

Rookdichtheid en zichtlengte

Kennisbank Bouwfysica
Auteur: Ruud van Herpen MSc.

1 Het verbrandingsproduct rook

De verbranding van een vuurlast kan in de meest essentiële vorm worden weergegeven in de volgende éénstapsreactie:

Brandstof + zuurstof → verbrandingsproducten + energie

Dit is een exotherme reactie, dat wil zeggen dat er bij deze reactie energie vrijkomt. Vaak is wel ontstekingsenergie nodig om de reactie op gang te brengen.

Dit model impliceert dat de verbranding instantaan plaatsheeft daar waar brandstof en zuurstof gelijktijdig aanwezig zijn. Dit houdt in dat ofwel alle aanwezige zuurstof wordt verbrand, ofwel alle aanwezige brandstof. De verbrandingssnelheid is dus onafhankelijk gesteld van de chemische reactiesnelheid en van de turbulente menging van de brandstof met de zuurstof. Deze verbrandingsmodellering wordt het “mixed is burnt”-principe genoemd.

Rook is hierbij een verbrandingsproduct, voornamelijk bestaande uit gassen (H₂O, CO₂, CO, etc.) van hoge temperatuur. Door deze hoge temperatuur en de bijbehorende turbulentie wordt vaak veel verse lucht ingemengd, waardoor een groot rookvolume ontstaat.

Feitelijk leveren deze verbrandingsproducten geen zichtbeperking op. Wel kan een overmaat van waterdamp tot stoomvorming leiden, waardoor zichtbeperking kan optreden. De voornaamste zichtbeperking wordt echter geleverd door vaste (roet)deeltjes in de rookgassen. De dichtheid hiervan is omgekeerd evenredig met de zichtlengte: hoe groter de dichtheid, des te kleiner de zichtlengte.

2 Optische rookdichtheid

2.1 Light extinction coefficient

De dichtheid van rook kan op verschillende manieren worden uitgedrukt, bij voorbeeld als massa-percentages van de rookgassen [kg deeltjes per 100 kg rookgas] of als volume-percentages van de rookgassen [m³ deeltjes per 100 m³ rookgas]. Traditioneel wordt een mengvorm hiervan gehanteerd en wordt de dichtheid uitgedrukt in [kg deeltjes per m³ rookgas]. Dus:

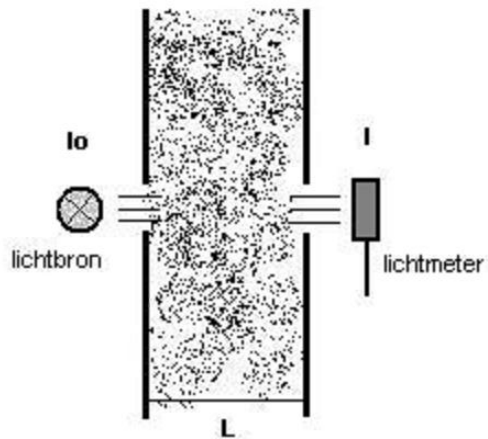
$$D = \frac{M_{rook}}{V_{rook}} \quad (1)$$

Hierin is:

D	dichtheid vaste deeltjes in rook [kg/m^3]
M_{rook}	massa vaste deeltjes [kg]
V_{rook}	volume rook [m^3]

Doordat hierin alleen de massa van de rookdeeltjes een rol speelt, kan deze dichtheid niet rechtstreeks vertaald worden in een zichtlengte. Immers, een groot aantal kleine rookdeeltjes met dezelfde massa als een klein aantal grote rookdeeltjes zal meer zichtbelemmering opleveren. Behalve de massa van de rookdeeltjes speelt dus ook het aantal deeltjes en de afmetingen hiervan een rol.

Er is dus een maat nodig voor de mate van zichtbelemmering, in de vorm van een optische rookdichtheid. De uitdoving van de lichtsterkte ten gevolge van het rook/lucht-mengsel is een maat hiervoor. Dit wordt wel de light extinction coefficient genoemd, zie figuur 1.



figuur 1. principe van de bepaling van de optische dichtheid van rook

$$RD_e = -\frac{\ln\left(\frac{I}{I_0}\right)}{L} \quad (2)$$

Hierin is:

RD_e	light extinction coefficient: optische rookdichtheid per afgelegde lichtweg [m^{-1}]
L	afgelegde lichtweg [m]
I	intensiteit van monochromatisch licht in rook
I_0	intensiteit van monochromatisch licht in lucht (referentie)

De lichtintensiteit in formule (2) wordt bepaald door de zogenaamde “zichtmassa” in de rook. Onder invoering van dit begrip kan de optische rookdichtheid analoog geschreven worden aan formule (1):

$$RD_e = \frac{Z_{rook}}{V_{rook}} \quad (3)$$

Hierin is:

RD_e	light extinction coefficient: optische rookdichtheid per afgelegde lichtweg [m^{-1}]
Z_{rook}	zichtmassa in de rook [m^2]
V_{rook}	volume rook [m^3]

De zichtmassa hangt af van het rookpotentieel en de verbrandingswarmte van het materiaal (de brandstof), volgens de volgende relatie:

$$Z_{rook} = \frac{E_{rook}}{U_{mat}} \cdot R_e \quad (4)$$

Hierin is:

Z_{rook}	zichtmassa in de rook [m^2]
E_{rook}	energie in de rook (convectief afgegeven brandenergie) [J]
U_{mat}	verbrandingswarmte materiaal (brandstof) [J/kg]
R_e	rookpotentieel [$m^{-1}kg^{-1}m^3$]

Daardoor kan formule (3) nu ook geschreven worden als:

$$RD_e = R_e \cdot \frac{M_{mat}}{V_{rook}} \quad (5a)$$

Hierin is:

R_e	rookpotentieel [$m^{-1} \cdot m^3/kg$]
M_{mat}	massa verbrand materiaal (brandstof) [kg], dit is gelijk aan: E_{rook} / U_{mat}
V_{rook}	volume rook [m^3]

In plaats van de statische beschrijving voor de optische rookdichtheid in vergelijking (5a) kan deze ook in een stromingssituatie worden beschreven (5b):

$$RD_e = R_e \cdot \frac{\dot{M}_{mat}}{\dot{V}_{rook}} \quad (5b)$$

Hierin is:

\dot{M}_{mat}	massastroom verbrand materiaal (brandstof) [kg/s], dit is gelijk aan: q_{rook} / U_{mat}
\dot{V}_{rook}	volumestroom rook [m^3/s]
q_{rook}	vermogen van de rook (convectief afgegeven brandvermogen) [W]

Het voordeel van de optische rookdichtheid is dat deze eenvoudig in een zichtlengte kan worden vertaald:

$$Z = \frac{3}{RD_e} \quad (6)$$

Hierin is:

Z zichtlengte [m]

RD_e light extinction coefficient: optische rookdichtheid per afgelegde lichtweg [m^{-1}]

De zichtlengte is niet altijd precies volgens formule (6) te bepalen. Deze formule is geldig voor niet-lichtgevende voorwerpen in zwarte rook. Voor lichtreflecterende en lichtgevende objecten wordt in plaats van de factor 3 een factor 8 gehanteerd. Ook de kleur van de rook (zwart, grijs, wit) beïnvloedt de zichtlengte. Bij zwarte rook treedt alleen absorptie van licht op en komt reflectie niet voor. Er is dus minder verstrooiing, hetgeen de zichtlengte ten goede komt. Bij grijze en witte rook treedt wel reflectie en verstrooiing op, waardoor de zichtlengte afneemt. De factor 3 in formule (6) wordt in dat geval gereduceerd tot een factor 2,3.

2.2 Rookdichtheid

Doorgaans wordt de rookdichtheid niet gemeten op basis van de natuurlijke logaritme (\ln) van de lichtintensiteitsverhouding, maar op basis van de logaritme met het grondtal 10 ($^{10}\log$). De op deze wijze bepaalde rookdichtheid (hier aangeduid met RD) is een factor 2,3 kleiner dan de light extinction coefficient (RD_e) volgens formule (2). Dat geldt ook voor het hieruit bepaalde rookpotentieel (R_e). In de Engelstalige literatuur wordt deze ook wel de mass optical density (D_m) genoemd.

De mass optical density (D_m , of rookpotentieel R_e) kan worden omgerekend naar het rookpotentieel zoals bedoeld in formules (4) en (5), door vermenigvuldiging met een factor 2,3.

Formule (6) wordt daarmee:

$$Z = \frac{1}{RD} \quad \text{voor grijze en witte rook}$$

$$Z = \frac{1,3}{RD} \quad \text{voor zwarte rook}$$

$$Z = \frac{3}{RD} \quad \text{voor lichtgevende voorwerpen}$$

Voorbeeld: autobrand in een parkeergarage

- Rookpotentieel (R)
 $R = 400 \text{ m}^{-1} \cdot \text{m}^3/\text{kg}$ (bron: LNB/NVBR)
- Zichtlengte (Z)
 $Z = 1,3 / RD$ (bron: LNB/NVBR), uitgangspunt zwarte rook
- Verbrandingswaarde voor het totaal aan brandbare materialen in een auto:
 $U_{\text{mat}} = 25 \text{ MJ/kg}$ (bron: LNB/NVBR)
- Convectief aan de rook afgegeven vermogen (piek):
 $q_{\text{rook}} = 6 \text{ MW}$ (bron: TNO)

Bij een ventilatiedebiet van $100 \text{ m}^3/\text{s}$ ($360.000 \text{ m}^3/\text{h}$) bedraagt de rookdichtheid:

$$RD = \frac{q \cdot R}{U_{mat} \cdot \dot{V}} = \frac{6 \cdot 10^6 \cdot 400}{25 \cdot 10^6 \cdot 100} = 0,96 \text{ m}^{-1}$$

Dit komt overeen met een zichtlengte van 1,4 meter. Voor lichtgevende objecten bedraagt de zichtlengte ongeveer 3,1 meter.

Wil men deze zichtlengte vergroten tot bij voorbeeld 30 meter, dan is een ventilatiedebiet van bijna 1000 m³/s benodigd! Gelukkig wordt een dergelijke zichtlengte-eis pas gesteld na 45 minuten, vanaf het ontstaan van de brand. De autobrand is dan al gedoofd, zodat met een kleiner ventilatiedebiet kan worden volstaan.

Zoals uit het bovenstaande voorbeeld al blijkt, is het brandvermogen en daarmee de rookproductie over de totale brandduur beschouwd vaak niet constant. Door het brandscenario in kleine tijdstappen (van bij voorbeeld 1 minuut) te verdelen kan per tijdstap de rookproductie worden bepaald. Door deze kleine tijdstappen te cumuleren, ontstaat een dynamische simulatieberekening voor de rookdichtheid (vultijdberekening).

Veel gehanteerde verbrandingswaarden zijn 17 a 20 MJ/kg voor woning- en kantoorinrichting, 25 a 35 MJ/kg voor auto's, motoren, vrachtauto's, trein- en metrostellen en 40 a 45 MJ/kg voor koolwaterstofbranden. Als rookpotentieel wordt standaard 100 m⁻¹.m³/kg aangehouden, hoewel bij materialen met een sterke rookproductie (zoals rubbers, autobanden, PVC, e.d.) hogere rookpotentiëlen worden aangehouden van circa 400 m⁻¹.m³/kg.

3 Rookpotentieel en zichtmassacoëfficiënt (mass extinction coefficient)

Vaak wordt in de literatuur naast het rookpotentieel (R) ook de zichtmassacoëfficiënt (K_m: "mass extinction coefficient") gehanteerd. Deze materiaalgrootheid heeft, in tegenstelling tot het rookpotentieel, geen betrekking op de brandstof zelf, maar op de vaste deeltjes (soot) die in de rook ten gevolge van het verbranden van de brandstof aanwezig zijn.

De relatie tussen rookpotentieel en zichtmassacoëfficiënt is eenvoudig. Als extra grootheid is de massafractie van de brandstof die in vaste rookdeeltjes wordt omgezet van belang:

$$R = Y_s \cdot K_m \quad (7)$$

Hierin is:

R	rookpotentieel [m ⁻¹ .m ³ /kg]
Y _s	massafractie van de brandstof die in vaste rookdeeltjes (soot) wordt omgezet [-]
K _m	zichtmassacoëfficiënt (mass extinction coefficient) [m ² /kg]

Als standaardwaarde wordt voor de massafractie vaste rookdeeltjes vaak 1% aangehouden. Indien hiervan ook in het voorgaande voorbeeld van een autobrand wordt uitgegaan, resulteert een rookpotentieel van 400 m⁻¹.m³/kg dus in een zichtmassacoëfficiënt (mass extinction coefficient) van 40.000 m²/kg.

Voor de rookdichtheid kan nu geschreven worden (zie formule 5a):

$$RD = K_m \cdot \frac{M_{\text{rookdeeltjes}}}{V_{\text{rook}}} \quad (8a)$$

Hierin is:

RD	optische rookdichtheid [m^{-1}]
K_m	zichmassacoëfficiënt (mass extinction coefficient) [m^2/kg]
$M_{\text{rookdeeltjes}}$	massa vaste rookdeeltjes [kg], dit is gelijk aan: $Y_s \cdot M_{\text{mat}}$
V_{rook}	volume rook [m^3]

Deze formule lijkt erg op formule (1). Er is alleen een extra coëfficiënt toegevoegd, om rookdichtheid te kunnen vertalen in optische rookdichtheid.

In plaats van de statische beschrijving voor de rookdichtheid in vergelijking (8a) kan deze ook in een stromingssituatie worden beschreven (8b):

$$RD = K_m \cdot \frac{\dot{M}_{\text{rookdeeltjes}}}{\dot{V}_{\text{rook}}} \quad (8b)$$



figuur 2. palletbrand (hout), waarvoor standaard wordt aangehouden $R=100$, $K_m=8000$ en $Y_s=1,2\%$

4 De massa-, energie- en deeltjesbalans in een rookvolume

Met de formules van hoofdstuk 2 is het in principe mogelijk om - afhankelijk van verbrandingswaarde, rookpotentieel en convectief afgegeven brandvermogen aan de rook bij een gegeven volume - de optische rookdichtheid en zichtlengte te berekenen.

In de praktijk zal het echter gaan om een besloten ruimte met beperkt volume, welke zeer snel gevuld is met rook. Binnen enkele minuten zal de zichtlengte in de rook minder dan een meter bedragen. Rookafvoer door middel van ventilatie kan hier uitkomst bieden.

Zowel bij een stationair als een niet-stationair brandscenario moet een balanssituatie aanwezig zijn ten aanzien van de massastromen (massabalans), de deeltjesstromen (deeltjesbalans) en de (convectieve) vermogens (energiebalans). In een stationaire situatie komt het erop neer dat de toevoer- en de afvoerstroombalans gelijk zijn aan elkaar. In een niet-

stationaire situatie worden gebruik gemaakt van de buffercapaciteit die in de ruimte aanwezig is.

Massabalans:

$$\dot{M}_{in} \cdot dt - \dot{M}_{uit} \cdot dt = M_{buffer} \quad (9)$$

(toevoermassa lucht – afvoermassa rook/lucht = massabuffering rook/lucht)

Met:

\dot{M} massastroom van lucht [kg/s]

M massa lucht [kg]

Deeltjesbalans:

$$\dot{Z}_{in} \cdot dt - \dot{Z}_{uit} \cdot dt = Z_{buffer} \quad (10)$$

(toevoermassa deeltjes – afvoermassa deeltjes = massabuffering rookdeeltjes)

Met:

\dot{Z} (of z) massastroom vaste rookdeeltjes, uitgedrukt in zichtmassadebiet [m^2/s]

Z massa vaste rookdeeltjes, uitgedrukt in zichtmassa [m^2]

Energiebalans:

$$q_{in} \cdot dt - q_{uit} \cdot dt = E_{buffer} \quad (11)$$

(energietoevoer – energieafvoer = energiebuffering)

Met:

q vermogen [W]

E energie [J]

De deeltjesbalans is in het bovenstaande vertaald in de zichtmassabalans. De volgende tabellen geven de van belang zijnde componenten in de balansen weer.

ENERGIEBALANS ROOKVOLUME (convectief)

Component	Formule
energie toevoer (vermogen)	$q_{in} = \dots$ convectief brandvermogen: instroom in de rook (randconditie)
energie afvoer (vermogen)	$q_{uit} = \rho_o c_p Q_{in} \cdot (T_{rook} - T_o)$ $q_{uit} = \rho_{rook} c_p Q_{uit} \cdot (T_{rook} - T_o)$ Beide formules kunnen worden gebruikt, in het ene geval is het vermogen gebaseerd op het instroomdebiet, in het andere geval op het uitstroomdebiet.
energiebuffer	$E_{rook}(t + dt) = E_{rook}(t) + q_{in} dt - q_{uit} dt$ de energiebuffer is van belang bij dynamische berekeningen; bij stationaire berekeningen is de energiebuffer constant.
temperatuur rook	$T_{rook} = T_o + \frac{E_{rook}}{\rho_{rook} c_p V}$

Stationaire situatie:

$$q_{uit} = q_{in}$$

$$T_{rook} = T_o + \frac{q_{in}}{\rho_o c_p Q_{in}}$$

ZICHTMASSABALANS ROOKVOLUME (convectief)

component	formule
zichtmassadebiet toevoer	$z_{in} = \frac{q_{in} R}{U_{mat}}$ <p>instroom in de rook, afhankelijk van brandvermogen, rookpotentieel en verbrandingswaarde</p>
zichtmassadebiet afvoer	$z_{uit} = RD \cdot Q_{uit}$ $Q_{uit} = Q_{in} \cdot \frac{\rho_o}{\rho_{rook}}$
zichtmassa buffer	$Z_{rook}(t + dt) = Z_{rook}(t) + z_{in} dt - z_{uit} dt$ <p>de zichtmassa buffer is van belang bij dynamische berekeningen; bij stationaire berekeningen is de buffer constant.</p>
rookdichtheid	$RD = \frac{Z_{rook}}{V_{rook}}$

Stationaire situatie:

$$z_{uit} = z_{in}$$

$$RD = \frac{q_{in} \cdot R}{Q_{uit} \cdot U_{mat}}$$

$$RD = \frac{q_{in} \cdot R}{Q_{in} \cdot U_{mat}} \cdot \frac{\rho_{rook}}{\rho_o}$$

De soortelijke massa ρ van de rook hangt af van de absolute temperatuur. Voor de soortelijke massa kan worden uitgegaan van:

$$\rho = \frac{353}{T}$$

GEHANTEERDE GROOTHEDEN

Grootheid	eenheid	omschrijving
Z	m^2	zichtmassa
z	m^2/s	zichtmassadebiet
R	$m^{-1}m^3/kg$	rookpotentieel
RD	m^{-1}	rookdichtheid
V	m^3	Volume
Q	m^3/s	Volumestroom
q	W	Vermogen
E	J	Energie
U_{mat}	J/kg	Verbrandingswarmte
T	K	absolute temperatuur
C_p	J/kg	Warmtecapaciteit

INDICES

in	inkomend
uit	uitgaand
rook	rookbuffer

Opmerkingen

1. De light extinction coefficient (optische rookdichtheid per afgelegde lichtweg RD_e) wordt in Engelstalige literatuur ook wel met K_L aangeduid.
2. Het rookpotentieel (R_e), gerelateerd aan de light extinction coefficient (RD_e) wordt in Engelstalige literatuur ook wel mass optical density (D_m) genoemd.
3. De mass extinction coefficient (zichtmassacoëfficiënt K_m) is gelijk aan het rookpotentieel, gedeeld door de massafractie van de brandstof die in vaste rookdeeltjes (soot) wordt omgezet. De zichtmassacoëfficiënt heeft dus betrekking op de vaste deeltjes in de rook, het rookpotentieel heeft betrekking op de totaal verbrande massa.