Rijksinstituut voor Volksgezondheid
en Milieu
*Ministerie van Volksgezondheid,
Welzijn en Sport*

Kennisnotitie

PFAS dynamiek in de Rijn en Maas: toekomstscenario's met SimpleBox

RIVM

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

T 088 689 89 89

Auteurs:
Tjebbe Janson
Joris Quik
Julia Hartmann
Centrum:
DMG/DDB
Contact:
julia.hartmann@rivm.nl
Kenmerk:
KN-2026-0060
DOI:
10.21945/RIVM-KN-2026-0060
Datum:
1 juni 2026

1. Introductie

Waarom onderzoek naar PFAS?

Poly- en perfluoralkylstoffen (PFAS) zijn door mensen gemaakte stoffen die onder andere worden gebruikt vanwege hun water- en vuilafstotende eigenschappen. Tijdens productie, gebruik en afvalverwerking kunnen PFAS in het milieu, voedsel en drinkwater terechtkomen. Daar kunnen ze een risico vormen voor de gezondheid van mensen en ecosystemen. Het is daarom belangrijk om blootstelling aan PFAS te beperken, onder andere door de emissie te verminderen. Nederland werkt samen met andere landen aan een Europees verbod op PFAS. Ook onderzoekt het RIVM in opdracht van de ministeries van Infrastructuur en Waterstaat (IenW), Volksgezondheid, Welzijn en Sport (VWS) en Landbouw, Visserij, Voedselzekerheid en Natuur (LVVN) in het PFAS onderzoeks-programma manieren om de blootstelling via voedsel, drinkwater en leefomgeving verder te verlagen.

Huidige blootstelling aan PFAS via drinkwater in Nederland

In 2023 berekende het RIVM de blootstelling aan PFAS via voedsel en drinkwater in Nederland, op basis van gegevens uit 2021 en 2022.[1] Hieruit bleek dat de inname via voedsel meer dan drie keer hoger is dan via drinkwater. De hoeveelheid PFAS in drinkwater varieert afhankelijk van de herkomst: drinkwater uit grondwater bevat minder PFAS dan water uit oppervlaktewater. Dit komt doordat de concentraties in oppervlaktewater momenteel hoger zijn.[2]

Circa 60 procent van het Nederlandse drinkwater wordt uit grondwater gewonnen, de rest uit oppervlaktewater, voornamelijk de Rijn en Maas. PFAS komen via verschillende routes in het oppervlaktewater terecht, waaronder atmosferische depositie en industriële lozingen.[3] Eenmaal in het oppervlaktewater breken de meeste PFAS nauwelijks af en zijn ze moeilijk te verwijderen in de drinkwaterzuivering.[4–7] In 2024 heeft de Universiteit Utrecht, in opdracht van de Inspectie Leefomgeving en Transport, een overzicht gegeven van de verontreiniging van de Rijn en Maas door PFAS in Nederland.[8]

Risicogrenzen en normen voor PFAS in drinkwater

In 2021 heeft het RIVM een indicatieve drinkwaterrichtwaarde voor PFAS afgeleid op basis van de door EFSA vastgestelde gezondheidskundige grenswaarde.[9] De afgeleide drinkwaterrichtwaarde is 4,4 nanogram PFOA equivalenten per liter (ng PEQ/L). De drinkwaterrichtwaarde is in PFOA equivalenten om rekening te houden met verschillen in toxiciteit tussen PFAS. De PFOA equivalenten kunnen worden berekend aan de hand van relatieve potentiefactoren (RPF's).[10] De drinkwaterrichtwaarde is nog niet beleidsmatig vastgesteld vanwege de technische, financiële en maatschappelijke implicaties.[4] Wel vraagt het ministerie van IenW aan drinkwaterbedrijven om investeringsplannen gericht op het behalen van een toekomstige PFAS-norm[i].[12]

[i] De uiteindelijke norm wordt mede bepaald door de uitkomsten van de wereldwijde PFAS-evaluatie door de Wereldgezondheidsorganisatie (WHO).[11]

Toekomstige PFAS-belasting Nederlandse drinkwaterbronnen
Inzicht in de toekomstige PFAS-belasting van drinkwaterbronnen is essentieel om te bepalen welke inspanningen nodig zijn. De PFAS-concentraties in zowel grond- als oppervlaktewater zijn namelijk aan verandering onderhevig.

Oppervlaktewater
Deze notitie richt zich op de toekomstige PFAS-belasting van de Rijn en Maas. Recente studies suggereren dat er over het algemeen sprake is van een dalende trend in PFAS-concentraties in de Rijn en Maas, hoewel sommige PFAS mogelijk juist toenemen.[13,14] Modelstudies, zoals in het Elbe-stroomgebied, voorspellen bij 50 procent emissiereductie van 2021 tot 2050 een afname van PFOS en PFOA met respectievelijk 7,5 en 16,7 procent per decennium.[15]

Grondwater
In een ander onderdeel (thema C1) van het PFAS onderzoeksprogramma meet het RIVM samen met onderzoeksinstituut KWR PFAS in grondwater op locaties waar drinkwater wordt gewonnen, om de verspreiding en diepte van PFAS in de bodem te bepalen.[16] In deze notitie richten we ons alleen op oppervlaktewater als bron voor drinkwater.

2. Onderzoeksvraag

In deze kennisnotitie staat de volgende vraag centraal: Hoe lang blijven PFAS in de Rijn en Maas aanwezig na het nemen van emissiereducerende maatregelen?

3. Methode

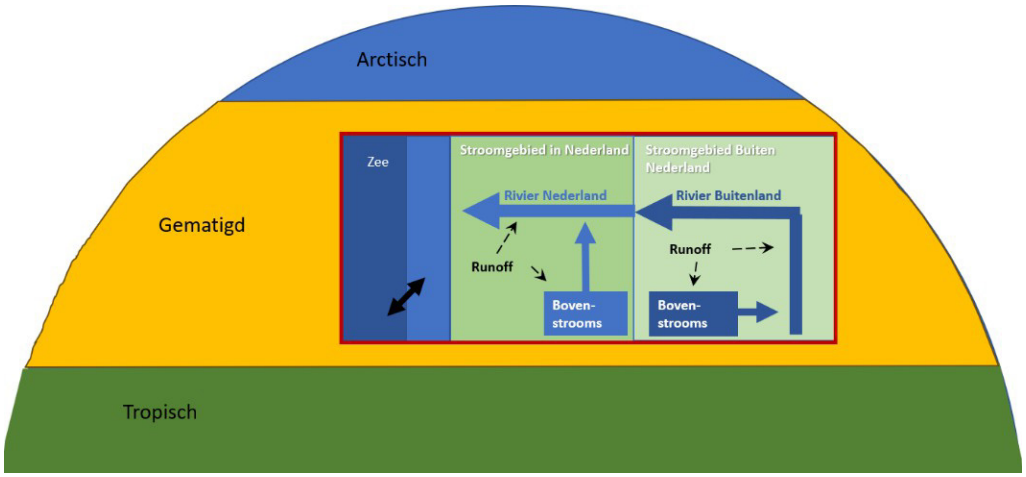
Om de onderzoeksvraag te kunnen beantwoorden, zijn er verschillende modelbenaderingen mogelijk. Aangezien er momenteel nog veel hiaten en onzekerheden zijn omtrent de benodigde gegevens, is gekozen voor een modelbenadering waarmee een eenvoudige eerste schatting kan worden gemaakt. Er is dus gekozen voor een getrapte aanpak waarmee met beperkte tijdsinvestering in dataverzameling en -analyse antwoord kan worden verkregen op de onderzoeksvraag. Dit antwoord kan richting geven aan vervolgonderzoek waar zo nodig in meer detail de dynamiek van verschillende PFAS ingeschat kan worden.

Er is gekozen voor een verkennende analyse met het SimpleBox model. SimpleBox is een 'nested multi-media environmental fate model' van het type 'Mackay level III/IV' geschikt voor verkennende studies. Het model simuleert het milieu door de verschillende media op te delen in compartimenten: lucht, water, sediment en bodem. De massa's van emissies, transport, verwijdering en verdeling tussen compartimenten worden gebruikt om de quasi-dynamische massastroom van een stof tussen milieucompartimenten uit te rekenen. De quasi-dynamische staat betekent dat alleen de emissies in de tijd worden veranderd. De transportprocessen tussen milieucompartimenten worden niet in de tijd veranderd. Het model biedt mogelijkheden tot representeren van het noordelijk halfrond van de aarde en kan daarbij verschillende ruimtelijke schalen tegelijk meenemen. Een gedetailleerde omschrijving van de meest recente versie van SimpleBox is te vinden in Schoorl et al[17]. Andere relevante informatie rondom dit model (bijvoorbeeld omschrijvingen van eerdere versies) is ook te vinden op de RIVM website[18].

Model aanpak

Om de dynamiek van PFAS in het milieu te simuleren voor de stroomgebieden van de Rijn en Maas is het landschapsscenario in het SimpleBox model v2026-4.0[ii] aangepast. Zo zijn variabelen zoals neerslag, landoppervlaktes en landgebruik aangepast om de dimensies van de Maas en Rijn te kunnen benaderen. Deze aanpassingen representeren het scenario afgebeeld in Figuur 1. Onzekerheden en variabiliteit van de model input (stofeigenschappen en beschrijving van het stroomgebied) worden meegenomen door met SimpleBox probabilistisch te rekenen. Dat betekent dat er niet met één vaste inputvariabele wordt gerekend, maar met een reeks mogelijke waarden, elk met een bepaalde kans (probabiliteit, zie Tabel B-1, B-2 en B-3).

Figuur 1 Conceptueel model van de wereldwijde schalen in SimpleBox met het landschapsscenario toegepast in de geneste compartimenten (continentaal en regionaal) in de gematigde schaal.



Hydrologie

SimpleBox genereert de rivierafvoer vanuit de run-off[iii] fractie afkomstig van neerslag. Omdat er in deze modelstudie probabilistisch wordt gerekend kunnen we voor zowel de neerslag als de run-off een verdeling opgeven. Voor elke modeliteratie worden waardes uit de verdelingen gebruikt om een afvoer te berekenen. Neerslag is gebaseerd op jaarlijks gemiddelde waardes voor het stroomgebied van de Rijn en Maas afkomstig uit het wereldwijde ERA5 klimaatmodel.[19] Dit model bevat een tijdsserie van neerslag van 1940 tot nu, zie tabel B-4.1. Voor de Rijn is dit gemiddeld 1054 millimeter per jaar (mm/jaar) (5^e & 95^e percentiel = 764 – 1271 mm/jaar) en voor de Maas 907 (5^e & 95^e percentiel = 642 – 1134) mm/jaar. Voor run-off is een Weibull verdeling gebruikt om een rivierafvoer te berekenen. Deze verdeling is gekalibreerd met de afvoer observaties in de Rijn en Maas. Hieruit volgen twee Weibull verdelingen van run-off voor beide stroomgebieden (zie tabel B-4.1).

Met de neerslag en gekalibreerde run-off verdelingen kan SimpleBox een verdeling van jaargemiddelde rivier afvoeren berekenen: de mediaan van de berekende en geobserveerde (mediaan van het jaargemiddelde) afvoer in Rijn is respectievelijk 1840 (5^e & 95^e percentiel = 1502 - 2378) en 1988 (5^e & 95^e percentiel = 1757 - 2824) m^3/s,

[ii] De scripts, data en aanvullende materialen zijn beschikbaar op Zenodo: https://doi.org/10.5281/zenodo.20324683 en https://doi.org/10.5281/zenodo.20324679

[iii] Run-off is water van neerslag of irrigatie dat niet in de bodem trekt, maar over het land naar het oppervlaktewater stroomt.

voor de Maas is dit respectievelijk 169 (5e & 95e percentiel = 130 - 283) en 247 (5e & 95e percentiel = 141 - 375) m^3/s. Zie Tabel B-4.2 voor de geobserveerde afvoer en neerslag voor de Rijn en Maas. De mediaan van de berekende afvoeren voor de Rijn is 16% lager dan de geobserveerde mediaan, terwijl de berekende mediaan voor de Maas 32% lager ligt dan de geobserveerde mediaan. Ook zijn de extreme afvoeren (zie de 95e percentielen) niet goed vertegenwoordigd in de afvoer in SimpleBox doordat het berekenen van afvoer op basis van neerslag en run-off een vereenvoudiging van de hydrologie is. Hierdoor worden extreme droge of natte periodes niet meegenomen. De berekende afvoeren komen niet exact overeen met de observaties maar liggen wel in dezelfde orde van grootte. Bovendien beoordelen we de modelresultaten relatief waardoor absolute verschillen minder van belang zijn.

Landoppervlakte & Landgebruik
Om het landoppervlakte van het Rijn en Maas stroomgebied in Nederland en Europa te berekenen zijn geografische kaartlagen gebruikt van HydroBasins. Dit zijn kaarten van stroomgebieden afgeleid van digitale hoogte modellen (DEM).[20]

De landgebruik fracties van het Rijn en Maas stroomgebied zijn afgeleid van 'The Modis Land Cover Type Product'.[21] Dit zijn satelliet data met een ruimtelijke resolutie van 500x500 meter waarmee landgebruik wordt opgedeeld in 17 classificaties. Deze zijn vertaald naar drie landgebruik types, Landbouw, Natuur en Overig welke gebruikt zijn in SimpleBox, zie tabel B-5.

Geselecteerde stoffen
Tien PFAS die in 2022 zijn aangetroffen in meer dan 90 procent van het drinkwater gemaakt uit oppervlaktewater, zijn geselecteerd.[1] Dit zijn: perfluorobutaansulfonzuur (PFBS), perfluorobutaanzuur (PFBA), perfluorpentaanzuur (PFPeA), perfluorhexaanzuur (PFHxA), perfluorheptaanzuur (PFHpA), perfluoroctaanzuur (PFOA), trifluorazijnzuur (TFA), perfluornonaanzuur (PFNA), perfluorhexaansulfonzuur (PFHxS) en Genx (HFPO-DA). Voor deze tien PFAS zijn fysisch-chemische eigenschappen geschat met behulp van modellen en analyse van die modellen door RIVM experts, zie tabel 1.

Emissiescenario's
Verdeling emissie naar bodem, water en lucht
In het model wordt voor de hieronder beschreven historische en toekomstige emissies de volgende verdeling tussen bodem, water en lucht aangehouden: bodem (14%), water (39%) en lucht (47%). Dit is gebaseerd op de emissie van PFOA beschreven in Meesters et al.24

Historische emissie
Om de concentraties van PFAS in milieucompartimenten te modelleren is er informatie nodig over de historische emissies per PFAS. Deze data is meestal niet beschikbaar behalve voor een aantal veelvuldig bestudeerde PFAS, zoals PFOA.24,25 In deze kennisnotitie is daarom gekozen om de relatieve afname te rapporteren ten opzichte van een standaardemissie die gelijk is voor alle tien PFAS. De snelheid van deze afname is niet afhankelijk van de emissie, maar van de proces constanten voor transport die SimpleBox berekent op basis van stof en landschapseigenschappen. Hierbij wordt 15 jaar eerder (t=-15) gestart met een emissie van 457 ton per jaar, deze emissie is naar oppervlakte verdeeld over alle compartimenten in het model (figuur 1). De keuze voor 457 ton is gebaseerd op een aantal proefberekeningen. Hieruit bleek dat deze hoeveelheid nodig is om het model binnen 15 jaar tot een steady state te vullen.

Tabel 1 Fysisch-chemische eigenschappen van de tien geselecteerde PFAS. Zie hoofdstuk 7 voor afkortingen. Eigenschappen voornamelijk uit EpiSuite v4.11 (US EPA, 2025). Voor Sol25, Pvap25, Koc, Koc Alt en halfwaardetijd is een verdeling opgegeven (t = triangular, u = uniform; tabel B-2).

	PFBS	*PFBA*	*PFPeA*	*PFHpA*	*PFOA*	*TFA*	*PFHxA*	*PFNA*	*PFHxS*	*GenX*	*Bron*
CAS-nr	375-73-5	375-22-4	2706-90-3	375-85-9	335-67-1	76-05-1	307-24-4	375-95-1	355-46-4	13252-13-6	
pKa (pH)	-3.31	0.37	0.34	0.31	0.30	0.05	0.32	-0.21	0.14	2.80	[22]
MW (g/mol)	300.10	214.04	264.05	364.06	414.07	114.02	314.06	464.08	400.11	330.06	[23]
Tm (°C)	36.86	-4.03	9.64	15.26	27.28	-24.00	23.07	38.94	41.25	17.99	[23]
Pvap25 (Pa)^{T}	6.91 – 54.40	1860.00 - 2000.00	631.00 - 905.00	135.00 – 200.00	19.33 – 30,00	15100 – 17700	240.00 - 361	11.05 – 18.10	0.61 – 7.65	83.80-132.00	[23]
Sol25 (mg/l)^{U}	344.00 – 8859.80	315.92 - 1373.00	16.72-196.50	0.04-3.65	0.002-0.48	91486 - 97500	0.85 - 27.12	0.000099 -0.06	6.17 - 21.73	16.86-27.20	[23]
Kaw25 (-)	5.89E-04	4.86E-03	2.56E-02	7.07E-01	3.71E+00	1.76E-04	1.34E-01	1.95E+01	1.62E-02	8.38E-03	[23]
Log Kow (-)	1.82	2.14	2.81	4.15	4.81	0.50	3.48	5.48	3.16	3.36	[23]
Koc (L/kg) ^{U}	85.47 – 17737.81	128.47 – 2737.79	301.58 – 12277.22	1659.59 – 246774.34	3852.12 – 1106369.00	15.91 – 136.21	707.95 – 55847.02	9042.74 – 4961351.54	470.98 – 356615.32	607.58 – 95279.62	[23]
Koc Alt (L/kg)^{U}	85.47 – 177.38	21.85 – 64.95	51.29 – 291.21	282.62 – 5853.29	655.09 – 26248.23	2.71 – 3.23	120.39 – 1305.57	1537.80 – 117679.28	470.98 – 3566.15	83.87 – 303.74	[23]
$t_{1/2}$ in water (jaar)	90 – 110										[a]
$t_{1/2}$ in bodem ^{T} *(jaar)*	180 – 220										[a]
$t_{1/2}$ in lucht ^{T} *(jaar)*	0.90 – 1.10										[a]
$t_{1/2}$ in sediment ^{T} *(jaar)*	810.00 – 990.00										[a]

[a] De voorspellingen zijn gebaseerd op het BIOWIN3-model uit EpiSuite™. Na beoordeling door een RIVM expert is besloten om voor alle PFAS de voorspelling van PFOA te gebruiken, omdat de voorspellingen van BIOWIN3 voor de andere PFAS niet realistisch bleken te zijn.

Toekomstige emissie
De toekomstige emissie is gemodelleerd aan de hand van drie emissiescenario's, zoals beschreven in Tabel 2. De scenario's zijn ook weergeven als lijnplots in tabel B-6. Scenario's 1 en 2 zijn geïnspireerd op, maar niet gelijk aan, restrictieopties 1 en 2 uit het achtergronddocument van het restrictievoorstel voor een verbod op PFAS van Nederland, Duitsland, Denemarken, Zweden en Noorwegen.[26] Dit komt onder andere doordat we de overgangstermijnen hebben aangepast naar hele jaren (in plaats van halve jaren), en doordat we specifieke aannames hebben gemaakt over de tijdsduur tot volledige emissiereductie (van 97% naar 100%) en over de mate van emissiereductie die na elke overgangstermijn wordt bereikt. De scenario's zijn bedoeld om inzicht te geven in de orde van grootte van de benodigde afnametijd en niet om exacte voorspellingen te doen.

Tabel 2 Beschrijving van drie scenario's voor wat betreft de toekomstige PFAS emissie . Alle scenario's starten in 2025. De reducties gelden voor emissie in alle compartimenten van het model (figuur 1).

Naam	*Scenario*	*Toelichting*
1. Volledige implementatie van restricties	Na 2 jaar emissiereductie naar 97%, daarna geleidelijk in 15 jaar naar 100%.	Geïnspireerd op restrictieoptie 1 uit RIVM et al.[26]. Start scenario bij ingaan van REACH restrictie met een ingangstermijn van 2 jaar welke meteen resulteert in reductie van 97%. Hierna is aangenomen dat in 15 jaar verdere reductie naar 100% mogelijk is.
2. Restrictie met derogaties	Na 2 jaar emissiereductie van 59%, na 7 jaar van 64%, na 14 jaar van 87%, en daarna in 6 jaar naar 97% daarna in 15 jaar naar 100% (na 35 jaar).	Geïnspireerd op restrictieoptie 2 uit RIVM et al.[26]. Hetzelfde scenario als hierboven maar met overgangstermijnen voor bepaalde gebruiken van PFAS voor 7 en 14 jaar waardoor pas na 20 jaar 97% reductie wordt behaald. Net als bij scenario 1 wordt aangenomen dat in 15 jaar hierna de emissie afneemt tot 100%.
3. Rijn scenario 30% reductie	In 15 jaar geleidelijke emissiereductie naar 30%.	De Internationale Commissie ter Bescherming van de Rijn (ICBR) heeft als doelstelling om de emissies van microverontreinigingen naar de Rijn met ten minste 30% te reduceren voor 2040.[27]

Benodigde verlaging van PFAS-concentraties voor drinkwaterveiligheid
Voor de tien geselecteerde PFAS (tabel 1) is berekend hoe lang deze stoffen in het oppervlaktewater aanwezig blijven. Dit is gedaan door voor elk emissiescenario (tabel 2) de steady state concentratie per jaar te delen door de concentratie op t=0. Deze fractie verandert in de tijd en wordt vergeleken met een aantal doelniveaus voor reductie in PFAS concentratie, namelijk 50, 75, 95 en 99,9 procent reductie. Op deze manier wordt de tijdsduur (in jaren) voor reductie afgeleid. Dit geeft een inschatting van hoe lang het duurt voordat de PFAS-concentraties in de Rijn en Maas tot het doelniveau zijn gedaald. Om te begrijpen welk doelniveau voldoende is, wordt gekeken naar het moment waarop de PFAS-concentratie onder de drinkwaterrichtwaarde van 4,4 ng PEQ/L komt. Dit is belangrijk, omdat drinkwaterbedrijven pas kunnen stoppen met extra zuiveringsmaatregelen wanneer aan deze richtwaarde wordt voldaan.

Bij het toetsen van oppervlaktewater als drinkwaterbron geldt de drinkwaterrichtwaarde op dit moment voor 36 PFAS met verschillende RPF-waarden.[28] Het RIVM heeft geen toegang tot meetgegevens van alle 36 PFAS voor de Rijn en de Maas. Wel heeft Jonker[8] gemiddelde concentraties gerapporteerd over 2018 tot 2022 voor 24 door Rijkswaterstaat gemeten PFAS op verschillende meetlocaties langs de Rijn en Maas. In tabel B-7.1 zijn deze gemiddelden omgerekend naar ng PEQ/L en weergegeven na een reductie van respectievelijk 50, 75, 95 en 99,9 procent. Concentraties onder de drinkwaterrichtwaarde (4,4 ng PEQ/L) zijn groen gemarkeerd, waarden boven deze richtwaarde zijn rood aangegeven. De tabel laat zien dat een concentratiereductie van 95 procent nodig is om op alle locaties voor die 24 PFAS (ruim[iv]) onder de drinkwaterrichtwaarde te blijven. Voor de tien in deze kennisnotitie geselecteerde PFAS, lijkt 75 procent reductie voldoende (zie tabel B-7.2).

Gevoeligheidsanalyse

De onzekerheid in de fysisch-chemische stofeigenschappen (tabel 1) en variabiliteit in de bodemeigenschappen en de hydrologie (tabel B-1) resulteren in een spreiding van de berekende concentraties en daaraan gekoppelde tijdsduur om tot de gestelde reductie niveaus te komen. Om de spreiding in de resultaten te kunnen verklaren is er een beperkte globale gevoeligheidsanalyse uitgevoerd volgens Brognonovo[29]. Dit geeft een eerste indruk van hoe sterk variabelen de output beïnvloeden. De gevoeligheidsanalyse is uitgevoerd op één jaartal van een concentratietijdreeks in scenario 2 (tabel 2) en dus niet op de gehele modeltijd. Dit is gedaan voor drie PFAS-verbindingen die verschillende resultaten lieten zien, dit zijn PFOA, TFA en GenX.

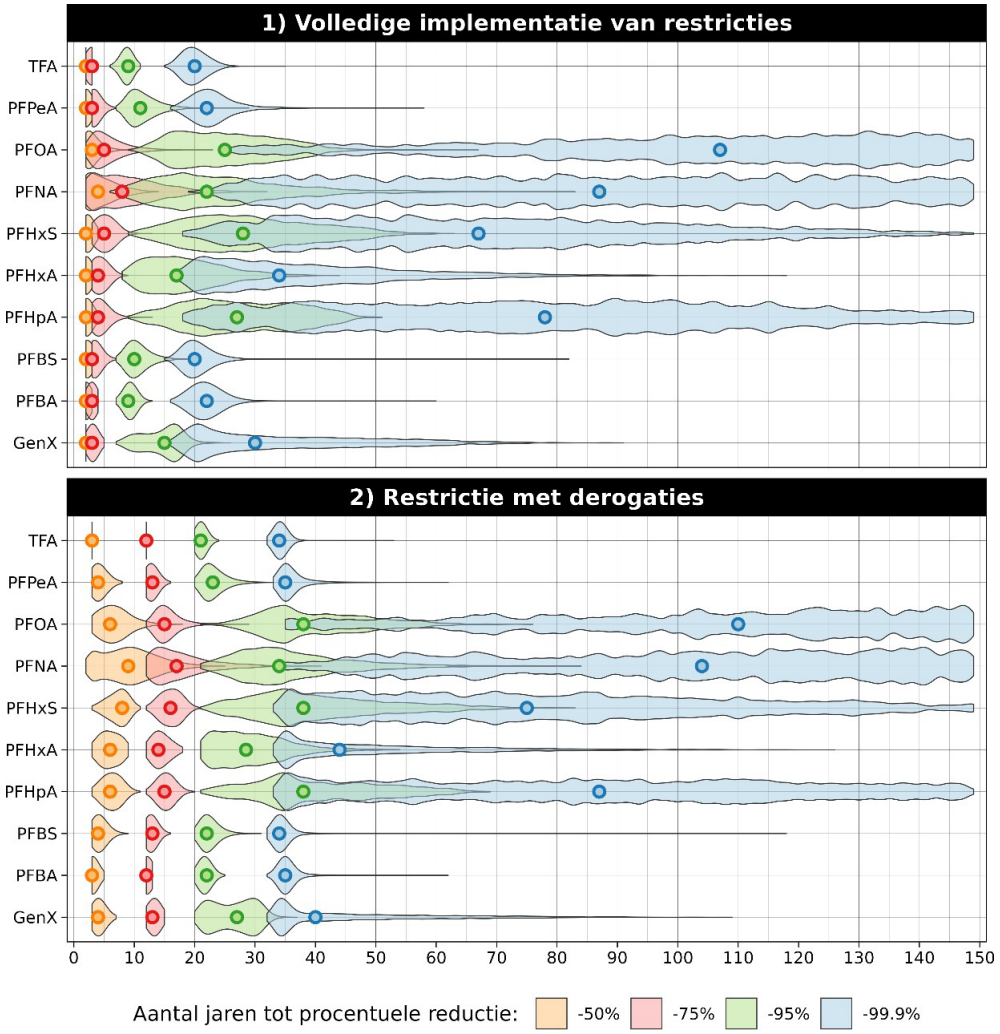
4. Resultaten

Voorspelde PFAS dynamiek in Rijn en Maas

Met SimpleBox is voor de drie emissiescenario's in tabel 2 berekend hoe lang het duurt tot een reductie in PFAS concentraties van respectievelijk 50, 75, 95 en 99,9 procent is bereikt. Figuur 2 toont de resultaten in vioolgrafieken met op de x-as het aantal jaren tot een 50, 75, 95 en 99,9 procent reductie in concentratie en op de y-as de tien PFAS-verbindingen. De breedte van de "viool" laat zien welke waarden het meest voorkomen: hoe breder, hoe meer data er op dat punt zijn.

[iv] Uitgaande van het gemiddelde per locatie, zou een reductie van 86% theoretisch voldoende zijn. Echter, vanwege de beperkte nauwkeurigheid van de onderliggende gegevens hanteren we een benodigde concentratiereductie van 95%.

Figuur 2 Vioolgrafieken van het verwachte aantal jaren tot 50, 75, 95 en 99,9 procent reductie in concentraties voor tien PFAS[a] (tabel 1) in de Rijn na emissiereducerende maatregelen (tabel 2), voorspeld met SimpleBox. De mediaan is aangegeven met een cirkel.



[a] Bij een paar stoffen is het aantal samples bij 99,9 procent reductie lager dan 2000, omdat de gemodelleerde tijdsduur langer dan 150 jaar is, zie tabel B-8.

De resultaten voor de Maas zijn hier niet opgenomen omdat de resultaten voor de Maas en Rijn vrijwel hetzelfde zijn. Scenario 3 is ook niet opgenomen, omdat in dat scenario geen 50 procent reductie in PFAS-concentratie wordt bereikt. De doelstelling van de ICBR is dus onvoldoende om de gemeten concentraties in tabel B-6.1 te verlagen tot onder de drinkwaterrichtwaarde van 4,4 ng PEQ/L. Zie voor de overige resultaten tabel B-9.1 en B-9.2.

De mediane resultaten laten voor scenario 1 (volledige implementatie restricties) zien dat het afhankelijk van de PFAS 9 tot 28 jaar kan duren tot er 95% reductie in concentraties is behaald. Voor scenario 2 (restrictie met derogaties) is dat 21 tot 38 jaar. De verblijftijden van alle PFAS zijn langer in het scenario met derogaties (scenario 2).

PFOA en PFNA, en in mindere mate PFHxS en PFHpA, blijven volgens het model het langst in de rivier aanwezig. De onzekerheid van de resultaten is bij deze PFAS hoog, vooral bij een reductie van 95 of 99.9 procent. Voor TFA, PFPeA, PFBS en PFBA geldt dat de verblijftijd in de rivier korter is (8 tot 15 jaar voor scenario 1, 21 tot 26 jaar voor scenario 2). De onzekerheid neemt hier ook toe bij hogere procentuele reductie, echter wel minder dan voor PFOA, PFNA, PFHxS en PFHpA.

Gevoeligheidsanalyse
Uit de gevoeligheidsanalyse komt een index tussen 0 en 1 per variabele. Hoe hoger de index van een input variabele, hoe meer invloed deze heeft op de spreiding van de steady state concentratie in één gekozen jaar. Tabel B-10 toont de indices van alle input variabelen in staafdiagrammen. Er is gekeken naar de spreiding in concentratie van GenX, PFOA en TFA op t=23 (2048) en naar PFOA op t=100 (2125). Dit zijn willekeurig gekozen momenten in het model.

Uit deze resultaten blijkt dat de concentratie van GenX en PFOA in 2048 het meest worden beïnvloed door (op volgorde): de fractie organisch stof in de natuurlijke bodem (natural soil), de Koc van de neutrale variant, de neerslag, de fractie water in de natuurlijke bodem, de dikte van de natuurlijke bodem en de run-off. De overige inputvariabelen scoren lager en zijn minder relevant. Deze resultaten laten zien dat de onzekerheid vooral ontstaat vanwege interacties tussen de bodem en GenX of PFOA. De resultaten laten bij TFA een ander beeld zien. Voor TFA zijn de volgende inputvariabelen het belangrijkst: hoogte van de luchtkolom, de neerslag, fractie organisch stof in de natuurlijke bodem, de windsnelheid en de run-off. Hier lijken atmosferische processen de onzekerheid te verklaren. De fysisch-chemische eigenschappen van GenX, PFOA en TFA lijken deze resultaten te ondersteunen. PFOA en GenX hebben een relatief hoge bodem-water partitie coëfficiënt (Koc) en een lage dampdruk waardoor deze een langere verblijftijd hebben in de bodem. TFA heeft een lagere Koc waarde en een hoge dampdruk.

Een aantal PFAS, waaronder PFOA (Figuur 2), blijven langer dan gemiddeld aanwezig in bodem en water. De gevoeligheidsanalyse laat zien dat de concentratie van PFOA op t=100 (2125) door andere inputvariabelen wordt beïnvloed dan in t=23 (2048). De volgende inputvariabele verklaren de meeste variatie in de uitkomst 2125 (van hoog naar laag): run-off, Koc van de gedissocieerde variant, fractie organisch stof in zowel de natuurlijke bodem als de agrarische bodem, Koc van de neutrale variant en de temperatuur. Met name de run-off wordt later in de modeltijd relevanter. Concentraties worden hier mogelijk nog beïnvloed door nalevering vanuit de bodem, via run-off, naar de rivier. De hoge Koc waarde van PFOA speelt hier ook een rol. De andere PFAS met een langere verblijftijd zijn: PFNA, PFHxS en PFHpA. Net als PFOA hebben deze een relatief hoge Koc waarde.

5. Discussie

In deze kennisnotitie is met behulp van SimpleBox voor tien PFAS onderzocht hoe lang deze stoffen in de Rijn en Maas aanwezig blijven na het nemen van emissiereducerende maatregelen.

In de modelbenadering gaat voor zowel de Rijn als de Maas het grootste deel van de emissie naar lucht en water (86%). Uit de gevoeligheidsanalyse blijkt dat neerslag en run-off veel invloed hebben op de resultaten. Echter zijn de verschillende hydrologische eigenschappen van de Rijn en Maas niet zichtbaar in de vergelijkbare uitkomsten (tabel B-7). Een mogelijke oorzaak is dat in deze modelbenadering de hydrologie van de

stroomgebieden is vereenvoudigd, waarin alleen de neerslag, run-off en landoppervlakte verschillen voor de Rijn en Maas. Daarnaast zijn de resultaten relatief waardoor mogelijke verschillen in absolute concentraties niet zichtbaar zijn.

Er zijn duidelijke verschillen in de snelheid waarmee verschillende PFAS uit de rivieren wegspoelen naar de zee na emissiereductie. Met name de langketenige PFAS, zoals PFOA, PFNA, PFHpA en PFHxS, blijven nog tientallen (95% concentratie reductie) tot soms meer dan honderd jaar (99% concentratie reductie) aanwezig in het watersysteem. Daarentegen nemen kortketenige PFAS, zoals PFBA, PFBS, PFPeA en met name TFA, veel sneller af: voor deze stoffen wordt een reductie van 95% doorgaans al binnen 8 tot 15 jaar bereikt bij een volledige implementatie van emissierestricties (scenario 1).

Scenario 1 (volledige implementatie restricties) leidt volgens verwachting tot de snelste afname in concentraties. De meeste PFAS halen 95% reductie binnen 10-30 jaar, behalve de 'langzame' stoffen zoals PFOA en PFNA. Scenario 2 (restricties met derogaties) leidt tot langere verblijftijden. Voor de meeste stoffen wordt 95% reductie binnen 20 tot 50 jaar gehaald, maar voor PFOA, PFNA en vergelijkbare stoffen duurt dit nog langer.

Opvallend is kortketenige PFAS die snel wegspoelen meestal ook een lage RPF hebben, waardoor hun bijdrage aan het totale risico beperkt is. De langzaam afnemende, langketenige PFAS hebben vaak juist een hogere RPF en zijn daardoor bepalend voor het risico voor de drinkwaterkwaliteit op de lange termijn. Daarbij moet wel opgemerkt worden dat de langketenige PFAS over het algemeen beter te verwijderen zijn in de drinkwaterzuivering dan de kortketenige PFAS (zoals TFA).

Het is daarbij belangrijk te realiseren dat de onzekerheid in de afnametijd aanzienlijk groter is voor langketenige PFAS. Dit komt doordat hun gedrag sterk wordt beïnvloed door bodeminteracties, variatie in organisch stofgehalte en hydrologische factoren zoals run-off. Voor kortketenige PFAS is de onzekerheid kleiner. Hun afname wordt vooral bepaald door hydrologische en atmosferische processen en minder door bodeminteracties.

Relatie met andere relevante studies

Pronk et al[14] heeft een analyse uitgevoerd om patronen en dynamiek van PFAS concentraties in de Rijn en Maas te onderzoeken. In de analyse zijn metingen van meerdere PFAS op meerdere meetlocaties langs de Rijn en Maas met elkaar vergeleken. De gemeten PFAS-vrachten zijn ook gerelateerd aan een aantal omgevingsvariabelen met een regressiemodel. De rivierafvoer was hier de belangrijkste, processen als afspoeling (run-off), uitspoeling of neerslag zouden hier verantwoordelijk voor kunnen zijn. Deze conclusie komt goed overeen met de resultaten uit de gevoeligheidsanalyse in hoofdstuk 4. Deze resultaten benadrukken dat de hierboven beschreven processen belangrijk zijn in de modellering van PFAS-dynamiek in oppervlaktewater.
In de introductie wordt een vergelijkbare modelstudie genoemd van Zhu et al[15] in het Elbe-stroomgebied. Zhu et al[15] vonden dat bij een emissiereductie van 50% van 2021 tot 2050 de PFOA concentraties met 16,7 procent afnamen per decennia. Dit komt goed overeen met de reducties in PFOA-concentraties in figuur 2, waarbij de eerste 50 procent reductie snel volgt op de emissiereductie. In Zhu et al[15] is niet verder gekeken in de tijd.

Aandachtspunten

Er zijn een aantal aandachtspunten bij de beschreven analyse, die kunnen worden onderverdeeld in drie categorieën: het gebruik van SimpleBox, de selectie van PFAS met

bijbehorende inschatting van de benodigde concentratiereductie, en de gehanteerde emissiescenario's. Hieronder worden de aandachtspunten per categorie toegelicht.

SimpleBox
Er is voor SimpleBox gekozen omdat het model geschikt is voor PFAS en het transport via bodem, oppervlaktewater en lucht op geïntegreerde wijze beschouwt, met bovendien een relatief eenvoudige implementatie voor het stroomgebied van de Rijn en Maas.[30] Daarnaast vormt SimpleBox de basis voor EUSES en andere screening level risicobeoordelingen binnen REACH en wordt het model al veelvuldig door het RIVM toegepast in uiteenlopende onderzoeken.[31,32] Er zijn echter ook beperkingen aan het gebruik van SimpleBox. Het model is verkennend en niet geschikt voor het schatten van lokale concentraties, omdat het:

1 een zeer beperkte ruimtelijke resolutie heeft (aantal delen stroomgebied)[33];
2 de hydrologische variabiliteit in de tijd maar zeer beperkt meeneemt; en
3 de nalevering van PFAS uit grondwater naar oppervlaktewater op de lange termijn niet meeneemt, terwijl dit belangrijk is volgens onder meer Jensen et al.[34] Grondwater is op dit moment geen onderdeel van SimpleBox.

Deze beperkingen zijn ondervangen door niet te focussen op berekende concentraties, maar op de verandering hierin in de tijd aan de hand van een vastgestelde emissiereductie, zoals voorzien door de REACH restrictie in PFAS gebruik. Daarnaast zijn de regionale en continentale compartimenten binnen de gematigde klimaatschaal in Simplebox aangepast (zie figuur 1). In de huidige modelopzet bestaan zowel het regionale als het continentale compartiment uit twee delen (in plaats van één). Op continentale schaal zijn nu twee bovenstroomse gebieden buiten Nederland te onderscheiden. Op regionale schaal is er een Nederlands bovenstrooms deel en een benedenstrooms deel, dat tevens water uit het buitenland ontvangt (de zijrivieren). Ook met deze aanpassing blijft het een vereenvoudigde weergave van de twee stroomgebieden waar we met een tijdsaanduiding in jaren duiden hoe lang PFAS in oppervlaktewater aanwezig kunnen blijven. Gezien de resultaten voor een aantal PFAS (TFA, PFBS, etc.) waarvan concentraties in oppervlaktewater relatief snel dalen, is het aan te bevelen nader onderzoek te doen naar de PFAS specifieke transport processen, zoals interactie met oppervlakken (bijv. sea/river spray) en biota. Voor de PFAS (PFOA, PFNA) welke mogelijk beduidend langer vanuit de bodem (en grondwater) naleveren aan het oppervlaktewater, kan het nuttig zijn de hydrologische dynamiek van run-off, maar ook effecten van input via grondwater beter te onderzoeken (met name relevant voor PFAS die in hoge concentraties voorkomen in het grondwater, zoals TFA[1]). Zoals in de inleiding genoemd, wordt er in het PFAS onderzoeksprogramma onderzoek gedaan naar de verspreiding van PFAS door de bodem naar het grondwater. De resultaten van dit onderzoek worden eind 2026 verwacht en kunnen mogelijk worden gebruikt in de verbetering van SimpleBox op dit gebied.

Tot slot zijn de fysisch-chemische eigenschappen van de geselecteerde stoffen deels gebaseerd op schattingen en expertbeoordelingen, wat extra onzekerheid met zich meebrengt in de berekeningen. Verder zijn een aantal processen die belangrijk zijn voor oppervlakte-actieve stoffen zoals PFAS, niet in deze modellering meegenomen omdat dit nog niet mogelijk is in SimpleBox. Wanneer hier aanleiding toe is kan het model uitgebreid worden en de analyse herhaald. Denk hierbij bijvoorbeeld aan effecten van seaspray op het transport van PFAS tussen water en bodem.

Keuze van PFAS en inschatting van noodzakelijke concentratiedaling
Er is gekozen om de analyse uit te voeren voor de tien PFAS die in 2022 in meer dan 90 procent van het drinkwater uit oppervlaktewater werden aangetroffen. Hiermee ligt de focus op de meest relevante en veelvoorkomende stoffen. Tegelijkertijd zijn dit niet alle PFAS die in de Rijn en Maas voorkomen, waardoor de resultaten niet het volledige verhaal vertellen.

Bij het bepalen van de benodigde reductie in PFAS-concentratie (95 procent) is een pragmatische aanpak gehanteerd, waarbij is uitgegaan van de drinkwaterrichtwaarde (4,4 ng PEQ/L) en van de gemiddelde concentratie van 24 door Rijkswaterstaat gemeten PFAS tussen 2018 en 2022.[8] Voor een vollediger en nauwkeuriger beeld van het benodigde reductiedoel, is het noodzakelijk om een meer gedetailleerde analyse uit te voeren van de meetgegevens voor álle PFAS die relevant zijn voor de beoordeling van oppervlaktewater als drinkwaterbron in de Rijn en Maas (momenteel 36 stoffen).[28] Een dergelijke analyse kan uitwijzen dat een reductie van 95 procent mogelijk niet voldoende is om overal aan de drinkwaterrichtwaarde te voldoen.

Emissiescenario's
Er zijn een aantal discussiepunten met betrekking tot de gehanteerde emissiescenario's. Zo is de historische belasting door PFAS van de Rijn en Maas alleen in algemene zin, door een diffuse belasting die gelijk is voor alle PFAS, meegenomen in de modelbenadering. Dit heeft echter geen invloed op de resultaten, omdat de gerapporteerde relatieve afname wordt bepaald door de processconstanten voor transport, die afhankelijk zijn van de stof- en landschapseigenschappen, en niet van de hoogte van de emissie zelf.

Daarnaast is voor alle PFAS dezelfde verdeling van de emissie naar lucht, bodem en water gehanteerd, gebaseerd op de verdeling van PFOA[24]. Dit kan van invloed zijn op de resultaten. Het model houdt namelijk geen rekening met mogelijke verschillen in de verdeling van de emissies tussen de PFAS, terwijl deze verschillen het tijdsverloop van de afname kunnen beïnvloeden. Bijvoorbeeld door variatie in binding aan de bodem afhankelijk van het compartiment waarin de emissie plaatsvindt. Hierdoor kunnen de daadwerkelijke afnametijden van PFAS-concentraties op specifieke locaties hoger of lager uitvallen dan het model nu voorspelt. Als in werkelijkheid een groter deel van de emissies naar de bodem plaatsvindt, kan dit er bijvoorbeeld toe leiden dat de afname van langketenige PFAS langer duurt dan de huidige resultaten suggereren.

Daarnaast zijn de toekomstscenario's (tabel 2), hoewel geïnspireerd op het achtergronddocument van het restrictievoorstel[26], relatief algemeen geformuleerd en gebaseerd op aannames over de effectiviteit en timing van emissiereductiemaatregelen. In werkelijkheid kunnen deze heel anders uitpakken. De onzekerheid hierin is niet meegenomen in deze studie. De scenario's zijn vooral bedoeld om inzicht te geven in de orde van grootte van de benodigde afnametijd, en niet om exacte voorspellingen te doen. In vervolg studies zou de mogelijke onzekerheid hierin verder onderzocht kunnen worden, denk daarbij aan effecten van het niet behalen van 100% afname van de emissie.

6. Conclusie

In deze kennisnotitie is onderzocht hoe lang PFAS in de Rijn en Maas aanwezig blijven na het doorvoeren van emissiereducerende maatregelen. Dit met het oog op de benodigde toekomstige zuiveringsinspanning van drinkwaterbedrijven die water uit deze rivieren

winnen. De verkennende analyse[v] laat zien dat, bij volledige implementatie van emissierestricties (scenario 1, zie tabel 2), het tot 30 jaar kan duren voordat de concentraties van de tien[vi] meest voorkomende PFAS in de Rijn en Maas voldoende[vii] zijn gedaald om zuiveringsmaatregelen overbodig te maken. Bij invoering van restricties met derogaties (scenario 2) is deze periode langer en kan oplopen tot 40 jaar. De huidige doelstelling van het ICBR om de emissie van microverontreinigingen in het Rijnstroomgebied met 30 procent te reduceren (scenario 3), lijkt onvoldoende om de PFAS-concentraties in de Rijn tot een acceptabel niveau terug te brengen.

Juist de langketenige PFAS, die vanwege hun hoge RPF op termijn het meest bepalend zijn voor de risicobeoordeling, blijven langdurig aanwezig in de Rijn en Maas. Een positief aspect is dat deze langketenige PFAS met de huidige zuiveringstechnieken[viii] bij drinkwaterbedrijven die water uit de Rijn en Maas winnen, effectief uit het water kunnen worden verwijderd. Omdat kortketenige PFAS met de huidige zuiveringstechnieken niet goed verwijderd kunnen worden, is een afname van hun concentraties (9 tot 22 jaar, afhankelijk van het type PFAS en het emissiescenario) alsnog gunstig voor de drinkwaterkwaliteit, ook al zijn ze minder potent dan de langketenige PFAS.

7. Aanbevelingen voor vervolgonderzoek

Voor verdere verfijning van de resultaten zijn de volgende richtingen voor vervolgonderzoek nuttig:

- Het herhalen van de beschreven analyse met verfijnde emissiescenario's - bijvoorbeeld door een gevoeligheidsanalyse uit te voeren op een meer PFAS-specifieke en mogelijk onzekere verdeling van emissies over water, bodem en lucht, of door onzekerheid toe te voegen aan de emissiescenario's uit tabel 2 - kan waardevol zijn. Hiermee wordt inzicht verkregen in de mate waarin onzekerheid in de emissieverdeling en -omvang doorwerkt in de uiteindelijke modelresultaten.
- Het actualiseren van parameters die het hoogst scoren in de gevoeligheids-analyse, zoals de Koc voor langketenige PFAS.
- Het toevoegen van een aantal additionele processen aan SimpleBox zoals de nalevering uit grondwater en de mogelijke effecten door PFAS uit seaspray.
- Het aanpassen van SimpleBox om het mogelijk te maken om verschillende klimaatscenario's mee te nemen.
- Het koppelen van de resultaten uit het SimpleBox model aan meer gedetailleerde, locatie-specifieke hydrologische modellen biedt de mogelijkheid om daadwerkelijke emissiebronnen, het onderscheid tussen diffuse en puntbronnen en de ligging van drinkwaterinnamepunten nauwkeuriger mee te nemen in de analyse.

8. Dankwoord

De auteurs danken Monique van der Aa (RIVM), Arjen Wintersen (RIVM), Polly Boon (RIVM), Harrie Timmer (Vewin), Rona Vink (Evides), Bram Martijn (Dunea), Gertjan Zwolsman (Dunea), André Bannink (RIWA), Koen Zuurbier (PWN), Roy Smits (Rijkswaterstaat), Erik Verhofstad (IenW) en de PFAS Stuur- en Regiegroep van het RIVM voor hun waardevolle feedback op eerdere versies van deze kennisnotitie.

[v] Conclusie gebaseerd op de mediane resultaten in figuur 2 en tabel B-7.2.
[vi] Op basis van meetgegevens uit 2022.[1]
[vii] Daling in concentraties in de Rijn en Maas van 95 procent om rekening te houden met andere aanwezige PFAS.
[viii] Actief kool met periodieke reactivatie.

9. Literatuur

1. Schepens, M. *et al. Risk Assessment of Exposure to PFAS through Food and Drinking Water in the Netherlands*. (2023) doi:10.21945/RIVM-2023-0011.
2. van der Aa, M., Hartmann, J. & Smit, E. *PFAS in Nederlands Drinkwater Vergeleken Met de Nieuwe Europese Drinkwaterrichtlijn En Relatie Met Gezondheidskundige Grenswaarde van EFSA*. (2022) doi:10.21945/RIVM-2022-0149.
3. Lyu, X. *et al.* Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS) in Subsurface Environments: Occurrence, Fate, Transport, and Research Prospect. *Reviews of Geophysics* **60**, e2021RG000765 (2022).
4. Arcadis. *PFAS in Drinkwater: Een Technische En Maatschappelijke Uitdaging. Adviesrapport Beleidskompas Regulering PFAS in Het Drinkwaterbesluit Ministerie van Infrastructuur En Waterstaat - DGWB*. https://open.overheid.nl/documenten/686dfbf0-840e-4bb2-aab3-f53ea2382e91/file (2025).
5. Evich, M. G. *et al.* Per- and polyfluoroalkyl substances in the environment. *Science* **375**, eabg9065 (2022).
6. Mumtaz, M. *et al.* Per- and Polyfluoroalkyl Substances in Representative Fluorocarbon Surfactants Used in Chinese Film-Forming Foams: Levels, Profile Shift, and Environmental Implications. *Environ. Sci. Technol. Lett.* **6**, 259–264 (2019).
7. Van Der Veen, I. *et al.* Fate of Per- and Polyfluoroalkyl Substances from Durable Water-Repellent Clothing during Use. *Environ. Sci. Technol.* **56**, 5886–5897 (2022).
8. Jonker, M. *Poly- En Perfluoralkylstoffen (PFAS) in Rijn-, Maas- En Drinkwater. Meetwaarden, Normen En Risicogrenzen*. https://www.ilent.nl/onderwerpen/pfas/documenten/leefomgeving-en-wonen/drinkwater/drinkwater/rapporten/poly-en-perfluoralkylstoffen-pfas-in-rijn-maas-en-drinkwater (2024).
9. van der Aa, M., Hartmann, J. & Biesebeek, J. D. te. *Analyse Bijdrage Drinkwater En Voedsel Aan Blootstelling EFSA-4 PFAS in Nederland En Advies Drinkwaterrichtwaarde*. https://www.rivm.nl/documenten/analyse-bijdrage-drinkwater-en-voedsel-aan-blootstelling-efsa-4-pfas-in-nederland (2021).
10. RIVM. Relatieve Potentie Factoren PFAS. https://www.rivm.nl/pfas/rpf (2025).
11. WHO. Assessing the occurrence and human health risk of per- and polyfluoroalkyl substances. https://www.who.int/activities/assessing-the-occurrence-and-human-health-risk-of-per--and-polyfluoroalkyl-substances.
12. IenW. IENW/BSK-2025/140160 Beslisnota bij Verzamelbrief PFAS. (2025).
13. Li, H., Zhu, X., Zhang, J., Wang, Z. & Li, R. Characterizing the long-term occurrence and anthropogenic drivers of per- and polyfluoroalkyl substances in surface water of the Rhine River. *Water Research* **245**, 120528 (2023).
14. Pronk, T., Amato, E., Vink, R. & Zuurbier, K. *Dynamiek van PFAS in de Maas En Rijn*. https://www.h2owaternetwerk.nl/images/2024/Juni/H2O-Online_240605_PFAS_in_rivieren.pdf (2024).
15. Zhu, X. *et al.* Evaluation and prediction of anthropogenic impacts on long-term multimedia fate and health risks of PFOS and PFOA in the Elbe River Basin. *Water Research* **257**, 121675 (2024).
16. Bulder, A., van der AA, M., Affourtit, F., Bakker, M. & Bil, W. *PFAS-Onderzoeksprogramma RIVM. Inventarisatie Beschikbare Informatie En Afbakening Onderzoek*. https://rivm.openrepository.com/handle/10029/627930 (2024) doi:10.21945/RIVM-2024-0104.
17. Schoorl, M., Hollander, A. & Meent, D. V. de. SimpleBox 4.0 : A multimedia mass balance model for evaluating the fate of chemical substances. https://www.rivm.nl/publicaties/simplebox-40-a-multimedia-mass-balance-model-for-evaluating-fate-of-chemical-substances (2016).
18. RIVM. SimpleBox. https://www.rivm.nl/en/soil-and-water/simplebox (2024).

19. C3S. ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS) https://doi.org/10.24381/CDS.ADBB2D47 (2018).
20. Lehner, B. & Grill, G. Global river hydrography and network routing: baseline data and new approaches to study the world's large river systems. *Hydrological Processes* **27**, 2171–2186 (2013).
21. Friedl, M. & Sulla-Menashe, D. MODIS/Terra+Aqua Land Cover Type Yearly L3 Global 500m SIN Grid V061. NASA Land Processes Distributed Active Archive Center https://doi.org/10.5067/MODIS/MCD12Q1.061 (2022).
22. ChemAxon. Calculator Plugin Marvin. (2025).
23. US EPA. Estimation Programs Interface Suite for Microsoft Windows. (2025).
24. Meesters, J. A. J., Hof, M., Quik, Joris, De Blaeij, A. & Gabbert, S. Environmental stock pollution modeling to inform emission intervention measures on very persistent chemicals: An illustrative case for perfluorooctanoic acid (PFOA). *Submitted* (2026).
25. Wang, Z., Cousins, I. T., Scheringer, M., Buck, R. C. & Hungerbühler, K. Global emission inventories for C4–C14 perfluoroalkyl carboxylic acid (PFCA) homologues from 1951 to 2030, Part I: production and emissions from quantifiable sources. *Environment International* **70**, 62–75 (2014).
26. RIVM, Bundesanstalt fur Arbeitzschutz und Arbeitzmedizin, Swedish Chemicals Agency, Norwegian Environment Agency, & Environment Protection Agency. What you need to know about the updated PFAS restriction dossier. (2025).
27. ICBR. Rhine 2040. (2020).
28. Hartmann, J., Bokkers, B. & Smit, E. *Werkwijze Toetsing PFAS in Drinkwatermonsters*. KU-2023-0024 (2023).
29. Borgonovo, E. A new uncertainty importance measure. *Reliability Engineering & System Safety* **92**, 771–784 (2007).
30. Hollander, A., Huijbregts, M. A. J., Ragas, A. M. J. & van de Meent, D. BasinBox: a generic multimedia fate model for predicting the fate of chemicals in river catchments. in *Living Rivers: Trends and Challenges in Science and Management* (eds. Leuven, R. S. E. W., Ragas, A. M. J., Smits, A. J. M. & van der Velde, G.) 21–38 (Springer Netherlands, Dordrecht, 2006). doi:10.1007/1-4020-5367-3_2.
31. Quik, J. T. K., Meesters, J. A. J. & Koelmans, A. A. A multimedia model to estimate environmental fate of microplastic particles. *Science of The Total Environment* 163437 (2023) doi:10.1016/j.scitotenv.2023.163437.
32. van de Meent, D., de Zwart, D. & Posthuma, L. Screening-Level Estimates of Environmental Release Rates, Predicted Exposures, and Toxic Pressures of Currently Used Chemicals. *Environmental Toxicology and Chemistry* **39**, 1839–1851 (2020).
33. Klepper, O. & den Hollander, H. A. A comparison of spatially explicit and box models for the fate of chemicals in water, air and soil in Europe. *Ecological Modelling* **116**, 183–202 (1999).
34. Jensen, C. R., Genereux, D. P., Solomon, D. K., Knappe, D. R. U. & Gilmore, T. E. Forecasting and Hindcasting PFAS Concentrations in Groundwater Discharging to Streams near a PFAS Production Facility. *Environ. Sci. Technol.* **58**, 17926–17936 (2024).

Bijlage

Tabellen B-1 t/m B-10 in Bijlage KN-2026-0060