

Expertoordeel onderbouwing beoordelingsdrempel bij project-specifieke berekeningen van stikstofdeposities

Arthur Petersen

28 augustus 2024 (oorspronkelijke tekst: 22 juli 2023; updates in grijs)

Samenvatting

Bij gebruik van een model voor een bepaald (beleids)doel moet eerst worden bepaald wat het **wetenschappelijke toepassingsbereik** is van een model. Het toepassingsbereik geeft aan waar het model betrouwbare uitspraken kan doen (gegeven het doel waarvoor de rekenresultaten worden gebruikt). **Als de resultaten te onzeker zijn (er is sprake is van 'schijnzekerheid'), dan is het model onvoldoende betrouwbaar (niet geldig) voor gebruik.** Er zit altijd een begrenzing aan een model. In de context van depositiemodellering van individuele bronnen is de grens waaronder resultaten onvoldoende betrouwbaar zijn (in de zin van een depositie die niet voldoende zeker van nul is te onderscheiden), niet eenduidig te bepalen – op basis van de best beschikbare wetenschappelijke kennis, rekening houdend met meetonzekerheid, kan echter worden beargumenteerd dat deze ligt tussen ongeveer 1 en 35 mol/ha/jaar. **Rekenresultaten lager dan 1–35 mol/ha/jaar zijn wetenschappelijk gezien onvoldoende betrouwbaar voor gebruik in besluitvorming (de modelsystematiek is dan niet doelgeschikt).** Theoretische en empirische overwegingen, de overeenstemming met andere modellen en peer consensus laten geen beleidsruimte toe – vanwege schijnzekerheid – om wetenschappelijk stikstofdeposities van individuele bronnen te berekenen en daar effecten aan toe te dichtten waar de depositie lager is dan 1–35 mol/ha/jaar. De huidige beoordelingsdrempel in Nederland van 0,005 mol/ha/jaar kan daarom wetenschappelijk, juridisch en beleidsmatig geen standhouden; de nieuw te kiezen beoordelingsdrempel moet ten minste 200 keer hoger liggen. Voor welke beoordelingsdrempel tussen 1 en 35 mol/ha/jaar uiteindelijk wordt gekozen is niet aan de wetenschap, omdat hier geen dwingend antwoord is te geven en ook niet-wetenschappelijke factoren zoals het voorzorgsbeginsel een rol spelen. Op welke manier dit voorzorgsbeginsel wordt ingevuld, is geen vraag die alleen door de wetenschap kan worden beantwoord. Wel is de beleidsruimte beperkt tot de wetenschappelijk onderbouwde bandbreedte van 1–35 mol/ha/jaar. In Duitsland is op basis van het voorzorgsbeginsel gekozen voor een beoordelingsdrempel van 21 mol/ha/jaar (ruim 4,000 keer hoger dan de huidige beoordelingsdrempel in Nederland). Nederland zou dit kunnen volgen, maar wetenschappelijk gezien zijn hogere of lagere beoordelingsdrempels ook mogelijk (mits gekozen binnen de onderbouwde bandbreedte). Zo zou uit voorzorg – in combinatie met wetenschappelijke argumenten die zijn aangescherpt t.o.v. de Duitse – een beoordelingsdrempel (ook 'rekenkundige ondergrens' genoemd) van 1 mol/ha/jaar kunnen worden vastgesteld. Voor deposities van 1 mol/ha/jaar of hoger geldt immers: (i) er bestaat wetenschappelijk gezien een voldoende grote kans dat de berekende depositie is te onderscheiden van nul (niet te veel kans op schijnzekerheid in dit opzicht) en (ii) deze depositie kan mogelijk leiden tot ecologisch significante gevolgen. Omdat bij deposities onder 1 mol/ha/jaar niet wordt voldaan aan de eerste voorwaarde, hoeft niet in het kader van voorzorg bepaald te worden of bij zulke kleine effecten ecologisch significante gevolgen kunnen worden uitgesloten. Als additioneel argument tegen het maken van een keuze uit voorzorg voor een rekenkundige ondergrens die wetenschappelijk gezien te laag is, voeg ik hieraan toe dat voor deposities onder 1 mol/ha/jaar naar mijn oordeel ook de tweede voorwaarde niet geldt; dit valt kwalitatief te onderbouwen met de volgende formule uit de wetenschap van de risicoanalyse: 'een kleine kans maal een klein effect geeft een verwaarloosbaar risico'.

Inleiding

Mij is gevraagd om een onafhankelijk expertoordeel over de wijze waarop de beoordelingsdrempel van 0,005 mol/ha/jaar bij project-specifieke berekeningen van stikstofdeposities is onderbouwd.¹ Allereerst moet ik hierbij aangeven dat hoewel mijn brede wetenschappelijke achtergrond ook grenslaagmeteorologie, atmosferische chemie en (grootschalige) verspreidingsmodellering omvat, de gevraagde expertise van mijn zijde hier vooral wetenschapsmethodologisch van aard is.² Uiteraard helpt mijn natuurwetenschappelijke achtergrond wel bij de inhoudelijke beoordeling van de discussie over de beoordelingsdrempel.

In mijn expertoordeel over de onderbouwing van de beoordelingsdrempel bij project-specifieke berekeningen van stikstofdeposities zal ik op zo transparant mogelijke wijze:

1. Reflecteren op het belang van het afbakenen van het toepassingsbereik van wetenschappelijke modellen, **in het bijzonder wanneer die worden ingezet in de besluitvorming**. Ik plaats dit in de context van het verantwoord omgaan met onzekerheden zoals dat is gecodificeerd in de **Leidraad voor Omgaan met Onzekerheden**.
2. **Oordelen over de onderbouwing van het hanteren van een beoordelingsdrempel van 0,005 mol/ha/jaar bij project-specifieke berekeningen van stikstofdeposities**.
3. (Beknopt) reageren op de punten over ‘cumulatie’ en ‘voorzorg’ die door de Commissie Hordijk en TNO zijn ingebracht, in het licht van 1 en 2.

1. Leidraad voor Omgaan met Onzekerheden: Toepassingsbereik van wetenschappelijke modellen

Een goed startpunt voor de discussie over hoe om te gaan met onzekerheid op de interface tussen wetenschap en besluitvorming (in het kader van beleid of vergunningverlening – en met een focus op het toepassingsbereik van wetenschappelijke modellen) kan worden gevonden in de oorspronkelijk in 2003 gepubliceerde *Leidraad voor Omgaan met Onzekerheden* (Petersen et al. 2003; Janssen et al. 2003; Petersen et al. 2013/2014) en in het rapport *Omgaan met Onzekerheid in Beleid* (Mathijssen et al. 2007). **Deze documenten representeren de state-of-the-art op het gebied van omgaan met onzekerheden in wetenschap en beleid**. De Leidraad voor Omgaan met Onzekerheden is ontwikkeld voor gebruik door wetenschappers in het milieudomein,³ in Nederland en daarbuiten.⁴ De Group of Chief Scientific Advisors van het Scientific Advice Mechanism van de Europese Commissie heeft de aanpak van de Leidraad expliciet aanbevolen voor breed gebruik in besluitvorming gebaseerd op wetenschappelijke input (Europese Commissie 2019, 46–49).

¹ Dit onafhankelijke expertoordeel over de onderbouwing van de beoordelingsdrempel is geschreven in opdracht van De Nieuwe Denktank en is een variatie op een eerder onafhankelijk expertoordeel (Petersen 2022), dat was geschreven in opdracht van het Ministerie van Verkeer en Waterstaat over de onderbouwing van de maximale rekenafstand. Het huidige expertoordeel verloopt analoog aan mijn eerdere expertoordeel (en paragraaf 1 is grotendeels identiek) – de redenering is immers dezelfde: wetenschappelijk, juridisch en beleidsmatig gezien is er in dit dossier geen beleidsruimte voor rekenen met schijnzekerheid.

² Ik heb geen bemoeienis gehad in mijn loopbaan met de ontwikkeling van de hier ter discussie staande modellen (vooral omdat deze modellen niet bij het Planbureau voor de Leefomgeving in beheer zijn).

³ De Leidraad voor Omgaan met Onzekerheden is breder toepasbaar dan alleen in het milieudomein.

⁴ De eerste fase van ontwikkeling vond plaats in het RIVM en doorontwikkeling vond later plaats in het PBL.

In de op wetenschappers gerichte Leidraad voor Omgaan met Onzekerheden wordt in het bijzonder aandacht besteed aan de volgende zes belangrijke punten:

1. Hoe geef je je probleem weer en hoe baken je het af (probleemframing)?
2. Wie betrek je bij de studie van het probleem, en in welke vorm en mate?
3. Wat zijn de centrale aspecten van het te bestuderen probleem?
4. Zijn de beschikbare kennis en methoden toereikend voor een goede analyse?
5. Wat zijn de onzekerheden die ertoe doen?
6. Hoe communiceer je over deze onzekerheden?

Al deze punten zijn van belang voor de wetenschappers die in de context van beleid of vergunningverlening modellen ontwikkelen en berekeningen doen met hun modellen, om op basis van deze modellen betrouwbare uitspraken te kunnen bereiken.⁵ Voor beleidsmakers en andere besluitvormers is er geen algemene 'leidraad' beschikbaar, terwijl daar wel behoefte aan is:

Beleidsmakers worden geconfronteerd met een dilemma: enerzijds wordt van hen verlangd dat zij beslissingen baseren op duidelijke, meetbare feiten, terwijl zij anderzijds worden geconfronteerd met ontwikkelingen die door variabele en onvoorspelbare processen onzekerheid met zich meebrengen. (Mathijssen et al. 2007, 9)

De verwachting was dat de uitwisseling van ervaringen en best practices [in de conferentie 'Omgaan met Onzekerheid in Beleid' van 16 en 17 mei 2006] een soort leidraad zou opleveren voor het omgaan met onzekerheid in beleid. Dat bleek te hoog gegrepen, door de complexiteit van het vraagstuk en door de grote diversiteit in beleidsomgeving, beleidsvragen, typen onzekerheden en ervaringen. (Don 2007, 5)

Uiteraard ontslaat de complexiteit van besluitvorming besluitvormers en andere betrokkenen niet van de plicht zich goed te vergewissen van in het bijzonder het toepassingsbereik van gebruikte modellen. Zij zouden moeten stimuleren dat wetenschappers verantwoord omgaan met onzekerheid in de context van besluitvorming. Een van die verantwoordelijkheden is het niet (laten) baseren van besluiten op resultaten die volgens de betrokken wetenschappers té onzeker zijn (waar die grens ligt, daar gaat de discussie nu precies over, zie de volgende paragraaf).

Er zijn verschillende voorbeelden te noemen van wetenschappers en adviseurs die hebben bijgedragen aan onverantwoord omgaan met onzekerheden, door bijvoorbeeld quasi-zekerheden ('schijnzekerheden') te bieden, niet-kwantificeerbare onzekerheden te kwantificeren, puntschattingen te geven in plaats van bandbreedtes, te geloven in de eigen modellen en analyses en kennis zomaar toe te passen buiten het gevalideerde toepassingsbereik (Petersen en Van Asselt 2007, 67). Vanuit wetenschappelijk oogpunt dient hierin verandering te komen.

⁵ 'Betrouwbaarheid' heeft drie dimensies: (1) statistische betrouwbaarheid ('betrouwbareheidsintervallen'), (2) methodologische betrouwbaarheid en (3) publieke betrouwbaarheid (Smith en Petersen 2014, 142–47). Elk van deze drie dimensies speelt een rol in publieke discussies over 'de' betrouwbaarheid van modellen voor beleid of vergunningverlening. Ik ga onder nader in op de methodologische betrouwbaarheid.

ONZEKERHEIDSMATRIX		Onzekerheidsgraad <i>(van zeker weten, via waarschijnlijk en mogelijk naar niet-weten)</i>			Onzekerheidsaard		Kwalificatie kennisbasis (onderbouwing)			Waarden-geladenheid van keuzes		
Locatie ↓		Statistische onzekerheid (range+kans)	Scenario-onzekerheid (range als 'what-if' optie)	Erkende onwetendheid	Kennis-gerelateerde onzekerheid	Variabiliteit-gerelateerde onzekerheid	Zwak —	Redelijk 0	Sterk +	Gering —	Midden 0	Groot +
Context	Ecologische, Technologische, economische, sociale en politieke representatie											
Expert-beschouwing	Narratives; storylines; adviezen											
Model	Model-structuur	Relaties										
	Technisch model	Software & hardware-implementatie										
	Model-parameters											
	Model inputs	Input data; driving forces; input scenarios										
Data (in algem. zin)	Metingen; monitoring data; survey data											
Outputs	Indicatoren; uitspraken											

Tabel 1. Onzekerheidsmatrix (Janssen et al. 2003, 18; Petersen 2007, 17; Petersen et al. 2014, 27). Zie Petersen et al. (2014, 29–32) voor een beknopte uitleg van alle dimensies in de onzekerheidsmatrix en Petersen ([2006] 2012) voor een filosofische uitdieping.

De **Leidraad voor Omgaan met Onzekerheden** is bedoeld als 'tegengif' voor deze neiging van veel wetenschappers (waar zij overigens vooral aan toegeven onder druk van besluitvormers)⁶ en **vormt daarmee de basis om zorgvuldig met onzekerheden om te gaan in besluitvormingsgericht wetenschappelijk onderzoek** (Petersen et al. 2014, 6). Het is niet alleen voor het wetenschappelijk onderzoek zelf van belang om te weten waar onzekerheden zijn gelokaliseerd (bij modelstudies bijvoorbeeld in de 'modelstructuur', de 'modelparameters', de 'model inputs' of het 'technische model', zie tabel 1). Op de interface tussen wetenschap en besluitvorming gaat het vervolgens vooral om de beoordeling van de impact van onzekerheden op specifieke modelresultaten en daarop gebaseerde conclusies (inclusief over het toepassingsbereik van de modellen in de specifieke besluitvormingscontext). En daarom is het van belang om een beeld te hebben van de betrouwbaarheid van een model *voor een bepaald doel* (zie ook Smith en Petersen 2014, 137). En daaraan nog voorafgaand: 'Bij het bouwen van het model is het van belang de wensen van het beleid en de omstandigheden van het specifieke beleidsprobleem mee te nemen in de keuze van de modelcomponenten' (Hordijk 2007, 55).

De beoordeling van de methodologische betrouwbaarheid van een wetenschappelijk model betreft in Leidraad-terminologie het geven van een 'kwalificatie van de kennisbasis (onderbouwing)' (zie tabel 1). Hierbij gaat het om 'de mate waarin gegeven resultaten/ uitspraken onderbouwd zijn' (Petersen et al. 2014, 32). Als de kwalitatieve classificatie 'zwak' wordt gegeven, dan is dat een aanwijzing 'dat de betreffende uitspraak met veel (kennis)onzeker-

⁶ Angst om ergens voor verantwoordelijk te worden gehouden kan ook een rol spelen. Wetenschappers hebben echter een maatschappelijke verantwoordelijkheid om te volgen wat er met hun resultaten wordt gedaan, om daarover te adviseren en om te waarschuwen voor verkeerd gebruik.

heid omgeven is, en nadere aandacht verdient' (Petersen et al. 2014, 32).⁷ Voor het bepalen van de kwalificatie van de kennisbasis 'kunnen bijv. criteria als empirische, theoretische en methodische onderbouwing en/of acceptatie en draagvlak binnen/buiten de peer community gebruikt worden' (Petersen et al. 2014, 32). Hierbij kan een zogenaamde 'pedigree-analyse' worden gebruikt:

Pedigree-analyse is een analyse die de 'sterkte' of wetenschappelijke status van een getal evalueert. Letterlijk betekent pedigree 'stamboom', 'herkomst' of 'komaf': wat is de herkomst van dit getal, is het van goede komaf? Daarbij wordt gekeken naar twee aspecten: hoe komt een getal (in een conclusie) tot stand en wat is de wetenschappelijke status van het getal, op welke wijze is het onderbouwd?

Criteria die in de pedigree-analyse gebruikt kunnen worden om een model te evalueren zijn 'proxy' (mate van directheid van de gebruikte indicator), 'kwaliteit en kwantiteit van onderliggende empirie', 'theoretische onderbouwing', 'representatie van de onderliggende causale mechanismen van het systeem', 'plausibiliteit' en 'mate van consensus'. (Van der Sluijs 2007, 26)

Bij de bepaling of een model 'goed genoeg' is voor een bepaald doel spelen uiteraard ook pragmatische keuzes een rol (er moet bijvoorbeeld doelmatig gebruik worden gemaakt van het budget en de tijd die beschikbaar zijn). In termen van de 'onzekerheidsmatrix' kan dit worden gezien als een van de dimensies van de waardengeladenheid van keuzes met betrekking tot het model.⁸

Bij de modelberekeningen voor stikstofdepositie ten gevolge van individuele projecten is er al snel sprake van schijnzekerheid. In het vervolg van dit expertoordeel richt ik mijn aandacht op de hoofdvraag die voorligt, namelijk of het berekenen van stikstofdepositie met beoordelingsdrempel van 0,005 mol/ha/jaar in het kader van vergunningverlening voor individuele projecten tot schijnzekerheid leidt en niet doelgeschikt is.

2. Oordeel over de onderbouwing van het hanteren van een beoordelingsdrempel van 0,005 mol/ha/jaar bij project-specifieke berekeningen van stikstofdeposities

De Commissie Hordijk (het Adviescollege Meten en Berekenen Stikstof) bracht op 15 juni 2020 haar eindrapport uit (*Meer Meten, Robuuster Rekenen*). In de samenvatting wordt ingegaan op de betrouwbaarheid van depositiemodellering en geeft de commissie aan

dat het rekeninstrument AERIUS Calculator niet doelgeschikt is. Daarvoor zijn twee redenen: 1. de onbalans tussen het detail dat het beleid vraagt en de mate van wetenschappelijke onzekerheid in het berekenen van de depositie op een klein oppervlak en 2. de ongelijke behandeling van verschillende sectoren door het gebruik van verschillende modellen (SRM-2, OPS) bij de vergunningverlening. (Adviescollege Meten en Berekenen Stikstof 2020, 4)

⁷ De Leidraad benadrukt dat de kwalificatie van de kennisbasis altijd wordt gegeven in de context van het doel van het gebruik van de kennis en dus nooit over een model los van de context.

⁸ De volgende dimensies van 'waardengeladenheid van keuzes' kunnen worden onderscheiden: algemene epistemische waarden, discipline-gebonden epistemische waarden, socio-culturele waarden en praktische waarden (Petersen 2006, 50; 2012, 51).

In de conclusies van het rapport wordt dit verder gespecificeerd:

In het oordeel over AERIUS-berekeningen voor vergunningverlening spelen twee overwegingen een rol. In de eerste plaats is de betrouwbaarheid van de voorspelling door het hanteren van een zeer lage beoordelingsdrempel onvoldoende en leidt deze aanpak tot schijnzekerheid. AERIUS Calculator (hierna kortweg AERIUS) berekent op basis van emissies van een project kleine bijdragen aan concentraties en depositie. De onzekerheid van die extra depositie op Natura 2000-gebieden is bij de gehanteerde ruimtelijke schaal (hexagonen ter grootte van een hectare) vele malen hoger dan de beoordelingsdrempel. De wetenschap kan hier niet bieden wat het beleid vraagt.

Een tweede overweging is dat het niet verdedigbaar is dat in AERIUS bij vergunningverlening voor de aanleg van een weg een ander rekensysteem (SRM-2) wordt gehanteerd dan voor de aanleg van een stal (OPS), waarbij ook de depositie van stikstofoxiden verder dan vijf km van de bron niet wordt meegerekend. (Adviescollege Meten en Berekenen Stikstof 2020, 9)

Een manier die de Commissie Hordijk adviseerde om de modellen meer doelgeschikt te maken voor de vergunningverlening, namelijk de depositie niet op een hexagoon maar op een cluster van hexagonen, ingedeeld naar habitatype, te berekenen – wat de schijnzekerheid in depositieberekeningen op grote afstand van de bron zou verminderen –, is door de overheid niet gevolgd. Wel is door de overheid een andere manier gekozen in 2021 – het hanteren van een uniforme maximale rekenafstand (van 25 km, dus vijfmaal groter dan de 5 km die daarvoor voor wegverkeer werd gehanteerd) – om de modellen meer doelgeschikt te maken door onbetrouwbare berekeningen op hexagonniveau voorbij die rekenafstand te voorkomen.⁹ Het hanteren van een maximale rekenafstand, terwijl binnen de 25 km nog steeds op hexagonniveau wordt gerekend, lost een deel van het probleem rond schijnzekerheid op. Maar het probleem van schijnzekerheid gekoppeld aan het gebruik van een beoordelingsdrempel van 0,005 mol/ha/jaar is hiermee nog niet opgelost. Ik deel het oordeel van de Commissie Hordijk dat op dit punt de huidige systematiek niet *fit for purpose* is. De beoordelingsdrempel van 0,005 mol/ha/jaar betreft een door RIVM-experts gemaakte pragmatische, computertechnische keuze zonder wetenschappelijke betekenis.

Uit de door mij voorgezeten audit van het RIVM (Auditcommissie RIVM Centrum Milieukwaliteit 2024) concludeer ik dat het RIVM eigener beweging stevig duidelijk had moeten maken, liefst voor maar zeker na de Commissie Hordijk (2020), dat AERIUS Calculator niet doelgeschikt is voor het huidige gebruik in de vergunningverlening (met projectspecifieke berekeningen op het niveau van 1 ha). De onzekerheid is in veel gevallen eigenlijk te groot voor dat gebruik; de auditcommissie waarschuwde expliciet tegen zulk verkeerd gebruik (*mis-use*) van modellen. Op het specifieke punt van de beoordelingsdrempel (ook ‘rekenkundige ondergrens’ genoemd): in 2019 had het RIVM duidelijk aan moeten geven dat het wetenschappelijk niet verantwoord was om geen op onzekerheden gebaseerde rekenkundige ondergrens te hanteren (wat het geval was, omdat de rekenkundige ondergrens van 0,005 mol/ha/jaar er alleen was om computertechnische redenen en zo dicht mogelijk bij nul was gekozen), had het moeten communiceren dat de kans dat een berekende depositie van nul is te onderscheiden wel erg klein wordt onder een bepaalde grens en had het zelf meer onderzoek moeten doen naar hoe hoog zo’n rekenkundige ondergrens dan zou moe-

⁹ Beide manieren om de modellen meer doelgeschikt te maken, sluiten elkaar niet uit en zijn te combineren (d.w.z. rekenen met clusters van hexagonen binnen de afstandsgrens).

ten zijn. Daarbij had breed en naast kwantitatief ook kwalitatief naar onzekerheden gekeken moeten worden, leidend tot een expertoordeel waarin ook onzekerheden in metingen worden betrokken (zoals gebeurt in de TNO-rapporten en het onderhavige expertoordeel). De auditcommissie stelde tenslotte dat het RIVM er nog steeds naar moet streven om in samenwerking met anderen helderheid te verkrijgen over de rekenkundige ondergrens (ook om dit verkeerde gebruik van het model te voorkomen nadat het model naar een andere organisatie is verschoven). Ik suggereer dat daarbij ook advies moet worden gegeven over de toepassing van het **voorzorgsbeginsel** in de keuze van de rekenkundige ondergrens, **waarbij bijzondere aandacht wordt besteed aan ecologische impact in een breder risicokader** (zie het eind van deze paragraaf).

Ik zal onder nader ingaan op de onderbouwing die door TNO is gegeven voor het afbakenen van het toepassingsbereik van het model dat wordt gebruikt voor project-specifieke berekeningen door het gebruik van een veel hogere beoordelingsdrempel (in het licht van wat over methodologische betrouwbaarheid wordt gezegd in de wetenschap en wat daarover is gekristalliseerd in de Leidraad voor Omgaan met Onzekerheden). Maar eerst moet nog het mogelijk bewuste gebruik van schijnzekerheid in het kader van het voorzorgsprincipe onder ogen worden gezien, wat wetenschappelijk onwenselijk is en daarom juridisch en beleidsmatig geen stand kan houden (zie ook paragraaf 3). De Commissie Hordijk belicht dit issue als volgt voor de keuze van de beoordelingsdrempel ('grenswaarde') van 0,005 mol/ha/jaar:

Het voorzorgsprincipe vraagt vooralsnog om een strikte grenswaarde bij vergunningverlening. Een ambitieus bronbeleid met vastgelegde nationale doelstellingen heeft als voordeel dat de grenswaarden bij de vergunningverlening verhoogd zouden kunnen worden zodat de onzekerheden in de berekeningen voor de vergunningen minder kritisch worden en schijnzekerheid minder prominent wordt. (Adviescollege Meten en Berekenen Stikstof 2020, 10)

Een spanning in het bovenstaand citaat is dat het begrenzen van schijnzekerheden – bijvoorbeeld door het verhogen van de beoordelingsdrempel (grenswaarde) – wetenschappelijk gezien veruit de voorkeur heeft. Dat dit wetenschappelijk gezien noodzakelijke begrenzen toch niet altijd gebeurt (en er toch met schijnzekerheden wordt gerekend), heeft onder andere te maken met de waardengeladenheid van keuzes die door de experts worden gemaakt.¹⁰ Modellers kunnen ervoor kiezen om schijnzekerheden te accepteren vanuit een veronderstelling (die overigens niet altijd feitelijk terecht is in termen van het effect)¹¹ dat dit nodig is vanwege een 'voorzorgsprincipe'. Hier vermengen zich echter epistemische en niet-epistemische waarden op een niet transparante wijze in de modelsystematiek en vanuit wetenschappelijk oogpunt verdient het de voorkeur om epistemische waarden te laten prevaleren in de beoordeling van doelgeschiktheid van modellen.

In de wetenschapspraktijk zijn er normen voor het bepalen van de betrouwbaarheid van kennis. In de Leidraad voor Omgaan met Onzekerheden zijn die normen gekristalliseerd in de verschillende dimensies die (parallel) van belang zijn bij het bepalen van de kwalificatie van de kennisbasis (zie de vorige paragraaf). De dimensies van methodologische betrouwbaarheid zijn als volgt te groeperen: (i) de theoretische basis, (ii) de empirische basis,

¹⁰ Zie de onzekerheidsmatrix (in tabel 1) en voetnoot 8.

¹¹ Besluiten die op basis van schijnzekerheden worden genomen, hoeven niet het (negatieve of positieve) effect te hebben dat wordt gemodelleerd.

(iii) de overeenstemming tussen verschillende modellen en (iv) peer consensus (Petersen 2006, 57–62; 2012, 58–62). Het rapport van TNO (2022) volgend valt de wetenschappelijke onderbouwing van een **beoordelingsdrempel van 0,005 mol/ha/jaar versus een beoordelingsdrempel van 1–35 mol/ha/jaar kort samen te vatten langs deze vier dimensies:**

- *Theoretische basis:* De beoordelingsdrempel van **0,005 mol/ha/jaar heeft geen basis in enige wetenschappelijke theorie**. Vanuit wetenschappelijk oogpunt is het theoretisch relevant om de beoordelingsdrempel af te leiden uit fysische, chemische en biologische overwegingen. TNO (2024) laat echter zien dat er geen theoretische noodzaak is in de modelwetenschap om berekeningen af te bakenen bij lage depositiebijdragen.
- *Empirische basis:* De beoordelingsdrempel van **0,005 mol/ha/jaar heeft geen empirische basis**. Vergelijking tussen berekende en gemeten concentraties van stoffen in een validatie-experiment voor een enkele bron levert een ‘ruis’ op in de berekende depositie van 6–12 mol/ha/jaar. **De kleinste meetbare hoeveelheden NO_x and NH₃ (respectievelijk 0,4 en 0,1 µg/m³) leveren een schatting op van een kleinste te bepalen stikstofdepositie van 35 mol/ha/jaar**. Ook valt uit de precisie waarmee KDW-waarden zijn gegeven (0,1 kg/ha/jaar) een ‘ruisniveau’ af te leiden; **depositiewaarden kleiner dan deze 0,1 kg ofwel 7 mol/ha/jaar vallen binnen deze ruis**. TNO (2024) laat het laatste argument (gebaseerd op de precisie van de KDW-waarden) buiten beschouwing – vanwege de gekozen scope van het rapport – en beargumenteert op basis van vergelijkingen met metingen dat de **onzekerheid in de totale berekende depositie grofweg tussen 10 en 100 mol/ha/jaar ligt**, waarbij de hogere waarden afgeleid zijn uit de landelijke meetcorrectie (niet meegenomen in TNO 2022). Als je de rekenkundige ondergrens ver genoeg onder de in TNO (2024) genoemde bandbreedte van 10–100 mol/ha/jaar vaststelt – en dat is naar mijn oordeel het geval bij een factor 10 onder de onderkant van de bandbreedte, **dus bij 1 mol/ha/jaar – dan kun je stellen dat je het model daaronder beslist niet meer mag gebruiken bij projectspecifieke berekeningen, omdat de kans dat de berekende depositie dan is te onderscheiden van nul, te klein is geworden**: je zult op nul af moeten rondren. Dus ondanks dat het lastig is om vanuit de modelwetenschap eenduidig tot een rekenkundige ondergrens te komen, zoals het rapport aangeeft, kan wel worden gesteld dat **de ondergrens niet nóg een orde van grootte lager dan 1 mol/ha/jaar mag liggen, want dan kom je ver in het gebied van de schijnzekerheid terecht**. Preciezer dan in ordes van grootte kan overigens nooit bepaald worden wat de rekenkundige ondergrens zou moeten zijn; **1 mol/ha/jaar is een veilige keuze**.
- *Overeenstemming tussen verschillende (versies van) modellen:* **De beoordelingsdrempel van 0,005 mol/ha/jaar wordt niet gebruikt in buitenlandse modellen** (zie onder ‘peer consensus’ wat er in het buitenland wordt gebruikt). Met verschillende versies van het AERIUS-modelinstrumentarium valt de ‘ruis’ te bepalen in de totale achtergronddepositie. **Het gebruik van verschillende basisgegevens met betrekking tot meteorologische gegevens en gegevens over landgebruik leidt tot een ruis tussen 1 en 10 mol/ha/jaar**.
- *Peer consensus:* **Alle betrokken experts zijn het erover eens dat de beoordelingsdrempel van 0,005 mol/ha/jaar geen wetenschappelijk onderbouwde beoordelingsdrempel is**. Dit geldt ook voor de experts in de Commissie Hordijk en bij TNO. Verder geeft TNO (2022) de oordelen van buitenlandse experts weer: in het Verenigd

Koninkrijk wordt een **beoordelingsdrempel van 1% van de KDW gebruikt** (bij een variatie van de KDW tussen ongeveer 500 en 2,000 mol/ha/jaar ligt deze beoordelingsdrempel dus tussen de 5 en 20 mol/ha/jaar), **in Vlaanderen werd een beoordelingsdrempel gehanteerd van 21 mol/ha/jaar**, in Denemarken wordt depositie afgerond op hele kg/ha/jaar (onder 0,5 kg/ha/jaar ofwel 35 mol/ha/jaar wordt dus afgerond naar nul) geeft en in Duitsland is de drempelwaarde bepaald op basis van de kleinst meetbare hoeveelheden NO_x and NH₃ (overeenkomend met een stikstofdepositie van 35 mol/ha/jaar – uit voorzorg is de drempelwaarde op 21 mol/ha/jaar gezet, zie Balla et al. 2014).

Een beoordelingsdrempel van 0,005 mol/ha/jaar is daarom naar mijn oordeel niet wetenschappelijk te onderbouwen. Wetenschappelijk gezien zou de beoordelingsdrempel tussen 1 en 35 mol/ha/jaar moeten liggen. Het huidige modelinstrumentarium dat gebruikmaakt van een beoordelingsdrempel die minimaal 200 maal te laag is, is mijns inziens niet *fit for purpose*. Verder stelt TNO (2024) terecht aan de orde dat ook mét een rekenkundige ondergrens, berekeningen van zowel relatief kleine als relatief grote deposities op ha-niveau meer dan een factor 2 tot 3 onzeker kunnen zijn (dus: schijnzeker in de berekening van de grootte, zelfs als er voldoende kans bestaat dat de depositie van nul is te onderscheiden), wat het eerdere oordeel van de Commissies Hordijk (2020) en Petersen (2024) bevestigt dat AERIUS Calculator niet doelgeschikt is voor het huidige gebruik in de vergunningverlening.

Voor welke beoordelingsdrempel tussen 1 en 35 mol/ha/jaar uiteindelijk wordt gekozen is niet aan de wetenschap, omdat hier geen dwingend antwoord is te geven en ook niet-wetenschappelijke factoren zoals het voorzorgsbeginsel een rol spelen. Op welke manier dit voorzorgsbeginsel wordt ingevuld, is geen vraag die alleen door de wetenschap kan worden beantwoord. Wel kan worden gesteld dat de beleidsruimte zich beperkt tot de wetenschappelijk onderbouwde bandbreedte van 1–35 mol/ha/jaar, omdat een beoordelingsdrempel buiten deze bandbreedte op basis van bovengenoemde dimensies wetenschappelijk niet te verantwoorden is. **In Duitsland is op basis van het voorzorgsbeginsel gekozen voor een beoordelingsdrempel van 21 mol/ha/jaar (ruim 4,000 keer hoger dan de huidige beoordelingsdrempel in Nederland).** Nederland zou Duitsland kunnen volgen, maar wetenschappelijk gezien zijn hogere of lagere beoordelingsdrempels ook mogelijk (mits gekozen binnen de onderbouwde bandbreedte). Zo zou uit voorzorg – in combinatie met wetenschappelijke argumenten die zijn aangescherpt t.o.v. de Duitse, gebruikmakend van TNO (2022) en TNO (2024) – een rekenkundige ondergrens van 1 mol/ha/jaar kunnen worden vastgesteld. Voor deposities van 1 mol/ha/jaar of hoger geldt immers: (i) er bestaat wetenschappelijk gezien een voldoende grote kans dat de berekende depositie is te onderscheiden van nul (niet te veel kans op schijnzekerheid in dit opzicht) en (ii) deze depositie kan mogelijk leiden tot ecologisch significante gevolgen (of aan deze voorwaarden wordt voldaan moet worden vastgesteld aan de hand van expertoordelen). Omdat bij deposities onder 1 mol/ha/jaar niet wordt voldaan aan de eerste voorwaarde, hoeft niet in het kader van voorzorg bepaald te worden of bij zulke kleine effecten ecologisch significante gevolgen kunnen worden uitgesloten. Zulke kleine, op nul af te ronden, deposities mogen dan alleen als nul meegenomen worden in eventuele optellingen van de deposities van projecten in de context van vergunningverlening; voor het onderhavige project zelf is een cumulatietoets niet van toepassing omdat het project aan zo'n optelling geen bijdrage kan leveren (zie ook volgende paragraaf). Als additioneel argument tegen het vaststellen uit voorzorg van een rekenkundige onder-

grens die wetenschappelijk gezien te laag is, voeg ik hieraan toe dat voor deposities onder 1 mol/ha/jaar naar mijn oordeel ook de tweede voorwaarde niet geldt; dit valt kwalitatief te onderbouwen met de volgende formule uit de wetenschap van de risicoanalyse: ‘een kleine kans maal een klein effect geeft een verwaarloosbaar risico’. In de Leidraad Bepaling Significantie van het Steunpunt Natura 2000 wordt gemeld: ‘de *mate* van een effect en de *kans* waarmee het effect kan optreden moeten goed onderscheiden worden’ (2010, 25); er kan volgens de Leidraad naar ‘kans maal effect’ worden gekeken om te bepalen of er sprake is van mogelijke ecologisch significante gevolgen (bij kleine kans/groot effect of grote kans/klein effect) of – zo voeg ik toe voor deposities onder 1 mol/ha/jaar – dat het risico als verwaarloosbaar moet worden beschouwd (vanwege kleine kans/klein effect).

3. Reactie op Commissie Hordijk en TNO op punten over ‘cumulatie’ en ‘voorzorg’

In het licht van bovenstaande geef ik hier een beknopte reactie op enkele relevante punten die zijn gemaakt door de Commissie Hordijk (2020) en TNO (2022) over ‘cumulatie’ (het optellen van veel kleine bronnen onder de drempelwaarde tot een effect dat gezamenlijk een aanzienlijk effect kan hebben) en – in samenhang hiermee – ‘voorzorg’:

Commissie Hordijk: ‘De onzekerheid in de berekening is veel hoger dan de gestelde drempelwaarde. Voor een beleidstoepassing is deze praktijk desondanks nodig, om te voorkomen dat veel kleine extra emissies bij elkaar opgeteld tot een grote stijging van de depositie leiden. Een beoordelingsdrempel gebaseerd op de modelonzekerheden op lokale schaal is voor beleidstoepassingen niet werkbaar’ (Adviescollege Meten en Berekenen Stikstof 2020, 14). En, zoals reeds geciteerd in paragraaf 2: ‘Het voorzorgsprincipe vraagt vooralsnog om een strikte grenswaarde bij vergunningverlening. Een ambitieus bronbeleid met vastgelegde nationale doelstellingen heeft als voordeel dat de grenswaarden bij de vergunningverlening verhoogd zouden kunnen worden zodat de onzekerheden in de berekeningen voor de vergunningen minder kritisch worden en schijnzekerheid minder prominent wordt’ (Adviescollege Meten en Berekenen Stikstof 2020, 10).

TNO: Het is de vraag of bij het kiezen van een wetenschappelijk verantwoorde, hogere drempelwaarde het effect van cumulatie een rol mag spelen: ‘De bijdragen van alle projecten aan de depositie beneden de rekengrens worden toegevoegd aan de achtergrond. Hun bijdrage wordt dus niet onttrokken aan de schatting maar wordt meegenomen in de achtergrond’ (TNO 2022, 23). Toch kan volgens TNO van wetenschappelijke overwegingen worden afgeweken bij het vaststellen van een drempelwaarde: ‘Uiteraard kan het voorzorgsprincipe aanleiding vormen voor een beleidsmatige keuze voor een lagere waarde’ (TNO 2022, 28).

Reactie: Zoals beschreven in de vorige paragraaf, **laten theoretische en empirische overwegingen, de overeenstemming met andere modellen en peer consensus geen beleidsruimte toe – vanwege schijnzekerheid – om wetenschappelijk stikstofdeposities van individuele bronnen te berekenen en daar effecten aan toe te dichten waar de depositie lager is dan 1–35 mol/ha/jaar.** Het uit ‘voorzorg’ proberen te voorkomen van ‘cumulatie’ van lage deposities valt wetenschappelijk niet te onderbouwen in de context van het evalueren van de effecten van een individueel project – er kan immers geen effect worden toegeschreven aan dat individuele project. **Er is geen beleidsruimte om de beoordelingsdrempel toch lager te stellen. Het probleem van cumulatie vergt daarom juridisch een andere oplossing.** Ook de

Raad van State was hierover volstrekt duidelijk in de uitspraak van 5 april 2023 *ECLI:NL:RVS:2023:1299 (Tracébesluit A12/A15)*: **er mag alleen worden gekeken naar de individuele projectbijdrage en daarbij mag niet uit voorzorg met schijnzekerheid worden gerekend**. Het beheersen van het risico van cumulatie is een taak van de overheid in generiek beleid. In de uitspraak (onder 1.5) schrijft de Raad van State bijvoorbeeld: ‘De vraag of de bevoegde bestuursorganen met de juiste maatregelen en tijdig invulling geven aan de verplichting om instandhoudings- en passende maatregelen te treffen in relatie tot de totale depositiebijdrage in een Natura 2000-gebied is naar het oordeel van de Afdeling bij een besluit waarbij toestemming wordt verleend voor een plan of project niet aan de orde.’ Deze argumentatie geldt zowel voor schijnzekerheid door rekenen voorbij een maximale rekenafstand als voor schijnzekerheid door rekenen met een wetenschappelijk gezien te lage beoordelingsdrempel.

Referenties

- Adviescollege Meten en Berekenen Stikstof. 2020. *Meer Meten, Robuuster Rekenen*. [Leden: L. Hordijk, J.W. Erisman, H. Eskes, J.C. Hanekamp, M.C. Krol, P.F. Levelt, M. Schaap en W. de Vries]. Den Haag: Adviescollege Meten en Berekenen Stikstof. 15 juni 2020. <https://open.overheid.nl/repository/ronl-663f8b39-c4c3-4e21-a321-f14f8d103ba5/1/pdf/bijlage-adviescollege-meten-en-berekenen-stikstof.pdf>
- Auditcommissie RIVM Centrum Milieukwaliteit. 2024. *Scientific Audit RIVM Centre for Environmental Quality*. [Leden: A.C. Petersen, B.P. Loos, W. Halfman, A.A.M. Holtslag en A.P. van Wezel]. Bilthoven: RIVM, 21 juni 2024. <https://www.rivm.nl/sites/default/files/2024-06/MIL%20Scientific%20Audit%202023%20Final%20Report.pdf>
- Balla, Stefan, Dirk Bernotat, Jakob Frommer, Annick Garniel, Markus Geupel, Heike Hebbinghaus, Helmut Lorentz, Angela Schlutow en Rudolf Uhl. 2014. 'Stickstoffeinträge in der FFH-Verträglichkeitsprüfung: Critical Loads, Bagatellschwelle und Abschneidekriterium'. *Waldökologie, Landschaftsforschung und Naturschutz* 14: 43–56. https://www.afsv.de/images/download/literatur/waldoekologie-online/waldoekologie-online_heft-14-3.pdf
- Don, Henk. 2007. 'Voorwoord'. In *Omgaan met Onzekerheid in Beleid*, geredigeerd door Judith Mathijssen, Arthur Petersen, Paul Besseling, Adnan Rahman en Henk Don, 5. Den Haag: Centraal Planbureau, Bilthoven: Milieu- en Natuurplanbureau en Leiden: Rand Europe. <https://www.cpb.nl/sites/default/files/publicaties/download/omgaan-met-onzekerheid-beleid.pdf>
- Europese Commissie. 2019. *Scientific Advice to European Policy in a Complex World*. Brussel: Group of Chief Scientific Advisors, Scientific Advice Mechanism, Europese Commissie. <https://op.europa.eu/en-GB/publication-detail/-/publication/5cb9ca21-0500-11ea-8c1f-01aa75ed71a1/language-en>
- Hordijk, Leen. 2007. 'Casus V: Luchtkwaliteit'. In *Omgaan met Onzekerheid in Beleid*, geredigeerd door Judith Mathijssen, Arthur Petersen, Paul Besseling, Adnan Rahman en Henk Don, 52–55. Den Haag: Centraal Planbureau, Bilthoven: Milieu- en Natuurplanbureau en Leiden: Rand Europe. <https://www.cpb.nl/sites/default/files/publicaties/download/omgaan-met-onzekerheid-beleid.pdf>
- Janssen, Peter, Arthur Petersen, Jeroen van der Sluijs, James Risbey en Jerome Ravetz. 2003. *RIVM/MNP Leidraad voor Omgaan met Onzekerheden: Quickscan Hints & Acties-Lijst*. Bilthoven: Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu/Milieu- en Natuurplanbureau. https://www.rivm.nl/bibliotheek/digitaaldepot/Leidraad_QS_Hints&Acties-Lijst.pdf [Engelse versie: https://www.rivm.nl/bibliotheek/digitaaldepot/Guidance_QS-HA.pdf]
- Mathijssen, Judith, Arthur Petersen, Paul Besseling, Adnan Rahman en Henk Don, red. 2007. *Omgaan met Onzekerheid in Beleid*. Den Haag: Centraal Planbureau, Bilthoven: Milieu- en Natuurplanbureau en Leiden: Rand Europe. <https://www.cpb.nl/sites/default/files/publicaties/download/omgaan-met-onzekerheid-beleid.pdf>
- Petersen, Arthur. 2006. *Simulating Nature: A Philosophical Study of Computer-Model Uncertainties and Their Role in Climate Science and Policy Advice*. Apeldoorn/Antwerpen: Het Spinhuis. Proefschrift Vrije Universiteit, Amsterdam. <https://research.vu.nl/ws/portalfiles/portal/42175122/complete+dissertation.pdf>
- Petersen, Arthur. 2007. 'Omgaan met onzekerheid in beleid'. In *Omgaan met Onzekerheid in Beleid*, geredigeerd door Judith Mathijssen, Arthur Petersen, Paul Besseling, Adnan Rahman en Henk Don, 15–18. Den Haag: Centraal Planbureau, Bilthoven: Milieu- en Natuurplanbureau en Leiden: Rand Europe. <https://www.cpb.nl/sites/default/files/publicaties/download/omgaan-met-onzekerheid-beleid.pdf>

- Petersen, Arthur. 2012. *Simulating Nature: A Philosophical Study of Computer-Model Uncertainties and Their Role in Climate Science and Policy Advice*. 2^e druk [van Petersen (2006)]. Boca Raton, FL: CRC Press.
- Petersen, Arthur. 2022. 'Expertoordeel onderbouwing maximale rekenafstand bij project-specifieke berekeningen van stikstofdeposities'. Geschreven in opdracht van het Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat. 9 november 2022.
https://www.ucl.ac.uk/steapp/sites/steapp/files/dutch_-_expert_judgement_arthur_petersen_11-11-202235.pdf
- Petersen, Arthur, en Marjolein van Asselt. 2007. 'Conclusies en aanbevelingen'. In *Omgaan met Onzekerheid in Beleid*, geredigeerd door Judith Mathijssen, Arthur Petersen, Paul Besseling, Adnan Rahman en Henk Don, 61–72. Den Haag: Centraal Planbureau, Bilthoven: Milieu- en Natuurplanbureau en Leiden: Rand Europe.
<https://www.cpb.nl/sites/default/files/publicaties/download/omgaan-met-onzekerheid-beleid.pdf>
- Petersen, Arthur, Peter Janssen, Jeroen van der Sluijs, James Risbey en Jerome Ravetz. 2003. *RIVM/MNP Leidraad voor Omgaan met Onzekerheden: Leidraad voor Omgaan met Onzekerheden: Mini-Checklist & Quicksan Vragenlijst*. Bilthoven: Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu/Milieu- en Natuurplanbureau.
https://www.rivm.nl/bibliotheek/digitaaldepot/Leidraad_Mini-Check_QS_Vragenlijst.pdf [Engelse versie: https://www.rivm.nl/bibliotheek/digitaaldepot/Guidance_MC_QS-Q.pdf]
- Petersen, Arthur, Peter Janssen, Jeroen van der Sluijs, James Risbey, Jerome Ravetz, Arjan Wardekker en Hannah Martinson Hughes. 2013/2014. *Leidraad voor Omgaan met Onzekerheden*. 2^e druk [van Petersen et al. (2003) en Janssen et al. (2003)]. Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving.
https://www.pbl.nl/sites/default/files/downloads/pbl_2014_leidraad_voor_omgaan_met_onzekerheden_1382_0.pdf [Engelse versie: https://www.pbl.nl/sites/default/files/downloads/pbl_2014_guidance_for_uncertainty_assessment_and_communication_712_0.pdf]
- Sluijs, Jeroen van der. 2007. 'Onzekerheidscommunicatie'. In *Omgaan met Onzekerheid in Beleid*, geredigeerd door Judith Mathijssen, Arthur Petersen, Paul Besseling, Adnan Rahman en Henk Don, 23–28. Den Haag: Centraal Planbureau, Bilthoven: Milieu- en Natuurplanbureau en Leiden: Rand Europe.
<https://www.cpb.nl/sites/default/files/publicaties/download/omgaan-met-onzekerheid-beleid.pdf>
- Smith, Leonard, en Arthur Petersen. 2014. 'Variations on reliability: Connecting climate predictions to climate policy'. In *Error and Uncertainty in Scientific Practice*, geredigeerd door Marcel Boumans, Giora Hon en Arthur Petersen, 137–56. Londen: Pickering & Chatto.
<https://www.lse.ac.uk/CATS/Assets/PDFs/Publications/Papers/2014/Smith-Petersen-Variations-on-reliability-2014.pdf>
- Steunpunt Natura 2000. 2010. *Leidraad bepaling significantie: Nadere uitleg van het begrip 'significante gevolgen' uit de Natuurbeschermingswet*. Ede: Ministerie van LNV.
https://www.commissiemer.nl/docs/mer/diversen/leidraad_bepaling_significantie27052010.pdf
- TNO. 2022. *Afbakening in de modellering van depositiebijdragen van individuele projectbijdragen (Fase 2) Versie 3*. Referentie 100342643. [Auteurs: J. Duyzer en H. Erbrink]. Utrecht: TNO. 26 april 2022.
<https://www.rijksoverheid.nl/binaries/rijksoverheid/documenten/rapporten/2022/04/26/afbakening-in-de-modellering-van-de-depositiebijdragen-van-individuele-projectbijdragen/afbakening-in-de-modellering-van-de-depositiebijdragen-van-individuele-projectbijdragen.pdf>

TNO. 2024. *Een ondergrens in de berekening van stikstofdepositiebijdragen voor vergunningverlening: Onderzoek naar een wetenschappelijk onderbouwde ondergrens*. Referentie R11334. [Auteurs: E. Meijer en E. van Loon]. Den Haag: TNO. 15 augustus 2024.
<https://www.ipo.nl/5541>

Over de auteur

Arthur Petersen (1970) studeerde natuurkunde (VU, 1993) en filosofie (VU, 1995) en promoveerde in de atmosferische fysica en chemie (Universiteit Utrecht, 1999), wetenschapsstudies en -filosofie (VU, 2006) en wetenschap en religie/cultuurfilosofie (Oxford, 2022). Hij trad in 2001 in dienst bij het Milieu- en Natuurplanbureau van het RIVM (een van de voorlopers van het Planbureau voor de Leefomgeving) en werd in 2003 projectleider van de sinds 2001 in ontwikkeling zijnde Leidraad voor Omgaan met Onzekerheden (1^e druk: RIVM/MNP 2003; 2^e druk: PBL 2013/2014). Van 2003–2014 was hij programmaleider methodologie en modellering en van 2011–2014 was hij de eerste Chief Scientist van het PBL; in die laatste rol was hij lid van het Directieteam en verantwoordelijk voor de wetenschappelijke kwaliteitsborging. Hij was bijzonder hoogleraar wetenschap en milieubeleid aan de VU ('vanwege het PBL') van 2011–2016. In 2014 stapte hij over naar een voltijdbaan als hoogleraar: hij werd Professor of Science, Technology and Public Policy (hoogleraar wetenschap, techniek en beleid) aan University College London (UCL). Sinds 2000 is hij betrokken bij het Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) – t/m 2014 vanuit de Nederlandse delegatie, daarna vanuit de delegatie van UCL (een 'observer organization'). In 2019 werd hij verkozen tot lid van Academia Europaea, de Europese Academie van Wetenschappen. Hij voert regelmatig onafhankelijke onderzoek-, advies- en evaluatieopdrachten uit voor overheden en kennisinstellingen (recentelijk o.a. voor de Deltacommissaris, het Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, de Wetenschappelijke Raad voor het Regeringsbeleid en het RIVM) en hij is sinds januari 2024 voorzitter van de Signaalgroep Deltaprogramma. Hij woont in Den Haag. Voor meer informatie en publicaties zie [hier](#) (persoonlijke webpagina universiteit).