

Verkenkend onderzoek naar de relatie tussen het neerslaan en weer in de lucht komen van asbestvezels

Sedimentatie en resuspensie van asbestvezels

TNO 2025 R11716 – 28 mei 2026

Verkennd onderzoek naar de relatie tussen het neerslaan en weer in de lucht komen van asbestvezels

Sedimentatie en resuspensie van asbestvezels

Auteurs	R. Arzoni S. Spaan
Rubricering rapport	TNO Publiek
Titel	TNO Publiek
Rapporttekst	TNO Publiek
Aantal pagina's	42 (excl. voor- en achterblad)
Aantal bijlagen	0
Opdrachtgever	Ministerie van Sociale Zaken en Werkgelegenheid
Programmanaam	MAPA Asbest
Projectnaam	Verkenning relatie kleef- en luchtmonsters
Projectnummer	060.59645, 060.63807, 060.68182

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

Samenvatting

De afgelopen jaren heeft het Ministerie van Sociale Zaken en Werkgelegenheid (SZW) TNO regelmatig vragen gesteld over de onderlinge verhouding tussen de resultaten van lucht- en kleefmonsters. De hoeveelheid (kwantitatieve) informatie die op dit moment beschikbaar is met betrekking tot dit onderwerp is echter beperkt. In dit verkennende literatuuronderzoek is beschikbare informatie over de relatie tussen gesedimenteerde asbestvezels en asbestvezels in de lucht bijeengebracht. Hiervoor zijn relevante NEN- en ISO-normen en geselecteerde literatuur geëvalueerd.

Onder sedimentatie wordt het neerslaan van vezels uit de lucht op oppervlakken verstaan. Dit kan plaatsvinden door een eenmalige gebeurtenis, of over een langere periode met meerdere gebeurtenissen waarbij de concentratie asbestvezels in het neergeslagen stof accumuleert (ophoopt). In dit onderzoek ligt de nadruk vooral op factoren die van invloed zijn op de mate van resuspensie, het opnieuw in de lucht brengen van neergeslagen vezels.

In Nederland worden kleefmonsters gebruikt om asbestverontreinigingen te detecteren en te beoordelen in verschillende contexten: als onderdeel van een risicobeoordeling (NEN 2991), als aanvulling op visuele inspecties in kader van de eindbeoordeling (NEN 2990), en incidenteel bij persoonlijke blootstellingsonderzoeken (NEN 2939). De toetswaarde van 100 asbeststructuren/cm² speelt hierin een centrale rol. Bij overschrijding van deze toetswaarde wordt bij een eindbeoordeling het werkgebied niet vrijgegeven of wordt bij een risicobeoordeling het gebied als te saneren aangemerkt.

Voor kleefmonsters wordt in het kader van de risicobeoordeling aangenomen dat de numerieke concentratie vezels in de lucht gerelateerd is aan de hoeveelheid vezels op oppervlakken. Deze relatie is echter complex en het is lastig om de concentratie van asbest in lucht op een betrouwbare manier te voorspellen op basis van de concentratie asbest vastgesteld in een monster van stof dat aanwezig is op een oppervlak (bijvoorbeeld door middel van kleefmonsters). Dit komt onder andere door verschillen in vergroting en telregels zoals gehanteerd in de verschillende normen (ISO 16000-27 voor vezels op oppervlaktes en NEN-ISO 14966 voor vezels in lucht). Mede hierdoor zijn kleef- en luchtmonsters niet één-op-één vergelijkbaar. Daarnaast wordt sedimentatie en resuspensie beïnvloed door verschillende factoren, zoals:

- **Adhesie:** Vezels hechten aan oppervlakken via moleculaire krachten. Luchtsnelheden van 20-44 m/s zijn nodig om adhesiekrachten te overwinnen waardoor asbestvezels resuspenderen in de lucht. Elektrostatische effecten en (lucht)vochtigheid zijn van invloed op de adhesiekracht. Indirect is daarmee ook het type oppervlak of vloerbedekking waarop de vezels zijn gesedimenteerd van belang.
- **Vezeldimensies:** De aerodynamische diameter bepaalt het sedimentatiegedrag. Amfibole asbestvezels sedimenteren en resuspenderen anders dan chrysotielvezels.
- **Ventilatie:** Ventilatie verlaagt de concentratie in de ruimte, wat resulteert in mindert sedimentatie. Verminderde luchtstroming bij wanden en objecten leidt tot dode hoeken en sedimentatie.
- **Temperatuur:** Warmteverschillen in een ruimte resulteren in convectiestroming (wat kan resulteren in verspreiding van asbestvezels), en er wordt aangenomen dat de temperatuur in een ruimte van invloed is op de luchtvochtigheid.

- **Activiteit:** Belangrijkste factor voor resuspensie. Activiteiten als lopen (schoeisel), stofzuigen en luchtbewegingen resulteren in resuspensie van asbestvezels.

Op basis van uitgevoerde literatuurstudie blijkt dat de luchtvochtigheid een belangrijke factor is voor het neerslaan van asbestvezels uit de lucht. De luchtvochtigheid beïnvloedt ook het vezelgedrag van neergeslagen vezels: een hoge relatieve luchtvochtigheid verhoogt de adhesie, en een lage relatieve luchtvochtigheid verhoogt de mobiliteit.

Bevochtigingsmethoden beperken verspreiding van vezels via de lucht, maar bemoeilijken reiniging doordat de vezels meer blijven plakken aan oppervlakken. Daarnaast kan aflopend vocht ook contaminatie van andere oppervlakken veroorzaken.

Een luchtstroom van 20-44 meter per seconde is nodig om de adhesiekrachten op te heffen. Dit impliceert dat een asbeststofzuiger optimaal werkt als eenzelfde luchtsnelheid wordt bereikt op het oppervlak waar asbestvezels verwijderd moeten worden. Eventuele hogere luchtsnelheden gecombineerd met lagere luchtvochtigheid verhogen mogelijk de effectiviteit van het reinigen met een stofzuiger.

Zonder luchtstroming, zoals (mechanische) ventilatie, zullen de meeste asbestvezels in de lucht binnen korte tijd (gemiddeld 30 minuten) neerdalen. Ventilatie in een ruimte zorgt ervoor dat asbestvezels via de lucht worden afgevoerd uit deze ruimte, waardoor de asbestconcentratie in de lucht wordt verlaagd en daarmee sedimentatie in de ruimte wordt beperkt. Om het schoonmaken van een werkgebied te optimaliseren kan worden overwogen om bijvoorbeeld voor moeilijk reinigbare plekken gecontroleerde resuspensie met bladblazers of perslucht onderdeel te maken van de schoonmaakprocedure. Ook kan worden overwogen om als alternatief voor het simuleren van activiteit door vegen en wapperen bij de eindbeoordeling een bladblazer of perslucht in te zetten om eventuele aanwezige vezels effectiever in de lucht te brengen en daardoor te betrekken bij de luchtmeting.

In slechts een deel van geselecteerde onderzoeken is data verzameld voor het bepalen van factoren die van invloed zijn op sedimentatie en/of resuspensie. De kwaliteit van deze onderzoeken was over het algemeen mager, onder andere omdat parameters die van invloed zijn op sedimentatie en resuspensie niet altijd zijn vastgelegd. Daardoor is het lastig om op basis van de beschikbare literatuur een betrouwbare resuspensiefactor of K-factor af te leiden. Dit komt ook omdat de resuspensiefactor methode- en situatieafhankelijk is. Zo worden er verschillende bemonsteringstechnieken toegepast (vacuüm methode, veegmethode of kleefmonsters) en verschillende analysetechnieken (SEM, TEM of FCM) met bijbehorende afwijkende telregels en onderzochte vezeldimensies.

Het is onbekend hoe de huidige toetswaarde van 100 asbeststructuren/cm² tot stand is gekomen. Indien bij het afleiden van deze toetswaarde een K-factor is toegepast, zou uitgaande van de grenswaarde voor asbest in lucht van 10.000 vezels/m³ zoals op dat moment van toepassing was deze K-factor 10⁻² m⁻¹ zijn geweest. In de literatuur worden echter K-waarden van 10⁻⁴ tot 10⁻⁷ m⁻¹ of zelfs lager genoemd, op basis waarvan een hogere toetswaarde voor kleefmonsters zou worden afgeleid. Om een meer betrouwbare toetswaarde vast te kunnen stellen is experimenteel onderzoek nodig, waarbij een representatieve variatie van parameters die van invloed zijn op resuspensie wordt meegenomen en de uitvoering van de monstername en analyse stof- en luchtmonsters op elkaar wordt afgestemd. Wellicht dat voor verschillende omstandigheden verschillende toetswaarden zouden moeten worden afgeleid.

Bij het interpreteren van de resultaten van kleefmonsters wordt er veelal vanuit gegaan dat al het stof (inclusief asbestvezels) dat op het oppervlak ligt wordt verzameld met het monster,

en dat het resultaat van de analyse de mate van verontreiniging van het bemonsterde oppervlak weergeeft. De recuperatie zal echter niet altijd 100% zijn, en hangt deels af van het type ondergrond. In het buitenland wordt in plaats van kleeft monsters gebruik gemaakt van vacuüm- en veegtechnieken om de mate van oppervlaktecontaminatie te bepalen. De effectiviteit van de verschillende monsternametechnieken onder verschillende omstandigheden is niet bekend. Door middel van vergelijkend onderzoek zou kunnen worden bepaald welke techniek (kleef, veeg of vacuüm) onder welke omstandigheden de voorkeur heeft.

Asbestvezels sedimenteren op plaatsen met een lage luchtstroming (zoals nabij wanden of objecten) en kunnen onder bepaalde omstandigheden resuspenderen op plaatsen met veel luchtstroming of activiteit. In zowel de NEN 2990 als de NEN 2991 worden op dit moment weinig handvaten gegeven om hier bij het bemonsteren rekening mee te houden. Met name het bepalen en vastleggen van de monsterlocatie is van belang voor de interpretatie van de resultaten.

Inhoudsopgave

Samenvatting	3
1 Inleiding.....	7
2 Opzet literatuuronderzoek	9
3 Context.....	11
3.1 Sedimentatie en resuspensie	11
3.2 Relevante wet- en regelgeving	12
3.3 Normen in relatie tot resuspensie van gesedimenteerde asbestvezels.....	13
3.4 Andere manieren van bemonstering en analyse.....	18
3.5 Herkomst toetswaarde kleeft monsters.....	21
4 Parameters	23
4.1 Adhesie	23
4.2 Vezeldimensies	25
4.3 Ventilatie en luchtstromen	27
4.4 Temperatuur.....	29
4.5 Activiteit.....	29
4.6 Resuspensiefactor.....	30
5 Discussie, conclusie en aanbevelingen	34
6 Literatuur.....	39
Ondertekening.....	42

1 Inleiding

Gesedimenteerde (ook wel neergeslagen) asbestvezels kunnen door activiteit opnieuw in de lucht worden gebracht (resuspensie) en zo bijdragen aan het blootstellingsrisico aan asbest voor gebruikers van de betreffende ruimte(n), zoals bewoners of medewerkers. In de context van bijvoorbeeld risicobeoordeling wordt de concentratie asbestvezels in de lucht als gevolg van resuspensie over het algemeen ingeschat op basis van de concentratie asbestvezels dat neergeslagen dan wel aanwezig is op een oppervlak.

In Nederland worden kleefmonsters gebruikt bij het in kaart brengen van oppervlaktecontaminatie in verschillende situaties:

- Als aanvulling op de visuele inspectie tijdens de eindbeoordeling (NEN 2990), om na te gaan of het werkgebied goed is schoongemaakt;
- Om het potentiële blootstellingsrisico in kaart te brengen door aanwezigheid van asbestverontreinigingen (gesedimenteerde asbestvezels en conglomeraten), inclusief het inkaderen van deze asbestverontreiniging (NEN 2991);
- Incidenteel worden kleefmonsters verzameld als onderdeel van persoonlijk blootstellingsonderzoek (NEN 2939) om potentiële bronnen van verontreiniging te identificeren die niet direct zijn gerelateerd aan de werkzaamheden aan asbest die worden bemeten (bijvoorbeeld aanwezigheid van asbestvezels op adembeschermingsmiddelen, laarzen of gereedschap dat afkomstig is van een andere sanering).

De mate van verontreiniging zoals in kaart gebracht met behulp van kleefmonsters geeft een indicatie van het potentiële blootstellingsrisico. Of er ook daadwerkelijk sprake is van een (actueel) risico, dat wil zeggen dat gesedimenteerde asbestvezels door resuspensie opnieuw in de lucht komen en kunnen worden ingeademd, hangt af van de situatie in de ruimte. Er wordt aangenomen dat de mate van resuspensie afhangt van een combinatie van verschillende factoren, zoals type asbesthoudende bron, soort oppervlak, en mate van activiteit in dan wel gebruik van de ruimte, en de precieze omstandigheden in de ruimte dus van belang zijn voor zowel de bemonstering als de interpretatie van de resultaten.

In de NEN 2990 en de NEN 2991 wordt naast een toetswaarde voor asbest in lucht een toetswaarde voor asbest in het stof gehanteerd van 100 asbeststructuren/cm² oppervlak. Bij een eindbeoordeling conform NEN 2990 wordt bij een resultaat boven de 100 asbeststructuren/cm² het werkgebied niet vrijgegeven en mag het werkgebied niet zonder adembeschermingsmiddelen worden betreden. Bij een risicobeoordeling conform NEN 2991 wordt het gebied waar een concentratie van 100 asbeststructuren/cm² of meer wordt aangetroffen toegevoegd aan het 'te saneren gebied' omdat het kan bijdragen aan een grenswaardeoverschrijding. Bij de interpretatie wordt dus min of meer uitgegaan van een directe relatie en een vaste verhouding, namelijk wat zich op het oppervlak bevindt komt potentieel ook in de lucht. Laubenthal (2023) is echter van mening dat het aantal variabelen dat van invloed is op de mate van resuspensie (bijvoorbeeld zaken als type oppervlak, elektrostatische effecten, aggregatie (samenklonteren)) te groot is om op basis van de concentratie asbestvezels op het oppervlak, zoals vastgesteld met kleefmonsters, een directe voorspelling te doen over de concentratie asbestvezels in de lucht, en dus de risico's door blootstelling aan asbestvezels in gebouwen.

De afgelopen jaren heeft het Ministerie van Sociale Zaken en Werkgelegenheid (SZW) TNO regelmatig vragen gesteld over de onderlinge verhouding tussen de resultaten van lucht- en kleefmonsters, en in het verlengde daarvan bijvoorbeeld over hoe kleefmonsters worden verzameld, over hoe de resultaten van kleefmonsters als onderdeel van de eindbeoordeling en risicobeoordeling worden geïnterpreteerd, en of er alternatieven zijn voor het verzamelen van kleefmonsters als onderdeel van de eindbeoordeling. De hoeveelheid (kwantitatieve) informatie die op dit moment beschikbaar is met betrekking tot dit onderwerp is echter beperkt. Met dit verkennende literatuuronderzoek wordt onderzocht welke parameters van invloed zijn op het sedimenteren en vooral resuspenderen van neergeslagen asbestvezels. In deze verkenning is het artikel van Laubenthal (2023) meegenomen.

2 Opzet literatuuronderzoek

Er is een verkennend literatuuronderzoek uitgevoerd gericht op het identificeren en beschrijven van parameters die van invloed zijn op relatie tussen gesedimenteerde asbestvezels en asbestvezels in de lucht. Hierbij zijn ook de context wat betreft regelgeving in Nederland, de relevante (inter)nationale normen en beschikbare meetmethoden meegenomen. In het onderzoek zijn verschillende bronnen van informatie geraadpleegd.

Een viertal NEN- en ISO-normen zijn relevant ten aanzien van dit onderzoek en worden in deze rapportage nader besproken. NEN 2990 (NEN, 2020) en NEN 2991 (NEN, 2015) maken onderdeel uit van het wettelijke stelsel. Het bemonsteren van gesedimenteerde asbestvezels maakt deel uit van de methode zoals beschreven in deze normen, en in beide NEN-normen wordt een toetswaarde van 100 asbeststructuren/cm² gehanteerd. In deze NEN-normen wordt verwezen naar onder andere NEN- ISO 14966 (NEN, 2019) en ISO 16000-27 (ISO, 2014). Binnen deze normen is gezocht naar informatie over relevante parameters en de onderbouwing van de toetswaarde.

Daarnaast is binnen het archief van TNO is gezocht naar informatie over de onderbouwing van voorgenoemde toetswaarde. Verder is geïnformeerd of er binnen de landelijke dan wel internationale normcommissie (respectievelijk NEN-commissie 390060 en ISO-commissie ISO/TC146/SC3/WG1) gegevens zijn verzameld op basis waarvan de relatie tussen gesedimenteerde asbestvezels en de potentie van gesedimenteerde asbestvezels om opnieuw in de lucht te komen in kaart is gebracht, bijvoorbeeld ter onderbouwing van de toetswaarde van 100 asbeststructuren/cm².

Aanvullend is gezocht naar publicaties met betrekking tot sedimentatie en resuspensie van asbestvezels, zowel in de Nederlandse taal als in het Engels. Hierbij zijn zoektermen als 'sedimentatie', 'resuspensie', 'neerslaan', 'opwervelen' en veronderstelde invloeden zoals 'activiteit' en 'adhesie' gebruikt. Naast het opiniërende artikel van Laubenthal (2023) zijn er 18 publicaties van studies geselecteerd op basis van de titel en de samenvatting. Een viertal van deze publicaties bleek niet bruikbaar voor dit onderzoek:

- Burkhanova et al. (2019a) en Burkhanova & Azarov (2019b): Dit betreft twee publicaties over aspiratiesystemen (afzuigsystemen) in de Russische asbestcementproductie.
- Baeten, Helsen & Deruyttere (1980): Dit onderzoek beschrijft hoe de verhouding stof versus asbestvezels is bij het bewerken van asbesthoudende materialen.
- Burdett & Bard (2006): Dit onderzoek beschrijft het identificeren van vezels en het rangschikken van vezels met betrekking tot hun potentiële gevaar en risico aan de hand van hun fysieke kenmerken.

De overige publicaties zijn gebruikt in deze rapportage omdat ze inzichten bevatten die bijdragen aan het begrip van sedimentatie en resuspensie van asbestvezels. Deze zijn gepubliceerd in de periode van 1989 tot 2023, en omvatten voor het merendeel experimenteel onderzoek en daarnaast enkele opiniërende stukken, literatuurstudies en naslagwerken.

Uit de evaluatie van de NEN- en ISO-normen is gebleken dat de resultaten van lucht- en kleefmonsters zoals worden verzameld als onderdeel van eindbeoordelingen conform NEN 2990 of risicobeoordelingen conform NEN 2991) niet direct geschikt zijn om meer inzicht te

krijgen in de mate van resuspensie na sedimentatie van asbestvezels (zie paragraaf 3.3.5). Het initiële plan om deze data op te vragen bij de Nederlandse asbestsector is daarom niet uitgevoerd.

De resultaten van dit verkennende literatuuronderzoek zijn in deze rapportage weergegeven.

3 Context

Om de informatie die is verkregen door middel van het literatuuronderzoek goed te kunnen interpreteren, is het van belang om een idee te geven van de context rond sedimentatie en resuspensie van asbestvezels. Daartoe worden eerst de begrippen sedimentatie en resuspensie nader toegelicht. Verder wordt een overzicht gegeven van relevante Nederlandse wet- en regelgeving, en welke (inter)nationale normen relevant zijn (onder andere met betrekking tot welke meet- en analysemethoden worden toegepast en hoe resultaten worden getoetst) en hoe deze zich tot elkaar verhouden, evenals welke andere meet- en analysemethoden beschikbaar zijn.

3.1 Sedimentatie en resuspensie

3.1.1 Sedimentatie

Als asbestvezels in de lucht zijn gekomen, bijvoorbeeld als gevolg van het beschadigen van een asbesthoudende toepassing, zullen deze bij het ontbreken van activiteit in de ruimte net als andere stofdeeltjes uitzakken en terecht komen op oppervlakken in deze ruimte. Sedimentatie beschrijft het uitzakken en neerslaan van deeltjes, in dit geval vanuit de lucht naar een oppervlak. Na sedimentatie worden deze deeltjes veelal aangeduid als 'stof', en kunnen zich ook voegen bij reeds aanwezig stof.

De hoeveelheid asbestvezels in het gesedimenteerde stof is gerelateerd aan de hoeveelheid asbestvezels die daarvoor in de lucht aanwezig waren. De hoeveelheid asbestvezels in het stof kan door middel van één gebeurtenis tot stand zijn gekomen of kan over een lange tijd zijn opgebouwd door accumulatie.

Bij het beschadigen van een asbesthoudende toepassing kunnen naast de vezels die vrijkomen aan de lucht (die mogelijk uiteindelijk sedimenteren) ook zichtbare en onzichtbare stukjes van de asbesthoudende toepassing vrijkomen die onder invloed van zwaartekracht direct omlaag vallen. Deze restanten komen (in eerste instantie) dus voornamelijk in de nabijheid van de beschadigde asbesthoudende toepassingen terecht. De onzichtbare restanten worden op kleefmonsters teruggevonden in de vorm van vezelstructuren (zoals vezelbundels, -clusters of matrixdeeltjes). Het moet duidelijk zijn of het een locatie betreft met zichtbare restanten, een locatie nabij een beschadiging met mogelijk onzichtbare restanten, of bijvoorbeeld een willekeurig gekozen locatie. Voor de interpretatie van de resultaten van kleefmonsters is het van belang dat goed wordt beschreven waar en waarom een kleefmonster is genomen.

Als een oppervlak langdurig niet wordt schoongemaakt en er gedurende een periode herhaaldelijk asbestvezels vanuit de lucht op dat oppervlak zijn neergeslagen, is de cumulatieve hoeveelheid asbestvezels per oppervlak hoger dan wanneer een oppervlak vaker wordt schoongemaakt. Wanneer er in zo'n geval kleefmonsters worden genomen, wordt er feitelijk retrospectief gekeken naar de bijdrage van de (mogelijk variërende) concentraties asbestvezels in de lucht vanaf het moment waarop dat oppervlak voor de laatste keer is schoongemaakt. Daarnaast worden als onderdeel van de eindbeoordeling in specifieke situaties kleefmonsters genomen van oppervlakken die ná het vrijkomen van

asbestvezels zijn schoongemaakt. Voor de interpretatie van de analyseresultaten van kleefmonsters is het daarom ook van belang dat de omstandigheden in de ruimte waar de monsters worden genomen worden beschreven.

3.1.2 Resuspensie

Asbestvezels aanwezig in gesedimenteerd stof kunnen onder invloed van activiteit (bijvoorbeeld lopende mensen, rijdende voertuigen, trillingen of aanwezige luchtstromingen) worden opgewerveld en dus weer in de lucht terechtkomen. Resuspensie beschrijft het opwervelen en opnieuw in de lucht terechtkomen van deeltjes.

Een logische veronderstelling is dat er bij meer gesedimenteerde vezels en meer activiteit meer asbestvezels in de lucht komt. Als alle asbestvezels aanwezig op oppervlakken in de lucht zouden kunnen worden gebracht (bijvoorbeeld door het creëren van veel luchtstroming met bijvoorbeeld een bladblazer), zou door middel van het bepalen van de concentratie asbestvezels in de lucht het blootstellingsrisico kunnen worden bepaald. Dat kan in de praktijk over het algemeen niet worden gerealiseerd, bijvoorbeeld omdat een gebouw wordt bewoond of erin wordt gewerkt. Als alternatief voor het bepalen van het (potentiële) blootstellingsrisico wordt daarom de concentratie asbestvezels in het stof bepaald, bijvoorbeeld met behulp van kleefmonsters.

Een belangrijk aspect bij resuspensie van asbestvezels is dat de asbestvezels 'beschikbaar' moeten zijn. Een asbestvezel die zich op een radiatorsteun, achter een richeltje, of op een kast tegen de muur bevindt zal bij 'normale' activiteiten in de ruimte waarschijnlijk niet vrijkomen aan de lucht. En asbestvezels die in eerste instantie zijn gesedimenteerd op een looppad zullen na verloop van tijd waarschijnlijk weer opwervelen en op een andere plek in de ruimte neerslaan. Dergelijke factoren zijn van belang bij het opstellen van de bemonsteringsstrategie.

3.2 Relevante wet- en regelgeving

Het (mogelijke) blootstellingsrisico als gevolg van resuspensie van gesedimenteerde asbestvezels komt (indirect) op drie plaatsen terug in de Nederlandse wet- en regelgeving.

In het **Arbeidsomstandighedenbesluit** (artikel 4.47b) is geregeld dat er na werkzaamheden met asbest (inclusief een doeltreffende reiniging van de arbeidsplaats en de arbeidsmiddelen) en voorafgaand aan het opheffen van de gevarenzone een eindbeoordeling moet worden uitgevoerd. De eindbeoordeling betreft een visuele inspectie waarbij voor vrijgave van het werkgebied dient te worden vastgesteld dat het te verwijderen asbest niet meer visueel waarneembaar is. De visuele inspectie wordt bij risicoklasse 2 en 2a aangevuld met luchtmetingen, waarbij voor vrijgave van het werkgebied dient te worden vastgesteld dat de concentratie asbestvezels in de lucht lager is dan de toetswaarde. Bij risicoklasse 2 is dat 10.000 vezels/m³, op basis van analyse met fasecontrastmicroscopie (FCM of PCM), bij risicoklasse 2a is dat 2.000 vezels/m³, op basis van analyse met Scanning Elektronen Microscopie (SEM). Er wordt in het Arbeidsomstandighedenbesluit voor het uitvoeren van de eindbeoordeling niet verwezen naar een genormaliseerde methode voor het verzamelen en de analyse van de kleefmonsters, waardoor er logischerwijs ook geen toetswaarde voor de beoordeling van de resultaten van kleefmonsters is beschreven. In het besluit wordt verwezen naar de certificatieregelingen, waarin wordt verwezen naar de NEN 2990.

In het **Besluit bouwwerken leefomgeving** (Bbl, artikel 6.25) wordt beschreven dat de concentratie van asbestvezels in de binnenlucht van een voor personen toegankelijke ruimte

van een bouwwerk niet hoger mag zijn dan 2.000 vezels/m³. Voor het bepalen van de concentratie asbestvezels wordt verwezen naar de NEN 2991. Er wordt in het Bbl niet gerefereerd naar het nemen van kleefmonsters.

In de **certificatieregelingen**¹ wordt samengevat het volgende vastgelegd:

- In paragraaf 1: Definities:
 - o Een eindbeoordeling is een eindbeoordeling volgens NEN 2990;
 - o Een beoordeling van de risico's van de aanwezige asbestconcentraties wordt uitgevoerd volgens NEN 2991;
- In artikel 21 lid 2:
 - o Indien visueel waarneembare restanten niet-hechtgebonden asbestverdacht materiaal binnen een bouwwerk aanwezig zijn wordt het asbestinventarisatieonderzoek uitgebreid met een inkadering door middel van:
 - a) het nemen van representatieve kleefmonsters per ruimte of gebied overeenkomstig de NEN 2991; en
 - b) een analyse van deze kleefmonsters overeenkomstig de ISO 16000-27.

3.3 Normen in relatie tot resuspensie van gesedimenteerde asbestvezels

3.3.1 NEN 2990

NEN 2990 beschrijft hoe de eindbeoordeling na asbestverwijdering moet worden uitgevoerd (NEN, 2020). Deze eindbeoordeling bestaat uit een visuele inspectie, in combinatie met luchtmetingen na saneringen in risicoklasse 2 en 2a in binnensituaties. De luchtmonsters worden geanalyseerd met FCM conform NEN 2990 of SEM/RMA conform NEN-ISO 14966. De norm schrijft verder voor dat in binnen situaties waarbij amfibool asbest is verwijderd (risicoklasse 2a) kleefmonsters moeten worden genomen en geanalyseerd als aanvulling op de visuele inspectie. Het gaat daarbij om de bemonstering van asbestvezels die niet visueel waarneembaar zijn, die zich door de lucht hebben kunnen verspreiden en gesedimenteerd zijn op horizontale en/of ruwe oppervlakken. Voor het verzamelen van de kleefmonsters wordt het gebruik van dubbelzijdig tape van geleidende koolstof ('C-tape') voorgeschreven. Na analyse van de kleefmonsters met SEM/RMA conform ISO 16000-27 wordt een inspectiegebied afgekeurd wanneer op een of meer van de verzamelde kleefmonsters een concentratie groter dan 100 asbeststructuren/cm² (categorieën + of ++) wordt aangetroffen. De aanwezigheid van een dergelijke concentratie wordt omschreven als een duidelijk (+) of zeer sterk (++) met asbest verontreinigd oppervlak, en wordt gelijkgesteld aan het aantreffen van visueel waarneembaar asbest. De aan- of afwezigheid van een lokale verontreiniging kan een aanwijzing zijn dat er niet goed is schoongemaakt. Het is echter niet aangetoond dat de aanwezigheid van een (lokale) verontreiniging (een kleefmonster waarvan de concentratie asbestvezels groter is dan de toetswaarde) leidt tot een overschrijding van de toetswaarde van asbest in lucht (Spaan et al., 2017).

Het komt in de praktijk voor dat ook visueel waarneembare restanten verdacht materiaal ('debris') en contactvlakken van het asbest op bouwmaterialen, met kleefmonsters worden bemonsterd, bijvoorbeeld om een discussie over de waarneming te vermijden. Verder is de meetstrategie die wordt toegepast (de locaties waar kleefmonsters worden genomen) van belang voor de interpretatie van de resultaten. Veelal ligt de nadruk op het bemonsteren van

¹ Staatscourant 2024 nr. 34077, 23 oktober 2024 Certificatieschema voor de Procescertificaten Asbestinventarisatie en Asbestverwijdering

de omgeving van de verwijderde asbesthoudende toepassing, terwijl vrijgekomen asbestvezels ook op andere locaties kunnen neerslaan.

In NEN 2990 is een van de basiseisen voor goedkeuring op basis van een visuele inspectie dat het containment (afgeschermd werkgebied met actieve ventilatie) droog moet zijn. Bij het aantreffen van een of meer zichtbaar natte plekken moet de eindbeoordeling worden uitgesteld. Als de relatieve vochtigheid in het containment meer dan 10% hoger is dan die van de lucht in de omringende bouwdelen of omgevingslucht moet de ruimte nog als 'nat' worden beschouwd en wordt het inspectiegebied afgekeurd voor inspectie. Ook wordt aangegeven dat als relatieve vochtigheid in een kruipruimte meer dan 10% hoger is dan die van de omgeving het nemen van luchtmonsters geen zin heeft. Hoewel dit in de norm niet als zodanig wordt aangegeven, wordt aangenomen dat dit criterium is opgenomen omdat het nemen van luchtmonsters bij een hoge luchtvochtigheid geen toegevoegde waarde heeft. Eventueel aanwezige gesedimenteerde vezels dan wel vezelstructuren zijn door het aanwezige vocht zwaarder en zullen dus niet resuspenderen, wat kan resulteren in een onderschatting van de concentratie asbestvezels in de lucht wanneer het werkgebied droog is. Ook zijn aanwezige restanten en/of (verontreinigd) stof dan minder goed zichtbaar.

Om te voorkomen dat gesedimenteerde vezels onopgemerkt blijven, moet tijdens de luchtmeting als onderdeel van de eindbeoordeling tweemaal activiteit worden gesimuleerd (binnen 10 minuten na aanvang van de meting en circa 20 minuten na de eerste simulatie) en moet de ventilatievoud worden verlaagd. Het simuleren van activiteit wordt over het algemeen gedaan door zowel de vloer als de wanden van het containment met een wegwerpstof af te vegen en/of luchtbeweging te creëren door met een waaier langs de wanden en de vloer van het containment te wapperen. Voor grote ruimten zoals fabriekshallen of magazijnen wordt in plaats van een stoffer/waaier het gebruik van een bladblazer of ventilator voorgeschreven. Indien kleefmonsters moeten worden verzameld moeten deze worden genomen voordat wordt begonnen met het simuleren van activiteit.

3.3.2 NEN 2991

NEN 2991 beschrijft een bepalingmethode ter vaststelling van de asbestconcentratie in binnenlucht en een beoordelingskader voor blootstellingsrisico's aan asbest voor gebruikers en derden in gebouwen, woningen, constructies, objecten, leegstaande bouwwerken en industriële installaties waarin asbesthoudende materialen zijn verwerkt (NEN, 2015).

NEN 2991 beschrijft onder andere een methode om het **actuele blootstellingsrisico** te bepalen door middel van het verzamelen van luchtmonsters met analyse conform NEN-ISO 14966. Daarnaast wordt een methode beschreven om het **potentiële blootstellingsrisico** te bepalen, waarbij op basis van de toestand van het asbesthoudend materiaal en/of de concentratie asbestvezels in secundaire bronnen, zoals stof op de vloer en in naden en kieren, een inschatting wordt gemaakt van de asbestconcentraties in de lucht die als gevolg van omgevingsomstandigheden (activiteit, luchtstromingen, enz.) zouden kunnen ontstaan.

Wat betreft asbesthoudend stof richt de monsternemingsstrategie die beschreven is in NEN 2991 zich voornamelijk op het inkaderen van een met asbest verontreinigd gebied. Dit komt neer op het steekproefsgewijs verzamelen van kleefmonsters van representatieve oppervlakken met behulp van dubbelzijdig tape van geleidende koolstof ('C-tape'), zodat kan worden bepaald welke (delen van) ruimten, inboedel e.d. mogelijk zouden moeten worden gereinigd. Het uitgangspunt is dat wordt vastgesteld wat het gebied is (waar een saneringsadvies voor geldt) waar meer dan 100 gesedimenteerde asbeststructuren/cm² voorkomen. De monsternamestrategie die wordt toegepast (de locaties waar kleefmonsters

worden genomen) is van belang voor de interpretatie van de resultaten. Er wordt vermeld dat moet worden bemonsterd 'op een aantal representatieve oppervlakken'. Naast het bemonsteren van de omgeving van de (vermoedelijke) bron is het van belang om ook andere locaties waar vrijgekomen asbestvezels kunnen neerslaan dan wel door schoeisel of rijdende voertuigen naar andere locaties naartoe kunnen worden getransporteerd worden bemonsterd.

In de norm wordt aangegeven dat de relatie tussen de hoeveelheid gesedimenteerde asbestvezels in stof en concentratie asbestvezels in de lucht gecompliceerd is, van veel factoren afhankelijk is, en dat de mate van activiteit in de betreffende ruimte een van de belangrijkste factoren is. Tevens wordt een indicatie gegeven van de relatie asbest in stof / asbest in lucht, waarvan wordt aangegeven dat deze is gebaseerd op ervaringen van zowel TNO als collega-onderzoeksinstituten in Duitsland, Oostenrijk, Zwitserland en de Verenigde Staten, met een verwijzing naar ISO 16000-27. Er kon echter niet worden achterhaald wat hierbij wordt verstaan onder ervaringen, en op wat voor soort gegevens deze ervaringen precies op zijn gebaseerd. Er zijn ook geen rapportages dan wel publicaties beschikbaar waarin deze informatie is beschreven. Hierdoor is het niet mogelijk om na te gaan of de relatie asbest in stof / asbest in lucht die hier wordt weergegeven klopt. Verder wordt aangegeven dat de indicatieve waarden gelden voor 'worst-case' situaties (aanwezigheid van amfibole asbestvezels). Ook wordt aangegeven dat chrysotielvezels minder gemakkelijk in de lucht worden geresuspendeerd dan amfibole asbestvezels. Dit wil zeggen dat wordt aangenomen dat wanneer de hoeveelheid chrysotiel- en amfibole asbestvezels op een oppervlak (en dus in het kleefmonster) vergelijkbaar is (dit wordt een vergelijkbaar verontreinigingsniveau genoemd), er bij activiteit minder chrysotielvezels in de lucht terecht zullen komen dan amfibole asbestvezels.

Gesteld wordt dat bij een hoeveelheid van méér dan 100 asbeststructuren/cm² (+ of ++) op een oppervlak in combinatie met gemiddelde activiteit (zoals normale kantoorwerkzaamheden en stofzuigen) de kans bestaat dat de grenswaarde wordt overschreden. De relatie met de mate van activiteit in de ruimte wordt verder niet onderbouwd. Er wordt wel aangegeven dat deze indicatieve waarden ook worden gehanteerd in de ISO 16000-27. Behalve activiteit worden in de norm mogelijke andere omgevingsomstandigheden of parameters die van invloed kunnen zijn op het resuspenden van asbestvezels niet verder uitgewerkt.

Het moment waarop kleef- en luchtmonsters worden verzameld is van invloed op in hoeverre de resultaten hiervan aan elkaar zijn gerelateerd. Als de concentratie asbest in de lucht en hoeveelheid asbest in het stof op (min of meer) hetzelfde moment worden bepaald is er géén sprake van een directe relatie tussen beiden, omdat het asbest dat de lucht aanwezig is logischerwijs niet aanwezig is in het stof dat is gesedimenteerd op oppervlakken en omgekeerd.

NEN 2991 wordt in de praktijk op verschillende manieren toegepast. In het Bbl wordt gerefereerd naar de NEN 2991 met betrekking tot het bepalen van het actuele blootstellingsrisico op basis van luchtmonsters. In het Certificatieschema voor de Procescertificaten Asbestinventarisatie en Asbestverwijdering wordt voorgeschreven dat bij aanwezigheid van visueel waarneembare restanten van niet-hechtgebonden asbestverdacht materiaal als eerste stap een inkadering door middel van het nemen van kleefmonsters overeenkomstig de NEN 2991 moet worden uitgevoerd, als aanvulling op de asbestinventarisatie. Het doel hiervan is om na te gaan of er naast visueel waarneembare restanten ook een niet visueel waarneembare verontreiniging aanwezig is en dus niet het bepalen van het mogelijke blootstellingsrisico voor eventuele bewoners. In het

Certificatieschema wordt aangegeven dat indien er op basis van het kleefmonsteronderzoek wordt geconstateerd dat er sprake is van een ernstige verontreiniging, die kan leiden tot een blootstelling aan asbestvezels in de lucht boven de van toepassing zijnde grenswaarde, het asbestinventarisatiebedrijf dient te adviseren om een risicobeoordeling uit te voeren, waarmee een beoordeling van de risico's van de aanwezige asbestconcentraties (oftewel het bepalen van het actuele blootstellingsrisico op basis van luchtmonsters) overeenkomstig de NEN 2991 wordt bedoeld.

3.3.3 ISO 1600-27

ISO 16000-27 beschrijft een methode om de numerieke concentratie vezelachtige structuren en vezels (waaronder asbestvezels) dikker dan 0,2 µm te bepalen in gesedimenteerde stof dat is bemonsterd op kleefband (ISO, 2014). Bij de analyse wordt het bemonsterde oppervlak (tape, meestal geleidende tape of C-tape) bij verschillende vergrotingen (eindvergroting 300 à 400 x en 1000 x) met SEM afgezocht naar vezels en vezelachtige structuren. Aangetroffen vezels en vezelstructuren worden nader geïdentificeerd door de samenstelling met energy dispersive X-ray spectroscopy (EDX) te bepalen. Als morfologie en samenstelling overeenkomen met die van asbest worden deze geteld en dragen bij aan de uitgerekende concentratie.

Vezelstructuren, zoals vezelbundels, -clusters of matrixdeeltjes, krijgen een gewichtsfactor van 5 of 10. Hoe deze gewichtsfactoren zijn afgeleid is onbekend. De getelde vezels en getelde gewogen structuren worden omgerekend naar een concentratie per geanalyseerd oppervlak, waarbij vervolgens wordt aangenomen dat dit de concentratie is geweest op het bemonsterde oppervlak. Bij analyse bij de laagste vergroting (300 x) wordt bij het aantreffen van circa 14 vezels (gewogen) een concentratie van 100 asbeststructuren/cm² bereikt. Omdat slechts een klein deel van het oppervlak van het kleefmonster wordt onderzocht ontstaat een grote steekproeffout. De gewoonte is om niet de uitgerekende concentratie (bijvoorbeeld 23 asbeststructuren/cm²) maar een concentratieklasse (-, +/-, + of ++) te vermelden, zo wordt een valse nauwkeurigheid vermeden.

De methode betreft een 'direct transfer' techniek waarbij wordt aangenomen dat alle vezels en structuren die zijn gesedimenteerd op een oppervlak volledig (100%) worden opgenomen door het gebruikte kleefband. Op basis van ervaringen uit de praktijk is bekend dat de 'recuperatie', ofwel de effectiviteit van het opnemen van stof van een oppervlak met tape, afhangt van de gebruikte tape, de wijze van bemonsteren (bijvoorbeeld fors aandrukken) en het type oppervlak. De tape zal bijvoorbeeld gemakkelijker stof en dus asbestvezels opnemen van een glad dan van een ruw oppervlak. Daarbij zullen sommige oppervlakken mee worden opgenomen, zoals houtsplinters en textielvezels, en zal de mate en soort vervuiling op een oppervlak van invloed zijn op het opnemen van vezels, zoals een oliefilm of vocht. De norm gaat ervan uit dat de verdeling van de asbestvezels over het bemonsterde oppervlak homogeen verdeeld is, omdat het uitgangspunt is dat deze zijn gesedimenteerd vanuit de lucht. Wanneer kleefmonsters worden genomen van oppervlakken waar zichtbare of onzichtbare resten (debris) aanwezig zijn, bijvoorbeeld nabij een beschadigde asbesthoudende toepassing, is dit echter niet het geval. Door toepassing van de gewichtsfactoren voor structuren (bundels, clusters, conglomeraten) met grotere afmetingen dan de uit de lucht gesedimenteerde vezels wordt de numerieke vergelijking van verschillende analyses van hetzelfde kleefmonster aanzienlijk bemoeilijkt.

In de norm wordt aangegeven dat er géén algemeen geaccepteerde methode is om de hoeveelheid asbest in stof te correleren aan een concentratie asbest in de lucht na resuspenderen. Er wordt aangegeven dat een belangrijk verschil is ten opzichte van de

analyse van luchtmonsters dat bij kleefmonsters de dimensies van de aangetroffen vezels en structuren groter zijn, en dat dit dus niet per se vezels betreft die in de lucht terecht (kunnen) komen en inadembaar zijn.

3.3.4 NEN-ISO 14966

NEN-ISO 14966 beschrijft een methode om de numerieke concentratie vezels, waaronder asbestvezels, met een lengte groter dan 5 µm en een diameter tussen 0,2 en 3 µm te bepalen die zijn bemonsterd op een filter (NEN, 2019). Bij de analyse wordt het bemonsterde oppervlak van een goudgecoat filter onderzocht. Bij een ingestelde vergroting van 1000 x dat leidt tot een eindvergroting van 2000 x tot 2500 x, wordt het filtermateriaal met SEM afgezocht naar de aanwezigheid van vezels, waaronder asbestvezels. Aangetroffen vezels worden nader geïdentificeerd door de samenstelling met EDX te bepalen. Wanneer de morfologie en samenstelling van deze vezels overeenkomen met die van asbest worden deze geteld en dragen bij aan de te bepalen concentratie.

In de NEN-ISO 14966 wordt door middel van de te hanteren telregels ('fibre counting rules') beschreven hoe onder andere de lengte en diameter van de vezels moeten worden gemeten, hoe moet worden omgegaan met vezels die buiten het beeldveld steken of vezels die elkaar kruisen. Vezels die deel uitmaken van een groepje (een conglomeraat) worden elk afzonderlijk geteld, mits beide uiteinden van elke afzonderlijke vezel zichtbaar zijn.

Vezels dunner dan 0,2 µm kunnen niet goed worden waargenomen bij de voorgestelde vergrotingen en de kwaliteit (resolutie) van een standaard SEM.

3.3.5 Vergelijking ISO 1600-27 en NEN-ISO 14966

De World Health Organization (WHO) definieert respirabele vezels als langer dan 5 µm, dunner dan 3 µm, met een lengte/diameter verhouding (aspect ratio) groter dan 3:1 (WHO, 1986).

Bij de analyse van luchtmonsters volgens de NEN-ISO 14966 wordt een aanzienlijk grotere vergroting voorgeschreven (eindvergroting 2000 x tot 2500 x) dan bij de analyse van kleefmonsters volgens de ISO 16000-27 (eindvergroting van 300 à 400 x en 1000 x). Dit betekent dat de waarneembaarheid van vezels met een diameter van 0,2 µm (de ondergrens voor de afmetingen van respirabele vezels) verschillend is per methode. Door de grotere vergroting zal het aantal asbestvezels dat wordt geteld in een luchtmonster bijvoorbeeld relatief groter zijn het aantal asbestvezels da wordt geteld in een kleefmonster. In combinatie met het toepassen van gewichtsfactoren voor vezelstructuren bij de analyse van de kleefmonsters is een één-op-één vertaling van de concentratie in de lucht (bepaald conform NEN-ISO 14966) naar de concentratie in stof (bepaald conform ISO 16000-27) en vice versa daarom niet mogelijk.

Door het toepassen van gewichtsfactoren voor aanwezige vezelstructuren, zoals vezelbundels, -clusters of matrixdeeltjes, wordt een grove schatting gemaakt van de bijdrage van deze structuren aan wat de totale concentratie respirabele asbestvezels in de lucht zou zijn als deze structuren in de lucht zouden komen na opsplitsing in losse vezels. Hierbij moet worden opgemerkt dat deze structuren niet zondermeer in de lucht terecht kunnen komen. De bijdrage hiervan aan de concentratie respirabele vezels zal nul zijn als deze structuren niet eerst door bijvoorbeeld mechanische invloeden dan wel activiteit (bijv. lopende mensen, rijdende voertuigen, luchtstromen) worden verkleind en opgesplitst in losse vezels, zodat deze kunnen resuspenderen naar de lucht. De gewichtsfactoren die worden toegekend aan

structuren komen niet per se overeen met het blootstellingsrisico dat ontstaat wanneer deze de structuren worden opgebroken in losse vezels. Hierbij is namelijk zowel het aantal vezels in de structuur, het type asbest en de mate of intensiteit van de activiteit van belang. Afhankelijk van het type structuur en de vergroting die wordt gehanteerd zal dat niet altijd een equivalente hoeveelheid vezels opleveren als de nu gehanteerde gewichtsfactoren van respectievelijk 5 en 10.

Er kan worden gesteld dat de numerieke concentratie asbestvezels zoals wordt bepaald in een medium (materialen, puin, lucht, stof, etc.) methode-bepaald is. Oftewel: de gekozen methode bepaalt de uitkomst, waardoor het vergelijken van resultaten van de analyse van verschillende media (zoals stof versus lucht) lastig is. Het is belangrijk dat bij het afleiden van bijvoorbeeld een resuspensiefactor (zie paragraaf 4.6) hier rekening mee wordt gehouden, zodat geen analytische fout wordt geïntroduceerd.

3.4 Andere manieren van bemonstering en analyse

Er bestaan in grote lijnen drie technieken om gesedimenteerde asbestvezels (c.q. restanten) te bemonsteren ten behoeve van een kwantitatieve bepaling van de concentratie asbestvezels per oppervlakte-eenheid: met behulp van een vacuümtechniek, een veegtechniek of door het nemen van kleefmonsters.

In Nederland is de recuperatie, de mate waarin gesedimenteerde asbestvezels met kleefmonsters worden opgetild van een oppervlak, onderzocht om te bepalen welke type kleefband het meest optimaal werkt (Arzoni, 2003). De vacuümtechniek en de veegtechniek zijn niet onderzocht omdat die in Nederland niet gangbaar waren en zijn. De recuperatie van Carbon- of C-tape (dubbelzijdige elektrisch geleidende tape) was beter dan van andere typen tape, zoals dactyloscopische tape, cellotape en duct-tape. Een bijkomend voordeel is dat C-tape elektrisch geleidend is en deze daardoor gemakkelijker in gebruik is in combinatie met analyse met SEM dan andere typen tape. Op basis hiervan wordt het gebruik van C-tape voorgeschreven in de NEN 2990, de NEN 2991 en de ISO 16000-27.

Met de vacuümtechniek wordt het stof op een specifiek en afgemeten oppervlak opgezogen met behulp van een filterkop in combinatie met een pomp, bijvoorbeeld een (micro-)stofzuiger. De asbestvezels en -restanten worden opgevangen op het filtermateriaal ten behoeve van analyse. Een voorbeeld van een gestandaardiseerde methode waarin deze techniek wordt toegepast is de ASTM D5755-09 (ASTM International, 2014). Met deze microvacuüm-methode wordt neergeslagen stof bemonsterd door stof op een oppervlak van over het algemeen 100 cm² op te zuigen bij 2 liter per minuut. Het resultaat is een index van de oppervlakteverontreiniging van asbeststructuren in het geanalyseerde stof per oppervlakte-eenheid, zoals afgeleid uit een kwantitatieve analyse met Transmissie Elektronen Microscopie (TEM). In de beschrijving van de methode wordt aangegeven dat er op dit moment geen relatie is vastgesteld tussen asbesthoudend stof zoals gemeten met deze methode en mogelijke blootstelling aan asbest in de lucht. Ook wordt aangegeven dat de bemonsteringsefficiëntie van de toegepaste microvacuüm bemonsteringstechniek onbekend is en zal variëren tussen substraten. Hierbij worden oppervlaktestructuur, kleefkracht, elektrostatische eigenschappen en andere factoren genoemd als factoren die de bemonsteringsefficiëntie beïnvloeden.

Millette & Hays (1994) hebben richtlijnen opgesteld voor de interpretatie van stofmonsters die zijn verzameld met de ASTM D5755 “microvac”-methode en zijn geanalyseerd met TEM. Deze richtlijnen staan bekend als de “ASTM expediency standards”:

- 1.000 structuren/cm²: “lage” concentratie
- 10.000 structuren/cm² “boven achtergrond” concentratie
- 100.000 structuren/cm²: “hoge” concentratie

Omdat dit om een vacuümtechniek gaat en er bij de analyse met TEM meer vezelstructuren worden waargenomen (ook korte en dunne vezels) is een vertaling van deze richtlijnen naar de interpretatie van kleefmonsters die worden geanalyseerd met SEM lastig.

Met de veegtechniek worden de restanten van een specifiek oppervlak opgenomen met een speciaal doekje. Op het lab wordt het doekje geëxtraheerd om de asbestvezels vrij te maken ten behoeve van analyse. Een voorbeeld van een gestandaardiseerde methode waarin deze techniek wordt toegepast is de ASTM D6480-19 (ASTM International, 2019). Met deze methode wordt neergeslagen stof bemonsterd door stof op een oppervlak van over het algemeen 100 cm² met behulp van een specifieke veegprocedure op te vegen met een doekje (deeltjesvrij, gesealde rand, continue vezeldoek medium) dat is bevochtigd met een vloeistof van 50/50 alcohol en water. Het resultaat is een index van de oppervlakteverontreiniging van asbeststructuren in het geanalyseerde stof per oppervlakte-eenheid, zoals afgeleid uit een kwantitatieve analyse met TEM. Ook in de beschrijving van deze methode wordt aangegeven dat er geen relatie is vastgesteld tussen asbesthoudend stof zoals gemeten met deze methode en mogelijke blootstelling aan asbest in de lucht. Ook wordt aangegeven dat de bemonsteringsefficiëntie van de toegepaste microvacuüm bemonsteringstechniek onbekend is en zal variëren tussen substraten. Als beïnvloedende factoren worden oppervlaktestructuur, kleefkracht (adhesie) en andere factoren genoemd.

In de ASTM D7390-18 (ASTM International, 2018) wordt aangegeven dat verschillende soorten oppervlak asbestvezels op verschillende manieren afgeven. In deze standaard wordt aangegeven wanneer de microvacuüm-methode (ASTM D5755-09) of de veegmethode (ASTM D6480-19) de voorkeursmethode is. Zo wordt de veegmethode afgeraden in geval van harde onregelmatige oppervlakken (zoals baksteen of ruw beton) en zachte onregelmatige oppervlakken (zoals tapijt of vezelglas). In deze standaard worden ook factoren beschreven die van belang zijn bij het opstellen van een monsternemingsstrategie voor het bemonsteren van gesedimenteerd stof en de interpretatie van de resultaten, zoals:

- Uniformiteit van de stofbelasting (afhankelijk van bijv. de locatie en de schoonmaakfrequentie en -geschiedenis);
- Eigenschappen van het stof (waar komt het vandaan, deeltjesgrootteverdeling, etc.);
- Eigenschappen van het oppervlak (hard/zacht, glad/textuur/onregelmatig, wel/niet statische lading);
- Eerdere verstoringen van het asbesthoudend materiaal (enkelvoudig of meervoudig, mogelijke gradiënt in stofbelasting op basis van afstand tot de bron);
- Verstoring tijdens de bemonstering;
- Omgevingsomstandigheden (temperatuur, vochtigheid, ventilatie);
- Geschiedenis van het gebouw (verstoring van asbesthoudend materiaal in het verleden, asbestsanering in het verleden, renovatie in het verleden, schoonmaakregime, manier van gebruik van het gebouw);
- Monsterneming buiten (voor vergelijk binnen met buiten).

In de ASTM D7390-18 (ASTM International, 2018) worden kleefmonsters niet genoemd. Daarnaast is voor zover bekend geen onderzoek gedaan waarin de drie verschillende technieken die beschikbaar zijn voor het nemen van een stofmonster van een oppervlak met elkaar zijn vergeleken. Hierdoor is een directe vergelijking van de

kleefmonster-methode met de microvacuüm-methode en/of de veegmethode niet mogelijk. Met behulp van zowel de microvacuüm-methode als de veegmethode wordt een grote oppervlak bemonsterd dan met de kleefmonster-methode, wat van invloed is op de representativiteit van het resultaat van een monster. Daar staat tegenover dat zowel een microvacuüm- als een veegmonster sowieso eerst moeten worden bewerkt voordat deze kunnen worden geanalyseerd, terwijl de monstervoorbereiding in geval van een kleefmonster beperkt is. Verder zal de bemonsteringsefficiëntie van de kleefmonster-methode zal verschillen ten opzichte van de twee andere methoden, en speelt het type oppervlak hier ook een belangrijke rol in. Het is mogelijk dat in geval van een zacht onregelmatig oppervlak zoals tapijt de microvacuüm-methode wellicht beter werkt dan de kleefmonster-methode.

In een literatuuronderzoek uitgevoerd door het RIVM (Oomen & Lijzen, 2004) wordt aangegeven dat een probleem bij het bepalen van asbest in zowel stof als lucht is dat verschillende bemonsteringsmethoden verschillende resultaten opleveren. Veegmonsters weerspiegelen bijvoorbeeld doorgaans nauwkeuriger alle opgehoopte asbest, terwijl monsters verzameld met een microvacuüm-methode dat niet doen. Bij het toepassen van ultrasonificatie, dat voor sommige methoden wordt gebruikt in de monstervoorbereiding voor analyse, kan asbest worden vrijgemaakt uit deeltjes (bijvoorbeeld vezelstructuren, restanten) doordat deze uiteenvallen in meerdere vezels. Dit resulteert dan in een overschatting van het aantal vrije, inadembare vezels in de gerapporteerde asbestconcentratie. Ook wordt aangegeven dat als asbest in stof wordt gemeten als indicatie voor eerdere of potentiële toekomstige blootstelling, dit moet worden uitgevoerd op een manier waarmee de hoeveelheid totale inadembare vezels wordt beoordeeld.

Daarnaast is de ook de vergelijkbaarheid van resultaten die zijn verkregen met behulp van verschillende analysemethoden een beperkende factor, zoals recent is beschreven in een onderzoek dat is uitgevoerd binnen het PEROSH-netwerk (Franken et al, 2025). Bij de 'standaard' analyses met SEM en FCM worden andere vezeldefinities aangehouden dan bij analyse met TEM. Voor analyse met SEM en FCM worden de WHO-criteria aangehouden (vezels met een lengte > 5 µm, een breedte tussen 0,25 en 3 µm en een minimale aspectverhouding van 3:1 (WHO, 1986)), terwijl voor analyse met TEM volgens ISO 10312 (ISO, 2019a) en ISO 13794 (ISO, 2019b) een aspectverhouding gelijk aan of groter dan 5:1 met een minimale lengte van 0,5 µm wordt gehanteerd. Voor indirecte analyse met TEM volgens de Franse norm is echter een aspectverhouding gelijk aan of groter dan 3:1 met een minimale lengte van 0,5 µm vereist (ANFOR, 2021). Het gebrek aan harmonisatie tussen de verschillende technieken verhindert een directe vergelijking van de gemeten concentraties.

Bij analyse met SEM volgens ISO 14966 wordt een directe methode toegepast, wat betekent dat het bemonsterde filtermateriaal direct onder de microscoop wordt geplaatst, met beperkte voorbehandeling (bijvoorbeeld verassen van organisch materiaal). Bij analyse met TEM worden zowel een directe als een indirecte methode toegepast. Bij de directe TEM-methode wordt een laagje koolstof direct op het oppervlak van het filter aangebracht door middel van vacuümverdamming. Kleine gedeelten van het met koolstof beklede filter worden overgebracht naar een rooster-materiaal (TEM-grids), waarna het filtermateriaal wordt opgelost. Deze TEM-grids worden onder de microscoop geplaatst om te worden geanalyseerd. Bij de indirecte TEM-methode wordt het filter eerst verast in een zuurstofplasma, waarna de resterende as in water wordt gedispergeerd en gefilterd. Van dit filter worden op dezelfde manier TEM-grids gemaakt als bij de directe methode.

In het algemeen is de resolutie van een transmissie elektronenmicroscoop beter dan die van een scanning elektronenmicroscoop, waardoor korte en dunne asbestvezels beter kunnen worden waargenomen. Als de uitvoeringsmethode (zoals hiervoor beschreven) voorschrijft

dat ook korte en dunne asbestvezels worden meegenomen in de analyse (worden geteld), dan leidt dat tot een hogere numerieke concentratie in vergelijking met de methoden die met SEM worden uitgevoerd en/of waar voor de analyse de WHO-definitie voor respirabele vezels wordt aangehouden. In Nederland ligt de nadruk meestal uitsluitend op het bepalen van de concentratie respirabele asbestvezels (zie paragraaf 3.3.5), waarvoor analyse met SEM voldoende geschikt is.

3.5 Herkomst toetswaarde kleefmonsters

Er is gezocht naar hoe de toetswaarde van 100 asbeststructuren/cm², zoals wordt gehanteerd in de NEN 2990 en de NEN 2991, tot stand is gekomen.

Bij contractonderzoek voor een adviesbureau van een bedrijfsgebouw met kleefmonsters (Tromp, 1997) ontstond de behoefte aan een toetswaarde voor de evaluatie van de resultaten van kleefmonsters. In de jaren erna bleek dat als er gemiddeld over de ruimte minder dan de nu gehanteerde toetswaarde van 100 asbeststructuren/cm² aanwezig waren, het niveau van de toenmalige grenswaarde van 10.000 asbestvezels/m³ (8-uurs tijdgewogen gemiddelde) niet werd overschreden. Op basis van het advies van de Gezondheidsraad (Gezondheidsraad, 2010) is de grenswaarde voor chrysotiel asbest op 1 juli 2014 verlaagd naar 2.000 vezels/m³ (8-uurs TGG), en voor amfibool asbest op 1 januari 2017. De toetswaarde van 100 asbeststructuren/cm² is echter nadien niet gewijzigd.

Er is nagevraagd of er binnen NEN- of ISO-verband gegevens zijn verzameld op basis waarvan de relatie tussen gesedimenteerde asbestvezels en de potentie om opnieuw in de lucht te komen zoals wordt beschreven in de norm is gebaseerd en/of de gebruikte toetswaarde van 100 asbeststructuren/cm² tot stand is gekomen. Hierbij is aangegeven dat deze informatie is gebaseerd op kennis en ervaring die door verschillende onderzoeksinstituten in Nederland, Duitsland, Oostenrijk, Zwitserland en de Verenigde Staten is opgegaan en is ingebracht in de internationale ISO-commissie. Deze gegevens zijn echter niet publiek beschikbaar, zijn niet gepubliceerd, en kunnen dus ook niet worden ingezien. De totstandkoming van de toetswaarde van 100 asbeststructuren/cm², en meer specifiek de gegevens (kwantitatieve onderbouwing) op basis waarvan deze toetswaarde is afgeleid, kon niet worden achterhaald. Er wordt aangenomen dat deze waarde op basis van ervaringen uit de praktijk is ontstaan. Het is dus ook onbekend of deze toetswaarde in alle omstandigheden leidt tot een goede inschatting van de kans op grenswaardeoverschrijding. In de NEN 2991 wordt wel aangegeven dat het risico onder andere afhangt van de mate van activiteit waardoor eventueel aanwezige asbestvezels opnieuw in de lucht kunnen komen, maar ook hierbij wordt verder niet aangegeven welke gegevens hieraan ten grondslag liggen.

In aanloop naar de ontwikkeling van de eerste versie van de NEN 2990 (verschenen in 2005) is door TNO een onderzoek uitgevoerd met als doel om vast te stellen of het additioneel nemen en analyseren van kleefmonsters als onderdeel van de eindbeoordeling substantieel bijdraagt aan het verkrijgen van een grotere zekerheid over het 'asbestveilig' (in de betreffende rapportage aangeduid als 'asbestvrij') opleveren van een gesaneerde ruimte, waarbij er sprake moet zijn van een duidelijke meerwaarde ten opzichte van de gehanteerde technieken (visuele inspectie en luchtmonsters) en de totale (meet)onzekerheid in de verrichting niet mag toenemen (Tempelman & Arzoni, 2004). Hiertoe zijn door deelnemende laboratoria gedurende een proefperiode de resultaten van ruim 320 eindbeoordelingen geregistreerd in een database. Op basis van deze gegevens werd geconstateerd dat in de kleefmonsters genomen tijdens de eindbeoordeling na verwijdering van niet-hechtgebonden asbesthoudende materialen inderdaad regelmatig asbest werd aangetroffen, waarbij na verwijdering van amosiethoudende materialen meer dan gemiddeld resten achterbleven die

tot afkeur leiden. Er werd echter ook geconstateerd dat deze situaties op basis van het consequent uitvoeren van de andere onderdelen van de eindbeoordeling (de visuele inspectie, eventueel in combinatie met luchtmonsters) ook ondubbelzinnig tot afkeur leidden. Verder werd aangegeven dat de combinatie van vegen en wapperen als een goede methode werd beschouwd om verborgen restanten aan respirabele asbestvezels in de lucht te brengen, wat zonder meer leidde tot afkeur van de ruimte. Verder werd aangegeven dat de analyse van kleefmonsters met behulp van FCM soms leidde tot vals-positieve resultaten omdat de aanwezige vezels niet werden geïdentificeerd, leidend tot het advies om kleefmonsters met behulp van SEM/RMA te analyseren (de huidige standaard). Op basis van de resultaten van het gehele onderzoek is toen aanbevolen om kleefmonsters niet op te nemen in de norm, maar meer aandacht te besteden aan de consequente uitvoering van de visuele inspectie en actieve monsterneming.

In dit onderzoek uit 2004 werd bij het aantreffen van meer dan drie asbestiforme vezelbundels of structuren (bij analyse met SEM) ervan uitgegaan dat de ruimte nog verontreinigd was (Tempelman & Arzoni, 2004). Deze toetswaarde komt overeen met de analytische gevoeligheid van de methode.

4 Parameters

In dit hoofdstuk worden de parameters beschreven die van invloed kunnen zijn op sedimentatie en/of resuspensie. Sommige van deze parameters worden in de onderzochte literatuur wel genoemd maar niet verder toegelicht, waardoor de beschikbare informatie voor deze parameters vrij beperkt is.

4.1 Adhesie

Gesedimenteerde asbestvezels komen niet gemakkelijk opnieuw vrij aan de lucht. Er is activiteit door bijvoorbeeld lopende mensen of een kracht zoals bijvoorbeeld een luchtstroom door een stofzuiger nodig om te zorgen dat de asbestvezels loskomen van het oppervlak waarop deze zijn gesedimenteerd. Met adhesie wordt het 'vastplakken' van vezels aan een oppervlak bedoeld.

Esmen (1996) beschrijft dat er een specifieke kracht nodig is om de adhesie van een vezel aan het oppervlak waarop het is neergeslagen op te heffen. Adhesie ontstaat door moleculaire interacties, die voornamelijk worden vertegenwoordigd door Londen-van der Waals krachten, elektrostatistische krachten en capillaire condensatie. Ook de diameter van de vezel is bepalend voor de mate van adhesie, die in relatie tot inademing van asbestvezels wordt beschreven als de aerodynamische diameter. Bij ongeladen deeltjes en/of een goed gearde ondergrond is elektrostatistische aantrekking uitgesloten. Indien er echter geen moeite wordt gedaan om elektrische aantrekking uit te sluiten zal er altijd in zekere mate sprake zijn van elektrostatistische aantrekking. Bij het verwijderen van asbesthoudend stof op elektrische componenten of kabels is dit effect bijvoorbeeld zeer nadrukkelijk aanwezig. Capillaire condensatie beschrijft de oppervlaktespanning van de condensatielaag van vloeistof (water) tussen deeltjes en een oppervlak. De capillaire condensatie is afhankelijk van de relatieve luchtvochtigheid. In de theoretische benadering van Esmen draagt relatieve luchtvochtigheid voor gemiddeld 0,9% bij aan de adhesie. Ook de oriëntatie van de deeltjes (vezels, anisometrisch of ongelijkvormig) is van belang. Hiermee wordt bijvoorbeeld bedoeld dat een luchtstroom in de lengterichting van een vezel minder effect zal hebben dan een luchtstroom op de volle lengte van een vezel. Gesedimenteerde deeltjes die worden blootgesteld aan een externe kracht (bijvoorbeeld beweging van de lucht) gaan eerst rollen voordat ze 'loslaten'. In dit geval is er sprake van 'adhesive drag' of wrijving in plaats van adhesie. Op basis van een theoretische benadering heeft Esmen uitgerekend dat voor ongeladen vezels met een diameter van 8,6 μm en een lengte van 43 μm bij een relatieve luchtvochtigheid van 50% de minimale snelheid van de lucht in de richting van het oppervlak waarop de vezels liggen die nodig is om deze vezels te laten resuspenderen 10,2 en 20,7 m/s is voor respectievelijk een meervoudige en een enkelvoudige laag vezels. In de praktijk zal de mate resuspensie onder invloed van elektrostatistische krachten, de oriëntatie van de vezels en/of een hoge vochtigheid echter lager zijn. Esmen (1996) heeft zijn theoretische benadering experimenteel bevestigd door het observeren van het gedrag van enkele neergeslagen vezels in turbulente luchtstroming. Op basis hiervan concludeerde Esmen (1996) dat het onwaarschijnlijk is dat vezels met een diameter kleiner dan 9 μm (biologisch relevante vezels) in significante hoeveelheden zullen resuspenderen bij een luchtsnelheid van 10 m/s (=36 km/uur). Dergelijke luchtsnelheden komen onder normale omstandigheden in een binnen situatie over het algemeen niet voor. Hoewel in het onderzoek van Esmen (1996) resuspensie door mechanische invloeden niet is meegenomen, neemt Esmen aan dat de invloed van

mechanische invloeden (bijvoorbeeld schoonmaken, spelen in het stof etc.) van groter belang is dan uitsluitend het creëren van een luchtstroom. Ook was het onderzoek gericht op cilindervormige vezels, wat betekent dat de resultaten niet direct kunnen worden vertaald naar asbestvezels, aangezien deze een andere vorm hebben. Amfibole asbestvezels zijn in de lengte recht en in de doorsnede niet volledig cilindervormig (hoewel dat vaak wordt aangenomen). Chrysotielvezels zijn in de lengte slangvormig (krullerig) en in de doorsnede vrijwel cilindervormig. Verwacht wordt dat korte chrysotielvezels zich grotendeels vergelijkbaar zullen gedragen als de cilindervormige vezels zoals zijn meegenomen in het onderzoek.

In het blootstellingsmodel Asbestos Removal Exposure Assessment Tool (AREAT) wordt de 'Substance Emission Potential' van een asbesthoudende toepassing, dat wil zeggen de potentie tot emissie van asbestvezel, bepaald op basis van het soort asbesthoudende toepassing, het gehalte en het soort asbest in de asbesthoudende toepassing en de vochtigheid van het materiaal (Franken et al., 2021; Franken et al., 2023). Hierbij wordt aangenomen dat het vochtgehalte van de asbesthoudende toepassing van invloed is op de mate waarin vezels vrij kunnen komen: hoe vochtiger de asbesthoudende toepassing, hoe minder makkelijk asbestvezels vrijkomen. In AREAT zijn verder verschillende bevochtigingsmethoden opgenomen als bronmaatregel. Uitgangspunt hierbij is dat door de aanwezigheid van vocht in de lucht nabij de asbesthoudende toepassing en/of op het oppervlak van de asbesthoudende toepassing de asbestvezels minder snel vrijkomen, en de asbestvezels die vrijkomen tijdens het verwijderen zwaarder worden en hierdoor sneller zullen sedimenteren, waardoor de asbestvezels zich minder (ver) verspreiden in de lucht. Het toepassen van bevochtigingsmethoden zal in bijvoorbeeld een afgesloten ruimte over het algemeen resulteren in een hogere relatieve vochtigheid in deze ruimte.

In de NEN 2990 wordt de relatieve luchtvochtigheid in een containment meegenomen als criterium om een eindbeoordeling te kunnen uitvoeren. Men neemt aan dat als de relatieve luchtvochtigheid in het containment 10% hoger ligt dan buiten het containment de relatieve luchtvochtigheid in het inspectiegebied verhoogd is, bijvoorbeeld door een natte reiniging. In dat geval moet de eindbeoordeling worden uitgesteld. Het is onduidelijk op basis van welke informatie is gekozen om hierbij een verschil van 10% in relatieve vochtigheid als afkappunt te gebruiken.

Wilmoth, Powers & Millette (1991) stellen dat het vrijkomen van asbestvezels uit verouderde en verslechterde asbesthoudende materialen afhankelijk is van factoren zoals activiteit in de omgeving, trillingen, temperatuur, luchtvochtigheid, luchtstromingen, gebruikspatronen, etc.. Uit onderzoek waar het bemonsteren van gesedimenteerde deeltjes door toepassing van vacuümtechnieken (vergelijkbaar met stofzuigen) werd toegepast is gebleken dat voor bemonstering een lokale luchtstroom met snelheden rond 160 km/uur (44 m/s) nodig zijn om de adhesie van kleine deeltjes ($<2\text{ }\mu\text{m}$) aan een oppervlak te overwinnen. Uit een vergelijking van drie methoden voor het bemonsteren van stof op harde oppervlakken is de efficiëntie het hoogst voor het gebruik van tape (~60-98%), gevolgd door filter papier (~60-90%) en een micro-vacuümtechniek (~10-60%). De efficiëntie was bij over het algemeen het hoogst voor deeltjes groter dan $5\text{ }\mu\text{m}$, en het laagst voor agglomeraten kleiner dan $10\text{ }\mu\text{m}$. Ze stellen ook dat tapijt zich gedraagt als een reservoir voor asbestvezels. In het onderzoek is tapijt bemonsterd met behulp van een micro-vacuümtechniek of door een stuk tapijt uit te snijden en te behandelen met ultrasoon (ultrasoonreiniging). In de tapijtmonsters werd na ultrasoonreiniging 20-100 keer meer asbestvezelstructuren aangetroffen dan in de monsters die waren verzameld met behulp van de micro-vacuümtechniek. Hierbij dient te worden opgemerkt dat door de ultrasoon-behandeling van het tapijt conglomeraten worden

opgedeeld, waardoor de resultaten van beide methoden niet goed met elkaar te vergelijken zijn.

Baron & Deye (1990) hebben onderzoek gedaan naar het effect van elektrostatische lading van asbestvezels op de bemonstering op een filter van asbest in de lucht. Door ladingseffecten tijdens het bemonsteren kunnen de banen die de deeltjes afleggen veranderen, wat kan resulteren in een niet-uniforme belading van het filtermateriaal en netto monsterverlies. De grootte van deze elektrostatische effecten hangt af van de lading van de deeltjes, de lading en de geleidbaarheid van de monsternametekop, het debiet en de richting van de luchtstroom. Vochtigheid is verondersteld een primaire bepalende factor voor het ontstaan van lading tijdens de emissie van deeltjes te zijn. In experimenten zijn de lading en concentratie van asbestvezels (chrysotiel) gemeten als functie van relatieve vochtigheid. Bij een luchtvochtigheid van onder de 15% relatieve luchtvochtigheid namen de lading van de vezels toe en nam de gemeten concentratie af. De elektrische mobiliteit van deeltjes neemt af bij een hogere luchtvochtigheid. Dit wil zeggen dat deeltjes (inclusief asbestvezels) zich gemakkelijk door de lucht bewegen als de luchtvochtigheid lager is. Ook werden de effecten van geleidende en niet-geleidende monsternametekoppen en debiet gemeten als functie van de lading van de vezels en de monsternametekoppen. Het gebruik van geleidende monsternametekoppen resulteert in een meer symmetrische en een mindere voorkeursverdeling van geladen deeltjes op een filteroppervlak ten opzichte van niet-geleidende monsternametekoppen. Het verhogen van het debiet zal de monsternametefficiëntie vergroten en variatie in de depositie op het filter verkleinen omdat de geladen deeltjes minder tijd hebben om te reageren op het veld dat wordt veroorzaakt door de monsternametekop.

Monsternametekoppen van transparant materiaal, bijvoorbeeld polystyreen of polycarbonaat, zijn niet geleidend. Monsternametekoppen van metaal of van met grafiet gevulde kunststoffen zijn wel geleidend. In NEN-ISO 14966 wordt het gebruik van geleidende monsternametekoppen voorgeschreven om het effect van geladen asbestvezels op de monsternametefficiëntie teniet te doen. In de NEN 2990 wordt het gebruik van geleidende monsternametekoppen niet voorgeschreven. In de NEN 2991 is geen beschrijving van de te gebruiken apparatuur en middelen opgenomen en wordt voor de analyse van luchtmonsters verwezen naar de ISO 14966.

4.2 Vezeldimensies

Liddell & Miller (1991) beschrijven dat het aerodynamische gedrag van vezels niet direct uit de geometrische diameter kan worden afgeleid. Door hun verlengde vorm (aspectverhouding, lengte gedeeld door diameter) en bijbehorende vormfactor wijkt hun gedrag af van dat van bolvormige deeltjes. De auteurs beschrijven dit gedrag aan de hand van de aerodynamische equivalente diameter (AED): de diameter van een bol met een referentiedichtheid van 1 g/cm^3 die dezelfde sedimentatiesnelheid ² heeft als de vezel. Met de AED worden effecten van grootte, vorm en dichtheid samengebracht in één maat. Vezels met een hoge aspectverhouding gedragen zich aerodynamisch alsof zij kleiner zijn dan hun geometrische diameter (AED is lager), deze vezels sedimenteren langzamer en blijven dus langer in de lucht. Tot een AED van circa 30–35 μm kan dit gedrag nog worden beschreven met klassieke aerodynamica, mits de vormfactor wordt meegenomen. In dit bereik bepalen met name oriëntatie en effectieve projectieoppervlakte de luchtweerstand. Bij grotere AED-waarden nemen inertiaële effecten (massatraagheid) toe: de vezel volgt veranderingen in de luchtstroom minder goed, waardoor één enkele equivalente diameter het gedrag van de

² Constante valsnelheid bij evenwicht tussen zwaartekracht en luchtweerstand

vezel niet meer volledig beschrijft. Bij zeer kleine vezels treedt het slip-effect op, en wijkt het gedrag af van de klassieke aerodynamica, omdat gasmoleculen niet meer continu langs het oppervlak bewegen. Voor vezels met een AED kleiner dan circa 1 μm (typisch diameters < 0,2 μm en lengtes van enkele tot tientallen μm) leidt dit tot een afname van de aerodynamische weerstand. Hierdoor is de sedimentatiesnelheid hoger dan op basis van klassieke aerodynamica wordt voorspeld.

Ondanks verschillen in aerodynamische weerstand en sedimentatiesnelheid wordt in de praktijk het gedrag van kleine vezels voor een groot deel bepaald door het meebewegen met luchtstromingen. Bij zeer kleine vezels is transport door luchtstroming en diffusie dominant ten opzichte van sedimentatie. Deze zeer kleine vezels gedragen zich in toenemende mate als aerosolen of zelfs quasi-moleculair, waarbij processen zoals Brownse diffusie, convectie en turbulentie het transport bepalen. Hierdoor blijven zij langdurig in suspensie en sedimenteren zij pas nadat zij bijvoorbeeld agglomereren met grotere deeltjes of in contact komen met oppervlakken (Liddell & Miller, 1991).

In het onderzoek van Liddell & Miller (1991) wordt geen onderscheid gemaakt tussen chrysotiel- en amfiboolvezels. Chrysotielvezels vertonen vaak een gebogen (serpentine) morfologie, terwijl amfibole vezels overwegend recht zijn. Deze vormverschillen kunnen de aerodynamische weerstand beïnvloeden: een gebogen vezel zal zich gemiddeld minder efficiënt uitlijnen met de stroming en daardoor een hogere weerstand ervaren, wat kan leiden tot een lagere sedimentatiesnelheid. De mate waarin dit optreedt hangt af van factoren zoals diameter, lengte, dichtheid en oriëntatie van de vezel, waardoor er geen eenduidig verschil in sedimentatiesnelheid kan worden vastgesteld tussen chrysotiel- en amfiboolvezels. Daarnaast hebben chrysotielvezels door hun structuur een grotere neiging tot agglomeratie (klitten), wat ook wordt benut in asbesthoudende toepassingen zoals koord en asbestcement. Hierdoor komen bij bijvoorbeeld beschadiging, breuk of slijtage over het algemeen grotere deeltjes (vezelagglomeraten) met een hogere effectieve aerodynamische diameter vrij, waarbij de massa sterker toeneemt dan de luchtweerstand. Dit leidt tot een hogere sedimentatiesnelheid. Hierdoor zullen chrysotielvezels onder praktijkomstandigheden sneller uit de lucht verdwijnen dan op basis van individuele vezelafmetingen en vorm alleen zou worden verwacht.

Oomen & Lijzen (2004) geven aan dat depositie van asbestvezels, afhankelijk van de aerodynamische diameter, plaatsvindt door Brownse diffusie, interceptie (afvangen) en impactie (botsen). De zeer fijne vezels gedragen zich ongeveer als moleculen en bewegen volgens Brownse diffusie, waardoor ze samenklonteren met grotere huisstofdeeltjes voordat ze sedimenteren. In dit rapport wordt ook aangegeven dat de resuspensiesnelheid van deeltjes afhankelijk is van de deeltjesgrootte. Deeltjes met een diameter van 5-25 μm resuspenden het gemakkelijkst en zelfs lichte activiteit (zoals in en uit de kamer lopen) kan een significante invloed hebben op de concentratie van in de lucht zwevende deeltjes groter dan 5 μm , terwijl deeltjes van 0,3-1 μm niet worden beïnvloed door schoonmaken of lopen.

Liddell & Miller (1991) beschrijven ook dat de mate van sedimentatie wordt beïnvloed door onder andere zwaartekracht, ervaren aerodynamische weerstand (drag), en het aan elkaar vastplakken van deeltjes door adhesie bij contact (impactie) met andere deeltjes in de lucht (vorming van agglomeraten) of contact met bijvoorbeeld de wanden van een ruimte of het meubilair. Op plaatsen waar de luchtsnelheid laag is, bijvoorbeeld plaatsen waar weinig turbulentie of activiteit is zoals direct naast een muur of een kast, zullen het stof en de asbestvezels in het stof sneller sedimenteren. In de hoeken en bij de wanden van een ruimte vindt men dus over het algemeen meer gesedimenteerde stof. De locatie waar monsters zijn genomen, onderdeel van de toegepaste bemonsteringsstrategie, is dus van belang voor de interpretatie van de resultaten van de verzamelde monsters.

Sahmel et al. (2015) onderzochten hoe snel chrysotielvezels uit de lucht verdwijnen door sedimentatie nadat de activiteiten waardoor de vezels in de lucht werden gebracht stopten. De concentratie chrysotiel gemeten in de ademhalingszone nam met 86% af binnen 15-30 minuten na het stoppen van de activiteit. De geschatte gemiddelde tijd die nodig was om 99% van vezels uit de lucht te verwijderen was ongeveer 30 minuten (95% betrouwbaarheidsinterval 22-57 minuten). De waargenomen effectieve sedimentatiesnelheid was 0,0034 m/s, ofwel 12 meter in een uur. Deze waargenomen sedimentatiesnelheid was tussen de 4,5 en 180 keer sneller dan de sedimentatiesnelheid zoals voorspeld met behulp van twee verschillende gravitationele bezinkingsmodellen voor deeltjes. Bovendien namen de gemeten concentraties ongeveer 2,5 keer sneller af dan werd voorspeld op basis van alleen luchtverversing (32 minuten versus 79 minuten voor een 99% afname van de concentratie bij een luchtverversing van 3,5 verversingen per uur). Sahmel et al. geven aan dat in andere onderzoeken vergelijkbare verwijderingssnelheden van vezels in de lucht zijn gerapporteerd, wat de aanname ondersteunt dat andere factoren dan alleen gravitationele sedimentatie en ventilatie bijdragen aan de verwijdering van (chrysotiel)vezels uit de lucht, zoals: van der Waals krachten, elektrificatie, impactie op andere oppervlakken, centrifugatie, agglomeratie, Brownse beweging en diffusie.

In een experimenteel onderzoek zijn na afloop van experimenten waarbij asbesthoudend materiaal (asbestcement golfplaten en amosietboard) droog werd gebroken in de afgesloten ruimte stationaire metingen uitgevoerd om het concentratieverloop in kaart te brengen (Spaan et al., 2021). Tijdens deze metingen werd in de afgesloten ruimte activiteit gesimuleerd met behulp van ventilatoren. Na het bewerken (breken) van asbesthoudend materiaal, waarbij veel vezels vrijkwamen, werd over de tijd een duidelijk afname van de asbestvezelconcentratie in de lucht waargenomen, waarbij met name in de periode direct na het stoppen van het bewerken (de activiteit), sprake was van een sterke daling. De concentratie na het droog breken van asbestcement golfplaat liep relatief meer terug dan na het droog breken van amosietplaat. Welke factoren en mechanismen hier precies op van invloed zijn is niet bekend. Zoals hierboven ook wordt beschreven wordt bijvoorbeeld aangenomen dat tijdens het breken van amosietplaat relatief gezien meer losse amosietvezels vrijkomen dan dat er losse chrysotielvezels vrijkomen tijdens het breken van asbestcement golfplaten. Over het algemeen plakken chrysotielvezels door hun vorm meer aan elkaar en zijn deze in asbesthoudend materiaal meer als bundels aanwezig, waardoor deze vezels relatief gezien minder gemakkelijk vrijkomen uit een matrix dan amfibole asbestvezels. Verder wordt aangenomen dat in geval van continue luchtverplaatsing amfibole asbestvezels makkelijker weer in de lucht komen dan chrysotielvezels doordat chrysotielvezels meer aan elkaar plakken waardoor de massa groter wordt en deze door hun vorm ook meer aan het oppervlak blijven plakken waarop ze zijn gesedimenteerd.

4.3 Ventilatie en luchtstromen

In de meeste verblijfsruimten zal een vorm van ventilatie aanwezig zijn. Door het ventileren van een gebruikruimte wordt een luchtstroom gecreëerd, waardoor eventueel in de lucht aanwezige asbestvezels (deels) worden verwijderd. In geval van mechanische ventilatie zullen afgezogen asbestvezels (grotendeels) neerslaan in bijvoorbeeld de afzuigkanalen, het plenum, de stoffilters en de luchtbehandelingskasten, en zullen dus niet neerslaan op de oppervlakken in de ruimte waar ze zijn vrijgekomen. In welke mate de asbestvezels in de lucht worden afgevoerd hangt af van de mate van ventilatie in de ruimte en de locatie van de afzuigpunten. De voorgeschreven ventilatievoud voor bedrijfsruimtes is globaal 3 tot 6 liter/seconde per vierkante meter (Bbl).

Bij asbestsaneringen in risicoklasse 2(a) moet het werkgebied in principe worden afgeschermd om verspreiding van asbestvezels naar de omgeving buiten het werkgebied te voorkomen. Hierdoor wordt onder andere voorkomen dat een werkgebied in zijn geheel of een groot gebied buiten wordt verontreinigd en moet worden schoongemaakt, en wordt voorkomen dat passanten, andere medewerkers die in de buurt aan het werk zijn (omstanders) of omwonenden worden blootgesteld aan asbest (voorkomen van secundaire blootstelling aan asbest). Een containment is een voorbeeld van een afgeschermd en actief geventileerd werkgebied. Door middel van één of meerdere onderdruk machines (ODM) wordt de lucht in het containment ververst. In de certificatieregelingen wordt voor een containment een ventilatievoud van minimaal zes verversingen per uur voorgeschreven. De afgezogen lucht gaat via het HEPA-filter van de ODM naar buiten, waardoor de asbestvezels uit de lucht worden gefilterd alvorens deze als “schone lucht” het containment uit wordt gelaten.

In ventilatiemodellen wordt aangenomen dat de luchtventilatie c.q. de ventilatievoud het belangrijkste mechanisme is dat deeltjes verwijdert uit een ruimte, door mechanismen als verdunning, diffusie, turbulente Eddy diffusie en advection (het meeliften op een medium door materie, energie of een bepaalde eigenschap; een voorbeeld hiervan is wegwaaien). In de ventilatiemodellen wordt over het algemeen geen rekening gehouden met fysieke eigenschappen van deeltjes, zoals gas of vast deeltjes, oppervlakte eigenschappen, afmetingen, elektrische lading en vorm (Sahmel et al., 2015).

Wanneer de luchtstroming de ruimte niet volledig omvat zal de lucht in de ruimte niet overal in dezelfde mate worden ververst. Lucht neemt de kortste route. Een verkeerd geplaatste ODM kan ervoor zorgen dat niet overal voldoende luchtverversing plaatsvindt en er dus dode hoeken (plaatsen waar geen luchtstroom is) ontstaan. Er ontstaat dan een soort snelweg tussen de afvoer- en toevoerlocaties van de lucht, waardoor verse lucht via de ODM direct het afschermd werkgebied weer uitstroomt. Om dode hoeken te voorkomen wordt de ODM bij voorkeur en indien dat mogelijk is zo ver mogelijk van de luchtsluis vandaan geplaatst.

Daarnaast zorgen obstructies in de luchtstroom voor het neerslaan van stof door middel van impactie. Wanneer lucht wordt gedwongen een scherpe bocht te maken komen de deeltjes in de lucht in contact met de obstructie (bijvoorbeeld een wand of een object), en blijven daar ‘vastplakken’. Een rooster boven een retourluchtinlaat heeft bijvoorbeeld over het algemeen een hogere stofbelasting dan omliggende gebieden. De hoeveelheid stof die op een rooster wordt verzameld wordt beïnvloed door het volume en de snelheid van de luchtstroom, het ontwerp van het rooster, de hoeveelheid turbulentie en de hoeveelheid stof in de luchtstroom. Ook wanneer de ruimte boven een plafond wordt gebruikt als retourluchtplenum kan de stofbelasting op de bovenkant van het plafond een gradiënt vertonen die overeenkomt met het volume en de snelheid van de retourlucht. Stof kan zich dus concentreren in gebieden waar de richting van de luchtstroming verandert, met een plaatselijke toename op elke locatie waar sprake is van turbulentie (wervelende luchtstroom). Ook op plaatsen waar de luchtsnelheid laag is, bijvoorbeeld plaatsen waar weinig turbulentie of activiteit is, zoals direct nabij naast een muur of een kast, zal stof sneller sedimenteren (Liddell & Miller, 1991). In de hoeken en bij de wanden van een ruimte vindt men dus over het algemeen meer gesedimenteerd stof.

Bij het bepalen van de bemonsteringsstrategie voor het vaststellen van een (potentieel) blootstellingsrisico is het belangrijk om rekening te houden met de mate van ventilatie van en de luchtstromen in een ruimte. De locatie waar monsters zijn genomen is bijvoorbeeld van belang voor de interpretatie van de resultaten van monsters van gesedimenteerd stof.

4.4 Temperatuur

Morawska & Salthammer (2003) geven aan dat temperatuur bij sedimentatie van stof een significante factor is. Door temperatuurverschillen kan convectiestroming en thermoforetische depositie ontstaan, wat wil zeggen dat deeltjes van verschillende groottes zich verschillend gedragen wanneer er sprake is van een temperatuurgradiënt. Door het grote aantal andere factoren dat van invloed is op de mate van sedimentatie is het moeilijk dit effect te isoleren en te kwantificeren.

Hoewel dit niet expliciet wordt benoemd in de publicaties die in dit verkennende literatuuronderzoek zijn geëvalueerd kan worden aangenomen dat de temperatuur in een ruimte ook van invloed is op de relatieve luchtvochtigheid in een ruimte, namelijk in relatie tot het dauwpunt. Het dauwpunt is de temperatuur waarbij de lucht verzadigd raakt met waterdamp en de waterdamp begint te condenseren tot vloeibaar water (dauw). Als een object (bijvoorbeeld een betonvloer) koud is ten opzichte van de lucht kan het punt worden bereikt waarop het water in de warmere lucht zal condenseren op het koudere oppervlak. Zoals in paragraaf 4.1 wordt weergegeven is de relatieve luchtvochtigheid en de aanwezigheid van water van invloed op de sedimentatie van vezels in de lucht en op de adhesie van vezels op een oppervlak.

4.5 Activiteit

In de voorgaande paragrafen is de invloed van activiteit op de mate van sedimentatie en resuspensie al een aantal keer (zijdelings) voorbij gekomen. In deze paragraaf wordt informatie over de invloed van activiteit uit andere onderzoeken beschreven.

Guillemin et al. (1989) hebben in 12 gebouwen waarin hechtgebonden en niet-hechtgebonden asbesthoudend isolatiemateriaal aanwezig was verschillende manieren voor het beoordelen van blootstelling met elkaar vergeleken. De auteurs concluderen onder andere dat resuspensie van gesedimenteerde asbestvezels een van de belangrijkste bronnen van blootstelling aan asbest in deze gebouwen is, en dat dit samenhangt met de activiteiten van aanwezige mensen in de betreffende ruimte, vergeleken met andere factoren zoals ventilatie, luchtbewegingen en trillingen. De auteurs stellen dat trillingen van de vloer, die zij hebben gebruikt als indicatie van de aanwezigheid van de bewoners, de meest relevante factor is voor het in kaart brengen van de werkelijke blootstellingsperiode.

In het onderzoek van Qian & Ferro (2008) werd het aantal deeltjes dat per tijdseenheid door activiteit van een oppervlak in de lucht terecht komt gemeten. Er is gebruik gemaakt van gedefinieerde testdeeltjes van 0,1-10 µm in plaats van asbestvezels. De experimenten werden uitgevoerd met drie typen vloerbedekking (vinyltegels, nieuwe en oude tapijten). De concentratie in de lucht werd gemeten met behulp van optische deeltjestellers. Tijdens de metingen werd de ruimte geventileerd. Activiteit werd gecreëerd door te lopen, te zitten en te tikken met de voeten tijdens het zitten. De geschatte resuspensiesnelheden varieerden tussen 10-5-10-2 deeltjes per uur, waarbij grotere deeltjes werden geassocieerd met hogere resuspensiesnelheden. Lopen door de ruimte resulteerde in een grotere mate van resuspensie. De variabiliteit in het lopen van persoon tot persoon, die wordt bepaald door looptempo, loopstijl en schoentype, bleek een bepalende factor te zijn. Onder dezelfde experimentele omstandigheden werd tijdens 'zwaar en snel' lopen meer resuspensie waargenomen dan tijdens minder actief lopen. Hoe voet-vloer interacties de mate van resuspensie van deeltjes beïnvloeden behoeft meer onderzoek. De onderzoekers verwachtten dat het swirl-effect van een mens die door de lucht heen beweegt een belangrijke factor is, evenals de snelheid en de interactie van het elektrisch veld dat een

mens bij zich draagt ten opzichte van de vloer. Wanneer een persoon alleen zat nam de concentratie langzaam af (door sedimentatie en ventilatie) en wanneer de persoon tikte met de voeten tijdens het zitten nam de concentratie langzamer af. De mate van resuspensie was voor grotere deeltjes (1,0-10 μm) lager voor de harde vloer dan voor het nieuwe tapijt. Er werd geen significant effect op de resuspensie van deeltjes gevonden voor een relatieve luchtvochtigheid tussen 30-50%, maar de onderzochte range in relatieve luchtvochtigheid omvat niet de volledige range die relevant is voor het binnenmilieu.

In het rapport van Oomen & Lijzen (2004) wordt aangegeven dat het aantal personen dat in een woning woont significant was geassocieerd met verhoogde hoeveelheden huisstof die per dag sedimenteren. Hierbij wordt aangegeven dat dit waarschijnlijk het gevolg is van meer activiteiten binnenshuis, zoals stofzuigen, vegen, schoonmaken en spelende kinderen. Hoewel dit niet in het rapport wordt benoemd wordt aangenomen dat de absolute hoeveelheid huisstof die in een huis aanwezig is en kan sedimenteren en/of resuspenderen ook samenhangt met het aantal personen dat in een woning woont, aangezien huidschilfers een belangrijke component van huisstof zijn.

4.6 Resuspensiefactor

De verhouding tussen de concentratie in het stof versus die in de lucht wordt de resuspensiefactor genoemd. De resuspensiefactor wordt aangeduid met de letter K ofwel de benaming 'K-factor', en kan worden gedefinieerd als de verhouding tussen de concentratie deeltjes in de lucht (stuks per volume) en de concentratie deeltjes op een oppervlak na sedimentatie (stuks per oppervlak), of uitgedrukt in een formule $K = C_{\text{lucht}} / C_{\text{oppervlak}}$ (m^{-1}) (Chatfield, 1999). Voor het bepalen van een resuspensiefactor is het van belang dat de eenheden die worden gebruikt voor het weergeven de concentratie vezels die in de lucht (C_{lucht}) en de concentratie asbestvezels op een oppervlak ($C_{\text{oppervlak}}$) op elkaar worden afgestemd.

Om de resuspensiefactor of K-factor af te kunnen leiden wordt een hoeveelheid asbestvezels in de lucht gebracht. Nadat de asbestvezels als gevolg van het ontbreken van elke vorm van activiteit zijn neergeslagen wordt vervolgens de concentratie asbestvezels dat is gesedimenteerd bepaald ($C_{\text{oppervlak}}$). Na het bemonsteren van het oppervlak moeten de vezels door activiteit (en bij gecontroleerde omstandigheden) opnieuw in de lucht worden gebracht en moet de concentratie in de lucht na resuspensie worden bepaald (C_{lucht}). Het moment waarop de monsters worden verzameld is bepalend voor of de resultaten kunnen worden gebruikt om een resuspensiefactor af te leiden. De monsternamen zoals beschreven in de volgende situaties is niet geschikt voor het bepalen van een resuspensiefactor:

- De concentratie asbestvezels (of deeltjes) in de lucht wordt eerst bepaald (C_{lucht}), vervolgens laat men de in de lucht aanwezige asbestvezels volledig neerslaan, en dan wordt de concentratie asbestvezels op het oppervlak bepaald ($C_{\text{oppervlak}}$). Op deze manier wordt niet de mate van resuspensie maar de mate van sedimentatie in kaart gebracht. Om daadwerkelijk een sedimentatiefactor te kunnen bepalen is het echter wel van belang dat het oppervlak bij aanvang van de meting schoon is (geen asbestvezels aanwezig).
- De concentratie asbestvezels in de lucht en de concentratie asbestvezels in het stof op een oppervlak worden gelijktijdig bepaald. Dit is in onderzoeken conform NEN 2991 soms het geval. De meetresultaten zijn in dit geval niet direct aan elkaar gerelateerd en kunnen daarom niet worden gebruikt om een resuspensiefactor af te leiden.

De parameters die in de voorgaande hoofdstukken zijn beschreven, zoals adhesie en activiteit, zijn van invloed op de meetresultaten. De omstandigheden waarbij wordt gemeten

zijn dus van invloed op de uiteindelijke resuspensiefactor. Verder is het voor het vaststellen van de resuspensiefactor van belang dat de analysemethoden op elkaar worden afgestemd, bijvoorbeeld met betrekking tot de telregels en de vergrotingen die worden toegepast. Voor alle monsters (dus ook van monsters die worden genomen van het oppervlak) moet de hoeveelheid (respirabele) asbestvezels die potentieel in de lucht kan komen worden bepaald.

In de literatuur is gezocht naar onderzoeken waarin een K-factor is afgeleid of waarbij op basis van de resultaten een K-factor zou kunnen worden afgeleid. Voor de interpretatie van deze informatie moet rekening worden gehouden met de omstandigheden waarbij deze onderzoeken zijn uitgevoerd, en of bijvoorbeeld de invloed van de voornoemde parameters (zoals adhesie) is meegenomen. Ook moet er rekening mee worden gehouden dat de concentraties asbestvezels in het stof en in de lucht zoals ze zijn gemeten afhangen van de meetmethode die is toegepast, en dus methodebepaald zijn. Als een andere analyse- of bemonsteringsmethode wordt toegepast dan kan de numerieke concentratie asbestvezels ook anders zijn.

Chatfield (1999) heeft onderzoek gedaan naar de resuspensiefactor voor chrysotiel. In dit experimentele onderzoek werden chrysotielvezels vrijgemaakt aan de lucht door het materiaal te beschadigen, en werd de concentratie in de lucht gemeten. Deze concentratie in de lucht werd vergeleken met de asbestvezels en -restanten die door hun grootte en gewicht direct neersloegen. In dit onderzoek is een vacuümtechniek gebruikt (waarbij de recuperatie mogelijk verschilt van die van kleefmonsters), en zijn de verzamelde monsters geanalyseerd met TEM (waarbij ook dunne en korte asbestvezels worden waargenomen). Chatfield (1999) kwam echter achteraf tot de conclusie dat het bepalen van een resuspensiefactor op basis van de toegepaste methoden geen geldige wetenschappelijke basis bood voor het voorspellen van concentraties chrysotiel in de lucht. Dit komt doordat de vezels en restanten die zijn bemonsterd op het oppervlak niet vanuit de lucht zijn gesedimenteerd, maar direct afkomstig waren van het asbesthoudende materiaal dat werd beschadigd, en (grotendeels) niet de potentie hadden om in de lucht te komen. Verder kan worden aangenomen dat de concentratie die in de lucht is gemeten niet de concentratie is die daar als gevolg van resuspensie is gekomen.

Kelman, Millette & Bell (2014) hebben door middel van simulatieonderzoek een resuspensiefactor tijdens het schoonmaken van een met asbest verontreinigde ruimte bepaald. Het schoonmaken bestond uit het stofzuigen van de vloer (30 minuten) en het afstoffen van alle geschikte oppervlakken in de ruimte. Voorafgaand aan het schoonmaken werden met behulp van een micro-vacuüm methode op zes locaties stofmonsters genomen en is één stationaire luchtmeting uitgevoerd. Tijdens het schoonmaken werden één stationaire en vier persoonlijke luchtmetingen uitgevoerd. De verzamelde monsters zijn geanalyseerd met behulp van TEM en twee van de persoonlijke metingen met FCM. De gemeten concentraties asbest in de lucht en in het stof waren zeer hoog, en het type asbest wordt niet vermeld. De gemeten concentraties asbest in het stof en in de lucht zijn gemiddeld om de K-factor te bepalen, en was 10^{-7} m^{-1} op basis van de gemiddelden. Er dient te worden opgemerkt dat bij het stofzuigen een deel van de asbestvezels en -structuren in het filter van de stofzuiger blijft zitten en dus niet meer vrijkomt aan de lucht. Oftewel: er wordt dus ook asbest weggenomen. Hierdoor voldoet de in dit onderzoek afgeleide K-factor niet aan de definitie zoals Chatfield (2000) die heeft geformuleerd, en is daarom bijvoorbeeld niet toepasbaar voor situaties waarin niet een deel van de vezels wordt afgevangen.

Lee, Van Orden & Stewart (1999) hebben een uitgebreide dataset met resultaten van lucht- en stofmonsters die zijn verzameld in woningen geanalyseerd om na te gaan of er sprake is van een correlatie tussen gemeten asbestconcentraties in de lucht en in neergeslagen stof.

Er was sprake van een diffuse achtergrondconcentratie (concentraties binnen hoger dan buiten, binnen geen significant verschil in concentraties voor locaties waar beschadigd asbesthoudend materiaal aanwezig was en waar geen asbesthoudend materiaal aanwezig was). De concentratie in de lucht bleek niet te correleren met de concentratie in neergeslagen stof voor monsters die waren geanalyseerd met behulp van de indirecte TEM-methode. De aanwezigheid van asbest in neergeslagen stof bleek niet afhankelijk te zijn van de aanwezigheid van asbesthoudend materiaal in de woningen, en de aanwezigheid van asbest in de lucht bleek niet afhankelijk te zijn van de aanwezigheid van asbest in neergeslagen stof. Er was ook geen sprake van een correlatie wanneer onderscheid werd gemaakt tussen de toegepaste bemonsteringstechnieken of andere analysetechnieken.

Het RIVM heeft een aantal jaren geleden een literatuuronderzoek gedaan naar de relevantie van blootstelling van de mens aan lood en asbest via huisstof (Oomen & Lijzen, 2004). Zij geven aan dat huisstof substantieel kan bijdragen aan blootstelling van de mens aan contaminanten, met name voor de contaminanten lood en asbest. Omdat huisstof voor 30-70% uit bodemmateriaal bestaat, kan een bodemverontreiniging resulteren in de verontreiniging van huisstof. Een significante bijdrage van asbest in de bodem naar asbest in huisstof kan optreden bij concentraties hoger dan 100 mg/kg (de restconcentratienorm). In de gevallen dat bodemverontreiniging bijdraagt aan asbestverontreiniging binnenshuis ligt de gecontamineerde bodem in de directe omgeving van het huis. Er wordt aangegeven dat asbest in stof kan worden beschouwd als een indicator van eerdere concentraties in de lucht, als een indicator van toekomstige blootstelling in de lucht, of gewoon als een ander bestanddeel van hinderlijk stof. Typische K-factoren voor een verscheidenheid aan deeltjesmaterialen, waaronder asbest, liggen in het bereik van 10^{-4} - 10^{-7} . Dit betekent dat er één vezel per milliliter in de lucht kan komen (vezels/cm³) voor elke 10^4 - 10^7 vezels op oppervlakken (vezels/cm²). Er wordt echter ook aangegeven dat er in de literatuur discussie is over de validiteit van de K-factor (Oomen & Lijzen, 2004).

De hoeveelheid asbest in huisstof zoals gemeten in verschillende onderzoeken was gemiddeld $1 \cdot 10^3$ vezels/cm² in woningen waarin geen niet-hechtgebonden asbesthoudende materialen of een asbestverontreiniging door andere bronnen zoals verontreinigde grond in de directe omgeving aanwezig is. Dit wordt als de achtergrondconcentratie gezien. In huizen waar wel niet-hechtgebonden of een andere bron in de directe omgeving aanwezig is kunnen de gemiddelde niveaus stijgen met een factor $1 \cdot 10^4$ naar $1 \cdot 10^7$ (Oomen & Lijzen, 2004). Er wordt in het rapport aangegeven dat wanneer de hoeveelheid asbest in huisstof wordt berekend op basis van de aangegeven K-factoren, deze laag zijn in vergelijking met hoeveelheden asbest in gesedimenteerd stof zoals gemeten in de verschillende onderzoeken. Hun conclusie is dat meest waarschijnlijke verklaring is dat de K-factor te laag is of niet toepasbaar is, en dat een K-factor van 10^{-6} - 10^{-9} waarschijnlijk beter zou zijn (Oomen & Lijzen, 2004).

Uitgaande van de in het RIVM-rapport genoemde K-factoren (10^{-4} - 10^{-7}) wordt een concentratie van 2.000 vezels/m³ in de lucht (niveau van de grenswaarde) bereikt bij een hoeveelheid van 2.000 tot 2.000.000 asbeststructuren/cm² in stof (zie Tabel 1). Als wordt gerekend met de door het RIVM voorgestelde K-factoren (10^{-6} - 10^{-9}) is voor het bereiken van concentratie van 2.000 vezels/m³ in de lucht een hoeveelheid van 200.000 tot 200.000.000 asbeststructuren/cm² in stof nodig.

Tabel 1: Omrekening van concentratie asbestvezels/m³ in lucht naar hoeveelheid asbeststructuren/cm² in stof op basis van verschillende K-factoren *

K-factor (in m ⁻¹)	Concentratie in lucht (in asbestvezels/m ³)	Hoeveelheid in stof (in asbeststructuren/cm ²)
10-2	2.000	20
10-3	2.000	200
10-4	2.000	2.000
10-5	2.000	20.000
10-6	2.000	200.000
10-7	2.000	2.000.000
10-8	2.000	20.000.000
10-9	2.000	200.000.000

* $C_{\text{Oppervlak}} = C_{\text{Lucht}} / K\text{-factor}$.

Voorbeeld K-factor 10⁻⁴ m⁻¹: $C_{\text{Oppervlak}} = 2.000 \text{ vezels/m}^3 / 10^{-4} \text{ m}^{-1} = 20.000.000 \text{ asbeststructuren/m}^2 = 2.000 \text{ asbeststructuren/cm}^2$

Laubenthal (2023) stelt dat er geen relatie is tussen de hoeveelheid gesedimenteerde asbestvezels zoals bepaald in een stofmonster en de concentratie asbestvezels in de lucht. De mate waarin dit gebeurt is namelijk van te veel parameters afhankelijk. Zo zijn er bijvoorbeeld te veel verschillende oppervlakken waarop stof zich kan ophopen. Verder is op deze oppervlakken de "loslaatbaarheid" of de waarschijnlijkheid van resuspensie zeer onvoorspelbaar, door de invloed van bijvoorbeeld elektrostatische effecten, relatieve vochtigheid, de massa van aggregaten en de aanwezigheid van organische lagen (bijvoorbeeld een oliefilm). Het ontbreken van de precisie of nauwkeurigheid om de invloed van deze parameters te kwantificeren was volgens hem reden om de inspanningen rond het voorspellen van de concentratie asbest in de lucht op basis van de hoeveelheid asbest in stof te staken.

5 Discussie, conclusie en aanbevelingen

In dit literatuuronderzoek is gekeken naar hoe en in welke mate gesedimenteerde asbestvezels kunnen bijdragen aan de concentratie asbestvezels in de lucht als deze door resuspensie weer beschikbaar komen. Onderzocht is welke parameters van invloed zijn op resuspensie. Volledigheidshalve is ook gekeken naar sedimentatie van asbestvezels en hoe we in Nederland omgaan met het bepalen van blootstellingsrisico's in relatie met gesedimenteerde asbestvezels. Naast het bestuderen van relevante publicaties over dit onderwerp is gekeken hoe de regelgeving in elkaar steekt en hoe de relevante NEN- en ISO-normen zich tot elkaar verhouden. Bij sedimentatie en resuspensie van asbestvezels spelen een groot aantal parameters een rol. De luchtstroming in een ruimte (door activiteit dan wel het ventilatiesysteem), de dimensies van de ruimte en wat er in de ruimte staat zijn bijvoorbeeld van invloed op waar in de ruimte vrijgekomen asbestvezels sedimenteren. Met betrekking tot resuspensie is waarschijnlijk de belangrijkste factor dat stof in het algemeen, en dus ook asbestvezels, in zekere mate vastplakt aan het oppervlak waar ze op neerslaan (adhesie). Omgevingsomstandigheden als het type oppervlak en relatieve luchtvochtigheid zijn van invloed op de mate van adhesie. Er is dan een bepaalde mate van activiteit nodig voordat het stof inclusief de asbestvezels loskomen en resuspenderen aan de lucht. De resultaten van het onderzoek van Esmen (1996) en Wilmoth, Powers & Millette (1991) geven aan dat een luchtstroom van meer dan 20-44 meter per seconde moet worden gerealiseerd om de adhesiekrachten op te heffen. Dit zou ook impliceren dat een asbeststofzuiger die wordt gebruikt om een oppervlak schoon te maken optimaal werkt als ter hoogte van het oppervlak waarvan de asbestvezels moeten worden verwijderd eenzelfde of hogere luchtsnelheid wordt gerealiseerd. Het is onbekend welke luchtsnelheden (kunnen) worden gerealiseerd met de asbeststofzuigers die in de praktijk worden gebruikt.

Het ventileren van een afgeschermd ruimte, zoals een containment, is, naast dat dit zorgt voor het verlagen van de concentratie asbest in de lucht tijdens het verwijderen van asbest, een belangrijk aspect van het schoonmaakproces. Vrijgekomen vezels die via het ventilatiesysteem worden afgevoerd kunnen niet meer sedimenteren in de ruimte, en hoeven dus ook niet op een andere manier te worden verwijderd als onderdeel van de schoonmaak na afloop van verwijderingswerkzaamheden. Indien een werkgebied mechanisch wordt geventileerd en de afgezogen lucht wordt gefiltreerd, bijvoorbeeld met behulp van een onderdrukmaschine, zou onder bepaalde omstandigheden (bijvoorbeeld voor moeilijk reinigbare plaatsen) kunnen worden overwogen om het actief resuspenderen van neergeslagen asbestvezels onderdeel te maken van de schoonmaakprocedure. De luchtsnelheid die nodig is om de adhesie-effecten op te heffen zou wellicht kunnen worden gerealiseerd met behulp van perslucht of een bladblazer. Hierbij is het van belang dat voldoende tijd wordt ingeruimd om de asbestvezels af te kunnen voeren via het ventilatiesysteem (hangt onder andere samen met het ventilatievoud), en dat verspreiding van de asbestvezels naar buiten het werkgebied wordt voorkomen. Een dergelijke schoonmaakmethodiek is daardoor met name geschikt voor werkzaamheden die worden uitgevoerd in een afgeschermd werkgebied met actieve ventilatie (bijvoorbeeld een containment), waarbij rekening dient te worden gehouden met de integriteit van de afscherming. Er zou dan bijvoorbeeld voornamelijk op de grond of muren moeten worden

geblazen en zo min mogelijk op het folie dat wordt gebruikt om het werkgebied af te schermen.

Bij luchtmetingen als onderdeel van een eindbeoordeling conform NEN 2990 moet activiteit worden gesimuleerd door twee keer te vegen en te wapperen, om zodoende eventuele gesedimenteerde asbestvezels in de lucht te brengen en bij de luchtmeting te betrekken. Het is onbekend of dit afdoende is om de genoemde grote luchtsnelheden te realiseren die nodig zijn om alle eventueel aanwezige asbestvezels in de lucht te brengen en te betrekken bij de luchtmeting. Op basis van onderzoek heeft TNO een aantal jaren geleden geadviseerd om meer nadruk te leggen op het simuleren van activiteit door meer en langer activiteit te simuleren (Spaan et al., 2017), door bijvoorbeeld gebruik te maken van een bladblazer, perslucht of een föhn en/of gedurende de gehele luchtmeting een ventilator te laten draaien (in plaats van twee keer kort te vegen en te wapperen). Echter, met een föhn of een ventilator worden niet de luchtsnelheden bereikt waarbij adhesie wordt overkomen. Er moet ook rekening mee worden gehouden dat het gebruik van een bladblazer of perslucht consequenties met zich meebrengt voor eenmalig gebruik (en daarna afvoeren) dan wel schoonmaken en hergebruiken van de apparatuur die wordt gebruikt voor het simuleren van activiteit, en dat bijvoorbeeld de grootte van de afschermd ruimte van belang is bij de keuze van de apparatuur waarmee activiteit wordt gestimuleerd. Zo zullen bladblazers (elektrisch, niet op benzine of diesel om blootstelling aan andere gevaarlijke stoffen te voorkomen) met name geschikt zijn om toe te passen in grote afgeschermd ruimten. En ook hierbij is het van belang dat de integriteit van het afgeschermd werkgebied niet in het geding komt (zie hierboven). Ook dient er rekening mee te worden gehouden dat degene die de eindbeoordeling uitvoert tijdens het simuleren van de activiteit mogelijk (hoger) wordt blootgesteld aan asbest. Degene die de eindbeoordeling uitvoert dient uit preventief oogpunt echter al adembescherming te dragen.

Bij het ontbreken van luchtstroming zullen vrijgekomen of geresuspendeerde asbestvezels voor het overgrote deel binnen ongeveer 30 minuten neerslaan. Wanneer er sprake is van actieve ventilatie zal de concentratie in de lucht over het algemeen sneller afnemen, omdat een deel van de in de lucht aanwezige asbestvezels wordt afgevoerd via het ventilatiesysteem. Daarom is het van belang om bij het bepalen van een meetstrategie voor het verzamelen van luchtmetingen het doel van de metingen en de omstandigheden in de ruimte mee te nemen. Als bijvoorbeeld de duur van luchtmetingen langer is dan de periode dat de asbestvezels in de lucht aanwezig zijn wordt het resultaat van het luchtmonster in feite verdund, wat kan resulteren in een onderschatting van de concentratie. De huidige methodiek voor eindbeoordeling schrijft een meetduur van minimaal twee uur (in geval van analyse met FCM) en minimaal vier uur (in geval van analyse met SEM/RMA voor), waarbij activiteit wordt gesimuleerd aan het begin van de luchtmeting en tijdens de luchtmeting de ventilatievoud moet worden verlaagd. Naast het meer en langer simuleren van activiteit tijdens de luchtmeting als onderdeel van de eindbeoordeling zou de meetduur van deze luchtmetingen ook kunnen worden verkort (bijvoorbeeld tot globaal de periode waarbij emissie optreedt), mits de analytische inspanning evenredig wordt verhoogd om dezelfde analytische gevoeligheid en statistische betrouwbaarheid te behalen (verhogen aanzuigebiet, vergroten te analyseren filteroppervlak) (Spaan et al., 2017).

Luchtvochtigheid is een belangrijke factor voor het neerslaan van asbestvezels uit de lucht en het door capillaire condensatie vastplakken van de asbestvezels aan het oppervlak waarop ze zijn neergeslagen. Bij een lage luchtvochtigheid worden vezels als gevolg van elektrostatische effecten juist veel mobieler. Het is onduidelijk bij welke luchtvochtigheid het nog zinvol is om luchtmetingen uit te voeren, met het oog op het meten van een concentratie die realistisch en representatief is voor de concentratie die kan optreden wanneer de

luchtvochtigheid in de ruimte “normaal” is. Desondanks wordt in de NEN 2990 voorgeschreven dat er gewacht moet worden met het uitvoeren van de eindbeoordeling als de luchtvochtigheid in de afgeschermd ruimte $\geq 10\%$ hoger is dan in de omgeving, en dat bij een $\geq 10\%$ hogere luchtvochtigheid in kruipruimten het uitvoeren van luchtmetingen geen toegevoegde waarde heeft.

Andersom werken bevochtigingsmethoden zoals het bevochtigen, schuimen of doordrenken van een asbesthoudende toepassing en het benevelen van de lucht in het werkgebied juist als beschermende maatregel tegen emissie en/of resuspensie van asbestvezels. Dergelijke bevochtigingstechnieken zijn belangrijke bronmaatregelen om te zorgen dat de blootstelling van de medewerker die werkzaamheden uitvoert aan asbest zo laag mogelijk is. Door de aanwezigheid van vocht komen asbestvezels minder snel vrij en sedimenteren de asbestvezels die wel vrijkomen sneller, waardoor deze asbestvezels zich minder verspreiden. Het toepassen hiervan in bijvoorbeeld een afgesloten ruimte zal over het algemeen resulteren in een hogere relatieve vochtigheid in deze ruimte. Door het toepassen van een bevochtigingsmiddel zullen de vrijgekomen asbestvezels en -structuren echter ook vastplakken aan de oppervlakken waar ze op terecht komen, wat het schoonmaken van deze oppervlakken zolang deze vochtig zijn zal bemoeilijken. En ook het (overtollige) vocht of schuim dat van een asbesthoudende toepassing afloopt en op een oppervlak terecht komt kan asbest bevatten. Hier dient bij het schoonmaken van het werkgebied rekening mee te worden gehouden. Tijdens het schoonmaken van het werkgebied na sanering, nadat er is stof gezogen met een asbeststofzuiger, worden oppervlakken vaak nog afgenomen met een vochtige doek ('natte eindschoonmaak'). Het is onbekend in hoeverre er door het gebruik van een vochtige doek (een deel van) de aanwezige asbestvezels aan het schoon te maken oppervlak blijven vastplakken of dat dit vocht er juist voor zorgt dat de asbestvezels zich hechten aan het oppervlak van de doek. Deze schoonmaakmethode is vooral bruikbaar voor gladde oppervlakken (zoals glas, metaal, plastic).

De kwaliteit van de onderzoeken waarin metingen zijn verzameld was over het algemeen mager. Vaak zijn de parameters die (mogelijk) van invloed zijn op de mate van sedimentatie dan wel resuspensie niet beschreven. Zo is bijvoorbeeld in een studie het type asbest dat is gebruikt onbekend, en is in verschillende onderzoeken de luchtvochtigheid niet vastgelegd. De in de beschikbare onderzoeken afgeleide resuspensie- of K-factoren zijn niet goed bruikbaar voor de Nederlandse situatie. Een belangrijke reden hiervoor is dat deze K-factoren methode-bepaald zijn, omdat de gemeten concentraties asbest in lucht en in stof die zijn gebruikt om de K-factor af te leiden methode-bepaald zijn. De K-factor die wordt verkregen is namelijk afhankelijk van de toegepaste bemonsteringstechniek (vacuüm methode, veegmethode of kleefmonsters) met bijbehorende recuperatie-efficiëntie, en de toegepaste analysetechniek(en) (SEM, TEM, FCM) met bijbehorende telregels (vergrotingen, eventuele omrekenfactoren) en de onderzochte vezeldimensies (respirabele vezels of ook kleinere vezels, wel of geen vezelstructuren). En door het grote aantal parameters dat van invloed is op de mate van sedimentatie en resuspensie hangt de afgeleide K-factor ook in grote mate samen met de omstandigheden waarbij de monsters worden verzameld. Verschillen in bijvoorbeeld het soort asbesthoudende toepassing dat aanwezig is, het type activiteit dat plaatsvindt, de dimensies van de ruimte, de luchtstromen, het type vloeroppervlak, dimensies van objecten in de ruimte en waar die van zijn gemaakt, de temperatuur en de relatieve luchtvochtigheid zal hoogstwaarschijnlijk resulteren in een verschillende K-factoren. Hierdoor is het ook lastig om gegevens die zijn verzameld in een situatie met specifieke omstandigheden te extrapoleren naar een situatie met andere omstandigheden. Daarnaast is in een aantal van de geraadpleegde onderzoeken de timing van de monsternamen (de toegepaste meetstrategie) niet geschikt om een K-factor af te kunnen leiden (zie paragraaf 4.6).

In de tijd dat de toetswaarde van 100 asbeststructuren/cm² werd geïntroduceerd was de grenswaarde voor blootstelling aan asbest 10.000 vezels/m³. Dit betekent dat waarschijnlijk is aangenomen dat bij een waarde van 100 asbeststructuren/cm² in het stof tot 10.000 vezels/m³ in de lucht vrij kunnen komen. Dit impliceert dat bij het afleiden van deze toetswaarde een K-factor van 10-2 m-1 is toegepast. De grenswaarde is voor chrysotiel en amfibool asbest is respectievelijk per 1 juli 2014 en 1 januari 2017 verlaagd naar 2.000 vezels/m³, evenals de toetswaarde voor de maximale concentratie asbestvezels in gebouwen. Als op basis van de toetswaarde voor asbest in lucht voor het afleiden van een toetswaarde voor asbest in stof dezelfde K-factor zou worden toegepast zou dit impliceren dat de toetswaarde zou moeten worden verlaagd van 100 naar 20 asbeststructuren/cm². Een dergelijke concentratie zit op het niveau van de analytische gevoeligheid van de methode conform ISO 16000-27. Dat betekent dat als (bij de gegeven analytische inspanningen) drie vezels worden aangetroffen dat al leidt tot een overschrijding van de toetswaarde. Het is echter onbekend hoe de toetswaarde van 100 asbeststructuren/cm² tot stand is gekomen, en is dus ook onbekend of hiervoor een resuspensiefactor is afgeleid op basis van data en zo ja welke data hiervoor is gebruikt. Mocht er bij het afleiden van de toetswaarde een K-factor van 10-2 m-1 zijn toegepast, dan is deze aanzienlijk hoger dan de hoogste K-factor (van 10-4 m-1) die wordt vermeld in de literatuur, waarbij tevens wordt verondersteld dat deze K-factor waarschijnlijk aanzienlijk lager zou moeten zijn. Dit zou betekenen dat in het achterblijvende stof hogere concentraties asbestvezels aanwezig kunnen zijn zonder dat de huidige grenswaarde in lucht wordt overschreden.

Om inzicht te krijgen in wat een relevante toetswaarde voor gesedimenteerde asbestvezels zou kunnen zijn zou onder gecontroleerde omstandigheden een experimenteel onderzoek moeten worden uitgevoerd. In dit onderzoek zou de hoeveelheid asbestvezels in stof na sedimentatie en de concentratie asbestvezels in de lucht voor sedimentatie én na resuspensie moeten worden gemeten, waarbij wordt gevarieerd met combinaties van parameters zoals activiteit, luchtvochtigheid, type ondergrond. Ook zou onderscheid moeten worden gemaakt in het soort asbesthoudend materiaal om verschillen in gedrag tussen chrysotiel en amfibool asbest in kaart te brengen. Het is zeer waarschijnlijk dat de K-factor zal afhangen van de combinatie van omstandigheden, wat zou kunnen resulteren in differentiatie van de toetswaarde voor verschillende omstandigheden. Voor het verkrijgen van consistente en vergelijkbare resultaten is het van belang dat de analytische methoden voor het bepalen van asbestvezelconcentraties in stof en lucht op elkaar zijn afgestemd. In de ISO 16000-27 wordt gebruik gemaakt van weegfactoren als risicofactor voor bundels, clusters en matrixdeeltjes (vezelstructuren), maar de herkomst van deze weegfactoren is onbekend. Als alternatief zou bij de weergave van de analyseresultaten onderscheid kunnen worden gemaakt tussen respirabele vezels en potentieel respirabele vezels (vezelstructuren), die bijvoorbeeld kunnen worden gebruikt om de onder- en bovengrens van het meetresultaat weer te geven.

In dit kader wordt het ook relevant geacht om na te gaan of er verschillende toetswaarden voor gesedimenteerde asbestvezels zouden moeten worden gehanteerd, afhankelijk van bijvoorbeeld het type onderzoek dan wel de omstandigheden. Op dit moment wordt bijvoorbeeld dezelfde toetswaarde gehanteerd voor zowel de beoordeling van het potentiële risico (conform NEN 2991) als de eindbeoordeling (conform NEN 2990), terwijl het in eerste geval een gebruikssituatie betreft (voor een eventuele sanering van de verontreiniging) en het in het tweede geval een situatie betreft waarin het werkgebied na sanering is schoongemaakt.

Als een stofmonster wordt genomen van een oppervlak wordt veelal verondersteld dat 100% van het stof (inclusief de asbestvezels) wordt bemonsterd. De mate van recuperatie zal

echter niet altijd 100% zijn, bijvoorbeeld wanneer metselwerk of tapijt wordt bemonsterd. De precieze effectiviteit van de verschillende monsternametechnieken onder verschillende omstandigheden is echter niet bekend. Op basis van een vergelijking van in andere landen gangbare technieken om (asbest)stof te bemonsteren, namelijk een microvacuüm-methode en een veegmethode, wordt geadviseerd welke methode het beste kan worden toegepast bij welk type oppervlak (ASTM International, 2018). In dit onderzoek is het nemen van kleefmonsters met C-tape, de methode die in Nederland gangbaar is, helaas niet meegenomen. Wanneer een vergelijkend onderzoek wordt uitgevoerd waarin alle drie de technieken worden meegenomen, zou kunnen worden bepaald welke stofbemonsteringstechniek onder welke omstandigheden de voorkeur heeft.

Asbestvezels sedimenteren op plaatsen waar de luchtstroom laag is, zoals nabij wanden, objecten in de ruimten en in afzuigkanalen, en kunnen (afhankelijk van de omstandigheden) resuspenderen op plaatsen waar de luchtstroming of mate van activiteit hoog is. In zowel de NEN 2990 als de NEN 2991 worden op dit moment weinig handvaten gegeven om hier bij het bemonsteren rekening mee te houden. De locatie van de monsters is van belang voor de interpretatie van de resultaten van deze monsters met betrekking tot de bijdrage aan het potentiële blootstellingsrisico. Hetzelfde geldt voor het type oppervlak en andere omstandigheden die van invloed zijn op het 'vastplakken' van gesedimenteerde asbestvezels aan een oppervlak. Een goede bemonsteringsstrategie kan helpen bij het nauwkeuriger bepalen van de verspreiding van asbestvezels (NEN 2991) en van het potentieel blootstellingsrisico (NEN 2990 en NEN 2991). Hierbij moet worden gedocumenteerd waar en waarom kleefmonsters worden genomen, zodat de resultaten beter geïnterpreteerd kunnen worden.

Op basis van de resultaten van dit verkennende literatuuronderzoek worden de volgende vervolgstappen aanbevolen:

- Verder (experimenteel) onderzoek naar sedimentatie en resuspensie van asbestvezel, om op basis van kwantitatieve gegevens één of meerdere toetswaarden voor de interpretatie van de resultaten van kleefmonsters af te kunnen leiden. Hierbij dienen de parameters die van invloed zijn op de mate van sedimentatie en resuspensie van asbestvezels te worden meegenomen;
- Onderzoek naar de invloed van (lucht)vochtigheid op sedimentatie en resuspensie van (asbest)vezels. Deze informatie is relevant met het oog op van (optimalisatie van) beheersing van blootstelling, schoonmaakmethoden, en meetstrategieën voor het verzamelen van (persoonlijke) luchtmetingen (zowel tijdens de sanering als als onderdeel van de eindbeoordeling);
- Onderzoek naar de mogelijkheden voor het verbeteren van de prestaties van asbeststofzuigers;
- Onderzoek naar mogelijkheden voor optimalisatie van de methoden die worden toegepast voor het schoonmaken van het werkgebied na asbestsanering (bijv. het gebruik van actieve luchtverplaatsing met behulp van bladblazers of perslucht met afzuiging via een ODM, actief opheffen van elektrostatische krachten, gebruik van specifieke doeken voor verwijderen van verontreinigingen (bijvoorbeeld kleefdoeken of elektrostatische doeken). Hierbij is input vanuit de asbestsaneringssector van belang.

6 Literatuur

AFNOR. NF X43-050. Air quality - determination of the asbestos fibre concentration by transmission electron microscopy - indirect method. July 2021.

Arzoni RJ. Onderzoek naar de recuperatie en de geschiktheid van verschillende typen kleefband voor het bemonsteren van gesedimenteerde asbestvezels, waaronder ducttape, koolstoftape, dactyloscopische tape en PVC-tape. TNO, 2003 (niet gepubliceerd).

ASTM international. ASTM D5755-09 (2014)e1 en. Standard Test Method for Microvacuum Sampling and Indirect Analysis of Dust by Transmission Electron Microscopy for Asbestos Structure Number Surface Loading. ASTM International, West Conshohocken, PA, 1 april 2014 (ingetrokken sinds 10 juli 2023).

ASTM International. ASTM D7390-18. Standard Guide for Evaluating Asbestos in Dust on Surfaces by Comparison Between Two Environments. ASTM International, West Conshohocken, PA, October 2018.

ASTM international. ASTM D6480-19. Standard Test Method for Wipe Sampling of Surfaces, Indirect Preparation, and Analysis for Asbestos Structure Number Surface Loading by Transmission Electron Microscopy. ASTM international, West Conshohocken, PA, 1 juni 2019.

Baeten J, Helsen J, Deruyttere A. Nature, structure, and properties of asbestos cement dust. British Journal of Industrial Medicine 1980; 37: 33-41.

Baron PA, Deye GJ. Electrostatic Effects in Asbestos Sampling I: Experimental Measurements. American Industrial Hygiene Association Journal 1990; 51 (2): 51-62.

Burdett G, Bard D. An inventory of fibres to classify their potential hazard and risk. Research report 503, Health & Safety Laboratory (HSL), Buxton, Derbyshire, 2006.

Burkhanova RA, Ostaali M, Nikolenko MA, Lupinogin VV, Azarov VN. About the assessment of the chrisothal asbestos dust slip into the atmosphere as a random function. Materials Science and Engineering 2019a; 537: IOP Conference Series, 062089.

Burkhanova RA, Azarov VN. Investigation of chrysotile asbestos dust in air of working zones and environment. Materials Science and Engineering 2019b; 687: IOP Conference Series, 066014.

Chatfield EJ. Correlated Measurements of Airborne Asbestos Containing Particles and Surface Dust. Advances in Environmental Measurement Methods for Asbestos, ASTM STP 1342, Beard ME & Rook HL (editors). American Society of Testing and Materials (ASTM), West Conshohocken, PA, 1999.

Esmen NA. Adhesion and Aerodynamic Resuspension of Fibrous Particles. Journal of Environmental Engineering 1996; 122 (5): 379-383.

Franken R, Tromp PC, van de Hoef W, Jadoenathmisier T, Schinkel JM. The development and calibration of a mechanistic asbestos removal exposure assessment tool (AREAT). *Annals of Work Exposures and Health* 2021; 65 (7): 789-804.

Franken R, Schinkel J, Spaan S. Validation and recalibration of the asbestos removal exposure assessment tool (AREAT). *Annals of Work Exposures and Health* 2023; 76 (5): 650-662.

Franken R, Tromp P, Ervik TK, Staff J, Jensen KA, Eypert-Blaison C, Brostrøm A, Cannizzaro A, Sanchez Cabo MT, Bruno MR, Fonseca AS, Davies L, Graff P, Spaan S. European harmonization of asbestos exposure assessment: comparing PCM, SEM, and TEM to derive conversion factors. *Annals of Work Exposures and Health* 2025; 69 (6): 575–591.

Gezondheidsraad. Asbest - Risico's van milieu- en beroepsmatige blootstelling. Nr. 2010/10, Den Haag, 03 juni 2010.

Guillemin MP, Madelaine P, Litzistorf G, Buffat P, Iselin F. Asbestos in buildings: The difficulties of a reliable exposure assessment. *Aerosol Science and Technology* 1989; 11 (3): 221-243.

International Standardization Organization (ISO). ISO 16000-27:2014 en. Indoor air - Part 27: Determination of settled fibrous dust on surfaces by SEM (scanning electron microscopy) (direct method). ISO, Genève, 1 juni 2014.

International Organization for Standardization (ISO). ISO 10312. 2019. Ambient air—determination of asbestos fibres—direct-transfer transmission electron microscopy method. ISO, Genève, 2019a.

International Organization for Standardization (ISO). ISO 13794. 2019. Ambient air—determination of asbestos fibres—indirect-transfer transmission electron microscopy method. ISO, Genève, 2019b.

Kelman BJ, Millette JR, Bell JU. Resuspension of Asbestos in Settled Dust in an Apartment Cleaning Situation. *Applied Occupational and Environmental Hygiene* 1994; 9 (11): 876-878.

Laubenthal TG. ASTM International Asbestos Dust Sampling Methods... an overview of these issues. Publicatie op LinkedIn op 24 oktober 2023, beschikbaar via <https://www.linkedin.com/pulse/us-lets-talk-astm-international-dust-sampling-issues-tom-laubenthal-rejye/>.

Lee RJ, Van Orden DR, Stewart IM. Dust and airborne concentrations – Is there a correlation? In: Beard ME & Rook HL (editors). *Advances in Environmental Measurement Methods for Asbestos*. ASTM STP 1342-EB, American Society of Testing and Materials, West Conshohocken, PA, 1999.

Liddell D, Miller K (editors). *Mineral Fibers and Health*. CRC Press Inc, Boca Raton, Florida, 1991. ISBN 0-8493-6646-1.

Millette JR, Hays SM. *Settled Asbestos Dust Sampling and Analysis*. CRC Press LLL, Boca Raton, Florida, 1994. ISBN 0-87371-948-4.

Morawska L, Salthammer T (editors). Indoor Environment. Airborne Particles and Settled Dust. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. JKGaA, Weinheim, 2003. ISBN 3-527-30525-4.

Nederlands Normalisatie-instituut (NEN). NEN 2991: 2015 nl.+C1:2012 Lucht - Bepaling van de asbestconcentraties in de binnenlucht en risicobeoordeling in en rondom gebouwen of constructies waarin asbesthoudende materialen zijn verwerkt. NEN, Delft, 1 september 2015.

Nederlands Normalisatie-instituut (NEN). NEN-ISO 14966: 2019 en - Ambient air - Determination of numerical concentration of inorganic fibrous particles - Scanning electron microscopy method. NEN, Delft, 1 december 2019.

Nederlands Normalisatie-instituut (NEN). NEN 2990:2020+C1:2020 nl. Lucht - Eindcontrole na asbestverwijdering. NEN, Delft, 1 september 2020.

Oomen AG, Lijzen JPA. Relevancy of human exposure via house dust to the contaminants lead and asbestos. RIVM report 711701037/2004, Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM), Bilthoven, 2004.

Qian J, Ferro AR. Resuspension of Dust Particles in a Chamber and Associated Environmental Factors. Aerosol Science and Technology 2008; 42 (7): 566-578.

Sahmel J, Avens HJ, Scott PK, Unice K, Burns A, Barlow CA, Madl AK, Henshaw J, Paustenbach DJ. Measured removal rates of chrysotile asbestos fibers from air and comparison with theoretical estimates based on gravitational settling and dilution ventilation. Inhalation Toxicology 2015; 27 (14): 787-801.

Spaan S, Tromp P, Diks M, Krystek P, Schinkel J. Mogelijkheden optimalisatie methodiek eindcontrole na asbestsanering. TNO rapport TNO 2017 R10706, Zeist, 5 oktober 2017.

Spaan S, Tromp P, Lucas Luijckx N, de Weerd H, ten Brug B, Franken R, Schinkel J. Opzet en resultaten van experimenteel onderzoek met asbesthoudend materiaal (amosietplaat, asbestcement golfplaten en pakkingen). TNO-rapport TNO 2021 R10986, 21 oktober 2021.

Tempelman J, Arzoni RJ. Onderzoek naar de bruikbaarheid van stripmonsters als onderdeel van de eindcontrole na asbestverwijdering (Ontwerp NEN 2990). TNO-rapport R2004/038, Apeldoorn, 27 januari 2004.

Tromp PC. Risico-evaluatie met betrekking tot de aanwezigheid van asbesthoudende restanten en asbesthoudend stof. TNO, rapportnummers MEP R 97/143, R 97/303, TR 97/542, TR 97/542a en R 98/056, 1997 (vertrouwelijk).

Wilmoth RC, Powers TJ, Millette JR. Observations on Studies Useful to Asbestos Operations and Management Activities. Microscope 1991; 39: 299-312.

World Health organization (WHO). Asbestos and other natural mineral fibers. Environmental Health Criteria (EHC) 53. WHO, Geneva, 1986. Beschikbaar via <https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/37190/9241541938-eng.pdf>.

Ondertekening

TNO › Health & Work › Utrecht, 28 mei 2026

ValidSigned door Carina de Jong
op 28-05-2026



ValidSigned door Suzanne Spaan
op 28-05-2026



C. de Jong-Rubingh
Research Manager

S. Spaan
Auteur

Health & Work

Princetonlaan 6
3584 CB Utrecht
www.tno.nl