

Interpretatie van percentielen en betrouwbaarheidsintervallen in blootstellingsmodellen

TNO2026 R10383 – 17 februari 2026

Interpretatie van percentielen en betrouwbaarheidsintervallen in blootstellingsmodellen

Auteurs	M. Birza S. Spaan T. Krone R. Franken
Rubricering rapport	TNO Public
Titel	TNO Public
Rapporttekst	TNO Public
Aantal pagina's	16 (excl. voor- en achterblad)
Aantal bijlagen	0

Alle rechten voorbehouden

Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van TNO.

© 2026 TNO

Inhoudsopgave

1.	Inleiding.....	4
2.	Methode	5
3.	Resultaten	6
4.	Conclusie	13
5.	Literatuur.....	14
6.	Ondertekening	16

1. Inleiding

In Nederland maken veel bedrijven en adviseurs gebruik van zgn. rekenmodellen om de blootstelling aan gevaarlijke stoffen op een betrouwbare manier te schatten. De Arbeidsinspectie beschouwt dergelijke rekenmodellen als een goed alternatief voor het uitvoeren van blootstellingsmetingen, die voldoet aan de stand van de wetenschap conform EN689. Hierbij geldt uiteraard wel als voorwaarde dat het gebruikte model wordt toegepast binnen het geldende toepassingsdomein, zoals bepaald door de modelontwikkelaars, en dat het model op de juiste wijze wordt toegepast, en is gevalideerd. De bekendste en meest toegepaste modellen zijn ECETOC-TRA, Stoffenmanager en the Advanced REACH Tool (ART). Daarnaast zijn er ontwikkelaars van praktische tools die een of meer van deze modellen in hun eigen tool hebben verwerkt (Chemrade, Toxic).

Blootstellingsmodellen kunnen worden gebruikt om in te schatten in welke mate werknemers worden blootgesteld aan gevaarlijke stoffen en om deze geschatte waarden te vergelijken met de grenswaarden om veilig gebruik aan te tonen. Welk blootstellingsmodel en welk percentiel wordt gebruikt is afhankelijk van het doel van de blootstellingsschatting. De keuzes die hierbij worden gemaakt, bepalen in belangrijke mate de uitkomst en dus de interpretatie van de geschatte blootstelling.

Onder deskundigen (arbeidshygiënist) in Nederland is een discussie ontstaan over wat bij toepassing van deze modellen de juiste keuze van de percentielwaarde is (indien een keuze mogelijk is in het model) die bij het schatten van de blootstelling wordt gebruikt.

1.1 Doelstelling en onderzoeksvraag

Het doel van dit onderzoek is het opstellen van een gedegen en (inter)nationaal gedragen advies over het vaststellen van de juiste uitkomstmaat en gebruik van percentielen bij het toepassen van rekenmodellen.

Om een dergelijk advies op te kunnen stellen zullen de volgende deelvragen worden onderzocht:

- 1) Wat representeert het percentiel (van metingen en modeluitkomsten) en hoe verhoudt dat zich tot de verwachte blootstelling van een werknemer?
- 2) Welke percentielen worden momenteel:
 - a. Aangeboden door de verschillende rekenmodellen?
 - b. Gehanteerd door andere blootstellingsexperts / modelontwikkelaars binnen Nederland en Europa?
- 3) Wat zijn overwegingen om een bepaald percentiel wel of niet te gebruiken?
- 4) Is het mogelijk consensus te krijgen over het gebruik van een geharmoniseerde uitkomstmaat (bepaald percentiel) voor de meest gebruikte blootstellingsmodellen?

Dit onderzoek is in twee delen opgesplitst. De huidige notitie richt zich op het beantwoorden van de eerste drie deelvragen op basis van desk research. (Inter)nationale consensus over het gebruik van percentielen bij het schatten van blootstelling valt buiten de scope van deze notitie.

2. Methode

Om bovenstaande deelvragen te beantwoorden is desk research uitgevoerd, waarbij zowel de literatuur als de grijze literatuur geraadpleegd is. Daarnaast zijn de antwoorden op de deelvragen getoetst bij collega's met een brede ervaring in zowel arbeidshygiëne, statistische analyse, en kennis met betrekking tot modelontwikkelingen en -validatie. Dit hebben we gedaan door middel van een brainstorm en review van deze notitie. Binnen de notitie hebben we ons voornamelijk op de standaard REACH modellen ECETOC TRA, Stoffenmanager en ART gericht.

3. Resultaten

3.1 Toepassingsdomein blootstellingsmodellen

Blootstellingsmodellen hebben ieder een specifiek toepassingsdomein en beperkingen, bijvoorbeeld met betrekking tot de blootstellingroute of de fysisch-chemische eigenschappen van de stoffen waarvoor een blootstellingsschatting kan worden gemaakt. Daarnaast verschilt per model of de gebruiker een percentiel kan kiezen en of er een betrouwbaarheidsinterval wordt weergegeven. Deze verschillen bepalen niet alleen de technische mogelijkheden van een model, maar hebben ook invloed op de mate waarin onzekerheid expliciet wordt gemaakt in de uiteindelijke blootstellingsschatting.

ECETOC TRA is bedoeld als eenvoudig screeningsmodel. Het is beschreven in een reeks technische rapporten (ECETOC, 2004, 2009, 2012, 2014). Het model vraagt relatief weinig invoer en geeft een relatief hoge schatting van blootstellingen, die beoogt is overeen te komen met het 75^e percentiel, geschikt voor eerste beoordelingen. (Marquart et al., 2017). De onzekerheid rondom deze schatting wordt daarbij niet expliciet gekwantificeerd, maar is impliciet vervat in de aannames en conservatieve keuzes binnen het model.

Stoffenmanager is complexer in gebruik, omdat meer variabelen moeten worden ingevoerd om tot een blootstellingsschatting te komen. Het model is gekalibreerd met behulp van de resultaten van blootstellingsmetingen, waardoor de variatie in blootstelling beter wordt meegenomen. Op basis hiervan kan Stoffenmanager meerdere percentielen berekenen: de mediaan, het 75^e, 90^e en 95^e percentiel, waarbij in eerste instantie standaard het 90^e getoond wordt (Tielemans et al., 2008). Hierdoor krijgt de gebruiker meer flexibiliteit in het gekozen beschermingsniveau, terwijl de onzekerheid in de schatting nog steeds impliciet blijft.

De Advanced REACH Tool (ART) is het meest uitgebreide model. Bij het gebruik van ART moeten nog meer variabelen worden ingevoerd en het model is net als Stoffenmanager gekalibreerd op meetgegevens, met als verschil dat ART een betrouwbaarheidsinterval berekent per schatting. Hierdoor kunnen gebruikers niet alleen verschillende percentielen schatten (mediaan, 75^e, 90^e, 95^e en 99^e), maar ook een betrouwbaarheidsinterval kiezen rondom het percentiel (50, 80, 90 of 95%) (Schinkel et al., 2011; McNally et al., 2014). ART maakt daarmee onzekerheid expliciet zichtbaar. Het uiteindelijke beschermingsniveau wordt hierdoor niet alleen bepaald door het model zelf, maar in belangrijke mate door de keuze van percentiel en betrouwbaarheidsinterval door de gebruiker.

Er zijn verschillende aspecten die meespelen bij de keuze van het blootstellingsmodel. Er kan gebruik gemaakt worden van de zogenoemde “tiered approach” waarbij eerst simpele screening modellen gebruikt worden. Indien de inschatting onder de grenswaarde is, is veilig gebruik aangetoond omdat dergelijke modellen een hoge schatting van de blootstelling geeft. Indien de blootstelling boven de grenswaarde uitkomt heeft de gebruiker de keus om of een hoger tier model in te zetten om een nauwkeurigere schatting te berekenen, of metingen te verrichten volgens de NEN-EN 689. Deze methode wordt veel binnen REACH dossiers toegepast, maar ook door arbeidshygiënist.

De tiered approach wordt vaak geïnterpreteerd als een opeenvolging van steeds minder conservatieve modellen. In de praktijk is deze aanname echter niet altijd geldig. Hogere-tier modellen maken meer keuzes expliciet, zoals het gekozen percentiel en de mate van onzekerheid. Afhankelijk van deze keuzes kan een hoger-tier model leiden tot vergelijkbare of zelfs hogere blootstellingsschattingen dan een eenvoudiger screeningsmodel.

Naast deze zogenoemde tiered approach kunnen gebruikers gelijk al kiezen voor de hogere tier modellen, bijvoorbeeld wanneer ze al voldoende gedetailleerde informatie over de werkplaats hebben welke nodig is om de model parameters in te vullen. In dat geval verschuift de nadruk van het

reduceren van conservatisme (hogere schattingen) naar het expliciet maken en onderbouwen van onzekerheid.

De mogelijkheid om te kiezen tussen percentielen en betrouwbaarheidsintervallen betekent dat gebruikers verschillende niveaus van voorzichtigheid kunnen toepassen binnen één model. Het is minder zinvol om modellen onderling te vergelijken op de schattingen. Dit geldt ook voor het onderling vergelijken van specifieke percentielkeuzes of combinaties van percentielen en betrouwbaarheidsintervallen tussen modellen. Zo is het niet zinvol om bijvoorbeeld een 90e percentiel in Stoffenmanager rechtstreeks gelijk te stellen aan een bepaalde combinatie van percentiel en betrouwbaarheidsinterval in ART. Hoewel beide modellen gebruikmaken van meetgegevens voor kalibratie, verschillen zij fundamenteel in modelstructuur, onderliggende aannames, wijze van kalibratie en de manier waarop variatie en onzekerheid worden beschreven. Belangrijker is of modellen in de praktijk doen wat ze beloven. Dit wordt onderzocht in validatiestudies, waarin modelschattingen worden vergeleken met meetgegevens. In deze validatiestudies wordt vaak gekeken naar het 90e percentiel: daarbij mag maximaal 10% van de meetresultaten hoger uitvallen dan de modelschatting. Voor ECETOC TRA, dat het 75e percentiel schat, geldt dat maximaal 25% van de meetresultaten boven de modelschatting mag liggen. Het bespreken van de resultaten van validatiestudies valt buiten de scope van deze notitie. Enkele voorbeelden van dergelijke studies zijn Hofstetter et al. (2013), Lamb et al. (2015), Lee et al. (2019) en Franken et al. (2023). Uitgangspunt voor deze notitie is dat de modellen binnen hun toepassingsdomein geschikt zijn en dit onderzoek is gericht op hoe je met deze uitkomsten kan omgaan.

Een overzicht van deze drie modellen, hun toepassingsdomein en keuzes in percentielen en betrouwbaarheidsintervallen is weergegeven in tabel 1.

Tabel 1: Samenvatting van het toepassingsdomein van toegepaste modellen

	ECETOC TRA		Stoffenmanager	ART
Blootstelling via inhalatie en/of dermale route	Inhalatie en dermaal		Inhalatie	Inhalatie
Fysische staat te beoordelen stof, binnen het toepassingsdomein	Vaste stoffen Vluchtige vloeistoffen		Vaste stoffen Vloeistoffen	Poeders, granulen of pallets Vaste objecten Vloeistoffen Poeders opgelost in vloeistoffen
Buiten het toepassingsdomein	Inhalatie ☐ Vezels ☐ Aerosol mist ☐ Emissie van hete processen (o.a. dampen) ☐ Gassen ☐ Vaste stoffen in vloeistof ☐ Voorzichtigheid bij het toepassen in geval van carcinogene, mutagene en reprotoxische (CMR) stoffen en zeer hoge hazard stoffen	Dermaal ☐ Vezels ☐ Vloeibare aerosolen ☐ emissie van hete processen (o.a. dampen) ☐ Voorzichtigheid bij het toepassen in geval van CMR stoffen en zeer hoge hazard stoffen	Inhalatie ☐ Vezels ☐ Gassen ☐ Hete werk technieken (zoals lassen, solderen, zuur dampen)	Inhalatie ☐ Emissie die vrijkomt tijdens hete metallurgische processen ☐ Vezels ☐ Gassen Geen correctiefactor voor adembescherming over de geschatte concentratie
Aangeboden percentielen / betrouwbaarheidsinterval	75-percentiel		50 ^e (mediaan), 75 ^e , 90 ^e en 95 ^e percentiel mogelijk. 90 ^e percentiel is de standaard ingestelde waarde. Modelonzekerheid wordt meegenomen in de berekening van de percentielen	50 ^e (mediaan), 75 ^e , 90 ^e , 95 ^e en 99 ^e percentiel mogelijk. Daarnaast wordt een betrouwbaarheidsinterval rondom de percentielwaarde weergegeven, met keuze uit interkwartiel (50%), 80%, 90% en 95%.

3.2 Distributie resultaten blootstellingsmetingen

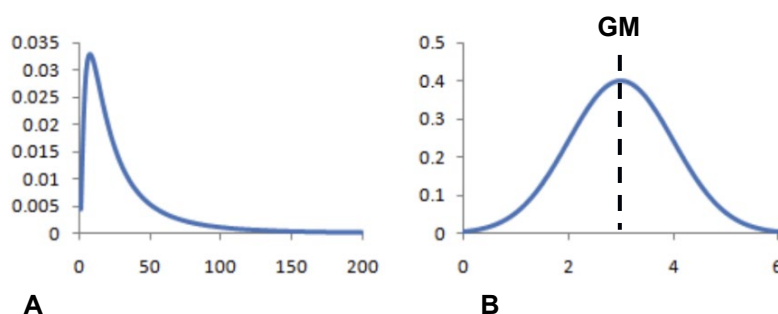
Blootstelling aan gevaarlijke stoffen op de werkvloer kan sterk variëren tussen personen en bedrijven en over de tijd (binnen personen), zelfs wanneer dezelfde stof en activiteit bemeten wordt. Deze variabiliteit kan veroorzaakt worden door verschillende factoren, zoals hoe het werk wordt uitgevoerd, hoeveel van een stof wordt gebruikt, omstandigheden op de werkplek, hoe goed beheersmaatregelen (zoals afzuiging) werken of toegepast worden, of machines goed worden onderhouden, en verschillen in gedrag tussen werknemers. De variabiliteit in gemeten blootstellingsniveaus wordt weerspiegeld door de spreiding en distributie van de resultaten van individuele metingen.

Om deze spreiding in kaart te brengen en te kwantificeren, maken we gebruik van de verdeling van deze scores en linken we die aan een bestaande vorm, zoals een lognormale (figuur 1a) of normaal (figuur 1b) verdeling. Blootstellingsdata volgt vaak een lognormale verdeling, met het zwaartepunt bij lage blootstellingsniveaus en enkele uitschieters naar boven. Lognormale verdelingen zijn door hun asymmetrie en wiskundige eigenschappen lastiger te gebruiken binnen de statistiek. Zodoende wordt deze data vaak ge-log transformeert wat een normale verdeling oplevert.

Karakterisatie van deze verdelingen gaat uit van een verwachte waarde, waar 50% van de metingen onder en 50% van de metingen boven zit, en een standaarddeviatie, welke de spreiding van de data rond deze waarde aangeeft. Binnen de lognormale verdeling noemen we dit het geometrisch gemiddelde (GM) en de geometrische standaarddeviatie (GSD), binnen de normale verdeling het (rekenkundig) gemiddelde (AM) en de standaarddeviatie (SD).

Lognormaal

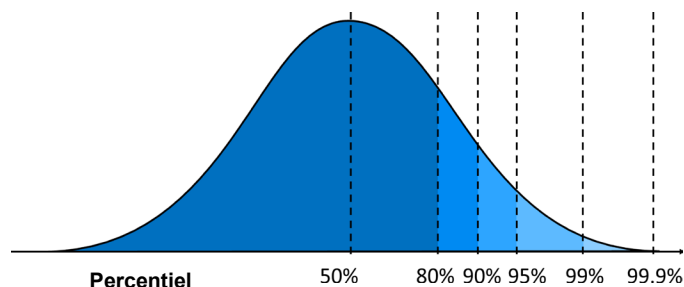
Normaal



Figuur 1: lognormale (A) en normale (B) verdeling

Percentielen

Een percentiel geeft aan welk percentage van de individuele datapunten gelijk zijn aan of lager liggen dan die specifieke waarde (figuur 2). Bijvoorbeeld, als het 90^e percentiel van gemeten blootstellingsniveaus aan stof X op 10 mg/m³ ligt, dan betekent dit dat 90% van de meetresultaten op of onder de 10 mg/m³ ligt, en 10% van de meetresultaten boven de 10 mg/m³ ligt.



Figuur 2: Voorbeeld verschillende percentielen van de distributie van blootstelling

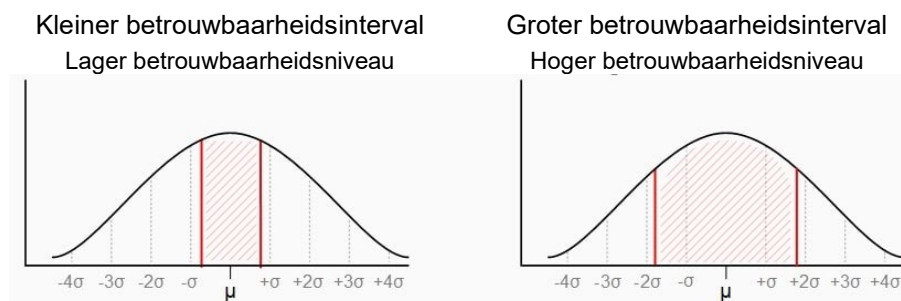
3.3 Betrouwbaarheidsintervallen

Bij het schatten van een blootstelling kan een betrouwbaarheidsinterval (BHI) worden berekend rondom de schatting. Dit interval geeft een bereik aan (met een onder- en bovengrens) waarbinnen de werkelijke waarde waarschijnlijk ligt. In het geval van blootstellingsmetingen wordt dit bereik afgeleid uit de steekproef. De breedte van het interval hangt onder andere samen met de variatie in de data (de standaarddeviatie, σ): hoe minder spreiding in de data rondom de schatting, hoe smaller het interval, en dus hoe preciezer de schatting.

Een 95%-BHI rond een geschatte waarde, bijvoorbeeld het 90e percentiel, betekent dat wanneer dezelfde metingen herhaald zouden worden op vergelijkbare groepen werknemers, de berekende percentielwaarde in 95% van deze herhalingen de werkelijke percentielwaarde bevat. Dit kan worden geïnterpreteerd als een 95% zekerheid dat de werkelijke 90^{ste} percentielwaarde binnen het gegeven 95% BHI ligt.

Belangrijk hierbij is de afweging tussen zekerheid en bruikbaarheid. Een 99%-BI geeft meer zekerheid dat de werkelijke waarde in het interval ligt, maar het interval zelf wordt breder. Dat levert dus meer zekerheid op, maar maakt de uitkomst minder praktisch voor besluitvorming. Een te breed interval zegt immers weinig: je weet bijna zeker dat de waarde erin zit, maar het bereik kan zowel 'veilig' als 'zorgwekkend' omvatten.

Een voorbeeld: stel dat het 90e percentiel van gemeten blootstellingsniveaus aan stof X wordt geschat op 10 mg/m³. Het 95%-BI loopt dan van 8 tot 12 mg/m³, terwijl het 99%-BI van 6 tot 14 mg/m³ loopt. Uit het 99%-BI kun je met meer zekerheid stellen dat de waarde binnen het interval ligt, maar door de grotere spreiding neemt de bruikbaarheid van de schatting af.



Figuur 3: Voorbeeld betrouwbaarheidsintervallen waarbij μ de centrale waarde en σ de standaard deviatie

3.4 Overwegingen voor de keuze van een percentiel voor een blootstellingsschatting

Bij de keuze van een model, een percentielwaarde en eventueel een betrouwbaarheidsinterval is het onder andere belangrijk om het doel van de blootstellingsbeoordeling voor ogen te houden. Afhankelijk van het doel van de schatting is namelijk een bepaalde mate van voorzichtigheid gewenst. Tabel 2 geeft een overzicht van de verschillende opties en bijbehorende overwegingen.

Tabel 2: Overzicht percentielen, wanneer deze het best toegepast kunnen worden en de overwegingen

Percentiel	Wanneer toepassen	Overwegingen
50 ^{ste} percentiel (GM)	Voor beschrijven van typische blootstellingsniveaus of vergelijking tussen groepen	Geeft beeld van de gemiddelde situatie maar onderschat mogelijk de hogere waarden binnen een groep waardoor het GM minder geschikt is voor toetsing aan de grenswaarden
75 ^e percentiel	Voor screening of trendanalyse geeft het 75 percentiel een goed beeld van de "hogere" waarden zonder rekening te houden met de extreme waarden	Te gebruiken als bovengrens van typische blootstellingen, biedt balans tussen representativiteit en een zekere mate van voorzichtigheid, maar meestal niet toereikend voor toetsing aan grenswaarden.
90 ^e percentiel	Aanbevolen binnen REACH voor toetsen aan de grenswaarden	Betrouwbare conservatieve schatting zonder overdreven streng te zijn
95 ^e percentiel	Wanneer je meer zekerheid wilt dat er geen overschrijding is	Zeer voorzichtig, maar kan leiden tot hoge schattingen en kan leiden onnodig gebruik van beschermingsmiddelen
99 ^e percentiel	Bij stoffen waar geen enkele overschrijding acceptabel is	Maximale zekerheid, maar vaak onrealistisch streng, kan leiden tot onnodig gebruik van beschermingsmiddelen

Het geometrisch gemiddelde (GM) geeft een indruk van het typische blootstellingsniveau binnen een situatie of groep werknemers. Dit is vooral nuttig om verschillende groepen te vergelijken of trends te signaleren. Het GM is echter minder geschikt om het resultaat van de schatting te toetsen aan de grenswaarde, omdat met het gebruik van de GM onvoldoende rekening wordt gehouden met variabiliteit in blootstelling en veel waarden hoger liggen dan het GM.

In sommige gevallen is het relevant om een iets voorzichtiger inschatting te maken, zonder hierbij de extreme waarden mee te nemen. Het 75^e percentiel kan dan een goede maat zijn. Sommige modellen ECETOC TRA of ConsExpo gebruiken bewust dit percentiel als uitkomstmaat om onrealistisch hoge waarden te vermijden, maar toch een conservatieve blootstellingsschatting wordt gemaakt (Ban et al., 2018).

Het 90^e percentiel is doorgaans de meest gebruikte uitkomstmaat in Stoffenmanager en ART. ECHA schrijft dit percentiel voor bij het inschatten van de mate van blootstelling in REACH-dossiers. (ECHA, 2016). Dit geldt bij zowel het gebruik van meetgegevens als bij het toepassen van modellen. Ook in de wetenschappelijke literatuur wordt vaak naar het 90^e percentiel verwezen, zoals in validatiestudies. In de ETEAM-studie zijn bijvoorbeeld de 90 percentiel schattingen van Stoffenmanager geëvalueerd (Lamb et al., 2015). Naast REACH-

dossiers kan het gebruik van dit percentiel ook relevant zijn bij het afleiden van veilige werkwijzen en het toetsen aan grenswaarden. In de Leidraad veilige werkwijzen (Fransman et al., 2009; Kuipers et al., 2016) wordt aangegeven dat blootstellingsschattingen op basis van blootstellingsmodellen hier onder voorwaarden voor gebruikt mogen worden. Hoewel hierbij geen specifiek percentiel wordt genoemd, wordt wel benadrukt dat de modellen voldoende conservatief moeten zijn.

Stoffenmanager en ART bieden ook de mogelijkheid om het 95e percentiel te schatten. Dit percentiel representeert een zeer hoge blootstelling en ligt aan de bovenzijde van wat als regulier gebruik kan worden beschouwd. Het toepassen van het 95e percentiel kan worden overwogen wanneer een hoog beschermingsniveau wenselijk is, bijvoorbeeld bij aanwezigheid van een kwetsbare populatie op de werkvloer zoals zwangere vrouwen.

Tegelijkertijd leidt het gebruik van het 95e percentiel bij modellen tot weinig representatieve blootstellingsschattingen, waarbij de uitkomst in toenemende mate wordt bepaald door modelaannames en onzekerheid. Dit kan ertoe leiden dat de schatting minder representatief is voor typische blootstellingssituaties en dat beheersmaatregelen worden voorgesteld die niet altijd proportioneel zijn.

In situaties waarin de modelschatting sterk wordt gedomineerd door deze onzekerheden, kan het verstandiger zijn om aanvullende informatie te verzamelen, bijvoorbeeld in de vorm van representatieve blootstellingsmetingen, in plaats van verdere opschaling van het gekozen percentiel.

ART biedt verder ook de optie om het 99^e percentiel te selecteren. Dit is een extreem conservatieve waarde die niet of nauwelijks representatief is voor realistische blootstellingssituaties, maar vooral de 'extreme' ('worst-case') blootstellingssituaties weergeeft. Dit percentiel kan eventueel worden gebruikt om binnen een groep de maximale blootstellingsniveaus in kaart te brengen.

Op het moment van schrijven van deze notitie biedt alleen ART de mogelijkheid om naast het percentiel ook een betrouwbaarheidsinterval (BI) te rapporteren, en zo ook de onzekerheid rond de geschatte waarde (het percentiel) weer te geven. Hierbij is het belangrijk om te realiseren dat het betrouwbaarheidsinterval rondom de geschatte waarde (het percentiel) iets anders uitdrukt dan het percentiel:

- Het percentiel geeft de verwachte maximale blootstelling voor het gegeven percentage van de populatie weer.
- Het betrouwbaarheidsinterval weerspiegelt de statistische onzekerheid van de blootstellingsschatting (bijvoorbeeld door een beperkt aantal metingen of modelonzekerheden).

Binnen ART kan de gebruiker kiezen uit verschillende betrouwbaarheidsintervallen (interkwartiel, 80%, 90% en 95%). In de praktijk is het 90%- of 95%-BI het meest gebruikelijk, omdat deze een goede balans bieden tussen betrouwbaarheid en toepasbaarheid. Zoals eerder ook al aangegeven geeft het 99% BI een onbruikbare bandbreedte, omdat deze ook alle extreme waarden omvat.

4. Conclusie

De keuze van het percentiel in een blootstellingsschatting hangt sterk af van het doel van de beoordeling. Voor het beschrijven van de mate van blootstelling van typische scenario's volstaat vaak het GM of het 75^e percentiel van de (geschatte) blootstellingsdistributie. Voor het toetsen van een blootstellingsschatting aan een grenswaarde is een meer conservatieve benadering noodzakelijk, zoals het 90^e percentiel en in sommige gevallen het 95^e percentiel. Echter is het gebruik van het 95^e of 99^e percentiel in de praktijk zelden nodig.

5. Literatuur

Ban H, Park JY, Lee D, Lee K. (2018) Impact of exposure factor selection on deterministic consumer exposure assessment. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*. Vol 94: 240 – 244.

ECETOC. Targeted Risk Assessment. (2004) Technical Report No. 93. Brussels: ECETOC. ISSN 0773 8072 93.

ECETOC. Addendum to ECETOC Targeted Risk Assessment Report No. 93. (2009) Technical Report No. 107. Brussels: ECETOC. ISSN 0773 8072 107.

ECETOC. ECETOC TRA version 3: Background and Rationale for the Improvements. (2012) Technical Report No. 114. Brussels: ECETOC. ISSN 0773 8072 114.

ECETOC. Addendum to TR114: Technical Basis for the TRA v3.1. (2014) Technical Report No. 124. Brussels: ECETOC. ISSN 0773 8072 124.

Franken R, Schinkel J, Spaan S. (2023) Validation and Recalibration of the Asbestos Removal Exposure Assessment Tool (AREAT). *Annals of Work Exposure and Health*. Vol 67(5): 650-662.

Fransman W, Marquart H, le Feber M. (2009) Kwaliteitscriteria voor veilige werkwijzen en instrumenten om veilige werkwijzen af te leiden.

Hofstetter R, Spencer JW, Hiteshew K et al. (2013) Evaluation of recommended reach exposure modelling tools and near-field, far-field model in assessing occupational exposure to toluene from spray paint. *Ann Occup Hyg*;57: 210-202.

Kuijpers E, Schinkel J, le Feber M, Fransman W. Valideren van veilige werkwijzen. Verduidelijken en nader specificeren van huidige criteria.

Lamb J, Miller BG, MacCalman L et al. (2015) Evaluation of Tier 1 Exposure Assessment Models under REACH (eteam) Projects - Substudy Report on External Validation Exercise. 1st edn. Dortmund: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin. Project number F 2303. ISBN 978-3- 88261-157-1.

Lee S, Lee K, Kim H. (2019) Comparison of quantitative exposure models for occupational exposure to organic solvents in Korea. *Ann Work Expo Health*; 63: 197–217.

Marquart H, Franken R, Goede H, Fransman W, Schinkel J. (2017) Validation of the dermal exposure model in ECETOC TRA. *Annals of Work Exposures and Health*. Vol. 61(7): 854-871.

Navy Medicine. (2021) Industrial Hygiene Field Operations Manual. Technical manual NMCPHC-TM6290.91-2.

Nederlands Normalisatie-Instituut (NEN). 2019 NEN-EN 689: Blootstelling op de werkplek – Meting van de inhalatieblootstelling aan chemische stoffen – Strategie om te voldoen aan de arbeidshygiënische blootstellingsgrenswaarden.

Tielemans E, Noy D, Schinkel J, Heussen H, Van der Graaf D, West J, Fransman W. (2008) Stoffenmanager Exposure Model: Development of a Quantitative Algorithm. Ann. Occup. Hyg. Vol. 52(6): 443-454.

6. Ondertekening

Utrecht, 17 februari 2026

C. de Jong-Rubingh
Research

R. Franken

Healthy Living & Work

Princetonlaan 6
3584 CB Utrecht
www.tno.nl

TNO innovation
for life