

# Het verschijnsel rook

Kennisbank Bouwfysica  
Auteur: Ruud van Herpen MSc.

## 1 Wat is rook?

Bij verbranding van een brandstof ontstaat rook als een verbrandingsproduct. Rook bevat hete verbrandingsgassen (vaak vooral CO<sub>2</sub> en H<sub>2</sub>O), vaste roetdeeltjes (risico van zichtbelemmering) en half verbrande producten (gevaar voor ontbranding, flash-over en toxiciteit, zoals bij CO).

Rook is bedreigend voor de aanwezige personen en kan het vluchten belemmeren als gevolg van:

- blootstelling aan hete gassen;
- blootstelling aan warmtestraling;
- verlies van zicht;
- blootstelling aan toxische stoffen.

## 2 Vluchtcriteria

### 2.1 Temperatuur

Mensen die zich in hete lucht of rook bevinden, kunnen door twee mechanismen letsel oplopen:

- huidverbranding;
- longverbranding.

De onderstaande tabel geeft de temperatuurseffecten op mensen gebaseerd op droge lucht:

temperatuur [°C]	responsie
127	moeilijk ademen
140	tolerantielimiet 5 minuten
149	moeilijk door de mond ademen, grens voor vluchten
160	ondraaglijke pijn
182	onomkeerbare schade in 30 seconden
200	ademhalingssysteem bezwijkt binnen 4 minuten

tabel 1. temperatuur versus responsie

Boven 150 °C ontstaan binnen 5 minuten huidbrandwonden. Onder de 70 °C kan men oncomfortabel, maar wel veilig, langere tijd verblijven.

Tussen 70 en 150 °C geldt de onderstaande betrekking tussen de maximale blootstelduur  $t$  in seconden en de temperatuur  $T$  in °C:

$$t = \frac{5,33 \cdot 10^8}{T^{3,66}} \text{ [s]}$$

Voor blootstelling aan warmte in een “watermist” omgeving - die ontstaat na gebruik van een sprinkler - wordt gesteld dat bij een temperatuur van 50 °C de warmteoverdracht naar de huid zo sterk toegenomen is ten opzichte van een droge omgeving en dat daarnaast de kans op condensatie in de longen eveneens zodanig is toegenomen dat letaliteit optreedt.

Samenvattend worden voor verblijf in een warme omgeving de volgende kritieke waarden voorgesteld:

- hinderlijk: temperatuur  $\leq 70^\circ\text{C}$  indien droge omgeving (oncomfortabel, maar wel veilig, langere tijd te verblijven)
- letaal: temperatuur  $\geq 150^\circ\text{C}$  indien droge omgeving (er ontstaan binnen 5 minuten brandwonden op de huid)
- letaal: temperatuur  $\leq 50^\circ\text{C}$  indien een vochtige omgeving

## 2.2 Warmtestraling

Ook door de warmtestraling uitgezonden door hete gassen en vaste oppervlakken - buiten het vlambereik en de hete rookgaszone - kunnen personen worden bedreigd. Hierbij is maatgevend:

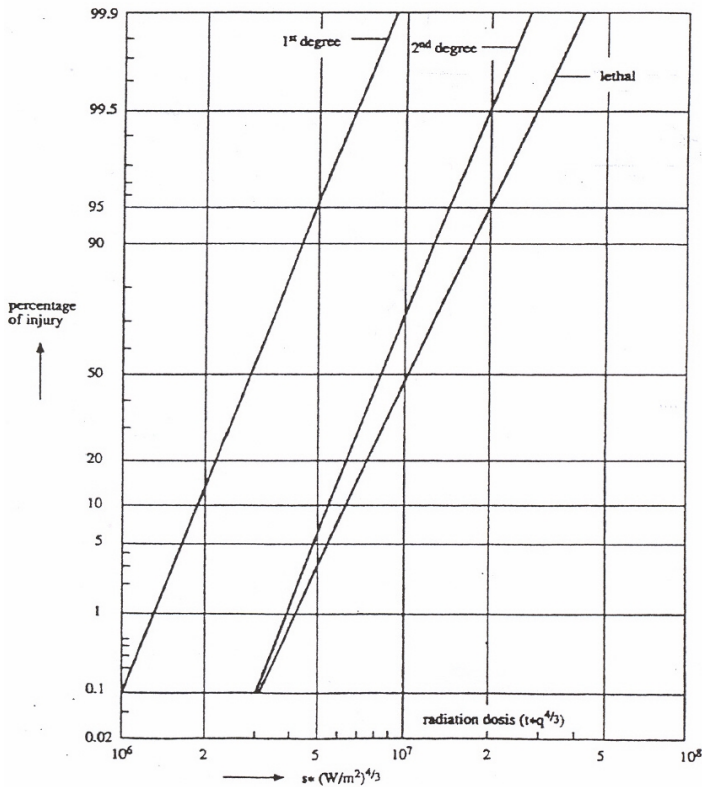
- intensiteit van de warmtestraling die invalt op de huid;
- tijdsduur van blootstelling;
- plaats die aan de warmtestraling wordt blootgesteld.

Gegevens over de kritieke niveaus voor de warmtestralingsflux kunnen worden ontleend aan de richtlijn CPR-16. Deze geeft zogenaamde Probit-relaties voor eerste- en tweedegraads brandwonden en voor dodelijke blootstelling, afgeleid van gegevens voor infraroodstraling, gemeten in experimenten met vloeistofbranden. Het schadeniveau is afhankelijk van de opgenomen dosis warmte uitgedrukt in het product van de blootstellingstijd “t” en de warmtestralingsflux “q”.

- eerstegraads brandwonden:  $\text{Probit} = -39,83 + 3,0186 \cdot \ln(t \cdot q^{4/3})$
- tweedegraads brandwonden:  $\text{Probit} = -43,14 + 3,0186 \cdot \ln(t \cdot q^{4/3})$
- dodelijk:  $\text{Probit} = -36,38 + 2,5600 \cdot \ln(t \cdot q^{4/3})$

De Probit-waarden worden via een conversietabel omgerekend naar de kans op optreden van het betreffende schadeniveau (zie figuur 1).

Hieruit blijkt dat bij een dosis van  $1,05 \times 10^7 \text{ [s(W/m}^2\text{)}^{4/3}]$  50% van de personen overlijdt. Dit komt overeen met 20 seconden lang  $20 \text{ kW/m}^2$  of met 100 seconden lang  $5,8 \text{ kW/m}^2$ . Eerstegraads brandwonden ontstaan na 20 seconden blootstelling aan  $7,3 \text{ kW/m}^2$  of na 100 seconden aan  $2,1 \text{ kW/m}^2$ . Anders gezegd, bij een vluchtperiode van 100 seconden en een stralingsniveau van  $6 \text{ kW/m}^2$  zal circa de helft van de vluchtenden omkomen, terwijl bij  $2 \text{ kW/m}^2$  de helft van de vluchtenden eerstegraads brandwonden zal oplopen. De relaties gelden voor een naakte huid.



figuur 1. schadeniveau versus stralingsdosis

Overigens is in de CPR 16 niet duidelijk aangegeven of het schadeniveau “dodelijk” uitgaat van bij voorbeeld een normaal gekleed persoon met een beperkt percentage naakte huid (handen, hoofd). Bij een door kleding beschermde huid is niet alleen de warmtestraling bepalend voor de optredende schade. De huidtemperatuur wordt ook bepaald door de kledingisolatie, rekening houdend met de eventuele luchtlagen hierin en het gedrag van de kleding bij brand (smelten, ontsteken).

Samenvattend worden voor straling een tweetal kritieke waarden voorgesteld, gebaseerd op het effect na 100 seconden:

- hinderlijk: stralingsflux = 2 kW/m² (helpt vluchtenden eerstegraads brandwonden);
- letaal: stralingsflux = 6 kW/m² (helpt vluchtenden zal omkomen).

### 2.3 Zicht

Een maatgevende bedreiging bij brand is zichtverlies door aanwezige rook. Hierdoor treedt desoriëntatie op met als gevolg dat mensen niet meer in staat zijn om (snel) de vluchtuitgangen te bereiken. Zichtverlies hangt samen met:

- lichtabsorptie en lichtverstrooiing door rookdeeltjes;
- irriterende werking van deeltjes en gas op de ogen.

De rookdeeltjes ontstaan in de vlammen als vaste deeltjes (as) en vloeibare deeltjes (condensaat). De productie is naast het verbrandingsproduct afhankelijk van de verbrandingscondities (temperatuur, zuurstoftoevoer). De rook verspreidt zich met de door brand geïnduceerde stroming en onder invloed van de heersende mechanische ventilatie.

Maatgevend voor de zichtomstandigheden is de zichtlengte. Dit is de afstand waarover een persoon voorwerpen kan waarnemen. Als relatie tussen de zichtlengte en de optische rookdichtheid geldt:

Z            1 / RD voor niet-lichtgevende voorwerpen;  
Z            2,5 / RD voor lichtgevende voorwerpen.

Waarin:

- Z is de zichtlengte in m;
- RD is de rookdichtheid in  $\text{m}^{-1}$

Hierbij wordt uitgegaan van een gelijkmatige rookverspreiding over de gehele zichtlengte. Bij variërende rookdichtheid over het "zichtpad" heeft padintegratie plaats.

De formele bouwregelgeving in Nederland kent geen grenswaarden. Het Bouwbesluit stelt een maximum aan de loopafstand die in (dichte) rook mag worden afgelegd, afhankelijk van de bezettingsgraadklasse. Dit komt vaak neer op een loopafstand van 30 meter in een rookcompartiment. Buiten het rookcompartiment is de vluchtroute volledig rookvrij, omdat deze van de brandruimte gescheiden moet zijn door rookwerende constructies.

De maximale loopafstand van 30 m is ontleend aan:

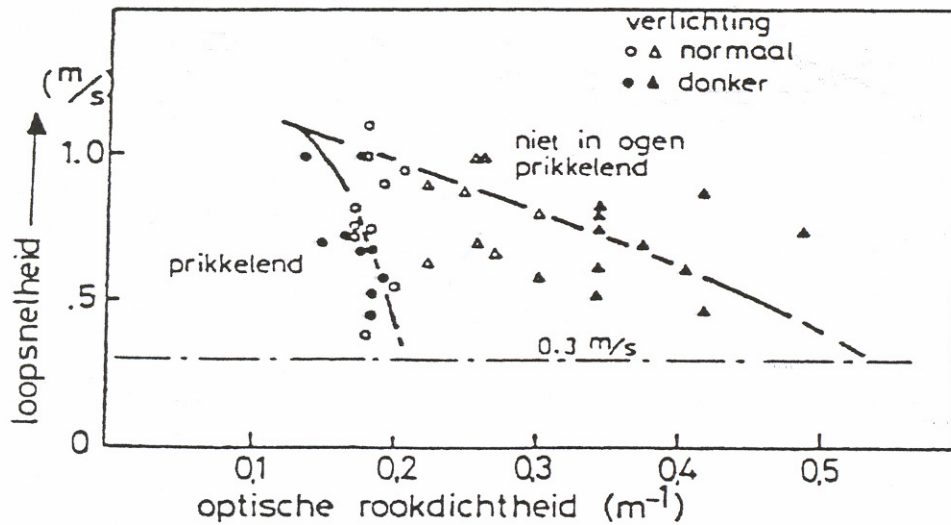
- de observatie dat mensen gedurende 30 seconden door rook kunnen lopen;
- de conservatieve veronderstelling dat rook zich door het gehele rookcompartiment kan hebben verspreid voordat aanwezigen vluchten.

Voor grotere compartimenten verwijst het Bouwbesluit (toelichting) naar een beoordelingsmethodiek "Vluchten bij brand uit grotere compartimenten"; daarin wordt gesteld dat een vluchtroute bruikbaar is zolang de zichtlengte berokken op niet lichtgevende voorwerpen ten minste 30 meter bedraagt.

Als de zichtlengte onder de 30 meter daalt, is de vluchtroute nog 30 seconden bruikbaar. De grens van 30 meter zichtlengte wordt ook gehanteerd bij het onderwerp van rook- en warmteafvoer systemen (RWA) voor bescherming van vluchtroutes.

Het is niet eenvoudig criteria te stellen aan de zichtlengte, overeenkomend met eerder genoemde effectniveaus als hinder, gewonden, doden. Mensen raken niet gewond of overlijden niet als rechtstreeks gevolg van het niet kunnen zien. Dat kan wel gebeuren als zij - doordat zij niet goed kunnen zien - zich niet snel genoeg in veiligheid kunnen brengen. Daarom wordt de gezochte koppeling gelegd via de loopsnelheid en de af te leggen afstand.

Door het verlies aan zicht gaan mensen langzamer lopen zoals in onderstaande figuur wordt geïllustreerd. Doordat mensen langzamer lopen, verblijven zij langer in de omgeving van de brand en worden daardoor langer aan warmte en toxische gassen blootgesteld. Als de rookdichtheid groter wordt dan  $0,5 \text{ m}^{-1}$  valt de loopsnelheid terug naar nul.



figuur 2. loopsnelheid, afhankelijk van de rookdichtheid

Als de vluchtroute goed te lokaliseren is, blijft het gevaar beperkt tot genoemde vertraging van het vluchten. Als de vluchtroute niet te lokaliseren is zal de vertraging gepaard gaan met verlies aan gevoel voor de juiste richting; het risico op langdurige blootstelling neemt dan snel toe.

Samenvattend worden volgende kritieke waarden ter beoordeling van de conditie voor de rookdichtheid (RD) voorgesteld:

- lichte hinder:  $RD = 0,083 \text{ m}^{-1}$ : zichtlengte voor lichtgevende voorwerpen circa 30 m; bij deze zichtlengte heeft een gebruiker in een rookcompartiment zicht op minstens één (nood)uitgang met vluchtrouteaanduiding (verlicht pictogram);
- ernstige hinder:  $RD = 0,2 \text{ m}^{-1}$ : zichtlengte voor lichtgevende voorwerpen 12,5 m; zichtlengte voor niet lichtgevende voorwerpen 5 m; bij deze zichtlengte heeft een gebruiker meestal zicht op ten minste één van wanden die de ruimte omsluiten. Daardoor is oriëntatie nog juist mogelijk.
- desoriëntatie:  $RD = 0,5 \text{ m}^{-1}$ : zichtlengte voor lichtgevende voorwerpen 5 m; zichtlengte voor niet lichtgevende voorwerpen 2 m; bij deze zichtlengte heeft een gebruiker doorgaans geen zicht meer op vluchtrouteaanduidingen, wanden of andere constructie-elementen. Oriëntatie is dan niet meer mogelijk.

## 2.4 Toxische gassen

Bij de effecten van rook op mensen wordt een onderscheid gemaakt tussen:

- oogirritatie (verminderd zicht op de vluchtroute) en disfunctioneren van ademhalingsorganen (ademen);
- toxische gassen die via de ademhaling in het bloed worden opgenomen; de dosis kan narcotische effecten hebben ( $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ) of anderszins het functioneren bemoeilijken (belangrijkste verbrandingsgassen:  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{HF}$ ,  $\text{HCN}$ ).

In tabel 2 staan de effecten van blootstelling van  $\text{CO}$  vermeld.

<i>Concentratie CO (ppm)</i>	<i>Effect</i>
1500	Hoofdpijn na 15 minuten, bewusteloosheid na 30 minuten, dood na 60 minuten
2000	Hoofdpijn na 10 minuten, bewusteloosheid na 20 minuten, dood na 45 minuten
3000	Maximum veilig blootstellingsduur 5 minuten, bewusteloosheid na 10 minuten
6000	Hoofdpijn en duizeligheid in 1 à 2 minuten, dood in 10 à 15 minuten
12800	Onmiddellijk effect, binnen 2 à 3 ademhalingen bewusteloosheid, dood in 1 – 3 minuten

tabel 2: effect van blootstelling aan CO-concentraties

De onderstaande Probit-functie stemt voor het 50% letaliteitsniveau overeen met de gegevens uit de tabel, waarbij "t" de blootstellingsduur is en "C" de gemiddelde concentratie tijdens de blootstellingsduur in ppm ( $=10^{-4}$  % v/v ):

$$\text{Lethaal (CO): Probit} = 37,92 + 3,7 \cdot \ln(t \cdot C)$$