



Kennisnotitie

Prognoseberekeningen van luchtkwaliteit en stikstofdepositie voor 2030-2040 onder invloed van klimaatverandering

1. Introductie

Het RIVM produceert om de twee jaar prognosekaarten voor luchtkwaliteit en stikstofdepositie op basis van berekeningen met het Operationele Prioritaire Stoffen (OPS) model (Sauter et al., 2023). Tot nu toe werd hierbij geen rekening gehouden met klimaatverandering. Op grond van recente KNMI klimaatscenario's leek het verstandig om dat vanaf nu wel te doen. Deze kennisnotitie beschrijft onderzoek naar mogelijkheden om bij de productie van de prognosekaarten rekening te houden met de verandering van het klimaat. De aanpassingen die bij de berekening van de prognosekaarten van GCN rapportage 2025 en Stikstofmonitoringsrapportage 2025 zijn toegepast, worden beschreven.

Uitgangspunt is, dat het gebruikte “weer van de toekomst” zo goed mogelijk past bij de meest recente klimaatscenario's van het KNMI. Omdat het weer op diverse plaatsen in de berekeningen een rol kan spelen, zijn drie deelaspecten onderzocht:

1. De directe invloed van het weer op de verspreidingsberekeningen van het OPS model.
2. De impact van weer op de chemische reacties die in de atmosfeer plaatsvinden.
3. De impact van het weer op de kalibratie van het model. Kalibratie is de correctie voor de systematische afwijking van de modelberekeningen ten opzichte van de metingen.

Het updaten van bovenstaande gegevens is onderdeel van het “Protocol Nieuwe Inzichten <https://www.rivm.nl/documenten/protocol-nieuwe-inzichten-luchtkwaliteit-en-stikstofdepositie>” zoals dat tussen de ministeries van LNV en IenW is afgesproken. Daarmee worden, via een afgesproken schema, de gegevens actueel gehouden.

2. Klimaatscenario's

Achtergrond en uitgangspunten

Onder invloed van klimaatverandering kunnen voor verspreiding, chemische conversie en depositie relevante meteorologische omstandigheden structureel veranderen (Jacob and Winner, 2009). Bij het maken van prognosekaarten kan het daarom van belang zijn om rekening te houden met zulke effecten. We willen dat doen door zo goed mogelijk aan te sluiten bij de meest recente KNMI-klimaatscenario's voor Nederland, KNMI'23 (Van Dorland et al., 2023).

OPS kan momenteel niet rechtstreeks aangedreven worden met uitvoer van klimaatmodellen of de door het KNMI geproduceerde tijdreeksen van mogelijk toekomstige weergegevens: 1) niet alle in OPS benodigde variabelen zijn voorhanden; 2) de temporele resolutie van beschikbare klimaatdata is te laag.

RIVM

A. van Leeuwenhoeklaan 9
3721 MA Bilthoven
Postbus 1
3720 BA Bilthoven
www.rivm.nl

T 088 689 89 89

Auteurs:

Ronald Hoogerbrugge
Cor Jacobs
Eric van der Swaluw
Ruben Verweij
Koen Siteur
Wilco de Vries

Centrum:
MIL

Contact:
ronald.hoogerbrugge@rivm.nl

Kenmerk:
KN-2025-0051

DOI:
10.21945/RIVM-
KN-2025-0051

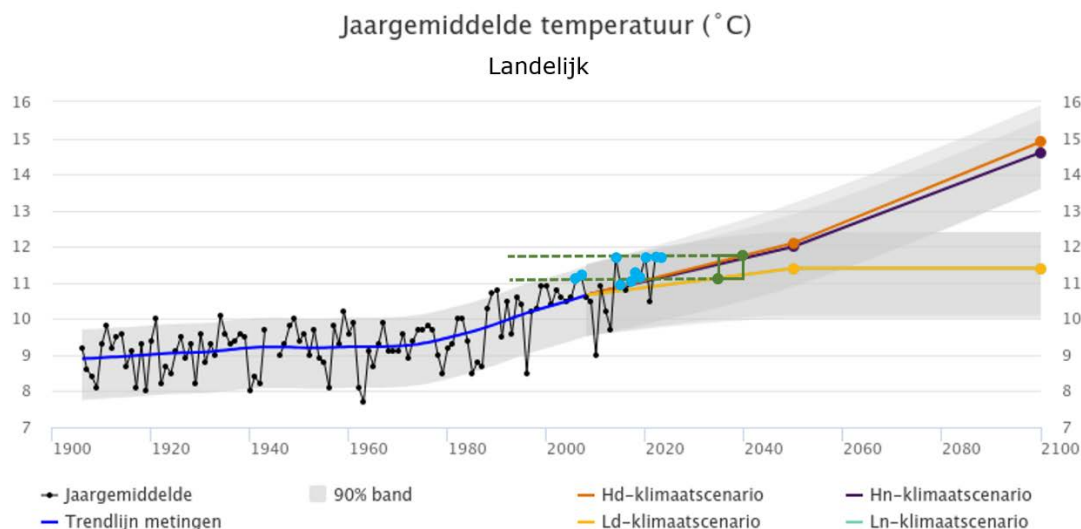
Datum:
01-10-2025

Om deze redenen is onderzocht of een *selectie* van recente, gepasseerde jaren te vinden is, waarvan de gemiddelde condities passen bij KNMI'23. De meteorologische gegevens staan dan immers al klaar voor gebruik in OPS én voor de berekening van de chemische conversiefactoren. Omdat het onmogelijk is om alle meteorologische grootheden te laten overeenstemmen met de scenario's hebben we - met het oog op ons doel - gelet op jaargemiddelde luchttemperatuur, neerslagsom en windsnelheid. Deze grootheden spelen een hoofdrol bij verspreiding, chemische conversie, en natte en droge depositie. Daarnaast beïnvloeden ze emissies van ammoniak en stikstofoxiden uit de landbouw.

Selectie van jaren

De selectie van de jaren is gebaseerd op de gegevens gepubliceerd op het klimaatdashboard van het KNMI (knmi.nl/klimaatdashboard). Figuur 1 laat het verloop van de jaargemiddelde landelijke temperatuur zien, van 1900-2023. In de figuur staan ook de projecties op basis van KNMI'23 (Van Dorland et al., 2023). Aan deze figuur van het dashboard hebben we een rechthoek en stippelijnen toegevoegd om de bandbreedte van de klimaatscenario's voor de periode rond 2035¹ te illustreren. De bandbreedte is hier gegeven door het temperatuurverschil tussen het koelste scenario (Ln of Ld) in 2035 en het warmste (Hd) in 2040 (gemarkeerde hoekpunten).

Figuur 1. Waargenomen jaargemiddelde temperaturen en verwachte trends volgens KNMI'23. De horizontale groene streepjeslijnen en de rechthoek symboliseren de bandbreedte van de KNMI'23 scenario's voor 2035-2040. De blauwe punten markeren de temperatuur van de jaren in de "warmste set". Zie ook hoofdstuk 2.



Acht recente jaren blijken binnen de bandbreedte van de klimaatscenario's te vallen. Deze jaren zijn dan ook als eerste geselecteerd. Omdat bij het maken van prognoses een reeks van 10 jaren wordt gebruikt (Hoogerbrugge et al., 2023), zijn nog twee extra jaren gekozen waarvan de temperatuur zo dicht mogelijk tegen de ondergrens van de bandbreedte ligt. Bij gelijke temperatuurgemiddelden hebben we in eerste instantie gelet op neerslagsom en windsnelheid, zowel qua gemiddelde als variabiliteit binnen de resulterende set van 10 jaren. Omdat de jaar-op-jaar variaties van deze grootheden voornamelijk veel groter zijn dan de trend leverde dit echter geen extra keuzegrond op. Daarom hebben we uiteindelijk de meest recente jaren gekozen, met het oog op de kalibratie (zie paragraaf over kalibratie). Dit leidt tot de volgende selectie ("warmste

¹ In de KNMI'23 kerncijfers is de eerstvolgende tijdhorizon 2033, met één scenario

set”): 2006–2007, 2014–2015, 2017–2020, 2022–2023. Omdat deze set slechts twee jaren verschilt van de simpelere keuze 2014-2023 (i.e. de 10 meest recente jaren op het moment van deze analyse) is ook onderzocht tot welke verschillen deze keuze als “weer van de toekomst” zou leiden, zowel qua klimaat als qua verspreiding en depositie.

Tabel 1 laat de temperatuur van beide sets zien, zowel op jaar- als seizoensbasis. Verder zijn ter vergelijking ook de temperatuurgegevens voor de “*huidige set*” (2005–2014) opgenomen. De warmste set valt met een gemiddelde temperatuur van 11,4 °C binnen de bandbreedte volgens KNMI'23. Dat geldt met 11,3 °C ook voor de afgelopen 10 jaren. Daarentegen is de huidige set duidelijk te koel in vergelijking met KNMI'23. De variabiliteit van de jaargemiddelden is met name voor de warmste set duidelijk lager dan de natuurlijke variabiliteit (vergelijk de verticale spreiding van de met blauw gemarkeerde punten in Figuur 1 met de breedte van de grijze band). Dit geldt in iets mindere mate voor de afgelopen 10 jaren, vooral door de wat lagere temperatuur van 2021. In beide gevallen blijkt er wel sprake te zijn van een grotere en meer realistische variabiliteit van de onderliggende seizoensgemiddelde temperaturen (niet getoond). De huidige set rond 2009 spant met de jaargemiddelde temperaturen al ongeveer de hele natuurlijke variabiliteit op.

Qua seizoensgemiddelde temperatuur past de warmste set goed bij KNMI'23 voor de lente, zomer en herfst, mede gezien de bandbreedte van de 30-jaren gemiddelden voor de scenario's (afhankelijk van het seizoen, minimaal $\pm 0,4$ °C; zie klimaatscenarios-data.knmi.nl/kerncijfers). Ook de zomer en herfst in de afgelopen 10 jaren passen goed bij KNMI'23; de lente pakt wat koeler uit. De winters in beide sets zijn aan de warme kant. In de huidige set zijn alle seizoenen koeler dan volgens KNMI'23, ook de winter.

Tabel 1. Vergelijking van gemiddelde temperaturen, neerslagsommen en windsnelheid voor de verschillende sets van jaren. Windsnelheid geldt voor Cabauw. 10 Warmste: 2006-2007, 2014-2015, 2017-2020, 2022-2023; 10 Meest recente: 2014-2023; 10 Huidige selectie: 2005-2014.

	Gemiddelde temperatuur (°C) per jaar of seizoen					Neerslag som (mm)	Wind snelheid (m/s)
	Jaar	Winter	Lente	Zomer	Herfst	Jaar	Jaar (Cabauw)
Jaren in selectie (scenario):							
10 Warmste	11,4	5,0	10,1	18,0	12,1	875	4,15
10 Meest recente	11,3	5,2	9,8	18,0	12,0	870	4,07
Huidige selectie	10,6	3,7	9,7	17,2	11,6	857	4,17
Vergelijk met:							
KNMI'23 laagste in 2035-2040	11,2	4,3	10,2	18,1	12,0	846	3,74
KNMI'23 hoogste in 2035-2040	11,6	4,7	10,5	18,6	12,4	863	4,20

Voor neerslagsommen blijkt de variabiliteit veel groter te zijn dan de trend tot 2040. Dat geldt ook voor windsnelheid, die in sommige delen van Nederland een dalende trend vertoont (knmi.nl/klimaatdashboard). Dat laatste hangt waarschijnlijk meer samen met het ruwer wordende Nederlandse landoppervlak dan met klimaatverandering (KNMI, 2020). Deze constatering betekent dat in feite elke mogelijke combinatie van jaren qua neerslagsom en windsnelheid zou passen bij KNMI'23, voor 2035-2040. Binnen de

nieuwe selecties (warmste set, afgelopen 10 jaren) is de variabiliteit vergelijkbaar met de natuurlijke variabiliteit. Bij neerslag komt dat vooral omdat één extreem droog en één extreem nat jaar (respectievelijk 2018 en 2023) in de sets zitten.

Jaargemiddelde neerslagsommen zijn ook in Tabel 1 opgenomen. De neerslagsommen van de 10 warmste en de 10 meest recente jaren zijn iets hoger dan volgens KNMI'23, vooral door het extreem natte jaar 2023. In deze sets zitten echter ook droge zomers (2018, 2019). Al met al passen beide sets bij de trend van toenemende jaarneerslag, ondanks drogere zomers (Van Dorland, 2023). De huidige set past qua gemiddelde neerslag bij een toekomstig klimaat, maar omvat minder extremen.

Landelijke cijfers voor windsnelheid zijn niet beschikbaar via het KNMI-dashboard. Daarom evalueren we de windsnelheden van de sets aan de hand van gegevens van het KNMI station bij Cabauw, ongeveer 23 km ten zuidwesten van De Bilt. Op dit station was vooral in de periode 1980-2010 sprake van een dalende trend in de windsnelheid. Met name de trend in de scenario's is hier klein ten opzichte van de jaar-op-jaar variaties, of zelfs afwezig (knmi.nl/klimaatdashboard). De gemiddelde windsnelheid op Cabauw ligt voor alle sets binnen de bandbreedte van de KNMI'23-scenario's, maar ligt meer in de buurt van bovengrens dan van de ondergrens van de scenario's.

3. Invloed van het weer op de verspreiding en depositie

Berekeningen

De invloed van het weer op de door OPS berekende verspreiding en depositie is onderzocht door de in de vorige paragraaf beschreven drie meteorologische 10-jaren sets aan OPS aan te bieden en daarbij emissies, achtergrondkaarten en chemische conversies gelijk te laten.

De meteorologische waarnemingen van de in OPS gebruikt KNMI-stations voor de drie sets zijn eerst verwerkt in METPRO. Dit is een preprocessor van OPS, die de weergegevens omzet naar statistische beschrijvingen van het weer en daaruit afgeleide variabelen die belangrijk zijn voor verspreiding en depositie. Daarbij wordt één landsbrede statistiek gegenereerd, naast een statistiek voor elk van de 6 OPS-meteo-districten (Sauter et al., 2023).

Op basis van de in METPRO verwerkte gegevens zijn berekeningen uitgevoerd met OPS v5.1.1.0 (18 jan 2023), met emissies, achtergrondkaarten en chemische conversiefactoren uit 2020. De keuze voor dit jaar is hier niet kritisch, omdat we alleen het meteo-effect van de verschillende sets voor toekomstig weer willen schatten. Voor deze eerste schatting zijn concentraties op een hoogte van 3,5 m en deposities berekend op 210 receptorlocaties verdeeld over Nederland. De berekeningen zijn uitgevoerd voor NH₃, NO_x, PM en, met het oog op vorming van deeltjes, ook SO₂. Resultaten voor secundaire stoffen zijn gebruikt om resultaten voor primair fijnstof aan te vullen tot totaal PM, met onderscheid naar PM₁₀ en PM_{2,5}, volgens de bij de productie van GCN-kaarten gebruikte methode. Daarbij worden ook geschatte concentraties van zeezout en aerosolen van organisch materiaal opgeteld (Mijnen-Visser et al., 2025).

Resultaten

a) Meteorologische omstandigheden

Tabel 2 toont de door METPRO gegenereerde weerstatistiek voor temperatuur, neerslag en wind, de daaruit afgeleide variabelen die van belang zijn voor verspreiding en depositie en een aantal ondersteunende gegevens. De gemiddelde temperatuur, windsnelheid en neerslagsom wijken wat af van de gegevens op het KNMI-

klimaatdashboard, omdat de weging en interpolatie over het land is afgestemd op de OPS-regio's. Daarbij worden bovendien andere KNMI-stations geselecteerd. Met name bij windsnelheid ontstaat daardoor een relatief groot verschil met de hiervoor gepresenteerde gegevens.

De relatieve verschillen (trends) blijven vergelijkbaar met die volgens het dashboard, maar de windsnelheid in de set van 10 warmste jaren pakt relatief laag uit. Dit heeft mogelijk belangrijke gevolgen: de wrijvingssnelheid en de daaraan gerelateerde menglaaghoogte zijn ook lager, de atmosferische weerstand² voor depositie is iets hoger. Daardoor kunnen concentraties hoger worden, bij verder gelijke omstandigheden. In de set met de afgelopen 10 jaren is de windsnelheid ook lager, maar het verschil met de huidige set is kleiner. Toch zijn de wrijvingssnelheid en menglaaghoogte lager dan bij de warmste jaren en de weerstanden hoger. Dit komt mede doordat METPRO een iets andere frequentieverdeling over windrichting- en stabiliteitsklassen genereert.

De neerslagsom neemt toe, vooral door de bijdrage van 2023. Ook de gemiddelde neerslagintensiteit neemt iets toe, maar de neerslagduur neemt juist iets af. Dit is consistent met de verwachting dat klimaatverandering tot intensere buien zal leiden, afgewisseld met langere droge periodes (Van Dorland et al., 2023). De neerslagkarakteristiek heeft een sterke invloed op natte depositie.

Tabel 2. Landsbrede weerstatistieken uit METPRO, voor lokale berekeningen en verschillen tussen de warmere sets van jaren en de huidige set.

Grootheid	Scenario			Verskil met huidig	
	Huidig (2009- 2014)	Afgelopen 10 (2014- 2023)	10 warmste (2006,2007 i.p.v. 2016,2021)	Afgelopen 10 - Huidig (°C of %)	10 warmste - Huidig (°C of %)
Temperatuur (°C)	10,4	11,1	11,2	0,7	0,8
Jaarlijkse neerslagsom (mm)	806	835	830	3,6	3,0
Neerslagkans (% uren met neerslag)	7,27	7,32	7,21	0,7	-0,8
Neerslagintensiteit (mm/uur)	1,31	1,38	1,38	5,3	5,3
Neerslagduur per gebeurtenis (uur)	1,87	1,84	1,81	-1,6	-3,2
Windsnelheid (m/s)	3,49	3,38	3,08	-3,2	-11,7
Wrijvingssnelheid (m/s)	0,242	0,228	0,234	-5,8	-3,3
Menglaaghoogte (m)	173	163	167	-5,8	-3,5
Atmosferische depositieweerstand 4 m (s/m)	49,3	51,0	50,0	3,4	1,4
Emissie-correctiefactor NH ₃ (-)	1,10	1,14	1,16	3,6	5,5
Zonnestraling (J/cm ²)	42,8	45,2	44,9	5,6	4,9

² Een hogere atmosferische weerstand duidt op minder turbulentie en bemoeilijkt depositie.

De emissiecorrectiefactor voor NH_3 is een indicatie van het effect van het weer op NH_3 -emissies bij aanwending van mest op landbouwpercelen. De factor is het resultaat van berekeningen aan de variatie van deze emissies binnen een jaar.

Deze berekeningen leiden ook tot variaties tussen jaren. De factor houdt rekening met temperatuur, windsnelheid en, via neerslagkans, vochtigheid. Hij geeft de relatieve verandering aan van deze emissies ten opzichte van een referentiejaar (Sauter et al., 2023). Deze indicator suggereert een bijna 4 % hogere aanwendingsemissie van NH_3 in de set met de afgelopen 10 jaren dan in de huidige set, en een bijna 6 % hogere emissie bij de warmste 10 jaren. Soortgelijke factoren worden binnen OPS zelf ook berekend voor stalemissies van NH_3 en NO_x (niet getoond in de tabel). Ook voor deze emissies verwachten we een lichte toename bij een hogere temperatuur.

b) Ammoniak

Tabel 3 toont de over de receptorpunten gemiddelde NH_3 en NH_4^+ concentraties en deposities. Voor beide sets met warmere jaren zien we duidelijke verschillen met de huidige set. De concentratieverschillen bedragen 7-8 % voor NH_3 en 8-11 % voor NH_4^+ . Dit is te verklaren door een hogere emissie uit landbouw (zie vorige paragraaf) en een lagere menglaag. Ook de afnemende depositie-snelheid draagt bij aan een hogere NH_3 -concentratie. Deze afname compenseert het effect van de toegenomen concentratie op de droge depositie van NH_3 vrijwel helemaal. De depositiesnelheid blijft vrijwel gelijk voor NH_4^+ . Mede daardoor neemt de droge depositie van NH_4^+ toe met ruim 11 %. Natte depositie neemt voor beide stoffen iets toe. Omdat zowel natte depositie van NH_x als de droge depositie van NH_4^+ een relatief klein deel zijn van de totale depositie blijft het effect op totale depositie van NH_x beperkt tot ~2 %.

Tabel 3. Effect van meteorologische verschillen op gemiddelde depositie en concentratie van NH_3 en secundaire producten.

Grootheid	Scenario			Verskil met huidig	
	Huidig (2005-2014)	Afgelopen 10 (2014-2023)	10 warmste (2006,2007 i.p.v. 2016,2021)	Afgelopen 10 - Huidig (%)	10 warmste - Huidig (%)
NH_3 concentratie ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	5,00	5,41	5,35	8,2	7,0
NH_4 concentratie ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	1,30	1,44	1,41	10,8	8,5
eff. $\text{NH}_3 > \text{NH}_4$ chem. conv. snelheid (%/uur)	6,50	6,48	6,48	-0,3	-0,3
droge NH_x depositie (als NH_4) (mol/ha/jaar)	555	558	560	0,5	0,9
droge NH_3 depositie (als NH_4) (mol/ha/jaar)	534	535	537	0,2	0,6
droge NH_4 depositie (als NH_4) (mol/ha/jaar)	20,6	22,9	22,9	11,2	11,2
effectieve droge depositiesnelheid NH_3 (cm/s)	0,576	0,533	0,541	-7,5	-6,1
effectieve droge depositiesnelheid NH_4 (cm/s)	0,091	0,091	0,092	0,0	1,1

	Scenario			Verschil met huidig	
Grootheid	Huidig (2005-2014)	Afgelopen 10 (2014-2023)	10 warmste (2006,2007 i.p.v. 2016,2021)	Afgelopen 10 - Huidig (%)	10 warmste - Huidig (%)
natte NH _x depositie (als NH ₄) (mol/ha/jaar)	319	334	329	4,7	3,1
natte NH ₃ depositie (als NH ₄) (mol/ha/jaar)	225	236	232	4,9	3,1
natte NH ₄ depositie (als NH ₄) (mol/ha/jaar)	94,7	98,4	97,2	3,9	2,6
effectieve verwijdering door natte depositie NH ₃ (%/uur)	4,68	4,63	4,54	-1,1	-3,1
NH _x depositie (als NH ₄) (mol/ha/jaar)	874	892	889	2,1	1,7

c) Stikstofoxides

Tabel 4 toont de resultaten voor NO_x en bijbehorende secundaire producten (NO₃⁻, HNO₃). Het grootste relatieve verschil zien we bij natte depositie van NO_x. Op basis van de afgelopen 10 jaren neemt die met bijna 10 % toe ten opzichte van de huidige set. Bij de warmste 10 jaren is het effect ruim 5 %. De bijdrage van natte NO_x depositie aan de totale NO_y depositie is echter beperkt. Effecten op concentraties en droge depositie blijven binnen 4 % voor de beide warmere datasets. Voor de secundaire producten is het effect op de droge depositie hier afgerond zelfs 0.

Tabel 4. Effect van meteorologische verschillen op gemiddelde depositie en concentratie van NO_x en secundaire producten.

	Scenario			Verschil met huidig	
Grootheid	Huidig (2005-2014)	Afgelopen 10 (2014-2023)	10 warmste (2006,2007 i.p.v. 2016,2021)	Afgelopen 10 - Huidig (%)	10 warmste - Huidig (%)
gemiddelde NO _x concentratie (µg/m ³)	13,2	13,6	13,3	3,0	0,8
NO ₃ +HNO ₃ concentratie (µg/m ³)	2,76	2,86	2,82	3,6	2,2
eff. NO _x > NO ₃ +HNO ₃ chemische conversie (%/uur)	3,47	3,47	3,47	-0,1	-0,1
NO ₃ _AER concentratie (µg/m ³)	2,47	2,56	2,53	3,6	2,4
HNO ₃ concentratie (µg/m ³)	0,289	0,299	0,295	3,5	2,1
NO ₃ _C concentratie (µg/m ³)	0,738	0,764	0,756	3,5	2,4
NO ₃ _F concentratie (µg/m ³)	1,73	1,80	1,77	4,0	2,3
droge NO _y depositie (als NO ₃ +HNO ₃) (mol/ha/jaar)	163	167	167	2,5	2,5

Grootheid	Scenario			Verskil met huidig	
	Huidig (2005- 2014)	Afgelopen 10 (2014- 2023)	10 warmste (2006,2007 i.p.v. 2016,2021)	Afgelopen 10 - Huidig (%)	10 warmste - Huidig (%)
droge NO _x depositie (als NO ₃ +HNO ₃) (mol/ha/jaar)	115	119	118	3,5	2,6
droge NO ₃ +HNO ₃ depositie (mol/ha/jaar)	48,3	48,3	48,3	0,0	0,0
eff. droge depositiesnelheid NO (cm/s)	0,127	0,128	0,130	0,8	2,4
eff. droge depositiesnelheid NO ₃ +HNO ₃ (cm/s)	0,344	0,332	0,336	-3,5	-2,3
natte NO _y depositie (als NO ₃ +HNO ₃) (mol/ha/jaar)	133	138	135	3,8	1,5
natte NO _x depositie (als NO ₃ +HNO ₃) (mol/ha/jaar)	26,0	28,5	27,4	9,6	5,4
natte NO ₃ +HNO ₃ depositie (mol/ha/jaar)	107	109	107	1,9	0,0
eff. verwijdering door natte depositie NO _x (%/uur)	0,296	0,319	0,308	7,8	4,1
eff. verwijdering door natte depositie NO ₃ +HNO ₃ (%/uur)	5,11	5,20	5,10	1,9	-0,3
NO _y depositie (als NO ₃ +HNO ₃) (mol/ha/jaar)	296	305	301	3,0	1,7

d) PM

Verschillen voor de gemiddelde PM₁₀ en PM_{2,5} concentraties, getoond in Tabel 5, blijven beperkt tot ~1,5 à 2 %. Hierin zijn effecten van het weer op concentraties en depositie van secundaire anorganische aerosolen (uit NH₃, NO_x en SO₂) en primair PM verwerkt. Zeezout en organische aerosolen kunnen een aanzienlijke bijdrage leveren aan het totaal en zijn bij deze berekeningen gelijk gehouden.

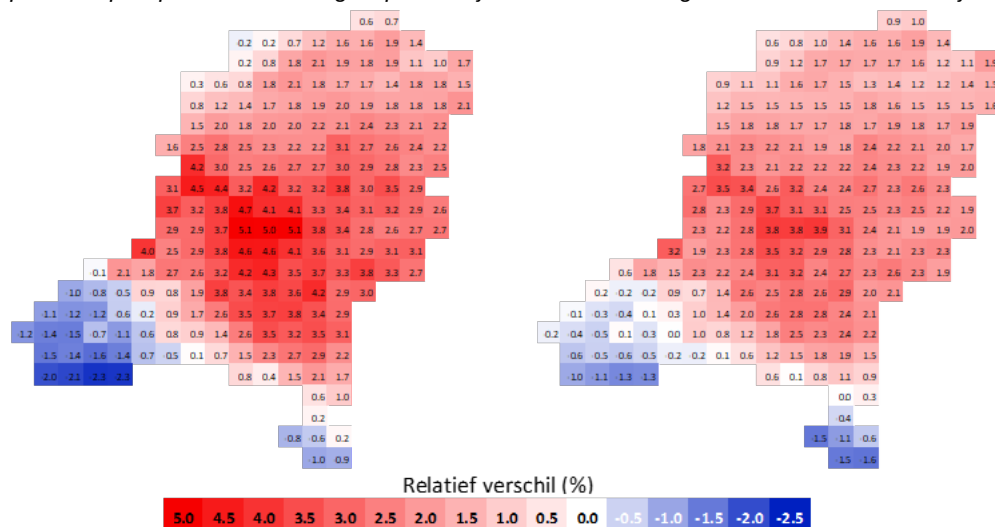
Tabel 5. Effect van meteorologische verschillen op de gemiddelde PM concentratie.

Grootheid	Scenario			Verskil met huidig	
	Huidig (2005- 2014)	Afgelopen 10 (2014- 2023)	10 warmste (2006,2007 i.p.v. 2016,2021)	Afgelopen 10 - Huidig (°C of %)	10 warmste - Huidig (%)
gemiddelde PM ₁₀ concentratie (µg/m ³)	10,2	10,4	10,4	1,8	1,4
gemiddelde PM _{2.5} concentratie (µg/m ³)	7,12	7,26	7,23	2,1	1,6

e) Ruimtelijke patronen

De tot nu toe gegeven landelijk gemiddelde verschillen geven weliswaar een goede eerste indicatie van de effecten van het veranderende weer, maar meestal is sprake van duidelijke ruimtelijke patronen in de verschillen. Dit illustreren we aan de hand van de PM_{2,5}-concentraties, die volgens de berekeningen gemiddeld iets toenemen bij gebruik van de warmere reeksen (rond 2 %, zie Tabel 5). Figuur 2 laat de daarbij horende relatieve concentratieverschillen per receptorpunt zien. De grootste, bovengemiddelde toenames zien we in het midden van het land. Maar in Zeeland en het delen van Limburg worden zelfs afnemende concentraties berekend. Dergelijke verschilpatronen ontstaan door complexe interacties tussen diverse meteorologische omstandigheden, emissie, concentratie, depositie en chemische conversie en zullen in een vervolgstudie verder geanalyseerd worden.

Figuur 2. Effect van mogelijk toekomstig weer op de PM_{2,5} concentratie: berekend relatief verschil per receptorpunt. Links: afgelopen 10 jaren t.o.v. huidig; rechts: warmste 10 jaren t.o.v. huidig.



4. Invloed van toekomstige emissies en klimaat op de chemische reacties in de atmosfeer

Inleiding

De vorming van secundaire anorganische aerosolen (*secondary inorganic aerosols*, SIA's) wordt in het OPS-model beschreven op basis van chemische omzettingskaarten, die berekend worden met het EMEP4NL-model. Verder worden de secundaire organische aerosolen (SOA's, gevormd door onder andere VOC emissies) gebruikt in de PM berekeningen voor GCN. Deze concentraties worden ook door EMEP4NL berekend. Omdat de vorming van SIA's en SOA's beide beïnvloed kunnen worden door meteorologische omstandigheden, is er onderzoek gedaan naar de te verwachten effecten van het veranderende klimaat op de vorming van deze stoffen. Hiervoor is een gevoeligheidsstudie uitgevoerd met behulp van EMEP4NL, voor vier meteorologische jaren (2009, 2018, 2020, 2023). Aanvullend zijn er voor twee scenario's (meteorologische jaren 2009 en 2020) OPS berekeningen uitgevoerd, om het effect van een andere chemische conversiekaart op de berekeningen van de SIA concentraties in OPS te kunnen bepalen. In de OPS berekeningen is de langjarige meteo 2005-2014 gebruikt, de enige aanpassing is dus de nieuwe chemische conversiekaart voor 2020. Het jaar 2009 is tot nu toe altijd gebruikt als meteorologisch jaar in de EMEP4NL simulaties ten behoeve van het uitvoeren van de prognose-berekeningen met het OPS

model. Voor EMEP4NL wordt één referentiejaar gebruikt, omdat het teveel rekentijd kost om een meerjarige reeks door te rekenen. Het jaar 2009 is destijds gekozen, omdat het een gemiddeld meteorologisch jaar is voor de periode 2005-2014. Het lijkt echter beter om een jaar te nemen dat representatiever is voor het toekomstige klimaat. Op basis van de jaargemiddeldetemperatuur, windsnelheid en neerslag is 2020 geselecteerd als meest geschikte referentiejaar voor het toekomstige klimaat. Ter vergelijking worden ook 2018 (warm en extreem droog) en 2023 (warm en extreem nat) doorgerekend.³ De twee extreme jaren zijn gekozen om effecten van de maximale variatie in neerslag in beeld te brengen. Deze twee extremen wijken naar verwachting ook in een toekomstig klimaat af van het gemiddelde.

Methode

Het EMEP4NL model⁴ is gebaseerd op het EMEP MSC-W model⁵ versie rv5.00. Het gebruikt 21 verticale lagen (0-15 km) met de hoogste horizontale resolutie boven Nederland (ongeveer 1.3 x 2.1 km). De meteorologische invoergegevens zijn berekend met behulp van het Weather Research Forecast (WRF) model versie 3.8.⁶ Het is een Euleriaans grid model met een uitgebreide chemische module.

De daarmee berekende vorming van de SIA's ammoniumnitraat en ammoniumsulfaat uit de precursors ammoniak (NH_3), stikstofoxiden (NO_x) en zwaveloxiden (SO_x), en ook de vorming van HNO_3 uit NO_x , wordt in elke tijdstap van EMEP4NL bijgehouden met een module die ontwikkeld is door het RIVM. Op basis hiervan worden kaarten berekend van de jaargemiddelde chemische conversiefactor. Deze kaarten worden vervolgens in het OPS model toegepast om uit te rekenen hoeveel SIA's er uit de door OPS berekende precursorgassen ontstaan.

De emissieraming voor 2035 is gebruikt, gebaseerd op de totalen uit de Clean Air Outlook 2 voor de emissies van alle landen. Voor de Noordzee is de raming van VITO uit 2014 gebruikt. Deze is vervolgens geschaald met de relatieve ontwikkeling tussen 2030 en 2035/2040 op basis van de zeescheepvaartemissies uit de KEV22, om zo een schatting voor 2035 te bepalen. Voor overige zeeën en ontbrekende landen zijn voor 2035 de emissies overgenomen van 2030.

Resultaten: chemische conversiefactoren en secundaire anorganische aerosolen

De landelijk gemiddelde jaarlijkse chemische conversiefactoren zoals berekend door EMEP zijn weergegeven in Tabel 6 voor vier meteojaren (2009, 2018, 2020, 2023). De effecten van het gebruik van het voorgestelde referentiejaar 2020 in plaats van 2009 zijn relatief beperkt in termen van het landelijk gemiddelde. Lokaal zijn er wel verschillen. Verder vallen de conversiefactoren voor 2020 tussen die voor de twee extreme jaren 2018 (droog) en 2023 (nat) in, voor alle conversiefactoren behalve de omzetting van NO_x naar HNO_3 . Dit geeft aan dat 2020 inderdaad een geschikte keuze is om toe te passen als referentiejaar voor een toekomstig klimaat. Het sluit goed aan bij de klimaatscenario's van KNMI'23 en geeft een effect wat tussen de twee te verwachten extremen in valt voor de belangrijkste conversiefactoren.

³ Zie [KNMI - Klimaatdashboard](#) voor een vergelijking van de verschillende jaren.

⁴ Zie <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2021.118183> voor meer details over het EMEP4NL model.

⁵ Zie <https://doi.org/10.5194/acp-12-7825-2012> voor de modelbeschrijving.

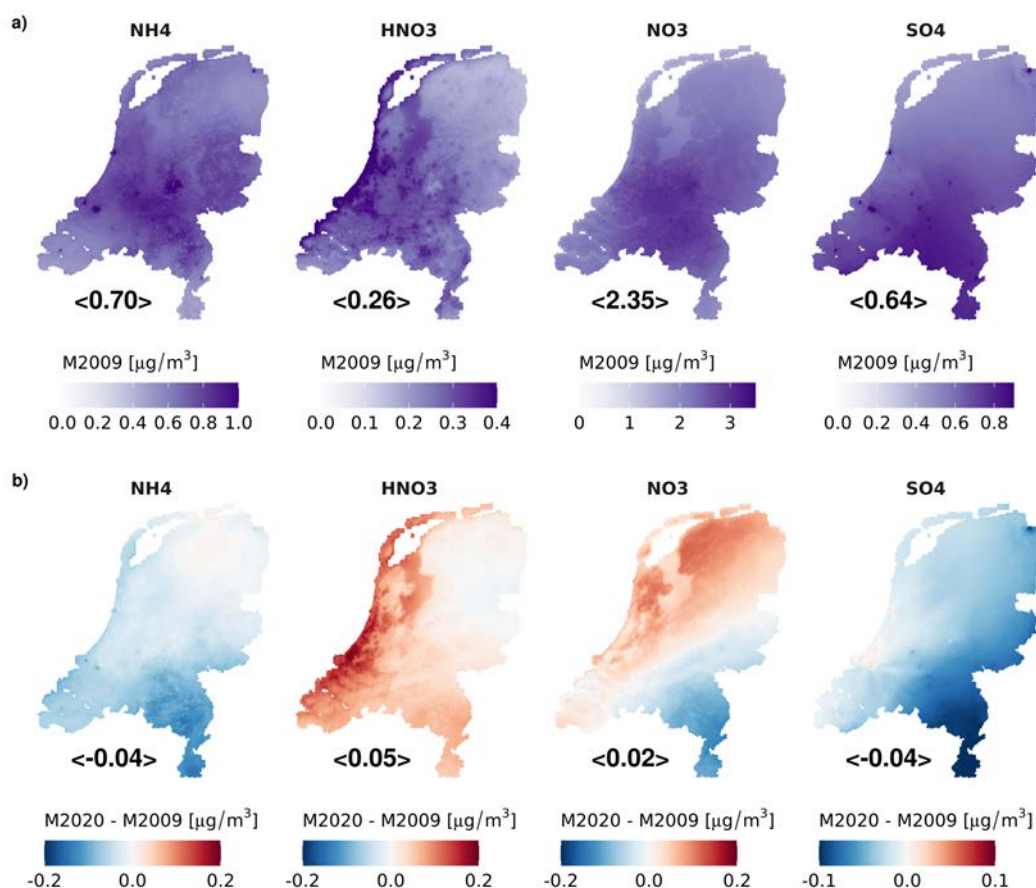
⁶ Zie <https://doi.org/10.5065/D68S4MVH>

Tabel 6. De gemiddelde chemische conversiefactoren uitgerekend met EMEP4NL voor de verschillende meteojaren.

Grootheid (% / h)	Scenario	Meteo 2009	Meteo 2018	Meteo 2020	Meteo 2023	Meteo 2018 - 2009	Meteo 2020 - 2009	Meteo 2023 - 2009
Conv. NH ₃		3.15	2.37	2.75	2.88	-0.78	-0.40	-0.27
Conv. NO _x (HNO ₃)		4.59	4.60	4.53	4.86	+0.01	-0.06	+0.27
Conv. NO _x (NO ₃ aer.)		5.05	5.01	4.91	5.27	-0.04	-0.13	+0.22
Conv. SO ₂		4.58	3.96	4.59	5.66	-0.62	+0.01	+1.08

Met deze chemische conversiekaarten berekend op basis van 2009 en 2020 zijn ook OPS berekeningen uitgevoerd, om het effect op de (ongekalibreerde) jaarlijkse SIA concentraties vast te kunnen stellen. De resultaten hiervan zijn te zien in Figuur 3. Vooral lokaal leidt de aanpassing van de chemische conversiefactoren tot verschillen. Voor NH₄ en SO₄ is dit voornamelijk een afname in Limburg en het oosten van Noord-Brabant, voor HNO₃ gaat het om een toename aan de westkust. Voor NO₃ is er een toename in het westen/noorden, gepaard met een afname in het oosten/zuiden van het land. De verschillen zijn relatief het grootste voor de concentratie HNO₃, voor de overige concentraties zijn de verschillen beperkt in termen van het landelijk gemiddelde. Ondanks het relatief beperkte effect, is het verstandig om deze aanpassing door te voeren. Vanuit wetenschappelijk oogpunt is het logischer om een referentiejaar te gebruiken dat goed aansluit bij de KNMI'23 klimaatscenario's. De verwachting is dat dit leidt tot een realistischer beeld van de gemodelleerde concentraties in de toekomst.

Figuur 3. Effect van het aanpassen van de chemische conversiefactoren berekend door EMEP4NL, op de verschillende concentraties berekend door OPS. De aanpassing betreft het gebruik van het meteorologische jaar 2020 in plaats van 2009 in EMEP4NL. In OPS is de langjarige meteo 2005-2014 gebruikt. a) De ongekalibreerde SIA concentraties berekend door OPS, met de chemische conversiefactoren uit EMEP4NL, meteojaar 2009. b) Het verschil in ongekalibreerde SIA concentraties, wanneer de conversiefactoren voor 2009 vervangen worden door die voor 2020.



Resultaten: organische aerosolen

Het effect van het aanpassen van het meteojaar op de SOA concentraties is te zien in Tabel 7. Omdat de ruimtelijke variatie in de SOA concentraties beperkt is, geeft het landelijk gemiddelde voldoende informatie om het effect van de aanpassing te beoordelen. Voor het jaar 2018 (extreem droog) zijn de verschillen het grootst en nemen de concentraties toe. Voor 2023 (extreem nat) nemen de SOA concentraties t.g.v. antropogene VOC emissies iets af en de SOA concentraties t.g.v. natuurlijke VOC bronnen iets toe. Wederom ligt het jaar 2020 qua effect tussen de twee extreme jaren in. Vanwege het hoge aantal chemische reacties die van toepassing zijn bij de chemie van SOA's, is het doorrekenen hiervan complex. Daarom is het mogelijk dat bij het toepassen van aangepaste chemische rekenschema's in EMEP4NL, de SOA concentraties ook zullen veranderen. Los daarvan concluderen we dat het referentiejaar 2020 voor toekomstscenario's in EMEP4NL ook voor de SOA concentraties een goed beeld geeft op basis van de huidige rekenmethode.

Tabel 7. De gemiddelde SOA concentraties uitgerekend met EMEP4NL voor de verschillende meteorjaren.

Grootheid ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Scenario	Meteo 2009	Meteo 2018	Meteo 2020	Meteo 2023	Meteo 2018 - 2009	Meteo 2020 - 2009	Meteo 2023 - 2009
Concentratie SOA, anthropogeen		0.078	0.098	0.080	0.074	+0.020	+0.002	-0.004
Concentratie SOA, biogeen		0.309	0.422	0.376	0.345	+0.114	+0.067	+0.036

Conclusie

EMEP4NL wordt toegepast binnen het GCN project om de chemische conversiefactoren van SIA's voor OPS te berekenen en de concentraties van SOA's te modelleren. Er is onderzocht wat de effecten zijn wanneer het meteorjaar 2009 wordt vervangen door 2020, om zo de berekeningen beter aan te laten sluiten bij de te verwachte situatie in een toekomstig klimaat. Samengevat is 2020 een jaar dat qua meteorologie goed aansluit bij het toekomstige klimaat rond 2035 volgens KNMI'23. De EMEP uitkomsten voor dit scenario vallen qua SIA en SOA concentratie tussen de twee jaren met een extreem afwijkende neerslagsom in (een droog 2018, een nat 2023). Daarom concluderen we dat 2020 op dit moment een beter referentiejaar is voor het berekenen van toekomstscenario's met EMEP4NL dan 2009.

5. Invloed van het weer op de benodigde kalibratie van de berekeningen

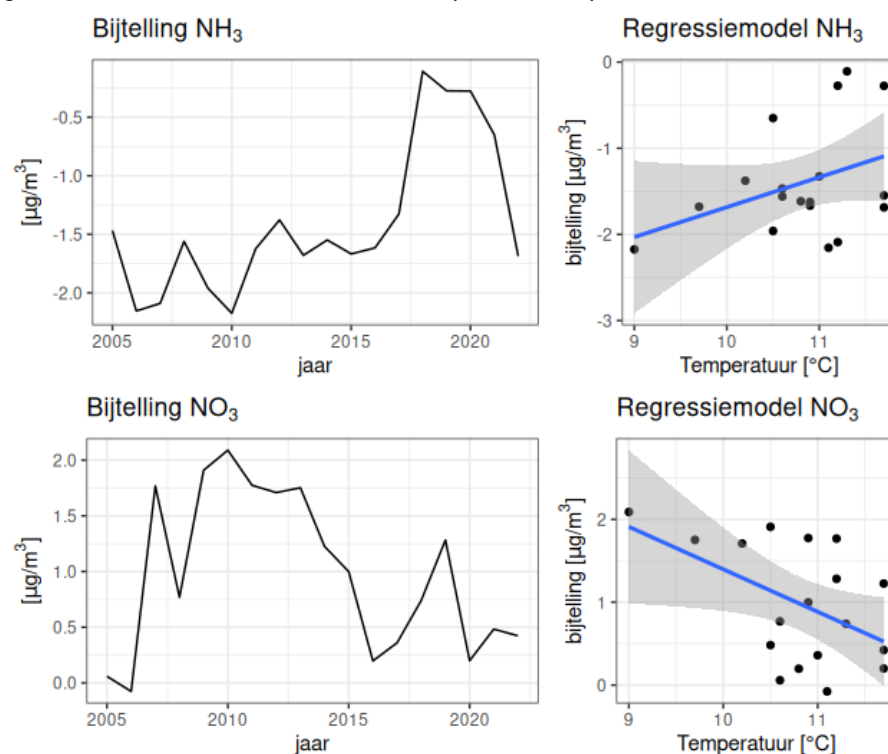
Gemodelleerde concentraties kunnen afwijken van gemeten concentraties. Bij het maken van GCN- en GDN-kaarten wordt hiervoor gecorrigeerd door middel van modelkalibratie aan de metingen. Metingen zijn echter enkel beschikbaar voor verstreken jaren. Om toch een correctie uit te kunnen voeren voor een toekomstig jaar wordt in de huidige methodiek vastgesteld welke correctie nodig is om de vijf meest recente verstreken jaren aan te laten sluiten op de metingen, waarna deze correctie wordt toegepast op de modeluitkomsten van het jaar in de toekomst (Mijnen-Visser et al., 2025). Deze methode veronderstelt dat klimaatverandering geen invloed heeft op de correctie die nodig is om het model op de metingen te laten aansluiten. Om te onderzoeken of deze aanname valide is, hebben we over de periode 2005-2022 onderzocht of en hoe de benodigde correctie beïnvloed wordt door de jaargemiddelde temperatuur (T), jaargemiddelde windsnelheid (u_{10}) en totale neerslagsom (P). Als de benodigde correctie van deze meteorvariabelen afhankelijk is, dan zou de huidige kalibratiemethode aangepast moeten worden om rekening te houden met een veranderend klimaat.

Figuur 4 toont de variatie van de onderzochte meteorvariabelen over de tijd. In Figuur 5 wordt voor NH_3 en NO_3 weergegeven welke bijtelling (in $\mu\text{g}/\text{m}^3$) nodig is om de berekende concentraties (gemiddeld) te laten aansluiten op de metingen. Waar de benodigde bijtelling negatief is, moeten de berekeningen naar beneden worden bijgesteld.

Figuur 4. Variatie in de onderzochte meteorologische variabelen over de periode 2005-2022. Links: temperatuur (landelijk jaargemiddelde), midden: totale neerslagsom (landelijk gemiddelde) en rechts: windsnelheid op 10 meter hoogte (op Cabauw, jaargemiddelde).



Figuur 5. Links: historische benodigde gemiddelde bijtelling voor NH_3 en NO_3 om de berekende concentraties in overeenstemming te brengen met de gemeten concentraties. Rechts: de regressiemodellen voor NH_3 en NO_3 . Voor deze componenten is temperatuur de enige geselecteerde verklarende variabele (zie Tabel 8).



Om te onderzoeken of de benodigde bijtelling samenhangt met de meteorologische variabelen, is *bidirectional stepwise linear regression* toegepast. Hierbij wordt een regressiemodel gemaakt met de meteorologische variabelen (Figuur 4) als onafhankelijke variabelen en de benodigde bijtelling (Figuur 5) als afhankelijke variabele. Vervolgens wordt aan de hand van een statistisch criterium, het zogenoemde *Akaike Informatie Criterium*, getoetst of het toevoegen of weglaten van een meteorologische variabele uit de set onafhankelijke variabelen de prestatie van het regressiemodel verbetert. Dit is een iteratief proces dat stopt wanneer de prestatie niet langer verbetert. Hiervoor zijn enkel de meetlocaties gebruikt waarvoor over de hele periode 2005-2022 valide metingen beschikbaar zijn. Tabel 8 toont de resulterende modellen, per component. Voor de componenten NH_4 , NO_x en $\text{PM}_{2.5}$ is de variatie in de benodigde bijtelling niet te voorspellen met de onderzochte

meteovariabelen. Voor deze componenten is het dus niet nodig om een extra bijtelling uit te voeren om rekening te houden met klimaatverandering. Voor de andere componenten zien we dat een deel van de variatie wél te verklaren is met (een subset van) de meteovariabelen. Voor deze componenten kunnen we aan de hand van de verkregen regressiemodellen uitrekenen hoeveel extra gecorrigeerd moet worden om rekening te houden met een veranderend klimaat.

Tabel 8. Benodigde extra bijtelling ten gevolge van klimaatverandering, uitgedrukt in verandering in de bijtelling per verandering in meteovariabele. Deze modellen zijn verkregen met bidirectional stepwise linear regression. De lege velden komen overeen met meteovariabelen die niet geselecteerd zijn in de stepwise regression voor een gegeven component. De asterisk geeft aan dat de kans kleiner is dan 5% om deze coëfficiënten te vinden onder de nul hypothese dat de coëfficiënten gelijk zijn aan 0. De voorspellende waarde van deze variabelen kunnen als significant worden beschouwd.

	Temperatuur (T)	Windsnelheid (u_{10})	Neerslag (P)
Component	$\Delta\mu\text{g}/\text{m}^3$ per $\Delta^\circ\text{C}$	$\Delta\mu\text{g}/\text{m}^3$ per $\Delta\text{m/s}$	$\Delta\mu\text{g}/\text{m}^3$ per Δmm
NH ₃	+0,35		
NH ₄			
NO _x			
NO ₃	-0,51*		
SO ₂	-0,18*	-0,81*	
SO ₄	-0,19		+0,0024
PM _{2,5}			
PM ₁₀	-1,7	+4,5	

Tabel 9 geeft een overzicht van de klimaatverandering tussen de kalibratiejaren (2019-2023) en het toekomstjaar (hier het gemiddelde tussen 2035-2040), volgens de vier KNMI'23 scenario's. Deze veranderingen, vermenigvuldigd met de coëfficiënten van de regressiemodellen uit Tabel 8, geven de extra bijtelling die nodig is om rekening te houden met klimaatverandering. We zien dat de benodigde extra bijtelling afhangt van het klimaatscenario. Met uitzondering van SO₄ zien we dat het, gegeven de bandbreedte in de klimaatscenario's, niet mogelijk is om te berekenen of de concentraties naar boven of naar beneden moeten worden bijgesteld om rekening te houden met klimaatverandering. Alleen voor SO₄ lijkt een klimaatcorrectie consistent negatief, variërend tussen zo'n -0,07 tot -0,24 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

*Tabel 9. Verwachte klimaatverandering tussen 2019-2023 en 2035-2040 per klimaatscenario en verwachte benodigde extra bijtellingen als gevolg van klimaatverandering. Hn: hoge temperatuur en nat, Hd hoge temperatuur en droog, Ln: Lage temperatuur en nat, Ld: lage temperatuur en droog. *Merk op dat het jaar 2023 zeer nat was, waardoor de gemiddelde neerslagsom over de periode 2019-2023 hoger was dan in de natste scenario's voor de periode 2035-2040.*

	Verwachte verandering in klimaat			Benodigde extra bijtelling volgens de modellen van Tabel 1.				
	T	u_{10}	P*	NH ₃	NO ₃	SO ₂	SO ₄	PM ₁₀
scenario	$\Delta^\circ\text{C}$	$\Delta\text{m/s}$	Δmm	$\Delta\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\Delta\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\Delta\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\Delta\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\Delta\mu\text{g}/\text{m}^3$
Hn	+0,23	+0,04	-45	+0,083	-0,12	-0,077	-0,15	-0,23
Hd	+0,31	-0,03	-75	+0,10	-0,16	-0,033	-0,24	-0,66
Ln	-0,18	+0,04	-45	-0,063	+0,093	+0,0011	-0,074	+0,49
Ld	-0,18	+0,04	-59	-0,063	+0,093	+0,0011	-0,11	+0,49

Conclusie kalibratie

Op basis van de gevonden beperkte gevoeligheid voor de onderzochte weersomstandigheden wordt geadviseerd om de bestaande periode van kalibratie jaren, de laatste vijf jaar, niet aan te passen.

6. Conclusie

De KNMI'23 klimaatscenario's geven voor de periode 2030-2040 weersomstandigheden die aanzienlijk warmer zijn dan de weersomstandigheden die, tot en met ronde 2023, in de GCN/GDN berekeningen gebruikt worden. Er is op meerdere manieren onderzocht hoe met meteorologische gegevens uit combinaties van gepasseerde jaren een set kan worden verkregen die consistent is met de KNMI'23 scenario's voor de periode rond 2035. De set van de 10 laatste beschikbare jaren (2014-2023) geeft een gemiddelde temperatuur die binnen de bandbreedte van de scenario's valt. Ook voor andere parameters, met name neerslagsom en windsnelheid, en qua seizoensvariaties sluit de reeks aan bij de scenario's. Daarom, en met het oog op de huidige systematiek, wordt geadviseerd om deze set te gebruiken voor het berekenen van de nieuwe GCN/GDN prognosekaarten. Dit advies is overgenomen in zowel de GCN 2025 als de stikstof monitoring 2025 [Mijnen-Visser 2025, Marra 2025].

Twee gerelateerde vraagstukken zijn ook onderzocht. 1) Het OPS model gebruikt deels weersafhankelijke chemische informatie uit het EMEP model. Omdat EMEP berekeningen veel rekentijd kosten, wordt hiervoor een representatief steekjaar gebruikt. Dit was altijd 2009 en op basis van dit onderzoek is het advies in het vervolg 2020 te gebruiken. 2) Bij de berekeningen is het gebruikelijk om de resultaten te corrigeren voor een systematische afwijking van het model. Deze afwijking is ook weersafhankelijk en daarom is het mogelijke effect van klimaatverandering op de benodigde correctie (kalibratie) onderzocht. Ook hier bleek dat het gebruik van de meest recente jaren om de correctie voor een toekomstig jaar rond 2035 te bepalen goed aansluit bij de KNMI'23 scenario's.

7. Referenties

- Dorland, R. van, et al., 2023. KNMI National Climate Scenarios 2023 for the Netherlands. KNMI Scientific Report WR-23-02. KNMI, De Bilt.
- Hoogerbrugge, R., et al., 2023. Grootschalige concentratiekaarten Nederland. Rapportage 2023.
- Mijnen-Visser, S., et al., 2025. Grootschalige concentratiekaarten Nederland. Rapportage 2025. RIVM rapport 2025-0034, doi: 10.21945/RIVM-2025-0034.
- Jacob, D. J., & Winner, D. A., 2009. Effect of climate change on air quality. *Atmospheric Environment*, 43(1), 51–63. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.09.051>
- Sauter, F., et al., 2023. The OPS-Model. Description of OPS 5.1.1.0. RIVM, Bilthoven, www.rivm.nl.
- Marra, W.A., et al., 2025. Monitor stikstofdepositie in Natura 2000-gebieden 2025, RIVM rapport 2025-0021, doi:10.21945/rivm-2025-0021.