
PFAS in sea spray

¹ Vrije Universiteit Amsterdam

² Scientific Technical Advice for Environment Polluting Substances (STAEPS)

Dit rapport is vrijgegeven door:

Afdelingshoofd van de afdeling Milieu en Gezondheid



De opdrachtgever van dit rapport was: Provincie Noord-Holland, Sector Omgevingsbeleid, Team Leefbaarheid

Het is intern gereviewed door:

Milieu & Gezondheid

O|2 Building
Faculty of Science
Vrije Universiteit Amsterdam
De Boelelaan 1085
1081 HV AMSTERDAM
T
E

Provincie Noord-Holland

Sector Omgevingsbeleid, Team Leefbaarheid

Houtplein 33
2012 DE Haarlem
T
E

Copyright © 2022, Milieu & Gezondheid

Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke wijze ook, zonder voorgaande schriftelijke toestemming van de houder van het auteursrecht.

Inhoud

Achtergrond	4
1. Wat is sea spray?	5
2. PFAS in sea spray	7
3. Bemonstering opties	8
4. Onderzoeksvraag	10
Referenties	11

Achtergrond

In 2019 heeft Sweco Nederland B.V. in opdracht van de provincie Noord-Holland een onderzoek uitgevoerd naar achtergrondconcentraties PFAS in de bodem van de provincie (Hollander, 2019). Een van de meest opvallende resultaten was het voorkomen van hoge gehalten PFOS aan de kust, landinwaarts afnemend. Opvallend genoeg werd voor PFOA een omgekeerde trend waargenomen, met hogere PFOA-concentraties in het oosten. In 2020 heeft de Antea Group een vergelijkbaar onderzoek gedaan met een specifieke focus op PFOS in het duingebied binnen de beheerregio van Omgevingsdienst IJmond (van der Groep, 2020). Ook in dit onderzoek werden dicht op de kust hoge hoeveelheden PFOS aangetroffen, die sterk afnamen naarmate de afstand van de kust toenam. In het Antea rapport worden PFOS-bevattende sea spray aerosolen (SSA) als mogelijke verklaring genoemd. De hypothese is dat bij het breken van golven aerosolen verrijkt met PFOS vrij kunnen komen, die landinwaarts getransporteerd kunnen worden alvorens neer te slaan op de duinbodem. Vanuit de provincie Noord-Holland is ons gevraagd een onderzoeksvraag te formuleren om deze hypothese te testen. Wat volgt zijn 1) een korte achtergrond over het fenomeen sea spray, 2) de huidige kennis over het voorkomen van PFAS in sea spray, 3) een beschouwing over mogelijke bemonsteringstechnieken en 4) formulering van de onderzoeksvraag.

1. Wat is sea spray?

Sea spray aerosolen (SSA) bestaan uit een suspensie, in de lucht, van deeltjes die direct aan het zeeoppervlak worden geproduceerd. Deze deeltjes bestaan voornamelijk in de vloeibare fase (d.w.z. als druppels), en hun straal varieert van ongeveer 10 nm tot enkele millimeters. – zie Lewis (2008) voor een uitgebreide mechanistische uitleg van dit verband – wordt deze typisch uitgedrukt als de straal bij een relatieve luchtvochtigheid van 80% (r_{80}). In het algemeen worden SSA-deeltjes onderverdeeld in drie klassen van grootte: $r_{80} \leq 1 \mu\text{m}$ (klein), $1 \mu\text{m} < r_{80} \leq 25 \mu\text{m}$ (medium), en $r_{80} \geq 25 \mu\text{m}$ (groot). Deze verdeling is gebaseerd op de eigenschappen en milieugedrag van de SSA-deeltjes (Lewis and Schwartz, 2004) en hangt samen met de manier waarop verschillende typen SSA-deeltjes gevormd worden en weer uit de atmosfeer verdwijnen (de Leeuw et al., 2011).

Sea spray aerosolen worden gevormd aan het zeeoppervlak, voornamelijk door het breken van de golven. Wanneer een golf breekt wordt lucht in het water meegevoerd en verspreid in bellen, die vervolgens naar het oppervlak stijgen en daar uiteenspatten. Bij het knappen van een luchtbel worden zogenaamde ‘film drops’ gevormd, het aantal logischerwijs afhankelijk van de grootte van de bel (tot zo’n 1000 per bel als deze groot genoeg is). Film drops hebben over het algemeen een straal van minder dan $1 \mu\text{m}$, en de meeste kleine SSA-deeltjes (i.e., $r_{80} \leq 1 \mu\text{m}$) worden dus gevormd als film drops. Na het knappen van een luchtbel ontstaat een verticale opwaartse straal in de holte die door de bubbel is achtergelaten. Deze straal kan uiteenvallen in zogenaamde ‘jet drops’, het aantal wederom afhankelijk van de grootte van de bel (tot zo’n 10 per bel). Jet drops hebben een straal die grofweg 10% is van de straal van de bel waaruit ze zijn ontstaan, en de meeste medium SSA-deeltjes (i.e., $1 \mu\text{m} < r_{80} \leq 25 \mu\text{m}$) worden gevormd als jet drops. Grote SSA-deeltjes (i.e., $r_{80} \geq 25 \mu\text{m}$) worden over het algemeen niet gevormd door het knappen van luchtbelletjes in water. Bij hogere windsnelheden (i.e., meer dan $\sim 10 \text{ m/s}$) kan de wind de golf toppen ‘afscheuren’ waardoor zogeheten ‘spume drops’ ontstaan (Monahan et al., 1983). Het grootste deel van grote SSA-deeltjes wordt gevormd als spume drops.

SSA-deeltjes kunnen grote afstanden afleggen in de atmosfeer voordat ze weer neerslaan op het aardoppervlak. Atmosferisch transport is omgekeerd afhankelijk van de grootte van de deeltjes. Terwijl spume drops al binnen enkele seconden tot minuten terugvallen naar het zeeoppervlak (Andreas, 1992) kunnen kleinere SSA-deeltjes honderden tot duizenden kilometers afleggen (Lewis and Schwartz, 2004). Windsnelheid speelt hierbij uiteraard ook een belangrijke rol. Niet alleen doordat het een dominante factor is voor het ontstaan (en breken) van golven, maar ook doordat het van invloed is op het opwaarts turbulent transport van nieuwgevormde SSA-deeltjes. Aangenomen wordt dat de windsnelheid nabij het aardoppervlak de dominante factor is voor de productie van SSA. Als gevolg hiervan varieert de productie van SSA zowel geografisch (dichter bij de kust is er meer golfactie dus meer SSA-productie) als temporeel (in herfst en winter waait het vaker en harder).

Dankzij hun grootte en wateraantrekkende eigenschappen functioneren SSA-deeltjes als condensatiekernen (CN) voor de vorming van wolken (Andreae and Rosenfeld, 2008), en de

belangrijkste verwijderingsroute van SSA-deeltjes uit de atmosfeer is dan ook via natte depositie. Droge depositie, i.e., het neerslaan onder invloed van zwaartekracht, is zeker voor kleinere SSA-deeltjes van ondergeschikt belang. Voor SSA-deeltjes met r_{80} van 1 μm , 2 μm en 5 μm , schatten Lewis and Schwartz (2004) de typische atmosferische verblijftijd als gevolg van enkel droge depositie op respectievelijk $\sim 10^4$ weken, 2.3 dagen en 10 uur. Aangezien precipitatie (e.g. regenval) met een frequentie van enkele dagen plaatsvindt in kustregio's, is zeker voor kleine SSA-deeltjes (i.e., $r_{80} \leq 1 \mu\text{m}$) natte depositie de dominante route (de Leeuw et al., 2011).

Naast atmosferische verblijftijden en transport, lijkt ook de samenstelling van SSA-deeltjes deels afhankelijk te zijn van hun grootte. De drie belangrijkste componenten waaruit SSA-deeltjes bestaan zijn zouten, water-oplosbaar organisch materiaal (water-soluble organic matter; WSOM), en water-onoplosbaar organisch materiaal (water-insoluble organic matter; WIOM). De massafractie van organisch materiaal (WSOM en WIOM) is omgekeerd afhankelijk van de grootte van de SSA-deeltjes. Metingen door Facchini et al. (2008) laten zien dat deeltjes met een radius $\geq 0.5 \mu\text{m}$ voor meer dan 90% uit zeezout bestaan, terwijl deeltjes met een radius $< 0.25 \mu\text{m}$ voornamelijk WIOM en in mindere mate WSOM bevatten. De massafractie WIOM nam toe van 0.03 tot 0.77 met afnemende deeltjesgrootte van 4 tot 0.06 μm . Een interessante serie van veldstudies aan de Ierse westkust (Cavalli et al., 2004; O'Dowd et al., 2004; Yoon et al., 2007; Ceburnis et al., 2008) heeft aangetoond dat de massafractie WIOM in SSA-deeltjes seizoensgebonden is. Dat wil zeggen, de bijdrage van organisch materiaal is hoger in tijden van hogere biologische activiteit, terwijl in tijden van lagere biologische activiteit (in dit geval in de winter), SSA-deeltjes voor het grootste deel uit zeezout bestaan. Bovendien blijken concentraties van zeezout en WIOM af te nemen over een verticale gradiënt ten opzichte van het aardoppervlak, terwijl WSOM en nss (non-sea-salt) sulfaat juist toenamen met toenemende hoogte. Dit toont aan dat net als zeezout ook WIOM in SSA haar oorsprong vindt in het wateroppervlak, terwijl WSOM een atmosferische oorsprong lijkt te hebben. Het lijkt waarschijnlijk dat de SSA-deeltjes die sterk verrijkt zijn met organisch materiaal afkomstig zijn van fragmentatie van golfkoppen waaruit veel van het zeewater is weggelopen voordat ze barsten, waardoor een film achterblijft die sterk verrijkt is aan oppervlakteactief materiaal (de Leeuw et al., 2011). Tot slot laten veel metingen zien dat de relatieve concentraties van de belangrijkste opgeloste stoffen in SSA-deeltjes (bijv. natrium) vergelijkbaar zijn met de relatieve concentraties in het zeewater waaruit ze zijn ontstaan. Als dit niet zo is, zoals in het geval van WIOM, bijvoorbeeld door actieve aantrekking over het water-lucht oppervlak, worden SSA-deeltjes verrijkt genoemd met dergelijke stoffen (de Leeuw et al., 2011). De verrijkingfactor kwantificeert het relatieve verschil tussen de concentratieverhouding stof: natrium (of een ander belangrijk bestanddeel van zeewater) in het SSA-deeltje, ten opzichte van dezelfde concentratieverhouding in het zeewater. Bij een waarde groter dan 1 is sprake van verrijking.

2. PFAS in sea spray

De drie belangrijkste bronnen van atmosferische PFAS zijn de chemische industrie (directe emissie tijdens bijv. de productie van fluoropolymeren), de transformatie in de atmosfeer van vluchtige precursors (bijv. FTOHs) naar PFAS, en de transfer van PFAS van water naar lucht via SSA. Schattingen op basis van experimenten en veldobservaties duiden op een substantiële bijdrage van SSA aan de totale atmosferische PFAS, vergelijkbaar met die van de andere twee bronnen (Johansson et al., 2019).

Net als WIOM kan ook het oppervlakte-actieve PFAS actief onttrokken worden uit het zeewater, over het water-lucht interface van de bellen die ontstaan tijdens het breken van de golven. SSA-deeltjes zijn dan ook verrijkt met PFAS: in een experimentele studie lieten Sha et al. (2021) zien dat PFAS-concentraties in kleine SSA-deeltjes (i.e., $r_{80} \leq 1 \mu\text{m}$) 4 tot 5 keer zo hoog waren dan hun relatieve concentraties in het zeewater waaruit ze ontstaan. Een veldstudie in South Bay (Antarctica) laat eenzelfde beeld zien (Casas et al., 2020). In het zeewater (op 0.3 m diepte) werd gemiddeld 313 pg/L PFAS gemeten, in de bovenste 1-1000 μm van het zeeoppervlak (de "surface microlayer SML") gemiddeld 447 pg/L, en in SSA-deeltjes gemiddeld 670 pg/L. Verrijkingfactoren voor PFAS in SML ten opzichte van zeewater varieerden van 1.2 tot 5, terwijl die voor SSA varieerden tussen 522 en 4690. Zij concludeerden dat door de sterke verrijking van PFAS in marine aerosols de rol van SSA in long-range transport van PFAS erg groot is. In een 'foam-fractionation' experiment toonden Smith et al. (2022) aan dat er een sterke verrijking optreedt van een hele reeks aan perfluoralkylzuren (PFAAs) vanuit effluent en influent van een rioolwaterzuivering. De verrijkingfactoren waren afhankelijk van de lengte van de C-F keten. PFAAs met lange ketens werden sterker verrijkt in het schuim dan de korte keten PFAAs en PFSAs sterker dan PFCAs. Smith et al. (2022) gebruikten deze methode zelfs om afvalwater te reinigen van PFAS, wat aangeeft dat de verrijking van de luchtbellens sterk is. Samengevat blijkt uit meerdere literatuurbronnen dat verrijking van PFAS snel op kan treden in water dat belucht wordt, zoals van oppervlakte-actieve stoffen als PFAS ook verwacht kan worden.

Sha et al. (2022) toonden aan dat er een duidelijke correlatie bestaat tussen de hoeveelheid sea spray (met daarin een reeks aan PFAAs) en afstand tot de kust. Dit onderzoek werd uitgevoerd met high volume air samplers, met een frequentie van 2-8 maal per maand. Hierbij werd steeds ca. 1500 m³ lucht bemonsterd gedurende een periode van 48 uur. Casas et al. (2020) toonden aan dat adsorptie van PFAS aan SSA versterkt kan worden door de aanwezigheid van organisch materiaal in de sea spray.

3. Bemonstering opties

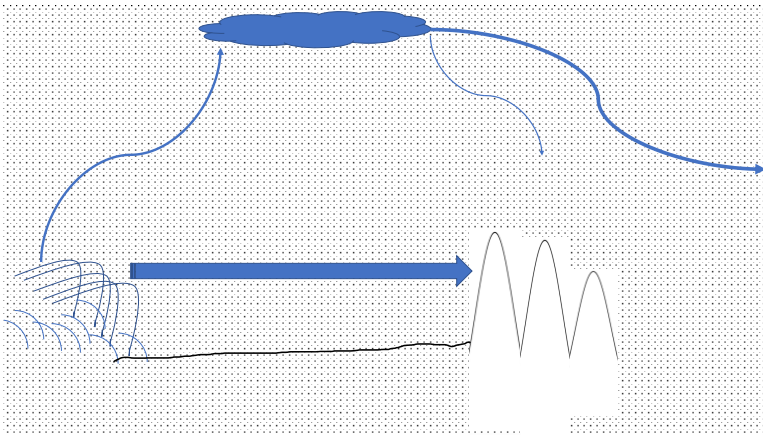
Voor de bemonstering van sea spray met als oogmerk het aantonen en kwantificeren van PFAS bestaan meerdere opties: active (high volume) samplers, passive sampling en het meten van droge of natte depositie of een mengvorm daarvan.

Een overzicht van voor- en nadelen van active en passive sampling wordt gegeven in Tabel 1. De tabel laat zien dat de keuze tussen active of passive sampling niet eenvoudig is. Ook het ijken van passive samplers met behulp van een active sampler is niet gemakkelijk. Immers, een passive sampler dient ca. drie maanden te worden uitgehangen, terwijl de active sampler hooguit 48 uur achter elkaar kan worden gebruikt.

Tabel 1 Vergelijking tussen passive en active sampling.

<i>Eigenschap</i>	<i>Passive sampling</i>	<i>Active sampling</i>
Eenvoud	+++	---
Kosten	+++ (laag)	--- (hoog)
Integratie over tijd	+++	---
Vervoer apparatuur en monsters	+++	---
Onderscheid deeltjes en lucht	---	+++
Precisie	-	+++
Vaststellen bemonsterd luchtvolume	--	+++
Snelheid	---	++
Weersinvloeden	--- (hoge invloed)	+++ (lage invloed)

Hoewel de belangrijkste verwijderingsroute van SSA-deeltjes uit de atmosfeer natte depositie lijkt te zijn (Andreae and Rosenfeld, 2008), is de vraag of dit voor het beoogde onderzoek ook de meest voor de hand liggende opties is. Voor de Hollandse duinen geldt dat de afstand tot de branding relatief kort is. Het proces van opname van SSA in de wolken en het later neerregenen daarvan leidt tot een meer evenwichtige verspreiding van PFAS over Nederland. Bij de Hollandse duinen lijkt eerder sprake van het 'afscheuren' van aerosolen van de golftoppen (Monahan et al., 1983) en met harde wind weer kort daarna neerkomen daarvan in het duingebied. Als dat het dominante proces is, zou kunnen worden volstaan met het meten van droge depositie (Figuur 1), zoals met de hierboven beschreven active of passive sampling. Natrium kan dan gebruikt worden om te bevestigen dat de bemonsterde PFAS van zee afkomstig zijn (Johansson et al., 2018). Indien wel gekozen wordt voor natte depositie metingen, moet daarin ook weer gekozen worden tussen verschillende modellen samplers.



Figuur 1 Wat is het dominante proces?

In de meeste gevallen worden brede trechters (diameter 10-30 cm) of verzamelvaten gebruikt om regen op te vangen (Okay et al., 2002). Dat kan in combinatie met een regen sensor of niet (Cong et al., 2010). Bepaalde constructies zijn nodig om droge depositie te voorkomen. De regensensor kan dan de afdekking openen als het gaat regenen. De hoeveelheid neerslag kan ook worden bijgehouden. Sommige samplers zijn ook geschikt voor sneeuw (St.Louis et al., 1995). Wet deposition samplers zijn vaak gebruikt voor het meten van metalen in lucht.

4. Onderzoeksvraag

De hoofdvraag voor het onderzoek naar PFAS in het kustgebied zou als volgt kunnen worden gedefinieerd:

- ***Kan bevestigd worden dat door de invloed van sea spray de gehalten aan PFAS in het Hollandse duingebied aanzienlijk worden verhoogd en zo ja, hoe groot is de bijdrage van sea spray aan de PFAS-belasting in het duingebied, vergeleken met het 'achterland'?***

Om tot een duidelijk en eenduidig antwoord op deze vraag te komen, dienen een aantal subvragen te worden beantwoord.

1. Welke PFAS dragen bij aan een mogelijk verhoogd PFAS-gehalte in het duingebied (alleen zuren en zo ja welke, precursors, overige?)
 2. Kan worden vastgesteld welke aerosol deeltjes de belangrijkste bijdrage leveren aan leveren aan de veronderstelde extra PFAS-belasting?
 3. Is het 'afscheuren' van de branding bij harde wind het dominante proces voor de veronderstelde extra PFAS-belasting of moet ook met natte depositie (regen, sneeuw) rekening worden gehouden?
 4. Wat is de invloed van het seizoen (veel of weinig wind en invloed van organisch materiaal)?
 5. Hoe is het verschil tussen het PFAS-gehalte in het kustgebied en dat in het achterland (referentielocatie(s))?
-

Referenties

- Andreae, M.O., Rosenfeld, D., 2008. Aerosol–cloud–precipitation interactions. Part 1. The nature and sources of cloud-active aerosols. *Earth-Science Reviews* 89, 13-41.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0012825208000317>
- Andreas, E.L., 1992. Sea spray and the turbulent air-sea heat fluxes. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 97, 11429-11441. <https://doi.org/10.1029/92JC00876>
- Casas, G., Martínez-Varela, A., Roscales, J.L., Vila-Costa, M., Dachs, J., Jiménez, B., 2020. Enrichment of perfluoroalkyl substances in the sea-surface microlayer and sea-spray aerosols in the Southern Ocean. *Environmental Pollution* 267, 115512.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S026974912036200X>
- Cavalli, F., Facchini, M.C., Decesari, S., Mircea, M., Emblico, L., Fuzzi, S., Ceburnis, D., Yoon, Y.J., O'Dowd, C.D., Putaud, J.P., Dell'Acqua, A., 2004. Advances in characterization of size-resolved organic matter in marine aerosol over the North Atlantic. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 109. <https://doi.org/10.1029/2004JD005137>
- Ceburnis, D., O'Dowd, C.D., Jennings, G.S., Facchini, M.C., Emblico, L., Decesari, S., Fuzzi, S., Sakalys, J., 2008. Marine aerosol chemistry gradients: Elucidating primary and secondary processes and fluxes. *Geophysical Research Letters* 35. <https://doi.org/10.1029/2008GL033462>
- Cong, Z., Kang, S., Zhang, Y., Li, X., 2010. Atmospheric wet deposition of trace elements to central Tibetan Plateau. *Applied Geochemistry* 25, 1415-1421.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0883292710001496>
- de Leeuw, G., Andreas, E.L., Anguelova, M.D., Fairall, C.W., Lewis, E.R., O'Dowd, C., Schulz, M., Schwartz, S.E., 2011. Production flux of sea spray aerosol. *Reviews of Geophysics* 49.
<https://doi.org/10.1029/2010RG000349>
- Facchini, M.C., Rinaldi, M., Decesari, S., Carbone, C., Finessi, E., Mircea, M., Fuzzi, S., Ceburnis, D., Flanagan, R., Nilsson, E.D., de Leeuw, G., Martino, M., Woeltjen, J., O'Dowd, C.D., 2008. Primary submicron marine aerosol dominated by insoluble organic colloids and aggregates. *Geophysical Research Letters* 35. <https://doi.org/10.1029/2008GL034210>
- Hollander, M., 2019. Bepaling achtergrondconcentratieniveau PFAS in Noord-Holland - Hoofdrapport. Referentienummer SWNL0249929/2.
https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwik8I_J-r6AhXY_rsIHWwyAhkQFnoECCwQAQ&url=https://www.noord-holland.nl/Onderwerpen/Water_Bodem/PFAS/Publicaties/Rapport_Achtergrondwaarden_PFAS_Noord_Holland.pdf&usq=AOvVaw0ZHVfhtFP6C044xd7uVGZ
- Johansson, J.H., Salter, M.E., Acosta Navarro, J.C., Leck, C., Nilsson, E.D., Cousins, I.T., 2019. Global transport of perfluoroalkyl acids via sea spray aerosol. *Environmental Science: Processes & Impacts* 21, 635-649. <http://dx.doi.org/10.1039/C8EM00525G>
- Johansson, J.H., Shi, Y., Salter, M., Cousins, I.T., 2018. Spatial variation in the atmospheric deposition of perfluoroalkyl acids: source elucidation through analysis of isomer patterns. *Environmental Science: Processes & Impacts* 20, 997-1006. <http://dx.doi.org/10.1039/C8EM00102B>
- Lewis, E.R., 2008. An examination of Köhler theory resulting in an accurate expression for the equilibrium radius ratio of a hygroscopic aerosol particle valid up to and including relative humidity 100%. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 113.
<https://doi.org/10.1029/2007JD008590>
- Lewis, E.R., Schwartz, S.E., 2004. Sea salt aerosol production: Mechanisms, methods, measurements and models: A critical review. American Geophysical Union, Washington, DC.
- Monahan, E.C., Fairall, C.W., Davidson, K.L., Boyle, P.J., 1983. Observed inter-relations between 10m winds, ocean whitecaps and marine aerosols. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 109, 379-392. <https://doi.org/10.1002/qj.49710946010>
- O'Dowd, C.D., Facchini, M.C., Cavalli, F., Ceburnis, D., Mircea, M., Decesari, S., Fuzzi, S., Yoon, Y.J., Putaud, J.-P., 2004. Biogenically driven organic contribution to marine aerosol. *Nature* 431, 676-680. <https://doi.org/10.1038/nature02959>

- Okay, C., Akkoyunlu, B.O., Tayanç, M., 2002. Composition of wet deposition in Kaynarca, Turkey. *Environmental Pollution* 118, 401-410. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0269749101002925>
- Sha, B., Johansson, J.H., Benskin, J.P., Cousins, I.T., Salter, M.E., 2021. Influence of Water Concentrations of Perfluoroalkyl Acids (PFAAs) on Their Size-Resolved Enrichment in Nascent Sea Spray Aerosols. *Environmental Science & Technology* 55, 9489-9497. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c03804>
- Sha, B., Johansson, J.H., Tunved, P., Bohlin-Nizzetto, P., Cousins, I.T., Salter, M.E., 2022. Sea Spray Aerosol (SSA) as a Source of Perfluoroalkyl Acids (PFAAs) to the Atmosphere: Field Evidence from Long-Term Air Monitoring. *Environmental Science & Technology* 56, 228-238. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c04277>
- Smith, S.J., Wiberg, K., McCleaf, P., Ahrens, L., 2022. Pilot-Scale Continuous Foam Fractionation for the Removal of Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS) from Landfill Leachate. *ACS ES&T Water* 2, 841-851. <https://doi.org/10.1021/acsestwater.2c00032>
- St.Louis, V.L., Rudd, J.W.M., Kelly, C.A., Barrie, L.A., 1995. Wet deposition of methyl mercury in northwestern Ontario compared to other geographic locations. *Water, Air, and Soil Pollution* 80, 405-414. <https://doi.org/10.1007/BF01189690>
- van der Groep, K., 2020. Bodemonderzoek naar PFAS in duingebied regio IJmond. Projectnummer 0463634.100.
- Yoon, Y.J., Ceburnis, D., Cavalli, F., Jourdan, O., Putaud, J.P., Facchini, M.C., Decesari, S., Fuzzi, S., Sellegri, K., Jennings, S.G., O'Dowd, C.D., 2007. Seasonal characteristics of the physicochemical properties of North Atlantic marine atmospheric aerosols. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 112. <https://doi.org/10.1029/2005JD007044>
-