Emissie van gevaarlijke stoffen bij de verwerking van zwart asfalt en verschillende typen rood asfalt

Resultaten van een laboratoriumstudie

TNO Publiek ⟩ TNO2026 R10187

24 juni 2026

Health & Work
www.tno.nl
+31 88 866 42 56
info@tno.nl

TNO2026 R10187 – 24 juni 2026

Emissie van gevaarlijke stoffen bij de verwerking van zwart asfalt en verschillende typen rood asfalt

Resultaten van een laboratoriumstudie

Auteurs	R. Franken A. van Renesse Duivenbode F. Mastoras R. Schilderink P. Tromp D. van Vliet Gereviewed door: S. Spaan

Rubricering rapport	TNO Publiek
Titel	TNO Publiek
Rapporttekst	TNO Publiek
Aantal pagina's	28 (excl. voor- en achterblad)
Aantal bijlagen	0
Opdrachtgever	Gemeente Amsterdam

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

In dit onderzoek is onderzocht welke stoffen vrijkomen bij het verwarmen van verschillende typen asfaltmengsels. Specifiek is gekeken naar rode asfaltmengsels die worden gemaakt met zogeheten blanke bindmiddelen. Omdat hierover in de praktijk zorgen bestaan, wilde de gemeente Amsterdam beter begrijpen of dit type rode asfalt mogelijke gezondheidsrisico's met zich meebrengt voor mensen die ermee werken. In een laboratoriumopstelling zijn daarom zowel de afzonderlijke bestanddelen van asfalt als complete asfaltmengsels verhit en is gemeten welke stoffen aanwezig zijn in de vrijgekomen gassen en dampen.

Uit de resultaten blijkt dat bij alle onderzochte asfaltmengsels, dus zowel zwart als rood, gevaarlijke stoffen vrijkomen tijdens verhitting. De samenstelling en hoeveelheid van die stoffen verschillen echter sterk per mengsel. Het bindmiddel blijkt daarbij de belangrijkste bron bij het vrijkomen van gevaarlijke stoffen. Pigment en andere toevoegingen dragen slechts beperkt bij omdat ze in veel kleinere hoeveelheden aanwezig zijn in de asfaltmengsels. Vooral mengsels met blanke bindmiddelen laten duidelijk hogere emissies en meer potentieel schadelijke stoffen zien dan asfalt op basis van standaard bitumen. Aromatische stoffen zoals naftaleen, styreen en cumeen komen regelmatig voor en voor sommige asfaltmengsels is het vrijkomen van deze stoffen in relatie tot de totale emissie hoog. Ook zijn gevaarlijke stoffen aanwezig die buiten de traditionele definitie van asfaltrook vallen.

De laboratoriummetingen geven geen directe informatie over wat werknemers in de buitenlucht precies inademen, maar ze laten wel zien welke stoffen aandacht verdienen bij vervolgonderzoek en waar mogelijke risico's liggen. Een belangrijke conclusie is, dat het bestaande "VBW-meetprotocol", dat vooral kijkt naar asfaltrook en aldehyden, onvoldoende in staat is om de blootstellingsrisico's bij het toepassen van deze nieuwe alternatieve asfaltmengsels af te dekken. Een deel van de stoffen die in dit onderzoek naar voren zijn gekomen, valt namelijk buiten die traditionele definitie van asfaltrook, waardoor risico's in de praktijk mogelijk onderschat kunnen worden. Daarom is een brede screening op gevaarlijke stoffen vooraf sterk aan te bevelen en is het noodzakelijk om het meetprotocol voor het meten van de blootstelling aan te passen op basis van deze screening.

Op basis van de resultaten wordt geadviseerd om niet alle onderzochte mengsels direct in praktijktesten mee te nemen. Mengsels B, D en F laten relatief lagere emissies en/of minder zorgwekkende stoffen zien en zijn daardoor meer geschikt als kandidaten voor vervolgonderzoek in de praktijk. Mengsels C en E daarentegen hebben zowel een hogere totale uitstoot als een grotere aanwezigheid van potentieel gevaarlijke stoffen, waardoor wordt aanbevolen om voor deze mengsels eerst naar optimalisaties in de samenstelling te kijken.

Inhoudsopgave

1 Inleiding 4
2 Methode 5
2.1 Analyses op componentniveau 5
2.2 Analyses op mengselniveau 6
2.3 Opstellen emissieprofielen 7
2.4 Statistische analyse 8
3 Resultaten 9
3.1 Componenten 9
3.2 Mengsels 13
3.3 Vergelijking concentraties componenten en mengsels 19
4 Discussie en conclusie 23
5 Aanbevelingen 25
5.1 Selectie van asfaltmengsels voor vervolgonderzoek 25
5.2 Meetstrategie 26
6 Literatuur 27
7 Ondertekening 28

1 Inleiding

Het ingenieursbureau van de gemeente Amsterdam werd eind 2021 gewezen op een memo van de Vakgroep Bitumineuze Werken (VBW) van Bouwend Nederland, waarin gesteld werd dat rood asfalt met als basis kleurloze bindmiddelen in de toekomst uitgefaseerd moet worden. Als reden hiervoor werd aangegeven dat rood asfalt (op basis van kleurloze bindmiddelen) niet duurzaam en circulair is (mede door een afwijkend productieproces en separate verwerking), en dat er in toenemende mate arbo-gerelateerde klachten worden gemeld door asfalteerders. Naar aanleiding van deze memo van Bouwend Nederland heeft tenminste één asfaltproducent aangegeven per 1 januari 2025 te stoppen met de productie en verwerking van rood asfalt op basis van kleurloze bindmiddelen.

In het verleden zijn door diverse partijen blootstellingsmetingen uitgevoerd bij de verwerking van zwart asfalt (regulier asfalt met standaard bitumen als bindmiddel) en rood asfalt (op basis van kleurloze bindmiddelen dan wel pigmenteerbaar bitumen), waarbij de blootstelling aan verschillende stoffen is bepaald. Binnen de sector en bij de opdrachtgevers is echter nog geen eenduidig beeld over de mogelijke gezondheidseffecten bij het verwerken van rood asfalt.

De gemeente Amsterdam heeft TNO gevraagd om de potentiële gevaarlijke stoffen welke vrij kunnen komen tijdens het verwerken van zwart asfalt en verschillende type rood asfalt te bepalen. Deze verduidelijking is nodig omdat er in de asfaltsector onduidelijkheid is over de gezondheidsrisico's bij het verwerken van rood asfalt. De gemeente Amsterdam heeft de wens om rood asfalt te gebruiken uit het oogpunt van verkeersveiligheid. Door het in kaart brengen van de gezondheidsrisico's bij de verwerking van zwart en rood asfalt kan er door de gemeente Amsterdam een onderbouwde afweging gemaakt worden voor de toepassing van rood asfalt.

Het project bestaat uit twee onderdelen. Onderdeel één bestaat uit een laboratoriumstudie waarbij in een experimentele omgeving de emissie tijdens het verwarmen van mengsels van zwart asfalt en verschillende typen rode asfalt en daaraan gerelateerde bouwstoffen wordt bepaald. Het tweede onderdeel betreft een blootstellingsonderzoek tijdens praktijkmetingen bij het aanbrengen van verschillende typen rood asfalt.

De huidige rapportage beschrijft de resultaten van de laboratoriumstudie.

2 Methode

Omdat in de praktijk de gerapporteerde klachten gerelateerd worden aan het gebruik van blanke bindmiddelen zijn twee typen testen gedaan. Ten eerste op “component”-niveau (bouwstofniveau), waarbij individuele componenten zoals de bindmiddelen en additieven (o.a. pigment) zijn verhit en de stoffen die hierbij vrijkomen bemeten zijn. Ten tweede op “mengsel”-niveau, waarbij de asfaltmengsels volgens de receptuur van de asfaltproducent in een laboratoriumomgeving vervaardigd zijn en in een gesloten mal gelegd waarbij de emissies tijdens het afkoelen van het asfalt in de mal bemeten is. Deze opzet geeft ons de mogelijkheid om onderscheid te kunnen maken tussen enerzijds stoffen die uit de bindmiddelen of additieven vrijkomen, en anderzijds stoffen die vrijkomen uit de asfaltmengsels als geheel waarbij bijvoorbeeld interactie-effecten door bijvoorbeeld verhitting of vermenging een rol kunnen spelen.

Aangezien in de asfaltsector steeds meer naar het gebruik/de toepassing van Warm Mix Asfalt (WMA) wordt bewogen omdat het verwerken en aanleggen van asfalt op lagere temperaturen tot lagere totale emissies stoffen leidt en Hot Mix Asfalt (HMA) uitgefaseerd wordt, is in overleg met de opdrachtgever besloten om in dit onderzoek uit te gaan van WMA-condities.

2.1 Analyses op componentniveau

Voor de analyses op component-niveau is één kg van elke bindmiddel aangeleverd. De volgende (in overleg met de opdrachtgever) geselecteerde componenten zijn getest: één standaard bitumen bindmiddel zoals gebruikt wordt voor regulier zwart asfalt (Bin AB, AB toegekend omdat hetzelfde bitumen in 2 verschillende mengsels (A en B) is toegepast), vier blanke bindmiddelen (Bin C, D, E, F), twee pigmenten (ijzeroxide – (red 1) en (red 2) en een WMA additief (WMA add). De twee pigmenten betreffen hetzelfde materiaal, maar verschillen de vorm: geperste pellets en poeder. Beide varianten zijn eerst gescreend bij 140 °C. Omdat het emissieprofiel van beide varianten hetzelfde was is één van de varianten (geperste pellets) meegenomen in de uiteindelijk analyse op componentniveau. De gemeten concentraties bij deze pellets lagen ook iets hoger dan het poeder.

Per bemeten component zijn twee deelmonsters van ca. 2-25 mg met behulp van een thermogravische analyse (TGA)-opstelling gecontroleerd verhit van kamertemperatuur (20 °C) naar twee verschillende eindtemperaturen bij een snelheid van 20 °C per minuut, waarbij de eindtemperatuur 10 minuten is aangehouden. De gekozen eindtemperaturen zijn de maximale WMA temperatuur (140 °C) en een worst-case temperatuur (160 °C). De worst-case temperatuur van 160 °C is gekozen om te beoordelen of er bij deze extra verhoging ten opzichte van 140 °C een wezenlijke verandering in het emissiepatroon ontstaat. Hiermee wordt beoordeeld of het emissiepatroon gevoelig is voor temperatuursveranderingen, zodat geen onderschatting van de emissie optreedt in de praktijk, waarbij door foutief handelen een iets hogere temperatuur kan ontstaan. Tijdens het gehele traject, inclusief opwarmen, zijn de vrijkomende vluchtige stoffen afgevangen op Tenax TA adsorptiebuisjes, die vervolgens zijn geanalyseerd met behulp van thermo-extractie en -desorptie (TED) in combinatie met gaschromatografie en massaspectrometrie (GC-MS). De analyse is in de zogenaamde ‘screening mode’ uitgevoerd, waarbij de identificatie van stoffen plaatsvindt door middel van vergelijking van massaspectra en retentie indices in TNO AMDIS (Automated Mass spectral Deconvolution and Identification System) en NIST databestanden (chemdata:amdis). Voor de bepaling van de totale emissie op componentniveau zijn alle gemeten concentraties van de individuele stoffen opgeteld, waarbij detectielimieten ook zijn meegenomen.

2.2 Analyses op mengselniveau

Voor de analyses op mengselniveau is een selectie van relevante asfaltmengsels (Tabel 1) in het laboratorium gemengd volgens receptuur van de asfaltproducent. Het WMA-additief is bij de asfaltmengsels met standaard bitumen gebruikt om WMA-productie mogelijk te maken. Omdat de producenten aangeven dat de bindmiddelen zonder WMA-additief onder WMA-condities gebruikt kunnen worden is geen WMA-additief gebruikt bij de productie van deze mengsels. Voor het produceren van de asfaltmengsels zijn de materialen in de volgende volgorde in de menger toegevoegd: (1) steenslag, (2) zand, (3) vulstof, (4) pigment (indien van toepassing), (5) WMA-additief (indien van toepassing) en (6) bindmiddel, en gemengd gedurende drie minuten.

Na het mengen is het asfaltmengsel uitgestort in een mal, waarna de temperatuur van het asfaltmengsel met behulp van een thermokoppel, gepositioneerd in de asfaltspecie, is bepaald (figuur 1). In dit onderzoek is de streefmengtemperatuur op 135 ± 5˚C gesteld om te waarborgen dat de emissiemetingen onder WMA-condities plaats zouden vinden. In Tabel 1 is de temperatuur na mengen per asfaltmengsel vermeld. Vervolgens is de mal onder een ‘kap’ geplaatst en zijn de vrijgekomen vluchtige organische stoffen (VOS) met behulp van Tenax-Carbopack adsorptiebuisjes gedurende 20 minuten bemonsterd, tijdens het afkoelen van het asfaltmengsel (figuur 2). Aan het einde van de metingen waren alle asfaltmengsels afgekoeld tot een temperatuur van ongeveer 115 ± 1˚C. Elk asfaltmengsel is 1x bemeten.

De analyse van de bemonsterde Tenax-Carbopack adsorptiebuisjes is uitgevoerd met behulp van automatische thermodesorptie (ATD) in combinatie met GC-MS. De analyse is in de zogenaamde ‘screening mode’ uitgevoerd, waarbij de identificatie van stoffen plaatsvindt door middel van vergelijking van massaspectra en retentie indices in TNO AMDIS en NIST-databestanden. Het gehalte van de verschillende VOS in de monsters is semi-kwantitatief bepaald op basis van de respons van tolueen in een externe standaard. Voor de bepaling van de totale emissie op mengselniveau zijn alle gemeten concentraties van de individuele stoffen opgeteld, waarbij detectielimieten ook zijn meegenomen.



Figuur 1: Asfaltmengsel in de mal (links) en bepaling van de temperatuur na mengen (rechts)



Figuur 2: Emissiemetingen van het asfaltmengsel in de mal

Tabel 1: Overzicht geteste mengsels, bindmiddelen en additieven

Mengsel code	Omschrijving	Bindmiddel	WMA-additief	Asfalttemperatuur na mengen (˚C)
A	WMA AC Surf 11, standaard zwart asfalt op basis van bitumen bindmiddel	Bin AB	Ja	135
B	WMA AC surf 11 met 3% pigment, rood asfalt op basis van bitumen bindmiddel	Bin AB	Ja	133
C	WMA AC surf 11 met 1,2% pigment, rood asfalt op basis van blank bindmiddel	Bin C	Nee	134
D	WMA AC surf 11 met 1,2% pigment, rood asfalt op basis van blank bindmiddel	Bin D	Nee	136
E	WMA AC surf 11 met 1,2% pigment, rood asfalt op basis van blank bindmiddel	Bin E	Nee	136
F	WMA AC surf 11 met 1,2% pigment, rood asfalt op basis van blank bindmiddel	Bin F	Nee	134

2.3 Opstellen emissieprofielen

Op basis van de resultaten van de GC-MS-analyse is voor alle gemeten stoffen de volgende informatie opgezocht:

- Grenswaarde;
- Gevaarszinnen;
- Gevaarsclassificatie.

Voor het opzoeken van bestaande grenswaarden is een getrapte aanpak gehanteerd. Eerst is gekeken of voor de stof een wettelijke publieke grenswaarde beschikbaar is. Als deze niet beschikbaar is, is gekeken of er een gezondheidskundige advieswaarde beschikbaar is via de Gezondheidsraad. Indien die niet beschikbaar is, is de database van GESTIS (https://gestis-database.dguv.de/) geraadpleegd. In

deze database van het Duitse “Institut fur Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung” (IFA) wordt een overzicht gegeven van de publieke grenswaarden zoals worden gehanteerd in verschillende landen. Eerst wordt gekeken of landen uit voorkeurscategorie 1 (landen waarbij de totstandkoming van de grenswaarden meer transparant is) grenswaarden hebben afgeleid. Het gaat hier om Duitsland, Frankrijk, Zweden, Noorwegen, Finland, Denemarken, Spanje en de Verenigde Staten. Indien in deze landen geen grenswaarde is afgeleid voor de betreffende stof wordt gekeken naar grenswaarden afkomstig uit landen in voorkeurscategorie 2. Indien grenswaarden tussen landen binnen dezelfde voorkeurscategorie onderling verschillen is gekozen voor de laagste grenswaarde. Indien voor een stof ook in GESTIS geen grenswaarde beschikbaar is, is gekeken naar beschikbare “Derived-No-Effect Levels” (DNELs) in de “GESTIS DNEL-lijst”. Indien er voor een stof geen grenswaarden of DNELs beschikbaar zijn is het mogelijk om een bedrijfsgrenswaarde in te schatten met behulp van gevaarszinnen. Echter, deze methode leidt tot zeer lage waarden, zelfs voor stoffen welke volgens deze methode ogenschijnlijk veilig zijn. Daarom is deze methode niet meegenomen en worden stoffen zonder grenswaarden apart meegenomen in de analyse.

Naast grenswaarden zijn voor elke gemeten stof ook de gevaarszinnen opgezocht. Hiervoor is de door TNO ontwikkelde database “Substance Information System” (SIS) gebruikt welke beschikbaar is op het TNO DIAMONDS platform (https://diamonds.tno.nl). Binnen deze database kan per stof opgezocht worden wat de gezondheidseffecten zijn via beschikbare gevaarszinnen (H300-zinnen). Dit zijn gestandaardiseerde teksten die specifieke gevaren aangeven zoals bijvoorbeeld “H350: Kan kanker veroorzaken”. Deze H-zinnen worden binnen de verplichte gevaarsindeling, etikettering en verpakking (“Classification, Labelling and Packaging”, CLP) verordening van de EU toegekend aan een stof. Naast de gevaarszinnen is met behulp van SIS per stof een zogenaamde “hazard band” (gevarenklasse) toegekend. Dit betekent dat op basis van H-zinnen voor oogschade, blootstelling via inhalatie en huidblootstelling een gevarenklasse wordt toegekend aan een stof. De toekenning van deze labels volgt een systematische aanpak zoals beschreven door Arnone et al. (2015). De gevarenklassen hebben de volgende betekenissen:

- A: laag gevaar;
- B: gemiddeld gevaar;
- C: hoog gevaar;
- D: erg hoog gevaar;
- E: extreem hoog gevaar.

Als laatste is per stof gekeken of de stof geclassificeerd is als CMR, wat staat voor “Carcinogeen, Mutageen of Reproductie toxisch”. Omdat dit onderzoek emissies betreft zijn alleen gevarenklassen voor inhalatie meegenomen in dit onderzoek en zijn gevarenklassen voor huidblootstelling en inslikken buiten beschouwing gelaten.

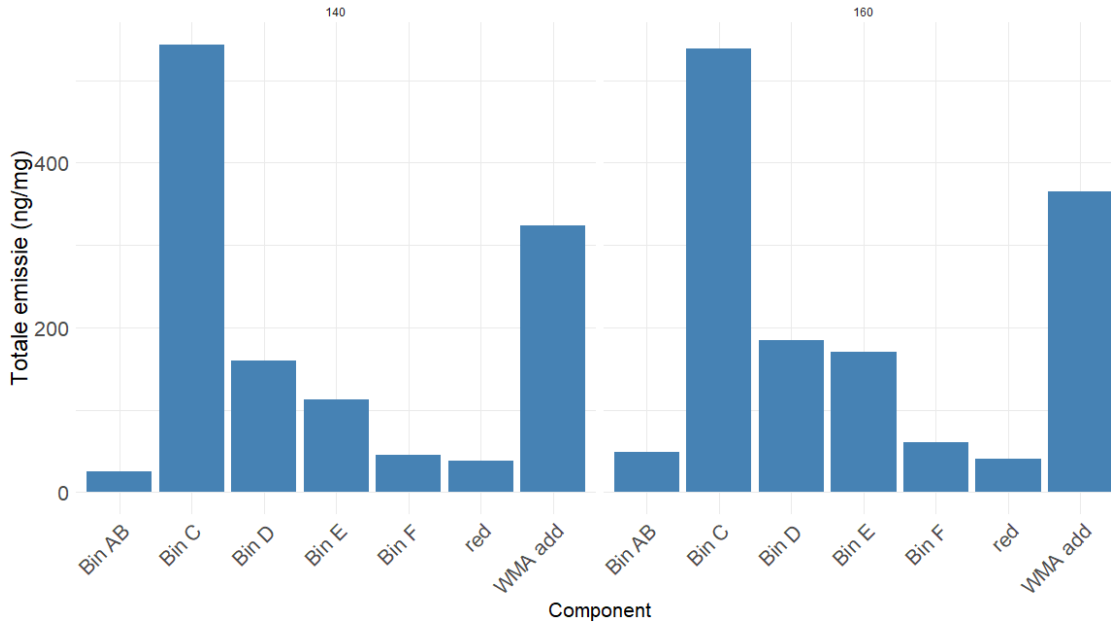
2.4 Statistische analyse

Voor zowel de componenten als de mengsels zijn de volgende analyses uitgevoerd. Per component en mengsel is een gevaarsprofiel opgesteld door eerst per component en asfaltmengsel de hoeveelheid stoffen te bepalen en aan elke stof een gevaarlabel toe te kennen. Dit maakt per component en mengsel inzichtelijk hoeveel zorgwekkende stoffen er aanwezig zijn. Op basis van deze informatie is daarna verder gekeken naar de stoffen met als label “extreem hoog gevaar” of “erg hoog gevaar” (label E en D) en of het om CMR-stoffen gaat. Daarnaast zijn voor de asfaltmengsels per stof de gemeten concentraties vergeleken met grenswaarden. Hierbij moet worden opgemerkt dat deze vergelijking niets zegt over de daadwerkelijk blootstelling van werknemers tijdens het asfalteren. Op basis hiervan kan wel een ‘ranking’ worden aangegeven van de meest risicovolle stoffen in het mengsel. Op basis hiervan kunnen de meest relevante (risicovolle) stoffen worden geselecteerd die meegenomen moeten worden in een toekomstig blootstellingsonderzoek.

3 Resultaten

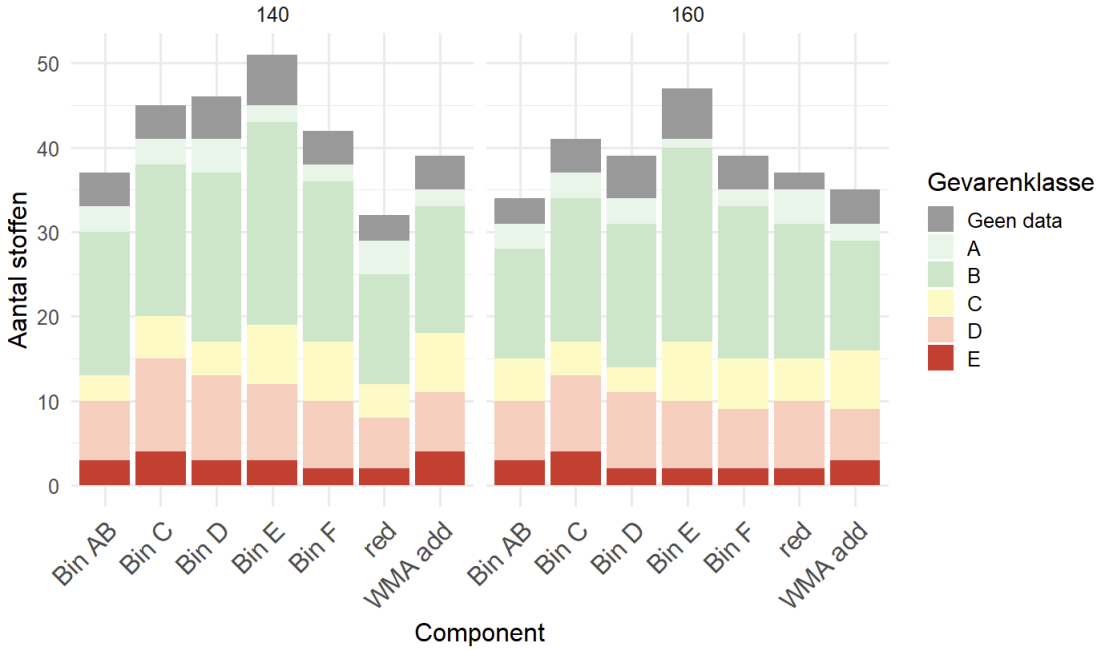
3.1 Componenten

In figuur 3 is de totale emissie weergegeven in ng/mg per component. Opvallend is dat de totale emissies per asfaltmengsel onderling sterk verschillen. Het standaard bitumen bindmiddel (Bin AB), het blanke bindmiddel F en de rode kleurstof hebben relatief lage emissies (~25 ng/mg) met opvolgend Bin D en E respectievelijk ~150 en 100 ng/mg. Voor het bindmiddel Bin C en het WMA add liggen de totale emissies het hoogst ~540 en 360 ng/mg. Daarnaast kan verder opgemerkt worden dat hogere totale emissies gemeten worden bij hogere temperaturen, met uitzondering van bindmiddel Bin C en het rode kleurstof.



Figuur 3: Overzicht totale emissies in ng/mg per component waarbij Bin AB het standaard bitumen is, Bin C – F de blanke bindmiddelen, red de rode kleurstof en WMA add het warm-mix additief.

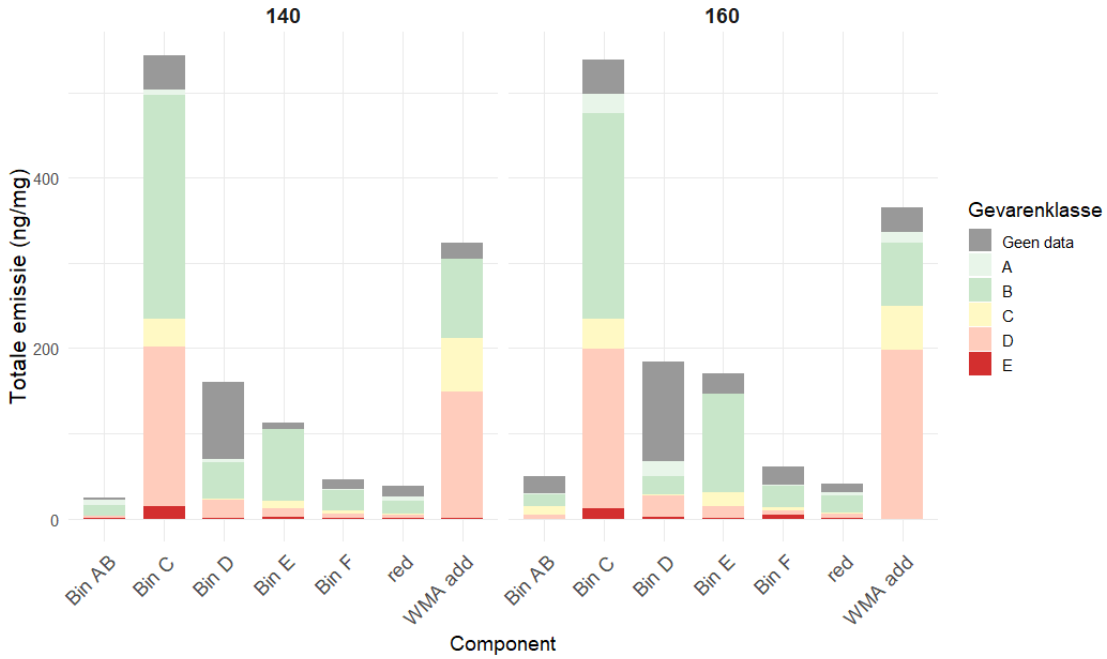
Figuur 4 toont het aantal stoffen per gevarenklasse welke vrijgekomen zijn tijdens de testen uitgevoerd bij 140 en 160 °C voor alle componenten. Uit de figuur kan opgemerkt worden dat voor alle monsters de meeste stoffen binnen gevarenklasse B vallen. De hoeveelheid zorgwekkende stoffen (gevarenklasse D of E) lijkt redelijk gelijk te zijn voor de verschillende componenten. Daarnaast zijn er zeven stoffen geïdentificeerd waarvoor geen gevarenklasse kon worden toegekend omdat informatie ontbrak. In de meeste gevallen vallen deze stoffen binnen de groep aromatische verbindingen.



Figuur 4: Aantal stoffen per gevarenklasse uitgezet per bemeten component

Figuur 5 toont de procentuele bijdrage van stoffen per gevarenklasse aan de totale emissie van afzonderlijke componenten, weergegeven voor 140 en 160 °C. De figuur maakt inzichtelijk hoe de samenstelling van de emissie, uitgedrukt naar gezondheidskundige relevantie, verschilt tussen componenten en verandert met temperatuur, exacte percentages zijn opgenomen in de bijlagen in tabel B1.

Bij 140 °C wordt voor de meeste componenten met uitzondering van Bin D, de totale emissie gedomineerd door stoffen in gevarenklasse B. Bij het WMA additief is ook een substantiële bijdrage van stoffen in gevarenklasse D te zien. Dit betreft de stof piperazine, welke 44% van de totale emissie bedraagt. Daarnaast is ook voor Bin C een substantiële bijdrage van stoffen in gevarenklasse D te zien, wat vooral wordt veroorzaakt door het vrijkomen van substantiële hoeveelheden naftaleen (~33%). Bij 160 °C blijft de procentuele bijdrage van stoffen aan de totale emissie per gevarenklasse relatief gelijk. Bij Bin F stijgt het aandeel stoffen met gevarenklasse E. Dit effect wordt voornamelijk veroorzaakt door een stijging van Cumeen binnen dit bindmiddel. Daarnaast neemt voor standaard bitumen (Bin AB) het aandeel van stoffen zonder toegekende gevarenklasse toe.
In totaal zijn twee rode pigmenten bemeten, welke (op basis van informatie van de leveranciers) om hetzelfde product gaat. Eén van de kleurstoffen is aangeleverd in pallet-vorm en één in poedervorm. De emissieprofielen van de twee kleurstoffen zijn vergelijkbaar, waarbij de totale emissie hoger was voor het pigment in palletvorm ten opzichte van het pigment in poeder-vorm. Het pigment in palletvorm is daarom als worst-case component in alle rode asfaltmengsels meegenomen.



Figuur 5: Procentuele bijdrage van stoffen per gevarenklasse aan de totale emissie van bemeten componenten, weergegeven voor mengtemperatuur van 140 en 160 °C.

Tabel 2 geeft een overzicht van de gemeten concentraties van individuele stoffen (in ng/mg) die zijn vrijgekomen uit de verschillende bindmiddelen en additieven bij verhitting tot 140 en 160 °C. Daarnaast is per stof de gevarenklasse weergegeven en of het om een CMR-stof gaat.
Voor het merendeel van de stoffen zijn lage tot zeer lage concentraties gemeten. Een verhoging van de temperatuur van 140 naar 160 °C resulteert in veel gevallen in een toename van de totale emissie, hoewel dit effect niet voor alle stoffen geldt. In sommige gevallen lijkt niet zozeer de temperatuur maar meer het type component van invloed te zijn op gemeten concentratie van de stof zelf. Dit kan wijzen op verschillen in thermisch gedrag en binding in de componentmatrix, die van invloed zijn op het vrijkomen van stoffen bepalen. Dit betekent dus dat een hogere temperatuur niet automatisch bij elke stof leidt tot meer emissie.

Een aantal stoffen komen vrij uit (bijna) alle componenten. Benzeen is in alle componenten aangetoond in relatief lage concentraties. Hoewel de absolute emissies beperkt zijn, zijn er onderling wel verschillen: uit Bin E en Bin F komen hogere concentraties benzeen vrij dan uit de andere componenten. Ook styreen komt, met uitzondering van in het rode pigment, in alle componenten voor, en komt in hogere mate voor bij Bin E en Bin C. Fenol en cumeen zijn in alle componenten in relatief gelijke hoeveelheden aanwezig met uitzondering van het WMA additief.

Naast dat een aantal stoffen in meerdere componenten voorkomen zijn bij een aantal componenten hoge concentraties voor bepaalde stoffen waargenomen. De concentratie bifenyl zoals gemeten voor Bin D is relatief hoog (~10%) ten opzichte van de concentraties bifenyl zoals gemeten voor de andere componenten (0.1% - 1.9%). Bij Bin C is de relatieve bijdrage van naftaleen aan de totale emissie zeer groot (~33%). In het WMA additief is een hoge relatieve bijdrage van Piperazine aan de totale emissies gemeten (~44%).

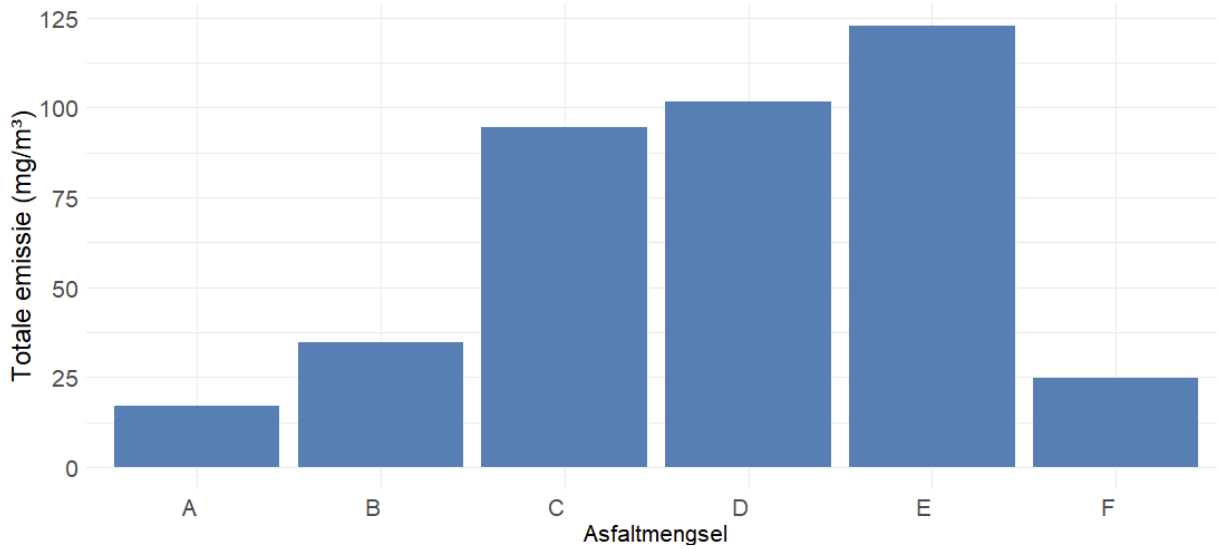
Tabel 2: Overzicht gemeten concentraties van individuele stoffen ingedeeld in gevarenklasse D of E in ng/mg, per component

Stof	°C	Bin AB	Bin C	Bin D	Bin E	Bin F	WMA add	Red 1	Gevarenklasse	CMR
Styreen	140	0,04	4,1	0,1	1,8	0,1	0,3	<0,01	D	R
	160	0,2	0,3	0,06	2,1	0,8	0,4	0,05		
Benzeen	140	0,2	0,1	0,1	1,5	1,3	0,7	0,3	E	CM
	160	0,1	0,3	0,2	0,5	0,2	0,1	0,4		
Bifenyl	140	0,4	0,9	16,2	1,3	0,05	0,3	0,2	D	-
	160	0,9	0,6	15	0,01	0,3	0,5	<0,01		
Fenol	140	1,1	0,4	1,7	0,1	1,1	<0,01	0,7	D	M
	160	0,1	3,5	1,4	0,2	<0,01	<0,01	0,8		
Azijnzuur	140	0,1	0,2	0,02	0,2	1,9	<0,01	1,1	D	-
	160	0,2	0,1	1,5	2,6	0,04	<0,01	1,3		
Iso-propylbenzeen (cumeen)	140	0,1	0,9	0,8	0,1	0,1	0,1	<0,01	E	C
	160	0,1	0,1	1,7	0,8	4,5	0,01	<0,01		
Trans-2-penteenzuur	140	<0,01	0,2	1,8	1,3	0,8	<0,01	0,7	D	-
	160	<0,01	<0,01	0,1	<0,01	<0,01	<0,01	0,2		
Chryseen	140	<0,01	0,1	0,03	0,2	<0,01	0,01	0,1	E	CM
	160	<0,01	0,04	0	<0,01	<0,01	<0,01	0,1		
Benzoëzuur	140	0,2	<0,01	0,003	5,5	0,4	<0,01	1,4	D	-
	160	1,3	<0,01	0,1	0,03	3,5	<0,01	1,6		
Naftaleen	140	0,4	179	0,1	0,1	0,1	<0,01	<0,01	D	C
	160	1,4	173	4,9	0,4	0,4	<0,01	<0,01		
3-methyl-2-butenal	140	<0,01	0,01	0,1	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	D	-
	160	<0,01	<0,01	0,4	1,3	0,2	<0,01	<0,01		
2-acetylfuraan	140	<0,01	0,1	0,04	0,1	0,01	<0,01	<0,01	D	-
	160	<0,01	0,05	<0,01	<0,01	0,05	<0,01	<0,01		
1-pentanol	140	<0,01	<0,01	<0,01	0,2	<0,01	0,1	<0,01	D	-
	160	<0,01	<0,01	<0,01	6,6	<0,01	0,2	<0,01		
Decahydronaftaleen	140	<0,01	0,3	<0,01	<0,01	<0,01	3,7	<0,01	D	-
	160	<0,01	0,03	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01		
1-ethyl-3,5-dimethylbenzeen	140	0,3	14	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	E	-
	160	0,003	11,4	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01		

Stof	°C	Bin AB	Bin C	Bin D	Bin E	Bin F	WMA add	Red 1	Gevarenklasse	CMR
4-ethyl-1,2-dimethylbenzeen	140	0,04	1,2	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	D	-
	160	0,01	9,3	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01		
2-methylpyridine	140	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,02	<0,01	D	-
	160	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,2	<0,01		
Piperazine	140	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	142	<0,01	D	R
	160	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	196,8	<0,01		
Hexaanzuur	140	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	D	-
	160	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,7		
2-hexanon	140	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0.3	D	R
	160	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0.4		
4-(1,1-dimethylpropyl)fenol	140	<0,01	0.3	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	D	-
	160	<0,01	0.5	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01		
3-methyl-6-tert-butylfenol	140	<0,01	<0,01	0.9	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	D	-
	160	<0,01	<0,01	0.9	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01		
2-ethylacroleine	140	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	D	-
	160	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0.1		
o-toluidine	140	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0.02	<0,01	E	CM
	160	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0.05	<0,01		
4-tert-butyltolueen	140	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	1.7	<0,01	D	R
	160	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0.4	<0,01		

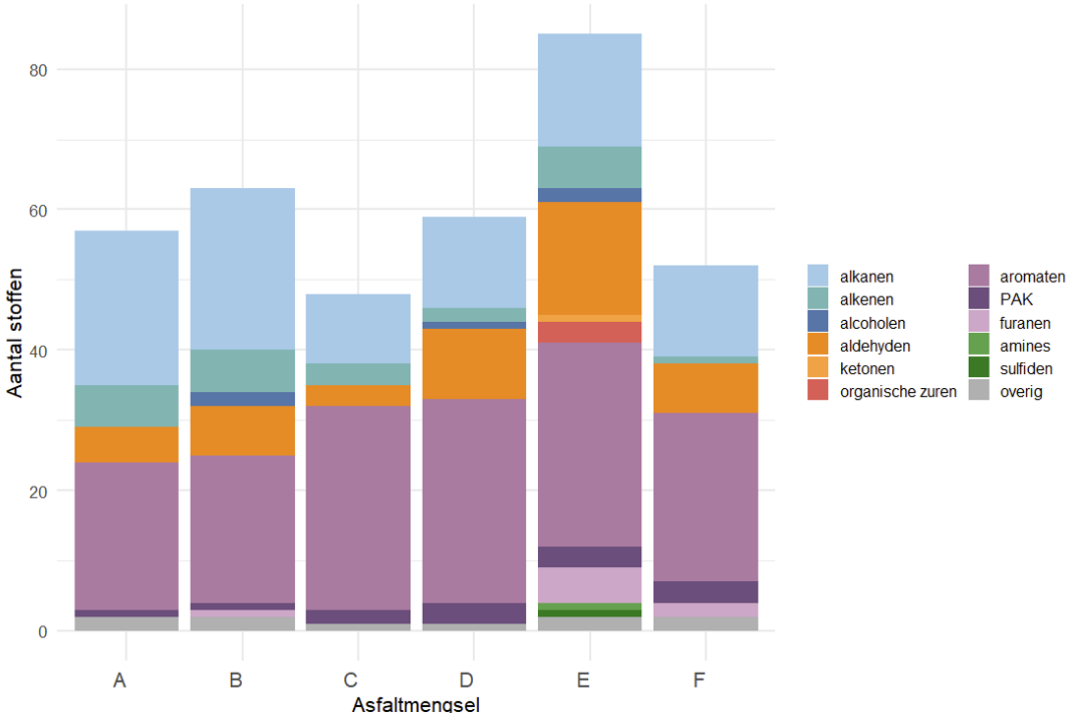
3.2 Mengsels

In figuur 6 is de totale emissie weergegeven in mg/m³ per asfaltmengsel. Opvallend is dat de totale emissies per asfaltmengsel onderling sterk verschillen. Voor mengsel A, B en F liggen de totale emissies rond de 25 mg/m³ terwijl de totale emissie van asfaltmengsel C, D en E rond de 100 mg/m³ liggen.



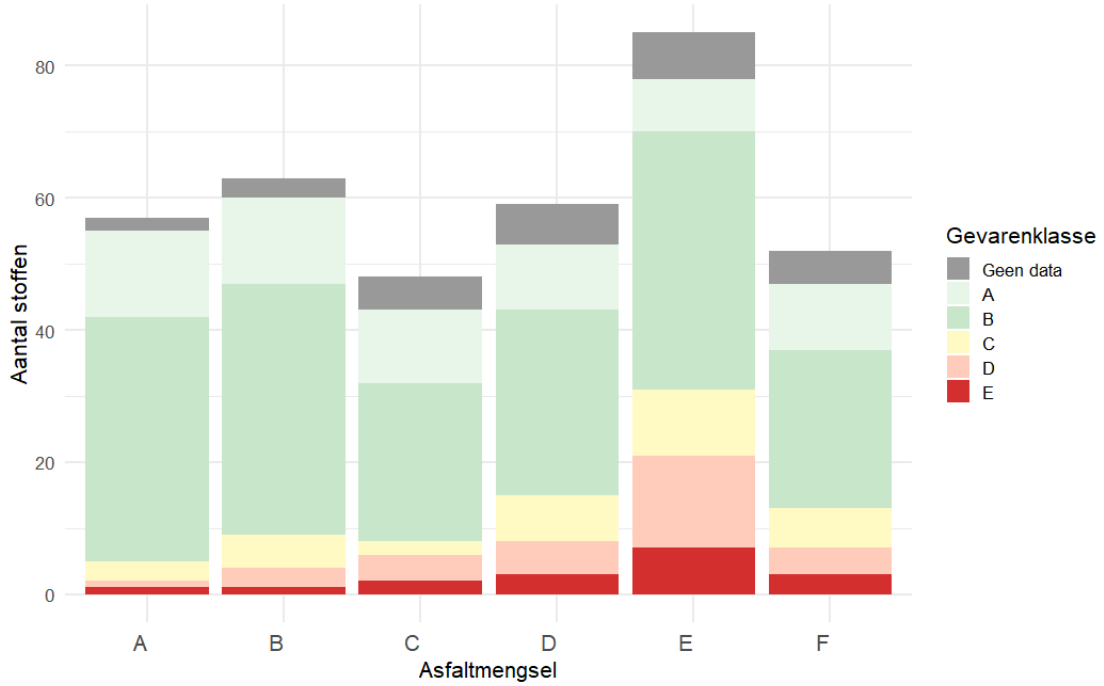
Figuur 6: Overzicht totale emissies in mg/m³ per asfaltmengsel (mengsel A en B op basis van standaard bitumen bindmiddel, mengsel C, D, E en F op basis van blanke bindmiddelen)

In figuur 7 is weergegeven welke typen stoffen (stofgroepen) zijn gemeten per asfaltmengsel. Uit de figuur is op te merken dat in mengsels op basis van standaard bitumen bindmiddel (A en B) over het algemeen meer alkanen en alkenen voorkomen in vergelijking met de mengsels welke blanke bindmiddelen bevatten, waarbij van de mengsels op basis van blanke bindmiddelen mengsel E de meeste alkanen en alkenen bevat. Verder is op te merken dat uit de mengsels op basis van blanke bindmiddelen meer aromaten vrijkomen in vergelijking met de mengsels op basis van standaard bitumen. In mengsel E komen ook organische zuren, amines, sulfiden en ketonen voor. In drie van de vier mengsels met blanke bindmiddelen komt naftaleen en fenantreen voor; deze stoffen vallen onder de groep “Polycyclische Aromatische Koolwaterstoffen (PAK)”. Hoewel het gevaar van stoffen niet direct op stofgroep-niveau beoordeeld kan worden, komt het voor dat bepaalde stofgroepen zoals aromaten en aldehyden meer zorgwekkende stoffen bevat dan bijvoorbeeld alkanen en alkenen.



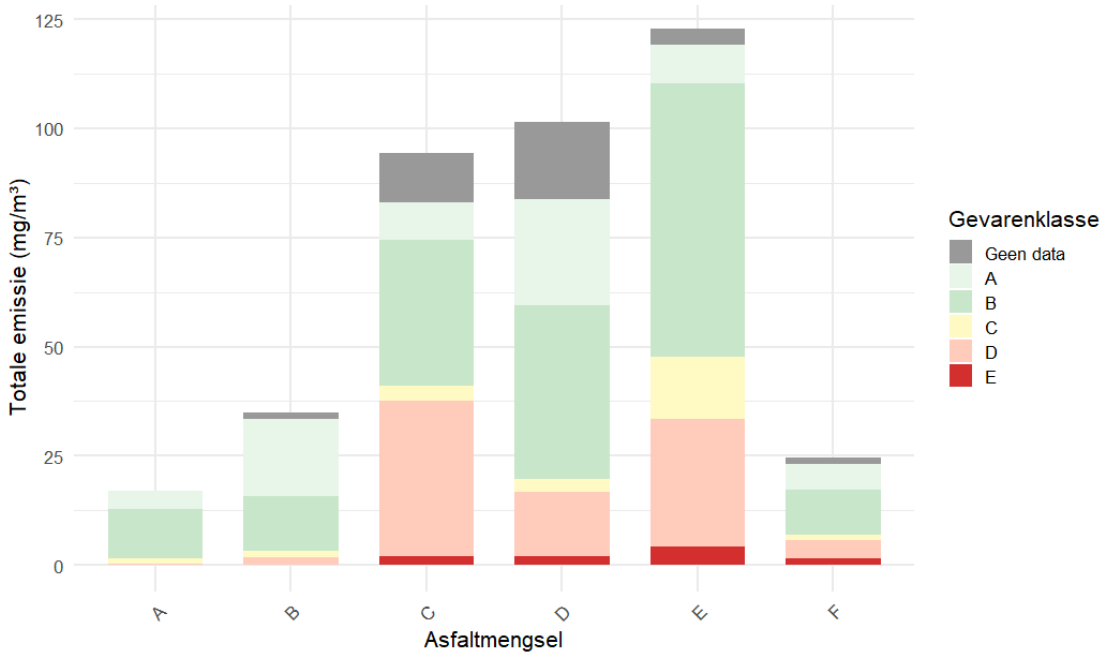
Figuur 7: Aantal stoffen per stofgroep voor de bemeten asfaltmengsels (mengsel A en B op basis van standaard bitumen bindmiddel, mengsel C, D, E en F op basis van blanke bindmiddelen)

In figuur 8 is per asfaltmengsel het aantal geïdentificeerde stoffen weergegeven, uitgesplitst naar inhalatiegevarenklasse. Zowel het totale aantal gemeten stoffen als het aantal stoffen in de verschillende gevarenklassen verschillen tussen de asfaltmengsels. Voor alle mengsels zijn voornamelijk stoffen ingedeeld in lagere gevarenklassen (A en B) gemeten. Toch zijn in alle mengsels ook stoffen vrijgekomen welke ingedeeld zijn in de hogere gevarenklassen D en E. Voor mengsel E is het grootste aantal stoffen gemeten, waarbij tevens het hoogste absolute aantal stoffen in gevarenklasse D en E is ingedeeld. Voor de asfaltmengsels C, D en F is het aantal stoffen dat is ingedeeld in de hogere gevarenklassen kleiner maar komt wel voor. Voor de asfaltmengsels waarbij standaard penetratie bitumen is gebruikt, geldt dit in nog sterkere mate. In de volgende alinea's wordt verder ingezoomd op de stoffen ingedeeld in gevarenklasse D en E.



Figuur 8: Aantal stoffen per gevarenklasse uitgezet per bemeten asfaltmengsel (mengsel A en B op basis van standaard bitumen bindmiddel (zwart asfalt), mengsel C, D, E en F op basis van blanke bindmiddelen (rood asfalt))

Figuur 9 toont per mengsel de procentuele bijdrage van de gemeten concentraties van stoffen ingedeeld in gevarenklassen A t/m E aan de totale emissie. Indien een stof niet kon worden ingedeeld in een gevarenklasse beschikbaar is deze gemarkeerd als “Geen data”. Daarnaast zijn de exacte percentages ook opgenomen in de bijlagen in tabel B2.
Uit het figuur valt op te merken dat voor standaard penetratie bitumen de relatieve bijdrage van stoffen die zijn ingedeeld in hogere gevarenklassen (D en E) beperkt is (~1%). Voor standaard bitumen met rood pigment is de relatieve bijdrage van stoffen ingedeeld in de hogere gevarenklassen iets hoger (~5%). Voor de mengsels op basis van blanke bindmiddelen beslaat een groter deel van de totale emissie uit stoffen die zijn ingedeeld in hogere gevarenklassen. Zo zijn de hoogste relatieve emissies waarneembaar voor mengsel C (~40%), gevolgd door mengsel E (~27%), F (23%) en D (~17%).



Figuur 9: Procentuele bijdrage van stoffen per gevarenklasse aan de totale emissie van bemeten mengsels

In tabel 3 is per mengsel een overzicht weergegeven van individuele stoffen die zijn ingedeeld in gevarenklasse “D” of “E”. In totaal gaat het om 21 individuele stoffen, waarvan acht stoffen geclassificeerd zijn als carcinogeen, zes stoffen als mutageen en twee stoffen als reproductietoxisch. Benzeen komt in alle zes mengsels voor, waarbij in mengsel E en C de concentraties verhoogd zijn tenopzichte van de andere mengsels. Daarnaast komt Naftaleen ook voor in alle zes de mengsels, met relatief hoge concentraties gemeten bij mengsel C en D. Voor mengsel C is de gemeten concentratie naftaleen ca. 14 mg/m³, wat overeenkomt met 15% van de totale emissie van dat asfaltmengsel. Verder zijn voor alle vier de asfaltmengsels op basis van blanke bindmiddelen relatief hoge concentraties styreen gemeten. Deze concentraties betreffen 22%, 10%, 10% en 16% van de totale emissie voor respectievelijk mengsel C, D, E en F. 2-ethylacroleine komt met uitzondering van het standaard zwart asfalt (mengsel A), in relatief lage concentraties vrij uit de vijf andere mengsels. Hoewel 2-ethylacroleine niet is geclassificeerd als CRM-stof, is deze wel gelabeld als H330, wat staat voor “dodelijk bij inademing”. Cumeen is ook in alle zes de mengsels vrijgekomen, en in relatief hogere concentraties in de mengsels op basis van blanke bindmiddelen tenopzichte van asfalt op basis van standaard bitumen. Daarnaast is het opvallend dat voor mengsel E 14 zorgwekkende stoffen gemeten zijn welke niet in de andere mengsels voorkomen. Met uitzondering van 2-hexanon en 1-pentanol zijn de gemeten concentraties wel laag.

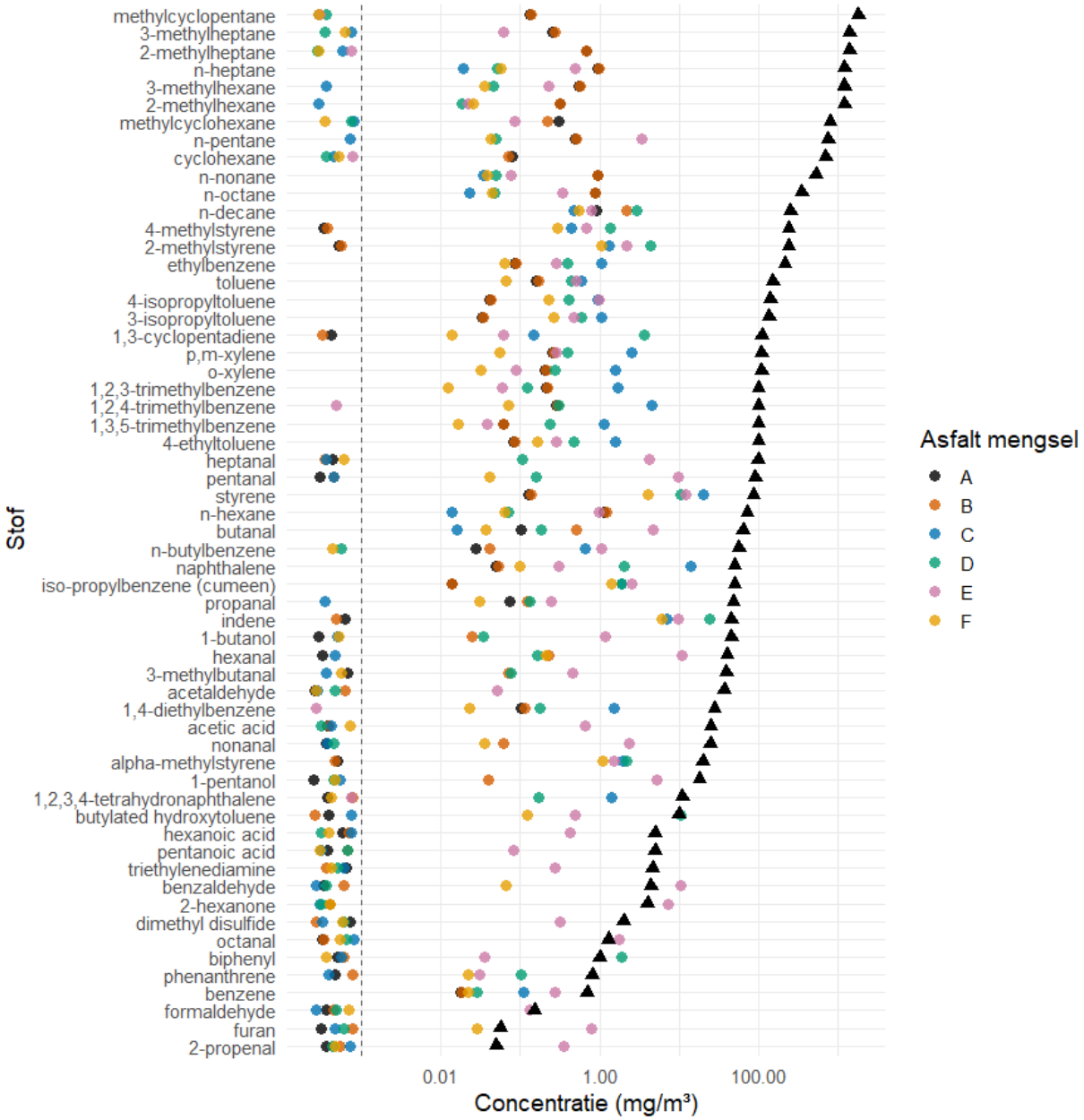
Tabel 3: Overzicht gemeten concentraties van individuele stoffen ingedeeld in gevarenklasse D of E in mg/m³, per mengsel.

Stof	Mengsel A	Mengsel B	Mengsel C	Mengsel D	Mengsel E	Mengsel F	Gevarenklasse	CMR
Benzeen	0,02	0,02	0,11	0,03	0,27	0,02	E	CM
Naftaleen	0,05	0,05	14	2,0	0,30	0,10	D	C
2-Ethylacroleine	<0,01	1,5	0,1	0,3	0,5	0,1	D	-
Styreen	0,13	0,13	20	11	12	4,0	D	R

Stof	Mengsel A	Mengsel B	Mengsel C	Mengsel D	Mengsel E	Mengsel F	Gevarenklasse	CMR
1,2,3,4-Tetrahydronaftaleen	<0,01	<0,01	1,4	0,2	<0,01	<0,01	D	C
Iso-propylbenzeen (cumeen)	0,01	0,01	1,9	1,9	2,5	1,4	E	C
Furaan	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,8	<0,01	E	CM
1-Pentanol	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	5,3	<0,01	D	-
Aceetaldehyde*	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,1	<0,01	E	CM
Bifenyl	<0,01	<0,01	<0,01	1,9	0	<0,01	D	-
2-Propenal	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,4	<0,01	E	-
Hexaanzuur	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,4	<0,01	D	-
2-Ethylfuraan	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,1	<0,01	D	-
2-n-Propylfuraan	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,1	<0,01	D	-
Formaldehyde*	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,1	<0,01	E	CM
2-Methyl-2-buteen	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	E	CM
2-Methylfuraan	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	1,2	<0,01	D	-
2-Hexanon	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	7,1	<0,01	D	R
Dimethyl disulfide	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,3	<0,01	D	-
Azijnzuur	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,7	<0,01	D	-
Methacroleine	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	1,2	<0,01	D	M

* Deze concentraties zijn een onderschatting van de werkelijke concentraties; de toegepaste samplingtechniek is voor deze vluchtige aldehyden minder geschikt.

In figuur 10 is een overzicht gegeven van de gemeten concentraties van stoffen waarvoor een grenswaarde beschikbaar is, waarbij de concentraties zoals gemeten voor de verschillende asfaltmengsels zijn uitgezet tegen deze grenswaarden. **Het is belangrijk te benadrukken dat deze emissies zijn gemeten in een laboratoriumopstelling in een afgesloten mal, en dus geen blootstellingsniveaus van werknemers weergeven**. De resultaten geven echter wel een indicatie welke stoffen in de praktijk in potentie een verhoogd risico zouden kunnen vormen. Dit biedt waardevolle handvatten om bij het uitvoeren van toekomstige blootstellingsmetingen in de praktijk gericht die stoffen te bemeten waarvoor in het laboratorium relatief hoge emissies zijn gemeten ten opzichte van de grenswaarden van die stoffen. Zo kunnen mogelijk relevante gezondheidsrisico's beter in worden geschat en gemonitord. In de figuur zijn de stoffen aflopend weergegeven, waarbij de stof met de hoogste grenswaarde bovenaan staat. Uit het figuur valt op te merken dat voor de meeste stoffen de gemeten concentratie ruim onder de grenswaarden ligt, maar dat voor enkele stoffen – met name voor mengsels op basis van blanke bindmiddelen – de gemeten concentratie relatief dichtbij of zelfs boven de grenswaarden uitkomt.



Figuur 10: Gemeten concentraties van individuele stoffen in vergelijking met grenswaarden (alleen voor stoffen waarvoor grenswaarden zijn gevonden). NB: de concentraties zijn **geen** blootstellingsniveaus. NB2: de concentraties op de x-as zijn op logaritmische schaal.

3.3 Vergelijking concentraties componenten en mengsels

Tabel 4 geeft een overzicht van de gemeten concentraties van stoffen die zijn vrijgekomen uit de verschillende onderzochte componenten (bindmiddelen, additieven) en asfaltmengsels. Voor elk van de zes onderzochte mengsels zijn de gemeten concentraties uitgesplitst naar de afzonderlijke componenten waarvoor metingen zijn uitgevoerd, waaronder de bitumen of blanke bindmiddelen voor alle zes de mengsels, het WMA-additief voor mengsels A en B en met uitzondering van zwart

asfalt (mengsel A) ook het pigment (in ng/mg). Daarnaast zijn de emissies zoals gemeten voor het uiteindelijke mengsel weergegeven (in mg/m³). Dit overzicht maakt het mogelijk om de aanwezigheid van specifieke stoffen in de emissie zoals gemeten voor de mengsels te relateren aan de stoffen in de emissie zoals gemeten voor de verschillende componenten.

De tabel laat zien dat een aanzienlijk deel van de gemeten stoffen uitsluitend op componentniveau is gemeten en niet of slechts in beperkte mate op mengselniveau. Veelal gaat dit om stoffen die op componentniveau al in lage concentraties vrijkwamen. Echter, Piperazine is in aanzienlijke hoeveelheden vrijgekomen op componentniveau uit de geselecteerde WMA toevoeging, maar is niet gemeten voor mengsel A en B. Tegelijkertijd zijn er stoffen welke zowel bij de testen van de afzonderlijke componenten als de testen van het uiteindelijke mengsel zijn gemeten, wat erop wijst dat deze stoffen de mengselproductie en -verwerking kunnen doorstaan, of tijdens het mengen opnieuw ontstaan. Dit is duidelijk waarneembaar voor bijvoorbeeld naftaleen, benzeen en bumeen. In het geval van Biphenyl komt de stof in alle componenten voor, maar slechts in één mengsel (D), mogelijk omdat de gemeten concentratie biphenyl voor het blanke bindmiddel dat is toegepast in dit mengsel hoger was in vergelijking tot de gemeten concentraties van deze stof voor andere bindmiddelen. Daarnaast zijn een aantal stoffen alleen in de mengselemissies aangetroffen. Dit is met name het geval voor mengsel E.

Tabel 4: Gemeten concentraties van individuele stoffen voor de componenten per asfaltmengsel (in ng/mg) en de asfaltmengsels (in mg/m³)

Mengsel	Asfaltmengsel A			Asfaltmengsel B				Asfaltmengsel C			Asfaltmengsel D			Asfaltmengsel E			Asfaltmengsel F			Gevaren klasse
Component*	Bin AB	WM add	Mengsel	Bin AB	WM add	Red	Mengsel	Bin C	Red	Mengsel	Bin D	Red	Mengsel	Bin E	Red	Mengsel	Bin F	Red	Mengsel	
1,2,3,4-tetrahydronaftaleen	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	1,4	<0,01	<0,01	0,2	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	D
1-pentanol	<0,01	0,08	<0,01	<0,01	0,08	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	5,3	0,2	<0,01	<0,01	D
2-acetylfuraan	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,1	<0,01	<0,01	0,04	<0,01	<0,01	0,01	<0,01	<0,01	0,1	<0,01	<0,01	D
2-ethylacroleine	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	1,5	<0,01	<0,01	0,1	<0,01	<0,01	0,3	<0,01	<0,01	0,5	<0,01	<0,01	0,1	D
2-ethylfuraan	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,1	<0,01	<0,01	<0,01	D
2-hexanon	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,3	<0,01	<0,01	0,3	<0,01	<0,01	0,3	<0,01	<0,01	0,3	7,1	<0,01	0,3	<0,01	D
2-methylfuraan	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	1,2	<0,01	<0,01	<0,01	D
2-methylpyridine	<0,01	0,02	<0,01	<0,01	0,02	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	D
2-n-propylfuraan	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,1	<0,01	<0,01	<0,01	D
3-methyl-2-butenal	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,01	<0,01	<0,01	0,1	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	D
3-methyl-6-tert-butylfenol	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,9	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	D
4-(1,1-dimethylpropyl)fenol	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,3	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	D
4-ethyl-1,2-dimethylbenzeen	0,04	<0,01	<0,01	0,04	<0,01	<0,01	<0,01	1,2	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	D
4-tert-butyltolueen	<0,01	1,68	<0,01	<0,01	1,68	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	D
azijnzuur	0,10	<0,01	<0,01	0,10	<0,01	1,1	<0,01	0,2	1,1	<0,01	0,02	1,1	<0,01	1,9	1,1	0,7	0,2	1,1	<0,01	D
benzoëzuur	0,9	<0,01	<0,01	0,9	<0,01	1,4	<0,01	<0,01	1,4	<0,01	<0,01	1,4	<0,01	0,4	1,4	<0,01	5,5	1,4	<0,01	D
bifenyl	0,4	0,31	<0,01	0,4	0,31	0,2	<0,01	0,9	0,2	<0,01	16,2	0,2	1,9	0,1	0,2	<0,01	1,3	0,2	<0,01	D
decahydronaftaleen	<0,01	3,73	<0,01	<0,01	3,73	<0,01	<0,01	0,4	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	D
dimethyl disulfide	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,3	<0,01	<0,01	<0,01	D
hexaanzuur	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,4	<0,01	<0,01	<0,01	D
methacroleine	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	1,2	<0,01	<0,01	<0,01	D
naftaleen	0,4	<0,01	0,1	0,4	<0,01	<0,01	0,1	178,9	<0,01	13,7	0,1	<0,01	2	0,5	<0,01	0,3	0,1	<0,01	0,1	D
fenol	1,1	<0,01	<0,01	1,1	<0,01	0,7	<0,01	0,4	0,7	<0,01	1,7	0,7	<0,01	1,1	0,7	<0,01	0,1	0,7	<0,01	D
piperazine	<0,01	142,3	<0,01	<0,01	142,3	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	D
styreen	0,04	0,3	0,1	0,04	0,3	<0,01	0,1	4,1	<0,01	20,4	0,1	<0,01	10,6	0,1	<0,01	12,6	1,8	<0,01	4	D

Mengsel	Asfaltmengsel A			Asfaltmengsel B				Asfaltmengsel C			Asfaltmengsel D			Asfaltmengsel E			Asfaltmengsel F			Gevaren klasse
Component*	Bin AB	WM add	Mengsel	Bin AB	WM add	Red	Mengsel	Bin C	Red	Mengsel	Bin D	Red	Mengsel	Bin E	Red	Mengsel	Bin F	Red	Mengsel	
trans-2-penteenzuur	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,7	<0,01	0,2	0,7	<0,01	1,8	0,7	<0,01	0,8	0,7	<0,01	1,3	0,7	<0,01	D
1-ethyl-3,5-dimethylbenzeen	0,3	<0,01	<0,01	0,3	<0,01	<0,01	<0,01	14,1	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	E
2-methyl-2-buteen**	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	X**	<0,01	<0,01	<0,01	E
2-propenal	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,4	<0,01	<0,01	<0,01	E
aceetaldehyde	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,1	<0,01	<0,01	<0,01	E
benzeen	0,2	0,7	0,02	0,2	0,7	0,4	0,02	0,1	0,4	0,1	0,1	0,4	0,03	1,3	0,4	0,3	1,5	0,4	0,02	E
chryseen	<0,01	0,01	<0,01	<0,01	0,01	0,1	<0,01	0,1	0,1	<0,01	0,03	0,1	<0,01	<0,01	0,1	<0,01	0,2	0,1	<0,01	E
formaldehyde	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,1	<0,01	<0,01	<0,01	E
furaan	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,8	<0,01	<0,01	<0,01	E
iso-propylbenzeen (cumeen)	0,07	0,1	0,01	0,07	0,1	<0,01	0,01	0,9	<0,01	1,9	0,8	<0,01	1,9	0,1	<0,01	2,5	0,1	<0,01	1,4	E
o-toluidine	<0,01	0,02	<0,01	<0,01	0,02	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	E

*Bin = bindmiddel; WM ad = warm-mix additief; Red = rood pigment additief; Mengsel = asfaltmengsel

** Meetonzekerheid is te groot om een concentratie toe te kennen

4 Discussie

Dit onderzoek is opgezet als een verkennende studie met als doel inzicht te verkrijgen in de aard en relatieve omvang van het vrijkomen van individuele stoffen uit verschillende (rode) asfaltmengsels en de afzonderlijke componenten. De focus lag voornamelijk op het identificeren van stoffen met een verhoogd gezondheidsrisico. Door de gekozen experimentele opzet, waarbij emissies zijn gemeten onder gecontroleerde laboratoriumcondities, is het mogelijk om vrijgekomen individuele stoffen te karakteriseren en de componenten en mengsels onderling te vergelijken. Deze benadering is nadrukkelijk niet bedoeld om de mate van blootstelling van werknemers en de veiligheid van deze werknemers in kaart te brengen, maar is gericht op het in kaart brengen van het potentiële risico door naar het gevarenprofiel van de componenten en mengsels te kijken.

De resultaten laten zien dat bij alle onderzochte asfaltmengsels meerdere stoffen vrijkomen die vallen in hogere gevarenklassen (D en E). Daarbij zijn duidelijke verschillen zichtbaar tussen de mengsels, maar ook tussen de afzonderlijke componenten. Uit de resultaten blijkt dat de meeste stoffen die vrijkomen te herleiden zijn naar de toegepaste bindmiddelen. Voor stoffen welke vrijkomen uit het WMA additief en het rode pigment, welke niet vrijkomen bij de bindmiddelen, blijkt dat deze ook niet of slechts in beperkte mate vrijkomen uit de asfaltmengsels. Dit kan mogelijk worden verklaard door de relatief lage hoeveelheid van deze additieven aan het totale mengsel. Zo bestaat een asfaltmengsel op basis van blanke bindmiddelen ongeveer voor 6% uit bindmiddel en 1,2% aan pigment in geval van gebruikt blanke bindmiddelen of 3% pigment en 0,02% WMA additief in het geval van standaard zwarte bitumen.

Hoewel er tussen de verschillende asfaltmengsels en componenten wel verschillen in het aantal gevaarlijke stoffen (gevarenklasse D en E) waarneembaar zijn, blijkt dat deze stoffen niet altijd een grote bijdrage leveren aan de gemeten totale emissie. Deze bevindingen benadrukken het belang van een gefaseerde benadering van de risicobeoordeling, waarin met behulp van de huidige screening van de emissie gerichte keuzes gemaakt kunnen worden over mogelijke vervolgstappen, zoals het herformuleren van producten of het uitvoeren van blootstellingsmetingen in de praktijk.

De waargenomen variatie in emissieprofielen tussen de onderzochte asfaltmengsels en hun afzonderlijke componenten benadrukt dat de verschillende mengsels niet als homogene producten kunnen worden beschouwd. Hoewel uit alle asfaltmengsels gevaarlijke stoffen vrijkomen, verschilt zowel de samenstelling van de totale emissie als de relatieve bijdrage van deze stoffen aan de totale emissie aanzienlijk tussen de verschillende mengsels. Dit toont (zoals verwacht) aan dat verschillen in de formulering van de bindmiddelen een bepalende rol spelen in de emissieprofielen van de mengsels. De resultaten van de testen op componentniveau bieden hierbij belangrijke aanknopingspunten voor het afleiden van de bron van herkomst. In meerdere gevallen konden stoffen die vrijkwamen uit de mengsels worden herleid tot specifieke bindmiddelen. Dit ondersteunt de hypothese dat bindmiddelen een belangrijke bron vormen voor het merendeel van de gemeten stoffen. Tegelijkertijd laten de resultaten zien dat voor bepaalde additieven, waaronder het WMA-additief en het rode pigment, op componentniveau wel stoffen met een relevant gevarenprofiel kunnen vrijkomen, maar dat deze stoffen in de totale emissie van de asfaltmengsels niet of nauwelijks terug worden gevonden. Dit suggereert dat de relatieve bijdrage van dergelijke additieven aan het vrijkomen van gevaarlijke stoffen uit het totale asfaltmengsel beperkt is, mogelijk als gevolg van de relatief kleine hoeveelheden van deze additieven in de asfaltmengsels of interacties/chemische reacties binnen het mengsel. Hoewel dergelijke additieven weinig lijken bij te dragen aan het gevaarsprofiel van asfaltmengsels,

betekent dit niet automatisch dat de additieven geen risico zouden kunnen vormen voor werknemers in andere ketens waar deze worden toegepast of geproduceerd.

De combinatie van mengsel- en componentanalyses laat zien dat inzicht in de onderliggende formulering essentieel is om te begrijpen waar potentiële risico's vandaan komen en de juiste mitigerende maatregelen te kunnen nemen (zoals vervanging van bepaalde additieven). Dit is van belang voor de beoordeling van asfaltmengsels in een vroeg stadium van hun ontwikkeling: emissies van mengsels met een vergelijkbare VOS concentratie kunnen qua samenstelling substantieel verschillen, bijvoorbeeld met betrekking tot de bijdrage van stoffen met een verhoogd gezondheidsrisico aan de totale emissie. Een dergelijke differentiatie is relevant voor het identificeren van aangrijpingspunten voor productoptimalisatie.

De resultaten van deze studie roepen vragen op over de geschiktheid van het bestaande "VBW-meetprotocol" voor het meten van de mate van emissie dan wel blootstelling bij de verwerking van alternatieve asfaltmengsels. In het huidige meetprotocol ligt de nadruk op het meten van asfaltrook als primaire indicator aangevuld met het meten van een zestal aldehyden. Deze benadering sluit goed aan bij de stoffen die vrijkomen tijdens het verwerken van conventionele asfaltmengsels, die grotendeels bestaan uit alifatische koolwaterstoffen en cyclische alkanen. Deze stoffen hebben een karakteristieke adsorptieband bij 2800 – 3000 $^{cm-1}$ die bij de FTIR analyse gebruikt wordt voor de kwantificatie van asfaltrook. In vergelijking met bitumen hebben de onderzochte alternatieve bindmiddelen niet alleen een groter aandeel aan aromatische verbindingen (o.a. alkylbenzenen, naftalenen), maar bevatten ook stoffen die niet vallen binnen de traditionele definitie van asfaltrook, zoals o.a. furanen, fenolen, alcoholen en zuren. Ook zijn aldehyden gemeten die niet behoren tot de zes geselecteerde aldehyden in het "VBW-protocol". Aangezien sommige van deze stoffen worden ingedeeld in hogere gevarenklassen, betekent dit, dat een gemeten lage concentratie asfaltrook niet noodzakelijkerwijs betekent dat er geen sprake is van een gezondheidsrisico.

De in dit onderzoek onderzochte mengsels en componenten laten zien dat bij het gebruik van alternatieve bindmiddelen en additieven sprake kan zijn van een ander emissieprofiel, waarin andere gevaarlijke stoffen een grotere rol kunnen spelen. Het gebruik van asfaltrook als primaire indicator voor de mate van blootstelling is daarom mogelijk onvoldoende onderscheidend voor het beoordelen van de risico's tijdens de verwerking van nieuwe of gemodificeerde asfaltmengsels. De resultaten van de stof-specifieke emissie-screening zoals toegepast in de huidige studie bieden een nieuwe invalshoek, op basis waarvan verschillen in emissieprofielen tussen mengsels in kaart kunnen worden gebracht welke bij het meten van alleen asfaltrook verborgen blijven. Een dergelijke screening is bij innovatie van asfalt, waarbij bijvoorbeeld additieven of alternatieve bindmiddelen worden toegepast, noodzakelijk voor het ontwikkelen van een passende meetstrategie op basis waarvan kan worden beoordeeld of een asfaltmengsel veilig gebruikt kan worden in de praktijk.

De resultaten van deze studie dienen te worden geïnterpreteerd in relatie tot de specifieke componenten en mengsels die zijn geselecteerd voor deze studie. Van bitumen is bekend dat de samenstelling, onder andere afhankelijk van het type ruwe grondstoffen en het raffinageproces, kan variëren. Hierdoor kan er sprake zijn van verschillen in het emissieprofiel tussen batches bitumen. Hoewel een dergelijke variatie in samenstelling minder waarschijnlijk is in geval van blanke bindmiddelen, kunnen ook bij deze bindmiddelen proces- en batchafhankelijke verschillen optreden. De resultaten van deze studie zijn daarom primair representatief voor de onderzochte componenten en mengsels, en niet zonder meer extrapoleerbaar naar andere varianten van bitumen of blanke bindmiddelen. Daarnaast worden in de praktijk regelmatig additieven toegevoegd, om bijvoorbeeld een bepaalde hardheid van het bitumen te krijgen waarbij ook andere stoffen vrij kunnen komen tijdens productie en leggen.

5 Conclusie en aanbevelingen

5.1 Selectie van asfaltmengsels voor vervolgonderzoek

De resultaten van deze studie bieden aanknopingspunten voor het maken van keuzes ten aanzien van vervolgonderzoek. Uit de resultaten van het onderzoek blijkt dat uit alle onderzochte asfaltmengsels op basis van blanke bindmiddelen stoffen in hogere gevarenklassen (D en E) vrijkomen bij de onderzochte verwerkingstemperaturen. De mate waarin deze stoffen bijdragen aan de totale emissie verschilt echter per mengsel.

Asfaltmengsel B
Asfaltmengsel B bevat zwarte bitumen met een hoger percentage rood pigment (~3%) ten opzichte van de asfaltmengsels op basis van blanke bindmiddelen. De totale emissie zoals gemeten voor dit mengsel was relatief laag, en ook de relatieve bijdrage van gevaarlijke stoffen aan de totale emissie was laag. Asfaltmengsel B is daarom geschikt om mee te nemen bij het uitvoeren van testen in een praktijksituatie, en kan mogelijk als referentiemiddel dienen om met asfaltmengsels op basis van blanke bindmiddelen mee te vergelijken.

Asfaltmengsel C
De totale emissie zoals gemeten voor dit mengsel was relatief hoog, en ook de relatieve bijdrage van gevaarlijke stoffen aan de totale emissie is hoog (voornamelijk naftaleen, styreen en in mindere mate cumeen). Door de combinatie van een hoge totale emissie, en hoge bijdrage van gevaarlijke stoffen aan deze totale emissie is het onzeker of dit mengsel geschikt is voor het uitvoeren van metingen in de praktijk tijdens het gebruik van dit asfaltmengsel. Indien het mogelijk is om de concentraties van deze dominante stoffen in het blanke bindmiddel te verlagen of te vervangen, verdient dit de voorkeur. Indien het aanpassen van de samenstelling niet mogelijk is, kan worden overwogen metingen in de praktijk uit te voeren om de mate van blootstelling van asfaltwerkers nader te kunnen beoordelen.

Asfaltmengsel D
Voor Asfaltmengsel D is de laagste concentraties gevaarlijke stoffen in gevarenklasse D en E gemeten in vergelijking met andere asfaltmengsels op basis van blanke bindmiddelen. Tegelijkertijd is de totale emissie zoals gemeten voor dit mengsel relatief hoog; deze is na de totale emissie zoals gemeten voor asfaltmengsel E het hoogst van de onderzochte mengsels waarin blank bindmiddel wordt toegepast. De bijdrage van stoffen in hogere gevaarklassen aan de totale emissie wordt voornamelijk veroorzaakt door de gemeten concentraties styreen, en in mindere mate naftaleen en cumeen. Op basis van de resultaten wordt dit mengsel beschouwd als een geschikte kandidaat voor vervolgonderzoek waarin blootstellingsmetingen in de praktijk worden uitgevoerd om de veiligheid van werknemers tijdens de verwerking van rood asfalt te kunnen beoordelen.

Asfaltmengsel E
Voor asfaltmengsel E is de hoogste totale emissie gemeten in vergelijking met alle onderzochte mengsels. Daarnaast is de op twee na hoogste hoeveelheid van stoffen in de gevaarklassen D en E gemeten. Daarnaast zijn tijdens de metingen uit dit mengsel een relatief groot aantal stoffen die zijn ingedeeld in de hogere gevaarklassen vrijgekomen. Gezien de combinatie van een hoge totale emissie en het vrijkomen van meerdere potentieel gevaarlijke stoffen ligt het niet voor de hand om dit mengsel te selecteren voor vervolgonderzoek in de praktijk.

Asfaltmengsel F
Voor asfaltmengsel F zijn lage totale emissies gemeten in vergelijking met de overige mengsels op basis van blanke bindmiddelen. Hoewel de relatieve bijdrage van stoffen die zijn ingedeeld in gevarenklassen D en E aan de totale emissie iets hoger is dan voor sommige andere asfaltmengsels op basis van blank bindmiddel (met uitzondering van mengsel E), blijft door de lage totale emissie de absolute bijdrage van deze gevaarlijke stoffen beperkt. De gemeten concentraties cumeen, styreen en naftaleen zijn duidelijk lager dan voor mengsels met de andere onderzochte blanke bindmiddelen. Op basis van deze resultaten wordt Asfaltmengsel F aangemerkt als een geschikte kandidaat voor vervolgonderzoek in de praktijk.

In conclusie, de studie laat zien dat bij alle onderzochte asfaltmengsels gevaarlijke stoffen vrijkomen, maar dat vooral mengsels met blanke bindmiddelen een duidelijke hogere emissie veroorzaken met meer stoffen in gevarenklassen D en E. De emissies blijken vooral bepaald te worden door het type bindmiddel, terwijl pigment en WMA-additief een beperkte rol spelen.

5.2 Meetstrategie

Uit dit onderzoek blijkt dat het bestaande “VBW-meetprotocol” voor het meten van asfaltrook onvoldoende geschikt is voor het meten van emissies en blootstellingen aan alternatieve asfaltmengsels. Het bestaande protocol is gericht op conventionele asfaltmengsels, die grotendeels bestaan uit alifatische koolwaterstoffen en cyclische alkanen, terwijl alternatieve asfaltmengsels een heel scala aan (gevaarlijke) stoffen kunnen bevatten die buiten de traditionele definitie van asfaltrook vallen.

De resultaten benadrukken het belang van een brede screening op gevaarlijke stoffen bij alternatieve asfaltmengsel voordat deze mengsels worden toegepast in de praktijk. Bij blootstellingsmetingen is het wenselijk om het meetprotocol af te stemmen op het type asfaltmengsel dat wordt toepast en de gemeten stoffen in de brede screening. Op die manier wordt ervoor gezorgd dat de relevante stoffen worden gemeten in de praktijk. Dit draagt bij aan een betere beoordeling van de mate van blootstelling tijdens het verwerken van asfalt.

6 Literatuur

Arnone M, Koppisch D, Smola T, Gabriel S, Verbist K, Visser R. (2015) Hazard banding in compliance with the new Globally Harmonised System (GHS) for use in control banding tools. Regulatory Toxicology and Pharmacology, Vol 73(1): 287-295.

Vakgroep Bitumineuze Werken (VBW). (2024) Meetprotocol Blootstellingsonderzoek Asfaltrook. Bouwend Nederland, Zoetermeer.

7 Ondertekening

Utrecht, 24 juni 2024

ValidSigned door Carina de Jong
op 24-06-2026

C.M. de Jong-Rubingh
Research Manager RAPID

ValidSigned door Remy Franken
op 24-06-2026

R. Franken
Auteur

Health & Work

Princetonlaan 6
3584 CB Utrecht
www.tno.nl

TNO innovation for life