

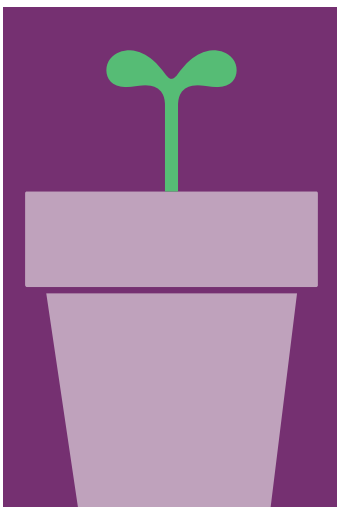
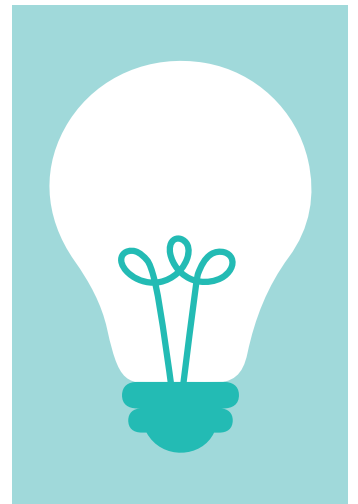


rijksuniversiteit  
groningen

Wubbo Ockels School

# Kernenergie en het Noorden

Economie  
Technologie  
Energiesystemen  
Wetgeving  
Psychologie  
Ethiek



# De economie van kernenergie

## Machiel Mulder



### Stand van zaken

Om de koolstofuitstoot aanzienlijk te verminderen, moeten energiesystemen drastische veranderingen ondergaan. Daarom stimuleren overheden hernieuwbare energiebronnen zoals zonnepanelen, windturbines, waterkracht en biomassa. Maar zelfs met dit beleid zal de groei van hernieuwbare energie waarschijnlijk niet voldoende zijn om de klimaatdoelen te halen. Dit komt deels door de verwachte toename van de vraag naar elektriciteit door elektrificatie en waterstofproductie. Daarom gaat de aandacht ook uit naar een andere koolstofvrije energiebron: kernenergie.

### Uitdagingen en kansen

Over kernenergie wordt veel gediscussieerd vanwege de risico's rondom veiligheid en milieu. Bovendien is het onzeker hoe goed kernenergie past in elektriciteitsmarkten die worden gekenmerkt door een groot aandeel van fluctuerende opwekking. Deze markten vereisen meer flexibele bronnen om het evenwicht te bewaren, terwijl kerncentrales over het algemeen worden beschouwd als een basislastleverancier met hoge vaste kosten. Daarom is het wellicht economisch niet efficiënt om op dergelijke centrales te vertrouwen in toekomstige elektriciteitsmarkten die gedomineerd worden door hernieuwbare energie.

### Ons perspectief

Door de economische waarde van investeringen in kerncentrales in verschillende toekomstige scenario's voor de elektriciteitsmarkt te onderzoeken, willen we een bijdrage leveren aan het maatschappelijke debat over de potentiële rol van kernenergie in koolstofarme energiesystemen. We proberen ook meer inzicht te krijgen in de economische mechanismen achter investeringen in kerncentrales.

De economische waarde van een kerncentrale hangt af van vier factoren:

- Kenmerken van de centrale: Dit omvat bouwkosten, bouwduur, levensduur, operationele en onderhoudskosten, brandstofkosten, opvoeringsbeperkingen, afvalverwerking en -opslag en ontmantelingskosten.
- Benuttingsgraad (capaciteitsfactor).
- Afvangprijs: De gemiddelde elektriciteitsprijs die de centrale ontvangt.
- Bijdrage aan de vermindering van koolstofuitstoot.

Terwijl de eerste factor exogeen is, zijn de andere nauw verbonden met de kenmerken en de werking van de elektriciteitsmarkt. Onze analyse houdt geen rekening met de kosten van eventuele vereiste netwerkuitbreidingen, omdat we erkennen dat deze kosten aanzienlijk kunnen variëren voor verschillende opwekkingstechnologieën.

# De technologie van kernenergie

## Nasser Kalantar-Nayestanaki (I) en Myroslav Kavatsyuk



### Stand van zaken

De energietransitie domineert de discussies over hoe Nederland in 2050 klimaatneutraal kan zijn. Vanuit technologisch perspectief moeten alle koolstofarme bronnen deel uitmaken van de mix om de klimaatdoelen te halen. Verschillende energiemixmodellen ondersteunen dit en schatten het aandeel van kernenergie op ongeveer 10% van de totale elektriciteitsproductie in de komende decennia.

Kerncentrales worden ontworpen en gebouwd op basis van ervaringen van de afgelopen 70 jaar. Ontwerpen van generatie III+ hebben bewezen zeer veilig in gebruik te zijn. Kleine modulaire reactoren (Small Modular Reactors, SMR's) worden ook ontworpen en gebouwd door verschillende bedrijven. Verder wordt er in verschillende landen serieus gewerkt aan onderzoek naar en ontwikkeling van Generatie IV-reactoren. De eerste resultaten zijn veelbelovend en tonen aan dat deze reactoren inherent veilig zijn. Ook wordt er onderzoek gedaan naar het beheer van radioactief afval. Nieuwe technologieën lijken dit probleem voor een groot deel op te lossen. Veel landen zijn initiatieven gestart voor de bouw van nieuwe reactoren (Generatie III+ en Generatie IV). De Nederlandse regering heeft onlangs besloten om twee nieuwe kerncentrales te bouwen op basis van Generatie III-technologie.

### Uitdagingen en kansen

De belangrijkste uitdagingen, of kansen, voor onderzoek rond nucleaire technologie, zijn o.a.:

- Hoe veilig zijn de nieuwe reactoren van Generatie III+ en Generatie IV?
- Wat zijn de belangrijkste voor- en nadelen van Generatie IV-reactoren?
- Hoe kunnen SMR's worden geïntegreerd in de toekomstige energiemix?
- Hoe kunnen de ontwikkelings- en bouwkosten van kerncentrales worden verlaagd?
- Hoe moet radioactief afval in Nederland worden beheerd?

### Ons perspectief

We gaan verschillende vragen behandelen en maken daarbij gebruik van de expertise van onze lokale groep. Om ervoor te zorgen dat nieuwe reactoren, die tientallen jaren (meer dan 60 jaar) moeten functioneren, effectief zijn, is het cruciaal om de eigenschappen van de materialen die in de reactor worden gebruikt goed te kennen. De reactorontwerpen zijn gebaseerd op bestaande modellen van nucleaire data. De nauwkeurigheid van deze data is echter laag voor sommige reactiekanalen en van sommige elementen ontbreken doorsneden voor relevante reacties in de database. Dit resulteert vaak in over-ontworpen reactoren om aan de veiligheidsvoorschriften te voldoen, wat tot onnodig hoge kosten leidt. Een gebrek aan nauwkeurige gegevens leidt tot onnodige iteraties en vertragingen. Om dit probleem aan te pakken en de ontwikkelings- en bouwkosten te verlagen, is een lijst van mogelijke materialen samengesteld. Monsters zullen worden bestudeerd met neutronenbundels in verschillende Europese faciliteiten. Reactiedoorsneden voor alle mogelijke kanalen zullen worden gemeten en toegevoegd aan de bestaande databases.

Hoewel het afval van Generatie IV-reactoren veel minder een probleem vormt, gebruiken Generatie III+-reactoren nog steeds de standaard splijtstofcyclus met radioactieve elementen die op lange termijn moeten worden beheerd. Verschillende landen bespreken mogelijkheden voor langetermijn-opslagplaatsen. Er zullen studies worden uitgevoerd om het radioactief afval in Nederland te kwalificeren en oplossingen aan te bieden.

# Kernenergie en ontwerp van energiesystemen

Aravind Purushothaman Vellayani



## Stand van zaken

Conventionele kerncentrales produceren elektriciteit door gebruik te maken van de opgewekte warmte, voornamelijk met behulp van stoomcycli. Deze centrales zijn operationeel in verschillende landen.

## Uitdagingen en kansen

Kernreactoren van de volgende generatie zullen naar verwachting warmte leveren bij hoge temperaturen (rond 900°C), wat mogelijkheden schept voor gasturbinetoe toepassingen en het gebruik van proceswarmte. Brandstofproductie, met name waterstof, is ook een veelbelovende mogelijkheid. Elektrolytische cellen kunnen worden gebruikt voor de productie van waterstof of waterstofhoudende brandstoffen zoals ammoniak en methanol. Daarnaast biedt de ontwikkeling van kleine tot middelgrote reactoren een breed scala aan mogelijke temperaturen, wat leidt tot verschillende innovatieve toepassingen. De toepassingen en procesconcepten voor deze reactoren zijn echter nog niet volledig ontwikkeld.

## Ons perspectief

We stellen een gerichte inspanning voor om nieuwe toepassingen en procesconcepten te ontwikkelen. We willen technologie en toepassingen op elkaar afstemmen, vooral in Nederland, met speciale aandacht voor mogelijkheden in het noorden. Deze concepten zullen worden ontwikkeld door middel van innovatieve procesontwerpen, exergie-analyses en energiekostenberekeningen. Exergieanalyse zal helpen bij het creëren van minimale entropie-producerende systeemconcepten en operationele strategieën voor opkomende technologieën. Zodra de optimale procesontwerpen zijn bepaald, zullen de resultaten van de massa- en energiebalans en de indicatieve dimensionering van de componenten leiden tot indicatieve berekeningen van de energiekosten.

In eerste instantie zal de nadruk liggen op de productie van waterstof en andere toekomstige brandstoffen. We zullen conceptuele procesontwerpen ontwikkelen op basis van verschillende technologieën, waaronder alkaline elektrolyzers, PEM elektrolyzers, vaste oxide elektrolyzers (in verschillende modi), omkeerbare brandstofcellen/elektrolyzers en zowel conventionele als opkomende thermochemische cycli. Verschillende systeemgroottes zullen worden overwogen en voorlopige terugverdientijden zullen worden berekend op basis van eenvoudiger aannames.

Thermodynamische modellen voor innovatieve energiecycli van verschillende systeemgroottes zullen worden ontwikkeld met behulp van vergelijkbare reeksen aannames voor gemeenschappelijke componenten. Kostenberekeningen, inclusief terugverdientijden, zullen worden uitgevoerd. Afhankelijk van de beschikbare middelen zullen we ook de mogelijkheden voor nucleaire aandrijving binnen de Nederlandse context evalueren.

Een ander aandachtsgebied zijn proceswarmtetoepassingen. We zullen kijken naar grote en middelgrote verbruikers van proceswarmte in Nederland en procesmodellen ontwikkelen op basis van verschillende reactortypes. Kostenberekeningen zullen vervolgens de levensvatbaarheid van deze concepten onder Nederlandse omstandigheden bepalen.

Op basis van de hierboven beschreven stappen ontwikkelen we een lijst met economisch aantrekkelijke technologische opties voor kernenergie, vergezeld van indicatieve kostenberekeningen die specifiek zijn voor de Nederlandse context.

# Kernenergie en wetgeving

Lorenzo Squintani



## Stand van zaken

Om aan de energiebehoefte te voldoen, heeft Nederland besloten de productie van kernenergie te verhogen. Kernenergie wordt gereguleerd door een complex kader van internationale, Europese en nationale wetten die de hele waardeketen bestrijken: van de winning van grondstoffen tot het beheer van afvalstoffen. In Nederland vormt de Kernenergiewet de basis van het wettelijke kader voor kernenergie. Deze wet richt zich op veiligheidskwesties in de gehele waardeketen van kernenergie. Het vormt onder andere de basis voor de vergunningsprocedures voor kernenergie-installaties en het beheer van radioactief afval.

Deze rol is niet veranderd met de invoering van de Omgevingswet in januari 2024. De milieu- en planningswet brengt voornamelijk wijzigingen aan in de regelgeving voor milieueffectbeoordelingen en bestemmingsplannen, die ook relevant zijn voor de bouw van nieuwe kerncentrales, maar vervangt niet het wettelijke regime dat is vastgelegd in de Kernenergiewet. De Kernenergiewet wordt verder ten uitvoer gelegd via diverse regerings- en ministeriële besluiten en verordeningen die betrekking hebben op verschillende elementen van de waardeketen voor kernenergie.

## Uitdagingen en kansen

Als we de ontwikkeling van het regelgevingskader voor kernenergie door de jaren heen bekijken, zien we een voortdurende spanning tussen het waarborgen van de veiligheid en het mogelijk maken van de productie en het gebruik van kernenergie, inclusief het beheer van radioactief afval. Een conservatieve juridische benadering kan technologische ontwikkelingen belemmeren en vertragen. Deze spanning wordt steeds duidelijker bij nieuwe technologische doorbraken, zoals de ontwikkeling van centrales van de vierde generatie of wanneer regeringen overwegen om de levensduur van bestaande, soms tientallen jaren oude centrales te verlengen. Vanuit juridisch oogpunt liggen de uitdagingen en kansen in het ontwikkelen van de optimale balans tussen veiligheid en het mogelijk maken van kernenergieproductie.

Daarnaast zijn er uitdagingen en mogelijkheden om dit evenwicht te handhaven naarmate ons begrip van nucleaire technologieën en de sociaaleconomische dimensies die verband houden met kernenergie in de loop van de tijd evolueert. Met andere woorden: we moeten een adaptief juridisch kader ontwikkelen voor de optimale regulering van kernenergie.

## Ons perspectief

Door een model te ontwikkelen om het aanpassingsvermogen van wettelijke regelingen voor energiesectoren te definiëren, kunnen we de mate van optimalisatie bij het vinden van een evenwicht tussen veiligheid en technologische ontwikkeling evalueren en vergelijken, evenals het aanpassingsvermogen van het gekozen evenwicht. Dit zal waardevolle inzichten opleveren in de toewijzing van bevoegdheden, veiligheidsnormen en de optimalisering van wettelijke instrumenten, waardoor het wettelijke kader voor de kernenergiesector optimaler en adaptiever wordt. Op die manier kan een stappenplan voor de ontwikkeling van het rechtskader worden opgesteld.

# De psychologie van kernenergie

Goda Perlaviciute



## Stand van zaken

De energietransitie is een enorme maatschappelijke uitdaging. Publieke acceptatie is cruciaal voor de succesvolle implementatie ervan, aangezien energieprojecten eerder zullen worden uitgevoerd met publieke steun, terwijl publieke tegenstand kan leiden tot vertragingen of annuleringen. De rol van sociale en geesteswetenschappen, met name milieupsychologie, wordt steeds meer erkend als het gaat om het begrijpen van de publieke perceptie en acceptatie van energieprojecten en -beleid, en om het ontwikkelen van energie-initiatieven die maatschappelijke steun kunnen krijgen.

## Uitdagingen en kansen

Hoeveel publieke steun is er voor kernenergie in Nederland, en wat verklaart de verschillen in individuele meningen hierover? Uit een onderzoek naar de publieke acceptatie van de energietransitie in de provincie Groningen kwam kernenergie als minst acceptabele van de mogelijke toekomstige niet-fossiele energiebronnen naar voren. Internationale studies tonen ook aan dat de publieke acceptatie van kernenergie over het algemeen hoger is dan die van fossiele brandstoffen, maar lager dan die van hernieuwbare energiebronnen. Publieke acceptatie is echter een dynamisch concept, wat een longitudinale monitor vereist, ten minste op nationaal niveau, om veranderingen in de publieke acceptatie van kernenergie in de loop van de tijd te volgen.

Bovendien kunnen de meningen over kernenergie sterk uiteenlopen, met grote verschillen tussen voor- en tegenstanders. Er is onderzoek nodig om de drijvende krachten achter dergelijke individuele en groepsverschillen beter te begrijpen, inclusief de normen en waarden van mensen, de perceptie van klimaatverandering, de veronderstelde kosten, risico's en voordelen van kernenergie, en de nabijheid van kerncentrales, naast andere factoren. Er zijn aanwijzingen dat mensen die relatief dicht bij kerncentrales wonen kernenergie positiever beoordelen dan mensen die verder weg wonen.

De redenen voor dergelijke verschillen worden echter niet goed begrepen. Factoren zouden kunnen zijn: herwaardering van kosten, risico's en voordelen (bv. lokale werkgelegenheid), gewenning aan de aanwezigheid van de centrale of cognitieve dissonantie (bv. mogelijke risico's negeren omdat weggaan geen optie is). Deze inzichten zijn beperkt, omdat er geen systematisch onderzoek is gedaan naar verschillen in meningen tussen het lokale en het algemene publiek, noch is er onderzoek gedaan naar de lokale acceptatie van kerncentrales van voor tot na de bouw ervan.

## Ons perspectief

We zijn van plan een publieke opiniepeilingsmonitor op te zetten om de houding ten opzichte van kernenergie in de loop van de tijd te volgen. Deze monitor zal een representatieve steekproef van de Nederlandse bevolking omvatten, die verschillende sociaaldemografische groepen omvat. Belangrijk is dat zowel het algemene publiek als lokale gemeenschappen die in de buurt wonen van bestaande kerncentrales en locaties waar nieuwe centrales gepland zijn (bijv. Borssele) in de monitor worden opgenomen. De huidige Nederlandse context, met plannen om nieuwe kerncentrales te bouwen, biedt een unieke kans om de lokale perceptie van kernenergie te onderzoeken. De monitor bestudeert en vergelijkt publieke opinies tussen de algemene en de lokale bevolking, en traceert lokale opinies van voor tot tijdens en na de bouw van nieuwe kerncentrales, als deze plannen doorgaan.

# Ethiek van het gebruik van kernenergie

Simon Friederich



## Stand van zaken

Het gebruik van kernenergie is lange tijd een van de meest bediscussieerde onderwerpen binnen de ethiek van de technologie geweest. Vroeger was men het er vrijwel over eens dat kernenergie vanuit ethisch oogpunt problematisch was. De risico's van nucleaire ongelukken, de verantwoordelijkheid voor toekomstige generaties met betrekking tot het opruimen van nucleair afval en de uitdagingen die voortvloeien uit nucleaire proliferatie waren bijzonder prominent in de argumenten voor deze consensus. Meer recentelijk is deze consensus echter onder druk komen te staan door verschillende factoren: de erkenning van klimaatverandering als een wereldwijd catastrofaal risico, de milieuvoordelen van

kernenergie ten opzichte van andere technologieën voor energieopwekking, en de verwachting dat kernenergie de totale kosten van het koolstofvrij maken van het energiesysteem kan verlagen.

Sommigen beweren zelfs dat een groter gebruik van kernenergie een ethische verplichting is voor politieke actoren in ontwikkelde landen die zich inzetten voor een snelle en vergaande vermindering van de koolstofuitstoot.

## Uitdagingen en kansen

Bij het besluit om opnieuw te investeren in kernenergie in Nederland moeten tal van ethische kwesties grondig worden beoordeeld. Deze zijn onder andere:

- In welke mate moet het gebruik van kernenergie – en de langetermijnverbintenis daaraan – breed worden ondersteund door de bevolking, vooral in gemeenschappen waar een kerncentrale komt, om ethisch acceptabel te zijn?
- Hoe moet opwerking van verbruikte splijtstof worden beoordeeld vanuit een ethisch standpunt, gezien het potentieel ervan om de uitdaging van radioactief afval te verminderen, hoewel het mogelijk de complexiteit van het non-proliferatieregime vergroot?
- Hoe moet de afweging tussen bescherming tegen mogelijke of hypothetische stralingsschade en de opwekking van koolstofvrije kernenergie ethisch worden benaderd?
- Is het ethisch toelaatbaar – of zelfs verplicht – om de regelgevingslast voor het gebruik van kernenergie te verminderen als dit de beperking van klimaatverandering vergemakkelijkt?

## Ons perspectief

We kiezen voor een pluralistische benadering en belichten deze vragen vanuit verschillende normatieve invalshoeken. We kijken naar consequentialistische/utilitaire perspectieven, zoals welke ontwikkelingsstrategieën voor energiesystemen de beste vooruitzichten bieden om de algemene voordelen te optimaliseren en de economische, milieu- en klimaatveranderingsgerelateerde schade te minimaliseren. We kijken ook naar deontologische perspectieven die zich baseren op meer categorische 'doe geen kwaad'-normen. Het in overweging nemen van deze verschillende normatieve perspectieven is belangrijk, omdat er legitieme meningsverschillen kunnen bestaan over de vraag of snelle reducties in koolstofuitstoot de meest urgente ethische noodzaak zijn of dat het belangrijker is om bij te dragen aan het wereldwijd toegankelijker en betaalbaarder maken van koolstofvrije technologieën.