



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

PFAS in moedermelk van Nederlandse vrouwen

PFAS in moedermelk van Nederlandse vrouwen

RIVM-briefrapport 2026-0028

Colofon

© RIVM 2026

Delen uit deze publicatie mogen worden overgenomen op voorwaarde van bronvermelding: Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM), de titel van de publicatie en het jaar van uitgave.

DOI 10.21945/RIVM-2026-0028

W. Bil (auteur), RIVM
R. Nederlof (auteur), RIVM
B.G.H. Bokkers (auteur), RIVM

Contact:
R. Nederlof
Chemische Voedselveiligheid
PFAS@rivm.nl

Dit onderzoek werd verricht in opdracht van de Ministeries van Infrastructuur en Waterstaat, Volksgezondheid, Welzijn en Sport, en Landbouw, Visserij, Voedselzekerheid en Natuur in het kader van Programma 53 PFAS.

Dit is een uitgave van:
**Rijksinstituut voor Volksgezondheid
en Milieu**
Postbus 1 | 3720 BA Bilthoven
Nederland
www.rivm.nl

Publiekssamenvatting

PFAS in moedermelk van Nederlandse vrouwen

PFAS zit overal in het milieu. Uit eerder onderzoek van het RIVM blijkt dat bijna alle mensen in Nederland te veel PFAS in hun bloed hebben. Het RIVM heeft nu onderzoek gedaan naar PFAS in moedermelk. Ook is gekeken hoe vaak er te veel PFAS in moedermelk zit (dat wil zeggen: meer dan de 'risicogrens'). Moedermelk is voor veel baby's belangrijke voeding.

Het RIVM deed dit onderzoek in moedermelk van 1629 Nederlandse vrouwen. In alle moedermelk is PFAS gevonden. In 82 procent van de monsters is de hoeveelheid lager dan de risicogrens. Dat betekent dat er bij deze hoeveelheden PFAS in moedermelk geen schadelijke effecten worden verwacht.

Het RIVM keek naar 29 verschillende PFAS. In bijna elk monster zaten minimaal twee soorten PFAS (PFOS en PFOA). In 93 procent van de monsters zijn vier soorten gevonden (PFOS, PFOA, PFNA en PFHxS). Daarvan kwam PFOS het vaakst voor en in de grootste hoeveelheden. Van de 29 PFAS zijn er 21 niet of bijna niet in moedermelk gevonden.

In 18 procent van de onderzochte moedermelk zat wel meer PFAS dan de risicogrens. Dan kan PFAS effect hebben op het lichaam. Bij baby's kan het immuunsysteem bij een te hoge blootstelling bijvoorbeeld minder goed gaan werken. Dit betekent niet dat baby's hier meteen ziek van worden. Dat hangt van verschillende omstandigheden af, zoals erfelijkheid en leefomstandigheden.

Dit onderzoek is onderdeel van een groot onderzoek in Nederland naar mogelijkheden om de blootstelling aan PFAS te verlagen. Dit PFAS-onderzoeksprogramma wil onder andere inzicht geven aan welke soorten PFAS en in welke hoeveelheden inwoners van Nederland blootstaan. Dit gebeurt in opdracht van de ministeries van IenW, VWS en LNV. Als het lukt om de blootstelling aan PFAS te verlagen, is de verwachting dat de hoeveelheid in moedermelk ook daalt.

Kernwoorden: PFAS, moedermelk, risicogrens, humane biomonitoring, PFOS, PFOA, PFNA, PFHxS, zuigelingen

Synopsis

PFAS in breast milk of Dutch women

PFAS is present everywhere in the environment. Previous studies by RIVM have revealed that almost everyone in the Netherlands has too much PFAS in their blood. RIVM has now investigated how much PFAS is present in breast milk. The study also assessed how often there is too much PFAS in breast milk (in other words: higher than the 'risk limit').

RIVM conducted this study using the breast milk of 1629 Dutch women. PFAS was found in all the breast milk examined. In 82% of samples, the quantity was below the risk limit. This means that PFAS in such quantities in breast milk are not expected to lead to harmful effects.

The study looked at 29 different PFAS substances. At least two types of PFAS (PFOS and PFOA) were present in practically every sample. Four types were found in 93% of the samples (PFOS, PFOA, PFNA and PFHxS). Of these types, PFOS was found to be present most often and in the largest quantities. Of the 29 PFAS substances, 21 were either not found or only found rarely in breast milk.

Levels of PFAS exceeding the risk limit were found in 18% of breast milk in the study. At such levels, PFAS can have an impact on the body. In babies, if the exposure levels are too high, this can lead to the immune system functioning less effectively. This does not mean that these babies will immediately become ill as a consequence. The risk of illness depends on a number of circumstances, including heredity and living conditions.

This study is part of a large-scale study in the Netherlands into the possibilities of reducing exposure to PFAS. One of the aims of this PFAS research programme is to provide an insight into the types and quantities of PFAS to which the residents of the Netherlands are exposed. This study was commissioned by the ministries of Infrastructure and Water Management (IenW), Health, Welfare and Sport (VWS) and Agriculture, Fisheries, Food Security and Nature (LVVN). If it is possible to reduce exposure to PFAS, it is expected that the amount in breast milk will also decrease.

Keywords: PFAS, breast milk, risk limit, human biomonitoring, PFOS, PFOA, PFNA, PFHxS, infants

Inhoudsopgave

1	Inleiding — 9
1.1	PFAS in moedermelk — 10
1.1.1	Waarom moedermelk? — 10
1.1.2	Historie van PFAS-metingen in moedermelk in Nederland — 11
1.2	Doel van dit rapport — 11
2	Materiaal en methoden — 13
2.1	Omschrijving COVID MILK-POWER MILK onderzoek — 13
2.1.1	Deelnemers aan de PFAS COVID MILK-POWER MILK studie en monsteselectie — 13
2.2	PFAS-metingen — 14
2.3	Dataverwerking — 15
2.3.1	Bepaling populatiekarakteristieken — 15
2.3.2	Analyse van PFAS bepalingen in melk — 16
2.3.3	Data onder de LOD of LOQ — 16
2.4	Vergelijking van de gemeten waarden met de risicogrens voor PFAS in moedermelk — 17
2.4.1	Beschikbare risicogrens voor PFAS in moedermelk — 17
2.4.2	Bepaling van de cumulatieve concentratie — 18
3	Resultaten — 23
3.1	Populatiekarakteristieken — 23
3.2	Overzicht van PFAS-moedermelkconcentraties in de PFAS COVID MILK-POWER MILK studiepopulatie — 25
3.3	Vergelijking van de cumulatieve moedermelkconcentraties met de risicogrens — 28
3.4	Relatieve bijdrage van individuele PFAS aan de cumulatieve concentratie in moedermelk — 30
4	Discussie — 31
4.1	Aspecten die invloed hebben op het percentage monsters onder de risicogrens — 32
4.1.1	Studieopzet van de PFAS COVID MILK-POWER MILK studie — 32
4.1.2	LB- versus UB-scenario — 33
4.1.3	Aspecten in de afleiding van de risicogrens voor PFAS in moedermelk — 33
4.1.4	Sommatie van PFAS-concentraties in moedermelk volgens aanpak 1 versus aanpak 2 — 35
4.1.5	Aannames en onzekerheden: Samenvattend — 36
4.2	Vergelijking met andere moedermelk metingen uit Nederland — 37
4.3	Vergelijking met andere moedermelk metingen uit Europa — 37
4.4	Aspecten buiten beschouwing gelaten — 37
4.5	Positieve effecten van moedermelk — 38
5	Aanbevelingen — 41
6	Conclusie — 43
	Dankbetuiging — 45

Literatuur — 47

Appendix A Analytical methods for detecting PFAS in breastmilk — 53

Appendix B Resultaten met Upper Bound (UB) scenario — 61

Appendix C Verloop PFAS concentraties in melk gedurende lactatie — 63

Appendix D Vergelijking van PFAS-concentraties in moedermelk in deze studie met andere studies in Nederland en Europa — 71

1 Inleiding

PFAS (per- en polyfluoralkylstoffen) zijn een groep door de mens gemaakte chemicaliën die van nature niet in het milieu voorkomen. De Nederlandse bevolking krijgt op verschillende manieren PFAS binnen. Dit gaat via inname van voedsel en drinkwater (Schepens et al., 2023), maar ook via andere bronnen en blootstellingsroutes, zoals bijvoorbeeld door het inademen van impregneermiddelen of het aanbrengen van cosmetica op de huid (Glüge et al., 2020; Affourtit en Verbruggen 2025). Alleen al vanuit blootstelling via voedsel en drinkwater blijken Nederlanders te veel PFAS binnen te krijgen (Schepens et al., 2023).

In opdracht van de ministeries van Infrastructuur en Waterstaat (IenW), Volksgezondheid, Welzijn en Sport (VWS), en Landbouw, Visserij, Voedselzekerheid en Natuur (LVVN) onderzoekt het RIVM hoe de blootstelling van mensen aan PFAS verminderd kan worden (Bulder et al., 2024; <https://www.rivm.nl/pfas/onderzoeksprogramma>). Onderdeel van dit onderzoeksprogramma is het verkrijgen van een landelijk dekkend beeld van de gecombineerde blootstelling¹ aan PFAS van de Nederlandse bevolking.

Het RIVM gebruikt biomonitoring als onderzoeksmethode om te weten te komen hoeveel PFAS mensen in hun lichaam hebben, door het meten van PFAS-concentraties in lichaamsmaterialen. Tussen 2024 en 2026 heeft het RIVM drie onderzoeken uitgevoerd, waarvoor de benodigde monsters afkomstig waren uit twee bestaande biobanken, aangevuld met bloedmonsters verzameld in 2025 in samenwerking met Sanquin (Bulder et al., 2024). De bestaande biobanken zijn het PIENTER-3 onderzoek van het RIVM (Verberk et al., 2019) met bloedmonsters afgenomen in 2016-2017, en de COVID MILK-POWER MILK studie van het Amsterdam Universitair Medisch Centrum (UMC) (Juncker et al., 2021) met bloed- en moedermelkmonsters uit 2020-2021.

De resultaten van het PIENTER-3 onderzoek, uitgevoerd onder een representatieve groep van de Nederlandse bevolking, werden medio 2025 gepubliceerd (Bil et al., 2025). Dit onderzoek toonde aan dat in bijna alle bloedmonsters minimaal zeven verschillende PFAS² werden gevonden (PFOA, PFNA, PFDA, PFUnDA, PFHxS, PFHpS en PFOS). De concentraties van PFOS waren het hoogst, gevolgd door PFOA. Bij vrouwen van vruchtbare leeftijd en kinderen waren de concentraties PFAS in het bloed iets lager dan bij de rest van de bevolking. In het bloed van inwoners van de regio's Dordrecht en Westerschelde waren de concentraties van enkele PFAS iets hoger dan in de rest van Nederland. Bij bijna de hele bevolking oversteeg de PFAS-concentratie in het bloed de gezondheidkundige grenswaarde. Boven de grenswaarde zijn effecten op het immuunsysteem niet uit te sluiten.

¹ Gecombineerde blootstelling bestaat uit bij elkaar opgetelde blootstelling aan verschillende chemische stoffen vanuit verschillende bronnen en blootstellingsroutes (oraal, inhalatoir, dermaal)

² Zie Tabel 1 voor de volledige namen en CAS nummers van deze en alle andere PFAS in dit rapport

Het huidige rapport bespreekt de resultaten van metingen van PFAS in moedermelkmonsters afgenomen in het COVID MILK-POWER MILK onderzoek in 2020-2021.

1.1 PFAS in moedermelk

1.1.1 *Waarom moedermelk?*

Eén van de redenen dat persistente organische verbindingen (POPs) gemeten worden in moedermelk, is hun lipofiliteit. De traditionele POPs, zoals dioxines, hopen zich op in het vetweefsel van mensen en andere zoogdieren, waaronder het borstweefsel (Zeilmaker et al., 2020). Ook moedermelk is relatief vet, met name in de latere fase van lactatie (Andreas et al., 2015). Hierdoor kunnen POPs vanuit het lichaam in moedermelk terecht komen. De concentratie POPs in moedermelk weerspiegelt wat de moeder gedurende haar leven heeft opgenomen (de *body burden*) (Zeilmaker et al., 2020).

PFAS hopen zich niet op in vetweefsel, maar in eiwitrijke weefsels, zoals de lever, de nieren, de longen en de milt (Nielsen et al., 2024; Domingo, 2025). Ook moedermelk is eiwitrijk, vooral in de eerste dagen na de geboorte (het colostrum). Moedermelk bevat grofweg drie verschillende categorieën eiwitten: wei-eiwitten (zoals α -lactalbumine, lactoferine, secretair IgA (sIgA), secretair IgG (sIgG), albumine, en lysozym), caseïnes (α -S1-, β -, en κ -caseïne) en melkvetbolmembraan-eiwitten (MFGM-eiwitten). De ratio wei-tot-caseïne proteïnen is het hoogste in het colostrum en bereikt een evenwicht in de latere fase van lactatie (Zu en Dingess, 2020). Studies tonen aan dat PFAS binden aan bepaalde eiwitten aanwezig in moedermelk, zoals humaan serumalbumine (Fischer et al., 2024; Starnes et al., 2024) en γ -immunoglobulines (Fischer et al., 2024). De exacte verdeling van PFAS over specifieke melkfracties (i.e. vet-, water- en verschillende eiwitfracties) is slechts beperkt gekarakteriseerd, en dan met name in koemelk (Draghi et al., 2023). Er is weinig bekend over hoe PFAS vanuit het lichaam in moedermelk terecht komen. Een mogelijkheid is dat PFOS en gechloreerde polyfluoralkyl ether sulfonzuren (Cl-PFESAs) door passieve diffusie via de paracellulaire route worden overgedragen van bloed naar moedermelk (Han et al., 2023). Omdat PFAS vanwege hun eigenschappen in moedermelk worden uitgescheiden, is dit een geschikt lichaamsmateriaal voor biomonitoringsonderzoek.

Een andere reden om POPs te meten in moedermelk is de relatieve gevoeligheid van zuigelingen voor de schadelijke effecten van POPs, doordat zij nog in ontwikkeling zijn en voor sommige aspecten afhankelijk zijn van moedermelk (zoals de bescherming tegen pathogenen). Voor PFAS is het meest gevoelige effect (het effect wat optreedt bij de laagste hoeveelheden) een onderdrukt immuunsysteem bij jonge kinderen (EFSA, 2020). Bovendien is de overdracht van PFAS, van de moeder via de moedermelk naar het pasgeboren kind, een uitgangspunt geweest voor de afleiding van de gezondheidkundige grenswaarde voor PFAS door de Europese Autoriteit voor Voedselveiligheid (EFSA, 2020). Zie paragraaf 2.4.1 voor meer details over de afleiding van de grenswaarde en het gekozen uitgangspunt.

1.1.2 *Historie van PFAS-metingen in moedermelk in Nederland*

In tegenstelling tot humane biomonitoring programma's onder de algemene bevolking, die eind jaren negentig grotendeels uitgefaseerd werden (Gezondheidsraad, 2024), heeft Nederland in 2014 nog wel geparticipeerd in de Human Milk Survey voor POPs in moedermelk van de Wereldgezondheidsorganisatie (WHO)/Verenigde Naties (UNEP) (Malisch et al., 2023).

In de zesde cyclus van deze survey werden, naast de 32 POPs gereguleerd onder de Stockholm Conventie in 2019³ (waaronder PFOS en PFHxS), ook een aantal andere PFAS gemeten in moedermelk (Zeilmaker et al., 2020; Malisch et al., 2023). PFOS en PFHxS werden teruggevonden in moedermelk van Nederlandse vrouwen, maar de andere PFAS niet. Later zijn de monsters nogmaals geanalyseerd met gevoeliger meetmethoden en werden naast PFOS en PFHxS ook PFOA, PFNA en PFUnDA teruggevonden (Fiedler et al., 2022).

Naast deze studie met nationale focus is in Nederland ook regionaal moedermelk geanalyseerd op de aanwezigheid van PFAS (Van Beijsterveldt et al., 2022). In deze studie is melk van vrouwen uit de regio Rotterdam onderzocht, en werden zowel PFOS als PFOA teruggevonden. De andere geanalyseerde PFAS (PFNA, PFDA, T-PFHxS, L-PFHxS) werden niet teruggevonden.

Het TV-programma Zembla wijdde in 2022 een aflevering aan de aanwezigheid van PFAS in moedermelk van een kleine groep vrouwen uit de regio Dordrecht. In melk van deze vrouwen werd PFAS aangetroffen. Het RIVM bekeek deze data en schreef dat het op basis van de PFAS-concentraties bij deze vrouwen geen aanleiding zag om te adviseren voor een kortere periode borstvoeding te geven of helemaal te stoppen met borstvoeding geven. De concentraties PFAS in de melk van deze vrouwen lagen rond de risicogrens.⁴

1.2 **Doel van dit rapport**

Het huidige rapport bespreekt de resultaten van metingen van PFAS in Nederlandse moedermelk afgenomen in het COVID MILK-POWER MILK onderzoek in 2020-2021. Deze resultaten geven inzicht in de concentratie PFAS in moedermelk. Het doel van het huidige rapport is tweeledig:

1. Het bepalen van de concentratie PFAS in moedermelk afgenomen bij de COVID MILK-POWER MILK studiepopulatie. Het bepalen van deze concentraties draagt bij aan het doel van het PFAS-programma om een landelijk dekkend beeld van de gecombineerde blootstelling aan PFAS van de Nederlandse bevolking te verkrijgen.
2. Het bepalen van de fractie monsters met PFAS-waarden boven de risicogrens voor PFAS in moedermelk en in welke mate de concentratie PFAS in moedermelk deze risicogrens overstijgt.

³ Inmiddels zijn ook PFOA, PFOA zouten en aanverwante stoffen en langketenige perfluorocarbonzuren, hun zouten en aanverwante stoffen opgenomen op Annex A van de Stockholm Conventie (<https://www.pops.int/TheConvention/ThePOPs/TheNewPOPs/tabid/2511/Default.aspx>)

⁴ <https://www.rivm.nl/pfas/actueel#07092022>

2 Materiaal en methoden

2.1 Omschrijving COVID MILK-POWER MILK onderzoek

De COVID MILK-POWER MILK studie is een prospectieve cohortstudie van het Amsterdam UMC opgezet tijdens de SARS-CoV-2 pandemie (Juncker et al., 2021). Er zijn monsters verzameld van lacterende vrouwen verspreid over heel Nederland met als doel de aanwezigheid en de dynamiek van IgA antilichamen tegen SARS-CoV-2 in moedermelk te bepalen.

Deelnemers werden benaderd om mee te doen aan de studie via een oproep in de media (sociale media, televisie, kranten en radio). In de studieopzet werd niet specifiek gericht op het verkrijgen van een representatieve selectie van jonge moeders in de Nederlandse bevolking, hoewel vrouwen uit heel Nederland werden geïncludeerd in de studie. Moedermelkmonsters, bloedserummonsters⁵ en vragenlijsten van de deelnemers werden afgenomen tussen 2020-2021. Via de vragenlijsten is van de deelnemers ook informatie verzameld over demografische kenmerken, leefsituatie, postuur, algemene gezondheid, de zwangerschap, hun kind, en hoeveel kinderen zij hadden op het moment van bemonstering. In totaal gaven 2258 deelnemers toestemming om hun monsters ook voor niet-COVID-gerelateerd onderzoek te gebruiken.

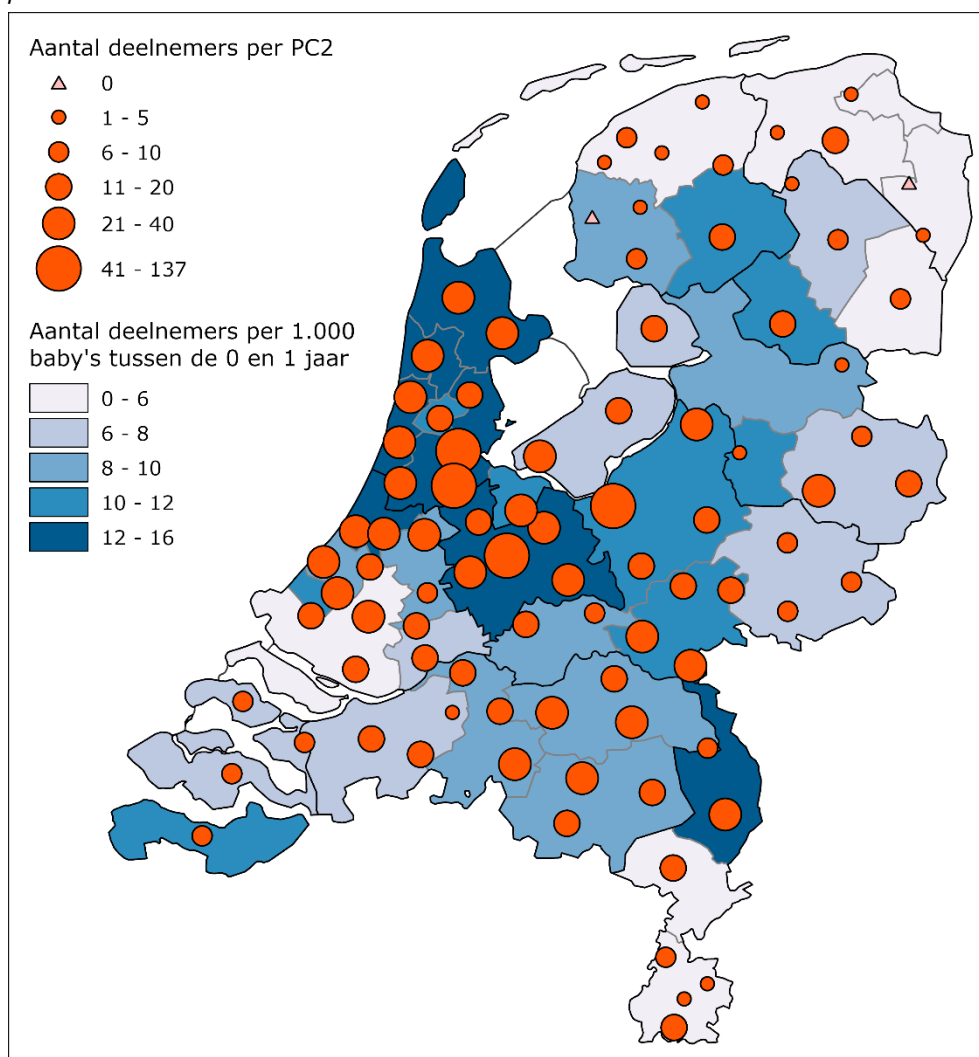
2.1.1 *Deelnemers aan de PFAS COVID MILK-POWER MILK studie en monsterselectie*

RIVM, het Amsterdam UMC en de Vrije Universiteit (VU) Amsterdam zetten in 2023 een samenwerking op voor het meten van PFAS in de monsters van de COVID MILK-POWER MILK studie (Bulder et al., 2024). Tussen 2024-2025 werden alle 2258 deelnemers benaderd met de vraag of zij akkoord gingen met het bepalen van PFAS in de afgenomen monsters. Hierop gaven 1708 deelnemers akkoord. Er waren melkmonsters beschikbaar van 1629 van deze deelnemers. Figuur 1 laat zien hoe de deelnemers aan het PFAS COVID MILK-POWER MILK onderzoek geografisch over het land verdeeld zijn, naar postcode en COROP-gebied⁶.

⁵ Naast moedermelk monsters werden ook bloedserummonsters afgenomen bij de deelnemers. De PFAS-concentratie is ook in deze bloedmonsters bepaald. De uitkomsten van deze meetcampagne zullen elders worden gepresenteerd.

⁶ Een COROP-gebied is een regionaal gebied binnen Nederland dat deel uitmaakt van de COROP-indeling. Deze regionale indeling, tussen gemeenten en provincies in, wordt gebruikt voor analytische doeleinden. In totaal telt Nederland 40 COROP-gebieden. Twee provincies (Flevoland en Utrecht) zijn elk in hun geheel één COROP-gebied, de overige zijn een gedeelte van één provincie en bestaan uit een aantal gemeenten.

Figuur 1 Geografische verdeling van 1622 van de 1629 deelnemers in het PFAS COVID MILK-POWER MILK onderzoek. Het aantal deelnemers per eerste twee cijfers van de postcode (PC2 gebied) is aangeduid met een rode stip. In blauw het aantal deelnemers per 10.000 baby's tussen de 0 en de 1 jaar per COROP-gebied. Baby's tussen de 0 en de 1 jaar worden gebruikt als een benadering voor het aantal vrouwen dat in 2021 is bevallen. Zeven deelnemers zijn niet weergegeven op deze kaart, omdat deze deelnemers geen postcode hebben opgegeven, of de opgegeven postcode niet overeenkwam met de opgegeven plaatsnaam.



2.2

PFAS-metingen

In de melkmonsters van de PFAS COVID MILK-POWER MILK populatie zijn 29 PFAS bepaald, waarvan drie als vertakte vorm (V), lineaire vorm (L), en het totaal van vertakte en lineaire vorm bij elkaar opgeteld (T) (zie Tabel 1). Deze 29 PFAS werden gemeten vanwege de analytische mogelijkheden. PFAS zijn bepaald in 300 µL melk per monster door het toevoegen van een interne standaard, na denaturatie van de melkeiwitten en extractie. Metingen zijn uitgevoerd met behulp van een vloeistofchromatograaf gekoppeld aan een massaspectrometer. De exacte opwerking van de monsters en de technische details van de analysemethoden staan omschreven in Appendix A.

Tabel 1 Specificatie van de 29 gemeten PFAS in dit onderzoek (waarvan drie PFAS gemeten als aparte lineaire en vertakte vormen) inclusief detectie- (LOD) en kwantificeringslimiet (LOQ) (beide in pg/mL)

PFAS	Acroniem	CAS nr.	LOD	LOQ
Perfluorbutaanzuur	PFBA	375-22-4	33	111
Perfluorpentaanzuur	PFPeA	2706-90-3	2,2	7,4
Perfluorhexaanzuur	PFHxA	307-24-4	2,1	6,9
Perfluorheptaanzuur	PFHpA	375-85-9	1	3,3
Perfluoroctaanzuur (totaal)	T-PFOA	-	1,5	5
Perfluoroctaanzuur (lineair)	L-PFOA	335-67-1	1,5	5
Perfluoroctaanzuur (vertakt)	V-PFOA	-	1,5	5
Perfluornonaanzuur	PFNA	375-95-1	1	3,3
Perfluordecaanzuur	PFDA	335-76-2	1	3,3
Perfluorundecaanzuur	PFUnDA	2058-94-8	1	3,3
Perfluordodecaanzuur	PFDoDA	307-55-1	1	3,3
Perfluorbutaansulfonzuur	PFBS	375-73-5	1,1	3,5
Perfluorpentaansulfonzuur	PFPeS	2706-91-4	1	3,3
Perfluorhexaansulfonzuur (totaal)	T-PFHxS	-	1	3,3
Perfluorhexaansulfonzuur (lineair)	L-PFHxS	355-46-4	1	3,3
Perfluorhexaansulfonzuur (vertakt)	V-PFHxS	-	1	3,3
Perfluorheptaansulfonzuur	PFHpS	375-92-8	1	3,3
Perfluoroctaansulfonzuur (totaal)	T-PFOS	-	1,4	4,8
Perfluoroctaansulfonzuur (lineair)	L-PFOS	1763-23-1	1,4	4,8
Perfluoroctaansulfonzuur (vertakt)	V-PFOS	-	1,4	4,8
Perfluornonaansulfonzuur	PFNS	68259-12-1	1,6	5,3
Perfluordecaansulfonzuur	PFDS	335-77-3	1,9	6,3
Tetrafluor-2-(heptafluorpropoxy)propaanzuur	HFPO-DA	13252-13-6	1	3,3
4,8-Dioxa-3H-perfluornonaanzuur	DONA	919005-14-4	1,9	6,3
2H-Perfluor-2-deceenzuur	8:2 FTUCA	70887-84-2	3,3	11
1H,1H,2H,2H-perfluorhexaansulfonzuur	4:2 FTS	757124-72-4	1	3,3
1H,1H,2H,2H-perfluoroctaansulfonzuur	6:2 FTS	27619-97-2	5,5	18
1H,1H,2H,2H-perfluordecaansulfonzuur	8:2 FTS	39108-34-4	1,7	5,8
1H,1H,2H,2H-perfluordodecaansulfonzuur	10:2 FTS	120226-60-0	2,1	6,9
N-methyl-perfluorbutaan sulfonamido-azijnzuur	MeFBSAA	159381-10-9	1	3,3
N-methyl-perfluorhexaan sulfonamido-azijnzuur	MeFHxSAA	715646-50-7	1	3,3
N-methyl-perfluoroctaan sulfonamido-azijnzuur	MeFOSAA	2355-31-9	1,3	4,3
N-ethyl-perfluoroctaan sulfonamido-azijnzuur	EtFOSAA	2991-50-6	1,5	5,1
9-chloorhexadecafluor-3-oxanonaan-1-sulfonzuur	9CI-PF3ONS	756426-58-1	1,3	4,3
11-chlooreicosafluor-3-oxaundecaan-1-sulfonzuur	11CI-PF3OUdS	763051-92-9	1,3	4,3

2.3 Dataverwerking

2.3.1 Bepaling populatiekarakteristieken

De leeftijd van de moeder, het hoogst genoten opleidingsniveau van de moeder, de viercijferige postcode van de woonplaats van de moeder, of het een geboorte bij een primipara of multipara⁷ betrof en de postpartum maand van monsterafname werden geëxtraheerd uit de overzichtstabel met daarin de uitkomsten van de vragenlijsten. Deze parameters werden relevant bevonden voor duiding van de PFAS-

⁷ Primipara, een vrouw die voor het eerst een kind heeft gebaard; multipara, een vrouw die twee keer of meer een kind heeft gebaard

niveaus. Ook werden ze gebruikt voor bepaling van de socio-economische status (SES) van de moeders.

Daartoe werd de viercijferige postcode gecombineerd met de SES per viercijferige postcode voor 2021 bepaald door het Centraal Bureau voor Statistiek (CBS). Het CBS berekende een zogenaamde SES-WOA (Welvaart, Opleiding, Arbeid) score gebaseerd op informatie over financiële welvaart, opleidingsniveau en het recente arbeidsverleden van particuliere huishoudens⁸. De gemiddelde SES-WOA score voor heel Nederland wordt uitgedrukt als 0, een negatieve (min) score toont een lagere SES-WOA score dan het gemiddelde en een positieve score toont een hogere SES-WOA score dan het gemiddelde.

2.3.2 *Analyse van PFAS bepalingen in melk*

Per PFAS werden beschrijvende statistieken bepaald, zoals het 50^e, 95^e, en 99^e percentiel van de concentraties in moedermelk.

Naast de resultaten over het totaal aantal deelnemers werden ook apart resultaten van primiparae gerapporteerd om de concentraties te kunnen vergelijken met de resultaten uit de WHO/UNEP Human Milk Survey. In die survey wordt geselecteerd op primiparae als zijnde meest representatief voor de *body burden* in de moeder na een lange tijd blootstelling (Zeilmaker et al., 2020; Fiedler et al., 2022).

De invloed van belangrijke factoren van blootstelling op de PFAS-concentraties in moedermelk, zoals bijvoorbeeld primipara/multipara, leeftijd of SES, is onderwerp van een aanvullend onderzoek dat op een later moment gepubliceerd zal worden (Carpay et al., In Prep.).

2.3.3 *Data onder de LOD of LOQ*

Voor de blootstellingsbepaling is het belangrijk om rekening te houden met de grenzen van de analysemethode. De LOD (detectielimiet) is de laagste concentratie waarbij de aanwezigheid van een stof in de melk kan worden aangetoond, maar de precieze concentratie is onzeker. De LOQ (kwantificeringslimiet) is de laagste concentratie van een stof in de melk die kwantitatief kan worden vastgesteld. Voor data onder de LOD of de LOQ is met twee verschillende scenario's gerekend:

- In het zogenoemde 'lower bound' (LB) scenario is de concentratie van de PFAS onder de LOD gelijkgesteld aan 0 pg/mL, en concentratie van de PFAS onder de LOQ gelijkgesteld aan de LOD. Dit is mogelijk een onderschatting, want een stof kan toch aanwezig zijn, maar in lagere concentraties dan wat er met de gebruikte analysemethode kwalitatief of kwantitatief kan worden aangetoond.
- In het zogenoemde 'upper bound' (UB) scenario is de concentratie van de PFAS onder de LOD gelijkgesteld aan de LOD, en de concentratie van de PFAS tussen de LOD en de LOQ gelijkgesteld aan de LOQ. Dit is een overschatting.

Opgemerkt wordt dat PFBA weliswaar is bepaald in alle monsters, maar dat de resultaten (allemaal <LOD) niet zijn meegenomen in de verwerking van de resultaten. De reden hiervoor is dat de LOD

⁸ https://www.cbs.nl/-/media/_excel/2024/24/ses_pc4_2021_2022_incl_exclstudentenv4.xlsx

(33 pg/mL) en LOQ (111 pg/mL) relatief hoog waren door een verontreiniging in een blanco monster. De LOQ is in deze studie hoger dan de LOQ's voor PFBA in andere (buitenlandse) humane biomonitoringsstudies, die variëren tussen de 6,2-50 pg/mL moedermelk (Fiedler et al., 2022; Macheka et al., 2022; Lankova et al., 2013).

Alle analyses zijn uitgevoerd met het LB- en het UB-scenario. Veel van de geanalyseerde PFAS hebben weinig tot geen waarden boven de LOD (zie sectie 3.2). Er wordt aangenomen dat blootstelling van de moeders aan deze betreffende PFAS, of de overdracht naar melk, zeer laag is. Vandaar dat dit rapport zich richt op presentatie van de resultaten met het LB-scenario. De resultaten van het UB-scenario zijn te vinden in Appendix B.

2.4 Vergelijking van de gemeten waarden met de risicogrens voor PFAS in moedermelk

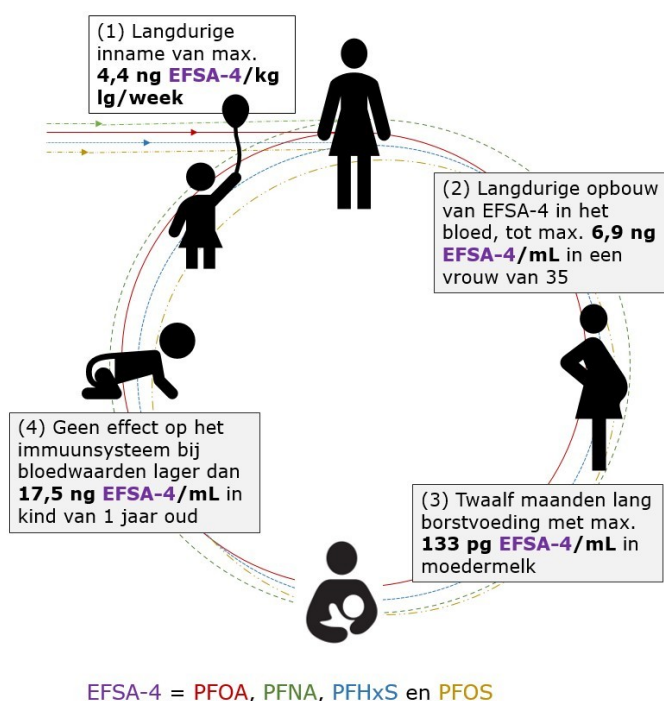
2.4.1 Beschikbare risicogrens voor PFAS in moedermelk

Om de PFAS-concentraties in moedermelk te kunnen duiden wat betreft overschrijding en mogelijk risico voor de gezondheid (zie doel 2) is een risicogrens voor interpretatie van de melkconcentraties gebruikt.

Hiervoor werd de gezondheidkundige grenswaarde, afgeleid door EFSA, gebruikt. Voor de som van vier PFAS (EFSA-4: PFOA, PFNA, PFHxS, PFOS) heeft EFSA een aanvaardbare wekelijkse inname (TWI) vastgesteld van 4,4 ng per kilogram lichaamsgewicht per week. Uitgangspunt daarvoor was een bloedconcentratie van 17,5 ng EFSA-4/mL in kinderen die gedurende één jaar borstvoeding hebben gekregen. Via kinetische modellering werd de bloedconcentratie in deze kinderen teruggerekend naar een inname van 133 pg EFSA-4/mL moedermelk gedurende een jaar borstvoeding, een bloedconcentratie van 6,9 ng EFSA-4/mL in vrouwen van vruchtbare leeftijd bij de start van borstvoeding, en vervolgens naar bovengenoemde inname uitgaande van chronische blootstelling (EFSA, 2020, zie Figuur 2). Bij een overschrijding van de risicogrens van 133 pg EFSA-4/mL moedermelk kan een verhoogd risico op een verminderde vaccinresponse in baby's en jonge kinderen, die deze melk gedurende een jaar lang consumeren, niet uitgesloten worden.

Voor het bepalen van de risicogrens is EFSA uitgegaan van twaalf maanden borstvoeding. In de afleiding hiervan is de consumptie van moedermelk gedurende deze twaalf maanden onafhankelijk van het lichaamsgewicht van het kind en bedraagt 800 mL/dag. In haar model gaat EFSA ervan uit dat de PFAS-concentratie in melk afneemt gedurende de twaalf maanden borstvoeding doordat de bloedserum concentratie van PFAS bij de moeder lager wordt. Er wordt uitgegaan van een afname in melk van 7,7% per maand voor PFOA en PFNA en 3,1% per maand voor PFOS en PFHxS. In haar model gaat EFSA ervan uit dat borstvoeding de enige bron van PFAS blootstelling is voor de zuigeling.

Figuur 2 Schematisch overzicht van afleiding van de TWI van EFSA voor de som van de EFSA-4 PFAS. De gezondheidkundige grenswaarde voor de EFSA-4 is zodanig afgeleid dat een langdurige inname van 4,4 ng EFSA-4/kg lichaamsgewicht/week van jongs af aan (1) leidt tot een langdurige maximale opbouw van 6,9 ng EFSA-4/mL bloed in een vrouw van 35 (2) zodat zij haar kind tijdens het geven van een jaar borstvoeding minder dan 133 pg/mL PFAS geeft vanaf ongeveer dag 0 postpartum (3) zodat haar kind op eenjarige leeftijd onder een maximale bloedconcentratie van 17,5 ng EFSA-4/mL bloed blijft (4), waarboven een verhoogd risico op een verminderde vaccinrespons niet uitgesloten kan worden. Dit figuur is deels gebaseerd op het origineel in Van Duursen (2025); voor dit rapport is de risicogrens voor moedermelk niet afgerond naar 130 pg/mL maar is 133 pg/mL aangehouden.



2.4.2

Bepaling van de cumulatieve concentratie

Het is bekend dat er meerdere PFAS tegelijk aanwezig zijn in moedermelk (Fiedler et al., 2022). Om die reden is specifiek gekeken naar de optelsom van de verschillende PFAS in moedermelk (i.e. de cumulatieve concentratie). De cumulatieve concentratie is op twee manieren bepaald (aanpak 1 en 2 hieronder).

Aanpak 1: Bepaling van de cumulatieve concentratie op basis van de EFSA-4 en equipotentie

Om de moedermelkconcentraties te vergelijken met de risicogrens voor PFAS in moedermelk zijn de concentraties van de EFSA-4 opgeteld om de cumulatieve concentratie per moedermelk monster te bepalen. Daarbij is aangenomen dat deze vier PFAS even schadelijk zijn (ze zijn 'equipotent'). Na optelling van deze vier PFAS per monster werd de concentratie vergeleken met de risicogrens voor PFAS in moedermelk.

Deze vergelijking werd weergegeven als 1) het percentage van de studiepopulatie met een som PFAS-concentratie in moedermelk boven de risicogrens, en 2) de risicokarakteriseringsratio:

Percentage van de studiepopulatie met een concentratie EFSA-4 PFAS in moedermelk boven de risicogrens:

$$\frac{|\{n \in N | \sum C_i(n) > \text{risicogrens}\}|}{N} \times 100\%$$

Waar i is T-PFOA, PFNA, T-PFHxS en T-PFOS. $\sum C_i(n)$ is de gesommeerde concentratie van 4 PFAS van individu n uit het totale sample N . Met andere woorden, de teller geeft het aantal individuen met een som PFAS-concentratie in moedermelk boven de risicogrens. De risicogrens is het PFAS-moedermelkgehalte van 133 pg EFSA-4/mL.

Risicokarakteriseringsratio:

$$\frac{\sum C_i(P)}{\text{risicogrens}}$$

Waar $\sum C_i(P)$ de gesommeerde concentratie van 4 PFAS van een specifiek percentiel van de verdeling van de populatie is. In dit rapport wordt gebruik gemaakt van het 50^e, 95^e, en 99^e percentiel (P50, P95, P99).

Aanpak 2: bepaling van de cumulatieve concentratie op basis van PFOA-equivalenten

Aanpak 1 gaat ervanuit dat de EFSA-4 even schadelijk zijn voor het immuunsysteem. Verschillende onderzoeken laten echter zien dat afhankelijk van het soort gezondheidseffect de relatieve schadelijkheid van de PFAS verschillen van elkaar (Bil et al., 2022; Bil et al., 2023; Conley et al., 2023; Conley et al., 2024a; Conley et al., 2024b; Janssen et al., 2024; Reardon et al., 2021). Om met deze verschillen in potentie rekening te houden, zijn in aanpak 2 relatieve potentiefactoren (RPF's) voor PFAS toegepast (Bil et al., 2021). RPF's corrigeren voor de verschillen in schadelijkheid tussen PFAS en zetten de melkconcentraties van verschillende PFAS om in PFOA-equivalenten (PEQ's).

PFOA heeft als referentiestof een RPF van 1. PFAS die bij lagere melkconcentraties hetzelfde effect veroorzaken als PFOA hebben een RPF groter dan 1, en PFAS die bij hogere concentraties hetzelfde effect veroorzaken een RPF kleiner dan 1. Hiermee kan voor verdere duiding vervolgens worden gedaan alsof alleen PFOA aanwezig is in moedermelk. Over de toxische potentie van vertakte PFAS is vrijwel geen informatie. Daarom wordt aangenomen dat de potentie daarvan gelijk is aan de lineaire variant en wordt dezelfde RPF gebruikt voor zowel de lineaire als de vertakte PFAS.

Er zijn RPF's voor orale inname (externe RPF's) beschikbaar voor 16 van de 28 PFAS gemeten in moedermelk (Tabel 2). Voor de stoffen PFNS, 8:2 FTUCA, 4:2 FTS, 6:2 FTS, 8:2 FTS, 10:2 FTS, MeFBSAA, MeFHxSAA, MeFOSAA, EtFOSAA, 9Cl-PF3ONS en 11Cl-PF3OUdS is geen RPF

beschikbaar. Daarom konden deze stoffen niet geïnccludeerd worden voor bepaling van de cumulatieve concentratie in moedermelk.

De cumulatieve concentratie in moedermelk is voor elke persoon voor elke PFAS berekend en uitgedrukt in PEQ's. De PEQ's voor de verschillende PFAS zijn vervolgens voor elke persoon opgeteld en vergeleken met de risicogrens. Deze aanpak is in lijn met de RIVM-benadering voor risicoduïding van PFAS, waarin de door EFSA afgeleide gezondheidkundige grenswaarde toegepast wordt op een bredere groep PFAS dan de EFSA-4, rekening houdend met verschillen in potentie tussen de PFAS (RIVM, 2021).

Tabel 2 Relatieve potentiefactoren (RPF's) voor bepalen van cumulatieve PFAS-concentratie in melk (Bil et al., 2021; <https://www.rivm.nl/pfas/rpf>)

PFAS	RPF
PFPeA	0,05
PFHxA	0,01
PFHpA	1
PFOA	1
PFNA	10
PFDA	10
PFUnDA	4
PFDoDA	3
PFBS	0,001
PFPeS	0,6
PFHxS	0,6
PFHpS	2
PFOS	2
PFDS	2
HFPO-DA (GenX)	0,06
DONA	0,03

Het percentage van de studiebevolking met een som PFAS-concentratie in moedermelk boven de risicogrens en de risicokarakteriseringsratio werden als volgt berekend:

De concentratie van 16 PFAS in moedermelk van een individu werd uitgedrukt in PFOA-equivalenten:

$$PEQ_i = C_i \times RPF_i$$

Waar C de melkconcentratie voorstelt en RPF de externe relatieve potentie factor van PFAS i , dat wil zeggen één van de 16 PFAS in Tabel 2.

Percentage van de studiebevolking met een concentratie PFAS in moedermelk boven de risicogrens:

$$\frac{|\{n \in N | \sum PEQ_i(n) > \text{risicogrens}\}|}{N} \times 100\%$$

$\sum PEQ_i(n)$ is de gesommeerde concentratie van 16 PFAS in PEQ's in moedermelk van individu n uit het totale sample N . Met andere woorden, de teller geeft het aantal individuen met een som-PEQ-concentratie boven de risicogrens. De risicogrens is het PFAS-moedermelkgehalte van 133 pg PEQ/mL.

Risicokarakteriseringsratio:

$$\frac{\sum PEQ_i(P)}{\text{risicogrens}}$$

Waar $\sum PEQ_i(P)$ de gesommeerde concentratie van 16 PFAS is van een specifiek percentiel van de blootstellingsverdeling van de bevolking. In dit rapport wordt gebruik gemaakt van het 50^e, 95^e, en 99^e percentiel (P50, P95, P99).

3 Resultaten

3.1 Populatiekarakteristieken

Van de 1708 vrouwen die toestemming hebben gegeven voor het meten van PFAS in moedermelk, waren van 1629 vrouwen nog melkmonsters aanwezig. De leeftijd van de vrouwen op moment van monsternamen, de postpartum maand van monsternamen, primipara of multipara, de SES en de hoogst genoten opleiding van de moeders in de PFAS COVID MILK-POWER MILK studiepopulatie staan vermeld in Tabel 3.

De meeste vrouwen uit de PFAS COVID MILK-POWER MILK studiepopulatie hebben een leeftijd tussen de 30-39 jaar ten tijde van monsterafgifte. Een kleiner gedeelte van de vrouwen is tussen de 20-29 of 40-49 jaar. Van 37 vrouwen in de populatie is de leeftijd niet gedocumenteerd. Van de deelnemers is 622 primipara en 950 multipara. Van 57 vrouwen is dit onbekend.

De postpartum maand van monsterafname verschilt in de studiepopulatie. Deze is voor het grootste aantal deelnemers onder de 12 maanden. Een kleiner aantal deelnemers doneerde melk tussen de 13-18 of 19-24 maanden postpartum. Een vijftigtal deelnemers doneerde melk twee jaar of later postpartum. Van ongeveer 70 vrouwen in de populatie is de postpartummaand ten tijde van donatie niet genoteerd.

De studiepopulatie bestaat voornamelijk uit vrouwen met een bovengemiddelde SES-WOA score (ongeveer 1200 deelnemers met een score gelijk aan of groter dan nul). Van ongeveer 430 deelnemers was de SES-WOA score kleiner dan nul. Een score boven nul geeft aan dat iemand welvarender en/of hoger opgeleid en/of langduriger aan het werk is dan de gemiddelde SES-WOA score voor heel Nederland. Omgekeerd geeft een score onder nul aan dat een persoon minder welvarend, lager opgeleid, of minder lang aan het werk is dan gemiddeld in Nederland. De hogere SES-WOA score in de studiepopulatie komt overeen met een hoog aantal deelnemers met een afgeronde HBO-opleiding of hoger.

Tabel 3 Populatiekarakteristieken van de totale PFAS COVID MILK-POWER MILK studiepopulatie (n=1629)

Variabele	Aantal
<i>Leeftijd moeder (jaar)</i>	
20-29	256
30-39	1243
40-49	93
NA*	37
<i>Postpartum maand van monsterafname (maand)</i>	
0-6	665
7-12	575
13-18	199
19-24	70
25-30	26
>30	25
NA**	69
<i>Primipara of multipara</i>	
Primipara	622
Multipara	950
NA	57
<i>Socio-economische status (SES-WOA score)</i>	
SES < -0.5	20
-0.5 ≤ SES < -0.25	87
-0.25 ≤ SES < 0	327
0 ≤ SES < 0.25	597
0.25 ≤ SES < 0.5	500
SES ≥ 0.5	89
NA	9
<i>Hoogst genoten afgeronde opleiding</i>	
Basisonderwijs	1
LBO/VBO/VMBO	8
MAVO	12
MBO	183
HAVO	34
VWO	10
HBO/WO bachelor/kandidaats	708
WO master/doctoraal	552
WO gepromoveerd	81
Anders of NA	40

*vanwege informatie niet in enquête of waarschijnlijk foutief in enquête (2 vrouwen met leeftijd 2 en 937 jaar)

**vanwege informatie niet in enquête of waarschijnlijk foutief in enquête (1 monsternamen op postpartummaand 124)

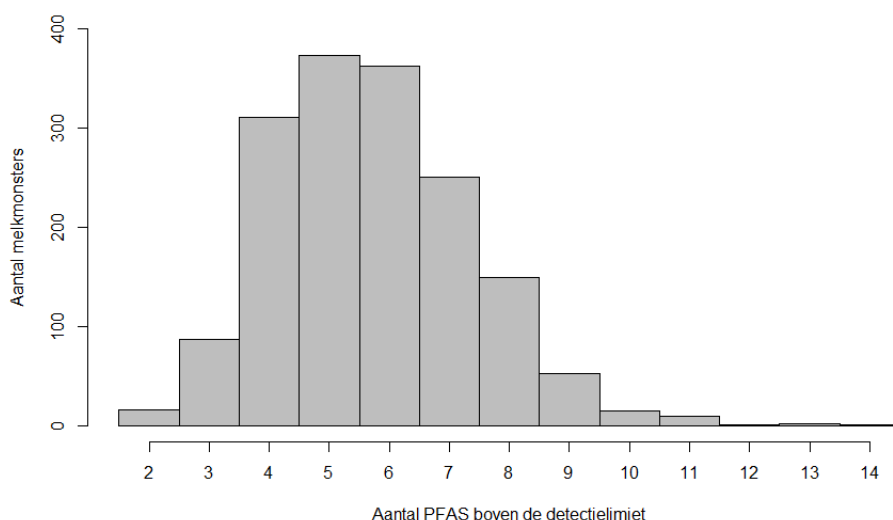
3.2 Overzicht van PFAS-moedermelkconcentraties in de PFAS COVID MILK-POWER MILK studiepopulatie

In alle melkmonsters is PFOS teruggevonden (Tabel 4). Zowel lineair als vertakt PFOS komen voor in een hoog aantal monsters. Ook PFOA is in bijna alle monsters teruggevonden. Voor PFOA komt de lineaire vorm vaker voor in de monsters dan de vertakte vorm. PFHxS is teruggevonden in 95% van de melkmonsters. Net zoals bij PFOA komt PFHxS vaker voor als lineaire vorm dan als vertakte vorm. Naast PFOS, PFOA en PFHxS kwam ook PFNA voor met een detectiefrequentie >90%. Dit zijn tevens de EFSA-4.

Een viertal PFAS (PFDA, PFHpA, PFBS en PFUnDA) is teruggevonden in ~30-50% van de melkmonsters. Dit wordt gevolgd door een achttal PFAS (PFHpS, PFPeA, PFHxA, PFDoDA, PFPeS, HFPO-DA, 6:2 FTS, MeFOSAA) teruggevonden in ~1-10% van de melkmonsters. Zes PFAS (8:2 FTUCA, 4:2 FTS, MeFBSAA, EtFOSAA, 9CI-PF3ONS, 11CI-PF3OUdS) zijn in enkele monsters teruggevonden. Ten slotte is een zestal PFAS (PFNS, PFDS, DONA, 8:2 FTS, 10:2 FTS, MeFHxSAA) in geen enkel melkmonster teruggevonden boven de detectielimiet.

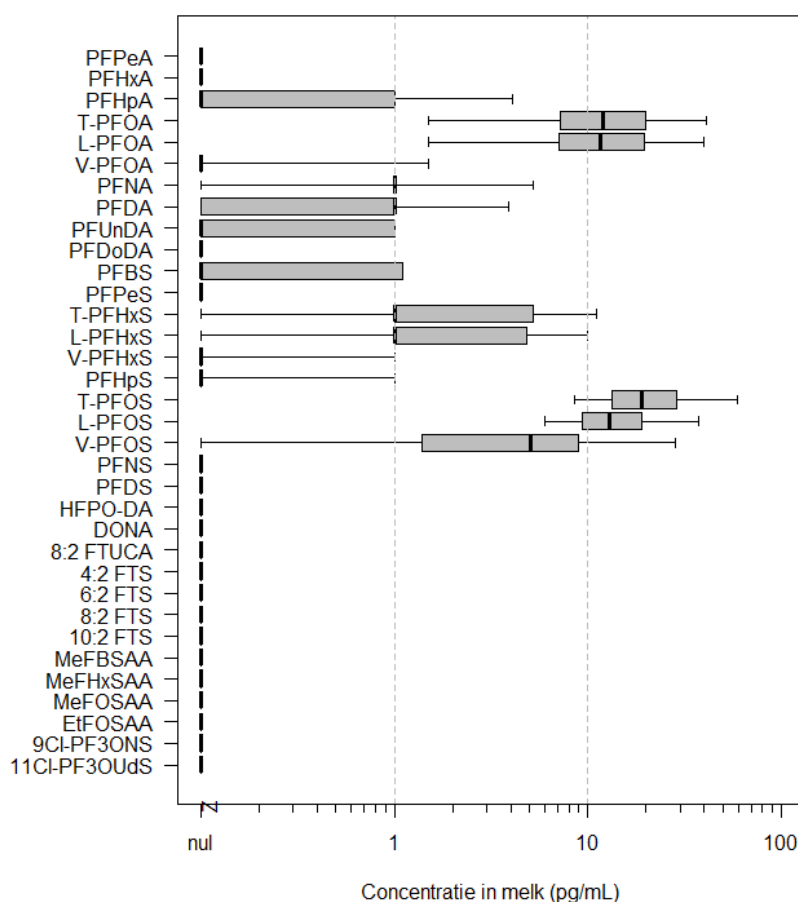
Figuur 3 toont het aantal PFAS dat gezamenlijk werd aangetroffen per melkmonster. Hierbij is de aanwezigheid van de lineaire, vertakte of totaal van een stof (i.e. PFOS, PFOA, PFHxS) als één PFAS meegeteld. In ieder melkmonster is een minimum van twee PFAS vastgesteld. In de meeste melkmonsters kwamen 4-7 PFAS voor. Maximaal kwamen er 14 PFAS voor in hetzelfde monster.

Figuur 3 Histogram van het aantal PFAS gedetecteerd per moedermelkmonster van de PFAS COVID MILK-POWER MILK studiepopulatie. De stoffen die als totaal, vertakt, en lineair werden gemeten zijn samengenomen en representeren detectie van één PFAS in dit figuur.



Van alle PFAS gemeten is totaal PFOS vastgesteld met de hoogste concentraties in de melkmonsters, met een P50 en P95 van respectievelijk 19 en 60 pg/mL moedermelk (Tabel 4 en Figuur 4). Dit wordt gevolgd door totaal PFOA, met P50 en P95 concentraties van 12 en 41 pg/mL in de studiepopulatie. Andere PFAS zijn teruggevonden in substantieel lagere concentraties. Totaal PFHxS is teruggevonden met P50 en P95 concentraties van 1,0⁹ en 11 pg/mL. PFHpA, PFNA, PFDA, PFUnDA, PFBS en PFHpS zijn teruggevonden met P95 concentraties tussen 1,0-5,2 pg/mL moedermelk. Van een zevental PFAS (PFPeA, PFHxA, PFDoDA, PFPeS, HFPO-DA, 6:2 FTS, MeFOSAA) heeft slechts een kleine fractie van de monsters een concentratie boven de detectielimiet waarvan alleen kan worden vastgesteld dat de P99 concentratie tussen de LOD en LOQ ligt.

Figuur 4 Moedermelk concentraties van 28 PFAS. De box geeft het 25e en 75e percentiel van de melkconcentratieverdelingen weer in de PFAS COVID MILK-POWER MILK studiepopulatie (eenheid pg/mL moedermelk, LB-scenario). De zwarte verticale streep is het 50e percentiel en de whiskers aan weerszijden van de box geven respectievelijk het 5e en 95e percentiel van de melkconcentratieverdeling weer. De namen van de PFAS zijn te vinden in Tabel 1. Merk op dat voor PFOA, PFOS en PFHxS de totale (T) concentratie de som is van de lineaire (L) en vertakte (V) vorm.



⁹ Hierbij wordt opgemerkt dat de P50 van 1,0 pg/mL gelijk is aan de LOD. Voor het LB-scenario betekent dat dat de P50 van PFHxS dus ergens tussen de LOD en LOQ van respectievelijk 1,0 en 3,3 pg/mL ligt.

Tabel 4 Detectiefrequentie en distributie van concentraties van 28 PFAS in moedermelk in de PFAS COVID MILK-POWER MILK studiepopulatie (N = 1629) (eenheid pg/mL moedermelk, LB-scenario). Cursieve percentielen liggen tussen LOD en LOQ.

PFAS ^a	LOD	LOQ	% ≥LOD	% LOD- LOQ	P50	P95	P99
PFPeA	2,2	7,4	5	5	0	0	2,2
PFHxA	2,1	6,9	4	4	0	0	2,1
PFHpA	1	3,3	42	34	0	4,1	7,8
T-PFOA	1,5	5	100 ^b	11	12	41	82
L-PFOA	1,5	5	100 ^b	11	12	40	79
V-PFOA	1,5	5	12	11	0	1,5	4,2
PFNA	1	3,3	93	76	1,0	5,2	12
PFDA	1	3,3	53	46	1,0	3,9	9,2
PFUnDA	1	3,3	27	24	0	1,0	4,6
PFDoDA	1	3,3	3	3	0	0	1,0
PFBS	1,1	3,5	34	30	0	1,1	6,6
PFPeS	1	3,3	2	2	0	0	1,0
T-PFHxS	1	3,3	95	47	1,0	11	23
L-PFHxS	1	3,3	94	51	1,0	10	18
V-PFHxS	1	3,3	19	17	0	1,0	4,4
PFHpS	1	3,3	6	6	0	1,0	1,0
T-PFOS	1,4	4,8	100	1	19	60	110
L-PFOS	1,4	4,8	100 ^b	2	13	38	81
V-PFOS	1,4	4,8	90	36	5,1	28	63
PFNS	1,6	5,3	0	0	0	0	0
PFDS	1,9	6,3	0	0	0	0	0
HFPO-DA	1	3,3	1	1	0	0	1,0
DONA	1,9	6,3	0	0	0	0	0
8:2 FTUCA	3,3	11	0 ^c	0 ^c	0	0	0
4:2 FTS	1	3,3	0 ^c	0 ^c	0	0	0
6:2 FTS	5,5	18	2	2	0	0	5,5
8:2 FTS	1,7	5,8	0	0	0	0	0
10:2 FTS	2,1	6,9	0	0	0	0	0
MeFBSAA	1	3,3	0 ^c	0 ^c	0	0	0
MeFHxSAA	1	3,3	0	0	0	0	0
MeFOSAA	1,3	4,3	1	1	0	0	1,3
EtFOSAA	1,5	5,1	0 ^c	0 ^c	0	0	0
9CI-PF3ONS	1,3	4,3	0 ^c	0	0	0	0
11CI-PF3OUdS	1,3	4,3	0 ^c	0 ^c	0	0	0

LOD: detectielimiet, LOQ: kwantificeringslimiet, PFAS: per-en polyfluoralkylstoffen, P50:

50^e percentiel, P95: 95^e percentiel, P99: 99^e percentiel

^a De namen van de PFAS zijn te vinden in Tabel 1.

^b Afgerond naar 100, dus n<LOD is niet nul.

^c Afgerond naar nul, dus n is niet nul.

3.3 Vergelijking van de cumulatieve moedermelkconcentraties met de risicogrens

De P50, P95 en P99 cumulatieve moedermelkconcentraties staan in Tabel 5. In beide doorgerekende aanpakken blijft de som concentratie PFAS in moedermelk grotendeels onder de risicogrens (Tabel 5 en Figuur 5). Het percentage monsters met een som concentratie onder de risicogrens verschilt per aanpak.

Wanneer alleen gekeken wordt naar de aanwezigheid van de EFSA-4 op basis van equipotentie (aanpak 1) is 3% van de monsters hoger dan de risicogrens van 133 pg EFSA-4 PFAS/mL moedermelk. De risicokarakteriseringsratio (RCR) is <1 bij het P50 en P95. Bij het P99 is de RCR >1.

Wanneer gekeken wordt naar de aanwezigheid van 16 PFAS op basis van verschillen in potentie (aanpak 2) is 18% van de monsters hoger dan de risicogrens van 133 pg PEQ/mL moedermelk. De RCR is <1 bij het P50. Bij het P95 en het P99 is de RCR >1. In het P99 betreft dit een factor 3,5 overschrijding.

De cumulatieve concentratie PFAS in moedermelk is ongeveer verdubbeld in aanpak 2 ten opzichte van aanpak 1. Daarmee verbonden is ook de mate van overschrijding (i.e. de RCR) van de risicogrens hoger in aanpak 2 ten opzichte van aanpak 1.

Tabel 5 Vergelijking van de cumulatieve PFAS-concentratie in moedermelk in de PFAS COVID MILK-POWER MILK studiepopulatie met de risicogrens voor PFAS in moedermelk en de mate van overschrijding (LB-scenario, 2 aanpakken)

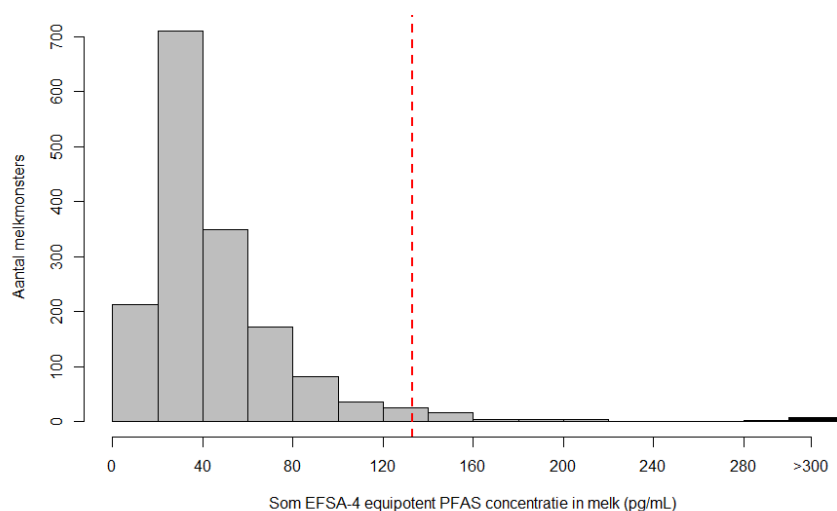
	Cumulatieve moedermelk-concentratie(pg/mL)			% monsters boven de risicogrens	Risicokarakteriseringsratio (RCR)		
	P50	P95	P99		P50	P95	P99
Som van EFSA-4 PFAS^a (aanpak 1)	36	110	190	3	0,27	0,81	1,5
Som van 16 PFAS^b in PEQ's (aanpak 2)	72	230	460	18	0,54	1,7	3,5

PEQ: PFOA-equivalenten, PFAS: Per- en polyfluoralkylstoffen, P50: 50^e percentiel, P95: 95^e percentiel, P99: 99^e percentiel

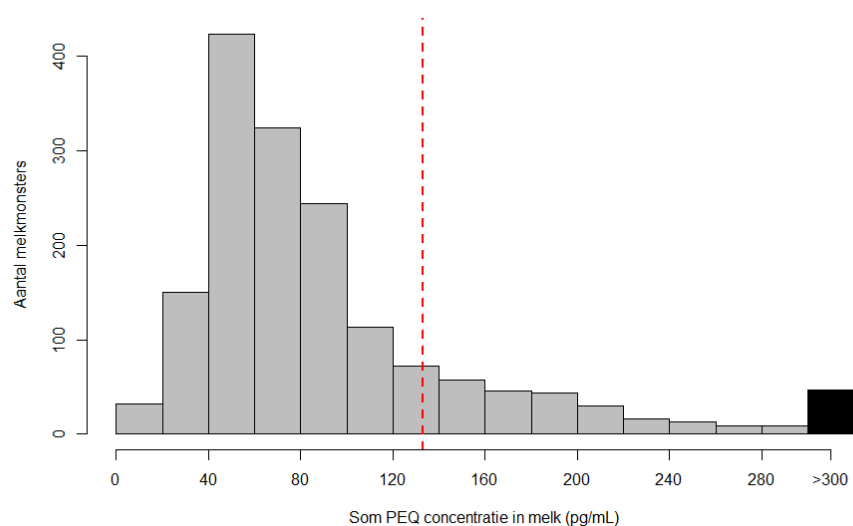
^aCumulatieve concentratie T-PFOA, PFNA, T-PFHxS en T-PFOS gebaseerd op equipotentie

^bCumulatieve concentratie van 16 PFAS in Tabel 2 uitgedrukt als PFOA-equivalenten (PEQ's), waarvan 2 PFAS (PFDS, DONA) alleen waarden onder de LOD hadden en dus niet bijdragen aan de som-PEQ in dit LB-scenario.

Figuur 5 Histogram van de gesommeerde PFAS-moedermelk concentraties (in pg/mL, LB-scenario) in de PFAS COVID MILK-POWER MILK studiepopulatie (n = 1629) uitgezet tegen de risicogrens voor PFAS in moedermelk. (a) toont de cumulatieve concentratie EFSA-4 PFAS op basis van equipotentie. (b) toont de cumulatieve concentratie van 16 PFAS uitgedrukt als som-PEQ. De verticale rode stippellijn toont de risicogrens van 133 pg/mL. Het aantal concentraties boven 300 pg/mL wordt samen weergegeven in de laatste (zwarte) kolom.



(a)



(b)

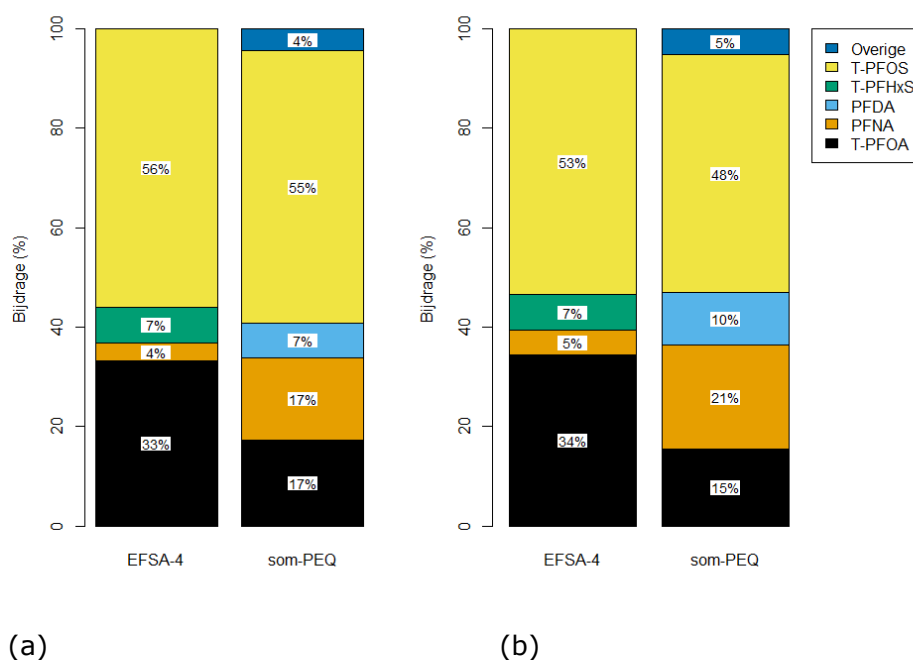
3.4 Relatieve bijdrage van individuele PFAS aan de cumulatieve concentratie in moedermelk

Figuur 6 toont de relatieve bijdrage van de individuele PFAS aan de cumulatieve concentratie PFAS in moedermelk voor de EFSA-4 (aanpak 1) en voor de som-PEQ van 16 PFAS (aanpak 2).

Figuur 6a toont de relatieve bijdrage van de individuele PFAS op basis van alle 1629 monsters. In beide aanpakken is de voornaamste bijdrage afkomstig van totaal PFOS. Op basis van de EFSA-4 wordt dit gevolgd door een significante bijdrage van totaal PFOA en een relatief kleine bijdrage van totaal PFHxS en PFNA. Wanneer gecorrigeerd wordt voor verschillen in potentie en meer PFAS worden geïnccludeerd, draagt totaal PFOA ongeveer de helft minder bij aan de cumulatieve concentratie PFAS in melk. PFNA daarentegen draagt relatief meer bij. Ook PFDA en overige PFAS leveren een kleine bijdrage.

Wanneer specifiek wordt toegespitst op de individuele bijdragen van de PFAS in de monsters met een overschrijding van de risicogrens, komt eenzelfde beeld naar voren (Figuur 6b) met het kleine verschil dat PFNA, PFDA en overige PFAS iets meer bijdragen aan de cumulatieve som-PEQ-concentratie, en totaal PFOS iets minder.

Figuur 6 De relatieve bijdrage van individuele PFAS aan de cumulatieve concentratie PFAS in moedermelk (LB-scenario). (a) toont de gemiddelde bijdrage in alle monsters. (b) toont de gemiddelde bijdrage in alleen de monsters met een som EFSA-4 of som-PEQ-concentratie boven 133 µg/mL. PFAS die minder dan 5% bijdragen zijn opgenomen in de categorie 'Overige'.



4 Discussie

Het onderzoek naar PFAS in moedermelk van de PFAS COVID MILK-POWER MILK studiepopulatie toont aan dat melk van Nederlandse moeders diverse PFAS bevat, met een minimum aantal van twee (PFOS en PFOA) tot een maximum van 14 PFAS per individu. PFOS, PFOA, PFNA en PFHxS werden in een groot aantal (>93%) van de monsters teruggevonden. Hoewel de monsters werden geanalyseerd op 29 PFAS, werden acht hiervan in slechts 1-6% van de monsters teruggevonden en 13 in vrijwel geen enkel monster.

PFOS kwam in de hoogste concentraties voor in moedermelk, gevolgd door PFOA. Deze bevinding is in lijn met het eerdere grootschalige PFAS-onderzoek naar de aanwezigheid van PFAS in bloed van de algemene Nederlandse bevolking, waar ook PFOS in de hoogste concentraties voorkwam in bloed gevolgd door PFOA (Bil et al., 2025). De huidige concentraties in melk weerspiegelen daarmee de aanwezigheid van PFAS in de Nederlandse bevolking.

Om te beoordelen of de concentratie PFAS in moedermelk hoger is dan gewenst, werd de concentratie van verschillende PFAS per individu bij elkaar opgeteld en vergeleken met een risicogrens voor PFAS in moedermelk. Dit werd gedaan op twee manieren: op basis van de som van de EFSA-4 PFAS (en equipotentie) en op basis van de som van 16 PFAS als som-PEQ (rekening houdend met verschillen in potentie). De vergelijking van de som-PFAS concentraties met de risicogrens voor PFAS in moedermelk toont aan dat een het grootste gedeelte van de moedermelkmonsters afgenomen bij Nederlandse vrouwen onder de risicogrens zit. Op basis van de EFSA-4 is dat 97% van de monsters onder de risicogrens; op basis van de som-PEQ betreft dit 82% van de monsters. Onder deze risicogrens is een mogelijk risico op gezondheidsschade bij zuigelingen door PFAS middels moedermelkconsumptie verwaarloosbaar.

Van het totaal van 1629 monsters komt 3% boven de risicogrens op basis van de EFSA-4 en 18% boven de risicogrens op basis van de som-PEQ. Het totaal PFAS in moedermelk overschrijdt de risicogrens bij het 99^e percentiel op basis van de som-PEQ met een factor 3,5. Dit betekent dat, wanneer kinderen deze melk gedurende één jaar drinken, effecten op het adaptieve immuunsysteem niet uit te sluiten zijn. Uit onderzoek blijkt dat kinderen in dat geval minder antistoffen aanmaken na vaccinatie tegen bepaalde ziekteverwekkers (Haemophilus influenza type b, difterie of tetanus) (Abraham et al., 2020). Dat tot 18% van de moedermelk van Nederlandse vrouwen deze concentraties PFAS bevat is ongewenst en onderschrijft het belang van onverminderde inzet op maatregelen die de blootstelling aan PFAS onder de algemene bevolking (zullen) verminderen, zoals het aankomende groepsrestrictie van PFAS in Europa onder de REACH-wetgeving, aanscherping van de maximum limieten voor PFAS in voedingsproducten en aanscherping van de milieukwaliteitsnormen als onderdeel van de revisie van de kaderrichtlijn water.

Belangrijk is echter om aan te geven dat een melkconcentratie boven de risicogrens niet meteen betekent dat een individu sneller en vaker ziek wordt door blootstelling aan PFAS via moedermelk. EFSA rekende voor het afleiden van de gezondheidkundige grenswaarde met een gemiddelde afname van 10% antilichamen in bloed van 101 kinderen (EFSA, 2020). Deze afname in antilichamen is relatief beperkt en is door EFSA niet kwantitatief gelinkt aan een verhoogde incidentie van ziektegevallen. Op individueel niveau is een scala aan andere factoren gedurende de levensloop naast blootstelling aan PFAS en andere chemische stoffen, zoals (epi)genetische variatie, leeftijd, sekse, aanwezigheid van chronische virale infecties, rookstatus, welzijn, het houden van huisdieren, mate van fysieke activiteit, obesitas, en dieet (Liston et al., 2016), die samen bepalen of een individu mogelijk gevolgen zal ondervinden van de bijdrage van PFAS blootstelling aan het minder functioneren van het immuunsysteem. Daarnaast is borstvoeding ook bevorderlijk voor de bescherming tegen infectieziekten, door o.a. de aanwezigheid van immuuncellen, antistoffen en voedingsstoffen die het immuunsysteem stimuleren (VZinfo, 2025). Wat deze berekening wel aangeeft is dat de aanwezigheid van PFAS in moedermelk op populatieniveau geen verwaarloosbare bijdrage levert aan het functioneren van het adaptieve immuunsysteem.

Als laatste bevatten de berekeningen op basis van aanpak 1 en 2 een aantal onzekerheden die ertoe kunnen leiden dat het aantal monsters onder of boven de risicogrens mogelijk anders uitpakt. Deze onzekerheden worden in onderstaande tekst nader toegelicht.

4.1 Aspecten die invloed hebben op het percentage monsters onder de risicogrens

De berekening heeft een aantal onzekerheden in zich, die kunnen leiden tot een onderschatting of een overschatting van het daadwerkelijke percentage onder de risicogrens. Deze aspecten staan hieronder opgesomd. Dit betreft een kwalitatieve omschrijving van de aannames en onzekerheden. Het is niet mogelijk op dit moment om al deze aspecten op een kwantitatieve manier te incorporeren in het berekenen van het percentage monsters onder de risicogrens.

4.1.1 Studieopzet van de PFAS COVID MILK-POWER MILK studie

- 4.1.1.1 Representativiteit van de studiepopulatie voor de Nederlandse populatie
De PFAS COVID MILK-POWER MILK studie is niet *a priori* ontworpen om een representatief beeld te schetsen van PFAS-concentraties in moedermelk van vrouwen in Nederland. De studie betreft een subpopulatie van het oorspronkelijke COVID MILK-POWER MILK cohort, namelijk de deelnemers die toestemming gaven om hun monsters ook voor niet-COVID-gerelateerd onderzoek (in dit geval naar PFAS) te gebruiken en waarvoor nog melkmonsters beschikbaar waren. Waar de studiepopulatie geografisch heel redelijk over Nederland verdeeld lijkt te zijn (Figuur 1), komt uit de populatiekarakteristieken (Tabel 3) naar voren dat de studiepopulatie grotendeels bestaat uit vrouwen in de leeftijd van 30-39 jaar met een hogere socio-economische status (SES-WOA score), gerelateerd aan een relatief hoge opleiding. Een hogere SES is in eerder onderzoek geassocieerd met hogere concentraties van PFOA, PFNA, PFOS en PFHxS in bloed (Buekers et al., 2018). De

uitkomsten van dit onderzoek zijn daarmee niet per se representatief voor alle zogende moeders in de algemene Nederlandse bevolking.

4.1.1.2 Invloed van de tijd van monsterafname op de concentratie PFAS in moedermelk

De periode waarin melkmonsters zijn afgenomen varieerde van 0 maanden tot >30 maanden postpartum. De wisselende samenstelling van moedermelk door de tijd (zie sectie 1.1) evenals de eliminatie van PFAS uit het lichaam via moedermelk hebben invloed op de concentratie PFAS in moedermelk, afhankelijk van de PFAS (zie Appendix C). Dit zorgt voor variatie in de dataset en maakt dat het moment van monsterafname niet specifiek gericht is op het vaststellen van een piekconcentratie in de moedermelk.

4.1.2 *LB- versus UB-scenario*

In Appendix B, Tabellen B.1 en B.2, staan de resultaten gerapporteerd van het UB-scenario. Daaruit komt naar voren dat er voor aanpak 1 geen verschil is tussen het LB- en UB-scenario, wat logisch verklaard wordt door de zeer hoge detectiefrequentie (93%-100%) van de EFSA-4 PFAS boven de LOD.

Dit is anders voor aanpak 2. In het UB-scenario heeft 48% van de monsters een som-PEQ boven de 133 pg/mL, ten opzichte van 18% in het LB-scenario (Tabel B.2). In aanpak 2 zijn er dus veel meer monsters waarin de risicogrens overschreden wordt. Voor de meeste van deze monsters wordt de concentratie van 133 pg/mL in beperkte mate overschreden, met een P95 RCR van 2,0 in het UB-scenario (Tabel B.2) ten opzichte van een P95 RCR van 1,7 in het LB-scenario. Bovendien hadden acht van de 16 PFAS waarvoor een RPF beschikbaar is een zeer lage detectiefrequentie (1-6% $\geq$ LOD), terwijl voor die PFAS (PFHpS, PFPeA, PFHxA, PFDoDA, PFPeS, PFDS, HFPO-DA, DONA) in het UB-scenario dan toch voor het overgrote deel van de monsters (94-99%) gerekend wordt met de LOD. Daarom is ervoor gekozen om te richten op de resultaten van het LB-scenario in het rapport zelf.

4.1.3 *Aspecten in de afleiding van de risicogrens voor PFAS in moedermelk*

4.1.3.1 Daling van PFAS in moedermelk

Bij de afleiding van de TWI wordt ervan uitgegaan dat de concentratie van PFAS in moedermelk afneemt met de tijd (EFSA, 2020). Bij de start van lactatie is de concentratie EFSA-4 PFAS in moedermelk 133 pg/mL, maar met de tijd daalt de concentratie EFSA-4 PFAS in moedermelk op basis van de PBK-simulatie in de EFSA-opinie tot 77,5 pg/mL bij postpartum maand 12 (EFSA, 2020).

De concentratie PFAS in moedermelk in deze studie is een momentopname. Afhankelijk van het moment van de monsterafname is de PFAS-concentratie representatief voor een piekconcentratie (i.e. bij postpartum maand 0) maar in de meeste gevallen (≥ 1 maand postpartum) kan ervan uitgegaan worden dat de initiële concentratie in moedermelk hoger moet zijn geweest bij de start van lactatie. Daarom leidt de vergelijking van moedermelkconcentraties in de latere maanden postpartum met de risicogrens van 133 pg/mL mogelijk tot een onderschatting van het risico.

Een dynamische risicogrens is wel overwogen (zie Appendix C) maar uiteindelijk niet toegepast in dit rapport omdat de daling van PFAS in moedermelk van een aantal PFAS onbekend is. Daarnaast is het ook onbekend of de concentratie PFAS blijft dalen na één jaar postpartum. Onze gegevens, die niet optimaal zijn om dit te bepalen, duiden op een lichte stijging van PFOS in moedermelk na één jaar postpartum (Appendix C). Mogelijk is dit gerelateerd aan het ontstaan van een nieuw evenwicht tussen blootstelling en uitscheiding van PFAS bij een lagere moedermelkproductie van de moeder, omdat het kind meer ander voedsel eet.

4.1.3.2 Duur van borstvoeding geven

In de afleiding van de EFSA TWI en het opstellen van de risicogrens voor PFAS in moedermelk is uitgegaan van een blootstellingsscenario waarbij een baby één jaar lang exclusief wordt gevoed met moedermelk (EFSA, 2020). Uit de Peiling Melkvoeding 2023 (Bouwmeester en Staal, 2024) blijkt dat 53,4% van de moeders in Nederland start met borstvoeding, 22,7% met een combinatie van kunstvoeding en borstvoeding, en 23,9% met kunstvoeding. Op de leeftijd van zes maanden is het percentage kinderen dat exclusief borstvoeding krijgt gereduceerd tot 31%. Bij kinderen tussen 6 en 12 maanden daalt dit percentage verder naar 24%. Dit betekent dat slechts een fractie van de kinderen in Nederland exclusief met moedermelk gevoed wordt voor de duur van één jaar. Voor veel baby's in Nederland is één jaar lang borstvoeding dus een overschatting van de blootstellingduur aan PFAS via moedermelk.

Echter, uit onze dataset blijkt ook dat sommige vrouwen langer dan één jaar borstvoeding geven. In deze gevallen is het blootstellingsscenario onderliggend aan de EFSA TWI een onderschatting van de daadwerkelijke blootstellingsduur.

4.1.3.3 Hoeveelheid moedermelk consumptie per dag

In de afleiding van de EFSA TWI en het opstellen van de risicogrens voor PFAS in moedermelk is uitgegaan van een blootstellingsscenario waarbij een baby één jaar lang 800 mL melk per dag drinkt (EFSA, 2020). De hoeveelheid melk die een baby drinkt is echter afhankelijk van zijn leeftijd en gewicht. In realiteit is de moedermelk consumptie dynamisch en varieert tussen 570-760 mL/dag (Rios-Leyvraz en Yao, 2023) afhankelijk van factoren zoals het gewicht van het kind en aanvulling op borstvoeding met flesvoeding en/of vaste voeding. Kleinere kinderen zullen minder melk drinken, terwijl grotere kinderen meer melk drinken. Per kilogram lichaamsgewicht hebben baby's ongeveer 100 tot 150 mL melk per dag nodig.¹⁰ Een groot deel van de kinderen krijgt niet meer exclusief borstvoeding na 6 maanden. Voor deze groep zal 800 mL melk per dag een overschatting zijn van het volume.

¹⁰ <https://www.borstvoeding.nl/afkolven-en-bewaren/hoeveel-melk-in-een-fles>

4.1.4 *Sommatie van PFAS-concentraties in moedermelk volgens aanpak 1 versus aanpak 2*

4.1.4.1 Bewijs voor immunotoxiciteit van PFAS en het verschil in relatieve potentie

De door EFSA vastgestelde TWI van 4,4 ng/kg lichaamsgewicht per week voor de EFSA-4 PFAS (PFOS, PFOA, PFNA en PFHxS) is gebaseerd op immunotoxiciteit als meest gevoelige effect (EFSA, 2020). Uitgangspunten van EFSA daarbij waren dat van andere PFAS dan de EFSA-4 onvoldoende informatie beschikbaar is over hun immunotoxiciteit om ze te kunnen includeren in de som TWI, en dat PFOS, PFOA, PFNA en PFHxS een gelijke potentie hebben wat betreft immunotoxiciteit. Echter, recente publicaties stellen dat meer PFAS dan deze vier effecten tonen op immuunsysteem-gerelateerde parameters (Ehrlich et al., 2023; Janssen et al., 2024; Iulini et al., 2025). Ook laten de RPF's in Tabel 2 van dit rapport een verschil zien potentie van de EFSA-4: PFHxS (0,6) is minder potent dan PFOA en PFNA (10) en PFOS (2) zijn meer potent dan PFOA.

Alhoewel deze RPF's gebaseerd zijn op levertoxiciteit vertonen ze over het algemeen een goede correlatie met RPF's gebaseerd op immuunsysteem-gerelateerde parameters (Bil et al., 2023). Daarbij dient opgemerkt te worden dat deze parameters (afname in milt en thymus gewicht, afname in globuline concentratie) niet definitief kunnen aantonen dat PFAS het functioneren van het immuunsysteem beperken, maar slechts indicatief zijn voor een mogelijk effect op het immuunsysteem. Daarnaast zijn het ook niet de meest gevoelige parameters om effecten op het immuunsysteem te detecteren (IPCS/WHO 2012). Voor het afleiden van definitieve RPF's voor het immuunsysteem is meer onderzoek nodig. Afhankelijk daarvan kunnen ook de kwantitatieve waarden van de RPF's veranderen, wat invloed heeft op de som-PEQ berekeningen.

Daarnaast is het wenselijk dat er internationaal afgestemde RPF's, of een anderszins geschikte internationaal afgestemde mengselrisicobeoordelingsbenadering, komt voor een grotere groep PFAS dan alleen de EFSA-4. De RPF's toegepast in dit rapport zijn afgeleid door het RIVM. Op dit moment beoordeelt de WHO 18 PFAS op 6 gezondheidseffecten¹¹, als voorbereiding op een mengselrisicobeoordeling van PFAS door de FAO/WHO Expert Committee on Food Additives (JECFA) en afleiding van WHO normen voor drinkwater door de WHO expert groep voor richtlijnen voor drinkwaterkwaliteit in 2027. Deze activiteit biedt uitzicht op een internationaal afgestemde aanpak voor de beoordeling van PFAS.

4.1.4.2 Aanwezigheid van PFAS

Uit de metingen in moedermelk komt naar voren dat de EFSA-4 PFAS met hoge detectiefrequenties aanwezig zijn in moedermelk, met de hoogste concentraties voor PFOS en PFOA en lagere concentraties voor PFHxS en PFNA. Maar ook PFDA, PFHpA, PFBS en PFUnDA worden teruggevonden in 30-50% van de monsters, met P95 concentraties

¹¹ De stoffen PFOS, PFUnDA, PFHpA, PFOA, PFHpS, PFBA, PFTrDA, PFHxA, PFTeDA, PFBS, PFHxS, PFPeA, PFDo(D)A, PFNA, PFNA, PFDA, PFDS, HFPO-DA en TFA en cardiometabole, hepatische, immunologische, ontwikkelings-, reproductie- en kankerverwekkende effecten. <https://www.who.int/news-room/articles-detail/request-for-data-on-pfas>

tussen 1,0-4,1 pg/mL. In aanpak 1 worden deze buiten beschouwing gelaten. Aanpak 1 leidt dus, wat betreft inclusie van het aantal PFAS, tot een mogelijke onderschatting van het aantal monsters dat de risicogrens overschrijdt. In die zin doet aanpak 2 meer recht aan de bevinding in Figuur 3 dat in de meeste melkmonsters tussen 4 en 7 PFAS voorkomen.

Daarnaast is het zo dat het aantal gemeten PFAS in melk geen volledig beeld geven. EFSA berekende dat PFBA en PFHxA bijdragen aan de som PFAS-blootstelling via het dieet van volwassenen voor respectievelijk 16% en 15% (EFSA, 2020). In Fiedler et al. (2022) werd onder andere PFBA teruggevonden in moedermelk uit verschillende Oost-Europese landen. In de huidige studie was de detectielimiet voor PFBA hoog in vergelijking tot andere PFAS. Zo hoog dat concentraties zoals waargenomen in Fiedler et al. (2022) in West- en Oost-Europese regio's mogelijk onopgemerkt blijven. Verder zijn verscheidene (ultra)kortketenige PFAS, zoals TFA, niet meegenomen in de analyses. Dit terwijl TFA de PFAS is die in de hoogste concentraties voorkomt in drinkwater in Nederland (Sadia et al., 2023). Deze (ultra)kortketenige PFAS, met een kortere halfwaardetijd in de mens, zijn mogelijk beter detecteerbaar in andere matrices, zoals urine (Bautista et al., 2026; Peng et al., 2022; Zheng et al., 2023).

4.1.4.3 Som EFSA-4 versus som-PEQ

In aanpak 2 wordt de risicogrens van 133 pg/mL EFSA-4 PFAS als uitgangspunt genomen als zijnde som van PFOA (equivalenten) (RIVM, 2021). Om deze waarde beter aan te laten sluiten met de RPF-methode zou deze som EFSA-4 waarde idealiter, door middel van een RPF-correctie, omgerekend moeten worden naar een som-PEQ waarde. Doordat de individuele data uit Abraham et al. (2020), de studie waarop EFSA de TWI heeft bepaald, niet publiek beschikbaar zijn, is dit tot op heden niet gedaan. Mogelijk leidt een RPF-correctie tot een ophoging van de risicogrens (dus een risicogrens >133 pg/ml moedermelk) door aanwezigheid van PFOS en PFNA, die met een RPF-correctie van respectievelijk 2 en 10 een grotere bijdrage aan de PEQ-concentratie zullen hebben dan wanneer ze als equipotent (aan PFOA) worden beschouwd. Doordat dit in aanpak 2 niet is gebeurd, leidt dit mogelijk tot een overschatting van het aantal monsters wat de risicogrens overschrijdt.

4.1.5 Aannames en onzekerheden: Samenvattend

De berekening van het percentage moedermelkmonsters met PFAS onder de risicogrens kent verschillende onzekerheden, zoals de beperkte representativiteit van de studiestudiepopulatie en variatie in het moment van monsternamen na geboorte. Daarnaast zijn er aannames gedaan over de duur en exclusiviteit van borstvoeding die niet zozeer voor een groot gedeelte van de Nederlandse baby's gelden. Ook bestaat er onzekerheid over de relatieve schadelijkheid van verschillende PFAS en hun bijdrage aan het gezondheidsrisico. Deze aspecten zorgen voor zowel een onder- als overschatting van het werkelijk percentage monsters onder de risicogrens.

4.2 Vergelijking met andere moedermelk metingen uit Nederland

Er zijn twee andere PFAS-moedermelkstudies beschikbaar met metingen uit Nederland; één studieonderdeel van de WHO/UNEP Human Milk Survey met monsters afgenomen in 2014 (Zeilmaker et al, 2020; Fiedler et al., 2022) en één studie met monsters uit de regio Rotterdam afgenomen tussen 2013-2018 (Van Beijsterveldt et al., 2022). De vergelijking van PFAS-concentraties in moedermelk uit deze studies is te vinden in Tabel D.1. in Appendix D. Voor de stoffen die in alle drie deze studies in moedermelk zijn teruggevonden (L-PFOA, T-PFOS, L-PFOS) is een duidelijk afnemende trend te zien tussen 2014 en 2020-2021. Ook voor de moedermelk concentraties van L-PFHxS, PFNA en PFUnDA is een duidelijke afname te zien in deze periode.

4.3 Vergelijking met andere moedermelk metingen uit Europa

De studie van Fiedler et al. (2022) presenteert PFAS-moedermelkmetingen met een mondiale representatie (Appendix D). In de regio West-Europa zijn, naast metingen uit Nederland, ook metingen uit Oostenrijk, België, twee regio's in Duitsland, Ierland, Zweden en Zwitserland aanwezig. De monsters werden verkregen tussen 2014 en 2019. Daarnaast zijn er ook gegevens van moedermelkmetingen van 12 landen uit Centraal-Europa. De vergelijking van de PFAS-concentraties in moedermelk uit deze landen/regio's en onze studie is te vinden in Tabel D.2 in Appendix D.

Hoewel de metingen van L-PFOA, PFNA, PFUnDA uit 2014 in Nederland hoger zijn dan het gemiddelde in de West-Europese regio, zijn de concentraties van de monsters uit 2020-2021 lager dan dit gemiddelde. Ook de gemiddelde concentraties van L-PFHxS, T-PFOS en L-PFOS uit 2014 in Nederland zijn hoger dan het gemiddelde in de West-Europese regio maar zijn inmiddels vergelijkbaar. Alleen de concentratie van V-PFOS uit 2020-2021 ligt nog iets boven het gemiddelde van de West-Europese regio. Over het algemeen wordt in de West-Europese landen een tendens van dalende PFAS-concentraties in moedermelk gezien, bijvoorbeeld voor PFOS (zie Figuur 18 in Malisch et al., 2023). Dit onderzoek geeft geen verklaring voor de dalende concentraties in moedermelk.

In vergelijking tussen de West-Europese en Centraal-Europese regio's is de gemiddelde concentratie T-PFOS in moedermelk hoger in Centraal-Europa. Opmerkelijk is ook dat er een kwantificeerbare hoeveelheid PFBA gevonden is in moedermelk, vergelijkbaar met de gemiddelde concentratie PFOA in deze regio. Ook werd in de Centraal-Europese regio PFHxA gevonden in moedermelk. In de West-Europese regio was de concentratie PFBA veel lager dan de Centraal-Europese regio en in het Nederlandse monster uit 2014 werd PFBA niet gevonden boven de LOQ. Ook PFHxA werd niet teruggevonden in de West-Europese regio. In het huidige rapport was de LOD/LOQ van PFBA relatief hoog en was geen enkel monster boven de LOD. PFHxA werd in 4% van de monsters teruggevonden met alle waarden tussen de LOD-LOQ.

4.4 Aspecten buiten beschouwing gelaten

Naar een aantal aspecten is niet nader gekeken in dit onderzoek. Dit heeft diverse redenen. Enerzijds zullen een aantal aspecten in

vervolgonderzoek worden behandeld in samenwerking met het Amsterdam UMC en de VU, en anderzijds zijn er aspecten die niet direct aansluiten bij de doelstelling van het PFAS-onderzoeksprogramma.

Zo is er in het huidige rapport niet gekeken naar mogelijke factoren die bepalend zijn voor de aanwezigheid van PFAS in moedermelk, hoewel onder de deelnemers van de COVID MILK-POWER MILK studie uitgebreide vragenlijsten zijn ingevuld met informatie over onder andere demografische kenmerken, leefsituatie, postuur, algemene gezondheid, en de zwangerschap (zie sectie 2.1). Ook is niet gekeken naar mogelijke associaties tussen concentraties PFAS in moedermelk met IgA antilichamen tegen SARS-CoV-2. Deze onderwerpen zijn onderdeel van vervolgonderzoek.

Het huidige rapport richtte zich op het rapporteren van concentraties van PFAS in moedermelk en niet op het uitvoeren van een geaggregeerde en cumulatieve blootstellingsschatting onder baby's en jonge kinderen. De EFSA TWI gaat ervan uit dat de blootstelling van het eerste levensjaar van een kind exclusief afkomstig is van blootstelling via moedermelk. Er zijn echter ook andere mogelijke bronnen van PFAS die bijdragen aan de geaggregeerde en cumulatieve blootstelling aan PFAS, zoals huisstof, drinkwater, kunstvoeding en consumentenproducten (Schepens et al., 2023; Affourtit en Verbruggen, 2025; NVWA, 2024). Om die reden is het percentage monsters onder de risicogrens voor PFAS in moedermelk geen volwaardige risicoboordeeling. Het uitvoeren van een risicoboordeeling ligt buiten de doelstelling van dit onderzoek en van het PFAS-onderzoeksprogramma.

4.5 Positieve effecten van moedermelk

Uit dit rapport blijkt dat de meeste moedermelkmonsters van Nederlandse vrouwen lagere PFAS-waarden bevatten dan de vastgestelde risicogrens. Op basis van de EFSA-4 is 97% van de monsters onder de risicogrens; bij de som-PEQ-methode geldt dit voor 82% van de monsters. Dit betekent dat het gezondheidsrisico voor baby's door PFAS-blootstelling via moedermelk in de meeste gevallen verwaarloosbaar is. Tot 18% van de monsters is boven de risicogrens, waarbij het 99^e percentiel op basis van de som-PEQ 3,5 keer de grens overschrijdt. Dit betekent dat, wanneer kinderen deze melk drinken gedurende één jaar lang, een mogelijk verhoogd risico op verminderd functioneren van het adaptieve immuunsysteem niet uitgesloten kan worden.

Moedermelk bevat veel gunstige stoffen voor pasgeborenen, zoals lactoferrine, lysozyme, oligosacchariden, groeifactoren, omega-3 vetzuren en mineralen (Voedingscentrum, n.d.). Borstvoeding is zowel voor het kind als voor de moeder positief voor de gezondheid in vergelijking met het geven van flesvoeding. Uit onderzoek blijkt dat baby's die borstvoeding krijgen minder kans hebben op bepaalde infectieziekten. Daarnaast lijkt borstvoeding het risico op (ernstig) overgewicht, astma en kinderleukemie bij kinderen te verkleinen. Bij moeders kan het de kans op onder andere diabetes type II, cardiovasculaire aandoeningen en borstkanker verminderen (VZinfo, 2025).

De gezondheidsvoordelen van borstvoeding worden over het algemeen als groter beschouwd dan de mogelijke risico's van blootstelling aan milieucontaminanten, zoals dioxines en polychloorbifenylen, via moedermelk (Zeilmaker et al., 2020). Het behoeft echter meer onderzoek om dit specifiek voor PFAS, eventueel in combinatie met andere milieucontaminanten aanwezig in moedermelk, kwantitatief te bepalen in een risico-baten analyse.

5 Aanbevelingen

Nederland heeft eerder meegedaan aan het wereldwijde onderzoek naar de aanwezigheid van POPs in moedermelk (Zeilmaker et al., 2020). Door het vergelijken van de PFAS-waarden uit Zeilmaker et al. (2020) en het huidige onderzoek is een afnemende tendens in concentraties van L-PFOA, T-PFOS, L-PFOS, L-PFHxS, PFNA en PFUnDA zichtbaar in de periode 2014-2021.

Sinds 2000 zijn in Europa diverse risico-mitigerende maatregelen genomen om het gebruik van PFAS in producten en de emissies naar het milieu te beperken. Het stellen van maatregelen is de laatste jaren geïntensiveerd, onder andere door introductie van maximum limieten van PFAS in voedingsmiddelen, introductie van aangescherpte milieukwaliteitsnormen, en een voorstel voor beperkingen van gebruik onder de REACH wetgeving. Hoewel de opzet van het onderzoek in het huidige rapport niet in staat stelt om een causaal verband aan te tonen, toont de dalende tendens van PFAS in moedermelk een parallel met de intensivering van deze beperkingen. We bevelen aan onverminderd in te zetten op maatregelen die de blootstelling aan PFAS onder de algemene bevolking verminderen.

Onze aanbeveling is ook om onderzoek naar de aanwezigheid van PFAS in moedermelk periodiek op te volgen. Zo kunnen de concentraties van PFAS in moedermelk worden gevolgd in de tijd en kan worden gemonitord of risico-mitigerende maatregelen voldoende effectief zijn om de algemene- maar ook een kwetsbare en gevoelige populatie te beschermen. Door aansluiting te zoeken bij internationale initiatieven, zoals het UNEP/WHO moedermelk onderzoek, kan ook worden bekeken of de aanwezigheid van PFAS in moedermelk afwijkend is van andere landen binnen en buiten Europa.

Als laatste zijn er nog een aantal wetenschappelijke aanbevelingen om een beter beeld te krijgen hoe PFAS zich gedraagt in het lichaam en zo bepaalde onzekerheden en aannames, benoemt in sectie 4.1 van dit rapport, weg te kunnen nemen. Onder andere het herhaaldelijk meten van PFAS concentraties in moedermelk door de tijd in dezelfde individuen (idealerweise langer dan één jaar), meer inzicht verschaffen in het mechanisme van uitscheiding van PFAS in moedermelk, het bepalen van andere PFAS in de chemische analyse (bv. TFA) of met een lagere detectielimiet (bv. PFBA), en een beter beeld verkrijgen van de relatieve toxiciteit van verschillende PFAS op het functioneren van het immuunsysteem.

6 Conclusie

Uit het onderzoek naar PFAS in moedermelk, uitgevoerd binnen de COVID MILK-POWER MILK studiepopulatie, blijkt dat moedermelk van Nederlandse vrouwen verschillende PFAS bevat. In elk monster werden minimaal twee PFAS (PFOS en PFOA) aangetroffen; het merendeel bevatte 4-7 PFAS. PFOS, PFOA, PFNA en PFHxS kwamen voor in meer dan 93% van de monsters. Hoewel er op 29 verschillende PFAS is getest, werden 21 daarvan nauwelijks of helemaal niet gevonden. PFOS werd het meest aangetroffen en had de hoogste concentraties in de moedermelk, gevolgd door PFOA. Deze resultaten komen overeen met eerdere grootschalige onderzoeken naar PFAS in het bloed van de Nederlandse bevolking (Bil et al., 2025). Ook in dit onderzoek werden meerdere PFAS in het bloed van de Nederlandse bevolking aangetoond, met de hoogste bijdragen van PFOS gevolgd door PFOA.

Wanneer uitsluitend naar de EFSA-4 wordt gekeken blijft 97% van de onderzochte monsters onder de risicogrens voor PFAS in moedermelk. Bij de beoordeling op basis van de som-PEQ geldt dit voor 82% van de monsters. Voor de monsters die onder deze grens vallen, is het potentiële gezondheidsrisico van PFAS voor zuigelingen via het drinken van moedermelk te verwaarlozen. Het deel dat de risicogrens overschrijdt, doet dat bij het 99^e percentiel o.b.v. som-PEQ met een factor 3,5. Voor de moedermelkmonsters die de risicogrens overschrijden betekent het dat, wanneer kinderen deze melk gedurende één jaar lang drinken, effecten op het adaptieve immuunsysteem niet uit te sluiten zijn. Hieruit volgt de noodzakelijkheid onverminderd in te zetten op maatregelen die de blootstelling aan PFAS onder de algemene bevolking verminderen.

Het bepalen van de fractie monsters boven de risicogrens is onderhevig aan enkele onzekerheden, zoals de representativiteit van de studiepopulatie, variatie in het tijdstip van monsterafname en aannames over de duur en exclusiviteit van borstvoeding geven. Ook bestaat er onzekerheid over de schadelijkheid van verschillende PFAS en hun gecombineerde effect. Deze aspecten resulteren zowel in een onder- als overschatting van het werkelijk percentage monsters boven de risicogrens. Dit risico bestaat naast het feit dat borstvoeding ook bevorderlijk is voor de bescherming tegen infectieziekten, door o.a. de aanwezigheid van immuuncellen, antistoffen en voedingsstoffen die het immuunsysteem stimuleren. Het is niet duidelijk bij welke hoeveelheden en in welke mate schadelijke effecten door PFAS in moedermelk optreden en hoe zich dit verhoudt tot de positieve effecten van borstvoeding geven. Dit vraagt een ander type onderzoek.

Alles samengenomen ziet het RIVM op dit moment geen aanleiding om een signaal af te geven om te adviseren korter of geen borstvoeding te geven. Er is wel meer onderzoek nodig om onzekerheden te reduceren in de methodologie benut voor het berekenen van het percentage van monsters wat de risicogrens overschrijdt.

In vergelijking met eerder onderzoek naar PFAS in moedermelk in Nederland zijn de concentraties afgenomen in de periode 2014-2021. Aanbevolen wordt om periodiek vervolgonderzoek uit te voeren, zodat de aanwezigheid van PFAS in moedermelk en de effectiviteit van eventuele intensivering van maatregelen gevolgd kunnen worden in de tijd.

Dankbetuiging

De auteurs danken Britt van Keulen, Chris van den Akker, Hannah Juncker, Hans van Goudoever, Jacqueline Muts en Nora Carpay (allen Amsterdam UMC), Jacco Koekkoek, Marja Lamoree, Majorie van Duursen en Virissa Lenters (allen Vrije Universiteit Amsterdam) voor de goede samenwerking bij het tot stand komen van dit rapport. RIVM-collega's Agnes Oomen en Marja Pronk danken wij voor het kritisch meelezen met een conceptversie van dit rapport. Astrid Bulder, Ben Bom, Joke Herremans, Lianne de Wit-Bos, Lonneke van Leeuwen, Maarten Schipper en Marcel Mengelers (allen RIVM) danken wij voor hun rol in de totstandkoming van dit rapport. De deelnemers van de COVID MILK-POWER MILK studie bedanken wij voor het beschikbaar stellen van monsters voor PFAS-bepalingen.

Literatuur

Abraham, K., Mielke, H., Fromme, H., Völkel, W., Menzel, J., Peiser, M., ... & Weikert, C. (2020). Internal exposure to perfluoroalkyl substances (PFASs) and biological markers in 101 healthy 1-year-old children: associations between levels of perfluorooctanoic acid (PFOA) and vaccine response. *Archives of Toxicology*, 94(6), 2131-2147.

<https://doi.org/10.1007/s00204-020-02715-4>

Affourtit, F. & Verbruggen, T. (2025). Inventarisatie en prioritering van PFAS-bronnen anders dan voedsel en drinkwater. RIVM Briefrapport No. 2025-0118. <https://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/2025-0118.pdf>

Andreas, N. J., Kampmann, B., & Le-Doare, K. M. (2015). Human breast milk: A review on its composition and bioactivity. *Early Human Development*, 91(11), 629-635.

<https://doi.org/10.1016/j.earlhumdev.2015.08.013>

Bautista, A., Fernandez-Tardon, G., Rodríguez-Suárez, M. M., Tardon, A., Bravo, N., Garí, M., ... & Farré, M. (2026). Per-and Polyfluoroalkyl Substances in Urine Samples from Eight-Year-Old Children Living in Northwest Spain. *Molecules*, 31(5), 900.

<https://doi.org/10.3390/molecules31050900>

Bil, W., Zeilmaker, M., Fragki, S., Lijzen, J., Verbruggen, E., & Bokkers, B. (2021). Risk assessment of per - and polyfluoroalkyl substance mixtures: A relative potency factor approach. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 40(3), 859-870. <https://doi.org/10.1002/etc.4835>

Bil, W., Zeilmaker, M. J., & Bokkers, B. G. (2022). Internal relative potency factors for the risk assessment of mixtures of per-and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in human biomonitoring. *Environmental Health Perspectives*, 130(7), 077005.

<https://doi.org/10.1289/EHP10009>

Bil, W., Ehrlich, V., Chen, G., Vandebriel, R., Zeilmaker, M., Luijten, M., Uhl, M., Marx-Stoelting, P., Halldorsson, T. I., & Bokkers, B. (2023). Internal relative potency factors based on immunotoxicity for the risk assessment of mixtures of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in human biomonitoring. *Environment International*, 171, 107727.

<https://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107727>

Bil, W., McKeon, H. P., Chen, G., Sam, M. L. S. P., Grift, I. D., van der Klis, F. R. M., Vos, E. R. A., Schipper, M., de Wit-Bos, L., Mengelers, M., Bokkers, B. G. H., & Nederlof R. (2025). PFAS in bloed van de Nederlandse bevolking. RIVM Briefrapport No. 2025-0094.

<https://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/2025-0094.pdf>

Blomberg, A.J., Haug, L.S., Lindh, C., Sabaredzovic, A., Pineda, D., Jakobsson, K. & Nielsen, C. (2023). Changes in perfluoroalkyl substances (PFAS) concentrations in human milk over the course of lactation: A study in Ronneby mother-child cohort. *Environmental Research*, 219, 115096. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.115096>

Bouwmeester, M., en Staal, I. (2024). Rapport Peiling Melkvoeding 2023. <https://www.vzinfo.nl/publicaties/rapport-peiling-melkvoeding-2023>

Buekers, J., Colles, A., Cornelis, C., Morrens, B., Govarts, E., & Schoeters, G. (2018). Socio-economic status and health: evaluation of human biomonitoring chemical exposure to per- and polyfluorinated substances across status. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15(12), 2818. <https://doi.org/10.3390/ijerph15122818>

Bulder, A., van der Aa, M., Affourtit, F., Bakker, M., Bil, W., Bokkers, B., Boon, P., Hartmann, J., Mengelers, M., Montforts, M., Naus, F., Nederlof, R., van Wijk, S., Wintersen, A., & de Wit, L. (2024). PFAS-onderzoeksprogramma RIVM. Inventarisatie beschikbare informatie en afbakening onderzoek. RIVM Briefrapport No. 2024-0104. <https://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/2024-0104.pdf>

Carpay et al. (In Prep.). Geographical Distribution and Predictors of PFAS levels in Serum and Breastmilk across the Netherlands.

Conley, J. M., Lambright, C. S., Evans, N., Farraj, A. K., Smoot, J., Grindstaff, R. D., Hill, D., McCord, J., Medlock-Kakaley, E., and Dixon, A. (2023). Dose additive maternal and offspring effects of oral maternal exposure to a mixture of three PFAS (HFPO-DA, NBP2, PFOS) during pregnancy in the Sprague-Dawley rat. *Science of The Total Environment*, 892, 164609. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164609>

Conley, J. M., Lambright, C. S., Evans, N., Bangma, J., Ford, J., Hill, D., and Gray Jr, L. E. (2024a). Long-chain perfluoroalkylether carboxylic acids PFO5DoA and PFO4DA alter glucose, bile acid, and thyroid hormone homeostasis in fetal rats from 5-day maternal oral exposure. *Environmental Research*, 263, 120210. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.120210>

Conley, J. M., Lambright, C. S., Evans, N., Bangma, J., Ford, J., Hill, D., Medlock-Kakaley, E., & Gray, L. E., Jr. (2024b). Maternal and Neonatal Effects of Maternal Oral Exposure to Perfluoro-2-methoxyacetic Acid (PFMOAA) during Pregnancy and Early Lactation in the Sprague-Dawley Rat. *Environmental Science & Technology*, 58(2), 1064-1075. <https://doi.org/10.1021/acs.est.3c08559>

Domingo, J. L. (2025). A review of the occurrence and distribution of Per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in human organs and fetal tissues. *Environmental Research*, 272, 121181. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2025.121181>

Draghi, S., Pavlovic, R., Pellegrini, A., Fidani, M., Riva, F., Brecchia, G., ... & Curone, G. (2023). First investigation of the physiological distribution of legacy and emerging perfluoroalkyl substances in raw bovine milk according to the component fraction. *Foods*, 12(13), 2449. <https://doi.org/10.3390/foods12132449>

EFSA. (2020). Risk to human health related to the presence of perfluoroalkyl substances in food. *EFSA Journal*, 18(9), e06223. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2020.6223>

Ehrlich, V., Bil, W., Vandebriel, R., Granum, B., Luijten, M., Lindeman, B., ... & Uhl, M. (2023). Consideration of pathways for immunotoxicity of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS). *Environmental Health*, 22(1), 19. <https://doi.org/10.1186/s12940-022-00958-5>

Fiedler, H., Sadia, M., Krauss, T., Baabish, A., & Yeung, L. W. (2022). Perfluoroalkane acids in human milk under the global monitoring plan of the Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants (2008–2019). *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 16(10), 132. <https://doi.org/10.1007/s11783-022-1541-8>

Fischer, F. C., Ludtke, S., Thackray, C., Pickard, H. M., Haque, F., Dassuncao, C., ... & Sunderland, E. M. (2024). Binding of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) to serum proteins: implications for toxicokinetics in humans. *Environmental Science & Technology*, 58(2), 1055-1063. <https://doi.org/10.1021/acs.est.3c07415>

Gezondheidsraad (2024). Meetprogramma voor blootstelling aan chemische stoffen. Nr. 2024/07. <https://www.gezondheidsraad.nl/site/binaries/site-content/collections/documents/2024/04/25/advies-meetprogramma-voor-blootstelling-aan-chemische-stoffen/Meetprogramma-voor-blootstelling-aan-chemische-stoffen-advies.pdf>

Glüge, J., Scheringer, M., Cousins, I. T., DeWitt, J. C., Goldenman, G., Herzke, D., Lohmann, R., Ng, C. A., Trier, X., & Wang, Z. (2020). An overview of the uses of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS). *Environmental Science: Processes & Impacts*, 22(12), 2345-2373. <https://doi.org/10.1039/d0em00291g>

Han, F., Liu, J., Wang, Y., Li, J., Lyu, B., Zhao, Y., & Wu, Y. (2023). Penetration of perfluorooctanesulfonate isomers and their alternatives from maternal blood to milk and its associations with chemical properties and milk primary components. *Environmental Science & Technology*, 57(6), 2457-2463. <https://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/acs.est.2c07401>

Iulini, M., Galbiati, V., Marinovich, M., & Corsini, E. (2025). Decoding PFAS immunotoxicity: a NAMs-based comparison of short vs. long chains. *Frontiers in Toxicology*, 7, 1665163. <https://doi.org/10.3389/ftox.2025.1665163>

IPCS/WHO (2012). Guidance for immunotoxicity risk assessment for chemicals. Harmonization Project Document No. 10.

<https://iris.who.int/server/api/core/bitstreams/24cf1977-e3b3-4f77-a9c2-0487dedb782f/content>

Janssen, A. W., Jansen Holleboom, W., Rijkers, D., Louisse, J., Hoekstra, S. A., Schild, S., ... & Beekmann, K. (2024). Determination of *in vitro* immunotoxic potencies of a series of perfluoroalkylsubstances (PFASs) in human Namalwa B lymphocyte and human Jurkat T lymphocyte cells. *Frontiers in Toxicology*, 6, 1347965.

<https://doi.org/10.3389/ftox.2024.1347965>

Juncker, H. G., Romijn, M., Loth, V. N., Ruhé, E. J., Bakker, S., Kleinendorst, S., ... & van Keulen, B. J. (2021). Antibodies against SARS-CoV-2 in human milk: milk conversion rates in the Netherlands. *Journal of Human Lactation*, 37(3), 469-476.

<https://doi.org/10.1177/08903344211018185>

Lankova, D., Lacina, O., Pulkrabova, J., & Hajslova, J. (2013). The determination of perfluoroalkyl substances, brominated flame retardants and their metabolites in human breast milk and infant formula. *Talanta*, 117, 318-325. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2013.08.040>

Liston, A., Carr, E. J., & Linterman, M. A. (2016). Shaping variation in the human immune system. *Trends in immunology*, 37(10), 637-646. <https://doi.org/10.1016/j.it.2016.08.002>

Macheka, L. R., Abafe, O. A., Mugivhisa, L. L., & Olowoyo, J. O. (2022). Occurrence and infant exposure assessment of per and polyfluoroalkyl substances in breast milk from South Africa. *Chemosphere*, 288, 132601. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132601>

Malisch, R., Fürst, P., Šebková, K., Sapunova, D., Kalina, J. (2023). 'Time Trends in Human Milk Derived from WHO- and UNEP-Coordinated Exposure Studies, Chapter 3: Perfluoroalkyl Substances'. In Malisch, M., Fürst, P., and Šebková, K. (Eds.). *Persistent Organic Pollutants in Human Milk* (pp. 643-601). Springer <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-031-34087-1>

NVWA (Nederlandse Voedsel- en Warenautoriteit). (2024). PFAS in levensmiddelen. <https://www.nvwa.nl/onderwerpen/voedselveiligheid/contaminanten-in-levensmiddelen/inspectieresultaten/2024/pfas-in-levensmiddelen>

Nielsen, F., Fischer, F. C., Leth, P. M., & Grandjean, P. (2024). Occurrence of major perfluorinated alkylate substances in human blood and target organs. *Environmental Science & Technology*, 58(1), 143-149. <https://doi.org/10.1021/acs.est.3c06499>

Peng, L., Xu, W., Zeng, Q., Sun, F., Guo, Y., Zhong, S., ... & Chen, D. (2022). Exposure to perfluoroalkyl substances in waste recycling workers: Distributions in paired human serum and urine. *Environment International*, 158, 106963. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106963>

Reardon, A. J., Rowan-Carroll, A., Ferguson, S. S., Leingartner, K., Gagne, R., Kuo, B., Williams, A., Lorusso, L., Bourdon-Lacombe, J. A., & Carrier, R. (2021). Potency ranking of per- and polyfluoroalkyl substances using high-throughput transcriptomic analysis of human liver spheroids. *Toxicological Sciences*, 184(1), 154-169.

<https://doi.org/10.1093/toxsci/kfab102>

Rios-Leyvraz, M., & Yao, Q. (2023). The volume of breast milk intake in infants and young children: a systematic review and meta-analysis. *Breastfeeding Medicine*, 18(3), 188-197.

<https://doi.org/10.1089/bfm.2022.028>

RIVM (2021). Notitie implementatie van de EFSA som-TWI PFAS.

<https://www.rivm.nl/sites/default/files/2021-04/Notitie%20implementatie%20EFSA-TWI%20PFAS.pdf>

RIVM (2026). <https://www.rivm.nl/en/proast>

Sadia, M., Nollen, I., Helmus, R., Ter Laak, T. L., Been, F., Praetorius, A., & Van Wezel, A. P. (2023). Occurrence, fate, and related health risks of PFAS in raw and produced drinking water. *Environmental science & technology*, 57(8), 3062-3074. <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c06015>

Schepens, M., te Biesebeek, J., Hartmann, J., van der Aa, N., Zijlstra, R., & Boon, P. (2023). Risk assessment of exposure to PFAS through food and drinking water in the Netherlands. RIVM Rapport 2023-0011. <https://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/2023-0011.pdf>

Starnes, H. M., Jackson, T. W., Rock, K. D., & Belcher, S. M. (2024). Quantitative cross-species comparison of serum albumin binding of per- and polyfluoroalkyl substances from five structural classes. *Toxicological Sciences*, 199(1), 132-149. <https://doi.org/10.1093/toxsci/kfae028>

Thomsen, C., Haug, L.S., Stigum, H., Froshaug, M., Broadwell, S.L. & Becher, G. (2010) Changes in Concentrations of Perfluorinated Compounds, Polybrominated Diphenyl Ethers, and Polychlorinated Biphenyls in Norwegian Breast-Milk during Twelve Months of Lactation. *Environmental Science & Technology*, 44(24), 9550-9556

Van Beijsterveldt, I. A., Van Zelst, B. D., De Fluiter, K. S., Van den Berg, S. A., van der Steen, M., & Hokken-Koelega, A. C. (2022). Poly- and perfluoroalkyl substances (PFAS) exposure through infant feeding in early life. *Environment International*, 164, 107274.

<https://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107274>

Van Duursen, M. B. M. (2025). Position paper M. van Duursen t.b.v. rondetafelgesprek PFAS d.d. 10 april 2025 (2025D14880).

<https://berthub.eu/tkconv/document.html?nummer=2025D14880>

Verberk, J. D. M., Vos, R. A., Mollema, L., van Vliet, J., van Weert, J. W. M., de Melker, H. E., & van der Klis, F. R. M. (2019). Third national biobank for population-based seroprevalence studies in the Netherlands, including the Caribbean Netherlands. *BMC Infectious Diseases*, 19(1), 470. <https://doi.org/10.1186/s12879-019-4019-y>

Voedingscentrum (n.d.). Moedermelk.

<https://www.voedingscentrum.nl/encyclopedie/moedermelk.aspx>

VZinfo (2025). Borstvoeding | Gevolgen.

<https://www.vzinfo.nl/borstvoeding/gevolgen>

Zeilmaker, M.J., Moermond, C.T.A., Brandon, E., Hoogerhuis, P., Razenberg, L., en Janssen, M.P.M. (2020). Persistent organic pollutants in human milk in the Netherlands. RIVM Briefrapport No. 2020-0025.

<https://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/2020-0025.pdf>

Zheng, G., Eick, S. M., & Salamova, A. (2023). Elevated levels of ultrashort-and short-chain perfluoroalkyl acids in US homes and people. *Environmental Science & Technology*, 57(42), 15782-15793.

<https://doi.org/10.1021/acs.est.2c06715>

Zhu, J., & Dingess, K. A. (2019). The functional power of the human milk proteome. *Nutrients*, 11(8), 1834.

<https://doi.org/10.3390/nu11081834>

Appendix A Analytical methods for detecting PFAS in breastmilk

For the quantitative analysis of the PFAS, an isotope labeled standard (50 µl of 1 ng/ml) containing the PFAS indicated in Table A.1 was added to an aliquot of 300 µl milk. The milk proteins were denatured by adding 150 µl 50 % formic acid solution (Biosolve) solution to the milk, horizontal shaken for 20 minutes at 300 motions per minute and stored at 40°C till extraction. The PFAS were isolated by solid phase extraction (SPE) using a custom made weak anion exchange (WAX) cartridges in a 96 well plate format (30 mg, 60 µm, 1 cc, Waters). The cartridges were washed with 1 ml type 1 water (Millipore), 1 ml 1 % acetic acid solution (Biosolve) and 1 ml mixture of isopropanol, acetonitrile and methanol (2/1/1, v/v), (all Biosolve). The PFAS were eluted with 1 ml of 0.1 % ammonium hydroxide (Merck) in methanol. The eluates were evaporated till dryness at 50° C by a centrifugal vacuum concentrator (Labconco). The residue was reconstituted in 100 µl water/methanol (1/1, v/v) mixture with 0.1% ammonium hydroxide.

The extracts were chromatographically separated under gradient conditions on an Exion liquid chromatography instrument (Sciex) coupled to a Turbo V Ion source (ESI) operating in the negative ion mode prior to triple quadrupole mass selective detection (6500+, Sciex). The LC column used was a RP18 2.1 mm x 100 mm, 2.5 µm and a C18 2.1 x 50 mm column (both Waters) with 10 mM ammonium acetate (Merck) and methanol as gradient solvents. The injection volume was 50 µl.

Further experimental details can be found Tables A.2-A.5, accompanied by the performance characteristics and validation parameters.

Table A.1 List of native and isotopically labeled PFAS used as internal standards

Compound	Abbreviation	Internal standard
Perfluoro-n-butanoic acid	PFBA	PFBA- ¹³ C4
Perfluoro-n-pentanoic acid	PFPeA	PFPeA- ¹³ C5
Perfluoro-n-hexanoic acid	PFHxA	PFHxA- ¹³ C5 (1,2,3,4,6)
Perfluoro-n-heptanoic acid	PFHpA	PFHpA- ¹³ C4 (1,2,3,4)
Perfluoro-n-octanoic acid, sum	PFOA _{total}	PFOA- ¹³ C8
Perfluoro-n-octanoic acid, linear	PFOA _{lin}	PFOA- ¹³ C8
Perfluoro-n-octanoic acid, branched	PFOA _{br}	PFOA- ¹³ C8
Perfluoro-n-nonanoic acid	PFNA	PFNA- ¹³ C9
Perfluoro-n-decanoic acid	PFDA	PFDA- ¹³ C6 (1,2,3,4,5,6)
Perfluoro-n-undecanoic acid	PFUnDA	PFUnDA- ¹³ C7 (1,2,3,4,5,6,7)
Perfluoro-n-dodecanoic acid	PFDoDA	PFDoDA- ¹³ C2 (1,2)
Tetrafluoro-2-(heptafluoropropoxy)propanoic acid	HFPO-DA	HFPO-DA- ¹³ C (1,2,3)
Dodecafluoro-3H-4,8-dioxanonoate	DONA	PFHpA- ¹³ C4 (1,2,3,4)
2H-Perfluoro-2-decenoic acid	8:2FTUCA	PFDA- ¹³ C6 (1,2,3,4,5,6)
Perfluoro-1-butanedisulfonate	PFBS	PFBS- ¹³ C3 (1,2,3)
Perfluoro-1-pentadisulfonate	PFPeS	PFHxS- ¹³ C3 (1,2,3)
Perfluoro-1-hexadisulfonate, sum	PFHxS _{total}	PFHxS- ¹³ C3 (1,2,3)
Perfluoro-1-hexadisulfonate, linear	PFHxS _{lin}	PFHxS- ¹³ C3 (1,2,3)
Perfluoro-1-hexadisulfonate, branched	PFHxS _{br}	PFHxS- ¹³ C3 (1,2,3)
Perfluoro-1-heptadisulfonate	PFHpS	PFHxS- ¹³ C3 (1,2,3)
Perfluoro-octadisulfonate, total	PFOS _{total}	PFOS- ¹³ C8
Perfluoro-octadisulfonate, linear	PFOS _{lin}	PFOS- ¹³ C8
Perfluoro-octadisulfonate, branched	PFOS _{br}	PFOS- ¹³ C8
Perfluoro-nonadisulfonate	PFNS	PFOS- ¹³ C8
Perfluoro-decadisulfonate	PFDS	PFUnDA- ¹³ C7 (1,2,3,4,5,6,7)
1H,1H,2H,2H Perfluorohexane sulfonate	42FTS	42FTS- ¹³ C2 (1,2)
1H,1H,2H,2H Perfluorooctane sulfonate	62FTS	62FTS- ¹³ C2 (1,2)
1H,1H,2H,2H Perfluorodecane sulfonate	82FTS	82FTS- ¹³ C2 (1,2)
1H,1H,2H,2H Perfluorododecane sulfonate	102FTS	102FTS- ¹³ C2-d4 (1,2)
N-Methylperfluorooctanesulfonamidoacetic acid	MeFOSAA	MeFOSAA-d3 (methyl)
N-Ethylperfluorooctanesulfonamidoacetic acid	N-EtFOSAA	N-EtFOSAA-d5 (ethyl)
N-Methylperfluorobutane sulfonamidoacetic acid	MeFBSAA	MeFBSAA-d3 (methyl)
N-Methylperfluorohexane sulfonamidoacetic acid	MeFHxSAA	MeFHxSAA-d3 (methyl)
11-chloroeicosafluoro-3-oxaundecane-1-sulfonate	11CIPF30UdS	PFDA- ¹³ C6 (1,2,3,4,5,6)
9-chlorohexadecafluoro-3-oxanonane-1-sulfonate	9CIPF30NS	PFOS- ¹³ C8

The native and isotopically labeled PFASs were bought from Cambridge Isotope Laboratories, Chiron and Wellington Laboratories.

LC-MS/MS method for PFAS

Table A.2 LC system

System	ExionLC, (Sciex)		
Injection volume	50 µl		
LC column	XBridge Premier BEH Shield RP18 Column, 2.5 µm, 2,1 mm X 100 mm (Waters)		
Delay column	Isolator C18 column, 2.1 mm X 50 mm (Waters)		
Gradient solvent		10 mM NH ₄ CH ₃ COO	Methanol
Time	Flow (ml/min)	%	%
0	0.6	99	1
0.1	0.6	99	1
0.5	0.6	50	50
8.5	0.6	15	85
8.6	0.6	0	100
14.9	0.6	0	100
15	0.6	99	1
19	0.6	99	1

Table A.3 MS system

System	6500+ (Sciex)
Source settings	
Ionspray voltage	- 4000 V
Temperature	350°C
Curtain gas	35
Nebulizer gas	35
Heater gas	50

Table A.4 MS-MS settings and transitions

Compound ID	Q1 m/z	Q3 m/z	DP	CE	CXP	Compound ID	Q1 m/z	Q3 m/z	DP	CE	CXP
PFBA	212.823	169	-10	-12	-19	PFHxS	398.855	80	-70	-88	-9
PFBA ¹³ C	216.823	172	-10	-12	-9	PFHxS ¹³ C	401.855	80	-70	-88	-9
PFPeA	262.806	218.7	-5	-14	-21	PFHxS Q	398.855	99.1	-70	-64	-7
PFPeA ¹³ C	267.806	223	-5	-14	-21	PFHpS	448.8	79.9	-80	-100	-9
PFPeA Q	262.806	69.2	-5	-52	-5	PFHpS Q	448.8	98.9	-80	-78	-11
PFHxA	312.78	268.9	-25	-14	-21	PFOS	498.769	79.8	-25	-92	-15
PFHxA ¹³ C	317.78	272.9	-25	-14	-21	PFOS ¹³ C	506.769	79.8	-25	-92	-15
PFHxA Q	312.78	119	-25	-28	-15	PFOS Q	498.769	98.9	-25	-92	-11
PFHpA	362.842	319.1	-30	-14	-31	PFNS	548.77	79.8	-155	-114	-9
PFHpA ¹³ C	366.842	322.1	-30	-14	-31	PFNS Q	548.77	98.8	-155	-116	-11
PFHpA Q	362.842	169.1	-30	-24	-11	PFDS	598.771	80.1	-65	-116	-29
PFOA tot	412.819	368.9	-30	-16	-31	PFDS Q	598.771	98.8	-65	-116	-23
PFOA	412.818	368.9	-30	-16	-31	42FTS	326.83	80.9	-45	-54	-9
PFOA ¹³ C	420.818	375.9	-30	-16	-31	42FTS ¹³ C	328.83	80.9	-45	-54	-9
PFOA Q	412.818	169	-30	-26	-11	42FTS Q	326.83	306.8	-45	-34	-17
PFNA	462.861	419.1	-25	-16	-11	62FTS	426.876	407	-85	-34	-17
PFNA ¹³ C	471.861	427.1	-25	-16	-11	62FTS ¹³ C	428.876	81	-85	-62	-3
PFNA Q	462.861	219.1	-25	-26	-13	62FTS Q	426.876	81	-85	-62	-3
PFDA	512.847	468.9	-15	-18	-35	82FTS	526.794	80.9	-95	-94	-13
PFDA ¹³ C	518.847	473.9	-15	-18	-35	82FTS ¹³ C	528.794	80.9	-95	-94	-13
PFDA Q	512.847	218.9	-15	-26	-13	82FTS Q	526.794	506.7	-95	-34	-17
PFUnDA	562.823	519.1	-45	-18	-45	102FTS	626.857	606.7	-5	-44	-25
PFUnDA ¹³ C	569.823	525.1	-45	-18	-45	102FTS ¹³ C	632.857	611.8	-5	-44	-25
PFUnDA Q	562.823	268.7	-45	-26	-19	102FTS Q	626.857	81	-5	-140	-11

Compound ID	Q1 m/z	Q3 m/z	DP	CE	CXP	Compound ID	Q1 m/z	Q3 m/z	DP	CE	CXP
PFDoDA	612.844	568.8	-15	-20	-17	MeFOSAA	569.825	418.9	-10	-28	-25
PFDoDA ¹³ C	614.844	569.8	-15	-20	-17	MeFOSAA ¹³ C	572.825	418.9	-10	-28	-25
PFDoDA Q	612.844	318.9	-15	-28	-9	MeFOSAA Q	569.825	511.8	-10	-30	-35
HFPO-DA	284.838	168.9	-10	-12	-11	N-EtFOSAA	583.879	418.9	-10	-30	-1
HFPO-DA ¹³ C	286.838	168.9	-10	-12	-11	N-EtFOSAA ¹³ C	588.879	418.9	-10	-30	-1
HFPO-DA Q	284.838	184.9	-10	-24	-11	N-EtFOSAA Q	583.879	525.8	-10	-30	-11
DONA	376.872	250.9	-10	-16	-17	MeFBSAA	369.611	218.9	-50	-24	-13
DONA Q	376.872	85	-10	-36	-9	MeFBSAA Q	369.611	282.7	-50	-24	-13
FOUEA	456.864	392.9	-40	-18	-19	MeFBSAA-d3	372.898	218.974	-40	-25	-15
PFBS	298.798	79.9	-60	-64	-11	MeFHxSAA	469.876	318.883	-25	-31	-30
PFBS ¹³ C	301.798	79.9	-60	-64	-11	MeFHxSAA Q	469.876	168.911	-25	-32	-52
PFBS Q	298.798	98.9	-60	-36	-17	MeFHxSAA-d3	472.907	382.934	-40	-23	-30
PFPeS	348.84	80	-90	-72	-9	9CIPF3ONS	530.768	350.8	-35	-38	-11
PFPeS Q	348.84	98.9	-90	-40	-15	11CIPF30UdS	630.751	450.9	-80	-40	-21

Performance characteristics

The quality of the analysis is assured by the analysis of procedure blanks and control samples.

In Table A.5, the average values of 41 blanks are presented. In case no signal was detected the result is displayed as "n.d.". The limits of detection (LODs) are calculated by three times the standard deviation or two times the average level of the determined blank values, the highest of those two values was selected. For the compounds that were not detected in the blanks, the LODs are calculated as three times the standard deviation of the measured values in cow milk enriched at the LOD level ($n = 8$).

The recoveries are determined by repeated analysis of two on different levels enriched cow milk samples (12 and 26 ng/l, both $n = 20$). The reproducibility is determined by the data of both samples.

Table A.5 Analysis of procedure blanks and control samples

	Blank values			Level 12 ng/L		Level 26 ng/L	
	Average n = 41 ng/L	LOD ng/L	LOQ ng/L	Recovery n = 20 %	Reproducibility n = 20 %	Recovery n = 20 %	Reproducibility n = 20 %
PFBA	14	33	111	124	18	115	13
PFPeA	0.75	2.2	7.4	96	8	97	6
PFHxA	0.65	2.1	6.9	95	8	98	10
PFHpA	0.5	1	3.3	93	7	96	7
PFOAtotal	0.6	1.5	5				
PFOAlin	0.6	1.5	5	96	7	97	7
PFOAbr	n.d.	1.5	5				
PFNA	0.4	1	3.3	92	6	98	6
PFDA	0.4	1	3.3	91	10	96	10
PFUnDA	0.1	1	3.3	94	12	99	11
PFDoDA	0.2	1	3.3	94	15	96	9
HFPO-DA	0.4	1	3.3	91	6	98	5
DONA	0.3	1.9	6.3	93	16	97	12
8:2FTUCA	n.d.	3.3	11	92	49	80	29
PFBS	0.5	1.1	3.5	94	8	95	8
PFPeS	n.d.	1	3.3	94	9	96	7
PFHxStotal	0.4	1	3.3				
PFHxSlin	0.4	1	3.3	100	10	99	6
PFHxSbr	n.d.	1	3.3				
PFHpS	n.d.	1	3.3	88	9	94	8
PFOStotal	0.6	1.4	4.8				

	Blank values			Level 12 ng/L		Level 26 ng/L	
	Average n = 41 ng/L	LOD ng/L	LOQ ng/L	Recovery n = 20 %	Reproducibility n = 20 %	Recovery n = 20 %	Reproducibility n = 20 %
PFOSlin	0.6	1.4	4.8	107	5	103	7
PFOSbr	n.d.	1.4	4.8				
PFNS	n.d.	1.6	5.3	90	24	96	18
PFDS	n.d.	1.9	6.3	86	25	91	16
4:2FTS	n.d.	1	3.3	84	10	92	7
6:2FTS	2.4	5.5	18	93	19	93	11
8:2FTS	0.2	1.7	5.8	90	15	99	15
10:2FTS	0.8	2.1	6.9	80	14	95	15
MeFOSAA	n.d.	1.3	4.3	89	19	94	12
N-EtFOSAA	n.d.	1.5	5.1	90	15	95	13
MeFBSAA	n.d.	1	3.3	92	11	99	12
MeFHxSAA	n.d.	1	3.3	84	7	94	9
9CIPF3ONS	n.d.	1.3	4.3	84	23	91	21
11CIPF3ODS	n.d.	1.3	4.3	104	20	105	16

Appendix B Resultaten met Upper Bound (UB) scenario

Tabel B.1 Detectiefrequentie en distributie van concentraties van 28 PFAS in moedermelk in de PFAS COVID MILK-POWER MILK studiepopulatie (N = 1629) (eenheid pg/mL moedermelk, UB-scenario).

PFAS ^a	LOD	LOQ	% ≥LOD	% LOD- LOQ	P50	P95	P99
PFPeA	2,2	7,4	5	5	2,2	2,2	7,4
PFHxA	2,1	6,9	4	4	2,1	2,1	6,9
PFHpA	1	3,3	42	34	1,0	4,1	7,6
T-PFOA	1,5	5	100 ^b	11	12	41	82
L-PFOA	1,5	5	100 ^b	11	12	40	79
V-PFOA	1,5	5	12	11	1,5	5,0	5,1
PFNA	1	3,3	93	76	3,3	5,2	12
PFDA	1	3,3	53	46	3,3	3,9	9,2
PFUnDA	1	3,3	27	24	1,0	3,3	4,6
PFDoDA	1	3,3	3	3	1,0	1,0	3,3
PFBS	1,1	3,5	34	30	1,1	3,5	6,6
PFPeS	1	3,3	2	2	1,0	1,0	3,3
T-PFHxS	1	3,3	95	47	3,3	11	23
L-PFHxS	1	3,3	94	51	3,3	10	18
V-PFHxS	1	3,3	19	17	1,0	3,3	4,4
PFHpS	1	3,3	6	6	1,0	3,3	3,3
T-PFOS	1,4	4,8	100	1	19	60	110
L-PFOS	1,4	4,8	100 ^b	2	13	38	81
V-PFOS	1,4	4,8	90	36	5,1	28	63
PFNS	1,6	5,3	0	0	1,6	1,6	1,6
PFDS	1,9	6,3	0	0	1,9	1,9	1,9
HFPO-DA	1	3,3	1	1	1,0	1,0	3,3
DONA	1,9	6,3	0	0	1,9	1,9	1,9
8:2 FTUCA	3,3	11	0 ^c	0 ^c	3,3	3,3	3,3
4:2 FTS	1	3,3	0 ^c	0 ^c	1,0	1,0	1,0
6:2 FTS	5,5	18	2	2	5,5	5,5	18
8:2 FTS	1,7	5,8	0	0	1,7	1,7	1,7
10:2 FTS	2,1	6,9	0	0	2,1	2,1	2,1
MeFBSAA	1	3,3	0 ^c	0 ^c	1,0	1,0	1,0
MeFHxSAA	1	3,3	0	0	1,0	1,0	1,0
MeFOSAA	1,3	4,3	1	1	1,3	1,3	4,3
EtFOSAA	1,5	5,1	0 ^c	0 ^c	1,5	1,5	1,5
9CI-PF3ONS	1,3	4,3	0 ^c	0	1,3	1,3	1,3
11CI-PF3OUdS	1,3	4,3	0 ^c	0 ^c	1,3	1,3	1,3

LOD: detectielimiet, LOQ: kwantificeringslimiet, PFAS: per-en polyfluoralkylstoffen, P50: 50^e percentiel, P95: 95^e percentiel, P99: 99^e percentiel

^a De namen van de PFAS zijn te vinden in Tabel 1

^b Afgerond naar 100, dus n<LOD is niet nul.

^c Afgerond naar nul, dus n is niet nul.

Tabel B.2 Vergelijking van de cumulatieve PFAS-concentratie in moedermelk in de PFAS COVID MILK-POWER MILK studiepopulatie met de risicogrens voor PFAS in moedermelk en de mate van overschrijding (UB-scenario, 2 aanpakken)

	Cumulatieve moedermelk-concentratie (pg/mL)			% monsters boven de risicogrens	Risicokarakteriseringsratio (RCR)		
	P50	P95	P99		P50	P95	P99
Som van EFSA-4 PFAS^a (aanpak 1)	40	110	190	3	0,30	0,82	1,5
Som van 16 PFAS^b in PEQ's (aanpak 2)	130	270	480	48	0,98	2,0	3,6

PEQ: PFOA-equivalenten, PFAS: Per- en polyfluoralkylstoffen, P50: 50^e percentiel, P95: 95^e percentiel, P99: 99^e percentiel

^aCumulatieve concentratie T-PFOA, PFNA, T-PFHxS en T-PFOS gebaseerd op equipotentie

^bCumulatieve concentratie van 16 PFAS in Tabel 2 uitgedrukt als PFOA-equivalenten (PEQ's).

Appendix C Verloop PFAS concentraties in melk gedurende lactatie

De TWI van 4,4 ng/kg lg/week is gebaseerd op een PFAS-concentratie in moedermelk bij de start van borstvoeding ($t = 0$) van 133 pg/mL. Bij de berekeningen van de TWI is uitgegaan van o.a. een afname van de PFOA- en PFNA-concentraties in melk van 7,7% per maand en een afname van PFOS- en PFHxS-concentraties met 3,1% per maand.

Aangezien de melkmonsters in het COVID MILK-POWER MILK cohort zijn genomen op variërende momenten na de bevalling, is overwogen om een correctie te maken voor de mogelijke afname in de melkconcentraties over de tijd. Dit kan op twee manieren worden uitgevoerd: de gemeten de grenswaarde voor melk van 133 pg/mL op $t = 0$ wordt vooruit gerekend in de tijd om zo een tijdsafhankelijke grenswaarde te verkrijgen voor elk moment na de bevalling, of de gemeten concentraties in melk worden teruggerekend naar $t = 0$. In beide gevallen is er een discrepantie tussen de PFAS waarop de grenswaarde is gebaseerd (PFOA, PFNA, PFOS en PFHxS) en de PFAS die zijn gedetecteerd in melk.

Terugrekenen van gemeten concentraties vereist informatie over de concentratieverandering van alle PFAS die in melk zijn aangetroffen. Aangezien deze informatie niet beschikbaar is, vervalt deze optie.

De grenswaarde kan vooruit worden gerekend als de concentratieafname beschikbaar is voor de vier betreffende PFAS. Zoals hieronder beschreven is informatie van PFNA echter niet beschikbaar en laat informatie over PFOA, PFOS en PFHxS een wisselend beeld zien. Tot 1 jaar na bevalling zijn de onderstaande bronnen eenduidig dat er een afname van PFOA is. De afnamesnelheid wisselt echter tussen de studies. Met betrekking tot PFOS en PFHxS is het onduidelijk of er een afname is in het eerste jaar of dat concentraties gelijk blijven. Informatie over trends na het eerste jaar is alleen beschikbaar uit de huidige PFAS COVID MILK-POWER MILK studie en lijkt voor PFOA, PFOS en PFHxS te wijzen op een toename (zie hierna).

Vanwege het gebrek aan eenduidige informatie werd een betrouwbare omrekening van de grenswaarde niet mogelijk geacht en daarmee vervalt ook die optie. Implicaties hiervan zijn beschreven in de discussie (sectie 4.1.3).

Informatie over het verloop van PFAS concentraties gedurende lactatie

De procentuele afname van de PFOA-, PFOS- en PFHxS-concentraties per maand in melk zijn onderzocht in de studies van Thomsen et al. (2010) en Blomberg et al. (2023). Van PFNA zijn geen gegevens beschikbaar die het verloop van de melkconcentratie gedurende de lactatie beschrijven. In de studies van Thomsen et al. en Blomberg et al. werden de melkconcentraties gedurende de lactatie bepaald in

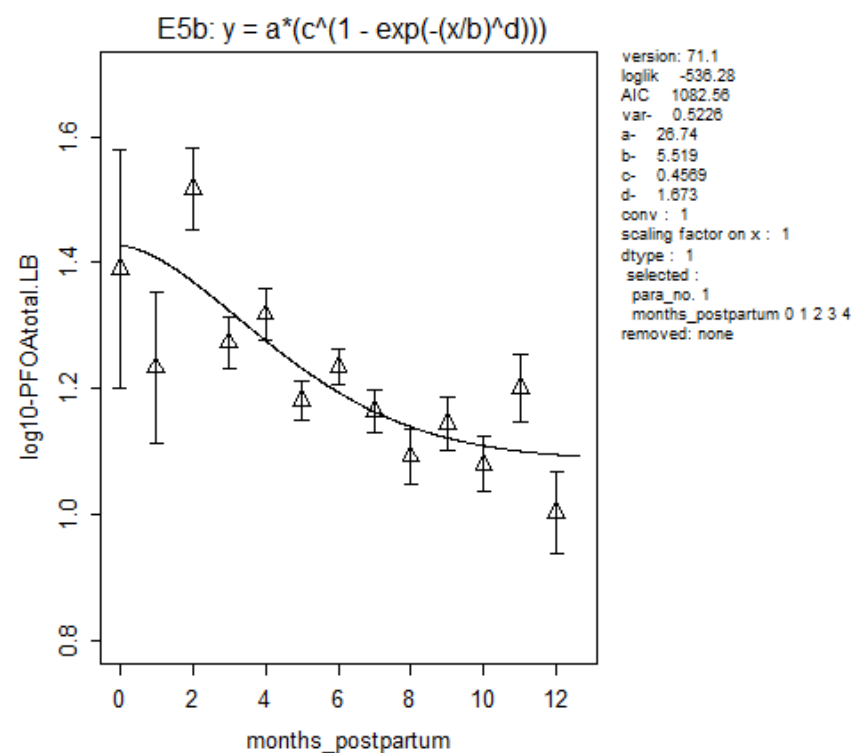
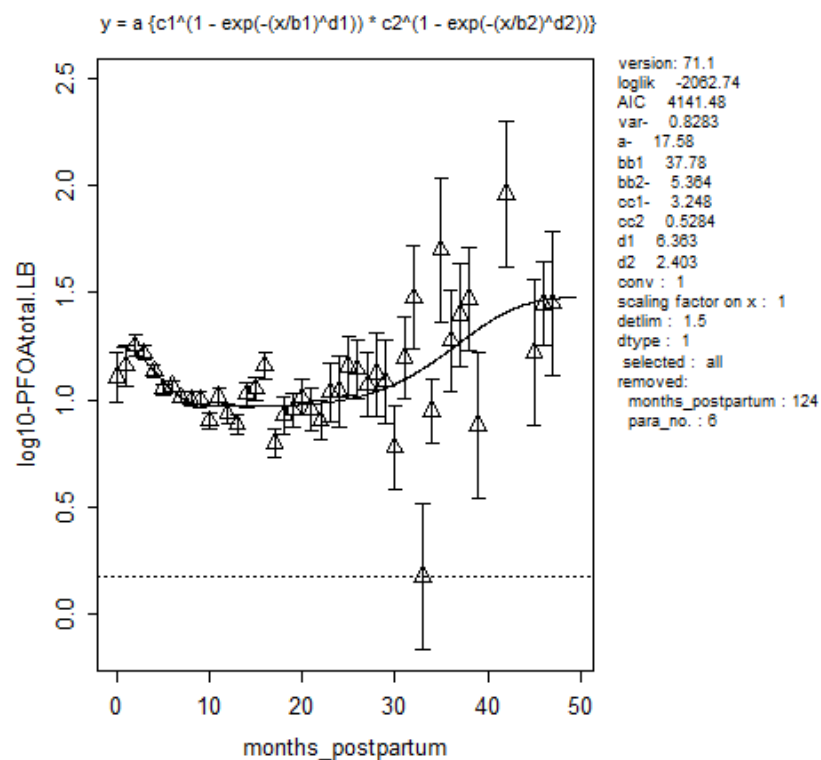
respectievelijk 10 en 11 vrouwen gedurende respectievelijk de eerste 12 en 8 maanden na bevalling. Volgens Thomsen et al. is de afname van PFOA in melk 7,7% en van PFOS 3,1% per maand. Blomberg et al. concluderen dat de PFOA-concentratie het sterkst afnam, met -12% per maand (95% CI: -22%; -1.5%), terwijl PFOS en PFHxS kleine niet-significante afnames lieten zien van respectievelijk -3,2% (-8,4; +2,3) en -2,5% (-9,7; +5,4).

In ons onderzoek worden melkconcentraties niet opgevolgd in de tijd. Wel is er gemonsterd op verschillende (onafhankelijke) momenten tijdens de lactatie (i.e. op verschillende tijdstippen maar in monsters van verschillende individuen). Gezien het grote aantal metingen boven de kwantificatielimiet voor T-PFOA, T-PFOS en T-PFHxS in de melkmonsters, kunnen de gemiddelde concentraties per maand inzicht geven in een eventuele trend in de tijd.

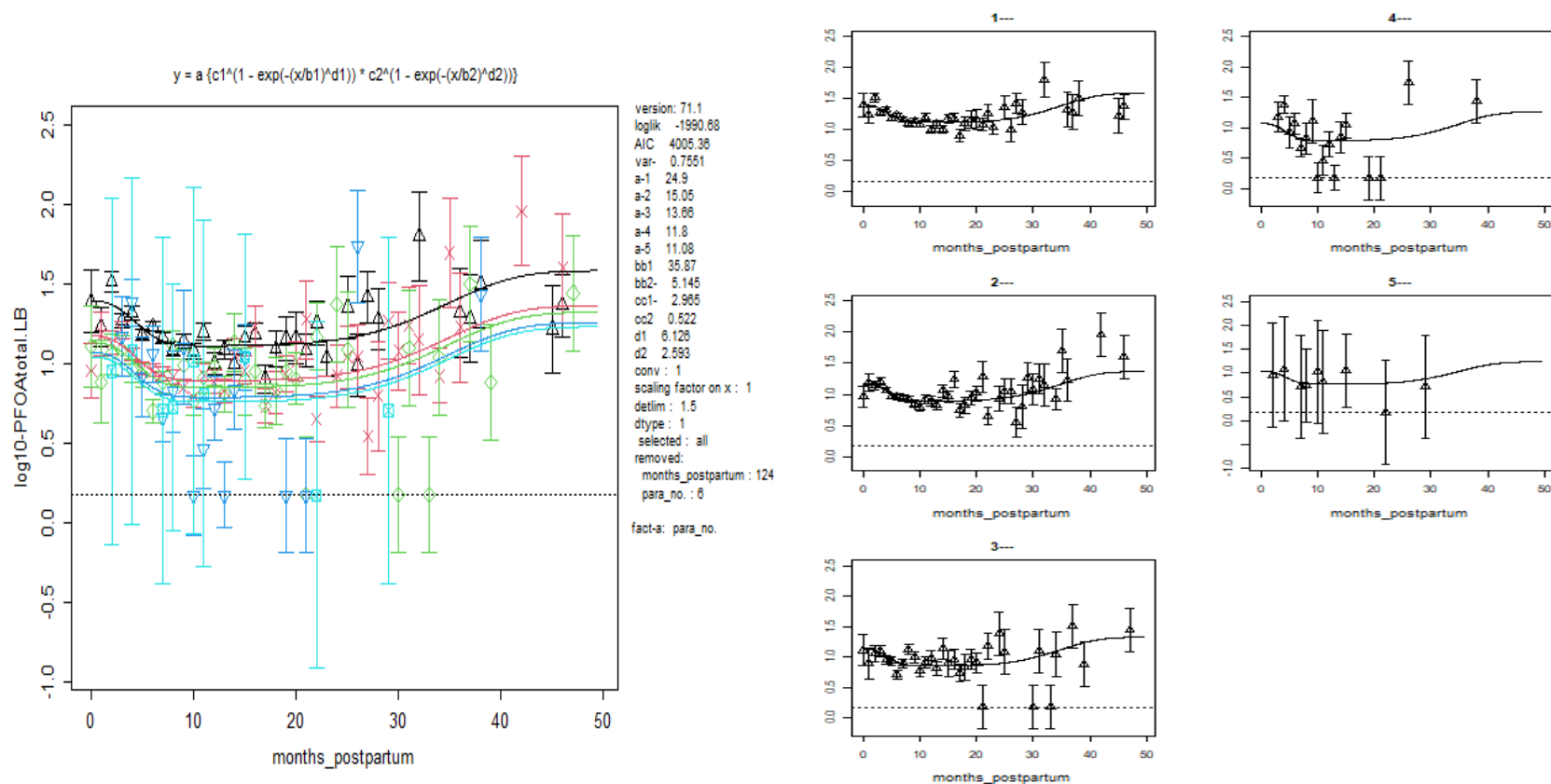
Onderstaande figuren geven deze trends weer. Figuur C.1 toont de log₁₀ mediane T-PFOA-concentratie in melk voor alle monsters van vrouwen met 1^e t/m 5^e kind tot en met maand 50, en concentraties van vrouwen met 1^e kind en alleen in eerste 12 maanden na bevalling. Figuur C.2 toont de log₁₀ mediane T-PFOA-concentratie in melk uitgesplitst voor moeders met een 1^e t/m 5^e kind. Figuren C.3-C.4 en C.5-C.6 tonen dezelfde gegevens voor respectievelijk T-PFOS en T-PFHxS. In alle figuren geven de symbolen de mediane concentratie per maand en de whiskers zijn het 95% betrouwbaarheidsinterval van de mediaan. Betrouwbaarheidsintervallen zijn het kleinst in de periode van 2 tot ~20 maanden aangezien in die periode de meeste monsters per maand beschikbaar zijn. Concentraties van 3 vrouwen die waren bevallen van hun 6^e kind zijn uit de analyse gelaten. Analyses zijn uitgevoerd met PROAST-versie 71.1 (RIVM, 2026).

Overeenkomstig met de bevindingen van Thomsen et al. en Blomberg et al. nemen de gemiddelde T-PFOA-concentraties af gedurende de eerste 12 maanden na de bevalling. De gemiddelde afname in het rechter panel van Figuur C.1 is 6% per maand. Daarna stabiliseert de concentratie en neemt na ongeveer 2 jaar weer toe tot de concentratie voor de bevalling (Figuren C.1 en C.2). Overeenkomstig met de studie van Blomberg et al. lijken de PFOS- en PFHxS-melkconcentraties gelijk te blijven in de eerste 12 tot ~20 maanden. Daarna nemen de concentraties licht toe (Figuren C.3-6). Mogelijk is deze toename te verklaren door een lagere melkproductie en consumptie omdat het kind ook ander voedsel eet. De blootstelling van PFAS aan de moeder blijft doorgaan, waardoor er een nieuw evenwicht tussen inname en uitscheiding gaat ontstaan. Ook de verschillen tussen 1^e t/m 5^e kind kunnen verklaard worden door een lagere lichaamsbelasting van de moeder door uitscheiding bij eerdere kinderen. De data van de vrouwen met 1^e kind bemonsterd t/m 12 maanden (Figuren C.3 en C.5 rechts) werden ook gefit met curves met een toe- en afnemende trend, maar gaven geen significant verbeterde beschrijving van de data.

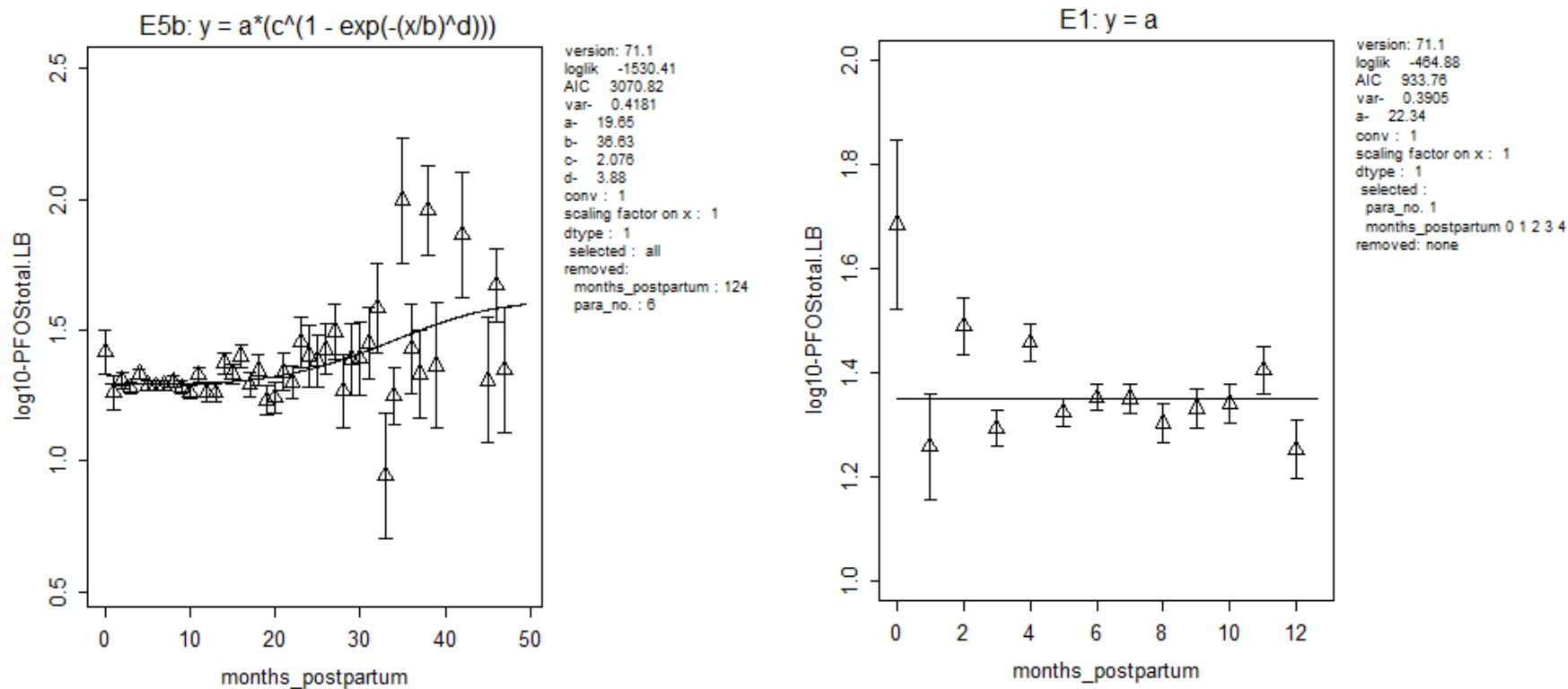
Figuur C.1 Log₁₀ mediane T-PFOA-concentratie in melk (pg/mL; LB-scenario) geplot tegen het moment van monstername (maand postpartum). Whiskers geven het 95% betrouwbaarheidsinterval van de mediaan. De horizontale stippellijn is de detectielimiet. Links: monsters van vrouwen met 1e t/m 5e kind. Rechts: alleen concentraties van vrouwen met 1e kind en alleen in eerste 12 maanden na bevalling.



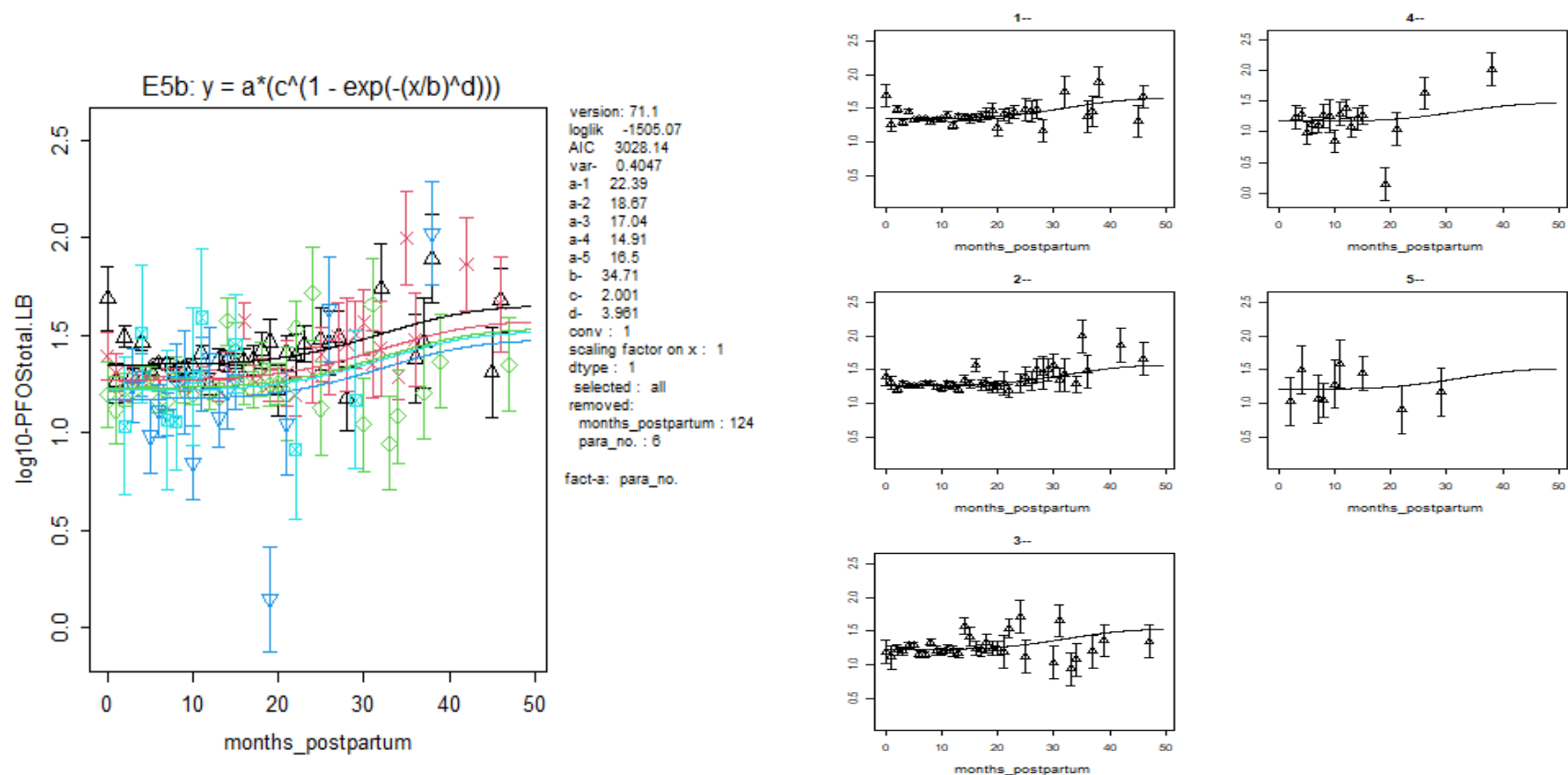
Figuur C.2 Log₁₀ mediane T-PFOA-concentratie in melk (pg/mL; LB-scenario) geplot tegen het moment van monstername (maand postpartum). Whiskers geven het 95% betrouwbaarheidsinterval van de mediaan. De horizontale stippellijn is de detectielimiet. Links: concentraties per hoeveelste kind; zwart = 1^e kind, rood = 2^e kind, groen = 3^e kind, blauw = 4^e kind en cyaanblauw = 5^e kind kind. Rechts: dezelfde datapunten en curves als links, maar in aparte plots, aantal kinderen staat aangegeven boven elke plot



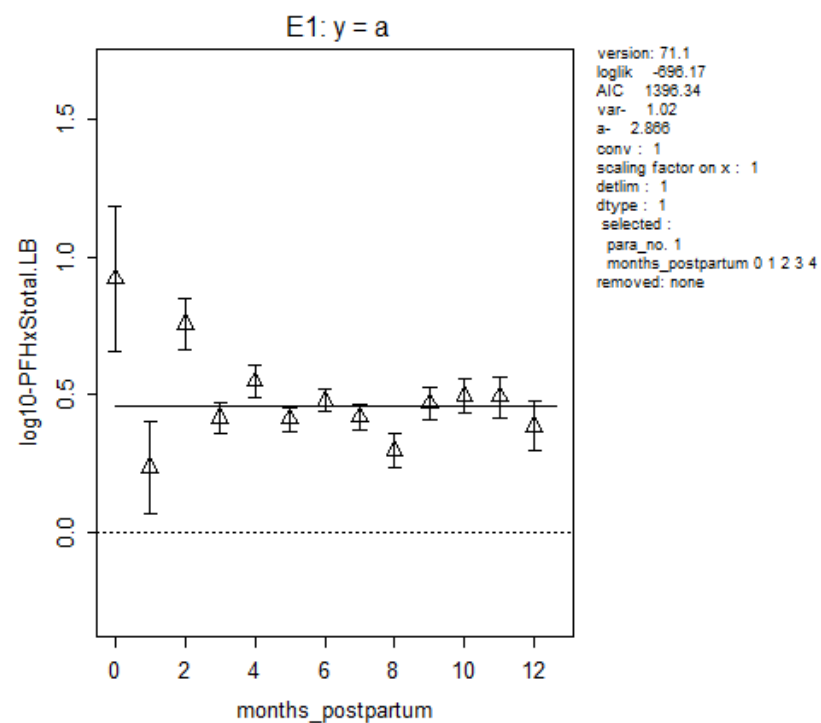
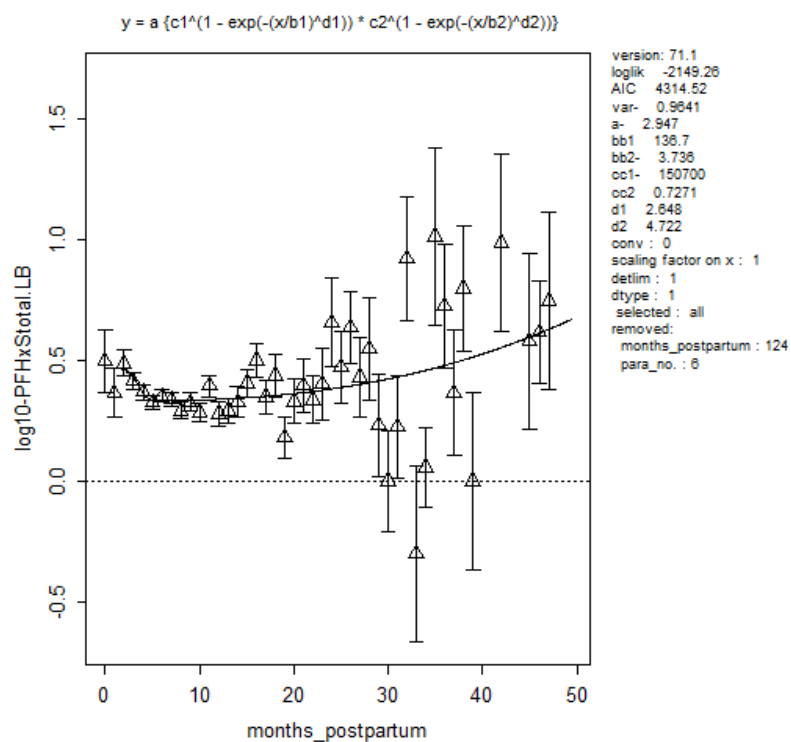
Figuur C.3 Log₁₀ mediane T-PFOS-concentratie in melk (pg/mL; LB-scenario) geplot tegen het moment van monstername (maand postpartum). Whiskers geven het 95% betrouwbaarheidsinterval van de mediaan. Links: monsters van vrouwen met 1e t/m 5e kind. Rechts: alleen concentraties van vrouwen met 1e kind en alleen in eerste 12 maanden na bevalling.



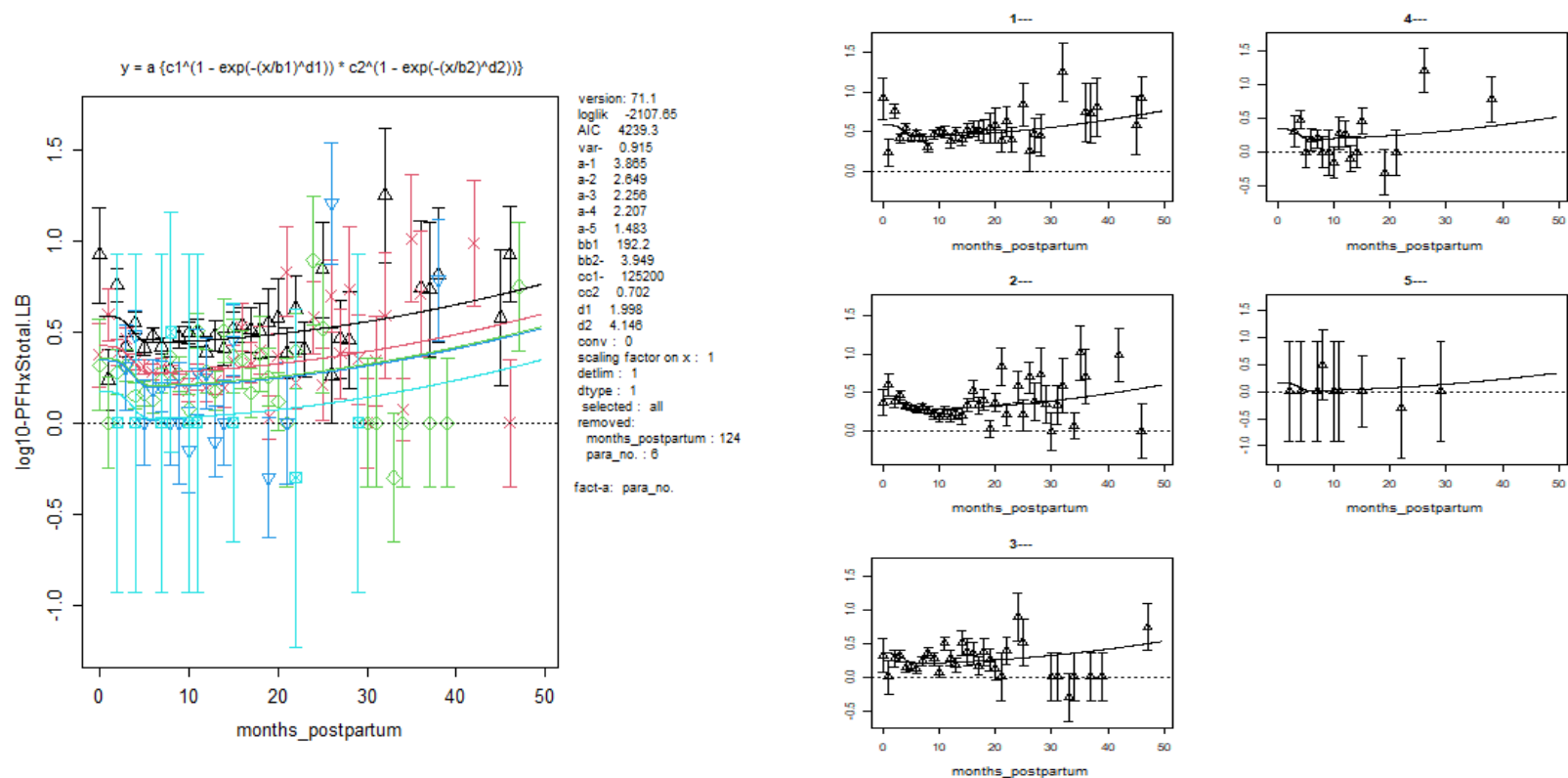
Figuur C.4 Log₁₀ mediane T-PFOS-concentratie in melk (pg/mL; LB-scenario) geplot tegen het moment van monstername (maand postpartum). Whiskers geven het 95% betrouwbaarheidsinterval van de mediaan. De horizontale stippellijn is de detectielimiet. Links: concentraties per hoeveelste kind; zwart = 1^e kind, rood = 2^e kind, groen = 3^e kind, blauw = 4^e kind en cyaanblauw = 5^e kind. Rechts: dezelfde datapunten en curves als links, maar in aparte plots, aantal kinderen staat aangegeven boven elke plot.



Figuur C.5 Log₁₀ mediane T-PFHxS-concentratie in melk (pg/mL; LB-scenario) geplot tegen het moment van monsternamen (maand postpartum). Whiskers geven het 95% betrouwbaarheidsinterval van de mediaan. De horizontale stippellijn is de detectielimiet. Links: monsters van vrouwen met 1e t/m 5e kind. Rechts: alleen concentraties van vrouwen met 1e kind en alleen in eerste 12 maanden na bevalling.



Figuur C.6 Log₁₀ mediane T-PFHxS-concentratie in melk (pg/mL; LB-scenario) geplot tegen het moment van monsternamen (maand postpartum). Whiskers geven het 95% betrouwbaarheidsinterval van de mediaan. De horizontale stippellijn is de detectielimiet. Links: concentraties per hoeveelste kind; zwart = 1^e kind, rood = 2^e kind, groen = 3^e kind, blauw = 4^e kind en cyaanblauw = 5^e kind. Rechts: dezelfde datapunten en curves als links, maar in aparte plots, aantal kinderen staat aangegeven boven elke plot.



Appendix D Vergelijking van PFAS-concentraties in moedermelk in deze studie met andere studies in Nederland en Europa

Tabel D.1 Vergelijking van PFAS-concentraties in moedermelk in deze studie en andere studies in Nederland

	Deze studie (LB-scenario)		Zeilmaker et al. (2020)	Fiedler et al. (2022)	Van Beijsterveldt et al. (2022)
Monster afname	2020-2021		2014	2014	2013-2018
Aantal monsters	1629	622\$	1*	1*	97-123
Primi- of multipara	multipara	primipara	primipara	primipara	multipara
Eenheid	pg/mL	pg/mL	pg/mL	pg/g	pg/mL
PFAS	P50	AM			P50
PFBA	<111	<111	NA	<6,2	NA
PFPeA	<7,4	<7,4	<30	<6,2	NA
PFHxA	<6,9	<6,9	<50	<6,2	NA
PFHpA	<3,3	<3,3	<20	<6,2	NA
T-PFOA	12	21	NA	NA	43
L-PFOA	12	20	<80	57,8	41
V-PFOA	<5,0	<5,0	NA	NA	NA
PFNA	<3,3	<3,3	<25	17,5	<LOQ
PFDA	<3,3	<3,3	<50	<6,2	<LOQ
PFUnDA	<3,3	<3,3	<50	6,2	NA
PFDoDA	<3,3	<3,3	NA	<6,2	NA
PFTTrDA	NA	NA	NA	<6,2	NA
PFTeDA	NA	NA	NA	<6,2	NA
PFBS	<3,5	<3,5	<200	<5	NA
PFPeS	<3,3	<3,3	NA	NA	NA
T-PFHxS	<3,3	4,7	NA	NA	<LOQ
L-PFHxS	<3,3	4,3	11	8,31	<LOQ
V-PFHxS	<3,3	<3,3	NA	NA	NA
PFHpS	<3,3	<3,3	NA	NA	NA
T-PFOS	19	28	NA	43	35
L-PFOS	13	19	45	28,8	23
V-PFOS	5,1	9,0	NA	14,1	NA
PFNS	<5,3	<5,3	NA	NA	NA
PFDS	<6,3	<6,3	<50	<6,2	NA
HFPO-DA	<3,3	<3,3	NA	NA	NA
DONA	<6,3	<6,3	NA	NA	NA
8:2 FTUCA	<11	<11	NA	NA	NA
4:2 FTS	<3,3	<3,3	NA	NA	NA
6:2 FTS	<18	<18	NA	NA	NA
8:2 FTS	<5,8	<5,8	NA	NA	NA
10:2 FTS	<6,9	<6,9	NA	NA	NA
MeFBSAA	<3,3	<3,3	NA	NA	NA
MeFHxSAA	<3,3	<3,3	NA	NA	NA
MeFOSAA	<4,3	<4,3	NA	NA	NA

	Deze studie (LB-scenario)		Zeilmaker et al. (2020)	Fiedler et al. (2022)	Van Beijsterveldt et al. (2022)
Monster afname	2020-2021		2014	2014	2013-2018
Aantal monsters	1629	622 ^{\$}	1*	1*	97-123
Primi- of multipara	multipara	primipara	primipara	primipara	multipara
Eenheid	pg/mL	pg/mL	pg/mL	pg/g	pg/mL
EtFOSAA	<5,1	<5,1	NA	NA	NA
9CI-PF3ONS	<4,3	<4,3	NA	NA	NA
11CI-PF3OUdS	<4,3	<4,3	NA	NA	NA

AM = aritmetisch gemiddelde, NA = not available (niet beschikbaar), PFAS = per- en polyfluoralkylstoffen, P50 = 50^e percentiel

* Betreft hetzelfde gepoolde monster van 50 primiparae, waarin PFAS is bepaald met verschil in analytische gevoeligheid

^{\$} Subset van de PFAS COVID MILK-POWER MILK studiepopulatie met alleen primiparae
'<' toont method detection limit (MLD) voor Zeilmaker et al. (2020) en toont LOQ voor deze studie en voor Fiedler et al. (2022)

Tabel D.2 Vergelijking van de concentratie PFAS in moedermelk van primipara in de huidige studie, West-Europa, Centraal-Europa en individuele deelnemende landen van West-Europa in de UNEP/WHO Human Milk Survey

	Deze studie (LB)	Fiedler et al. (2022)									
Monster afname (jaar)	2020-2021	2014	2016	2015	2019	2019	2019	2019	2016	2014-2019	2009-2019
Aantal monsters	622	1*	1*	1*	1*	1*	1*	1*	1*	8*	12*
Land/regio	NL	NL	AUT	BE	DEU_NS	DEU_SH	IRL	SWE	CHE	WEOG	CCE
Eenheid	pg/mL	pg/g	pg/g	pg/g	pg/g	pg/g	pg/g	pg/g	pg/g	pg/g	pg/g
PFAS	AM									AM	AM
PFBA	<111	<6,2	7,7	<6,2	10,1	8,9	7,1	<6,2	<6,2	4,23	32,3
PFPeA	<7,4	<6,2	<6,2	<6,2	<6,2	<6,2	<6,2	<6,2	<6,2	NA	0,791
PFHxA	<6,9	<6,2	<6,2	<6,2	<6,2	<6,2	<6,2	<6,2	<6,2	NA	8,07
PFHpA	<3,3	<6,2	<6,2	<6,2	<6,2	<6,2	<6,2	<6,2	<6,2	NA	NA
T-PFOA	21	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
L-PFOA	20	57,8	33,4	19,9	18,3	17,7	33,4	37,4	35,3	31,7	30,6
V-PFOA	<5,0	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
PFNA	<3,3	17,5	<6,2	7,9	<6,2	<6,2	<6,2	<6,2	<6,2	3,18	5,57
PFDA	<3,3	<6,2	<6,2	<6,2	<6,2	<6,2	<6,2	<6,2	<6,2	NA	NA
PFUnDA	<3,3	6,2	<6,2	<6,2	<6,2	<6,2	<6,2	<6,2	<6,2	0,775	0,599
PFDoDA	<3,3	<6,2	<6,2	<6,2	<6,2	<6,2	<6,2	<6,2	<6,2	NA	NA
PFTTrDA	NA	<6,2	<6,2	<6,2	<6,2	<6,2	<6,2	<6,2	<6,2	NA	NA
PFTeDA	NA	<6,2	<6,2	<6,2	<6,2	<6,2	<6,2	<6,2	<6,2	NA	NA
PFBS	<3,5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	NA	NA
PFPeS	<3,3	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
T-PFHxS	4,7	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
L-PFHxS	4,3	8,31	<5,5	<5,5	<5,5	<5,5	<5,5	17,4	8,49	4,28	2,37
V-PFHxS	<3,3	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
PFHpS	<3,3	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
T-PFOS	28	43	19,7	28,9	15,9	19,7	13,5	31,2	51,4	27,9	36,4
L-PFOS	19	28,8	15,3	22,4	13,3	15,4	10,5	20,8	36,3	20,4	28,4
V-PFOS	9,0	14,1	4,46	6,45	2,6	4,28	3,04	10,4	15,1	7,56	7,97
PFNS	<5,3	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
PFDS	<6,3	<6,2	<6,2	<6,2	<6,2	<6,2	<6,2	<6,2	<6,2	NA	NA
HFPO-DA	<3,3	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
DONA	<6,3	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
8:2 FTUCA	<11	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
4:2 FTS	<3,3	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
6:2 FTS	<18	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
8:2 FTS	<5,8	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
10:2 FTS	<6,9	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
MeFBSAA	<3,3	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
MeFHxSAA	<3,3	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
MeFOSAA	<4,3	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
EtFOSAA	<5,1	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
9CI-PF3ONS	<4,3	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
11CI-PF3OUdS	<4,3	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA

AM = aritmetisch gemiddelde; AUT = Oostenrijk; BE = België; CCE = Centraal-Europa;
CHE = Zwitserland; DEU = Duitsland; IRL = Ierland; NA = not available (niet
beschikbaar); NL = Nederland; NS = Niedersachsen; PFAS = per- en polyfluoralkylstoffen;
SH = Schleswig-Holstein; SWE = Zweden; WEOG = West-Europa en Andere Regio's.

* Betreft hetzelfde gepoolde monster van 5

* Betreft gepoolde monsters van individuen uit hetzelfde land.

'<' toont LOQ voor deze studie en voor Fiedler et al. (2022)

Dit is een uitgave van:

**Rijksinstituut voor Volksgezondheid
en Milieu**

Postbus 1 | 3720 BA Bilthoven
www.rivm.nl

juni 2026

De zorg voor morgen
begint vandaag