

# Kwantificering van zelfredzaamheid in externe veiligheid

Inge Trijssenaar & Nils Rosmuller

*Steeds meer wordt bij externe veiligheidsvraagstukken geappelleerd aan het begrip zelfredzaamheid: de mate waarin een persoon zichzelf in veiligheid kan brengen ten tijde van een ongeval met gevaarlijke stoffen. In de toelichting op het Besluit Externe Veiligheid Inrichtingen (BEVI) wordt genoemd dat de brandweer in haar adviestaak omtrent het groepsrisico aandacht aan zelfredzaamheid kan schenken. Vooralsnog wordt er in risicoberekeningen geen rekening gehouden met zelfredzaamheid. De zelfredzaamheidsadviezen zijn louter kwalitatief en spitsen zich veelal toe op het onderliggend wegennet en de mate waarin dit de burgers kan faciliteren het rampgebied te verlaten. In deze bijdrage wordt de invloed van gevaarlijke stoffen op de (zelfredzaamheid van de) burger gekwantificeerd opdat duidelijk wordt of de burger überhaupt en tot wanneer en in welke mate in staat is zichzelf in veiligheid te brengen. Op basis van literatuurstudies is een model ontwikkeld, waarmee zelfredzaamheid kan worden meegenomen in een kwantitatieve risicoanalyse. Het model dient om:*

- 1) realistischere blootstellingstijden te bepalen dan momenteel wordt aangenomen in risicoanalyses;*
- 2) het aantal personen te bepalen dat niet in staat is zichzelf uit een rampgebied te redden;*
- 3) het effect van zelfredzaamheid bevorderende maatregelen te kunnen kwantificeren in een risicoanalyse.*

## 1 Inleiding

Een goede zelfredzaamheid van burgers is in de eerste minuten van een ramp met gevaarlijke stoffen uiterst belangrijk. Er wordt dan ook steeds meer aandacht besteed aan maatregelen voor het bevorderen van de zelfredzaamheid en maatregelen om de burgers te informeren wat zij moeten doen in geval van een dergelijke ramp. Ook de brandweer mag bij haar verantwoordingsplicht van het groepsrisico de zelfredzaamheid betrekken. Echter, het ontbreekt aan kwantitatieve handvatten, die aangeven tot op welk moment en in welke mate burgers die worden blootgesteld aan gevaarlijke stoffen en branden zichzelf nog in veiligheid kunnen brengen (Rosmuller 2007; Raben 2007). Dergelijke handvatten kunnen gebruikt worden in kwantitatieve risicoberekeningen (QRA) en kunnen ondersteunen bij het evalueren van maatregelen die bedoeld zijn de zelfredzaamheid te verbeteren. Tevens geven zij inzicht in het beroep dat bij rampen wordt gedaan op de hulpverleningscapaciteit van met name brandweer en de geneeskundige diensten.

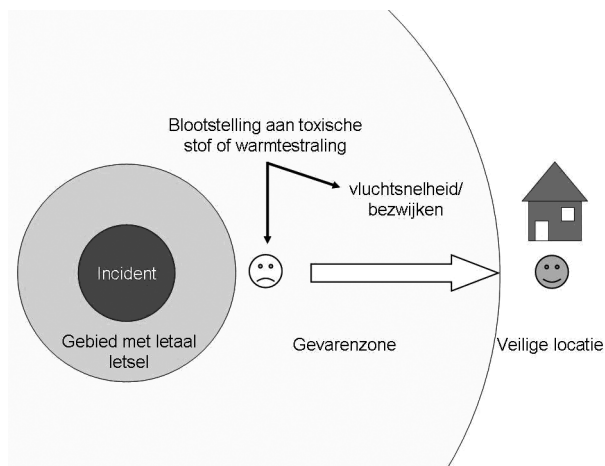
Momenteel wordt er bij een risicoanalyse alleen rekening gehouden met letale slachtoffers en een vaste tijd van blootstelling aan de gevaarlijke situatie: te weten 30 minuten blootstelling in geval van toxische stoffen en 20 seconden blootstel-

ling in geval van brand (Uijt de Haag 2006; Paarse Boek 1999). Bovendien gaat men ervan uit dat de personen op een en dezelfde plaats blijven. Echter, de realiteit is anders. Indien er zich een ramp voordoet, zal iedereen die daar toe in staat is vluchten. Voor toxische stoffen kan de werkelijke blootstelling korter duren: men kan van de bron wegvluchten of ergens (binnen) schuilen (Gezondheidsraad 2007). Voor brandscenario's kan de blootstellingsduur langer zijn indien de vluchtroute niet of moeilijk begaanbaar is, zoals bij de cafébrand in Volendam. Daarom is het van belang om de blootstellingsduur nauwkeuriger te bepalen dan momenteel wordt gedaan. Hiervoor is onderzoek gedaan naar de relatie tussen blootstelling aan gevaar en de mate waarin personen zelfredzaam zijn, waarbij de mate van (subleetaal) letsel is vertaald in de vluchtsnelheid van de personen. In combinatie met informatie over het vluchtpad en de af te leggen afstand kan vervolgens een verbeterde blootstellingsduur worden bepaald.

Om zelfredzaamheid te kunnen integreren in kwantitatieve risicoanalyses is een literatuurstudie uitgevoerd naar bestaande dosis-respons relaties en kwantitatieve maten voor zelfredzaamheid. Er zijn formules bestudeerd zoals die in de toxicologie worden gebruikt om het effect van de concentratie (irriterende stoffen) en dosis (bedwelmende stoffen) op de gezondheid van mensen te bepalen. De aard van het effect (irriterend/bedwelmend) hangt af van de aard van de stof(categorie). Daarnaast zijn er verschillende maten voor de ernst van de gezondheidsschade bestudeerd om na te gaan welke van deze kan dienen als geschikte kwantitatieve maat voor zelfredzaamheid: interventiewaarden (LBW, AGW, VRW), AEGL (Acute Exposure Guideline Levels), ERPG (Emergency Response Planning Guidelines), en IDLH (Immediate Danger to Life and Health). Er is gekozen voor de AEGL-waarde (zie paragraaf 3). In geval van brand is eveneens een literatuurstudie uitgevoerd naar relaties van warmte op de zelfredzaamheid en het effect van afnemende warmtestraling op letsel van vluchtende personen. De resultaten zijn samengevat in een model dat kan worden ingepast binnen bestaande kwantitatieve risicoanalysemodellen.

## 2 Model voor zelfredzaamheid in kwantitatieve risicoanalyse

Het ontwikkelde model voor zelfredzaamheid in risicoanalyse maakt onderscheid tussen warmtestraling, rook en verschillende typen toxische chemicaliën en kwantificeert het effect hiervan op de evacuatiesnelheid en de blootstellingsduur (zie figuur 1). Het model houdt rekening met de afstand tot een veilige locatie en eventuele bottlenecks onderweg naar deze veilige locatie. In het geval van brand kan er een interactie optreden tussen toxische blootstelling en blootstelling aan warmte: door een vermindering van zelfredzaamheid als gevolg van de toxische stoffen in rook, kan de tijd van blootstelling aan warmte toenemen. Het onderzoek was gericht op het beschrijven van de fysieke effecten van blootstelling, het is niet beoogd om een mentale of psychologische beschouwing te geven over de effecten van deze blootstelling op de mens. De volgende paragrafen beschrijven achtereenvolgens de relaties voor het effect van toxische stoffen (paragraaf 3), brand (paragraaf 4), evacuatie (paragraaf 5) en methoden voor implementatie van het model (paragraaf 6).

**Figuur 1**      **Schematische weergave van model voor zelfredzaamheid**

### 3 Toxisch letsel

Voor toxisch letsel is onderscheid gemaakt tussen bedwelmende en irriterende stoffen. Voor een bedwelmende stof, zoals koolstofmonoxide, is de concentratie in de bloedtoevoer naar de hersenen het belangrijkste criterium voor de toxische effecten op de mens. De concentratie in het bloed wordt bepaald door de concentratie van de bedwelmende stof in de lucht in combinatie met de blootstelduur, het subleetaal letsel is dan ook gerelateerd aan de opgenomen dosis. Voor een irriterende stof is de concentratie in neus-, keel- of longweefsel het belangrijkste criterium voor subleetaal letsel (Purser 2002). De concentratie in neus-, keel- of longweefsel is gelijk aan de concentratie van de irriterende stof in de lucht.

#### *Bedwelmende stoffen in rookgassen*

Van verschillende bedwelmende stoffen die in rookgassen voorkomen zijn gedetailleerde gegevens bekend voor hun effect op de zelfredzaamheid. Voor koolmonoxide (CO), blauwzuurgas (HCN), koolstofdioxide (CO<sub>2</sub>) en tekort aan zuurstof (O<sub>2</sub>) zijn relaties beschreven in het Fractional Incapacitation Dose (FID) model van Purser (Purser 2002). Deze FID-relaties kunnen worden toegepast om de mate van zelfredzaamheid te bepalen zowel in geval van blootstelling aan de betreffende stoffen in rookgassen als in geval van blootstelling aan de betreffende stoffen in zuivere vorm.

De Fractional Incapacitation Dose (FID) is het quotiënt van de dosis waaraan men tot een bepaald tijdstip is blootgesteld aan een bedwelmende stof en de dosis waarbij men bewusteloos raakt of uitgeschakeld wordt, ofwel 'incapacitated'. Zodra de FID de waarde 1 bereikt of overschrijdt, dan treedt het gedefiniëerde effect op. In het FID-model wordt gesteld dat de effecten van verschillende bedwelmende stoffen bij elkaar kunnen worden opgeteld.

De algemene formule voor de bepaling van de FID is (ISO/TS 13571, 2002):

$$FID = \sum_{i=1}^m \frac{D_i(t)}{(D_{incapacitation})_i} \quad (\text{Vergelijking 1})$$

Waarin:

- $D_i$  de gemiddelde dosis van een bedwelmend gas  $i$  over een bepaald tijdsinterval;  
 $(D_{incapacitation})_i$  de specifieke blootstellingdosis waarbij een persoon bewusteloos raakt ofwel uitgeschakeld wordt, uitgedrukt in volume fractie vermenigvuldigd met de blootstellingtijd.

De FID-relaties zijn gebaseerd op toxicologisch onderzoek, waaronder dierproeven met primaten en muizen, experimenten met blootstelling van mensen aan lage concentraties en data van menselijke blootstelling bij branden. De gedetailleerde relaties voor het bepalen van de FID van verschillende bedwelmende stoffen in rookgassen zijn weergegeven in bijlage 1.

Het effect van bedwelmende stoffen (in rookgassen) op de vluchtsnelheid wordt gekenmerkt door een relatief plotselinge afname van de zelfredzaamheid tot uitschakeling. De relatie tussen de FID en de mate van zelfredzaamheid is weergegeven met behulp van figuur 2. Figuur 2 laat de mobiliteitsfactor zien als functie van de FID-waarde van een willekeurige bedwelmende stof of combinatie van bedwelmende stoffen. Hierin is de mobiliteitsfactor de fractie van de oorspronkelijke – onbeperkte – vluchtsnelheid van een persoon. Die onbeperkte vluchtsnelheid kan op haar beurt verschillend zijn voor verschillende personen of categorieën van personen, zoals kinderen of ouderen. In een risicoanalyse zal doorgaans worden uitgegaan van de vluchtsnelheid van een gemiddelde bevolking, waarbij wordt aangenomen dat personen wandelen en niet rennen, aangezien er soms langere afstanden afgelegd moeten worden voordat een veilige locatie bereikt is.

#### *Irriterende stoffen in rookgassen*

De dosis van toxische stoffen is relevant voor zowel de subletale effecten van bedwelmende stoffen als de letale effecten van (bedwelmende én irriterende) brandproducten. De subletale effecten van irriterende brandproducten zijn echter gerelateerd aan de concentratie en niet aan de dosis van deze stoffen. De subletale effecten zijn beschreven in het ‘Fractional Irritant Concentration’-model (Purser 2002):

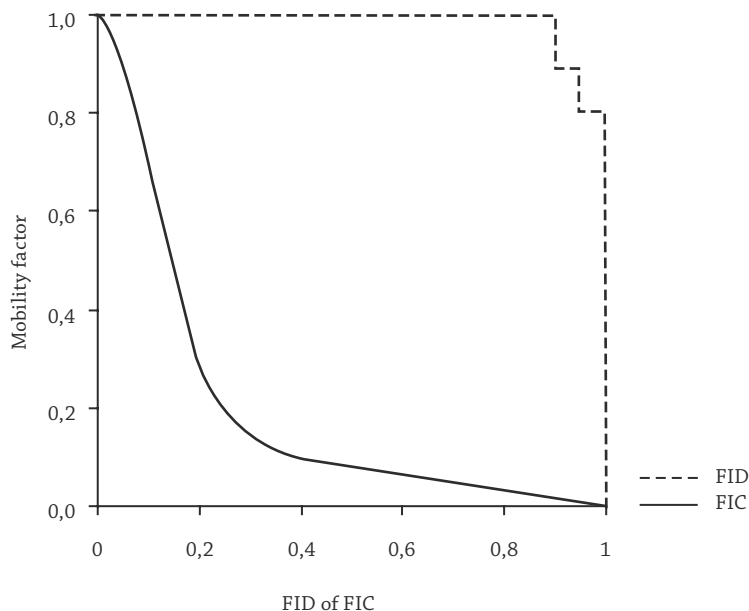
$$FIC = \sum_{i=1}^m \frac{C_i}{F_i} \quad (\text{Vergelijking 2})$$

waarin:

- $C_i$  de gemiddelde concentratie van een irriterend gas  $i$  (ppm);  
 $F_i$  de concentratie waarbij uitschakeling plaatsvindt (ppm).

Het effect van irriterende stoffen wordt gekenmerkt door een relatief snelle afname van de mate van zelfredzaamheid bij lagere concentraties als gevolg van irritatie van ogen en bemoeilijking van de ademhaling. Als de FIC een waarde van 1 heeft bereikt of overschrijdt, dan is de persoon uitgeschakeld en niet meer zelfredzaam. De relatie tussen de FIC van een willekeurige irriterende stof of combinatie van irriterende stoffen en de mobiliteitsfactor is weergegeven in figuur 2 (Purser 2007). Het FIC-model is ontwikkeld voor irriterende stoffen, die bij brand kunnen vrijkomen, te weten: waterstofchloride (HCl), stikstofdioxide ( $\text{NO}_2$ ), waterstoffluoride (HF), waterstofbromide (HBr), zwaveldioxide ( $\text{SO}_2$ ). De grenswaarden zijn bepaald op basis van de RD50 van muizen, oftewel de concentratie die bij muizen een afname van de ademhalingsnelheid van 50% tot gevolg heeft. Het effect van irriterende stoffen op de zelfredzaamheid wordt bepaald door een combinatie van irritatie van de luchtwegen en de ogen. Dit is gebaseerd op onderzoek met mensen die door irriterende rook lopen (Jin 1997).

**Figuur 2** Mobiliteitsfactor als functie van FID en FIC, de mobiliteitsfactor is de fractie van de onbeperkte vluchtsnelheid van een persoon



### Toxische chemicaliën

Voor de vertaling van een blootstelling aan toxische chemicaliën naar de mate van zelfredzaamheid zijn (nog) geen vergelijkbare methoden beschikbaar als de FID- en FIC-methoden voor toxische stoffen in rookgassen. Door grenswaarden te selecteren die uitspraak doen over zelfredzaamheid en de toxische chemicaliën in te delen in irriterende en bedwelmende stoffen kunnen de mobiliteitsrelaties van de FID- en FIC-methoden worden gebruikt voor toxische chemicaliën.

Er zijn verschillende maten voor de ernst van de gezondheidsschade bestudeerd om na te gaan welke van deze kan dienen als geschikte kwantitatieve maat voor zelfredzaamheid van toxische chemicaliën: de interventiewaarden VRW (voorlichtingsrichtwaarde), AGW (alarmeringsgrenswaarde) en LBW (levensbedreigende waarde), AEGL (acute exposure guideline levels), ERPG (emergency response planning guidelines), en IDLH (immediate danger to life and health). De interventiewaarden (VRW, AGW en LBW) worden in Nederland toegepast om de risico's in te schatten als gevaarlijke stoffen vrijkomen tijdens een calamiteit en zich verspreiden via de lucht. Van de drie interventiewaarden doet de alarmeringsgrenswaarde (AGW) een uitspraak over zelfredzaamheid: de AGW is de concentratie van een stof waarboven onomkeerbare of andere ernstige gezondheidsschade kan optreden door de toxische effecten van de stof. In de rampsituatie kunnen die er al toe leiden dat mensen beperkt raken in de mogelijkheid om zich te beschermen *of om te vluchten*. Maar ook effecten op de lange termijn, zoals het risico van kanker en mogelijke schade aan de voortplanting, kunnen optreden (Gezondheidsraad 2007).

De ERPG-2 is de maximale concentratie waarvan kan worden aangenomen dat bijna alle individuen er gedurende maximaal 1 uur aan blootgesteld kunnen worden zonder irreversibele of ernstige gezondheidsproblemen te ontwikkelen of te ervaren of zonder dat zich symptomen manifesteren waardoor de mogelijkheden van een individu om beschermende maatregelen te treffen, afnemen. De ERPG doet dus geen uitspraak over zelfredzaamheid. De IDLH doet dit wel: de IDLH-waarde geeft de concentratie aan waarbij men, na het falen van de adembescherming, bij een blootstelling tot 30 minuten, niet sterft, geen irreversibele gezondheidseffecten oploopt, of *waarbij de zelfredzaamheid geen gevaar loopt*.

De definitie van de AEGL-2 sluit het beste aan bij de zelfredzaamheidsvraagstelling (Raben 2007), aangezien de AEGL-2 uitspraak doet over het wel of niet zelfredzaam zijn en bovendien ook bepaald is voor een relatief korte blootsteldingsduur van 10 en 30 minuten, die het meest relevant is in geval van rampen met gevaarlijke stoffen. De AEGL-2 geeft de concentratie van een stof weer, waarbij een algemene populatie, inclusief gevoelige individuen, irreversibele of andere ernstige, langdurige gezondheidsproblemen kunnen ondervinden of *waarbij de zelfredzaamheid verslechtert*. De AEGL-2-waarden zijn – volgens de definitie – niet voor iedere stof gerelateerd aan de zelfredzaamheid, maar zijn in ieder geval een conservatief uitgangspunt. AEGL-2-waarden zijn beschikbaar voor blootstellingstijden van 10 minuten, 30 minuten, 1 uur, 4 uur en 8 uur. Hiervan zijn de blootstellingstijden van 10 en 30 minuten het meest relevant in het kader van zelfredzaamheid bij rampen.

Enkele toxische chemicaliën zijn onderverdeeld in bedwelmende chemicaliën, waarvan het subletaal letsel dosisafhankelijk is, en irriterende chemicaliën, waarvan het subletaal letsel concentratieafhankelijk is (zie tabel 1 voor de onderverdeling van chemicaliën). De onderverdeling is gemaakt aan de hand van de beschrijving van de stofeigenschappen en de tijdsafhankelijkheid van de AEGL-2-waarden voor 10 en 30 minuten. De chemicaliën in tabel 1 zijn representatieve stoffen voor verschillende stofcategorieën zoals deze in kwantitatieve risicoanalyses gehanteerd worden (Uijt de Haag 2006). Aangezien de AEGL-2 (nog) niet beschikbaar is voor ethylchloride, wordt voor deze stof de IDLH-waarde gehanteerd.

De FID van een toxische stof wordt bepaald door de specifieke blootstellingdos<sub>is</sub> ( $D_{\text{incapacitation}}$ ) te berekenen met behulp van tabel 1, uitgaand van het toxische dosismodel ( $C^{\text{nt}}t=\text{constant}$ ). De n-waarde van de stof kan afgeleid worden uit de AEGL-2-waarden van 10 en 30 minuten of – bij ontbreken van tijdsafhankelijke grenswaarden voor subletaal letsel – overgenomen worden uit de dosisrelatie voor letaal letsel. De specifieke blootstellingsdosis kan vervolgens in de algemene FID-vergelijking (vergelijking 1) worden ingevuld, waarmee de FID-waarde voor iedere blootstellingsdosis kan worden berekend. De FIC kan bepaald worden door de concentratiegrenswaarde uit tabel 1 over te nemen en in de algemene FIC-vergelijking (vergelijking 2) in te vullen. De vluchtsnelheid kan ten slotte bepaald worden aan de hand van figuur 2, op dezelfde wijze als dit voor bedwelmende en irriterende stoffen in rookgassen wordt gedaan. Door het toepassen van de AEGL-2-waarden in de FID- en FIC-methodieken wordt conservatief aangenomen dat boven de AEGL-2-waarden niemand meer in staat is te vluchten.

**Tabel 1    Onderverdeling en AEGL-2-grenswaarden voor toxische chemicaliën**

| Stof              | Onderverdeling<br>FID/FIC<br>methode | AEGL-2 grenswaarde concentratie in ppm<br>(parts per million) |                          |
|-------------------|--------------------------------------|---|--------------------------|
|                   |                                      | 10 minuten blootstelling                                      | 30 minuten blootstelling |
| Acrylnitriël      | FID                                  | 290   | 110                      |
| Ethyl chloride    | FID                                  | -   | 3800*                    |
| Ammoniak          | FIC                                  | 220   | 220                      |
| Chloor            | FIC                                  | 2.8   | 2.8                      |
| Methyl isocyanaat | FID                                  | 0.4   | 0.13                     |
| Salpeterzuur      | FIC                                  | 43  | 30                       |

\* IDLH-grenswaarde

4      **Thermisch letsel**

In geval van brand wordt in de huidige risicoanalyses een blootstellingsduur van 20 seconden aangehouden. De werkelijke blootstellingsduur kan langer zijn indien de vluchtroute moeilijk begaanbaar is of als er veel mensen op het vluchtpad aanwezig zijn, zoals bij een evenement of op een druk station. Een methode om de blootstellingsduur te bepalen is beschreven in het Groene boek (CPR16E 1992). Hierbij is aangenomen dat blootstelling aan warmtestraling weinig of geen effect heeft op de zelfredzaamheid van de slachtoffers, totdat de verwondingen letaal worden. Tijdens de vluchtperiode zal de warmtestraling waaraan een persoon wordt blootgesteld afnemen met een toenemende afstand van de brand. Met deze afname wordt rekening gehouden door berekening van de effectieve blootstellingsduur):

$$t_{\text{eff}} \approx t_r + \frac{3}{5} \times \frac{x_0}{u} \left[ 1 - \left( 1 + \frac{u}{x_0} \times t_v \right)^{\frac{5}{3}} \right]$$

Vergelijking 3

waarin:

- $t_{\text{eff}}$  effectieve blootstellingsduur in seconden
- $x_0$  de initiële afstand tot het centrum van de brand in meters
- $u$  de vluchtsnelheid in meter per seconde
- $t_r$  reactietijd in seconden
- $t_v$  vluchttijd in seconden  $= (x_s - x_0)/u$
- $x_s$  afstand (in meters) van het centrum van de brand tot die positie waarbij de stralingsintensiteit beneden het gevaarsniveau ligt. Voor de stralingsintensiteit beneden gevaarsniveau wordt  $1 \text{ kW/m}^2$  aangenomen, een warmtestralingsniveau vergelijkbaar met een zonnige zomerdag.

De evacuatiesnelheid kan worden beïnvloed door blootstelling aan toxische stoffen in de rookgassen: als de mobiliteit afneemt, neemt de blootstellingstijd aan warmte toe. De effectieve blootstellingsduur van vergelijking 3 kan vervolgens gebruikt worden om het aantal gewonden met brandwonden ( $1^\circ$ ,  $2^\circ$  en  $3^\circ$  graads) en het aantal letale slachtoffers te berekenen.

## 5 Evacuatie

In het model voor zelfredzaamheid in risicoanalyses (Raben 2007) wordt rekening gehouden met twee belangrijke eigenschappen van de evacuatieleroute, namelijk de afstand tot een veilige locatie en de aanwezigheid van bottlenecks op de evacuatieleroute. Het model is nadrukkelijk niet bedoeld om gedetailleerde evacuatieberekeningen mee uit te voeren. Hiervoor dienen reeds bestaande evacuatiemodellen te worden toegepast.

### *Afstand tot een veilige locatie*

Een veilige locatie kan gedefinieerd worden aan de hand van een grenswaarde, zoals een concentratie, maximale dosis of warmtestralingsniveau, of het kan een schuilplaats zijn, zoals een gebouw, waarvan ramen en deuren gesloten kunnen worden. De mobiliteit van een persoon wordt beïnvloed door de concentratie of toxische dosis, waaraan de persoon is blootgesteld onderweg naar de veilige locatie. In het geval van brand kan de afstand tot een warmtewerende schuilplaats of de afstand tot die positie waarbij de stralingsintensiteit beneden het gevaarsniveau ligt worden ingevuld in vergelijking 3 (als  $x_s$ ).

### *Bottlenecks in de evacuatieleroute*

Het is mogelijk om een bottleneck mee te nemen in het model. De evacuerende personen passeren deze bottleneck onderweg naar een veilige locatie. De werkelijke blootstellingsduur neemt hiermee toe, als gevolg van de tijd die nodig is om de bottleneck te passeren. Een gemiddelde waarde voor de extra blootstellingstijd wordt bepaald door het aantal mensen dat de bottleneck moet passeren en de capaciteit van de bottleneck, bijvoorbeeld uitgedrukt in aantal personen per minuut.



## 6 Modelimplementatie en toepassing

### *Implementatie*

Er zijn twee verschillende manieren om het model te implementeren binnen een kwantitatieve risicoanalysemodel:

- 1 een eenvoudige implementatiemethode, die naar verwachting het meest geschikt is voor een standaard kwantitatieve risicoanalyseberekening. Hierbij wordt de evacuatiesnelheid bepaald aan de hand van de condities die heersen op de startlocatie van iedere vluchtende persoon. Aan de hand van bijvoorbeeld de daar heersende concentratie wordt een inschatting gemaakt van evacuatiesnelheid en blootstellingsduur. Voordelen van deze implementatiemethode zijn de eenvoud en rekensnelheid.
- 2 Een dynamische implementatie, die naar verwachting meer geschikt is voor het uitvoeren van scenarioanalyses of uitgebreidere QRA-berekeningen. Hierin wordt de evacuatiesnelheid voor de eerste tijdstap bepaald aan de hand van de concentratie die heerst op de startlocatie van iedere vluchtende persoon. In de volgende tijdstappen wordt vervolgens gekeken wat de nieuwe plaats en bijbehorende concentraties zijn. De blootstellingstijd en eventueel (sub) letaal letsel worden hiermee iteratief bepaald. Deze implementatiemethode geeft een nauwkeuriger resultaat van blootstellingstijd en letsel, maar weegt wellicht niet op tegen de extra rekentijd en complexiteit ten opzichte van de eenvoudige implementatiemethode.

Aan de hand van een of meerdere casestudies, waarin meerdere scenario's zullen worden uitgewerkt, zullen de verschillende implementatiemethoden getoetst en nader vergeleken worden. Op basis van de casestudies kan een keuze gemaakt worden uit de twee implementatiemethoden of zal nader uitgewerkt worden welke methode voor welke situaties het best kan worden toegepast.

### *Toepassing*

Er zijn meerdere toepassingsmogelijkheden voor het model. Er kan een realistisch schatting van de blootstellingstijd gemaakt worden, waarmee zowel letaal als subletaal letsel beter kan worden bepaald.

Met behulp van het model kunnen de effecten van zelfredzaamheid bevorderende maatregelen bepaald worden, bijvoorbeeld in het kader van een verantwoording van het groepsrisico. Zelfredzaamheid bevorderende maatregelen zijn bijvoorbeeld het vergroten van de capaciteit van een bottleneck in de evacuatieleroute en het aanwezig zijn of plaatsen van een schuilplaats.

Daarnaast kan het model worden gebruikt om het aantal personen te schatten, dat niet in staat is zichzelf te redden in een bepaalde (ramp)situatie. Dit laatste gaat als volgt: de FID of FIC kan worden bepaald voor iedere blootgestelde persoon, afhankelijk van de startlocatie. Indien de FID of FIC de waarde 1 bereikt, betekent dit dat deze persoon niet meer zelfredzaam is. Door de informatie van zelfredzaamheid te combineren met bevolkingsgegevens kan een schatting gemaakt worden van het aantal niet-zelfredzame personen in geval van een grootschalige ramp met toxische stoffen. Het aantal niet-zelfredzame personen

is een belangrijke eerste schatting voor hulpdiensten zowel voor de voorbereiding van mogelijke ramp als in 'real-time' rampenbestrijdingssituaties. Het aantal niet-zelfredzame personen is voor hulpverlening relevantere informatie dan het aantal letaal getroffen personen, aangezien de hulpverleningscapaciteit toereikend moet zijn om het aantal gewonden en personen dat niet of verminderd zelfredzaam is, zo snel mogelijk uit het gevaarlijke gebied te evacueren.

## 7 Conclusies

Momenteel wordt voor toxische stoffen een blootstellingsduur van 30 minuten gehanteerd. Dit zal vaak te hoog zijn bij calamiteiten waar men van het gevaar weg kan vluchten of een schuilplaats kan opzoeken. Er is een conceptueel model ontwikkeld waarin voor toxisch letsel de mate van mobiliteit (en dus zelfredzaamheid) gerelateerd is aan de blootstelling. Er wordt met dit model rekening gehouden met verminderde mobiliteit als gevolg van subleetaal letsel, wat tot op heden niet het geval is.

Van de meest voorkomende stofcategorieën en voorbeeldstoffen zijn bestaande dosis-responsrelaties bestudeerd en gecategoriseerd naar of ze een irriterende of bedwelmende uitwerking op de mens hebben. Met een toename van het irritatieniveau neemt de vluchtsnelheid af. Met het toenemen van de dosis zal de vluchtsnelheid constant blijven tot het moment dat een bepaalde dosis wordt overschreden, waarna vluchten niet meer mogelijk is.

Van de kwantitatieve maten voor de ernst van de gezondheidsschade is gekeken welke maten in hun definitie rekening houden met zelfredzaamheid. Het blijkt dat de AEGL-2 de meest geschikte maat is voor het kwantificeren van zelfredzaamheid. De AEGL-2 geeft de concentratie van een stof weer, waarbij een algemene populatie, inclusief gevoelige individuen, irreversibele of andere ernstige, langdurige gezondheidsproblemen kunnen ondervinden of waarbij de zelfredzaamheid verslechtert.

Momenteel wordt voor thermische effecten een blootstellingsduur van 20 seconden gehanteerd. Er heeft een optimalisatie plaatsgevonden bij de bepaling van de blootstellingstijd. Met het opgestelde model kan nu een blootstellingsduur bepaald worden die afhankelijk is van de bron, doordat rekening wordt gehouden met de afstand tot een veilig warmtestralingsniveau. Bovendien wordt rekening gehouden met omgevingsfactoren, die de vluchttijd beïnvloeden die nodig is om deze afstand af te leggen, zoals aanwezigheid van veel personen of een bottleneck op het vluchtpad.

## Literatuur

- CPR16E (1992) *Methods for the determination of possible damage to people and objects resulting from releases of hazardous materials*, First edition, Committee for the Prevention of Disasters caused by dangerous substances. The Hague: directorate-General of Labour of the Ministry of Social Affairs and Employment.
- Gezondheidsraad (2007) *De waarde van interventiewaarden – onderbouwing en toepassing van interventiewaarden voor beslissingen bij calamiteiten met gevaarlijke stoffen*. Den Haag, publicatienr. 2007/16.
- ISO/TS 13571 (2002) *Life-threatening components of fire- Guidelines for the estimation of time available for escape using fire data*.
- Jin, T. (1997) *Studies on Human Behavior and Tenability in Fire Smoke*, Fire Safety Science – Proceedings of The Fifth International Symposium. Melbourne: International Association of Fire Safety Science, 3-21.
- Paarse Boek (1999) *Guidelines for quantitative risk assessment*. CPR 18E.
- Purser, D.A. (2002) 'Toxicity assessment of combustion products'. In: The SFPE handbook of fire protection engineering. Quincy, Massachusetts: NFPA.
- Purser, D.A. (2007) *The application of exposure concentration and dose to evaluation of effects of irritants as components of fire hazard*. Interflam, conference proceedings.
- Raben I., I.J.M. Trijssenaar-Buhre en S.I. Wijnant (2007) *Kwantificering zelfredzaamheid*, TNO-rapport.
- Rosmuller, N. (2007) 'Verbetering kwantitatieve risicoanalyse noodzakelijk'. Alert, December 2007.
- Uijt de Haag, P.A.M. (2006) *Handleiding Risicoberekeningen BEVI*.

*Inge Trijssenaar is onderzoeker en Nils Rosmuller is onderzoeker en team manager bij de Nederlandse Organisatie voor toegepast natuurwetenschappelijk onderzoek (TNO) in Utrecht, afdeling Industriële en Externe Veiligheid. E-mail: Inge.Trijssenaar@tno.nl*

## Bijlage 1 FID- en FIC-relaties voor bedwelmende en irriterende stoffen in rookgassen

| Stof            | Bedwelmende stoffen in rookgassen   |
|-----------------|---|
| CO              | $FID_{CO} = 3.317 \times 10^{-5} [CO]^{1.036} RMV \frac{t}{PID}$ <p>           Waarin<br/>           CO= concentratie in ppm; RMV= 'Respiratory Minute Volume' in liter/min, voor lichte activiteit is de RMV gelijk aan 25 liter/min; t = blootstellingstijd in minuten; PID = specifieke blootstellingsdosis voor uitschakeling (Personal Incapacitation Dose =30%).         </p>   |
| O <sub>2</sub>  | $FID_{O_2} = \frac{t}{e^{8.13-0.54*(20.9-V\%O_2)}}$ <p>           Waarin V%O<sub>2</sub> = O<sub>2</sub> volume percentage.         </p>  |
| HCN             | $FID_{HCN} = \frac{t}{e^{5.396-0.023*[HCN]}}$ <p>           Waarin [HCN] = HCN-concentratie in ppm (parts per million).         </p>  |
| CO <sub>2</sub> | <p>Hyperventilatie effect:</p> $VCO_2 = \frac{e^{0.1903*V\%CO_2+2.004}}{7.1}$ <p>           Waarin V%CO<sub>2</sub>: CO<sub>2</sub> volume percentage.         </p> <p>Bedwelmend effect bij hogere concentraties CO<sub>2</sub>:</p> $FID_{CO_2} = \frac{t}{e^{6.1623-0.5189*V\%CO_2}}$  |
| mengsel         | <p>De gelijktijdige aanwezigheid van meerdere bedwelmende stoffen leidt tot een additioneel effect, aangezien de bedwelmende stoffen alle impact hebben op de hoeveelheid beschikbare zuurstof naar de hersenen. De opsomningsregel voor irriterende stoffen volgens het FID model is:</p> $FID_{total} = ((FID_{CO} + FID_{HCN}) * VCO_2 + FID_{O_2})$ <p>           De opsomningsregel laat niet alleen zien dat FID-waarden van de verschillende bedwelmende stoffen bij elkaar opgeteld dienen te worden, maar laat ook zien hoe er rekening wordt gehouden met het hyperventilatie-effect van CO<sub>2</sub>: de VCO<sub>2</sub> factor is gebruikt om de FID-waarden van CO en HCN te versterken, waarmee de toegenomen inname van deze bedwelmende stoffen, die optreedt als gevolg van de hyperventilatie, wordt gemodelleerd.         </p> |

| Irriterende stoffen in rookgassen |  |
|-----------------------------------|--|
| FIC grenswaarden (ppm)            |  |
| HBr                               | 200  |
| HCl                               | 200  |
| HF                                | 120  |
| NO <sub>2</sub>                   | 80   |
| SO <sub>2</sub>                   | 30   |
| mengsel                           | De gelijktijdige aanwezigheid van meerdere irriterende stoffen leidt tot een additioneel effect van de irritatie, aangezien doorgaans dezelfde lichaamsonderdelen geprikkeld worden (neus, keel en longweefsel en ogen). De effecten van irriterende stoffen hoeven niet te worden opgeteld bij de effecten van bedwelmende stoffen, aangezien deze op een andere manier het lichaam beïnvloeden. De opsommingsregel voor irriterende stoffen volgens het FIC-model is:<br>$FIC = \frac{[HCl]}{F_{HCl}} + \frac{[HBr]}{F_{HBr}} + \frac{[HF]}{F_{HF}} + \frac{[SO_2]}{F_{SO_2}} + \frac{[NO_2]}{F_{NO_2}}$ |