zetten. Tegelijk drukken wind en zon gedurende veel uren de marktprijs, waardoor de inkomstenbasis van kapitaalintensieve basislast installaties kwetsbaar wordt.

Daar komt bij dat SMR's zelf nog geen breed bewezen commerciële standaard vormen. Veel belangrijke eigenschappen — kosten, bouwtijd, beschikbaarheid, onderhoudbaarheid, flexibiliteit, personeelsbehoefte, afvalbeheer, ontmanteling en veiligheid in langdurige commerciële praktijk — zijn nog beperkt empirisch gevalideerd. Daarmee gaat het nationaal niet om een bewezen technologie in een onzeker systeem, maar om een technologie in ontwikkeling binnen een eveneens onzeker energiesysteem. Dat vergroot de behoefte aan terughoudendheid bij langjarige bindingen.

Voor het Rijk speelt bovendien het vraagstuk van risicodragerschap. Indien SMR's of grote kerncentrales economisch niet zelfstandig financierbaar blijken, ontstaat de vraag wie het markt-, rente-, bouw-, vergunning-, technologie- en regulatory risk draagt. Bij grote kerncentrales lijkt eerder sprake van nationale betrokkenheid en mogelijke publieke risicodeling. Voor SMR's is dat minder vanzelfsprekend, zeker wanneer regionale overheden geen investeerder, afnemer of garant willen zijn. Daarmee wordt de nationale vraag niet alleen technisch, maar institutioneel: welke risico's wil de Staat dragen, voor welke systeemfunctie, en met welke publieke rechtvaardiging?

Ook veiligheid en toezicht hebben nationaal gewicht. Nucleaire veiligheid, afvalbeheer, beveiliging, kennisopbouw, inspectiecapaciteit en noodorganisatie vragen een volwassen institutioneel systeem. Zeker bij meerdere kleinere eenheden op verschillende locaties ontstaat de vraag of toezicht, kennisbasis en veiligheidsorganisatie voldoende robuust kunnen worden opgebouwd en onderhouden. Veiligheid is daarmee geen eenvoudige functie van schaal, maar een systeem eigenschap van ontwerp, organisatie, toezicht en praktijkervaring.

Vanuit nationaal perspectief ligt de mogelijke waarde van SMR's daarom vooral in scenario's waarin Nederland behoefte heeft aan aanvullende regelbare CO_2-arme productie, waarin grote

kerncentrales niet passend of onvoldoende flexibel zijn, waarin voldoende seriebouw en standaardisatie tot stand komen, en waarin markt- en risicostructuren langjarig kunnen worden geborgd. Zonder die voorwaarden blijft de nationale systeemwaarde onzeker.

Conclusie

Voor Nederland ligt het belang niet in het vroegtijdig positioneren van SMR's als zelfstandige oplossing, maar in het zorgvuldig bepalen welke systeemfunctie na wind, zon, opslag, import, waterstof, ammoniak en mogelijke grote kerncentrales werkelijk nog open blijft.

Overkoepelende conclusie

De analyse laat zien dat de betekenis van SMR's sterk afhankelijk is van het schaalniveau waarop de vraag wordt gesteld.

- Lokaal lijkt vooralsnog beperkte systeemmeerwaarde zichtbaar.
- Provinciaal ontstaat twijfel welke systeemfunctie nog werkelijk open ligt.
- Nationaal blijven strategische argumenten voor regelbaar vermogen en leveringszekerheid bestaan, maar onder grote systeemonzekerheid.

Daarmee blijkt dat de beoordeling van SMR's niet kan plaatsvinden als geïsoleerde technologiebeoordeling, maar uitsluitend als onderdeel van een integrale systeemanalyse waarin:

- vraagontwikkeling;
- duurzame opwek;
- opslag;
- infrastructuur;
- marktordening;
- regelgeving;
- veiligheid;
- en bestuurlijke risico's

in samenhang worden beschouwd.

Ten slotte

De aantrekkelijkheid van SMR's lijkt toe te nemen naarmate het schaalniveau abstracter wordt, maar neemt af zodra de technologie moet worden ingebed in concrete regionale systeemvragen en economische realiteit.

5 Stakeholderperspectief — Voorne aan Zee

1. Regionale systeemvraag en schaalgrootte

Voor een gemeente als Voorne aan Zee moet de mogelijke betekenis van SMR's primair worden beoordeeld vanuit de feitelijke schaal van het regionale energiesysteem en de reeds aanwezige energie-infrastructuur.

De gemeente omvat circa 33.000 huishoudens. Bij een gemiddeld elektriciteitsverbruik van ongeveer 2.500 kWhe per huishouden per jaar resulteert dit in een totale jaarlijkse elektriciteitsvraag in de orde van grootte van circa 80.000 MWhe. Dat komt overeen met de jaarproductie van een continu producerende centrale van ongeveer 10 MWe.

Daarnaast is sprake van een kassengebied waarin reeds:

- een geothermiebron van circa 10 MWth aanwezig is;
- een warmteverdeelnet tussen kassen bestaat;
- en meerdere WKK-installaties operationeel zijn.

Daardoor bevindt een eventuele aanvullende warmtevoorziening zich direct in concurrentie met:

- bestaande geothermie;
- bestaande warmte infrastructuur;
- WKK-systemen;
- warmtepompen;
- en andere duurzame warmteopties.

Ook aan de elektriciteitszijde ontstaat directe concurrentie met:

- bestaande WKK-productie;
- grootschalige windproductie op de Noordzee;
- en mogelijk toekomstige grote kerncentrales elders in het systeem, zoals in Borssele of op de Maasvlakte.

Daarmee ontstaat een fundamenteel schaalvraagstuk. De regionale systeemvraag ligt in de orde van grootte van circa 10 MWe, terwijl internationaal besproken SMR-concepten veelal vermogens kennen van circa 100 tot 300 MWe per eenheid.

2. Economische robuustheid en benuttingsgraad

Nucleaire installaties zijn economisch traditioneel afhankelijk van:

- hoge benuttingsgraden;
- langdurige continue productie;
- stabiele afzet;
- en schaalvoordelen.

Een relatief beperkte en seizoengevoelige regionale warmtevraag maakt het onzeker of:

- voldoende benuttingsgraad kan worden bereikt;
- warmte infrastructuur economisch rendabel wordt;
- en aanvullende investeringen voor flexibilisering, koeling en systeemintegratie kunnen worden terugverdiend.

Daarbij komt dat een relatief kleine nucleaire eenheid reeds investeringen vertegenwoordigt in de orde van grootte van honderden miljoenen euro's, exclusief:

- netaansluitingen;
- koelvoorzieningen;
- vergunningprocedures;
- veiligheidsorganisatie;
- reserveonderdelen;
- bouwrente;
- engineering;
- projectmanagement;
- en operationele ondersteuning.

Tegelijkertijd opereren warmteafnemers zoals tuinders doorgaans binnen aanzienlijk kortere investerings- en contracthorizonten dan de levensduur van nucleaire installaties. Langjarige contractuele bindingen van meerdere decennia sluiten daardoor niet vanzelfsprekend aan op de economische realiteit van de sector.

Ook ontbreekt vooralsnog zekerheid dat voldoende aantallen SMR's zullen worden gerealiseerd om:

- seriebouw;
- leereffecten;
- operationele ervaring;
- en schaalvoordelen

daadwerkelijk te bereiken.

3. Bestuurlijk belang van de gemeente

Het primaire belang van Voorne aan Zee lijkt daarom minder te liggen in het realiseren van een eigen nucleaire energievoorziening, en meer in:

- bescherming van publieke belangen;
- behoud van bestuurlijke handelingsvrijheid;
- en voorbereiding op mogelijke nationale energieontwikkelingen.

De kernvraag verschuift daarmee van:

"hoe realiseren wij een SMR?"

naar:

"welke gevolgen kunnen nationale of regionale energieontwikkelingen hebben voor onze gemeente?"

Voor de gemeente staan daarbij vooral centraal:

- veiligheid;
- gezondheid;
- leefomgeving;
- ruimtelijke kwaliteit;
- koelwatergebruik;
- infrastructuur;
- leveringszekerheid;
- energieprijzen;
- en cumulatieve effecten op natuur en omgeving.

Daarnaast bestaat belang bij:

- het voorkomen van voortijdige lock-in;
- het behouden van flexibiliteit;
- en het vermijden van langdurige ruimtelijke of bestuurlijke verplichtingen zonder aantoonbare regionale systeemmeerwaarde.

4. Voedselveiligheid en functiemenging

Bij mogelijke nucleaire toepassingen in of nabij glastuinbouwgebieden verdient ook de combinatie met voedsel- en tuinbouwproductie aandacht.

Tijdens normale exploitatie van nucleaire installaties kunnen binnen gereguleerde vergunning kaders beperkte hoeveelheden radioactieve stoffen via ventilatie- en filtersystemen worden afgevoerd. Hoewel dergelijke emissies doorgaans ruim binnen wettelijke normen blijven, kan de aanwezigheid van nucleaire installaties nabij intensieve voedselproductie bestuurlijke, maatschappelijke en economische vragen oproepen.

Daarbij gaat het niet uitsluitend om radiologische normstelling, maar ook om:

- marktacceptatie;
- exportpositie;
- imago van voedselproductie;
- cumulatieve risicobeleving;
- en de vraag in hoeverre verschillende functies ruimtelijk en maatschappelijk wenselijk combineerbaar zijn.

Juist in hoogwaardige glastuinbouwgebieden kunnen dergelijke aspecten een bredere betekenis krijgen dan alleen de formele naleving van emissienormen.

Conclusie

Vanuit het perspectief van Voorne aan Zee is vooralsnog niet evident dat sprake is van:

- een voldoende grote regionale systeemvraag;
- voldoende schaalgrootte;
- voldoende benuttingsgraad;

- en voldoende economische robuustheid

om een nucleaire toepassing structureel te dragen.

Daarmee lijkt het primaire belang van de gemeente momenteel vooral te liggen in:

- zorgvuldige systeemanalyse;
- bescherming van publieke belangen;
- kennisopbouw;
- en het behouden van bestuurlijke handelingsvrijheid onder omstandigheden van fundamentele onzekerheid.

6 Provinciaal perspectief — Zuid-Holland

Voor de provincie Zuid-Holland moet de mogelijke rol van SMR's worden beoordeeld binnen een reeds sterk veranderend energie- en industriesysteem. Daarbij gaat het niet uitsluitend om elektriciteitsproductie, maar om de samenhang tussen:

- warmtevoorziening;
- industrie;
- havenontwikkeling;
- waterstof;
- netstructuur;
- wind op zee;
- opslag;
- en ruimtelijke ordening.

Een belangrijk uitgangspunt vormt het reeds ingezette provinciale beleid rond warmte-infrastructuur. Zuid-Holland heeft zich de afgelopen jaren sterk gemaakt voor grootschalige warmtenetten die onder meer:

- Den Haag;
- Rotterdam;
- de glastuinbouw in de B-driehoek;
- en Leiden

met elkaar verbinden. Binnen deze structuur zijn reeds bestaande warmtebronnen aanwezig, waaronder grote afvalverbrandingsinstallaties met langjarige leveringscontracten. Daarnaast beschikt de haven- en industriezone over aanzienlijke hoeveelheden potentiële restwarmte die binnen warmtenetten kan worden benut.

Daardoor ontstaat de vraag in hoeverre aanvullende nucleaire warmteproductie daadwerkelijk nog een open systeemfunctie vervult binnen een warmtesysteem waarin reeds:

- infrastructuur wordt aangelegd;
- bestaande warmtecontracten lopen;
- restwarmte beschikbaar komt;
- en alternatieve warmteopties zich ontwikkelen.

Ook de industriële structuur van Zuid-Holland bevindt zich in transitie. Traditionele bulk fossiele activiteiten staan onder druk, terwijl toekomstige ontwikkeling zich waarschijnlijk sterker zal richten op:

- fijnchemie;
- waterstof;
- ammoniak;
- logistiek;
- containerstromen;
- en energie-intensieve industriële ketens met hogere flexibiliteit.

Juist daarbij speelt voor industrie doorgaans:

- korte terugverdientijd;
- flexibiliteit;
- snelle aanpasbaarheid;
- en het vermogen om op veranderende marktomstandigheden te reageren

een centrale rol. Dit kan spanning opleveren met zeer kapitaalintensieve energie-opties met lange afschrijvingstermijnen en beperkte corrigeerbaarheid.

Daarnaast verandert ook de elektriciteitsstructuur van Zuid-Holland fundamenteel door de zeer grote aanlanding van windenergie vanaf de Noordzee. Hierdoor ontstaat potentieel een systeem waarin gedurende grote delen van het jaar reeds aanzienlijke hoeveelheden elektriciteit beschikbaar zijn tegen lage marginale kosten.

Binnen een dergelijk systeem verschuift de resterende systeemopgave mogelijk van:

- grootschalige continue productie,

naar:

- flexibiliteit;
- piekvermogen;
- reservevermogen;
- seizoen balans;
- opslag;
- systeemstabiliteit;
- en leveringszekerheid tijdens perioden met lage duurzame productie.

Juist daar ontstaat een fundamentele provinciale systeemvraag:

Is binnen een energiesysteem met zeer grote duurzame aanlanding, bestaande warmte infrastructuur, industriële flexibilisering en mogelijke nationale grote kerncentrales nog sprake van een voldoende grote en economisch robuuste systeemrol voor regionale SMR-toepassingen?

Daarmee lijkt de provinciale discussie minder te draaien om de technische mogelijkheid van SMR’s, en meer om de vraag:

- welke systeemfunctie werkelijk nog open ligt;
- hoe stabiel die functie is over langere tijd;
- en welke alternatieven reeds beschikbaar of in ontwikkeling zijn.

Mogelijke voorlopige conclusie

Voor Zuid-Holland lijkt de kernvraag momenteel niet primair:

“kunnen SMR’s technisch worden toegepast?”

maar eerder:

“welke resterende systeemopgave blijft over nadat reeds ingezette ontwikkelingen in warmte, wind op zee, industrie, opslag, waterstof en netinfrastructuur zijn meegenomen?”

Dat verschuift de discussie van technologiepromotie naar professionele systeemplanning onder onzekerheid.

7 Stakeholderperspectief — Nederland

1. Nationale systeemvraag en leveringszekerheid

Voor Nederland ligt de mogelijke betekenis van SMR's op een wezenlijk ander schaalniveau dan voor gemeente of provincie. Nationaal gaat het niet primair om één lokale warmtevraag of één provinciale industrie structuur, maar om de toekomstige inrichting van het gehele energiesysteem. Daarbij spelen:

- leveringszekerheid;
- betaalbaarheid;
- CO_2-reductie;
- strategische autonomie;
- netstabiliteit;
- geopolitieke kwetsbaarheid;
- en langjarige robuustheid van de energievoorziening

een centrale rol.

Vanuit nationaal perspectief bestaat een reëel belang bij regelbare CO_2-arme productie tijdens perioden met weinig wind en zon. Dat belang kan pleiten voor:

- kernenergie;
- regelbare centrales op waterstof of ammoniak;
- opslag;
- importcapaciteit;
- of vraagsturing.

De fundamentele nationale vraag luidt echter niet of SMR's technisch mogelijk zijn, maar welke systeemfunctie zij daadwerkelijk moeten vervullen binnen het toekomstige Nederlandse energiesysteem.

Die vraag kan pas worden beantwoord wanneer voldoende duidelijk is:

- hoe de elektriciteitsvraag zich ontwikkelt;
- welke rol elektrificatie krijgt;
- hoe waterstof- en ammoniakketens zich ontwikkelen;
- hoeveel opslag economisch haalbaar wordt;
- welke productie reeds wordt ingevuld door wind op zee en zon;
- en welke rol grote kerncentrales mogelijk gaan spelen.

Daarmee ontstaat nationaal een fundamentele systeemvraag:
welke resterende systeemopgave blijft werkelijk open nadat reeds ingezette ontwikkelingen zijn meegenomen?

2. Marktstructuur, basislast en economische spanning

Een fundamentele spanning is dat kernenergie economisch traditioneel het sterkst functioneert in systemen met:

- hoge benuttingsgraad;
- stabiele afzet;
- continue productie;
- en voorspelbare marktcondities.

Juist het Nederlandse energiesysteem ontwikkelt zich echter steeds sterker richting:

- grote volumes wind- en zonne-energie met lage marginale kosten;
- sterke prijsvolatiliteit;
- perioden met zeer lage of negatieve elektriciteitsprijzen;
- flexibiliteit;
- opslag;
- en vraagsturing.

Daardoor ontstaat spanning tussen:

- kapitaalintensieve basislast productie;
- en een energiesysteem dat steeds dynamischer en flexibeler wordt.

Wanneer Nederland daarnaast grootschalig inzet op:

- wind op zee;
- elektrolysers;
- opslag;
- import van waterstof of ammoniak;
- en mogelijk grote kerncentrales,

kan de resterende markt voor kleinere nucleaire eenheden beperkt worden.

Grote kerncentrales profiteren traditioneel van schaalvoordelen in:

- investering;
- exploitatie;
- onderhoud;
- organisatie;
- brandstoflogistiek;
- en financiering.

Hierdoor kan de concurrentiepositie van kleinere SMR’s verder onder druk komen te staan, terwijl wind en zon gedurende grote delen van het jaar juist de marktprijs drukken waarop kapitaalintensieve installaties hun investeringen moeten terugverdienen.

Daarmee ontstaat een fundamentele investeringsvraag:
in hoeverre is het verantwoord langdurige en moeilijk corrigeerbare investeringen aan te gaan in een energiesysteem waarvan:

- de toekomstige structuur;
- de marktvorming;
- de benuttingsgraad;
- en de concurrentieverhoudingen

nog onvoldoende zijn uitgekristalliseerd?

3. Technologieonzekerheid en empirische validatie

Naast onzekerheid over het toekomstige energiesysteem bestaat ook onzekerheid over de technologie zelf. Veel SMR-concepten bevinden zich nog in:

- ontwerpstadium;
- prototypefase;
- vergunning ontwikkeling;
- of vroege commerciële voorbereiding.

Daardoor zijn belangrijke eigenschappen nog beperkt empirisch gevalideerd in langdurige commerciële praktijk. Dit betreft onder meer:

- werkelijke investeringskosten;
- bouwtijd;
- beschikbaarheid;
- onderhoudbaarheid;
- flexibiliteit;
- personeelsbehoefte;
- ontmantelingskosten;
- afvalbeheer;
- en veiligheid tijdens langdurige commerciële exploitatie.

Ook veel geclaimde voordelen van SMR's zijn vooralsnog grotendeels gebaseerd op:

- ontwerpverwachtingen;
- modelstudies;
- schaalverwachtingen;
- toekomstige standaardisatie;
- en veronderstelde leereffecten.

Juist de economische kernhypothese van SMR's — het compenseren van verlies aan klassieke schaalvoordelen door modularisering, seriebouw en standaardisatie — is in de civiele nucleaire praktijk nog beperkt bewezen.

Daarmee gaat het nationaal niet om een bewezen technologie in een onzeker systeem, maar om een technologie in ontwikkeling binnen een eveneens onzeker energiesysteem. Dat vergroot de noodzaak van terughoudendheid bij langjarige bindingen en moeilijk corrigeerbare investeringen.

4. Risicodragerschap, institutionele robuustheid en veiligheid

Voor het Rijk speelt daarnaast het vraagstuk van risicodragerschap. Indien SMR's of grote kerncentrales economisch niet zelfstandig financierbaar blijken, ontstaat de vraag:

- wie draagt het marktrisico;
- het bouwrisico;
- het renterisico;

- het Vergunningrisico;
- het technologie risico;
- en het regulatory risk?

Bij grote kerncentrales lijkt eerder sprake van nationale betrokkenheid en mogelijke publieke risicodeling. Voor SMR's is dat minder vanzelfsprekend, zeker wanneer regionale overheden geen investeerder, afnemer of garant willen zijn.

Daarmee wordt de nationale vraag niet alleen technisch of economisch, maar ook institutioneel:
welke risico's wil de Staat langdurig dragen, voor welke systeemfunctie, en met welke publieke rechtvaardiging?

Daarnaast vragen nucleaire veiligheid, afvalbeheer, beveiliging, inspectiecapaciteit, kennisborging en noodorganisatie een langdurig robuust institutioneel systeem. Zeker wanneer meerdere kleinere reactoren op verschillende locaties zouden worden gerealiseerd, ontstaat de vraag of voldoende:

- operationele ervaring;
- inspectiecapaciteit;
- organisatorische kwaliteit;
- veiligheidsdiscipline;
- en kenniscontinuïteit

kunnen worden opgebouwd en behouden.

Veiligheid wordt daarmee geen eenvoudige functie van schaal of ontwerp alleen, maar een emergente systeemeigenschap van:

- techniek;
- organisatie;
- toezicht;
- ervaring;
- marktstructuur;
- en institutionele kwaliteit.

Conclusie

Vanuit nationaal perspectief kan kernenergie strategische waarde hebben als regelbare CO_2-arme productie binnen een onzeker toekomstig energiesysteem. Voor SMR's blijft echter onzeker:

- welke systeemfunctie werkelijk open blijft;
- of voldoende schaalvoordelen gerealiseerd kunnen worden;
- of de technologie commercieel robuust blijkt;
- en welke publieke risico's uiteindelijk moeten worden gedragen.

Daarmee lijkt het nationale belang momenteel minder te liggen in het vroegtijdig positioneren van SMR's als zelfstandige oplossing, en meer in het zorgvuldig bepalen:

- welke systeemfunctie werkelijk resteert;
- welke alternatieven beschikbaar zijn;
- en onder welke omstandigheden een nucleaire investering gedurende meerdere decennia robuust en corrigeerbaar blijft.

8 Wat aspecten voor de systeem studie SMR

De analyse van SMR's en andere langjarige energie-opties laat zien dat de centrale onzekerheid niet uitsluitend ligt in de techniek zelf, maar in het totale systeem waarin deze techniek gedurende meerdere decennia moet functioneren. Daarmee verschuift de vraag van: "werkt de technologie?" naar: "blijft de technologie robuust binnen een veranderend energiesysteem, veranderende markten en veranderende maatschappelijke omstandigheden?". Deze verschuiving sluit direct aan op het fundamentele inzicht uit *Besluitvorming in onzekerheid*: modellen en analyses beschrijven mogelijkheden, maar bepalen niet automatisch of een besluit verantwoord is. Het moment van begrenzen ligt buiten het model.

Bij de beoordeling van SMR's wordt zichtbaar dat vrijwel iedere bepalende factor onzeker is. Niet alleen de techniek bevindt zich nog in een vroege commerciële en regulatoire fase, ook het toekomstige energiesysteem zelf is nog onvoldoende uitgekristalliseerd. Scenario's voor elektriciteitsvraag lopen uiteen van beperkte groei tot een verdrievoudiging van het huidige verbruik. Tegelijkertijd zijn reeds omvangrijke investeringen voorzien in wind op zee, zonne-energie, netuitbreidingen, opslag, elektrolysers en mogelijk grote kerncentrales. Daardoor is nog onzeker welke systeemfunctie uiteindelijk werkelijk open blijft voor SMR's.

Juist deze systeemonzekerheid raakt aan een kernprincipe uit het attachment: een energiesimulatie beschrijft een gesloten systeem, terwijl de werkelijkheid open en verstoringsgevoelig is. Het model kan scenario's doorrekenen, maar niet voorspellen welke combinatie van technologische ontwikkeling, geopolitiek, marktordening, regelgeving en maatschappelijke weerstand zich werkelijk zal voordoen. Daardoor ontstaat een fundamentele spanning tussen de precisie van de berekening en de onzekerheid van de werkelijkheid.

De economische positie van SMR's blijkt daarbij uitzonderlijk gevoelig voor externe parameters. Anders dan bij veel andere technieken bestaan de kosten grotendeels uit investerings- en financieringslasten. Daarmee wordt rente een dominante systeemeigenschap. Een investering met een technische levensduur van circa zestig jaar vereist impliciet vertrouwen in meerdere decennia van stabiele renteontwikkeling, bestuurlijke continuïteit en voldoende marktinkomsten. Juist op deze punten laat de recente geschiedenis echter grote onzekerheid zien. Duitsland besloot na Fukushima tot sluiting van kerncentrales, Nederland wijzigde de positie van kolencentrales, subsidiestelsels voor wind en zon werden aangepast en congestieproblemen tonen dat infrastructuurontwikkeling niet vanzelf gelijke tred houdt met beleidsambities.

Hierdoor ontstaat een tweede laag van onzekerheid: niet alleen de techniek is onzeker, maar ook het institutionele systeem waarin zij moet functioneren. Dit sluit direct aan bij het inzicht uit het attachment dat het model beschrijft wat gebeurt binnen het gekozen kader, maar niet wat gebeurt wanneer dat kader zelf verandert. Regulatory risk wordt daarmee geen randverschijnsel, maar een centrale factor in de economische haalbaarheid van langjarige energie-investeringen.

Daarnaast blijkt dat veel veronderstelde voordelen van SMR's nog grotendeels gebaseerd zijn op ontwerpverwachtingen, modelstudies en prognoses, terwijl langdurige operationele ervaring beperkt is. Dit geldt niet alleen voor kosten en bouwtijd, maar ook voor veiligheid. Veiligheid blijkt geen directe eigenschap van schaal of ontwerp alleen, maar een emergente systeemeigenschap die mede afhankelijk is van organisatie, toezicht, ervaring,

onderhoudsstructuren, veiligheidscultuur en institutionele kwaliteit. Wanneer kleinere reactoren worden gekoppeld aan compactere organisaties, beperkte operationele ervaring en nieuwe toezichtstructuren, ontstaat een veiligheidsvraagstuk dat nog onvoldoende empirisch is uitgekristalliseerd.

Daarmee raakt de discussie opnieuw aan een centraal inzicht uit het attachment: de werkelijkheid is groter dan het model. Niet alleen telt wat het systeem doet onder verwachte omstandigheden, maar juist hoe het reageert wanneer aannames onjuist blijken, wanneer externe verstoringen optreden of wanneer meerdere onzekerheden samenkomen.

De analyse laat tevens zien dat energie-investeringen niet alleen moeten worden beoordeeld op huidige prestaties, maar ook op de snelheid waarmee alternatieve technologieën zich ontwikkelen. De energiesector kent meerdere voorbeelden van snelle technologische verandering, zoals de ontwikkeling van STEG-installaties van circa 40% naar meer dan 60% rendement in enkele decennia, of de snelle kostendaling van wind, zon en batterijen. Hierdoor ontstaat het risico van technologische lock-in: een situatie waarin een samenleving zich voor tientallen jaren bindt aan een technologie die later economisch of systeemmatig minder passend blijkt.

Juist hier wordt het begrip corrigeerbaarheid uit het attachment fundamenteel. Hoe groter de onzekerheid over de toekomstige ontwikkeling van techniek, markt en systeem, hoe belangrijker het wordt om handelingsvrijheid te behouden. Dat leidt tot een fundamenteel bestuurlijk principe:

In situaties van diepe systeemonzekerheid moet terughoudend worden omgegaan met langjarige en moeilijk corrigeerbare verplichtingen.

Een economische levensduur van 60 jaar voor kerncentrales is dan alleen plausibel wanneer wordt aangenomen dat de toekomstige systeemstructuur gedurende al die 60 jaar voldoende stabiel blijft om hoge benuttingsgraden te behouden. Juist die systeemstabiliteit wordt door de energietransitie, de invoering van een andere techniek met extreem lage marginale kosten, echter steeds onzekerder.

Daarmee verschuift het zwaartepunt van besluitvorming. Niet de vraag: “Welke technologie is optimaal?”

maar: “Welke keuzes blijven robuust onder meerdere plausibele toekomsten?” wordt bepalend.

Vanuit dat perspectief krijgt ook de rol van Provincie en gemeente een andere betekenis. Zij lijken primair publieke belangenbehartigers te zijn, gericht op betrouwbaarheid, betaalbaarheid, veiligheid en leefomgeving, maar niet op het dragen van langjarige investerings- en marktrisico’s. Hun bestuurlijke horizon ligt vermoedelijk dichter bij tien jaar dan bij de technische levensduur van nucleaire installaties. Daarmee ontstaat een asymmetrie tussen publieke besluitvorming op korte termijn en private of maatschappelijke risico’s op zeer lange termijn.

De combinatie van al deze onzekerheden leidt tot enkele grote conclusies.

Grote conclusies

1. De beoordeling van SMR's kan niet los plaatsvinden van het totale toekomstige energiesysteem

De betekenis van SMR's hangt volledig af van:

- de ontwikkeling van elektriciteitsvraag,
- de omvang van wind en zon,
- de rol van opslag,
- elektrolysers,
- import/export,
- marktordening,
- en de positie van grote kerncentrales.

Zonder voldoende uitgewerkt systeembeeld ontbreekt de basis voor een betekenisvolle beoordeling.

2. De grootste onzekerheden rond SMR's liggen niet uitsluitend in de techniek, maar in systeemontwikkeling, marktontwikkeling en institutionele stabiliteit

Rente, regelgeving, maatschappelijke acceptatie, congestie, technologische ontwikkeling en veranderende marktstructuren blijken waarschijnlijk bepalender voor de uiteindelijke rentabiliteit dan de reactortechniek zelf.

3. Veiligheid kan nog niet uitsluitend uit ontwerpclaims worden afgeleid

De uiteindelijke veiligheidsperformance van SMR's zal afhangen van:

- organisatie,
- toezicht,
- operationele ervaring,
- veiligheidscultuur,
- personele kwaliteit,
- en systeeminpassing.

Juist deze factoren bevinden zich nog grotendeels in opbouw of ontwikkeling.

4. Langjarige nucleaire investeringen creëren sterke lock-in en verminderen corrigeerbaarheid

Bij levensduren van meerdere decennia ontstaat langdurige binding aan:

- technologie,
- infrastructuur,
- financieringsstructuren,
- regelgeving,

- en marktaannames.

Hoe groter de onzekerheid over de toekomstige systeemontwikkeling, hoe belangrijker het wordt om handelingsvrijheid te behouden.

5. Besluitvorming over SMR's vraagt daarom niet primair om optimalisatie, maar om robuustheid onder onzekerheid

Het doel moet niet zijn:

- de perfecte voorspelling van één toekomst,

maar:

- het vermijden van kwetsbare keuzes die slechts functioneren onder één specifieke aanname over de toekomst.

6. Het centrale bestuurlijke vraagstuk is uiteindelijk niet technisch, maar normatief

De kernvraag luidt niet:

"Kan het?"

maar:

"Onder welke onzekerheden zijn wij bereid ons voor tientallen jaren te verbinden?"

Daarmee sluit de analyse direct aan op de hoofdconclusie van het attachment:

De kwaliteit van besluitvorming ligt niet in de precisie van de berekening, maar in het vermogen om tijdig en georganiseerd te begrenzen.

---

9 Slotbeschouwing

De analyse van SMR's laat zien dat de discussie uiteindelijk veel breder is dan een beoordeling van één specifieke technologie. De kernvraag blijkt niet uitsluitend technisch, maar vooral systeemmatig, bestuurlijk en normatief van aard.

Naarmate de analyse concreter wordt en dichter bij daadwerkelijke systeeminpassing komt, nemen de onzekerheden toe. Lokale warmtevraag, benuttingsgraad, marktpositie, concurrentie met windenergie, infrastructuur, regelgeving, financiering, veiligheid en bestuurlijke risico's blijken sterk met elkaar verweven. Daardoor verschuift de discussie van: "is de technologie interessant?"

naar:
"onder welke omstandigheden blijft een investering gedurende meerdere decennia robuust?"

Juist daarbij blijkt dat veel bepalende factoren nog onzeker zijn. Niet alleen het toekomstige energiesysteem is in ontwikkeling, maar ook de technologie zelf. Veel veronderstelde voordelen van SMR's zijn nog beperkt empirisch bewezen en sterk afhankelijk van toekomstige schaalvoordelen, standaardisatie en marktontwikkeling.

Daarmee ontstaat een fundamenteel spanningsveld tussen:

- langjarige lock-in;
- hoge kapitaalintensiteit;
- en een energiesysteem dat zelf nog fundamenteel transformeert.

De studie laat zien dat onder dergelijke omstandigheden het belang van corrigeerbaarheid, flexibiliteit en bestuurlijke handelingsvrijheid toeneemt. Dat betekent niet dat SMR's uitgesloten zijn, maar wel dat terughoudendheid logisch wordt wanneer:

- systeemfuncties nog onzeker zijn;
- alternatieven zich snel ontwikkelen;
- en toekomstige markt- en beleidscondities moeilijk voorspelbaar blijven.

Daarmee verschuift de kwaliteit van besluitvorming: niet naar het voorspellen van één optimale toekomst,
maar naar het vermogen keuzes te maken die onder meerdere plausibele toekomsten overeind blijven.

Of scherper geformuleerd:

De kern van professionele systeemplanning ligt niet in het maximaliseren van technologische ambitie, maar in het behouden van bestuurlijke robuustheid onder onzekerheid.

Bijlage 1 Uitgangspunten voor de studie naar SMR's binnen het toekomstige energiesysteem

1. Doel van de studie

Deze studie heeft niet als doel een vooraf bepaalde voorkeur voor of tegen SMR's te onderbouwen, maar beoogt een systematische beoordeling mogelijk te maken van de potentiële rol van SMR's binnen een toekomstig Nederlands energiesysteem onder omstandigheden van fundamentele onzekerheid.

De studie richt zich daarbij niet uitsluitend op de technische eigenschappen van SMR's, maar op hun functioneren binnen:

- het totale energiesysteem,
- maatschappelijke en bestuurlijke randvoorwaarden,
- economische ontwikkelingen,
- institutionele stabiliteit,
- en technologische verandering over lange tijdschalen.

2. Systeembenadering als uitgangspunt

SMR's worden niet beoordeeld als geïsoleerde technologie, maar als onderdeel van een breder energiesysteem waarin:

- vraagontwikkeling,
- duurzame productie,
- opslag,
- netstructuur,
- import/export,
- marktordening,
- regelgeving,
- warmtevoorziening,
- en industriële ontwikkeling

onderling samenhangen.

Een technologie kan slechts betekenisvol worden beoordeeld wanneer voldoende inzicht bestaat in:

- de systeemfunctie die zij moet vervullen,
- de alternatieven die beschikbaar zijn,
- en de interactie met andere systeemcomponenten.

3. Onzekerheid als centrale randvoorwaarde

De studie gaat uit van de constatering dat fundamentele onzekerheid bestaat over:

- toekomstige elektriciteitsvraag,
- elektrificatie van industrie en mobiliteit,

- ontwikkeling van waterstof- en ammoniakeconomie,
- ontwikkeling van wind- en zonne-energie,
- opslagtechnologieën,
- brandstofprijzen,
- rente en inflatie,
- regelgeving,
- maatschappelijke acceptatie,
- en technologische ontwikkeling.

Deze onzekerheid wordt niet beschouwd als tijdelijke afwijking rond één voorspelbaar toekomstbeeld, maar als structurele eigenschap van het huidige energiesysteem.

4. Geen optimalisatie voor één scenario

De studie gaat er niet vanuit dat één toekomstscenario met voldoende zekerheid kan worden voorspeld. Daarom worden technologieën niet uitsluitend beoordeeld op optimale prestaties binnen één veronderstelde toekomst, maar op:

- robuustheid,
- adaptiviteit,
- corrigeerbaarheid,
- en functioneren onder meerdere plausibele scenario's.

5. Corrigeerbaarheid als beoordelingscriterium

Bij langjarige energie-investeringen vormt corrigeerbaarheid een expliciet beoordelingscriterium.

Daarbij wordt onderzocht:

- in hoeverre een investering aanpasbaar is;
- in hoeverre lock-in ontstaat;
- hoe afhankelijk de technologie wordt van toekomstige markt- en beleidsontwikkelingen;
- en hoe groot de gevolgen zijn wanneer uitgangspunten later onjuist blijken.

Hoe groter de onzekerheid over de toekomstige systeemontwikkeling, hoe groter het belang van:

- handelingsvrijheid,
- faseerbaarheid,
- modulariteit,
- en adaptiviteit.

6. Vergelijking met alternatieven

SMR's worden niet afzonderlijk beoordeeld, maar in vergelijking met andere relevante opties binnen het energiesysteem, waaronder:

- grote kerncentrales,
- STEG-installaties op aardgas, waterstof en ammoniak,
- wind op zee,
- wind op land,
- zonne-energie,
- opslagtechnologieën,
- vraagsturing,
- en warmtekracht systemen.

Vergelijkingen vinden plaats op:

- technische eigenschappen,
- systeemfunctie,
- economische robuustheid,
- veiligheidsaspecten,
- emissies,
- en institutionele uitvoerbaarheid.

7. Veiligheid als systeemeigenschap

Veiligheid wordt niet uitsluitend beschouwd als eigenschap van het reactorontwerp, maar als emergente systeemeigenschap die mede afhankelijk is van:

- organisatie,
- toezicht,
- operationele ervaring,
- onderhoudsstructuren,
- veiligheidscultuur,
- personele kwaliteit,
- en institutionele stabiliteit.

Ontwerpclaims alleen worden niet beschouwd als voldoende bewijs voor feitelijke operationele veiligheid over lange perioden.

8. Regulatory risk als centrale factor

De studie gaat ervan uit dat:

- regelgeving,
- subsidiebeleid,
- marktordening,
- vergunningprocedures,
- maatschappelijke acceptatie,
- en bestuurlijke prioriteiten

gedurende de levensduur van energie-installaties wezenlijk kunnen veranderen.

Regulatory risk wordt daarom beschouwd als een centrale systeemeigenschap en niet als een randverschijnsel.

9. Technologische ontwikkeling als dynamische factor

De studie houdt rekening met het feit dat:

- alternatieve technologieën zich verder kunnen ontwikkelen;
- rendementen kunnen stijgen;
- kosten kunnen dalen;
- opslagtechnologieën kunnen verbeteren;
- en systeemstructuren fundamenteel kunnen veranderen.

Daarom worden technologieën niet alleen beoordeeld op huidige prestaties, maar ook op:

- gevoeligheid voor technologische verdringing;
- snelheid van technologische ontwikkeling;
- en risico op langdurige lock-in.

10. Bestuurlijke positie van Provincie en gemeente

De studie gaat ervan uit dat Provincie en gemeente primair opereren vanuit hun publieke verantwoordelijkheid voor:

- betrouwbaarheid,
- betaalbaarheid,
- veiligheid,
- leefomgeving,
- ruimtelijke kwaliteit,
- en economische ontwikkeling.

Daarbij wordt verondersteld dat zij:

- geen primaire investeerder zijn;
- geen langdurige afnamegaranties zullen verstrekken;
- en beperkt bereid zullen zijn langjarige marktrisico’s te dragen.

Hierdoor ontstaat onderscheid tussen:

- publieke belangenafweging,
- en private investeringslogica.

11. Betrouwbaarheid van gegevens en modellen

Bij de beoordeling van technologieën wordt expliciet onderscheid gemaakt tussen:

- operationele praktijkervaring,
- prototype-ervaring,
- modelstudies,
- ontwerpverwachtingen,
- en theoretische potenties.

De studie erkent dat modellen:

- mogelijkheden kunnen berekenen,
  maar:
- de werkelijkheid niet volledig kunnen voorspellen.

Daarom vormt ook de betrouwbaarheid van aannames, data en scenario's zelf onderdeel van de beoordeling.

12. Scenario's, onzekerheden en correlaties

De studie gaat ervan uit dat langjarige energiesysteemontwikkeling niet kan worden beschreven met één enkel toekomstbeeld. Daarom wordt gewerkt met meerdere plausibele scenario's over een periode van circa zestig jaar, waarin variatie mogelijk is in onder meer:

- elektriciteitsvraag;
- industriële ontwikkeling;
- elektrificatie;
- duurzame productie;
- opslagontwikkeling;
- brandstofprijzen;
- rente;
- inflatie;
- CO_2-prijzen;
- regelgeving;
- technologische ontwikkeling;
- en maatschappelijke acceptatie.

Bij ieder scenario wordt expliciet aandacht besteed aan:

- de onzekerheidsbandbreedte van de gebruikte aannames;
- de betrouwbaarheid van de beschikbare gegevens;
- en de mate waarin aannames empirisch onderbouwd zijn.

Daarbij wordt erkend dat veel parameters niet onafhankelijk van elkaar bewegen. In werkelijkheid bestaan vaak sterke onderlinge correlaties tussen economische, technologische, maatschappelijke en energetische ontwikkelingen. Zo kunnen:

- hoge brandstofprijzen samengaan met hogere elektriciteitsprijzen;
- hoge rente leiden tot lagere investeringsactiviteit;
- grote volumes duurzame productie de benuttingsgraad van regelbare centrales beïnvloeden;
- congestie de snelheid van elektrificatie beperken;
- en streng klimaatbeleid zowel CO_2-prijzen als investeringsdruk verhogen.

De studie beschouwt dergelijke correlaties expliciet als onderdeel van de systeemanalyse, omdat geïsoleerde parameteranalyses anders een schijnzekerheid kunnen creëren die onvoldoende aansluit bij de samenhang van de werkelijkheid.

Daarmee richt de studie zich niet op het voorspellen van één optimale toekomst, maar op het beoordelen van de robuustheid van technology

13. Centrale onderzoeksvraag

De centrale vraag van deze studie luidt daarom niet:

“Zijn SMR’s goed of slecht?”

maar:

“Onder welke systeemvoorwaarden, onzekerheden en randvoorwaarden kan een langdurige inzet van SMR’s bestuurlijk, maatschappelijk, economisch en systeemmatig verantwoord worden geacht?”

Bijlage 2 Methodologische analysevolgorde van de studie

Stap 1 — Analyse van reeds vastgelegde infrastructuur en productie

Allereerst wordt vastgesteld welke onderdelen van het toekomstige energiesysteem reeds feitelijk zijn vastgelegd of in uitvoering zijn, waaronder:

- bestaande productiecapaciteit;
- reeds vergunde installaties;
- wind- en zonneparken;
- netuitbreidingen;
- opslagprojecten;
- LNG- en moleculaire infrastructuur;
- industriële clusters;
- en beleidsmatig vastgelegde ontwikkelingen.

Deze stap bepaalt de feitelijke uitgangspositie en de resterende systeemruimte waarbinnen nieuwe technologieën nog een rol kunnen vervullen.

Stap 2 — Analyse van de ontwikkeling van vraag

Vervolgens wordt onderzocht hoe de toekomstige vraag zich kan ontwikkelen, waaronder:

- elektriciteitsvraag;
- industriële elektrificatie;
- mobiliteit;
- warmtevraag;
- waterstofproductie;
- ammoniakgebruik;
- en vraagprofielen in tijd en seizoen.

Daarbij wordt expliciet gewerkt met meerdere scenario’s en onzekerheidsbandbreedtes over langere perioden.

Stap 3 — Analyse van netten en infrastructuur

Daarna wordt onderzocht:

- de ontwikkeling van elektriciteitsnetten;
- congestie;
- internationale koppelingen;
- warmte-infrastructuur;
- moleculaire infrastructuur;
- opslagmogelijkheden;
- koelwaterbeschikbaarheid;
- en ruimtelijke beperkingen.

Deze infrastructuur bepaalt in belangrijke mate welke technologieën praktisch inpasbaar zijn.

Stap 4 — Identificatie van resterende systeemopgaven

Pas nadat:

- bestaande infrastructuur,
- vraagontwikkeling,
- en systeembeperkingen

voldoende zijn uitgewerkt, wordt bepaald welke systeemopgaven daadwerkelijk nog openstaan.

Bijvoorbeeld:

- winterzekerheid;
- regelbaar vermogen;
- langdurige opslag;
- industriële warmte;
- leveringszekerheid;
- netstabiliteit;
- of seizoen balans.

Daarmee wordt zichtbaar welk probleem een technologie daadwerkelijk moet oplossen.

Stap 5 — Vergelijking van oplossingsrichtingen

Vervolgens worden verschillende technologieën en systeemopties vergeleken, waaronder:

- SMR’s;
- grote kerncentrales;
- STEG-varianten;
- wind;
- zon;
- opslag;
- vraagsturing;
- en warmtekracht oplossingen.

Deze vergelijking vindt plaats op basis van:

- techniek;
- systeemfunctie;
- economie;
- veiligheid;
- uitvoerbaarheid;
- milieueffecten;
- en institutionele robuustheid.

Stap 6 — Analyse van robuustheid onder onzekerheid

Tot slot wordt onderzocht in hoeverre oplossingen robuust blijven onder:

- verschillende vraagscenario’s;
- veranderende rente;
- brandstofprijzen;
- technologische ontwikkeling;
- regelgeving;
- maatschappelijke acceptatie;
- congestie;
- en veranderende marktstructuren.

Daarbij worden niet alleen afzonderlijke onzekerheden beschouwd, maar ook de correlaties tussen meerdere gelijktijdig optredende veranderingen.

Centraal staat daarbij niet de optimalisatie voor één voorspelde toekomst, maar de vraag:

welke oplossingen onder meerdere plausibele toekomsten bestuurlijk, economisch en systeemmatig overeind blijven.

Conclusie

Deze analysevolgorde voorkomt dat technologieën worden beoordeeld voordat voldoende duidelijk is welk energiesysteem daadwerkelijk ontstaat en welke systeemopgaven werkelijk nog openstaan.

Of nog scherper:

Eerst het systeem begrijpen, daarna pas de technologie beoordelen.

Bijlage 3 De alternatieven

Hoofdcategorie	Productiemiddel / systeemoptie	Primaire systeemrol	Regelbaarheid	Warmte levering mogelijk	OpslagfunVerwachte rol in hoog-RES systeem
Thermisch regelbaar	H_2 STEG	Regelbaar vermogen	Hoog	Nee	Nee	Flexibiliteit en backup
Thermisch regelbaar	H_2 STEG + warmte (WKK)	Elektriciteit + industriële warmte	Hoog	Ja	Nee	Flexibele WKK en systeemkoppeling
Thermisch regelbaar	NH_3 STEG	Regelbaar vermogen	Hoog	Nee	Nee	Backup en importbrandstof
Thermisch regelbaar	NH_3 STEG + warmte (WKK)	Elektriciteit + warmte	Hoog	Ja	Nee	Industriële warmte en flexibiliteit
Thermisch regelbaar	CH_4 STEG	Regelbaar vermogen	Zeer hoog	Nee	Nee	Flexibele piek- en reservecentrale
Thermisch regelbaar	CH_4 STEG + warmte (WKK)	Elektriciteit + warmte	Zeer hoog	Ja	Nee	Efficiënte warmte-kracht levering
Thermisch regelbaar	Kolen + ROI + DeNOx	Bulkproductie	Matig	Mogelijk	Nee	Afbouw / strategische reserve
Thermisch regelbaar	Kolen + ROI + DeNOx + CCS	Bulkproductie met CO_2-reductie	Matig	Mogelijk	Nee	Mogelijke niche bij CO_2-beleid
Nucleair	SMR	Continu stabiel vermogen	Beperkt tot matig	Mogelijk	Nee	Mogelijke stabiele CO_2-arme productie
Nucleair	Grote kerncentrale	Continu stabiel vermogen	Beperkt	Mogelijk	Nee	Baseload / winterzekerheid
Variabel duurzaam	Wind op zee	Bulk duurzame energie	Afhankelijk wind	Nee	Nee	Grote energie leverancier
Variabel duurzaam	Wind op land	Regionale duurzame energie	Afhankelijk wind	Nee	Nee	Aanvullende regionale productie
Variabel duurzaam	Zon op land	Goedkope piekenergie overdag	Afhankelijk instraling	Nee	Nee	Decentrale bulkproductie
Variabel duurzaam	Zon op dak	Decentrale productie	Afhankelijk instraling	Nee	Nee	Lokale vraagreductie
Elektrische opslag	Batterijopslag	Kortetermijn flexibiliteit	Zeer hoog	Nee	Ja	Balanshandhaving en congestiereductie
Elektrische opslag	Valmeer / pompaccumulatie	Middellange opslag	Hoog	Nee	Ja	Dag/week balans
Moleculaire opslag	H_2 opslag	Seizoensbuffer	Hoog	Nee	Ja	Lange termijn opslag
Moleculaire opslag	NH_3 opslag	Moleculaire energiedrager	Hoog	Nee	Ja	Import- en seizoensbuffer
Moleculaire opslag	CH_4 opslag	Strategische gasbuffer	Hoog	Nee	Ja	Leveringszekerheid
Systeemoptie	Vraagsturing	Flexibiliteit aan vraagzijde	Zeer hoog	Nee	Virtueel	Balans en congestiebeperking
Systeemoptie	Warmtenetten	Warmte distributie	Afhankelijk bron	Ja	Beperkt	Koppeling warmte-elektriciteit
Systeemoptie	Industriële warmtebuffers	Tijdelijke warmteopslag	Hoog	Ja	Ja	Warmte flexibiliteit
Systeemoptie	Import/export elektriciteit	Internationale systeembalans	Afhankelijk markt	Nee	Virtueel	Leveringszekerheid en optimalisatie

Bijlage 4 De uitgangspunten

1. Techniek — eigenschappen van de installatie zelf

Technische prestaties

- elektrisch rendement
- totaal rendement (incl. warmte)
- eigen verbruik installatie
- vermogensdichtheid
- schaalbaarheid / modulariteit
- technische levensduur
- thermische efficiëntie bij deellast

Dynamisch gedrag

- starttijd warm
- starttijd koud
- stoptijd
- minimale uptime
- minimale downtime
- afregelsnelheid
- opregelsnelheid
- minimum load
- gedrag bij deellast
- cyclisch belastbaar
- aantal starts/stops per jaar
- gevoeligheid voor thermische vermoeiing
- black-start capability
- geschiktheid voor spanningsproeven
- inertiebijdrage
- kortsluitvermogen
- bijdrage aan spannings- en frequentiestabiliteit

Beschikbaarheid en onderhoud

- geplande beschikbaarheid
- ongeplande beschikbaarheid
- mean time between failures
- onderhoudsinterval
- onderhoudsduur
- redundantie componenten
- beschikbaarheid reserveonderdelen
- leverbaarheid kritische componenten
- gevoeligheid voor veroudering

Emissies en reststromen

- emissie CO_2
- emissie NOx

- emissie SO_2
- emissie NH_3
- emissie stof/fijnstof
- emissie zware metalen
- methaanlekken
- radioactieve emissies
- afvalstromen
- eindberging/reststoffen
- warmte-emissie

2. Systeem — functioneren binnen het energiesysteem

Inpasbaarheid energiesysteem

- interactie met wind en zon
- gevoeligheid voor cannibalisatie
- effect op marktprijzen
- bijdrage aan leveringszekerheid
- bijdrage aan winterzekerheid
- bijdrage aan piekvermogen
- bijdrage aan regelvermogen
- geschiktheid voor reservevermogen
- geschiktheid voor eilandbedrijf
- bijdrage aan netstabiliteit

Net en infrastructuur

- netverzwaring noodzakelijk?
- congestie-effecten
- afstand tot vraagcentra
- benodigde transportinfrastructuur
- aansluiting op warmte-infrastructuur
- koelwater beschikbaarheid
- afhankelijkheid van koeltorens

Integratie met andere systemen

- warmte-inpasbaarheid
- koppeling met opslag
- koppeling met H_2
- koppeling met NH_3
- bijdrage aan seizoensbalans
- vraagvolgend vermogen
- flexibiliteit bij overschotten
- flexibiliteit bij tekorten

Ruimtelijke en milieusysteem aspecten

- landgebruik

- watergebruik
- biodiversiteitseffecten
- geluidsbelasting
- externe veiligheidscontour
- afhankelijkheid zeldzame materialen

3. Economie — kosten, markt en financiering

Investering en exploitatie

- investering (CAPEX)
- onderhoudskosten
- bedieningskosten
- brandstofkosten
- ontmantelingskosten
- afvalbeheerkosten
- operationele kosten (OPEX)

Marktpositie

- LCOE
- systeemkosten
- inkomstenzekerheid
- benuttingsgraad risico
- residual load afhankelijkheid
- businesscase bij negatieve prijzen
- concurrentiepositie in energiemarkt
- gevoeligheid voor prijsvolatiliteit

Gevoeligheden

- gevoeligheid rente
- gevoeligheid inflatie
- gevoeligheid brandstofprijs
- gevoeligheid CO_2-prijs
- gevoeligheid grondstofprijzen
- gevoeligheid wisselkoersen

Financiering en risico

- financierbaarheid
- verzekerbaarheid
- afhankelijkheid subsidie
- afhankelijkheid capaciteitsvergoeding
- publiek/private risicoverdeling
- lock-in risico

4. Veiligheid & organisatie — exploitatie, toezicht en beheersing

Veiligheid techniek

- intrinsieke veiligheid
- operationele veiligheid
- gevoeligheid menselijke fouten
- domino-effect potentieel
- herstelbaarheid na incident
- evacuatiecomplexiteit
- sabotagegevoeligheid
- cyber-risico

Organisatie en exploitatie

- operatorcomplexiteit
- benodigde specialistische kennis
- personeelsbeschikbaarheid
- redundantie in kennis en besluitvorming
- opleidingsduur personeel
- omvang exploitatieorganisatie
- onderhoudsorganisatie beschikbaar?

Vergunningen en toezicht

- vergunning duur
- vergunning complexiteit
- toezichtlast
- beschikbaarheid toezichthoudende expertise
- internationale standaardisatie
- regulatory risk
- gevoeligheid voor veranderende regelgeving

Geopolitiek en leveringsketen

- afhankelijkheid buitenlandse leveranciers
- supply chain robuustheid
- geopolitieke afhankelijkheid
- afhankelijkheid brandstofketen
- strategische autonomie

5. Robuustheid & onzekerheid — gedrag onder veranderende omstandigheden

Robuustheid energiesysteem

- robuustheid bij lage vraag
- robuustheid bij hoge vraag
- robuustheid bij veel duurzame opwek
- robuustheid bij beperkte duurzame opwek

- robuustheid bij snelle opslagontwikkeling
- robuustheid bij veranderende import/export

Economische robuustheid

- robuustheid bij lage stroomprijzen
- robuustheid bij hoge stroomprijzen
- robuustheid bij hoge rente
- robuustheid bij inflatie
- robuustheid bij brandstofschaarste
- robuustheid bij strengere milieueisen

Institutionele robuustheid

- robuustheid bij strengere regelgeving
- robuustheid bij wijzigend marktmodel
- afhankelijkheid beleidssteun
- corrigeerbaarheid van investeringskeuze
- faseerbaarheid
- adaptiviteit

Betrouwbaarheid van de kennisbasis

- empirisch bewezen?
- gebaseerd op simulatie?
- laboratoriumdata of praktijkdata?
- FOAK of NOAK?
- aantal gerealiseerde installaties
- duur operationele ervaring
- onafhankelijke validatie beschikbaar?
- transparantie modellen
- gevoeligheid voor aannames
- onzekerheidsbandbreedte
- historische voorspellende waarde van modellen

Bijlage 5 De afbakening van investeringskosten

Bij de beoordeling van investeringskosten van SMR's en andere energie-installaties moet expliciet onderscheid worden gemaakt tussen:

- de kosten van de primaire installatie of reactor zelf;
- en de totale kosten van een volledig gerealiseerde, vergunde en operationeel inzetbare energievoorziening.

Een betekenisvolle vergelijking van technologieën is alleen mogelijk wanneer de volledige functionele scope van de investering expliciet is meegenomen. Daarbij dienen investeringskosten onder meer te omvatten:

Scope van investeringsbedrag" met sub vragen:

- alleen reactor module?
- inclusief turbine/generator?
- inclusief balance of plant?
- inclusief civiele werken?
- inclusief netaansluiting?
- inclusief koeling?
- inclusief warmteafname?
- inclusief bouwrente?
- inclusief vergunning en engineering?
- inclusief reserveonderdelen?
- inclusief ontmanteling en afvalvoorziening?

Kernzin:

CAPEX is alleen vergelijkbaar wanneer de functionele scope, technische configuratie en operationele prestatie-eisen volledig gelijkwaardig zijn gespecificeerd.

Civiele en infrastructurele voorzieningen

- bouwrijp maken terrein;
- fundaties;
- wegen;
- drainage;
- finale bestrating;
- verlichting;
- beveiliging;
- hekwerken;
- nutsvoorzieningen;
- water-, gas- en elektriciteitsaansluitingen;
- netaansluiting;
- koelwaterinfrastructuur;
- havens, spoor of logistieke voorzieningen indien relevant.

Gebouwen en ondersteunende voorzieningen

- controlekamers;
- kantoren;
- werkplaatsen;
- opslagloodsen;
- magazijnen;
- brandweervoorzieningen;
- trainingsfaciliteiten;
- tijdelijke bouwvoorzieningen;
- huisvesting van medewerkers buiten de bouwplaats.

Engineering en projectorganisatie

- engineering;
- ontwerpvalidatie;
- vergunningprocedures;
- MER-trajecten;
- veiligheidsstudies;
- projectmanagement;
- bouwplaats organisatie;
- kwaliteitsborging;
- documentatie;
- archivering en configuratiebeheer.

Levering, montage en logistiek

- transport;
- aan- en afvoer van materialen;
- hijsvoorzieningen;
- installatie;
- montage;
- reserveonderdelen;
- initiële opslag van kritische componenten.

Opleiding en operationele voorbereiding

- opleiding operators;
- training onderhoudspersoneel;
- simulatortraining;
- opbouw veiligheidsorganisatie;
- procedures;
- noodorganisatie.

Inbedrijfstelling en testen

- commissioning;
- systeemtesten;
- garantieproeven;
- formele inbedrijfstellingsproeven;
- spanningsproeven;

- performance tests;
- validatie van veiligheidsfuncties.

Verbruik en tijdelijke voorzieningen tijdens bouw en opstart

- hulpstoffen;
- brandstoffen;
- tijdelijke energievoorziening;
- koelmiddelen;
- testverbruik;
- afvalverwerking tijdens bouw;
- tijdelijke logistiek.

Financiële componenten

- bouwrente;
- financieringskosten;
- verzekeringen;
- risicoreserveringen;
- escalatiekosten;
- vertraging risico’s.

Een investeringsbedrag zonder expliciete scope-definitie zegt weinig over de werkelijke kosten van een operationeel inzetbaar energiesysteem.

Bijlage 6 Relatie tussen SMR's en grote kerncentrales

De voorgaande analyse maakt tevens duidelijk dat de beoordeling van grote conventionele kerncentrales gedeeltelijk verschilt van die van SMR's. Een aantal technologische onzekerheden is bij grote kerncentrales beperkter, omdat sprake is van:

- langer operationeel praktijkverleden;
- grotere internationale ervaring;
- bestaande regulatoire kaders;
- bewezen brandstofcycli;
- en omvangrijke operationele kennisbasis.

Daardoor zijn belangrijke technische eigenschappen zoals:

- beschikbaarheid;
- bedrijfsvoering;
- onderhoud;
- veiligheidssystemen;
- brandstoflogistiek;
- en levensduur

in hogere mate empirisch gevalideerd dan bij veel huidige SMR-concepten.

Ook bestaan bij grote conventionele centrales doorgaans:

- grotere operationele organisaties;
- meer redundantie;
- omvangrijkere kennisstructuren;
- en meer ervaring binnen toezicht en noodorganisatie.

Daarmee neemt een deel van het technologie- en organisatierisico af ten opzichte van veel huidige SMR-concepten.

Tegelijkertijd blijven fundamentele systeem- en financiële vraagstukken grotendeels bestaan.

Ook grote kerncentrales zijn sterk afhankelijk van:

- hoge benuttingsgraad;
- langdurige stabiele productie;
- voorspelbare marktcondities;
- lage financieringskosten;
- en een voldoende stabiel energiesysteem over meerdere decennia.

Juist daar ontstaat spanning met een toekomstig elektriciteitssysteem waarin:

- wind en zon grote delen van de productie leveren;
- marktprijzen sterk fluctueren;
- flexibiliteit belangrijker wordt;
- opslag zich ontwikkelt;

- en vraagontwikkeling onzeker blijft.

Daarnaast nemen bij grote kerncentrales de absolute investeringsomvang en daarmee het financiële systeemrisico verder toe. De combinatie van:

- zeer hoge kapitaalsintensiteit;
- lange bouwtijd;
- lange afschrijvingstermijnen;
- bouwrente;
- en politieke en regulatoire onzekerheid

maakt dat financiering en risicodragerschap bepalend worden voor de uiteindelijke economische haalbaarheid.

Daarmee verschuift de kernvraag bij grote kerncentrales van: “werkt de technologie?”

naar: “onder welke toekomstige systeem- en marktcondities blijft een investering van deze omvang gedurende meerdere decennia economisch en bestuurlijk robuust?”

Ook hier geldt dat de uiteindelijke beoordeling niet uitsluitend technologisch is, maar primair systeemmatig en institutioneel.

Bij grote kerncentrales nemen de technologische onzekerheden af, maar blijven de systeem- en financieringsonzekerheden grotendeels bestaan.

Bijlage 7 Risico's per productietechniek binnen een toekomstig energiesysteem

De risico's van energieproductietechnieken verschillen fundamenteel van aard. Sommige risico's zijn primair technologisch, andere economisch, systeemmatig, bestuurlijk of maatschappelijk. Daarnaast verschuiven risico's sterk afhankelijk van:

- marktstructuur;
- aandeel duurzaam;
- regelgeving;
- brandstofprijzen;
- rente;
- netontwikkeling;
- en systeemintegratie.

Onderstaand overzicht beschrijft de dominante risico's per techniek binnen een energiesysteem met grote onzekerheid en een hoog aandeel wind- en zonne-energie.

1. SMR — Small Modular Reactors

Technologische risico's

- beperkte commerciële praktijkervaring;
- veel ontwerpen nog in prototype- of ontwikkelfase;
- beperkte empirische validatie van kosten en prestaties;
- onzekerheid over onderhoudbaarheid en beschikbaarheid;
- onzekerheid over seriebouw en standaardisatie.

Economische risico's

- zeer hoge kapitaalintensiteit;
- sterke gevoeligheid voor rente;
- onzekerheid over schaalvoordelen;
- onzekerheid over benuttingsgraad;
- concurrentie met lage marginale kosten van wind en zon.

Systeemrisico's

- basislast karakter in fluctuerend systeem;
- beperkte regionale warmtevraag;
- afhankelijkheid van stabiele marktcondities;
- concurrentie met grote kerncentrales.

Bestuurlijke en regulatoire risico's

- vergunning ontwikkeling nog beperkt uitgekristalliseerd;
- beperkte toezicht ervaring;
- onzekerheid over publieke risicodragerschap;
- maatschappelijk draagvlak onzeker.

Veiligheidsrisico’s

- veiligheid sterk afhankelijk van organisatiekwaliteit;
- beperkte operationele ervaring;
- kleinere organisaties mogelijk minder redundantie;
- meerdere locaties verhogen toezichtcomplexiteit.

2. Grote kerncentrales

Technologische risico’s

- technologie grotendeels bewezen;
- relatief beperkte technologische onzekerheid;
- wel risico op complexiteit en veroudering gedurende lange levensduur.

Economische risico’s

- extreem hoge investeringskosten;
- zeer lange bouwtijd;
- bouwrente dominant;
- zeer gevoelig voor renteontwikkeling;
- lock-in gedurende 60–80 jaar.

Systeemrisico’s

- afhankelijk van hoge benuttingsgraad;
- concurrentie met wind en zon;
- negatieve prijsperioden;
- beperkte flexibiliteit;
- grote systeemimpact bij ongeplande uitval.

Regulatory risk

- beleidswijzigingen kunnen businesscase fundamenteel wijzigen;
- risico op verscherpte veiligheidseisen;
- politieke kwetsbaarheid na incidenten.

Veiligheids- en afvalrisico’s

- langjarige afvalverantwoordelijkheid;
- hoge eisen aan beveiliging en noodorganisatie;
- grote maatschappelijke impact bij incidenten.

3. STEG — Gascentrale gecombineerd cyclus

Technologische risico’s

- technologisch zeer volwassen;
- beperkte technische onzekerheid.

Economische risico's

- afhankelijk van gasprijs;
- afhankelijk van CO_2-prijs;
- risico op lage vollasturen;
- risico stranded asset door klimaatbeleid.

Systeemrisico's

- afhankelijkheid van fossiele of H_2 infrastructuur;
- leveringszekerheid brandstof;
- geopolitieke afhankelijkheid.

Regulatory risk

- CO_2-beleid;
- emissieregels;
- mogelijke beperkingen fossiele brandstoffen.

Positieve systeemeigenschappen

- hoge flexibiliteit;
- snelle op- en afregeling;
- geschikt voor reservevermogen.

4. GT — Gasturbine open cyclus

Technologische risico's

- technologisch bewezen.

Economische risico's

- laag rendement;
- hoge brandstofkosten per kWhe;
- rendabel alleen bij piekprijzen of capaciteitsvergoedingen.

Systeemrisico's

- afhankelijk van beschikbaarheid brandstof;
- lage benuttingsgraad.

Positieve systeemeigenschappen

- zeer snel regelbaar;
- waardevol als piek- en reservevermogen;
- relatief lage investering.

5. Zonne-energie

Technologische risico's

- beperkt;
- technologie volwassen.

Economische risico's

- prijsdruk door overaanbod overdag;
- negatieve marktprijzen;
- afhankelijkheid van subsidies of saldering.

Systeemrisico's

- productieprofiel slecht afgestemd op wintervraag;
- sterke gelijktijdigheid;
- grote opslagbehoefte;
- netcongestie.

Regulatory risk

- wijziging saldering;
- ruimtelijke beperkingen;
- netaansluitingen.

Materiaal- en geopolitieke risico's

- afhankelijkheid internationale productieketens;
- afhankelijkheid zeldzame materialen en China.

6. Windenergie

Technologische risico's

- relatief beperkt;
- offshore onderhoud complex.

Economische risico's

- prijsdruk bij hoge windproductie;
- afhankelijkheid van netcapaciteit;
- offshore onderhoudskosten.

Systeemrisico's

- weersafhankelijkheid;
- correlatie van productie over grote gebieden;
- grote behoefte aan reservevermogen en opslag.

Infrastructurele risico's

- enorme netuitbreidingen;
- congestie;
- systeem balancing.

Maatschappelijke risico's

- ruimtelijke weerstand;
- ecologische impact;
- visuele hinder;
- natuurdiscussies.

7. Opslag (batterijen, waterstof, NH3, Valmeer)

Technologische risico's

Batterijen

- degradatie;
- brandveiligheid;
- grondstoffen.

Waterstof/NH3

- lage round-trip efficiency;
- technologie deels nog in ontwikkeling;
- veiligheidsvraagstukken.

Valmeer

- grote ruimtelijke impact;
- beperkte locaties.

Economische risico's

- afhankelijk van prijsverschillen;
- arbitrage spread compressie;
- cannibalisatie door veel opslag;
- onzeker verdienmodel.

Systeemrisico's

- opslag lost niet alle seizoen problemen op;
- langdurige Dunkelflaute blijft uitdaging.

Regulatory risk

- marktontwerp nog onzeker;
- vergoeding systeemdiensten onzeker.

Overkoepelende observatie

De analyse laat zien dat risico's verschuiven naarmate het energiesysteem verandert.

Traditioneel lagen risico's vooral bij:

- techniek;
- brandstof;
- en beschikbaarheid.

In een systeem met grote hoeveelheden wind en zon verschuiven risico's steeds meer naar:

- marktstructuur;
- benuttingsgraad;
- flexibiliteit;
- systeemintegratie;
- regelgeving;
- financiering;
- en corrigeerbaarheid.

Daarmee ontstaat een fundamentele systeemverschuiving:

Niet de afzonderlijke technologie bepaalt nog het dominante risico, maar de manier waarop technologieën gezamenlijk functioneren binnen een onzeker en sterk veranderend energiesysteem.

Risicocategorie	SMR	Groot nucleair	STEG	GT	Zon	Wind	Opslag
Technologisch risico	Hoog	Middel	Laag	Laag	Laag	Laag	Middel
Commerciële praktijkervaring	Hoog risico / beperkt	Middel	Laag	Laag	Laag	Laag	Middel
Investeringsrisico	Hoog	Hoog	Middel	Laag	Middel	Hoog offshore / middel onshore	Hoog
Rentegevoeligheid	Hoog	Hoog	Middel	Laag	Middel	Middel	Hoog
Bouwtijd risico	Hoog	Hoog	Laag	Laag	Laag	Middel	Middel
Brandstofprijs risico	Middel	Middel	Hoog	Hoog	Laag	Laag	Middel
CO_2 prijs risico	Laag	Laag	Hoog	Hoog	Laag	Laag	Laag
Regulatory risk	Hoog	Hoog	Hoog	Middel	Middel	Middel	Middel
Vergunning risico	Hoog	Hoog	Middel	Laag	Middel	Hoog offshore	Middel
Veiligheidsrisico techniek	Middel/hoog	Middel	Middel	Middel	Laag	Middel	Middel
Veiligheidsrisico organisatie	Hoog	Middel	Laag	Laag	Laag	Middel	Middel
Afval- en reststromen risico	Hoog	Hoog	Middel	Middel	Middel	Middel	Middel/hoog
Systeemintegratie risico	Hoog	Hoog	Middel	Laag	Hoog	Hoog	Hoog
Flexibiliteitsrisico	Hoog	Hoog	Laag	Laag	Hoog	Hoog	Middel
Benuttingsgraad risico	Hoog	Hoog	Middel	Hoog	Hoog	Hoog	Hoog
Netafhankelijkheid	Middel	Middel	Middel	Middel	Hoog	Hoog	Hoog

Risicocategorie	SMR	Groot nucleair	STEG	GT	Zon	Wind	Opslag
Opslagafhankelijkheid systeem	Middel	Middel	Laag	Laag	Hoog	Hoog	n.v.t.
Schaalvoordeel afhankelijkheid	Hoog	Hoog	Middel	Laag	Hoog	Hoog offshore	Hoog
Grondstoffen/geopolitiek risico	Middel	Middel	Hoog	Hoog	Hoog	Hoog	Hoog
Maatschappelijk draagvlak risico	Hoog	Hoog	Middel	Middel	Middel	Hoog	Middel
Lock-in risico	Hoog	Hoog	Middel	Laag	Middel	Middel	Middel
Corrigeerbaarheid laag	Hoog risico	Hoog risico	Middel	Laag	Middel	Middel	Middel
Afhankelijkheid subsidies/systeemdiensten	Hoog	Hoog	Middel	Hoog	Hoog	Hoog	Hoog
Marktprijs kwetsbaarheid	Hoog	Hoog	Middel	Laag	Hoog	Hoog	Hoog
Levensduur mismatch met systeemontwikkeling	Hoog	Hoog	Middel	Laag	Middel	Middel	Middel

Overkoepelende observatie

De tabel laat zien dat in een toekomstig energiesysteem de dominante risico's steeds minder puur technologisch zijn. Voor vrijwel alle technieken verschuiven de belangrijkste onzekerheden richting:

- systeemintegratie;
- marktontwikkeling;
- regelgeving;
- financiering;
- benuttingsgraad;
- en bestuurlijke corrigeerbaarheid.

Vooral kapitaalintensieve technieken met lange levensduur — zoals SMR's en grote kerncentrales — blijken sterk gevoelig voor onzekerheid in:

- toekomstige systeemstructuur;
- marktprijzen;
- regelgeving;
- rente;
- en benuttingsgraad.

Daarmee verschuift de beoordeling van:

"werkt de technologie?"

naar:

"blijft de technologie onder meerdere toekomstige systeemscenario's langdurig robuust functioneren?"

Bijlage 8 Reflectie op de betekenis van een enquête onder fundamentele onzekerheid

De voorgaande analyse roept tevens de vraag op in hoeverre een enquête over SMR's op dit moment reeds kan leiden tot werkelijk betekenisvolle en bestuurlijk robuuste uitkomsten.

Het organiseren van een enquête suggereert impliciet dat:

- de relevante systeemvraag voldoende helder is;
- de technologie voldoende uitgekristalliseerd is;
- de belangrijkste alternatieven voldoende vergelijkbaar zijn;
- en respondenten beschikken over voldoende stabiele informatie om afgewogen voorkeuren of oordelen te vormen.

Juist die uitgangspunten blijken momenteel echter nog in belangrijke mate onzeker.

Niet alleen de technologie zelf bevindt zich nog grotendeels in een vroege commerciële en regulatoire ontwikkelingsfase, ook het toekomstige energiesysteem is nog sterk in beweging. Grote onzekerheden bestaan onder meer over:

- elektriciteitsvraag;
- rol van waterstof en ammoniak;
- opslag;
- marktordening;
- wind op zee;
- netontwikkeling;
- flexibiliteitsmarkten;
- regelgeving;
- en de positie van grote kerncentrales.

Daardoor bestaat het risico dat een enquête verwachtingen oproept over de mate van bestuurlijke en technische uitkristallisering die feitelijk nog niet aanwezig is.

Onder dergelijke omstandigheden kunnen antwoorden gemakkelijk:

- speculatief;
- scenario-afhankelijk;
- of sterk beïnvloed door framing en aannames worden,

zonder dat respondenten werkelijk zicht hebben op:

- de uiteindelijke systeemfunctie;
- de economische robuustheid;
- de risicoverdeling;
- of de langjarige consequenties van verschillende keuzes.

Daarmee ontstaat een fundamentele bestuurlijke vraag:
is het doel van een enquête op dit moment:

- kennisontwikkeling;
- maatschappelijke oriëntatie;
- inventarisatie van waarden en zorgen;
- of feitelijke besluitvoorbereiding?

Juist wanneer de onderliggende systeemstructuur nog onvoldoende uitgekristalliseerd is, ligt terughoudendheid voor de hand bij het organiseren van procedures die impliciet de indruk wekken dat reeds sprake is van voldoende stabiele kennis voor richtinggevende voorkeuren of beleidsuitspraken.

Vanuit dat perspectief kan het bestuurlijk zorgvuldiger zijn om:

- eerst verdere systeemontwikkeling af te wachten;
- meer praktijkervaring met SMR's internationaal op te bouwen;
- en meer duidelijkheid te verkrijgen over marktstructuur, flexibiliteitsvraagstukken, opslag, waterstof en nationale energieontwikkeling,

voordat een meer richtinggevende maatschappelijke consultatie plaatsvindt.

Daarmee verschuift de rol van een huidige discussie mogelijk van:

"het vormen van voorkeuren"

naar:

"het gezamenlijk expliciteren van onzekerheden, randvoorwaarden en open systeemvragen."

Het risico bestaat dat de procedure bestuurlijke rijpheid suggereert die inhoudelijk nog onvoldoende aanwezig is.

Bijlage 9 Historische ontwikkeling

De rode draad is dat vrijwel iedere generatie energiebeleid reageerde op het probleem van de vorige periode — maar tegelijk nieuwe kwetsbaarheden introduceerde. Daardoor ontstond een systeem waarin centrales, brandstoffen, belastingen en heffingen elkaar voortdurend verdringen en ontregelen.

Na de Tweede Wereldoorlog was leveringszekerheid het dominante uitgangspunt. Nederland had de oorlog en schaarste meegemaakt. Het elektriciteitssysteem werd daarom niet primair ontworpen op maximale economische efficiëntie, maar op strategische robuustheid. Flexibiliteit zat ingebouwd in de structuur van het systeem. Veel centrales konden verschillende brandstoffen gebruiken of relatief eenvoudig worden aangepast. Eerst ging het om kolen en olie; later kwam aardgas erbij. Het systeem kende bewust redundantie, voorraden en spreiding van risico's.

In de jaren zestig en zeventig groeide aardgas snel uit tot een belangrijke pijler van de Nederlandse energievoorziening. Tegelijkertijd bleef de herinnering aan geopolitieke afhankelijkheid aanwezig. De oliecrises van 1973 en 1979 maakten duidelijk hoe kwetsbaar een energiesysteem wordt wanneer één brandstof dominant wordt. Dat leidde tot een herwaardering van kolen als strategische zekerheid. Grote kolenvoorraden konden langdurig worden opgeslagen, terwijl olie en gas afhankelijk waren van internationale aanvoer.

In die periode ontstond opnieuw een sterke nadruk op flexibiliteit. Gascentrales op de Maasvlakte werden voorbereid op omschakeling naar olie. Ook bestaande installaties, zoals Borssele, werden aangepast voor alternatieve brandstoffen. Tegelijkertijd werden nieuwe kolencentrales gebouwd, onder andere in Nijmegen en de Amercentrale. Opvallend is dat men niet volledig koos voor één route. Naast kolen werden ook olie- en gascentrales gebouwd. Diversificatie was bewust beleid. Men dacht strategisch in termen van onzekerheid: niemand wist welke brandstof over twintig jaar dominant, goedkoop of politiek acceptabel zou zijn.

De opkomst van kernenergie leek aanvankelijk een volgende stap in deze zoektocht naar strategische onafhankelijkheid. Kerncentrales gebruikten weinig brandstofvolume, hadden stabiele productiekosten en verminderden afhankelijkheid van olie en gas. Maar na de ramp in Tsjernobylramp veranderde het maatschappelijke en politieke klimaat fundamenteel. Nieuwe nucleaire plannen verdwenen grotendeels in de ijskast. Daarmee verloor Nederland opnieuw een mogelijke strategische pijler.

Vanaf de jaren negentig verschoof het zwaartepunt naar milieu en efficiëntie. Problemen rond SO_2, NO_x, verzuring en klimaat kwamen centraal te staan. Tegelijkertijd groeide het besef dat warmtekrachtkoppeling energetisch veel efficiënter was dan klassieke centrales. Dat leidde tot een enorme groei van WKK-installaties en STEG-centrales. Gas werd gezien als relatief schoon, efficiënt en flexibel. De verwachting was dat aardgas decennialang de dominante transitiebrandstof zou blijven.

Maar juist in die periode veranderde de structuur van de sector fundamenteel door liberalisering en marktwerking. De elektriciteitsmarkt na 2000 bracht een heel andere logica binnen. Voorheen werd capaciteit gebouwd vanuit systeemplanning en strategische

reservevorming. Nu moesten investeringen worden terugverdiend via marktprijzen. Dat betekende dat centrales steeds afhankelijker werden van prijsschommelingen, belastingen, emissiehandel en politieke keuzes.

Dat creëerde een nieuwe onzekerheid: niet langer alleen technische of geopolitieke onzekerheid, maar vooral beleids- en markt onzekerheid.

De gebeurtenissen van 2003 zijn daarin illustratief. Door hittegolven en koelwaterproblemen ontstonden plotseling zeer hoge elektriciteitsprijzen. De angst voor tekorten leidde vrijwel direct tot een roep om nieuw grootschalig kolenvermogen. Twee nieuwe kolencentrales in de Eemshaven en twee op de Maasvlakte werden ontwikkeld. De redenering was toen economisch logisch: kolen waren goedkoop, wereldwijd beschikbaar en geschikt voor basislast.

Maar nog voordat deze centrales volledig waren afgeschreven, veranderde het politieke klimaat opnieuw. Rond 2010 werd CO_2 het dominante thema. Emissiehandel, CO_2-heffingen en sluitingsbeleid veranderden de economische basis van dezelfde centrales die enkele jaren eerder nog strategisch noodzakelijk werden geacht. Investeerders kregen te maken met een fundamentele breuk: installaties met een technische levensduur van veertig tot zestig jaar werden binnen tien jaar politiek problematisch.

Tegelijkertijd groeiden wind- en zonne-energie explosief. Dat veranderde opnieuw de economische structuur van het systeem. Hernieuwbare productie met lage marginale kosten drukte steeds vaker de marktprijzen naar beneden op momenten van hoge productie. Daardoor kwamen juist de flexibele gascentrales en WKK-installaties onder druk te staan die eerder als duurzaam en efficiënt waren gepresenteerd. Een deel van het gasvermogen werd gesloten of draaide verliesgevend.

Daarmee ontstond een paradoxaal systeem. Enerzijds werd veel weersafhankelijk vermogen toegevoegd. Anderzijds verdwenen juist de regelbare installaties die nodig waren om fluctuaties op te vangen. Vervolgens ontstond opnieuw de roep om reservevermogen, capaciteitsmechanismen en strategische back-up.

Dan de sluiting van het Groningse gasveld. Decennialang vormde Slochteren een unieke strategische pijler onder het Nederlandse energiesysteem. Het veld bood niet alleen relatief goedkoop binnenlands gas, maar ook flexibiliteit, leveringszekerheid en geopolitieke onafhankelijkheid. De mogelijkheid om grote hoeveelheden regelbaar gasvermogen te voeden gaf Nederland een uitzonderlijk stabiele positie binnen Noordwest-Europa. Met de afbouw en uiteindelijke sluiting van Groningen verdween niet alleen een brandstofbron, maar ook een belangrijk strategisch instrument voor systeemstabiliteit en prijsvorming.

Daarnaast werd tegelijkertijd ingezet op het versneld sluiten van kolencentrales rond 2030. Daarmee verdwijnt opnieuw een groot deel van het regelbare en langdurig beschikbare productievermogen uit het systeem. Vanuit klimaatperspectief is die keuze begrijpelijk, maar systeemmatig betekent dit wel dat in relatief korte tijd meerdere strategische pijlers gelijktijdig worden afgebouwd:

- Gronings gas;
- kolenvermogen;
- en een belangrijk deel van het klassieke thermische park.

Juist daardoor neemt de afhankelijkheid toe van:

- weersafhankelijke productie;
- import;
- opslag;
- internationale markten;
- en nog grotendeels onuitontwikkelde alternatieven zoals grootschalige waterstofketens.

Daar bovenop kwam vanaf 2022 het grotendeels wegvallen van Russisch gas naar Europa als gevolg van de oorlog in Oekraïne. Daarmee werd zichtbaar hoe sterk geopolitieke ontwikkelingen direct kunnen ingrijpen op:

- brandstofprijzen;
- leveringszekerheid;
- industrie;
- elektriciteitsprijzen;
- en investeringszekerheid.

Opnieuw veranderde daardoor binnen enkele jaren de volledige economische logica van het energiesysteem. Gascentrales die eerder onder druk stonden door lage stroomprijzen en duurzaam beleid, werden ineens weer essentieel voor leveringszekerheid. LNG-import, drijvende terminals en strategische gasvoorraden kregen plotseling hoge prioriteit. Daarmee werd opnieuw zichtbaar hoe moeilijk het is om langjarige investeringsbeslissingen te nemen in een systeem waarin:

- geopolitiek;
- klimaatbeleid;
- marktwerking;
- technologieontwikkeling;
- en maatschappelijke voorkeuren

tegelijkertijd voortdurend veranderen.

Nu verschuift de discussie opnieuw richting kernenergie. Kerncentrales worden door sommigen gepresenteerd als oplossing voor leveringszekerheid, CO_2-reductie en geopolitieke onafhankelijkheid. Maar tegelijkertijd bestaan er grote onzekerheden over toekomstige marktprijzen, opslag, waterstof, netcongestie, flexibiliteit, regelgeving, financiering en de interactie met grootschalige duurzame productie.

Daarmee ontstaat een fundamentele vraag: kan een energiesysteem met investeringen van zestig jaar nog stabiel functioneren wanneer belastingen, heffingen, emissieregels, subsidies en marktstructuren iedere tien jaar fundamenteel veranderen?

Juist daar lijkt tegenwoordig de grootste onzekerheid te liggen. Niet meer alleen in de techniek of de brandstof, maar in de bestuurlijke voorspelbaarheid van het systeem zelf.

De historische ontwikkeling laat zien dat vrijwel iedere energiebron eerst als oplossing werd gepresenteerd, daarna als probleem werd gezien, en vervolgens weer gedeeltelijk nodig bleek om de nieuwe problemen op te lossen. Kolen moesten olie vervangen. Gas moest kolen

vervangen. Hernieuwbaar moest gas vervangen. Vervolgens bleek reservevermogen weer nodig. Daarna kwamen opslag, waterstof en opnieuw kernenergie in beeld.

Het systeem reageert daardoor steeds sterker op politieke en economische impulsen van de korte termijn, terwijl de infrastructuur juist extreem lange investeringshorizonnen kent. Dat maakt de elektriciteitsvoorziening niet alleen een technisch systeem, maar steeds meer een systeem van beleidsrisico's, fiscale onzekerheid en veranderende maatschappelijke voorkeuren.

En misschien is dat wel de diepste verandering sinds de oorlog: vroeger probeerde men onzekerheid op te vangen met technische flexibiliteit en strategische reserves; tegenwoordig probeert men onzekerheid te sturen via markten, subsidies, heffingen en beleidsprikkels — terwijl juist die beleidsomgeving zelf steeds onzekerder wordt.

Het Nederlandse energiebeleid ontwikkelde zich historisch van strategische systeemplanning met redundantie en flexibiliteit naar een sterk door markt- en beleidsprikkels gestuurd systeem, terwijl de onderliggende infrastructuur juist extreem lange investeringshorizonten kent. Daardoor verschuift de grootste onzekerheid geleidelijk van techniek en brandstof naar bestuurlijke voorspelbaarheid en systeemstabiliteit.

Literatuur — strategische beschouwingen over energiebeleid, leveringszekerheid en systeemontwikkeling

Nederlandse strategische energiebeschouwingen

- WRR – Energiebeleid op langere termijn (1974)
- WRR – Klimaatbeleid voor de lange termijn
- CIEP – Dertig jaar Nederlands energiebeleid
- RVO – Historische beslissingen in het energiedomein met grote impact
- CBS – Energietransities in Nederland door twee eeuwen heen

Leveringszekerheid, systeemstabiliteit en flexibiliteit

- TNO – Systeemintegratie van kernenergie en SMR's
- TNO Vector – Haast geboden: nieuw energiebeleid
- International Energy Agency (IEA) – World Energy Outlook
- International Energy Agency (IEA) – Electricity Market Report
- ENTSO-E – European Resource Adequacy Assessment

Energie, geopolitiek en afhankelijkheid

- Daniel Yergin – The Prize: The Epic Quest for Oil, Money & Power
- Daniel Yergin – The New Map: Energy, Climate, and the Clash of Nations
- Vaclav Smil – Energy and Civilization: A History
- Vaclav Smil – Power Density

Marktwerking, infrastructuur en systeemrisico

- Helm, Dieter – Burn Out: The Endgame for Fossil Fuels

- Helm, Dieter – Net Zero
- Jenkins, Jesse et al. – The Benefits of Nuclear Flexibility in Clean Energy Systems
- MIT Energy Initiative – The Future of Nuclear Energy in a Carbon-Constrained World

Systeemdenken, lock-in en transities

- Geels, Frank – Technological Transitions and System Innovations
- Donella Meadows – Thinking in Systems
- Charles Perrow – Normal Accidents
- Ulrich Beck – Risk Society

Kernenergie en SMR's

- IAEA – Advances in Small Modular Reactor Technology Developments
- OECD-NEA – Small Modular Reactors: Challenges and Opportunities
- World Nuclear Association – Small Nuclear Power Reactors
- IPCC – Climate Change Mitigation Pathways and Nuclear Energy

Bijlage 10 Invloed keuze van het rijk, de positie van Provincie en gemeenten en particiatie

De mogelijke positie van SMR's kan niet los worden gezien van de keuzes die het Rijk maakt over de toekomstige inrichting van het Nederlandse energiesysteem. Juist omdat elektriciteitsproductie, infrastructuur, marktordening, subsidiëring, waterstofontwikkeling en netplanning grotendeels nationaal worden gestuurd, bepaalt het Rijk in belangrijke mate welke systeemfuncties economisch en technisch werkelijk open blijven. Provincies en gemeenten kunnen wel ruimtelijke afwegingen maken en lokaal draagvlak organiseren, maar de onderliggende economische randvoorwaarden worden in hoofdzaak bepaald door nationaal beleid, subsidies, regelgeving, netontwikkeling en marktordening. Daardoor ontstaat een fundamentele spanning tussen decentrale verantwoordelijkheid en nationale systeemsturing.

Het Rijk heeft via RES-beleid, wind-op-zee programma's, elektrificatiebeleid, netuitbreidingen, opslagontwikkeling en waterstofstrategieën reeds sterk richting gegeven aan de toekomstige systeemarchitectuur. Daarmee ontwikkelt Nederland zich steeds verder richting een energiesysteem met grote hoeveelheden weersafhankelijke productie, sterke prijsvolatiliteit, perioden met zeer lage of zelfs negatieve elektriciteitsprijzen en een groeiende behoefte aan flexibiliteit, opslag en correctiemechanismen. Juist deze systeemontwikkeling beïnvloedt direct de economische positie van kapitaalintensieve continue productie zoals grote kerncentrales en SMR's.

De analyse van de jaarduurkrommen laat zien dat grote volumes wind- en zonne-energie de resterende vraagduurcurve geleidelijk vernauwen. Aanvankelijk verdringt duurzame productie vooral fossiele midden- en pieklast. Naarmate het aandeel verder stijgt, ontstaat echter ook verdringing van nucleaire basislast. Daardoor neemt de benuttingsgraad van kerncentrales af. Omgekeerd verdringt uitbreiding van kernenergie ook weer duurzame productie, doordat een deel van de vraag permanent wordt ingevuld door continue nucleaire productie. Binnen een systeem met beperkte opslag, beperkte exportmogelijkheden en beperkte continue vraaggroei ontstaat daardoor wederzijdse economische kannibalisatie tussen grote volumes wind en zon enerzijds en continue nucleaire productie anderzijds. Juist hierdoor wordt de economische positie van SMR's sterk afhankelijk van de mate waarin het Rijk structureel blijft kiezen voor verdere uitbreiding van duurzame productie.

De groei van weersafhankelijke productie leidt vervolgens tot nieuwe systeemspanningen zoals overschotten, congestie, Dunkelflaute, prijsvolatiliteit en afnemende benuttingsgraden van regelbaar vermogen. Daarom wordt steeds sterker ingezet op opslag, elektrolyse, waterstof, ammoniak, flexibilisering en netverzwaring. Deze systemen lossen echter niet alleen problemen op, maar introduceren ook nieuwe afhankelijkheden en marktdynamieken. Wanneer elektrolysers massaal reageren op lage stroomprijzen ontstaat bijvoorbeeld gelijktijdige waterstofproductie. Daardoor kunnen opnieuw overschotten, prijsdruk, benuttingsproblemen en congestie ontstaan, nu binnen het waterstofsysteem. De systeemdynamiek van de elektriciteitsmarkt verschuift daarmee gedeeltelijk naar gekoppelde waterstof- en ammoniakmarkten.

Daarnaast wordt de economische positie van binnenlandse elektrolysers beïnvloed door internationale ontwikkelingen. Waterstof of ammoniak uit regio's met hogere zoninstraling, hogere windfactoren, lagere grondkosten en hogere benuttingsgraden kan aanzienlijk

goedkoper worden geproduceerd dan in Nederland. Daardoor kan goedkope import van waterstof of ammoniak de economie van binnenlandse elektrolysers onder druk zetten. Hierdoor ontstaat opnieuw een systeemspanning: duurzame overschotten vragen om elektrolyse, maar goedkope import kan tegelijkertijd de benuttingsgraad en rentabiliteit van binnenlandse elektrolysers aantasten.

Onder deze omstandigheden ontstaat steeds meer behoefte aan subsidies, capaciteitsmechanismen, garantieregelingen en bestuurlijke systeemcorrecties. Aanvankelijk versnellen subsidies de groei van gewenste technieken. Naarmate het systeem complexer wordt, kunnen zij echter ook nieuwe spanningen veroorzaken. Stimulering van wind en zon verlaagt bijvoorbeeld marktprijzen, waardoor flexibel vermogen economisch onder druk komt te staan. Opslag vermindert prijsverschillen en tast daarmee op termijn de businesscase van nieuwe opslag aan. Elektrolyse kan leiden tot waterstofoverschotten en prijsdruk op waterstofmarkten. Uitbreiding van kernenergie kan de benuttingsgraad van duurzame productie aantasten en omgekeerd. Daardoor ontstaat geleidelijk een energiesysteem waarin steeds meer onderdelen afhankelijk worden van beleidsmatige correcties.

Het marktmechanisme verschuift daarmee geleidelijk van autonome prijsvorming naar een systeem waarin bestuurlijke sturing, subsidies en risicodeling een steeds grotere rol spelen. Investeringsrisico verschuift daardoor van techniek naar politiek en systeemontwikkeling. In klassieke energiemarkten werden investeringen vooral bepaald door techniek, brandstofkosten en vraagontwikkeling. In het huidige systeem worden investeringen echter steeds sterker afhankelijk van subsidiestromen, marktontwerp, regelgeving, CO_2-beleid, infrastructuurontwikkeling en toekomstige systeemkeuzes van het Rijk. Juist voor kapitaalintensieve technieken met lange terugverdientijden ontstaat daardoor grote onzekerheid. Het logische gevolg is dat investeerders steeds nadrukkelijker kijken naar garanties, minimumprijzen, capaciteitsvergoedingen en publieke risicodeling.

Binnen deze context ontstaat de bestuurlijke vraag in hoeverre provincies en gemeenten zelfstandig moeten inzetten op SMR’s wanneer de nationale systeemontwikkeling primair andere richtingen ondersteunt en de economische randvoorwaarden grotendeels nationaal worden bepaald. SMR’s zijn weliswaar kleiner dan klassieke kerncentrales, maar blijven onderdeel van nationale energieplanning, nucleaire regelgeving, infrastructuur, marktordening en langjarige systeemontwikkeling. Daarmee overstijgt hun betekenis het lokale schaalniveau.

Provincies en gemeenten beschikken bovendien slechts beperkt over investeringscapaciteit, risicodragend vermogen en invloed op de nationale systeemvoorwaarden die uiteindelijk de economische levensvatbaarheid bepalen. Daardoor ontstaat een bestuurlijke asymmetrie: decentrale overheden dragen mogelijk wel ruimtelijke, bestuurlijke en maatschappelijke gevolgen, terwijl zij slechts beperkt invloed hebben op de nationale systeemarchitectuur waarbinnen SMR’s economisch moeten functioneren.

Opmerkelijk is dat de analyse aanvankelijk begon als een technisch-economische beschouwing over vollasturen, jaarduurkrommen, kernenergie, wind, opslag en waterstof. Gaandeweg verschuift de kern van het vraagstuk echter van techniek naar bestuurlijke verantwoordelijkheid. Hoe sterker zichtbaar wordt dat benuttingsgraden, marktprijzen, infrastructuren, subsidies en systeemfuncties nationaal worden bepaald, hoe nadrukkelijker de vraag ontstaat of dit type besluitvorming überhaupt passend is op provinciaal of gemeentelijk niveau.

Daarmee blijkt de discussie over SMR's uiteindelijk minder te draaien om de reactor zelf dan om de vraag welk bestuursniveau verantwoordelijk kan en mag zijn voor keuzes waarvan de economische, technische en maatschappelijke gevolgen meerdere generaties en het volledige nationale energiesysteem raken.

De analyse roept ook een bestuurskundige vraag op over de verhouding tussen Rijk, provincies en gemeenten binnen de discussie over SMR's. Juist omdat nucleaire energie sterk afhankelijk is van nationale marktordening, regelgeving, infrastructuur en langetermijnbeleid, ligt de fundamentele systeemverantwoordelijkheid in belangrijke mate bij het Rijk.

Tegelijkertijd worden provincies en gemeenten actief betrokken bij verkenningen, participatieprocessen en ruimtelijke discussies. Daardoor ontstaat een bestuurlijke tussenruimte waarin decentrale overheden worden uitgenodigd om mee te denken over een ontwikkeling waarvan de essentiële economische en systeemvoorwaarden uiteindelijk nationaal worden bepaald.

Juist wanneer het Rijk zelf nog geen expliciete en stabiele langetermijnpositie over de rol van SMR's heeft ingenomen, ontstaat ruimte voor regionale profilering, lobbyvorming en bestuurlijke verwachtingspatronen.

Daardoor kan de indruk ontstaan dat decentrale overheden invloed hebben op een systeemkeuze die in werkelijkheid grotendeels afhankelijk blijft van nationale besluitvorming en nationale risicodragende ondersteuning.

Daarmee rijst de vraag of een duidelijkere afbakening van verantwoordelijkheden tussen Rijk en decentrale overheden eerder in het proces wenselijk zou zijn geweest.

De discussie over SMR's verschuift uiteindelijk van een technische en ruimtelijke vraag naar een bestuurlijke vraag over verantwoordelijkheid, beïnvloedingsruimte en democratische legitimiteit. Provincies, gemeenten en burgers worden wel betrokken bij verkenningen, participatieprocessen en maatschappelijke afwegingen, maar de fundamentele systeemvoorwaarden — zoals marktordening, subsidiëring, infrastructuur, netontwikkeling en de toekomstige nationale energiearchitectuur — blijven grotendeels door het Rijk bepaald. Juist daardoor ontstaat spanning tussen de formele participatie op decentraal niveau en de feitelijke beïnvloedbaarheid van de onderliggende systeemkeuzes.

Naarmate duidelijker wordt dat de economische levensvatbaarheid van SMR's sterk afhankelijk is van nationale keuzes over wind, zon, opslag, waterstof en marktsturing, rijst steeds nadrukkelijker de vraag of provincies en gemeenten werkelijk in positie zijn om hierover zelfstandig richtinggevende besluiten te nemen. Daarmee raakt de discussie uiteindelijk aan de kern van betekenisvolle participatie zelf: niet alleen de vraag óf men mag meepraten, maar vooral of de wezenlijke keuzes, onzekerheden en grenzen daadwerkelijk open en beïnvloedbaar zijn.

Daarmee ontstaat ook twijfel over de betekenis en eerlijkheid van een enquête onder burgers wanneer de fundamentele systeemkeuzes, economische randvoorwaarden en bestuurlijke verantwoordelijkheden nog niet expliciet zijn uitgewerkt. Een enquête wekt immers de indruk dat burgers invloed kunnen uitoefenen op een openliggende keuze, terwijl tegelijkertijd veel bepalende factoren — zoals nationale marktordening, subsidiëring, infrastructuurontwikkeling, systeemintegratie en de toekomstige rol van SMR's binnen het

landelijke energiesysteem — buiten de invloedssfeer van gemeenten, provincies en burgers zelf liggen. Juist daardoor kan participatie het karakter krijgen van schijnparticipatie: een proces waarin betrokkenheid wordt georganiseerd, terwijl de feitelijke beïnvloedingsruimte beperkt of onduidelijk blijft. Dat roept niet alleen vragen op over de waarde van de enquête voor burgers, maar ook over de positie van deelnemers en experts die gevraagd worden mee te denken binnen een kader waarvan de essentiële uitgangspunten nog onvoldoende expliciet zijn gemaakt. Daarmee raakt de discussie uiteindelijk aan de kern van betekenisvolle participatie: niet alleen gehoord worden, maar ook kunnen deelnemen aan een proces waarin de werkelijke keuzes, onzekerheden en grenzen nog openliggen en zichtbaar kunnen worden gewogen.

Bijlage 11 Regelvermogen en brandstofprijs

De beoordeling van regelbaar vermogen mag niet worden beperkt tot één tijdshorizon. Op een termijn van tien jaar staat de vraag centraal welk vermogen tijdig beschikbaar kan zijn om leveringszekerheid te borgen naast een sterk groeiend aandeel wind en zon. Op die termijn ligt flexibel thermisch vermogen meer voor de hand dan nieuwe kernenergie, omdat het sneller realiseerbaar, beter schaalbaar en beter inzetbaar is voor wisselende restvraag.

Al vele jaren is in de elektriciteitswereld niet de techniek bepalend voor de keuze, maar de beschouwing over de beschikbaarheid en prijs van de brandstoffen. Wat is er uit het verleden te leren en waar gaat het naar toe.

Op een termijn van vijfentwintig jaar verschuift de vraag naar brandstofdiversiteit en aanpasbaarheid. Dan moet worden beoordeeld in hoeverre LNG, waterstof, ammoniak, methanol, vloeibare brandstoffen of combinaties daarvan beschikbaar, betaalbaar en veilig toepasbaar zijn in gasturbines of STEG's, al dan niet met aanvullende maatregelen voor NOx- en CO_2-reductie. Juist op deze termijn is optionaliteit van grote waarde: het systeem moet kunnen meebewegen met feitelijke ontwikkelingen in opslag, import, industrie, netten en brandstofmarkten.

Op een termijn van vijftig jaar wordt de vraag fundamenteel. Dan gaat het niet alleen om leveringszekerheid, maar om het voorkomen van verkeerde systeemlock-in. Een kerncentrale met een lange levensduur kan alleen verantwoord zijn wanneer overtuigend is aangetoond dat Nederland ook op lange termijn behoefte heeft aan grootschalig continu vermogen. Wanneer de resterende systeemopgave vooral bestaat uit flexibel vermogen bij wisselende restvraag, past een trage, kapitaalintensieve en relatief starre oplossing minder goed dan een gefaseerd en brandstofmatig open systeem van flexibel regelbaar vermogen.

De tijdshorizon verandert de beoordeling. Op tien jaar is kernenergie te traag voor het flexibiliteitsprobleem. Op vijfentwintig jaar is optionaliteit doorslaggevend. Op vijftig jaar is lock-in het hoofdcriterium. Juist daarom moet eerst de systeemfunctie worden vastgesteld voordat een technologie als strategisch noodzakelijk wordt gepresenteerd.

1 Flexibiliteit productie middel

De beoordeling moet beginnen bij de flexibiliteit van het productiemiddel. In een elektriciteitssysteem met circa 70.000 MWe wind en zon is de resterende opgave niet vanzelfsprekend het leveren van extra basislast, maar het leveren van regelbaar vermogen op momenten dat wind, zon, opslag en import tekortschieten. Voor die functie is de flexibiliteit van het productiemiddel doorslaggevend.

Kerncentrales hebben hierin weinig keuzevrijheid. Zij vragen hoge investeringen, lange bouwtijd, lange levensduur en hoge benutting. Daarmee leggen zij de systeemrol voor vele decennia vast. Een kerncentrale kan technisch op onderdelen regelbaar zijn, maar economisch en bestuurlijk blijft zij vooral een keuze voor langdurig continu vermogen. Wanneer de toekomstige restvraag grillig, onzeker en wisselend is, ontstaat daardoor het risico van systeemlock-in.

Gasturbines en STEG's hebben juist meer keuzevrijheid. Zij kunnen snel worden gerealiseerd, gefaseerd worden uitgebreid en worden ingezet met weinig of veel draaiuren, afhankelijk van de feitelijke ontwikkeling van vraag, opslag, import, netcapaciteit en duurzame productie. Bovendien kunnen zij in beginsel met verschillende brandstofroutes worden verbonden: LNG of aardgas op korte termijn, vloeibare brandstoffen of LPG als reserve, en later mogelijk waterstof, ammoniak, methanol of synthetische brandstoffen, al dan niet met aanvullende maatregelen voor NOx- en CO_2-reductie.

Daarmee verschuift het strategische oordeel. Niet alleen de zekerheid van één brandstofketen is bepalend, maar vooral de mogelijkheid om tussen brandstofketens en inzetprofielen te kunnen bewegen. Juist onder onzekerheid is keuzevrijheid een veiligheidswaarde. Een kerncentrale vraagt dat het systeem zich aanpast aan de centrale; een flexibel thermisch productiemiddel kan zich aanpassen aan het systeem**.**

Bij een onzekere elektriciteitstoekomst is flexibiliteit niet een technische bijzaak, maar een strategische hoofdwaarde. Kernenergie legt een systeemkeuze vast; gasturbines en STEG's houden systeemkeuzes open.

2 Splijtstof als strategische brandstofketen

Bij de beoordeling van kernenergie moet splijtstof niet worden behandeld als een gewone brandstof. Uranium heeft weliswaar een zeer hoge energiedichtheid en is daardoor relatief goed op voorraad te houden, maar voordat uranium als splijtstof in een reactor kan worden gebruikt, doorloopt het een lange, gespecialiseerde keten. Die keten bestaat uit mijnbouw, verwerking tot uraniumconcentraat, conversie, verrijking, splijtstof fabricage, gebruik in de reactor, opslag van gebruikte splijtstof, eventuele opwerking en uiteindelijk eindberging. Daarmee is de afhankelijkheid bij kernenergie niet beperkt tot de beschikbaarheid van uraniumerts. Zij omvat ook toegang tot conversiecapaciteit, verrijkingscapaciteit, gekwalificeerde splijtstof fabricage en institutionele oplossingen voor gebruikte splijtstof.

De wereldproductie van uranium is sterk geconcentreerd. In 2024 kwam ongeveer driekwart van de wereldwijde mijnproductie uit Kazachstan, Canada en Namibië; Kazachstan leverde volgens de World Nuclear Association circa 39%, Canada 24% en Namibië 12% van de wereldproductie. Voor de Europese Unie waren in 2024 Canada, Kazachstan, Australië en Rusland de belangrijkste leveranciers van natuurlijk uranium; deze vier landen waren samen goed voor 84% van de leveringen aan EU-nutsbedrijven. Dat laat zien dat de aanvoer van uraniumerts wel te spreiden is, maar niet onbeperkt. De keuze voor kernenergie verplaatst de brandstofafhankelijkheid dus naar een beperkt aantal mijnbouwlanden.

De meest strategische kwetsbaarheid ligt echter niet alleen bij de mijnbouw, maar vooral bij de latere stappen in de keten. Verrijkingscapaciteit is wereldwijd nog sterker geconcentreerd dan uraniumwinning. De International Energy Agency wijst erop dat meer dan 99% van de wereldwijde verrijkingscapaciteit bij vier leveranciers ligt, waarbij Rusland circa 40% van de mondiale verrijkingscapaciteit vertegenwoordigt. Dat betekent dat een Europese of Nederlandse kernenergie keuze niet alleen moet aantonen dat uranium kan worden ingekocht, maar ook dat conversie, verrijking en splijtstof fabricage zonder ongewenste geopolitieke afhankelijkheden kunnen worden geborgd. Rusland is daarbij niet onvermijdelijk, maar het vermijden van Russische capaciteit vraagt tijdige contractering, voldoende westerse capaciteit en een reactorontwerp waarvoor passende splijtstof leverbaar is.

Er zijn westerse alternatieven. Uranium kan worden betrokken uit landen als Canada, Australië en Namibië. Verrijking kan plaatsvinden via partijen als Urenco en Orano, en Orano breidt bijvoorbeeld de verrijkingscapaciteit in Tricastin uit om een alternatief te bieden voor Russische verrijkingsdiensten. Maar deze alternatieven zijn niet kosteloos en niet onbeperkt. Zij vragen investeringen, lange levertijden, kwalificatie, vergunningen en zekerheid dat de gekozen reactor past bij de beschikbare splijtstofketen. De splijtstofkeuze is dus geen vrije marktkeuze op het moment dat de centrale draait; zij moet vóór de bouw strategisch, technisch en juridisch zijn geborgd.

MOX biedt slechts beperkt extra flexibiliteit. MOX gebruikt plutonium uit gebruikte splijtstof, gemengd met uranium, en kan in bepaalde reactoren worden toegepast. Maar daarvoor zijn opwerking, speciale fabricage, aangepaste veiligheidsanalyses en vergunningen nodig. Het is dus geen algemene uitwijkroute, maar een beperkte optie binnen een vooraf geschikt nucleair systeem. Voor thorium geldt dit nog sterker. Thorium is vooral een keuze voor een ander reactorconcept en een andere brandstofcyclus. Een bestaande uraniumreactor later wezenlijk ombouwen naar thorium is praktisch geen reële flexibiliteitsoptie. Wanneer daarvoor de reactor zelf moet worden aangepast, raakt men aan reactorfysica, kernontwerp, veiligheidsanalyse en radioactief geworden hoofdcomponenten. Dat is niet vergelijkbaar met het aanpassen van branders of brandstofsystemen bij gasturbines.

De hoofdbevinding is daarom dat splijtstof strategische voorraadbaarheid biedt, maar weinig strategische flexibiliteit. De brandstofhoeveelheid is klein en voorraad kan voor meerdere jaren worden aangelegd. Dat is een voordeel ten opzichte van gasvormige of vloeibare brandstoffen die continu of regelmatig moeten worden aangevoerd. Maar daar staat tegenover dat de nucleaire brandstofketen smal, gespecialiseerd en deels geopolitiek kwetsbaar is. Bovendien legt de keuze voor een reactor ook de splijtstofroute, de afvalroute en het vergunning regime voor lange tijd vast.

Voor de vergelijking met flexibel thermisch vermogen is dit onderscheid essentieel. Bij gasturbines en STEG's kan de brandstofroute in de tijd verschuiven: van aardgas of LNG naar bijmenging met waterstof, mogelijk ammoniak, methanol of synthetische brandstoffen. Bij kernenergie moet de splijtstofroute grotendeels vooraf bij het reactorontwerp passen. Daarmee vermindert uranium de afhankelijkheid van continue brandstofaanvoer, maar het vergroot niet de adaptieve keuzevrijheid van het systeem. De kernzin luidt daarom: **splijtstof is strategisch op te slaan, maar niet strategisch flexibel.**

6.3 Aardgas/LNG

Aardgas en LNG vormen op korte en middellange termijn de meest logische brandstofroute voor flexibel regelbaar vermogen. De reden daarvoor ligt niet in een ideaalbeeld van aardgas, maar in de combinatie van bestaande infrastructuur, technische volwassenheid, korte bouwtijd, hoge regelbaarheid en de mogelijkheid om gasturbines en STEG's met beperkte draaiuren als systeemreserve in te zetten. In een elektriciteitssysteem met veel wind en zon is de relevante vraag niet welke brandstof continu bulkstroom kan leveren, maar welke brandstof voldoende beschikbaar is voor perioden waarin wind, zon, opslag en import tekortschieten.

De strategische kwetsbaarheid van aardgas ligt vooral in de herkomst. Europa is na het wegvallen van Russische pijpleidinggas sterker afhankelijk geworden van LNG, met de Verenigde Staten als grootste leverancier, naast onder meer Qatar, Noorwegen, Algerije en

andere exporteurs. Daarmee verschuift de afhankelijkheid van één pijpleidingrelatie naar een mondiale LNG-markt. Dat vergroot de spreiding, maar niet automatisch de zekerheid. LNG blijft gevoelig voor prijsconcurrentie met Azië, geopolitieke verstoringen, exportbeleid, scheepvaart, terminalcapaciteit en opslagbeleid.

De vraag of er nog honderd jaar aardgas beschikbaar is, kan daarom niet alleen geologisch worden beantwoord. Wereldwijd bestaan nog aanzienlijke gasvoorraden en resources, maar bewezen reserves bij huidige productie wijzen eerder op meerdere decennia dan op een zekere eeuw. Bovendien is niet elke molecule aardgas voor Nederland beschikbaar, betaalbaar, politiek aanvaardbaar of klimaatmatig verdedigbaar. De strategische vraag is dus niet of er ergens nog gas is, maar of Nederland en Europa op kritieke momenten toegang hebben tot voldoende gas tegen aanvaardbare prijs en onder aanvaardbare emissievoorwaarden.

Voor flexibel vermogen is dat beeld minder zwaar dan voor basislast. Wanneer gasturbines of STEG's vooral draaien als reserve voor kritieke uren, dagen of weken, is de benodigde jaarhoeveelheid brandstof relatief beperkt. Daardoor worden strategische voorraad, gespreide contracten en tijdelijke inzet beter te orga niseren. Aardgas/LNG kan daarmee een robuuste brugfunctie vervullen, mits het systeem niet opnieuw structureel afhankelijk wordt gemaakt van permanente fossiele bulkproductie.

De hoofdbevinding luidt daarom: aardgas/LNG biedt veel meer operationele flexibiliteit dan splijtstof, maar minder langjarige strategische zekerheid. Het is sterk als tijdelijke en flexibele systeemreserve, zwakker als structureel eindbeeld. De waarde ligt niet in aardgas als ideaal, maar in de combinatie van snelle beschikbaarheid, regelbaarheid en de mogelijkheid om later over te stappen op andere brandstofroutes of CO_2-beperkende maatregelen.

Russisch gas kan op langere termijn niet volledig worden uitgesloten als marktoptie. Wanneer de geopolitieke verhoudingen wijzigen, kan Russische productie opnieuw druk zetten op de wereldmarkt en mogelijk prijs verlagend werken. Voor een robuuste Nederlandse systeemstudie mag dit echter niet als basisaanname worden gebruikt. De EU heeft sinds 2026 juist gekozen voor een structurele afbouw van Russische gasimport, en politieke, juridische en maatschappelijke bezwaren tegen hernieuwde afhankelijkheid zullen waarschijnlijk lang doorwerken. Russisch gas kan daarom hoogstens als ontspanningsscenario worden meegenomen, niet als fundament voor leveringszekerheid.

4 LPG

LPG kan een rol vervullen als brandstof voor piekvermogen en strategische reserve. De waarde van LPG ligt niet in grootschalige continue elektriciteitsproductie, maar in de combinatie van opslagbaarheid, internationale verhandelbaarheid en snelle beschikbaarheid bij beperkte draaiuren. Voor gasturbines of aangepaste motorinstallaties kan LPG daardoor interessant zijn wanneer de systeemfunctie vooral bestaat uit het overbruggen van korte of uitzonderlijke tekorten.

Bij lage jaarlijkse inzet kan een relatief dure brandstof toch aantrekkelijk zijn, omdat de brandstofkosten dan slechts een beperkt deel van de totale systeemkosten vormen. De belangrijkste waarde ligt dan in beschikbaarheid: het vermogen staat klaar en de brandstof

kan fysiek worden opgeslagen. Daarmee verschilt LPG van aardgas via het net, waarbij beschikbaarheid afhankelijk blijft van gasnet, markt en aanvoercondities.

Tegenover deze voordelen staan duidelijke beperkingen. LPG blijft een fossiele brandstof met CO_2-emissies. Daarnaast vraagt verbranding aandacht voor NOx-reductie, en opslag van grotere hoeveelheden LPG brengt veiligheids- en vergunningseisen met zich mee. Ook is LPG minder geschikt als structurele brandstof voor STEG's met veel draaiuren, omdat dan prijs, emissies en logistiek zwaarder gaan wegen.

De hoofdbevinding is daarom dat LPG geen eindoplossing is voor het elektriciteitssysteem, maar wel een redelijke variant voor piekvermogen, noodvermogen of strategische reserve. Juist in een systeem met veel wind en zon kan zo'n beperkt inzetbare brandstof waardevol zijn, mits zij expliciet wordt beoordeeld op systeemkosten, emissies, opslagveiligheid en bijdrage aan leveringszekerheid.

LPG is geen brandstof voor de basisvariant, maar kan wel waarde hebben als verzekeringsbrandstof voor piekvermogen.

5 Ammoniak

NH_3 is in 2026 nog geen bewezen standaardbrandstof voor grootschalige gasturbines of STEG's, maar ontwikkelt zich tot een serieuze optie voor de periode na 2030. De technologie voor ammoniakverbranding maakt duidelijke stappen, maar moet nog worden bewezen op commerciële schaal, met voldoende rendement, bedrijfszekerheid en beheersing van NOx, N_2O en ammoniak slip. Voor de komende tien jaar is ammoniak daarom geen dragende oplossing voor leveringszekerheid. Voor de horizon van vijfentwintig jaar verdient zij wel een plaats in de variantenstudie als mogelijke importbrandstof voor flexibel vermogen.

Ammoniak is geen antwoord op het onmiddellijke flexibiliteitsprobleem, maar kan wel een strategische route worden om flexibel thermisch vermogen op langere termijn koolstofarm te maken — mits veiligheid, emissies en kosten aantoonbaar beheersbaar zijn.

6 Methanol

Methanol vormt een interessante tussenroute tussen fossiele gasbrandstoffen en koolstofvrije brandstoffen zoals ammoniak en waterstof. De kracht van methanol ligt in de vloeibare vorm, de relatief eenvoudige opslag en transporteerbaarheid, de bestaande industriële ervaring en de mogelijkheid om het te produceren uit biomassa of uit groene waterstof en afgevangen CO_2. Daardoor kan methanol op termijn een rol spelen als brandstof voor flexibel regelbaar vermogen, vooral wanneer de jaarlijkse draaiuren beperkt blijven en de waarde vooral ligt in beschikbaarheid tijdens kritieke perioden.

Tegenover deze voordelen staat dat methanol geen koolstofvrije brandstof is. Bij verbranding komt CO_2 vrij. De klimaatwaarde hangt daarom volledig af van de herkomst van de methanol en van de CO_2 die bij productie wordt gebruikt. Fossiele methanol is geen structurele klimaatoplossing. Biomethanol is beperkt door duurzame biomassabeschikbaarheid. E-methanol is aantrekkelijk, maar vraagt goedkope duurzame elektriciteit, groene waterstof en geschikte CO_2-bronnen. Daardoor is methanol op langere termijn kansrijk, maar op korte termijn nog geen zekere grootschalige brandstofroute.

Technisch is toepassing in gasturbines mogelijk en worden demonstraties uitgevoerd, maar grootschalige toepassing in STEG's moet nog worden beoordeeld op rendement, bedrijfszekerheid, emissies, brander aanpassingen en kosten. Methanol kan gunstig zijn voor NOx-emissies ten opzichte van sommige conventionele brandstoffen, maar blijft aandacht vragen voor volledige verbranding, veiligheid, opslag en CO_2-balans.

De hoofdbevinding is dat methanol vooral waarde heeft als flexibele, opslagbare en mogelijk duurzame vloeibare energiedrager. Op tien jaar is zij vooral een reserve- of ontwikkeloptie. Op vijfentwintig jaar kan methanol een serieuze brandstofvariant worden voor flexibel vermogen. Op vijftig jaar kan zij alleen een structurele rol spelen als de productie werkelijk gebaseerd is op duurzame waterstof en duurzame of circulaire CO_2.

Methanol biedt meer logistieke flexibiliteit dan waterstof en minder veiligheidszwaarte dan ammoniak, maar haar klimaatwaarde staat of valt met de herkomst van de koolstof.

7 Waterstof afgeleid uit methanol of ammoniak

Waterstof kan niet alleen rechtstreeks worden geproduceerd en getransporteerd, maar ook worden ingevoerd via dragers zoals ammoniak en methanol. Deze route is aantrekkelijk omdat waterstof zelf moeilijk grootschalig te vervoeren en op te slaan is. Door waterstof eerst chemisch te binden in NH_3 of methanol ontstaat een vloeibare of beter hanteerbare energiedrager die internationaal kan worden verhandeld en per schip naar Nederland kan worden gebracht.

Bij ammoniak kan waterstof worden teruggewonnen door kraken. Daarbij wordt NH_3 omgezet in stikstof en waterstof. Het voordeel is dat de koolstof ontbreekt en dat de uiteindelijke waterstof bij gebruik geen CO_2 veroorzaakt. De keerzijde is dat ammoniak giftig is, dat grootschalige opslag en transport zware veiligheidseisen stellen en dat kraken extra installaties, energie, katalysatoren en zuivering vraagt. Waterstof uit ammoniak is daarmee geen eenvoudige brandstof, maar een volledige import-, opslag-, conversie- en veiligheidsketen.

Bij methanol kan waterstof worden geproduceerd via reforming. Methanol is logistiek aantrekkelijk omdat het vloeibaar is bij normale omstandigheden en relatief goed kan worden opgeslagen en vervoerd. Maar methanol bevat koolstof. Bij reforming ontstaat CO_2. De klimaatwaarde van deze route hangt daarom volledig af van de herkomst van de methanol en van de vraag of de vrijgekomen CO_2 duurzaam is ingebracht, opnieuw wordt benut of wordt afgevangen. Zonder duurzame herkomst of CO_2-route is waterstof uit methanol geen klimaatneutrale oplossing.

Voor flexibel regelbaar vermogen moet daarom steeds worden vergeleken of het beter is om NH_3 of methanol direct als brandstof te gebruiken, of deze eerst om te zetten in waterstof. Direct gebruik is ketentechnisch eenvoudiger, maar vraagt aangepaste verbranding en emissiebeheersing. Terugvorming naar waterstof kan schoner gebruik mogelijk maken, maar voegt conversieverliezen, kapitaalkosten en complexiteit toe.

De hoofdbevinding is dat H_2 uit NH_3 of methanol vooral een strategische middellange- en langetermijnroute is. Zij biedt meer transporteerbaarheid dan directe waterstof, maar minder eenvoud dan aardgas/LNG. De route kan waardevol worden wanneer duurzame ammoniak of

duurzame methanol in grote hoeveelheden beschikbaar komt, maar zij mag niet worden behandeld als een kosteloze of reeds volwassen oplossing voor het flexibiliteitsprobleem.

Waterstof uit ammoniak of methanol is geen primaire brandstof, maar een terugvertaalde energiedrager: strategisch interessant, maar alleen zinvol wanneer de extra conversieverliezen, kosten, veiligheidseisen en CO_2-effecten aantoonbaar opwegen tegen direct gebruik van NH_3, methanol of LNG.

8 Waterstof uit Wind op zee, opgeslagen in gasvelden

Een afzonderlijke route is waterstof die in Nederland wordt geproduceerd uit wind op zee, via elektrolyse wordt omgezet, ondergronds wordt opgeslagen en later wordt gebruikt voor ondervuring of brandstof in gasturbines en STEG's. Deze route sluit goed aan bij de Nederlandse systeemopgave. Zij verbindt variabele productie uit wind op zee met regelbaar vermogen op momenten dat wind, zon, opslag en import tekortschieten. Daarmee kan waterstof fungeren als brug tussen overschot en tekort, vooral op langere tijdschalen dan batterijen kunnen overbruggen.

De strategische kracht van deze route ligt in binnenlandse productie, gebruik van bestaande gaskennis, mogelijke benutting van het gasnet en ondergrondse opslag in zoutcavernes of mogelijk lege gasvelden. Daardoor ontstaat een nationale flexibiliteitsroute die minder afhankelijk is van continue import van brandstoffen. Bovendien kan zij stapsgewijs worden ontwikkeld: eerst aardgas of LNG, vervolgens bijmenging van waterstof, daarna mogelijk hogere waterstofpercentages of volledig waterstofbedrijf wanneer turbines, opslag en waterstofproductie voldoende volwassen zijn.

Tegenover deze voordelen staan grote onzekerheden. De route kent meerdere omzettingsstappen en dus rendementsverlies: elektriciteit wordt omgezet in waterstof, waterstof wordt gecomprimeerd, getransporteerd, opgeslagen en later weer omgezet in elektriciteit. Economisch is deze route daarom vooral verdedigbaar wanneer het gaat om overschotstroom, langere tekorten of hoge waarde van leveringszekerheid. Daarnaast is de schaal onzeker. De groei van wind op zee, de snelheid van elektrolyse, de aanleg van het waterstofnet en de beschikbaarheid van ondergrondse opslag bepalen gezamenlijk of deze route werkelijk systeemrelevant wordt.

Opslag is daarbij de kritische schakel. Zoutcavernes lijken het meest geschikt voor de eerste grootschalige opslag, maar zijn beperkt in aantal en volume. Lege gasvelden bieden mogelijk grotere volumes, maar kennen meer technische en vergunningmatige onzekerheden. Voor een robuuste systeemstudie mag waterstofopslag in gasvelden daarom niet als gegeven worden behandeld, maar moet zij als ontwikkeloptie worden beoordeeld met expliciete aannames over capaciteit, veiligheid, terugleverbaarheid, zuiverheid en kosten.

De hoofdbevinding is dat waterstof uit wind op zee met ondergrondse opslag een belangrijke strategische route kan worden voor de horizon van 25 en 50 jaar, maar geen eenvoudige oplossing voor de komende tien jaar. De waarde ligt vooral in seizoens- en systeemflexibiliteit, niet in goedkope bulkproductie. Zij versterkt de argumentatie voor flexibele gasturbines en STEG's, omdat deze productiemiddelen met de ontwikkeling van waterstof kunnen meegroeien.

Waterstof uit wind op zee met ondergrondse opslag is geen korte termijn vervanging voor aardgas/LNG, maar wel een strategisch ontwikkelpad waarmee flexibel thermisch vermogen op termijn kan verduurzamen zonder de systeemkeuze nu vast te leggen.

9 Lange termijn visie voor gasturbines en STEG's

Horizon	Systeemvraag	Meest logische route	Kernpunt
10 jaar	snelle leveringszekerheid	gasturbine/STEG op aardgas/LNG	realiseerbaar en flexibel
25 jaar	brandstofdiversiteit	H_2-ready STEG, ammoniak/methanol/CCS als opties	optionaliteit
50 jaar	voorkomen van lock-in	koolstofarme flexlaag of bewezen behoefte aan continu vermogen	systeemrobuustheid

Voor gasturbines en STEG's ontstaat geen enkelvoudige keuze, maar een adaptief ontwikkelpad. Op een termijn van tien jaar ligt de nadruk op snel realiseerbaar flexibel vermogen. Aardgas en LNG zijn dan de meest robuuste brandstofroutes, omdat infrastructuur, techniek, vergunningen en bedrijfsvoering beschikbaar zijn. LPG of andere vloeibare brandstoffen kunnen aanvullend worden beschouwd als piek- of noodbrandstof voor zeer lage draaiuren. Waterstof, ammoniak en methanol zijn op deze termijn vooral voorbereidings- en demonstratieroutes, niet de dragende basis voor leveringszekerheid.

Op een termijn van vijfentwintig jaar verschuift de nadruk naar ombouwbaarheid en brandstofdiversiteit. Nieuwe gasturbines en STEG's zouden daarom niet alleen op aardgas of LNG moeten worden beoordeeld, maar op hun vermogen om later waterstof bij te mengen, op waterstof te draaien of aangepast te worden aan ammoniak, methanol of synthetische brandstoffen. Ook CCS moet in deze fase als variant worden meegenomen. De waarde van deze route ligt in optionaliteit: het productiemiddel kan meebewegen met de feitelijke ontwikkeling van wind op zee, waterstofproductie, import van energiedragers, ondergrondse opslag en emissiebeleid.

Op een termijn van vijftig jaar is fossiel aardgas als structurele brandstof niet langer een houdbaar eindbeeld. Dan moet flexibel thermisch vermogen zijn doorontwikkeld tot een koolstofarme of klimaatneutrale flexibiliteitslaag. Dat kan via waterstof uit wind op zee of import, via ammoniak als energiedrager, via duurzame methanol of synthetische brandstoffen, of via combinatie met CO_2-afvang. De doorslaggevende eis is dat het systeem niet opnieuw wordt vastgelegd op één brandstofroute. De strategische waarde van gasturbines en STEG's ligt juist in het openhouden van meerdere routes.

Op tien jaar zijn gasturbines en STEG's vooral een snelle zekerheidsoptie; op vijfentwintig jaar een adaptief brandstofplatform; op vijftig jaar alleen nog verdedigbaar als koolstofarme flexibiliteitslaag.

10. Strategische keuze

In het licht van een groot duurzaam park — met veel wind en zon — moet strategische autonomie niet meer worden beoordeeld als de vraag: **welke technologie maakt ons onafhankelijk?** De betere vraag is:

welke technologie houdt het elektriciteitssysteem betrouwbaar, corrigeerbaar en bestuurlijk vrij wanneer wind, zon, opslag, vraag, brandstoffen en internationale markten anders uitpakken dan verwacht?

Vanuit dat perspectief verschuift het oordeel. Kernenergie geeft een vorm van strategische autonomie door hoge energiedichtheid, beperkte brandstofvolumes en meerjarige voorraadbaarheid van splijtstof. Maar zij geeft weinig **operationele autonomie** en weinig **adaptieve autonomie**. Gasturbines en STEG's geven juist minder absolute brandstofzekerheid, maar veel meer flexibiliteit, ombouwbaarheid en keuzevrijheid in de tijd.

11. Strategische autonomie is meer dan brandstofzekerheid

Bij kernenergie wordt strategische autonomie vaak verbonden met het feit dat uranium weinig volume vraagt en dat splijtstof voor meerdere jaren kan worden opgeslagen. Dat is een reëel voordeel. Een kerncentrale is minder afhankelijk van dagelijkse of wekelijkse brandstofaanvoer dan een gascentrale. Daarmee heeft kernenergie een sterke positie als men strategische autonomie smal definieert als: **fysieke brandstofvoorraad op het terrein of binnen de keten**.

Maar die definitie is te beperkt. Bij kernenergie verschuift de afhankelijkheid naar mijnbouw, conversie, verrijking, splijtstof fabricage, reactorontwerp, vergunning, afvalbeheer en eindberging. De splijtstofroute is bovendien sterk gekoppeld aan het reactorontwerp. MOX of thorium zijn geen vrije latere uitwijkroutes. Daarmee biedt splijtstof wel voorraadbaarheid, maar weinig brandstofmatige flexibiliteit.

Bij gasturbines en STEG's ligt dat anders. Zij zijn afhankelijker van brandstofaanvoer, zeker bij aardgas of LNG. Maar zij kunnen op termijn meebewegen met meerdere brandstofroutes: aardgas, LNG, LPG of vloeibare reservebrandstoffen, waterstof, ammoniak, methanol, synthetische brandstoffen en eventueel CCS. Hun strategische waarde zit dus niet in één zekere brandstof, maar in **keuzevrijheid tussen routes**.

Daarmee ontstaat het kernonderscheid:

Kernenergie biedt voorraadzekerheid binnen één starre keten. Gasturbines en STEG's bieden brandstofonzekerheid, maar met veel meer adaptieve keuzevrijheid.

12. In een duurzaam systeem is flexibiliteit zelf strategisch

In een systeem met circa 70.000 MWe wind en zon verandert de systeemeis. De vraag is niet langer primair: hoe krijgen we zoveel mogelijk continue productie? De vraag wordt: hoe houden we het systeem betrouwbaar wanneer wind en zon tijdelijk onvoldoende leveren, opslag tekortschiet, import onzeker is en de restvraag sterk varieert?

Bijlage 11 Literatuurlijst — Studie positionering SMR's

1. Besluitvorming onder onzekerheid

- Daniel Kahneman — *Thinking, Fast and Slow*
- Nassim Nicholas Taleb — *The Black Swan*
- Nassim Nicholas Taleb — *Antifragile*
- Bent Flyvbjerg — *How Big Things Get Done*
- Roger Pielke Jr. — *The Honest Broker*
- Path dependence — publicaties van Paul David en Brian Arthur

2. Systeemtheorie en complexe systemen

- Donella Meadows — *Thinking in Systems*
- Sociotechnical systems theory — publicaties over complexe adaptieve systemen
- Frank Geels — publicaties over sociotechnische transities en Multi-Level Perspective (MLP)
- Jesse Jenkins — publicaties over deep decarbonization en systeemintegratie
- Princeton University — *Net-Zero America*

3. Energiesystemen, flexibiliteit en elektriciteitsmarkten

- International Energy Agency — *World Energy Outlook*
- International Energy Agency — *Electricity Market Design for the Energy Transition*
- International Energy Agency — *Nuclear Power in a Clean Energy System*
- Paul Joskow — publicaties over elektriciteitsmarkten, capaciteitsmarkten en leveringszekerheid
- MIT Energy Initiative — *The Future of Nuclear Energy in a Carbon-Constrained World*

4. Kernenergie en SMR's

- International Atomic Energy Agency — publicaties over SMR's, veiligheid, licensering en exploitatie
- OECD Nuclear Energy Agency — *Small Modular Reactors: Challenges and Opportunities*
- OECD Nuclear Energy Agency — *The Full Costs of Electricity Provision*
- International Energy Agency — publicaties over nucleaire systeemintegratie
- Flamanville 3 construction project — projectdocumentatie en evaluaties
- Olkiluoto 3 — projectdocumentatie en evaluaties
- Vogtle — projectdocumentatie en evaluaties
- Hinkley Point C — projectdocumentatie en evaluaties

5. Veiligheid, risico en systeemfalen

- Charles Perrow — *Normal Accidents: Living with High-Risk Technologies*
- James Reason — *Human Error*
- Swiss cheese model — literatuur van James Reason
- Erik Hollnagel — *Safety-I and Safety-II*

- Safety-I and Safety-II — publicaties over resilience engineering
- Genserik Reniers — publicaties over clusterveiligheid, domino-effecten en systeemrisico's
- Onderzoeksraad voor Veiligheid — *Industrie en Omwonenden*
- Ulrich Beck — *Risk Society: Towards a New Modernity*

6. Governance, participatie en legitimiteit

- Jürgen Habermas — *The Theory of Communicative Action*
- Sherry Arnstein — *A Ladder of Citizen Participation*
- Roger Pielke Jr. — publicaties over wetenschap, beleid en publieke besluitvorming
- Ulrich Beck — publicaties over legitimiteit, moderniteit en risico
- Risk governance — publicaties over governance van complexe risico's

7. Megaprojecten, lock-in en publieke investeringen

- Bent Flyvbjerg — publicaties over megaprojecten, budgetoverschrijdingen en optimism bias
- Path dependence — literatuur over lock-in en infrastructuurontwikkeling
- Paul Joskow — publicaties over investeringszekerheid en marktontwerp
- Nassim Nicholas Taleb — publicaties over fragiliteit en asymmetrische risico's

8. Flexibiliteit, opslag en regelbaar vermogen

- International Energy Agency — publicaties over flexibiliteit, opslag en systeemintegratie
- Jesse Jenkins — publicaties over dispatchable power en CO_2-arme systemen
- Paul Joskow — publicaties over capaciteitsmarkten en flexibiliteitsmarkten
- MIT Energy Initiative — studies naar systeembalans en regelbaar vermogen

9. Institutionele robuustheid en regulatory risk

- Donella Meadows — publicaties over feedbackstructuren en systeemgedrag
- Roger Pielke Jr. — publicaties over beleid onder onzekerheid
- Ulrich Beck — publicaties over institutioneel risico
- Genserik Reniers — publicaties over governance van industriële clusters
- Onderzoeksraad voor Veiligheid — rapporten over systeemverantwoordelijkheid en governance

10. Modellen, scenario's en onzekerheidsanalyse

- Daniel Kahneman — publicaties over modelvertrouwen en cognitieve biases
- Nassim Nicholas Taleb — publicaties over onbekende onzekerheden en extreme gebeurtenissen
- Monte Carlo method — literatuur over probabilistische systeemanalyse
- Scenario analysis — publicaties over scenario-planning en deep uncertainty
- Sensitivity analysis — publicaties over gevoeligheidsanalyse en onzekerheidsbandbreedtes