

Bijlage 1. Vergelijking ISO-norm, SFPE- handboek en AEGL

Bijlage 1. Vergelijking ISO-norm, SFPE-handboek en AEGL

In de ISO norm (ISO 13571, 2012), het SFPE-handboek (Purser & McAllister, 2016) en de Acute Exposure Guidelines (AEGL) (National Research Council, 2001) zijn methoden vastgelegd om grenswaarden te bepalen voor het moment waarop vlucht- en overlevingsmogelijkheden van personen worden bedreigd. Deze methoden worden hieronder per brandconditie besproken en vergeleken.

A. Toxische rookgassen

Irriterende of prikkelende gassen

ISO norm

Om de gecombineerde invloed van de irriterende gassen (HCl, HBr, HF, SO₂, NO₂, acroleïne en formaldehyde) op vlucht- en overlevingsmogelijkheden te kunnen bepalen wordt in de ISO norm de FEC methode voor irriterende gassen gebruikt, waarin een optelsom wordt gemaakt van de FEC-waarde per irriterend gas (zie vergelijking 1). Deze vergelijking heeft een onzekerheid van ± 50%.

$$FEC_{irr} = \frac{\varphi_{HCl}}{F_{HCl}} + \frac{\varphi_{HBr}}{F_{HBr}} + \frac{\varphi_{HF}}{F_{HF}} + \frac{\varphi_{SO_2}}{F_{SO_2}} + \frac{\varphi_{NO_2}}{F_{NO_2}} + \frac{\varphi_{acroleïne}}{F_{acroleïne}} + \frac{\varphi_{formaldehyde}}{F_{formaldehyde}} + \sum \frac{\varphi_{irriterend\ gas}}{F_{C_i}}$$

φ de gemiddelde concentratie van het irriterende gas in $\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$;

F de concentratie van elk irriterend gas waarvan verwacht wordt dat deze de vlucht- en overlevingsmogelijkheden significant beperkt in $\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$.

Vergelijking 1 FEC methode voor irriterende gassen

In de ISO norm staan grenswaarden¹ weergegeven voor de concentraties van irriterende gassen waarvan verwacht wordt dat deze levensbedreigend zijn voor blootgestelde personen (F-waarden in vergelijking 1). Deze grenswaarden staan weergegeven in tabel 1. Het moment waarop FEC_{irr} een waarde van s^*1 bereikt of overschrijdt, is het moment waarop de situatie levensbedreigend wordt.

SFPE-handboek

In het SFPE-handboek wordt de FIC methode voor irriterende gassen gebruikt. De vergelijking voor deze methode is echter, behalve dat de concentraties worden weergegeven in ppm², hetzelfde als de vergelijking voor de FEC methode in de ISO norm (zie vergelijking 1). Hierbij noemt het SFPE-handboek niet alleen grenswaarden³ voor de concentraties van irriterende gassen voor de levensbedreigende situatie⁴, maar ook voor een belemmerende

¹ Deze grenswaarden zijn bepaald aan de hand van analyse van data uit verschillende bronnen en richtlijnen (ISO 13571, 2012).

² Uitgaande van de algemene gaswet is $1 \mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$ ongeveer gelijk aan 1 ppm.

³ De fysiologische algoritmes in het SFPE-handboek zijn deels gebaseerd op experimentele data en gerapporteerde effecten bij mensen en deels op dierproeven (Purser & McAllister, 2016).

⁴ De letterlijke vertaling van de term die zowel het SFPE-handboek als de ISO norm hanteren (incapacitation) is handelingsonbekwaamheid. Wij hebben gekozen voor levensbedreigend, omdat de persoon zichzelf niet meer kan redden en dus in een levensbedreigende situatie verkeerd. Daarnaast is 'levensbedreigend' een meer gangbare term.

ontvluchting en een fatale situatie na 30 minuten (zie tabel 1). Uitgaande van de grenswaarde voor belemmerende ontvluchting, representeert een FIC-waarde van sf^*1 een belemmerde ontvluchting en een FIC-waarde van sf^*5 een levensbedreigende situatie.

Naast de FIC methode, noemt het SFPE-handboek ook de FLD methode om fatale effecten van irriterende gassen te kunnen berekenen. Deze methode gaat uit van een dosis in plaats van een concentratie en de FLD-waarde wordt dan ook meegenomen in de methode voor verstikkende gassen (zie vergelijking 5). De vergelijking is hetzelfde als de vergelijking voor de FEC / FIC methode voor irriterende gassen, echter wordt als grenswaarde de fatale dosis zoals weergegeven in tabel 1 gebruikt. Voor de concentratie wordt de blootstellingsduur mee gerekend. Een FLD-waarde van sf^*1 representeert een fatale situatie.

Tabel 1 Grenswaarden concentraties irriterende gassen volgens de ISO norm en het SFPE-handboek

	SFPE Belemmerend (ppm)	SFPE Levensbedreigend (ppm)	ISO	SFPE Fatale dosis (ppm·min)
HCl	200	900	1000	114.000
HBr	200	900	1000	114.000
HF	200	900	500	87.000
SO ₂	24	120	150	12.000
NO ₂	70	350	250	1900
NO	-	>1000	-	~30.000
CH ₂ CHO (acroleïne)	4	20	30	4500
HCHO (formaldehyde)	6	30	250	22.500

AEGL

De grenswaarden voor AEGL-1, AEGL-2 en AEGL-3 voor de irriterende gassen bij een blootstellingsduur van 10 en 30 minuten staan weergegeven in tabel 2.⁵ Er is voor gekozen alleen deze twee blootstelduren weer te geven, omdat het bij dit onderzoek primair gaat om de tijd die personen bij brand hebben om te vluchten en overleven en dit vaak om korte tijdsperiodes gaat.

⁵ De grenswaarden van de AEGL methode zijn niet direct te verbinden aan de indeling in grenswaarden in het SFPE-handboek en de ISO norm, omdat de omschrijvingen van de verschillende niveaus van de AEGL-methode afwijken van de niveaus die staan beschreven in tabel 1. In de tabellen worden daarom de niveaus van de AEGL-methode weergegeven.

Tabel 2 Grenswaarden AEGL voor irriterende gassen

	AEGL-1		AEGL-2		AEGL-3	
	10 min (ppm)	30 min (ppm)	10 min (ppm)	30 min (ppm)	10 min (ppm)	30 min (ppm)
HCl	1,8	1,8	100	43	620	210
HBr	1,0	1,0	250	83	740	250
HF	1,0	1,0	95	34	170	62
SO ₂	0,20	0,20	0,75	0,75	30	30
NO ₂	0,50	0,50	20	15	34	25
NO	-	-	-	-	-	-
CH ₂ CHO (acroleïne)	0,03	0,03	0,44	0,18	6,2	2,5
HCHO (formaldehyde)	0,9	0,9	14	14	100	70

Verstikkende of asfyxiërende gassen

Een overzicht van de concentraties verstikkende gassen (CO, HCN, laag O₂ en CO₂) die na een blootstelling van ongeveer 5 en 30 minuten levensbedreigend of fataal kunnen zijn voor een persoon in een staat van lichte activiteit staan weergegeven in tabel 3 (Purser & McAllister, 2016).

Tabel 3 Levensbedreigende en fatale concentraties verstikkende gassen

	5 min		30 min	
	Levensbedreigend	Fataal	Levensbedreigend	Fataal
CO (ppm)	6000-8000	12.000-16.000	1400-1700	2500-4000
HCN (ppm)	150-200	250-400	90-120	170-230
Laag O ₂ (%)	10-13	< 5	< 12	6-7
CO ₂ (%)	7-8	> 10	6-7	> 9

ISO norm

Volgens de ISO norm kan de gecombineerde invloed van verstikkende gassen bepaald worden aan de hand van de FED methode, waarin een optelsom wordt gemaakt van de FED-waarde per verstikkend gas. De algemene vergelijking voor deze methode staat weergegeven in vergelijking 2.

$$FED = \sum_{i=t}^n \sum_{t_1}^{t_2} \frac{C_i}{(C \cdot t)_i} \Delta t$$

- C_i de gemiddelde concentratie van een verstikkend gas i in $\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$;
 Δt de gekozen tijdstoename in minuten;
 $(C \cdot t)_i$ de blootstellingsdosis ($\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{min}$) die de vlucht- en overlevingsmogelijkheden bedreigt.

Vergelijking 2 Algemene FED methode verstikkende gassen

De ISO norm geeft aan dat CO en HCN de enige verstikkende gassen zijn die een significant effect hebben op de vlucht- en overlevingsmogelijkheden van blootgestelde personen en nemen daarom alleen CO en HCN mee in de FED methode. Wel wordt rekening gehouden met de mogelijkheid tot hyperventilatie. Daarom wordt de gemiddelde concentratie van ieder verstikkend gas in de FED methode vermenigvuldigd met de frequentie factor (v_{CO_2}) (zie vergelijking 3). Deze vergelijking heeft een onzekerheid van $\pm 20\%$.

$$v_{CO_2} = \exp\left[\frac{\varphi_{CO_2}}{5}\right]$$

- φ_{CO_2} het gemiddelde volumepercentage CO_2 gedurende de gekozen tijdstoename.

Vergelijking 3 Berekening frequentie factor (v_{CO_2})

De FED methode volgens de ISO norm waarin zowel rekening wordt gehouden met CO en HCN als met de frequentie factor is weergegeven in vergelijking 4.⁶ Deze vergelijking heeft een onzekerheid van $\pm 35\%$. Het moment waarop FED_{tox} een waarde van sf^*1 bereikt of overschrijdt, is het moment waarop de situatie levensbedreigend wordt.

$$FED_{tox} = \sum_{t_1}^{t_2} \frac{\varphi_{CO} \cdot v_{CO_2}}{35000} \Delta t + \sum_{t_1}^{t_2} \frac{\varphi_{HCN}^{2.36} \cdot v_{CO_2}}{1,2 \cdot 10^6} \Delta t$$

- φ_{CO} de gemiddelde concentratie CO in $\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$ over de gekozen tijdstoename;
 φ_{HCN} de gemiddelde concentratie HCN in $\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$ over de gekozen tijdstoename;
 Δt de gekozen tijdstoename in minuten.

Vergelijking 4 FED methode verstikkende gassen volgens de ISO norm

SFPE-handboek

De FED methode volgens het SFPE-handboek houdt naast het verstikkende effect van CO en HCN en de invloed van hyperventilatie ook rekening met het verstikkende effect van laag O_2 en stikstofoxiden, en de fatale dosis van irriterende gassen (zie vergelijking 5).⁷ Wel is de directe bijdrage van stikstofoxiden vaak klein en is uit praktijkonderzoek gebleken dat laag

⁶ De grenswaarde voor de dosis van CO is bepaald met behulp van experimenten met jonge bavianen. De grenswaarde voor de dosis van HCN is bepaald met behulp van experimenten met Java apen. Voor meer informatie zie de ISO norm (ISO 13571, 2012).

⁷ De fysiologische algoritmes in het SFPE-handboek zijn deels gebaseerd op experimentele data en gerapporteerde effecten bij mensen en deels op dierproeven (Purser & McAllister, 2016).

O₂ en de fatale dosis van irriterende stoffen weinig effect hebben op de totale FED-waarde. In de FED methode wordt uitgegaan van een volwassene die bezig is met licht werk.

$$F_{IN} = (F_{ICO} + F_{ICN} + F_{INOx} + FLD_{irr}) \times v_{CO_2} + F_{IO}$$

F _{ICO}	FED-waarde voor CO, uitgaande van een levensbedreigende dosis;
F _{ICN}	FED-waarde voor HCN, uitgaande van een levensbedreigende dosis;
F _{INOx}	FED-waarde voor stikstofoxiden, uitgaande van een levensbedreigende dosis;
FLD _{irr}	FED-waarde voor een fatale dosis van irriterende gasen;
v _{CO2}	frequentie factor;
F _{IO}	FED-waarde voor laag O ₂ , uitgaande van een levensbedreigende dosis.

Vergelijking 5 FED methode verstikkende gasen volgens het SFPE-handboek

Volgens het SFPE-handboek representeert een FED_{IN}-waarde van sf*1 een levensbedreigende situatie en een FED_{IN}-waarde van sf*2 een fatale situatie. De vergelijkingen hieronder laten zien hoe de FED-waarde van CO (zie vergelijking 6), HCN (zie vergelijking 7), NO_x (zie vergelijking 8) en laag O₂ (zie vergelijking 9) berekend kunnen worden.

$$F_{ICO} = 3,317 \times 10^{-5} [CO]^{1,036} (v_E)(t)/D$$

[CO]	concentratie CO in ppm;
v _E	ademhalingsventilatie per minuut in L·min ⁻¹ , 25 L·min ⁻¹ voor licht werk;
t	blootstellingsduur in minuten;
D	blootstellingsdosis (%COHb) voor een levensbedreigende situatie, 30 %COHb voor licht werk.

Vergelijking 6 Berekening FED-waarde voor CO

$$F_{ICN} = \frac{[CN]^{2,36}}{1,2 \times 10^6} t$$

[CN]	concentratie HCN in ppm;
t	blootstellingsduur in minuten.

Vergelijking 7 Berekening FED-waarde voor HCN

$$F_{INOx} = \frac{[NO_x]t}{1500}$$

[NO _x]	concentratie stikstofoxiden in ppm;
t	blootstellingsduur in minuten.

Vergelijking 8 Berekening FED-waarde voor NO_x

$$F_{IO} = \frac{t}{\exp[8,13 - 0,54(20,9 - [\%O_2])]}$$

[%O₂] concentratie O₂ in volumeprocent (% v/v)
t blootstellingsduur in minuten

Vergelijking 9 Berekening FED-waarde voor laag O₂

AEGL

Door de AEGL worden voor de drie niveaus en bij een blootstellingsduur van 10 en 30 minuten de grenswaarden voor verstikkende gassen aangehouden die staan weergegeven in tabel 4.

Tabel 4 Grenswaarden AEGL voor verstikkende gassen

	AEGL-1		AEGL-2		AEGL-3	
	10 min (ppm)	30 min (ppm)	10 min (ppm)	30 min (ppm)	10 min (ppm)	30 min (ppm)
CO	-	-	420	150	1700	600
HCN	2,5	2,5	17	10	27	21

B. Warmte

Een overzicht van de tolerantie van blootstelling aan zowel stralingswarmte als convectiewarmte staat weergegeven in tabel 5 (Brandweeracademie, 2015).

Tabel 5 Tolerantie blootstelling aan stralingswarmte en convectiewarmte

Stralingswarmte		Convectieve warmte	
Stralingsniveau (kW·m ⁻²)	Maximale verblijfsduur	Temperatuur (°C)	Maximale verblijfsduur
15	2 seconden	200	2 minuten
8	5 seconden	150	5 minuten
6	7 seconden	120	7 minuten
2,5	> 30 seconden	110	10 minuten
		100	15 minuten
		90	> 30 minuten

ISO norm

Het effect van warmte op de vlucht- en overlevingsmogelijkheden kan volgens de ISO norm bekeken worden vanuit de dosis warmte die het lichaam over een bepaalde tijdsperiode

verkrijgt. Dit effect kan daarom berekend worden aan de hand van de FED methode, waarin zowel het effect van stralingswarmte als convectiewarmte wordt meegenomen.

De ISO norm geeft twee vergelijkingen voor het berekenen van het effect van stralingswarmte, namelijk de tijd tot het ervaren van pijn (zie vergelijking 10) en de tijd tot het ontstaan van tweedegraads brandwonden (zie vergelijking 11). Beide vergelijkingen hebben een onzekerheid van $\pm 25\%$.

$$t_{Irad} = 4,2q^{-1,9}$$

q stralingswarmte flux in kW·m⁻²

Vergelijking 10 Tijd tot ervaren pijn door stralingswarmte

$$t_{Irad} = 6,9q^{-1,56}$$

Vergelijking 11 Tijd tot ontstaan tweedegraads brandwonden door stralingswarmte

Daarnaast geeft de ISO norm twee vergelijkingen voor het berekenen van het effect van blootstelling aan convectiewarmte met een luchtvochtigheid van 10%. Hierin is onderscheid gemaakt in de mate waarin de blootgestelde persoon gekleed is, namelijk het moment waarop pijn wordt ervaren indien de persoon volledig gekleed is (zie vergelijking 12) en indien de persoon licht of niet gekleed is (zie vergelijking 13). Beide vergelijkingen hebben een onzekerheid van $\pm 25\%$.

$$t_{Iconv} = (4,1 \times 10^8)T^{-3,61}$$

T de temperatuur in graden Celsius.

Vergelijking 12 Blootstelling convectiewarmte volledig gekleed

$$t_{Iconv} = (5 \times 10^7)T^{-3,4}$$

Vergelijking 13 Blootstelling convectiewarmte licht of niet gekleed

De FED methode bestaat vervolgens uit de optelsom van de FED-waardes voor stralingswarmte en convectiewarmte (omgekeerde van t_{Irad} en t_{Iconv}) (zie vergelijking 14). Wanneer de stralingswarmte lager is dan 2,5 kW·min⁻² is de FED-waarde voor stralingswarmte ($1/t_{Irad}$) in deze formule gelijk aan 0. Op het moment dat de FED_{heat} een waarde van $sf \cdot 1$ bereikt of overschrijdt, wordt de situatie voor de blootgestelde personen levensbedreigend.

$$FED_{heat} = \sum_{t_1}^{t_2} \left(\frac{1}{t_{Irad}} + \frac{1}{t_{Iconv}} \right) \Delta t$$

Vergelijking 14 FED methode blootstelling aan warmte

SFPE-handboek

Het SFPE-handboek houdt dezelfde vergelijking aan voor de FED methode voor blootstelling aan warmte als de ISO norm (zie vergelijking 14). Echter, de vergelijking om het effect van blootstelling aan stralingswarmte te berekenen verschilt (zie vergelijking 15). Daarnaast geeft het SFPE-handboek voor het effect van blootstelling aan convectiewarmte alleen de vergelijking voor licht of niet geklede personen weer (zie vergelijking 13).

$$t_{Irad} = \frac{r}{q^{1,33}}$$

r blootstellingsdosis stralingswarmte in $(kW \cdot m^{-2})^{4/3} \cdot min$

q stralingswarmte flux in $kW \cdot m^{-2}$

Vergelijking 15 Blootstelling stralingswarmte

De effecten van verschillende waarden voor de blootstellingsdosis van stralingswarmte staan weergegeven in tabel 6.

Tabel 6 Effect blootstellingsdosis van stralingswarmte

Effect	r $[(kW \cdot m^{-2})^{4/3} \cdot min]$
Ernstige huidpijn	1,33-1,67
Tweedegraads brandwonden	4,0-12,2
Derdegraads brandwonden	16,7

Volgens het SFPE-handboek, uitgaande van een blootstellingsdosis stralingswarmte voor ernstige huidpijn ($r = 1,33$), representeert een FED-waarde van sf^*1 een belemmerende ontvluchting, een FED-waarde van ongeveer sf^*8 tweedegraads brandwonden en daarmee een levensbedreigende situatie en een FED-waarde van ongeveer sf^*12 derdegraads brandwonden en daarmee een fatale situatie.

C. Zicht

De ISO norm noemt geen grenswaarden voor de invloed van zicht op de vlucht- en overlevingsmogelijkheden van blootgestelde personen. Volgens het SFPE-handboek kan het effect van visuele beperkingen door rook berekend worden aan de hand van de FEC methode, waarin een onderscheid wordt gemaakt tussen kleine en grote ruimtes (zie vergelijking 16). Het moment waarop FEC_{smoke} een waarde van sf^*1 bereikt of overschrijdt, is het moment waarop de vluchtmogelijkheid van het slachtoffer aanzienlijk wordt beperkt.

$$FEC_{smoke} = \frac{(OD/m)}{0,2} \text{ voor kleine ruimtes of } \frac{(OD/m)}{0,08} \text{ voor grote ruimtes}$$

OD/m optische dichtheid per meter

Vergelijking 16 FEC methode voor zicht door rook

Een overzicht van de grenswaarden voor zicht in zowel kleine als grote ruimtes in optische dichtheid per meter is weergegeven in tabel 7.

Tabel 7 Grenswaarden zicht door rook in gebouwen

Groote ruimte	Grenswaarde (OD/m)	Zichtbaarheid (m)
Klein	0,2	5
Groot	0,08	10

D. Conclusie

De vlucht- en overlevingsmogelijkheden van personen die door brand zijn blootgesteld aan toxische rookgassen, warmte en visuele beperkingen door rook zijn bekeken aan de hand van de richtlijnen en grenswaarden in de ISO norm, het SFPE-handboek en AEGL. Omdat AEGL uitgaat van concentraties bij specifieke blootstellingsduren en in de experimenten sprake zal zijn van tijdsafhankelijke concentraties, is AEGL niet makkelijk toepasbaar in het huidige onderzoek. De ISO norm en het SFPE-handboek passen dan ook het beste bij onze doeleinden en zijn samengevat in tabel 8. Omdat in het SFPE-handboek de meest volledige en actuele methode wordt besproken om de vlucht- en overlevingsmogelijkheden voor blootgestelde personen te bepalen, is er voor gekozen om het SFPE-handboek aan te houden in dit onderzoek.

Tabel 8 Overzicht grenswaarden volgens de ISO norm en het SFPE-handboek

Brandconditie	Norm	Methode	Belemmerend	Levensbedreigend	Fataal
Irriterende gassen	ISO	FEC _{irr}		sf * 1	
	SFPE	FIC FLD	sf * 1	sf * 5	sf * 1
Verstikkende gassen	ISO	FED _{tox}		sf * 1	
	SFPE	FED _{IN}		sf * 1	sf * 2
Warmte	ISO	FED _{heat}		sf * 1	
	SFPE	FED _{heat}	sf * 1	sf * 8	sf * 12
Zicht	ISO	-			
	SFPE	FEC _{smoke}	sf * 1		

Literatuurlijst

- Brandweeracademie. (2015). *Gebrand op inzicht: Een onderzoek naar de effectiviteit van rookmelders*. Arnhem: IFV.
- ISO 13571. (2012). *Life-threatening components of fire - Guidelines for the estimation of time to compromised tenability in fires*. Geneva: International Organization for Standardization.
- National Research Council. (2001). *Standing Operating Procedures for Developing Acute Exposure Guideline Levels for Hazardous Chemicals*. Washington: National Academy Press. <https://doi.org/10.17226/10122>
- Purser, D. A., & McAllister, J. L. (2016). Assessment of Hazards to Occupants from Smoke, Toxic Gases, and Heat. In M. J. Hurley (Ed.), *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering* (5th ed., pp. 2308–2428). New York: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2565-0>