

Expertoordeel rekenkundige ondergrens bij project-specifieke berekeningen van stikstofdeposities

Arthur Petersen

20 januari 2025

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 is er sprake 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 1 mol/ha/jaar, op basis van de best beschikbare wetenschappelijke kennis, rekening houdend met de meetdetectielimiet. Onder 1 mol/ha/jaar is een depositie niet voldoende zeker van nul te onderscheiden en kan een berekende depositiebijdrage dus niet met voldoende wetenschappelijke zekerheid worden gerelateerd aan een individuele bron (er kan geen causaal verband worden vastgesteld). Rekenresultaten lager dan 1 mol/ha/jaar zijn wetenschappelijk gezien onvoldoende betrouwbaar voor gebruik in besluitvorming over specifieke projecten (de modelsystematiek is dan niet doelgeschikt).

Theoretische en empirische overwegingen, de overeenstemming met andere modellen en peer consensus laten wetenschappelijk gezien geen ruimte toe – vanwege schijnzekerheid – om stikstofdeposities van individuele bronnen te berekenen en daar effecten aan toe te dichten waar de depositie lager is dan 1 mol/ha/jaar. De huidige rekenkundige ondergrens van 0,005 mol/ha/jaar (0,01 mol/ha/jaar na afronding) kan daarom wetenschappelijk gezien geen stand houden; de rekenkundige ondergrens ligt twee ordes van grootte hoger.

Inleiding

Mij is gevraagd door het Ministerie van Landbouw, Visserij, Voedselzekerheid en Natuur om een onafhankelijk expertoordeel over de grootte van de rekenkundige ondergrens bij project-specifieke berekeningen van stikstofdeposities.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 natuur-

¹ Dit onafhankelijke expertoordeel over de rekenkundige ondergrens, geschreven in opdracht van het Ministerie van Landbouw, Visserij, Voedselzekerheid en Natuur (LVVN), is mede gebaseerd op een peer review door 15 instituten en individuen (georganiseerd door LVVN) van mijn op 28 augustus 2024 gepubliceerde expertoordeel, dat was geüpdatet naar aanleiding van het door TNO en UvA uitgevoerde onderzoek in opdracht van het Interprovinciaal Overleg (<https://www.ipo.nl/nieuws/rekenkundige-ondergrens/>) en oorspronkelijk was opgeleverd op 22 juli 2023 in opdracht van De Nieuwe Denktank. Het is een variatie op een eerder onafhankelijk expertoordeel (Petersen 2022), dat was geschreven in opdracht van het Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat over de onderbouwing van de maximale rekenafstand. Het huidige expertoordeel verloopt analoog aan mijn eerdere expertoordeel over de maximale rekenafstand (en paragraaf 1 is grotendeels identiek) – de redenering is immers dezelfde: wetenschappelijk gezien moet er in dit dossier worden voorkomen dat er wordt gerekend 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).

wetenschappelijke achtergrond wel bij de inhoudelijke beoordeling van de discussie over de rekenkundige ondergrens.

In mijn expertoordeel over de rekenkundige ondergrens 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. Wetenschappelijk onderbouwen wat de grootte moet zijn van de rekenkundige ondergrens bij project-specifieke berekeningen van stikstofdeposities (gegeven dat rekenen met de huidige ondergrens van 0,005 mol/ha/jaar leidt tot schijnzekerheid).
3. (Beknopt) reageren op de punten over 'cumulatie' en 'voorzorg' die door de Commissie Hordijk (Adviescollege Meten en Berekenen Stikstof 2020) en TNO (2022) zijn ingebracht, in het licht van 1 en 2.

De impact van het gebruiken van een wetenschappelijk onderbouwde rekenkundige ondergrens en de juridische aspecten maken geen onderdeel van dit expertoordeel. Dit geldt ook voor de ecologische wetenschappen. Dit expertoordeel betreft net als TNO (2024) de (atmosfeer)modelwetenschappen en vormt een direct vervolg op de IPO-verkenning die in de eerste helft van 2024 is uitgevoerd. Deze IPO-verkenning heeft, naast TNO (2024), ook een impactanalyse en een juridische analyse opgeleverd. Voor informatie over impact en juridische aspecten van een rekenkundige ondergrens verwijs ik daarom naar de genoemde analyses.³ Wel geef ik hier ter inleiding nog een korte uitleg over het verschil tussen een rekenkundige ondergrens en een drempel- of grenswaarde zoals werd gehanteerd in het Programma Aanpak Stikstof:

Waarin verschilt een rekenkundige ondergrens van een drempel- of grenswaarde zoals werden gehanteerd in het Programma Aanpak Stikstof (PAS)?

Een rekenkundige ondergrens is geen (ecologische) drempel- of grenswaarde maar volgt dwingend uit de atmosfeerwetenschap in combinatie met de juridische bewijsstandaard in het kader van vergunningverlening, namelijk dat een causaal verband moet kunnen worden gedetecteerd tussen de emissie van een individuele bron en de berekende depositie voordat wordt toegekomen aan een voortoets of passende beoordeling. Het verschil zit erin dat onder de rekenkundige ondergrens causaliteit tussen emissie en depositie niet kan worden gedetecteerd waardoor er sprake is van schijnzekerheid; daarom moeten berekende deposities onder die grens worden afgerond naar nul. In het geval van een drempel- of grenswaarde hoger dan een wetenschappelijk onderbouwde rekenkundige ondergrens moet tegenover de cumulatieve stikstofdepositie van alle vrijgestelde activiteiten een pakket met maatregelen staan die zorgen dat de instandhoudingsdoelstellingen gehaald worden. Dit hoeft niet bij een rekenkundige ondergrens, althans niet als voorwaarde voor het gebruik in het kader van Hrl. art. 6.3. In het kader van Hrl. art. 6.2 blijft de overheid natuurlijk wel verplicht om verslechtering van habitats te voorkomen en op termijn de verbeter- en uitbreidingsdoelstellingen te bereiken.⁴ De huidige rekenkundige ondergrens van 0,005 mol/ja/jaar is niet wetenschappelijk onderbouwd maar werkt wel hetzelfde (berekeningen onder de ondergrens worden afgerond naar nul) en heeft dezelfde juridische consequenties. Zie verder de juridische analyse van de IPO-verkenning.

³ Deze zijn te vinden op <https://www.ipo.nl/nieuws/rekenkundige-ondergrens/>.

⁴ De rekenkundige ondergrens voor het gebruik van een model in de vergunningverlening (Hrl. art. 6.3) is niet automatisch van toepassing bij het gebruik van een model voor een ander doel (zoals in de context van Hrl. art. 6.1 en 6.2). Voor het krijgen van een beeld van de totale depositie in het kader van Hrl. art. 6.1 en 6.2 blijven bijdragen onder 1 mol/ha/jaar (en ook alle bijdragen voorbij 25 km) meegeteld worden.

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

Een goed startpunt voor de discussie over hoe om te gaan met onzekerheid op het raakvlak tussen wetenschap en besluitvorming binnen beleid of vergunningverlening kan worden gevonden in de oorspronkelijk in 2003 gepubliceerde *Leidraad voor Omgaan met Onzekerheden* (RIVM 2003a, 2003b; PBL [2013] 2014) en in het rapport *Omgaan met Onzekerheid in Beleid* (CPB/MNP/Rand Europe 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,⁵ in Nederland en daarbuiten.⁶ 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). Ook de European Food Safety Authority refereert in de eigen onzekerheidsleidraad aan de *Leidraad voor Omgaan met Onzekerheden* (EFSA 2018a, 2018b, 2019).

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 bakken 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 daarmee berekeningen doen om tot betrouwbare uitspraken te komen.⁷ 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. (CPB/MNP/Rand Europe 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)

⁵ De Leidraad voor Omgaan met Onzekerheden is breder toepasbaar dan alleen in het milieudomein.

⁶ De eerste fase van ontwikkeling vond plaats in het RIVM en doorontwikkeling vond later plaats in het PBL.

⁷ ‘Betrouwbaarheid’ heeft drie dimensies: (1) statistische betrouwbaarheid (‘betrouwbaarheidsintervallen’), (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.

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 van wetenschappers moeten verlangen dat zij 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.

De Leidraad voor Omgaan met Onzekerheden is bedoeld als 'tegengif' voor deze neiging van wetenschappers (waar zij overigens vooral aan toegeven onder druk van besluitvormers die zekerheid zoeken)⁸ en vormt daarmee de basis om zorgvuldig met onzekerheden om te gaan in besluitvormingsgericht wetenschappelijk onderzoek (PBL [2013] 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 het raakvlak tussen wetenschap en besluitvorming gaat het vervolgens vooral om de beoordeling van de impact van onzekerheden op specifieke modelresultaten en daarop gebaseerde (beleids)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 (beleids)doel (zie Knuuttila et al. 2025; 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' (PBL [2013] 2014, 32). Als aan de onderbouwing de kwalificatie 'zwak' wordt gegeven, dan is dat een aanwijzing 'dat de betreffende uitspraak met veel (kennis)onzekerheid omgeven is, en nadere aandacht verdient' (PBL [2013] 2014, 32).⁹ 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' (PBL [2013] 2014, 32). Hierbij kan een zogenaamde 'pedigree-analyse' worden gebruikt:

⁸ Angst van besluitvormers om ergens voor verantwoordelijk te worden gehouden kan hierbij een rol spelen. Wetenschappers hebben echter een maatschappelijke verantwoordelijkheid om te volgen wat besluitvormers met hun resultaten doen, om daarover te adviseren en om te waarschuwen voor verkeerd gebruik.

⁹ 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.

ONZEKERHEIDSMATRIX		Onzekerheidsgraad <i>(van zeker weten, via waarschijnlijk en mogelijk naar niet-weten)</i>			Onzekerheidsaard		Kwalificatie kennisbasis (onderbouwing)			Waardengeladenheid van keuzes		
		Statistische onzekerheid (range+kans)	Scenario-onzekerheid (range als 'what-if' optie)	Erkende onwetendheid	Kennisgerelateerde onzekerheid	Variabiliteit-gerelateerde onzekerheid	Zwak -	Redelijk 0	Sterk +	Gering -	Midden 0	Groot +
Locatie ↓												
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 (RIVM 2003b, 18; Petersen 2007, 17; PBL [2013] 2014, 27). Zie Walker et al. (2003) en PBL ([2013] 2014, 29–32) voor een uitleg van de dimensies in de onzekerheidsmatrix en Petersen ([2006] 2012) voor een filosofische uitdieping.

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 (beleids)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.¹⁰

Zoals we hierna zullen zien is er bij de modelberekeningen voor stikstofdepositie ten gevolge van individuele projecten al snel sprake van schijnzekerheid. In het vervolg van dit expertoordeel richt ik mijn aandacht op het vinden van een antwoord op de vraag die voorligt, namelijk wat de grootte moet zijn van de rekenkundige ondergrens bij het berekenen van

¹⁰ 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).

stikstofdepositie in het kader van vergunningverlening voor individuele projecten, waarbij schijnzekerheid wordt voorkomen. Als alternatief voor de huidige 0,005 mol/ha/jaar, die tot schijnzekerheid leidt en niet doelgeschikt is. In de volgende paragraaf vormt de Leidraad voor Omgaan met Onzekerheden een hulpmiddel om de betrouwbaarheid van de voor de bepaling van de rekenkundige ondergrens benodigde kennis, inclusief waardengeladenheid, te beoordelen. De kracht van de daar gegeven redenering is echter niet afhankelijk van het expliciete gebruik van deze leidraad.

2. Expertoordeel over de grootte van de rekenkundige ondergrens 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)

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 [de huidige rekenkundige ondergrens van 0,005 mol/ha/jaar, ap] 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 huidige rekenkundige ondergrens van 0,005 mol/ha/jaar, ap]. 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 heeft de overheid tot op heden niet gevolgd. Dit betreft de depositie niet op een hexagoon maar op een cluster van hexagonen berekenen, ingedeeld naar habitatype. Dit zou schijnzekerheid in depositieberekeningen op grote afstand van de bron verminderen. Wel is door de overheid in 2021 een andere manier gekozen om de modellen meer doelgeschikt te maken. Dit betreft het hanteren van een uniforme maximale rekenafstand van 25 km,¹¹ om onbetrouwbare rekenresultaten op hexagonniveau voorbij die

¹¹ Vijfmaal groter dan de 5 km die daarvoor voor wegverkeer werd gehanteerd en veel kleiner dan de onbeperkte rekenafstand die voor alle bronnen werd gehanteerd. Hiermee is sprake van een gelijkwaardige behandeling van verschillende typen emissiebronnen in het kader van toestemmingverlening.

rekenafstand te voorkomen.¹² 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 rekenkundige ondergrens 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 rekenkundige ondergrens van 0,005 mol/ha/jaar betreft een door RIVM-experts gemaakte pragmatische, computertechnische keuze zonder wetenschappelijke betekenis.¹³

Ik zal onder nader ingaan op de onderbouwing voor het afbakenen van het toepassingsbereik van het model dat wordt gebruikt voor project-specifieke berekeningen door het gebruik van een veel hogere rekenkundige ondergrens. Ik doe dat in het licht van wat over methodologische betrouwbaarheid wordt gezegd in de wetenschap en wat daarover vastligt 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 problematisch is wanneer dit niet transparant gebeurt en sowieso moeilijk juridisch en beleidsmatig stand kan houden (zie ook paragraaf 3). De Commissie Hordijk belicht dit issue als volgt voor de keuze van de rekenkundige ondergrens van 0,005 mol/ha/jaar:

Het voorzorgsprincipe vraagt vooralsnog om een strikte grenswaarde [de huidige rekenkundige ondergrens van 0,005 mol/ha/jaar, ap] bij vergunningverlening. Een ambitieus bronbeleid met vastgelegde nationale doelstellingen heeft als voordeel dat de grenswaarden [lager dan, gelijk aan of hoger dan een wetenschappelijk onderbouwde rekenkundige ondergrens, ap]¹⁴ 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 bovenstaande citaat is dat het begrenzen van schijnzekerheden – bijvoorbeeld door het verhogen van de rekenkundige ondergrens – wetenschappelijk gezien vereist is. 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.¹⁵ Modellers kunnen ervoor kiezen om schijnzekerheden te accepteren vanuit een veronderstelling (die overigens niet altijd feitelijk terecht is in termen van het effect)¹⁶ dat dit nodig is vanwege een ‘voorzorgsprincipe’. Het is dan wel belangrijk om zulke vermenging van epistemische waarden (gericht op kennis) en niet-epistemische waarden (gericht op ethiek en beleid) transparant te maken in de modelsystematiek en ook aan te geven op welke aspecten van de weten-

¹² 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).

¹³ AERIUS Calculator kan tot veel meer decimalen achter de komma rekenen, maar dat leidde tot instabiliteit van het systeem met onhanteerbaar lange rekentijden.

¹⁴ De formulering die de Commissie Hordijk hier kiest, duidt erop dat het gaat om een drempelwaarde, ook indien deze lager is of gelijk aan een wetenschappelijk onderbouwde rekenkundige ondergrens (zie het kader op pagina 2 van dit expertoordeel voor het verschil tussen een drempel- of grenswaarde en een rekenkundige ondergrens).

¹⁵ Zie de onzekerheidsmatrix (in tabel 1) en voetnoot 10.

¹⁶ Besluiten die op basis van schijnzekerheden worden genomen, hoeven niet het (negatieve of positieve) effect te hebben dat wordt gemodelleerd.

schap de niet-epistemische waarden zich richten en in die zin beperkt zijn (Douglas 2009, 2023; zie ook Harding 1991 en Longino 1995, 2001). Er moet dus een juiste balans worden gevonden tussen de rol van epistemische waarden en niet-epistemische waarden in de beoordeling van doelgeschiktheid van modellen. In dit expertoordeel wordt beoogd dit op transparante wijze te doen bij de onderbouwing van een rekenkundige ondergrens.

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, (iii) de overeenstemming tussen verschillende modellen en (iv) peer consensus (Petersen 2006, 57–62; 2012, 58–62). Voordat ik de waardengeladenheid van verschillende expertoordelen (inclusief mijn eigen expertoordeel) over de grootte van de rekenkundige ondergrens expliciet bespreek, geef ik eerst de wetenschappelijke onderbouwing van een rekenkundige ondergrens langs deze vier dimensies:

- *Theoretische basis*: Beneden een wetenschappelijk bepaalde rekenkundige ondergrens is het model theoretisch niet geldig. De huidige rekenkundige ondergrens van 0,005 mol/ha/jaar heeft zelf geen basis in enige wetenschappelijke theorie. Vanuit wetenschappelijk oogpunt is het theoretisch relevant om de rekenkundige ondergrens af te leiden uit fysische, chemische en biologische overwegingen in de (atmosferische) modelwetenschappen. Dát er een rekenkundige ondergrens bestaat, d.w.z. dat er een ondergrens vanuit de (atmosferische) modelwetenschappen te bepalen is waaronder een berekende depositiebijdrage niet met voldoende wetenschappelijke zekerheid kan worden gerelateerd aan een individuele bron (er geen causaal verband kan worden vastgesteld), valt theoretisch te onderbouwen (zie ook TNO 2024). Er wordt immers gebruik gemaakt van een model dat slechts een benadering is van de werkelijkheid. In de modelwetenschappelijke theorie achter het toeschrijven van een causaal verband vormt de empirische meetdetectielimiet een ‘complement’ (cf. Schlüter et al. 2023) van het model (de empirische meetdetectielimiet biedt een handvat voor de theoretische detectielimiet ofwel de rekenkundige ondergrens). Er moet een *theoretische* detectielimiet worden bepaald omdat het empirisch niet mogelijk is om project-specifieke deposities daadwerkelijk via metingen te detecteren. De meetdetectielimiet is momenteel in de orde van grootte van 10 mol/ha/jaar (zie onder bij ‘empirische basis’). Het model mag niet onder de theoretische detectielimiet worden gebruikt omdat dan moet worden aangenomen dat het te onzeker is dat er sprake is van een causaal verband tussen emissie en depositie. Het vereist een expertoordeel om te bepalen wat in dit opzicht een ‘veilige’ waarde is voor de rekenkundige ondergrens, dat wil zeggen een waarde die jaren stand kan houden: de empirische meetdetectielimiet moet in ieder geval niet onder de theoretische detectielimiet ofwel rekenkundige ondergrens komen te liggen. Het ziet er niet naar uit dat de empirische meetdetectielimiet de komende jaren – of zelfs decennia – met meer dan één orde van grootte lager zal komen te liggen (zie hierna bij empirische basis). Uit deze theoretische overweging, waarin de empirische meetdetectielimiet (nu orde van 10 mol/ ha/jaar) het model theoretisch completeert, volgt daarom het oordeel dat de rekenkundige ondergrens (theoretische detectielimiet) orde van 1 mol/ha/

jaar is; de rekenkundige ondergrens kan niet preciezer worden bepaald dan op een orde van grootte¹⁷ (zie TNO 2024). De waarde van 1 mol/ha/jaar voor de rekenkundige ondergrens is wetenschappelijk gezien een veilige waarde voor gebruik over een periode van vele jaren.¹⁸

- *Empirische basis*: De huidige rekenkundige ondergrens van 0,005 mol/ha/jaar heeft geen empirische basis en ligt ver beneden de empirische meetdetectielimiet. Balla et al. (2014) schatten de empirische meetdetectielimiet voor stikstofdepositie op basis van de kleinst meetbare hoeveelheden NO_x en NH₃ (respectievelijk 0,4 en 0,1 µg/m³) op 35 mol/ha/jaar. RIVM (2021, 17) schat de detectielimiet (als rekenkundige ondergrens) als volgt: “Om een indicatie te geven van de ondergrens van de aantoonbaarheid van een bronbijdrage op basis van metingen kan de gevoeligheid van de meetmethoden voor het meten van de luchtconcentraties van NO_x en voor NH₃ gebruikt worden. Die gevoeligheid ligt ongeveer rond de 0,2 microgram per kubieke meter (Berkhout et al. 2017; Teledyne 2016). Deze concentraties vertalen zich, op basis van een gemiddelde depositiesnelheid in Nederland, in deposities van ordegrootte 20 mol N per hectare per jaar.” TNO (2021) bevestigt RIVM (2021), met dezelfde referenties. TNO (2022, 28) concludeert: “Een belangrijke validatiestudie waarbij berekende concentraties, als gevolg van de emissies van een enkele bron, vergeleken worden met gemeten waarden laat zien dat een depositie tussen 6 en 12 mol/ha/jaar niet meetbaar is.” En TNO (2024), onder verwijzing naar de methode van TNO (2022, 21), stelt onder het kopje ‘De afwijking van metingen vormt een maat voor de ondergrens’: “De detectielimiet van meetinstrumenten vormt een technische barrière voor het valideren van kleine berekende deposities. De standaardafwijking van de metingen ten opzichte van gemodelleerde concentratie-waarden bedraagt 0,05 µg/m³ voor NH₃. Uitgaande van een gemiddelde depositiesnelheid van 1 cm/s zonder rekening te houden met bijkomende onzekerheden in de depositiesnelheid, is dat te vertalen naar een orde van 10 mol/ha/jaar.”¹⁹ Deze schatting voor de meetdetectielimiet van een orde van 10 mol/ha/jaar omvat ook de schattingen van RIVM (2021)/TNO(2021) van 20 mol/ha/jaar en van TNO (2022) van 6 mol/ha/jaar. Op basis van onzekerheid in de modellering van de depositiesnelheid (een factor 3) schat TNO (2024, 22) de maximale meetdetectielimiet op 30 mol/ha/jaar (en – bij implicatie – de minimale meetdetectielimiet op 3,3 mol/ha/jaar). Gegeven de genoemde waarden, die al meer dan een decennium in de orde van grootte van 10 mol/ha/jaar liggen maar die gezien ook de aanwezigheid van schattingen van de gemiddelde meetdetectielimiet van 6 mol/ha/jaar (TNO 2022) mogelijk in de toekomst in de orde van grootte van 1 mol/ha/jaar zouden kunnen komen te liggen, is 1 mol/

¹⁷ De orde van grootte van een getal is een term die gebruikt wordt binnen de exacte wetenschappen om de gehele exponent van een macht van 10 mee aan te duiden – b.v. 10⁻¹ (0,1), 10⁰ (1) en 10¹ (10) vormen een reeks met drie opeenvolgende ordes van grootte –, waarbij die macht van 10 als benadering van een getal geldt. Grofweg kun je stellen dat waarden die binnen een factor √10 (dat is ongeveer 3,16) van 0,1, 1, 10, enz. vallen respectievelijk orde van 0,1, 1, 10, enz. zijn.

¹⁸ Dit kan op verschillende manieren worden geïmplementeerd, b.v. als afronding naar 1,00 mol/ha/jaar bij 0,995 mol/ha/jaar en hoger, als afronding naar 1,0 mol/ha/jaar bij 0,95 mol/ha/jaar en hoger of als afronding naar 1 mol/ha/jaar bij 0,5 mol/ha/jaar en hoger. De rekenkundige ondergrens vóór afronding zou dan respectievelijk 0,995, 0,95 of 0,5 mol/ha/jaar zijn (de huidige rekenkundige ondergrens vóór afronding is 0,005 mol/ha/jaar en de huidige rekenkundige ondergrens na afronding is 0,01 mol/ha/jaar).

¹⁹ De precieze uitkomst voor de vermenigvuldiging van deze concentratie en depositiesnelheid is 9,3 mol/ha/jaar.

ha/jaar voor vele jaren een veilige waarde voor de rekenkundige ondergrens als theoretische detectielimiet (wederom benadruk ik, met TNO 2024, dat de rekenkundige ondergrens niet preciezer kan worden bepaald dan op een orde van grootte).

- *Overeenstemming tussen verschillende (versies van) modellen:* Een rekenkundige ondergrens van 0,005 mol/ha/jaar of vergelijkbare orde van grootte wordt niet gebruikt in buitenlandse berekeningen van deposities in de vergunningverlening. De bovenstaande theoretische en empirische argumenten voor het gebruik van de meetdetectielimiet voor het bepalen van een ondergrens in berekeningen, zijn niet afhankelijk van de precieze wijze waarop (model)berekeningen worden uitgevoerd. In Duitsland is de rekenkundige ondergrens bepaald op basis van de kleinst meetbare hoeveelheden NO_x en NH₃ (overeenkomend met een stikstofdepositie van 35 mol/ha/jaar – uit veiligheid is de theoretische detectielimiet of rekenkundige ondergrens op 21 mol/ha/jaar gezet, zie Balla et al. 2014). Ook in Ierland wordt een rekenkundige ondergrens van 21 mol/ha/jaar voorgeschreven voor gebruik in modelinstrumentarium voor vergunningverlening (Irish Environmental Protection Agency 2023). In beide landen is niet één bepaald model voorgeschreven voor gebruik.
- *Peer consensus:* Alle betrokken experts zijn het erover eens dat de rekenkundige ondergrens van 0,005 mol/ha/jaar geen wetenschappelijk onderbouwde rekenkundige ondergrens is. Dit geldt ook voor de experts in de Commissie Hordijk en bij RIVM en TNO. Experts van RIVM (2021) en TNO (2022; 2024) ondersteunen in principe het gebruik van de meetdetectielimiet om de rekenkundige ondergrens te bepalen (voor verdere discussie over de details van de ondersteuning door RIVM en TNO zie onder) – en ook onder de peer reviewers van een eerdere versie van dit expertoordeel is hiervoor steun gevonden, evenals voor het (vanwege mogelijke toekomstige verlaging van de meetdetectielimiet) veilig zetten van de rekenkundige ondergrens op 1 mol/ha/jaar (geen 100% consensus op alle punten, maar dat is gezien de waarden geladenheid van wetenschap ook niet te verwachten). Ook in Duitsland en Ierland hebben experts geadviseerd een op de empirische meetdetectielimiet gebaseerde rekenkundige ondergrens te gebruiken en zijn die adviezen opgevolgd (zie Balla et al. 2014 en Irish Environmental Protection Agency 2023).

Een rekenkundige ondergrens van 0,005 mol/ha/jaar is daarom naar mijn oordeel inderdaad niet wetenschappelijk te onderbouwen. Wetenschappelijk gezien zou de rekenkundige ondergrens één orde van grootte onder de huidige empirische meetdetectielimiet van 10 mol/ha/jaar moeten liggen, wat neerkomt op 1 mol/ha/jaar. Het actuele modelinstrumentarium dat gebruikmaakt van een rekenkundige ondergrens die nog twee ordes van grootte lager ligt, is mijns inziens niet *fit for purpose* en leidt tot schijnzekerheid. Verder stelt TNO (2024) terecht aan de orde dat ook mét een wetenschappelijk onderbouwde 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 (Adviescollege Meten en Berekenen Stikstof 2020) en Petersen (Auditcommissie RIVM Centrum Milieukwaliteit 2024) bevestigt dat AERIUS Calculator niet doelgeschikt is voor het huidige gebruik in de vergunningverlening.

Dat het tot nu toe heeft moeten duren voordat er in Nederland een breder in de wetenschap gedragen expertoordeel ligt over de rekenkundige ondergrens heeft te maken met de

complexiteit van het onderwerp (zie TNO 2024), de waardengeladenheid van de wetenschap en het feit dat de vraag over het toepassingsbereik van AERIUS Calculator, in de zin van een rekenkundige ondergrens, niet in een vroeg stadium aan een bredere groep wetenschappers is gesteld (buiten het RIVM). Al snel na de PAS-uitspraak in 2019 was duidelijk dat er een antwoord moest komen vanuit de wetenschap op het toepassingsbereik van AERIUS Calculator in de vergunningverlening in de nieuwe situatie, waarin projecten individueel beoordeeld worden zonder gebruik te kunnen maken van een stikstofboekhouding zoals onder het PAS.²⁰ Dit hield de noodzaak in van het hanteren van zowel een maximale afstandsgrens als een rekenkundige ondergrens. Dat de nu gevonden rekenkundige ondergrens numeriek dezelfde waarde heeft als de grenswaarde van het PAS, namelijk 1 mol/ha/jaar, is louter toeval en heeft geen betekenis. Het betreft immers verschillende grootheden: de 1 mol/ha/jaar van het PAS was een beleidsmatig gekozen grens- of drempelwaarde om kleine projecten vrij te stellen van vergunningplicht; de onderhavige 1 mol/ha/jaar is een rekenkundige ondergrens, die één orde van grootte ligt onder de huidige empirische meetdetectielimiet van 10 mol/ha/jaar.

In RIVM (2021) zijn de benodigde wetenschappelijke ingrediënten aangedragen voor zowel de maximale rekenafstand als de rekenkundige ondergrens (als eerste ‘wetenschappelijk technische’ argument voor de rekenkundige ondergrens wordt de meetdetectielimiet uitgewerkt). Het rapport observeert dat de wetenschappelijke ingrediënten in beide gevallen niet leiden tot één getal maar dat er een beleidsmatige keuze nodig zou zijn. Oftewel: het RIVM kwam niet tot een eigen expertoordeel, waarin niet-epistemische waarden (vanuit het beleid) en epistemische waarden (vanuit zowel de ‘pure’ wetenschap als samenhangend met niet-epistemische waarden) door wetenschappelijke experts in balans waren gebracht. In Petersen (2022) heb ik alsnog een gedragen expertoordeel geformuleerd voor de afstandsgrens en het huidige expertoordeel beoogt hetzelfde te doen voor de rekenkundige ondergrens.

Dit expertoordeel is het resultaat van een deliberatief proces met andere experts gedurende meer dan 1,5 jaar. De eerste versie, van juli 2023, vormde input voor een rondetafelgesprek met wetenschappelijke experts over een rekenkundige ondergrens in modelberekeningen van stikstofdepositie op natuurgebieden op 14 december 2023 in Utrecht (ik was zelf verhinderd).²¹ Mijn lidmaatschap van de wetenschappelijke klankbordgroep van het daarna door TNO en UvA uitgevoerde onderzoek in opdracht van het IPO (TNO 2024) droeg bij aan het maken van een update van mijn expertoordeel in augustus 2024. De door mij in mijn expertoordeel geformuleerde positie is niet meer en niet minder dan een uitwerking en

²⁰ Het PAS introduceerde een grotere precisie dan eerder werd gebruikt voor stikstofdeposities. De Commissie MER waarschuwde in 2012: “AERIUS suggereert een zeer hoge nauwkeurigheid van de berekende depositie op een detailniveau van 1 ha. Veel van de brongegevens en de daarbij gebruikte verspreidingsmodellen hebben echter een grote onzekerheid. De gepresenteerde nauwkeurigheid is daarmee onmogelijk te bereiken. Ook in de huidige praktijk worden berekeningen uitgevoerd die de depositie ten onrechte weergeven tot op 0,1 mol nauwkeurig en worden op basis van die getallen vergunningen verleend of geweigerd.” De Commissie adviseerde destijds al om “de gemodelleerde deposities te presenteren met een nauwkeurigheid die recht doet aan de onzekerheid in de gebruikte data en modellen” (Commissie voor de Milieueffectrapportage 2012). Dit geldt des te meer nu er individueel wordt gekeken naar projecten.

²¹ ‘Opbrengst Rondetafelgesprek met wetenschappelijk experts over een rekenkundige ondergrens in modelberekeningen van stikstofdepositie op natuurgebieden, 14 december 2023, Utrecht (BIJ12)’ (<https://www.tweedekamer.nl/downloads/document?id=2024D03194>).

onderbouwing van het binnen de klankbordgroep breder gedeelde ‘spoor 3’ (uitgaan van de meetdetectielimiet) voor het bepalen van een rekenkundige ondergrens, dat een belangrijke rol innam in het eerder genoemde rondetafelgesprek. TNO (2024) bewandelt in het centrale hoofdstuk 2 (‘Uitgevoerd onderzoek’) met name ‘spoor 1’ (uitgaan van een theoretisch onderbouwde onzekerheidsanalyse) en ook ‘spoor 2’ (uitgaan van ruis in de totale depositie), waarbij uiteindelijk de conclusie moet worden getrokken dat langs deze sporen er vooralsnog geen ondergrens te vinden is. Spoor 3, dat ook binnen de scope van de vraagstelling valt, wordt echter alleen maar genoemd als de tweede van drie ‘mogelijke andere denkrichtingen’ in hoofdstuk 3 (‘Discussie’). In de samenvatting van TNO (2024) wordt opgemerkt: “De Nederlandse ondergrens van 0,005 mol/ha/jaar is beleidsmatig als benadering van 0 gekozen, vanwege het voorzorgsbeginsel ten aanzien van de instandhoudingsverplichting van Natura 2000 gebieden. De gehanteerde ondergrens is niet wetenschappelijk onderbouwd. De gekozen ondergrenzen van orde grootte 10 mol/ha/jaar waarmee omringende landen werken zijn eveneens niet puur wetenschappelijk onderbouwd.” Oftewel: ook TNO (2024) kwam niet tot een eigen expertoordeel, waarin niet-epistemische waarden (vanuit het beleid) en epistemische waarden (vanuit zowel de ‘pure’ wetenschap als samenhangend met niet-epistemische waarden) door wetenschappelijke experts in balans waren gebracht.

Vandaar dat er nog een vervolg nodig was de afgelopen maanden om aan de hand van mijn expertoordeel middels een peer review alsnog de mogelijkheden van spoor 3 te beproeven. Hierbij moet worden opgemerkt dat in verschillende landen in de EU (b.v. Duitsland en Ierland) dit spoor reeds succesvol is doorlopen door een rekenkundige ondergrens wetenschappelijk te onderbouwen.

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 (Adviescollege Meten en Berekenen Stikstof 2020) en TNO (2022) over ‘cumulatie’ (het optellen van veel kleine bronnen onder de rekenkundige ondergrens 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 [de huidige rekenkundige ondergrens van 0,005 mol/ha/jaar, ap]. 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 [rekenkundige ondergrens, ap] 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 [de huidige rekenkundige ondergrens van 0,005 mol/ha/jaar, ap] 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 rekenkundige ondergrens het effect van cumulatie een rol mag spelen: 'De bijdragen van alle projecten aan de depositie beneden de rekgrens 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 rekenkundige ondergrens: '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 wetenschappelijk gezien geen ruimte toe – vanwege schijnzekerheid – om stikstofdeposities van individuele bronnen te berekenen en daar effecten aan toe te dichten waar de depositie lager is dan 1 mol/ha/jaar. Het uit 'voorzorg' proberen te voorkomen van 'cumulatie' van deposities lager dan 1 mol/ha/jaar 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 omdat de berekende deposities moeten worden afgerond naar nul. Er is wetenschappelijk gezien geen ruimte om de rekenkundige ondergrens toch lager te stellen dan 1 mol/ha/jaar. De argumentatie hier is vergelijkbaar met de argumentatie die geldt voor schijnzekerheid door rekenen voorbij een maximale rekenafstand.

Referenties

- Adviescollege Meten en Berekenen Stikstof. 2020. *Meer Meten, Robuuster Rekenen*. [Leden: Leen Hordijk, Jan Willem Erisman, Henk Eskes, Jaap Hanekamp, Maarten Krol, Pieter Levelt, Martijn Schaap en Wim 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: Arthur Petersen, Willem Halffman, Bert Holtslag, Birgit Loos en Annemarie van Wezel]. Bilthoven: RIVM, 7 februari 2024. https://www.rivm.nl/sites/default/files/2024-06/MIL_Scientific_Audit_2023_Final_Report.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
- Berkhout, Augustinus, Daan Swart, Hester Volten, Lou Gast, Marty Haaima, Hans Verboom, Guus Stefess, Theo Hafkenscheid en Ronald Hoogerbrugge. 2017. 'Replacing the AMOR with the miniDOAS in the ammonia monitoring network in the Netherlands'. *Atmospheric Measurement Techniques* 10 (11): 4099–4120.
- Commissie voor de Milieueffectrapportage. 2012. *Programmatistische Aanpak Stikstof (PAS): Advies van de Commissie m.e.r.* Rapport 2540-168. Utrecht: Commissie voor de Milieueffectrapportage. 12 juli 2012. <https://zoek.officielebekendmakingen.nl/blg-181405.pdf>
- CPB/MNP/Rand Europe. 2007. *Omgaan met Onzekerheid in Beleid*. [Redacteuren: Judith Mathijssen, Arthur Petersen, Paul Besseling, Adnan Rahman en Henk Don]. 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>
- 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>
- Douglas, Heather. 2009. *Science, Policy, and the Value-Free Ideal*. Pittsburgh: University of Pittsburgh Press.
- Douglas, Heather. 2023. 'The importance of values for science'. *Interdisciplinary Science Reviews* 48 (2): 251–263.
- EFSA. 2018a. 'Guidance on Uncertainty Analysis in Scientific Assessments'. *EFSA Journal* 16 (1): 5123.
- EFSA. 2018b. 'The principles and methods behind EFSA's Guidance on Uncertainty Analysis in Scientific Assessment'. *EFSA Journal* 16 (1): 5122.
- EFSA. 2019. 'Guidance on Communication of Uncertainty in Scientific Assessments'. *EFSA Journal* 17 (1): 5520.
- 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>
- Harding, S. 1991. *Whose Science? Whose Knowledge?* Ithaca, NY: Cornell University Press.
- 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>
- Irish Environmental Protection Agency. 2023. *Licence Application Instruction Note 1 (IN1): Assessment of the Impact of Ammonia and Nitrogen on Nature 2000 Sites from Intensive Agriculture Installations*. Wexford, Ireland: Environmental Protection Agency.
- Knuuttila, Tarja, Natalia Carrillo en Rami Roskinen, red. 2025. *The Routledge Handbook of Philosophy of Scientific Modeling*. Londen: Routledge.
- Longino, Helen. 1995. 'Gender, politics, and the theoretical virtues'. *Synthese* 104 (3): 383–397.
- Longino, Helen. 2001. *The Fate of Knowledge*. Princeton: Princeton University Press.
- PBL. (2013) 2014. *Leidraad voor Omgaan met Onzekerheden*. 2^e druk [van RIVM (2003a) en RIVM (2003b)]. [Auteurs: Arthur Petersen, Peter Janssen, Jeroen van der Sluijs, James Risbey, Jerome Ravetz, Arjan Wardekker en Hannah Martinson Hughes.] 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, gepubliceerd in 2013:
https://www.pbl.nl/sites/default/files/downloads/pbl_2014_guidance_for_uncertainty_assessment_and_communication_712_0.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>
- RIVM. 2003a. *RIVM/MNP Leidraad voor Omgaan met Onzekerheden: Leidraad voor Omgaan met Onzekerheden: Mini-Checklist & Quickscan Vragenlijst*. [Auteurs: Arthur Petersen, Peter Janssen, Jeroen van der Sluijs, James Risbey en Jerome Ravetz]. 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]
- RIVM. 2003b. *RIVM/MNP Leidraad voor Omgaan met Onzekerheden: Quickscan Hints & Acties-Lijst*. [Auteurs: Peter Janssen, Arthur Petersen, Jeroen van der Sluijs, James Risbey en Jerome Ravetz]. 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]

- RIVM. 2021. *Verkenning afstandsgrens project-specifieke depositieberekeningen*. RIVM-briefrapport 2021-0115. [Auteurs: Gerben Roest, Wim van der Maas, Addo van Pul, Paul Romeijn, Albert Bleeker, Sebastiaan Hazelhorst, Roy Wichink Kruit en Mark Wilmot]. Bilthoven: Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu. 9 juli 2021.
<https://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/2021-0115.pdf>
- Schlüter, Maja, Christa Brelsford, Paul Ferraro, Kirill Orach, Minghao Qiu en Martin Smith. 2023. 'Unraveling complex causal processes that affect sustainability requires more integration between empirical and modeling approaches'. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 120 (41): e2215676120.
- 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>
- Teledyne (2016). Beschrijving van Teledyne meetapparatuur in *Reference and Equivalent Methods used to Measure National Ambient Air Quality Standards (NAAQS) Criteria Air Pollutants: Volume I*. Washington, DC: US Environmental Protection Agency.
- TNO. 2022. *Afbakening in de modellering van depositiebijdragen van individuele projectbijdragen (Fase 2) Versie 3*. Referentie 100342643. [Auteurs: Jan Duyzer en Hans 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: Ernst Meijer en Emiel van Loon]. Den Haag: TNO. 15 augustus 2024.
<https://www.ipo.nl/nieuws/rekenkundige-ondergrens/>
- Walker, Warren, Poul Harremoës, Jan Rotmans, Jeroen van der Sluijs, Marjolein van Asselt, Peter Janssen en Martin Kreyer von Krauss. 2003. 'Defining uncertainty: A conceptual basis for uncertainty management in model-based decision support'. *Integrated Assessment* 4 (1): 5–17.

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 ('vanwe-

ge het PBL') van 2011–2016. In 2014 stapte hij over naar een voltijd baan 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).