

Tekst Ruud van Herpen en Richard van de Nes

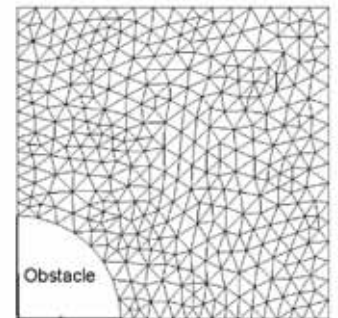
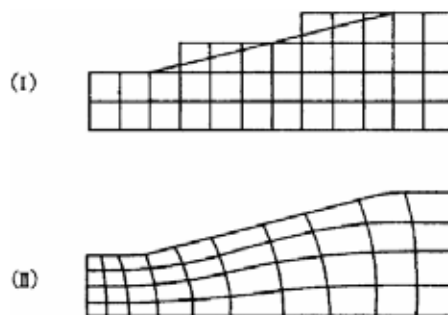
# CFD betrouwbaar hulpmiddel om brand in parkeergarage te simuleren

Grote parkeergarages zijn vaak onderwerp van CFD-simulaties (Computational Fluid Dynamics). Vanwege het overschrijden van de toegestane brandcompartimentsgrootte wordt in die situaties in veel gevallen brandventilatie als gelijkwaardige oplossing voor brandbeheersing toegepast. Die brandventilatie wordt vervolgens gedimensioneerd op basis van CFD-simulaties. Ruud van Herpen van Adviesburo Nieman en tevens lector brandveiligheid in de bouw en Richard van de Nes van ONE Simulations gaan in de materie.

**C**FD houdt in dat in een computermodel lucht- en rookstromingen worden gesimuleerd. Het ruimtevolumen van de parkeergarage wordt daarbij in kleine volume-elementjes opgedeeld, waardoor een rekengrid ontstaat. Voor elk volume-elementje worden de stromingsvergelijkingen per tijdstapje opgelost. Daarbij wordt rekening gehouden met de behoudswetten van massa, energie, impuls en impulsmoment.

Dimensionering van het brandventilatiesysteem is een aandachtspunt. In de simulatie van een autobrand in een parkeergarage en de bijbehorende rook- en temperatuurontwikkeling blijken verschillende uitgangspunten en randvoorwaarden te worden gehanteerd. Dit leidt bij een gelijke casus tot verschillende resultaten.

In een CFD simulatie moet een groot aantal modellerkeuzen worden gemaakt. Dit begint al bij het maken van het bouwkundige 3D model. In het algemeen leidt een groter detailniveau tot een betrouwbaarder resultaat. Echter, dit leidt ook tot een fijner rekengrid met meer cellen en een langere rekentijd. Het is dus van belang alleen die details op te nemen die belangrijk zijn voor de uitkomst van de simulatie. In sommige gevallen, met name bij natuurlijke ventilatie, is het belangrijk het rekendomein groter te maken dan de bouwkundig begrensde



**Diverse gridvormen, tweedimensionaal weergegeven. Een orthogonaal grid (links) kent de nodige beperkingen. Een ongestructureerd grid (rechts) geeft de meeste vormvrijheid.**

ruimte. De in- en uitstroming van lucht en rook door openingen kan alleen realistisch worden gemodelleerd wanneer een (klein) deel van de omgeving wordt meegenomen.

## Type grid

Niet alleen de bouwkundige details bepalen de gridgrootte. Ook het type grid is van belang. Zo is het met een ongestructureerd grid eenvoudiger om willekeurige bouwkundige begrenzingen te modellen (schuine en ronde vormen) dan met een gestructureerd grid, zeker wanneer dat gestructureerde grid orthogonaal (blokvormig) is. Om vast te kunnen stellen dat met een voldoende

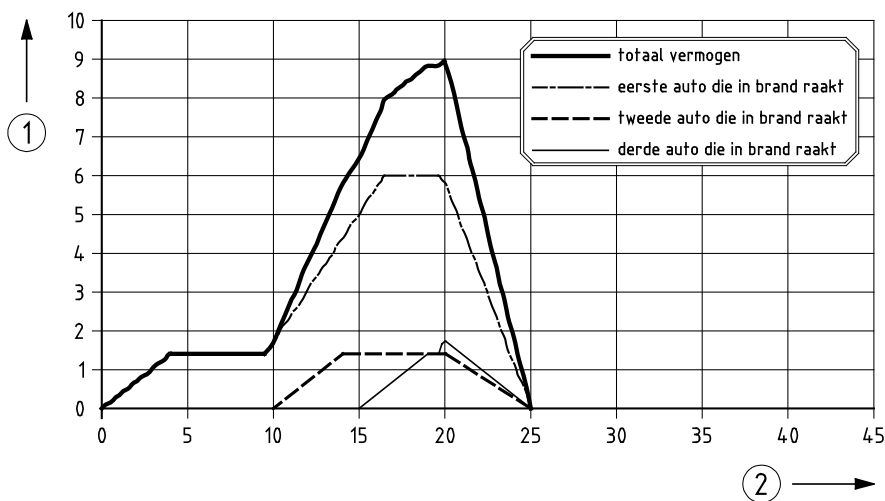
nauwkeurig grid gerekend is, moet het resultaat van een stationaire berekening (een berekening met constante randcondities en constante brandhaard) worden vergeleken met het resultaat van een aanzienlijk fijner rekengrid. Komen die resultaten met elkaar overeen, dan is het gehanteerde rekengrid voldoende nauwkeurig. In de praktijk wordt dit niet voor elke simulatie afzonderlijk uitgevoerd, maar het is belangrijk dat een adviseur de gevoeligheid van de gridgrootte ten minste voor vergelijkbare situaties heeft onderzocht. Naast een onderzoek naar de gevoeligheid van het rekengrid dient er

ook inzicht te zijn in de gevoeligheid met betrekking tot de behaalde kwaliteit van de oplossing, ofwel convergentie. In een CFD-simulatie worden differentiaalvergelijkingen iteratief opgelost. Dit wil zeggen dat de berekening wordt herhaald totdat de uitkomst ongeveer gelijk is. De convergentie is het verschil tussen het resultaat van de voorgaande iteratie en de huidige. Hoe kleiner dit verschil hoe betrouwbaarder de uitkomst. Een adviseur dient de gevoeligheid van de behaalde convergentie op de uitkomst te kennen en zorg te dragen voor een voldoende geconvergeerde berekening. De minimaal vereiste convergentie hangt sterk af van verschillende factoren, waaronder het gekozen turbulentiemodel.

Er zijn verschillende manieren waarop warmteoverdracht in bouwkundige constructies kunnen worden gesimuleerd. De wijze van modeleren heeft effect op de temperatuur van de rook. Het meest realistisch is het opnemen van de constructie in het rekenmodel en deze dus ook te voorzien van een grid. Dit kost echter extra rekentijd en er zijn geschikte alternatieven. Het meest geavanceerde alternatief is het modelleren van constructiedelen als een vaste stof, waarbij ook opwarming van deze delen wordt meegenomen. Een vereenvoudiging van dit model is het toepassen van een constante warmte-overdrachtcoëfficiënt, die is gebaseerd op de eigenschappen van de constructiedelen. Het opwarmen van de constructie kan met deze methode echter minder goed worden voorspeld. Een ander alternatief is het veronderstellen van een adiabatische constructie. Dit betekent dat er geen warmte uitwisseling is tussen de hete rook en de constructie, dus dat de constructie niet opwarmt en de rook niet afkoelt. Als laatste kan de constructie worden gemodelleerd met een constante temperatuur.

## Brandmodel

Er zijn ruwweg twee manieren van het modelleren van brand: een zogenaamd inert brandmodel en een verbrandingsmodel. In het inerte brandmodel wordt geen chemische reactie gesimuleerd maar wordt de brand nagebootst als een bron van energie en rook. Het is van belang dat het volume waarin de verbranding plaatsvindt past bij het brandvermogen. Bij een te klein volume wordt de temperatuur in de bron te hoog en bij een te groot volume te laag. Een veelge-



**Het autobrandscenario volgens ontwerp-NEN 6098. Dit is een vermogensscenario; het brandvermogen op as 1 uitgezet tegen de tijd op as 2. Brandstofeigenschappen zijn hierin niet opgenomen.**

maakte fout is het hanteren van een constant volume met een variabel brandvermogen. Hierdoor is in het begin van de brand de maximale temperatuur te laag en daarmee ook de impuls voor de ceiling jet. Bij een verbrandingsmodel pyrolyseert de brandstof in de brandhaard. Het vlamvolume wordt hierdoor in de CFD-simulatie bepaald op basis van de hoeveelheid aanwezige brand- en zuurstof. Dat geldt ook voor de resulterende temperatuur en turbulentie-intensiteit. Dit verbrandingsmodel is dus realistischer en betrouwbaarder dan het inerte brandmodel.

Het toe te passen brandmodel hangt af van het doel van de simulatie. Voor bijvoorbeeld de thermische belasting nabij een brandhaard kan beter het verbrandingsmodel worden gebruikt. Voor het onderzoek naar de rookverspreiding in een parkeergarage is een inert brandmodel in de meeste gevallen prima toepasbaar. In alle gevallen geldt dat nabij de brand een fijnmazig grid wordt gebruikt en dat de brand goed gedefinieerd is. Overigens legt de gebruiker het brandvermogen in simulaties meestal op en dus is de brandontwikkeling niet een resultaat van de simulatie maar een vooraf bepaalde randvoorwaarde.

Bij beide brandmodellen is het mogelijk de rookproductie via het rookpotentieel en de verbrandingswaarde te koppelen aan het brandvermogen. Het komt echter regelmatig voor dat de zichtlengte foutief wordt berekend, deze wordt vaak een factor 10 of

meer te gunstig ingeschat.

Het spreekt voor zich dat de plaats van de brandhaard voor rookverspreiding en thermische belasting een grote rol speelt. Vaak wordt uitgegaan van een worstcaselocatie. Echter, het voorspellen van de worstcaselocatie is feitelijk niet mogelijk. Het is dan ook verstandig om een aantal simulaties uit te voeren met verschillende brandlocaties.

## Stromingsmodel

Elk CFD-pakket bezit een goed stromingsmodel. Immers, het simuleren van gas- of vloeistofstromingen is de essentie van CFD. Toch zijn er verschillen in stroming- en turbulentiemodellen met verschillende toepassingsgebieden.

Er is een belangrijk verschil tussen RANS- en LES-simulaties. Beide zijn succesvol gevalideerd voor brandsimulaties. Een RANS-simulatie levert nog betrouwbare resultaten met een aanzienlijk grof rekengrid en grote tijdstap. Een LES-simulatie met een fijn rekengrid en kleine tijdstap geeft een gedetailleerder resultaat. In een LES-simulatie heeft de brandhaard een grilliger karakter zoals in de praktijk ook bij branden wordt gezien. Er worden grotere lokale verschillen in de temperatuur en rookdichtheid gevonden. De keuze van het model hangt af van het doel van de studie. Beide modellen zijn geschikt voor brandsimulaties, mits de beperkingen in acht worden genomen.

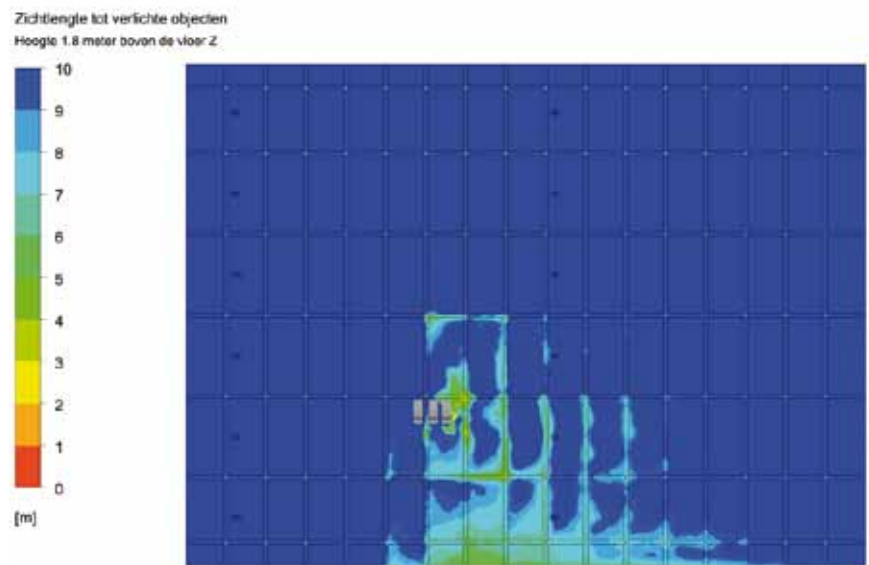
Wanneer warmtestraling in een CFD-simulatie wordt beschouwd, resulteert dat in een forse toename in rekentijd. Dat wordt veroorzaakt doordat voor warmteoverdracht door straling een heel ander model (gebaseerd op ray-tracing) nodig is. Warmteoverdracht door straling is bij hoge temperaturen belangrijk. Voor het bepalen van de thermische belasting en de mogelijkheden tot vluchten of repressief optreden moet warmtestraling dan ook altijd worden beschouwd.

Warmtestraling treedt op vanaf de vlammen van de brandhaard en vanaf het hete rookgasvolume naar constructies en personen in de directe omgeving. Daarbij is sprake van onderlinge beïnvloeding. Met name de straling vanaf de vlammen wordt deels door het rookgasvolume geabsorbeerd. De mate van absorptie hangt af van de optische dichtheid van de rook. Wanneer warmtestraling niet in de CFD-simulatie wordt beschouwd, is in elk geval een correctie op het brandvermogen noodzakelijk. Voor brandtemperaturen kan worden aangehouden dat circa 70 procent van het vermogen convectief wordt afgegeven aan de lucht en circa 30 procent door straling aan de rook en constructies. Wanneer het brandvermogen wordt gereduceerd tot 70 procent wordt de rook ter plaatse van de brandhaard minder heet en verliest ook minder warmte aan de constructie. Per saldo moet de rooktemperatuur op grotere afstand van de brand dan ongeveer gelijk zijn aan de rooktemperatuur die met een stralingsmodel wordt verkregen. Het simuleren en dimensioneren van een brandventilatiesysteem van een parkeergarage is eventueel ook zonder stralingsmodel mogelijk.

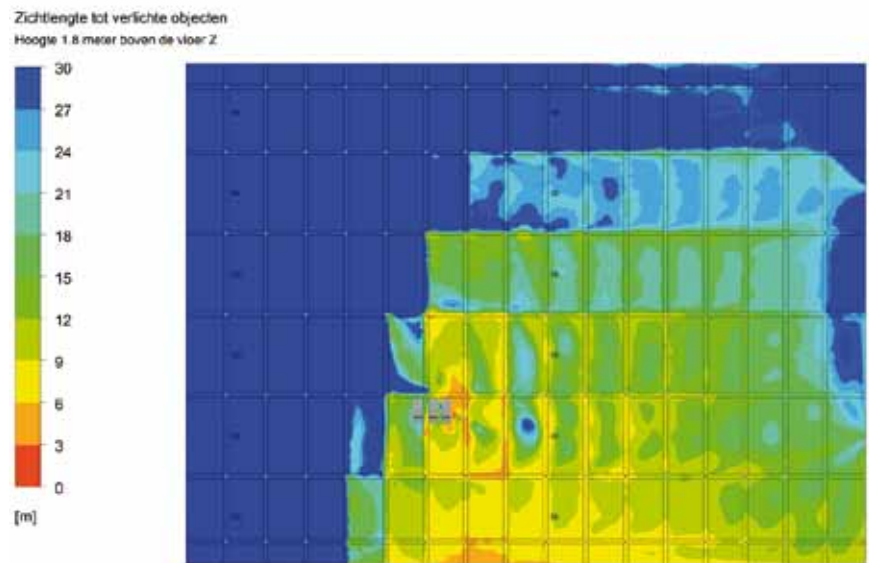
### Presentatie

Het modelleren heeft een directe invloed op de uitkomst van de simulatie. De manier van presenteren is echter ook belangrijk voor het interpreteren van de figuren. De rookverspreiding kan bijvoorbeeld inzichtelijk worden gemaakt door het presenteren van de zichtlengte of optische dichtheid. De verschillende manieren van presenteren kunnen een heel verschillende interpretatie geven. In grafieken hiernaast is telkens hetzelfde CFD resultaat op verschillende manieren gepresenteerd. In de bovenste grafiek is de zichtlengte weergegeven op

een schaal van 0 tot 10 meter en lijkt het alsof de garage nauwelijks rook bevat. In de onderste grafiek loopt de schaal van 0 tot 30 meter en lijkt de situatie in de garage een stuk slechter. In de grafiek bovenaan pagina 22 loopt de schaal van 0 tot 100 meter en lijkt er nauwelijks zicht in de garage. Schijn bedriegt in dat geval: zichtlengten van meer dan 20 meter worden niet meer ervaren als rookbelemmering. Ter vergelijking: de foto op pagina 22 geeft een zichtlengte van ongeveer vier meter weer.

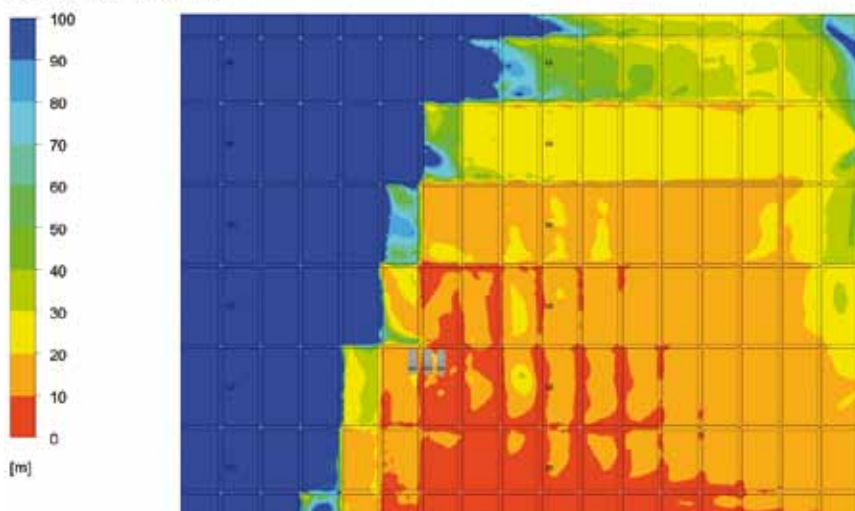


**Zichtlengte in een parkeergarage, weergegeven op een schaal van 0 tot 10 meter.**



**Zichtlengte in een parkeergarage, weergegeven op een schaal van 0 tot 30 meter.**

Zichtlengte tot verlichte objecten  
Hoogte 1.8 meter boven de vloer Z



Zichtlengte in een parkeergarage, weergegeven op een schaal van 0 tot 100 meter.



Parkeergarage met rookbelemmering; de zichtlengte voor niet-lichtgevende voorwerpen bedraagt hier gemiddeld ongeveer vijf meter.

Het weergeven van de zichtlengte zoals in de grafieken is feitelijk onjuist. Immers, de zichtlengte kan niet in een willekeurig punt in de parkeergarage worden bepaald, maar is in dat punt richtingsafhankelijk. De zichtlengte wordt verkregen uit de

optische dichtheid, geïntegreerd over de zichtlengte weg. Naast de schaalverdeling en variabele die gepresenteerd worden, speelt ook de hoogte waarop de resultaten worden weergegeven een belangrijke rol. Vooral tijdens de

brand stijgt hete rook op en is de zichtlengte nabij het plafond van de garage kleiner dan boven de vloer in de garage. Een doorsnede is vaak een nuttige toevoeging.

## Dimensioneren

CFD simulaties kunnen goed worden ingezet om de brand- en rookventilatie in parkeergarages te dimensioneren. In een gelijke casus kunnen verschillen optreden bij de simulatie van een autobrand als gevolg van een verschil in aannamen, interpretatie van randcondities en de wijze van presentatie. Ten minste de volgende modelleerkeuzen dienen goed te worden onderbouwd en toegelicht:

- aannamen met betrekking tot het 3D model
- toegepast brandmodel
- rookbron voor de bepaling van de optische dichtheid
- warmtetransport door constructie-elementen
- stralingsmodel, indien toegepast
- toegepaste turbulentie model

Naast de modellering dient voor een voldoende kwaliteit van de CFD-simulatie te worden gezorgd. Dit wordt bereikt door het toepassen van een passend rekengrid met verfijningen op de juiste plekken, ter plaatse van de brandhaard, componenten van het ventilatiesysteem en openingen. Er dient tevens een voldoende mate van convergentie te worden behaald. Om de kwaliteit van een CFD te kunnen beoordelen dient inzicht in de nauwkeurigheid van het rekengrid en de behaalde convergentie te worden verschaft. Ten slotte heeft de presentatie van de resultaten invloed op de interpretatie van de figuren. Bij een visuele presentatie dienen de schaalverdelingen zo te worden gekozen dat de figuren informatie verschaffen die past bij de onderzoeksvraag. 🔄

## Zichtlengteberekening

De zichtlengteberekening wordt vaak verschillend berekend. Er is echter maar één juiste manier om de gegevens te vertalen naar de zichtlengte in de CFD.

Zie [www.brandveilig.com/zichtlengte](http://www.brandveilig.com/zichtlengte)

## KADER: Optische dichtheid en zichtlengte

De zichtlengte berekening wordt vaak verschillend berekend. Er is echter uiteraard maar één juiste manier om de gegevens te vertalen naar de zichtlengte in de CFD. In het algemeen worden de 3 basisgegevens om de zichtlengte te berekenen gegeven, namelijk het brandvermogen (RHR in W), de verbrandingswaarde ( $H_c$  in J/kg) en het rookpotentieel (R in  $m^2/kg$ ).

Het brandvermogen in de tijd wordt voor een autobrandscenario voorgeschreven in concept-NEN 6098. De verbrandingswaarde is een eigenschap van de brandstof, dit is de hoeveel energie per kilogram brandstof, voor een auto meestal  $H_c = 25$  MJ/kg (betrokken op de totale massa van de auto).

Door het vermogen te delen door de verbrandingswaarde kan de massa-afname ( $m_{brandstof}$  in kg/s) van het brandende object worden bepaald voor de brandstofbeheerste situatie:

$$m_{brandstof} = \frac{RHR}{H_c}$$

Het rookpotentieel is, net als de verbrandingswaarde, een eigenschap van de brandstof en zegt iets over de mate waarin de verbrandingsproducten van een brand (rook) de transmissie van licht blokkeren. Bij proeven met autobranden is de transmissie van licht door de rook en de massa-afname van de brandstof (auto) gemeten. De transmissie is daarbij gedefinieerd als de 10-logaritme van de verhouding van ontvangen en uitgezonden lichtintensiteit. Op basis hiervan is het rookpotentieel van een autobrand bepaald op  $R = 400$   $m^2/kg$ , een conservatieve waarde.

De massa-afname behorende bij de brand dient in het CFD model ter plaatse van de brand vrij te komen in de vorm van verbrandingsproducten. Deze zullen mengen met de aanwezige luchtvolume ( $V$  in  $m^3$ ) in de garage, waardoor een bepaalde dichtheid van de verbrandingsproducten ontstaat. Door deze dichtheid te vermenigvuldigen met het rookpotentieel wordt de optische dichtheid ( $D_{rook}$  in  $m^{-1}$ ) van de rook bepaald:

$$D_{rook} = R \cdot \frac{m_{brandstof}}{V}$$

Op basis van de contrastfactor (C, eenheidsloos) kan de optische dichtheid worden vertaald in de zichtlengte ( $Z_{rook}$  in m) over de zichtafstand x door de rook:

$$Z_{rook} = \int_0^x \frac{C}{D_{rook}} dx$$

De contrastfactor hangt af van het waar te nemen object. Zo straalt een autobrand veel licht uit en heeft dus een hogere contrastfactor dan bijvoorbeeld de wanden van een parkeergarage. Voor de contrastfactoren van niet-lichtgevende objecten worden waarden van 1 à 1,3 gehanteerd. Voor lichtgevende objecten wordt een waarde van 3 gehanteerd.

Naast de bepaling van de zichtlengte op basis van de totale massa-afname van de brandstof wordt in veel CFD berekeningen de zichtlengte vaak gerelateerd aan de roetdeeltjes (vaste deeltjes) in de rook, deze belemmeren immers het zicht. Dit houdt in dat de massa-afname van de brandstof moet worden vermenigvuldigd met een roet conversie factor (soot yield  $Y_s$ , eenheidsloos).



$$m_{roet} = Y_s \cdot \frac{RHR}{H_c}$$

De dichtheid van de rook bestaat in dit geval uitsluitend uit een dichtheid van de roetdeeltjes ( $\rho_{roet}$ , eenheid  $\text{kg}/\text{m}^3$ ). Om vanuit de massa roetdeeltjes de optische dichtheid te bepalen dient dan de massa extinctie coëfficiënt ( $K_m$ , eenheid  $\text{m}^2/\text{kg}$ ) te worden gebruikt. In de literatuur wordt hiervoor vaak  $8.700 \text{ m}^2/\text{kg}$  gehanteerd:

$$D_{roet} = K_m \cdot \frac{m_{roet}}{V}$$

De zichtlengte ( $Z_{roet}$ , eenheid m) wordt op dezelfde wijze gevonden als bij de eerste methode. Omdat de extinctie-coëfficiënt bepaald is op basis van de natuurlijke logaritme van lichtintensiteitsverhoudingen, moet bij deze methode de contrastfactor 2,3 keer groter worden genomen:

$$Z_{roet} = 2,3 \int_0^x \frac{C}{D_{roet}} dx$$

Uiteraard moeten beide methoden tot dezelfde zichtlengte leiden,  $Z_{rook}$  moet dus gelijk zijn aan  $Z_{roet}$ . De roet conversiefactor en het rookpotentieel hangen dan als volgt met elkaar samen:

$$Y_s = \frac{2,3 \cdot R}{K_m}$$

Als dus een massa extinctie coëfficiënt van  $K_m=8.700 \text{ m}^2/\text{kg}$  wordt gehanteerd is de roet conversie factor bij een rookpotentieel van  $R=400 \text{ m}^2/\text{kg}$  gelijk aan  $Y_s=0,106$ .



Figuur: Een autobrand produceert veel rook