

Publicatiereeks Gevaarlijke Stoffen 1

**Deel 2A:  
Effecten van explosie op personen**

*Ministerie van Binnenlandse Zaken en Koninkrijksrelaties*



Ministerie van Verkeer en Waterstaat

<b>Inhoudsopgave</b>		<b>pagina</b>
<b>Samenvatting</b>		<b>4</b>
<b>Summary</b>		<b>4</b>
<b>1</b>	<b>Inleiding</b>	<b>5</b>
1.1	Redactioneel	5
1.2	Indeling	5
<b>2</b>	<b>Identificatieschema</b>	<b>6</b>
<b>3</b>	<b>Uitwerking van Blast</b>	<b>9</b>
3.1	Longschade	11
3.2	Gehoorschade	16
<b>4</b>	<b>Uitwerking van meesleureffecten</b>	<b>18</b>
4.1	Criteria voor bepaling van overlijdenskans	18
4.2	Druk-impuls diagrammen	20
<b>5</b>	<b>Uitwerking van scherven en brokstukken</b>	<b>24</b>
5.1	Scherven	24
5.2	Brokstukken	27
5.3	Letselcriterium	28
5.4	Glasscherven	30
<b>6</b>	<b>Instorten van gebouwen</b>	<b>32</b>
6.1	Kans op overlijden bij instorting van gebouw	32
6.2	Niet-letaal letsel	32
<b>7</b>	<b>Voorbeeldberekeningen</b>	<b>34</b>
7.1	Voorbeeld 1	34
7.2	Voorbeeld 2	36
7.3	Voorbeeld 3	36
<b>8</b>	<b>Conclusies</b>	<b>37</b>
<b>REFERENTIES</b>		<b>38</b>
<b>REFERENTIES</b>		<b>38</b>
<b>Lijst van gebruikte symbolen</b>		<b>40</b>
<b>Bijlage I</b>		<b>42</b>
<b>Bijlage II</b>		<b>48</b>

---

<b>Nauwkeurigheid van modellen voor bepaling van uitwerking van explosies op mensen</b>	<b>48</b>
<b>Bijlage III Probitfuncties voor diverse letselsoorten</b>	<b>51</b>

## Samenvatting

In dit rapport is de uitwerking op mensen onderzocht van de diverse effecten die bij een explosie kunnen optreden.

Voor de blast- en meesleureffecten worden druk-impuls-diagrammen gepresenteerd waarmee de overlijdenskansen kunnen worden bepaald.

Voor de uitwerking van scherven en brokstukken kan, afhankelijk van de massa, de snelheid en de vorm van een scherf of brokstuk, aangegeven worden of er, bij impact, ernstige verwondingen zullen optreden. Voor de uitwerking van het instorten van gebouwen als gevolg van een explosie zijn globale getallen voor het aantal doden en gewonden gegeven.

Met uitzondering van het laatste effect worden probitfuncties gegeven waarmee overlijdenskansen kunnen worden bepaald.

## Summary

In this report the effects on people submitted to the phenomena of an explosion are investigated. For the phenomena blast and whole body displacement, pressure-impulse graphs are given to determine the chance of survivability.

The effects of impact of penetrating or non-penetrating fragments are given in such a way that one is able, to determine whether a fragment will cause serious damage.

The effects of the collapse of a building are given in some global figures about the amount of the death and wounded.

For all the phenomena, except for the last one, probit functions are presented with which one is able to determine the chances of lethal injury.

---

## 1 Inleiding

De gevolgen van een explosie vormen een potentieel gevaar voor de mens. Om te kunnen beoordelen in hoeverre deze gevolgen acceptabel zijn en hoe de eventuele gevolgen voor de mens kunnen worden beperkt, is het noodzakelijk om inzicht te verkrijgen in de uitwerking van de explosie-effecten op de mens.

In dit hoofdstuk worden de gevolgen voor de mens onderzocht van de volgende effecten die op kunnen treden bij een explosie: blast, meesleuren, scherven en brokstukken en het instorten van gebouwen. De gevolgen van warmtestraling komen in een separaat deel aan de orde.

### 1.1 Redactioneel

Dit document betreft een herziening van rapport PML 1988-C-73, voormalig hoofdstuk 3 van de eerste versie van CPR 16 (1990). Deze herziening is mede gebaseerd op rapport PML 1999-C102 [22].

### 1.2 Indeling

Het is gebruikelijk de explosie-effecten onder te verdelen in een aantal categorieën. Als hoofdingeling wordt gebruikt de directe en indirecte effecten.

#### a) Directe of primaire effecten

De door de blast veroorzaakte drukverandering kan letsel veroorzaken aan daarvoor gevoelige menselijke organen.

#### b) Indirecte effecten

De indirecte effecten worden weer onderverdeeld in secundaire en tertiaire effecten.

- Secundaire effecten.

Hieronder wordt de uitwerking van scherven en brokstukken verstaan. Deze scherven ontstaan ofwel direct uit de explosiebron ofwel doordat voorwerpen uit de omgeving van de explosiebron als gevolg van de ontstane blast worden weggeslingerd.

- Tertiaire effecten.

Als gevolg van de blast en bijbehorende explosiewind kunnen mensen worden meegesleurd en tegen stilstaande voorwerpen botsen. Letsel dat door deze botsing kan ontstaan wordt aangeduid als uitwerking van de tertiaire effecten.

Een reden om onderscheid te maken tussen directe en indirecte effecten is, dat bij de directe effecten het zeker is dat mensen de drukverhoging zullen ondergaan. Bij indirecte effecten daarentegen bestaat er een kans dat mensen door brokstukken zullen worden getroffen of dat ze bij meesleuren een stilstaand voorwerp zullen treffen.

Een effect dat buiten de gebruikelijke indeling valt, maar dat wel aan de orde zal komen, is het letsel aan het menselijk lichaam dat kan ontstaan indien men zich in een gebouw bevindt dat als gevolg van een explosie geheel of gedeeltelijk instort.

---

## 2 Identificatieschema

Aan de hand van het identificatieschema, dat is weergegeven in Figuur 2-1, kunnen de gevolgen van een explosie voor mensen worden bepaald. De nummers in het schema verwijzen naar onderstaande toelichting. Tussen haakjes wordt aangegeven met behulp van welke paragraaf de betreffende gegevens zijn te bepalen.

ad 1.

De positie van de mens voor wie de gevolgen moeten worden bepaald is van belang. Onderscheid moet worden gemaakt tussen het geval dat deze zich in een gebouw bevindt en het geval dat deze zich in de open lucht bevindt.

ad 2.

Bevindt de mens zich in de open lucht dan zijn er drie effecten waarvan de uitwerking op mensen moet worden bepaald: hittestraling, blast en scherven en brokstukken. De uitwerking van de hittestraling wordt hier niet behandeld daar deze in een separaat hoofdstuk aan de orde komt. Voor de uitwerking van de plotselinge drukverhoging, de blast, wordt het druktijdsverloop van de druk- of schokgolf bekend verondersteld, zodat piekoverdruk, positieve fase-duur en impuls op willekeurige afstanden van het explosiepunt te bepalen zijn (te bepalen met [21], zie ook hoofdstuk 3).

ad 3.

Voor het bepalen van de directe blasteffecten is de oriëntatie van de mens ten opzichte van de voortplantingsrichting van de drukverhoging van belang. Door deze oriëntatie wordt de op de mens uitgeoefende druk beïnvloed (paragraaf 3.1).

ad 4.

In twee van de drie oriëntaties, reflectie en omstroming, is de uitgeoefende druk niet gelijk aan de invallende druk. Met behulp van de gegeven formules kan de uitgeoefende druk worden berekend (paragraaf 3.1 formule 3 t/m 8).

ad 5.

Met aan de literatuur ontleende gegevens kan de overlevingskans worden bepaald voor de zogenaamde directe blasteffecten (longletsel: vergelijking 10 en 11, of vergelijking 9 indien de schok-/druk-golf een niet-ideale vorm heeft; oorletsel: probitfunctie 12).

ad 6.

Zie hoofdstuk 4. Voor het geval dat de oriëntatie van de mens zodanig is dat er omstroming optreedt, zal meesleuren door de explosiewind plaats kunnen vinden. Tijdens dit meesleuren kan mogelijk een star object worden getroffen. De overlevingskans na de botsing van het lichaam met een star object kan worden bepaald (Figuur 4-2 of Figuur 4-3, of probitfunctie 18 of 20).

Deze zogenaamde tertiaire effecten moeten gecombineerd worden met de primaire effecten (voorbeeld 1).

ad 7.

Zie hoofdstuk 5. De uitwerking van scherven en brokstukken, de zogenaamde secundaire effecten, wordt bepaald aan de hand van massa, snelheid en vorm van een brokstuk. Deze grootheden worden in dit hoofdstuk bekend verondersteld (bepalen met bijvoorbeeld [21]).

---

Op de kans dat een mens door een scherf of brokstuk wordt getroffen, wordt niet ingegaan.

Aangegeven wordt welke massa en snelheid van een brokstuk of scherf kritiek zijn in die zin dat er ernstige verwondingen met mogelijke fatale gevolgen zullen optreden (scherven: 5.1, formule (26) en Figuur 5-3, brokstukken: 5.2, Tabel 5-2). Wordt aangenomen dat een mens door een scherf of brokstuk wordt getroffen dan kan de overlijdenskans worden geschat (5.3, probitfuncties (27), (28), (30) en Figuur 5-4).

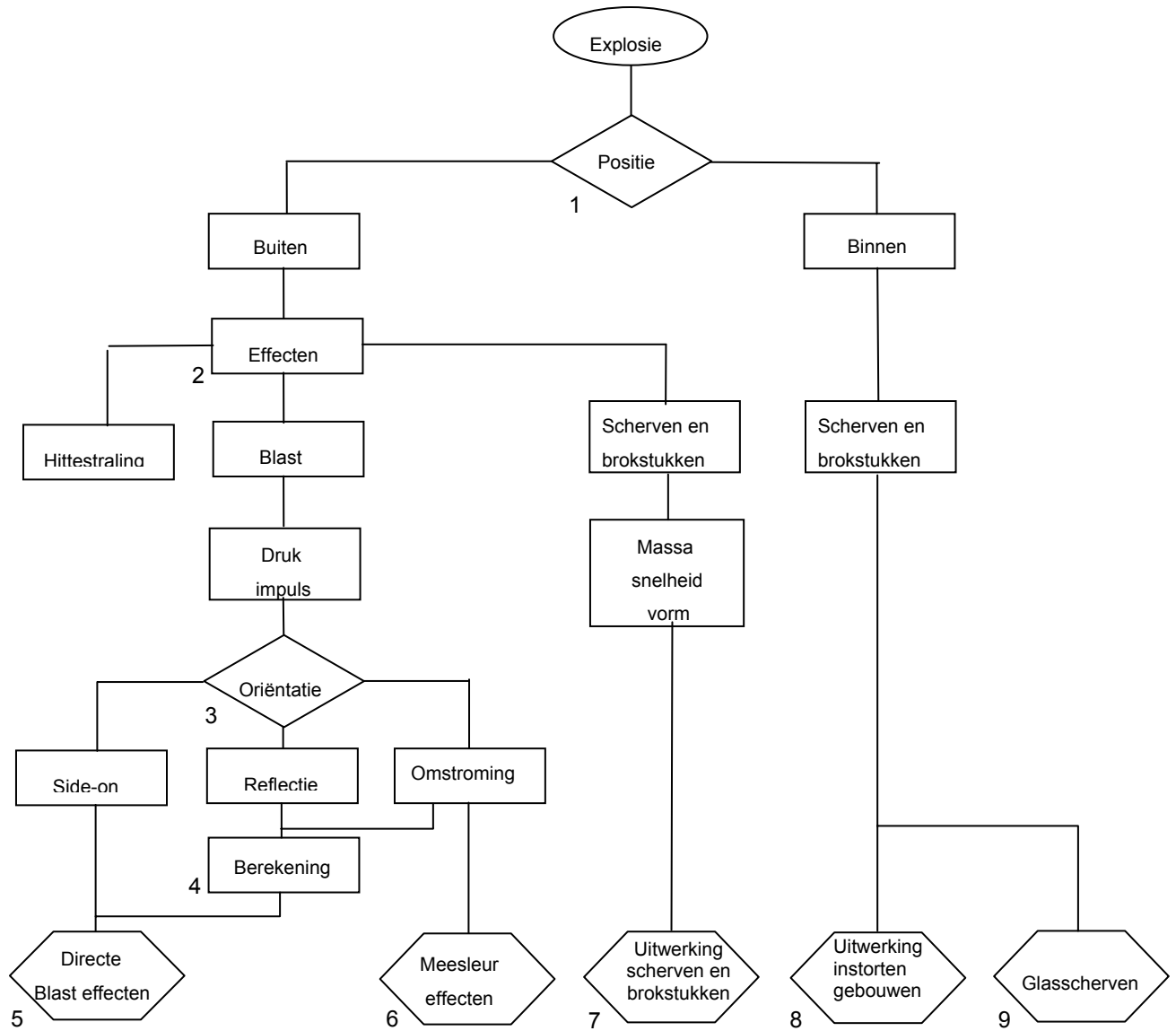
ad 8.

Aan de hand van een vergelijking met instortende gebouwen als gevolg van aardbevingen kunnen globale percentages voor het aantal doden worden gegeven (hoofdstuk 6).

ad 9.

Voor het schatten van de overlijdenskans ten gevolge van glasscherven wordt een aparte probitfunctie gegeven (paragraaf 5.4, vergelijking 33).

---



**Figuur 2-1** Identificatieschema



### 3 Uitwerking van Blast

Voor een beschrijving van explosies en berekening van drukeffecten wordt verwezen naar het gele boek, PGS 2.

Eén van de effecten van een explosie is de plotselinge drukverhoging. Deze drukverhoging zal zich in de vorm van een golf van het explosiepunt afbewegen. De vorm van de golf hangt in belangrijke mate af van het type en de grootte van de explosie en de afstand tot het explosiepunt.

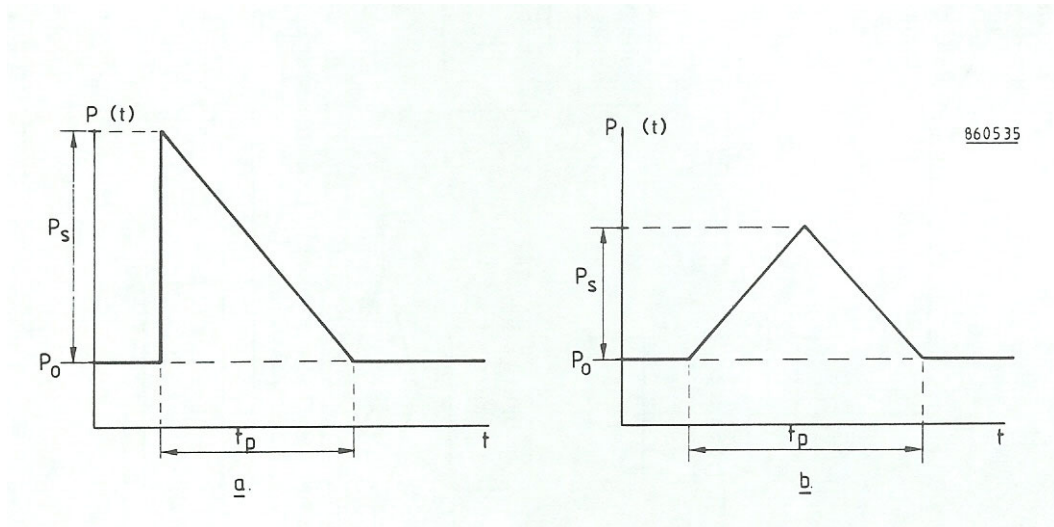
Bij explosies ten gevolge van een verbrandingsproces kunnen deflagraties en detonaties worden onderscheiden. Bij een gaswolkexplosie zal meestal een deflagratie ontstaan. Hierbij veroorzaakt een ontstekingsbron een vlamfront in de gaswolk waardoor de temperatuur zeer snel stijgt en er als gevolg van de expanderende gassen een drukopbouw plaatsvindt. De maximale druk wordt na een bepaalde tijd bereikt, de zogenaamde stijgtijd. De karakteristieke vorm van de bij een deflagratie horende drukopbouw wordt ook wel drukgolf genoemd. Stijgtijd en vorm van de drukgolf worden door het deflagratieproces zelf bepaald. In Figuur 3-1 is het geschematiseerde druk-tijd verloop van een drukgolf gegeven.

Een detonatie zal voornamelijk het gevolg zijn van het exploderen van explosieven maar kan ook ontstaan bij zeer krachtige gaswolkexplosies. Bij een detonatie vindt de drukverhoging instantaan plaats, dus zonder enige stijgtijd. De explosie plant zich voort doordat een sterke schokgolf de reactie onderhoudt. Figuur 3-1 geeft een voorbeeld van de typische vorm van de luchtschok op een bepaalde plaats afkomstig van een detonatie. Deze vorm wordt schokgolf genoemd.

Blast wordt gebruikt als algemene term voor schok- en drukgolven.

Na het bereiken van de piekoverdruk neemt de overdruk weer af tot nul en wordt gedurende enige tijd zelfs negatief. De grootte van de onderdruk is in vergelijking met de piekoverdruk meestal gering en kan over het algemeen worden verwaarloosd.

Vaak wordt het druk-tijd verloop van een schok- of drukgolf geschematiseerd tot een driehoek (Figuur 3-1).



**Figuur 3-1** het geschematiseerde druk-tijd verloop voor a: een schokgolf en b: een drukgolf

De belangrijkste kenmerken van een druk- of schokgolf zijn:

- a) de piekoverdruk  $P_s$ ,
- b) de positieve fase-duur  $t_p$ ,  
dit is de tijdperiode waarin een drukverhoging optreedt; en
- c) de impuls  $i_s$ .

De impuls  $i_s$  is gelijk aan

$$i_s = \int_{t_p} (P_s(t) - p_o) dt \quad (1)$$

waarin:

- $i_s$  = impuls van de aankomende druk- of schokgolf [Pa.s]
- $P_s$  = piekoverdruk in de aankomende druk- of schokgolf [Pa]
- $p_o$  = atmosferische druk [Pa]

Bij gebruik van het geschematiseerde druk-tijd verloop voor druk- en schokgolf is in beide gevallen de impuls is gelijk aan

$$i_s = \frac{1}{2} P_s * t_p \quad (2)$$

waarin:

- $t_p$  = positieve fase-duur [s]

Het menselijk lichaam is goed in staat zich aan grote drukveranderingen aan te passen. Voorwaarde is echter wel dat deze drukverandering geleidelijk plaatsvindt zodat deze gecompenseerd kan worden door een drukverandering in de organen waar zich lucht bevindt. Bij een plotselinge verandering ontstaat een drukverschil dat tot beschadiging van deze organen kan leiden.

De meest vitale luchtbevattende organen zijn de longen. In de beschikbare literatuur wordt aan longbeschadiging de meeste aandacht geschonken omdat longschade kan leiden tot overlijden. Een minder vitaal maar zeer gevoelig orgaan voor drukveranderingen is het oor.

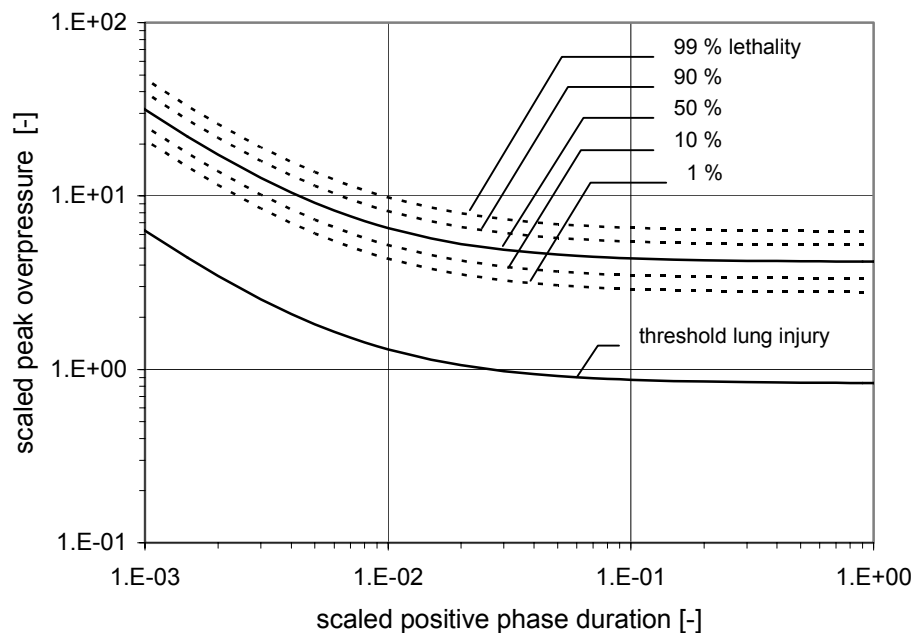
### 3.1 Longschade

Door een verschil in druk binnen en buiten de longen wordt, omdat bij een explosie de druk buiten in het algemeen hoger is dan binnen, de borstkas naar binnen gedrukt waardoor longschade op kan treden. Omdat voor dit indrukken tijd nodig is, is behalve de grootte van de overdruk, ook de duur van de belasting van belang.

In [1] wordt een aantal grafieken gegeven waaruit de overlevingskans te bepalen is afhankelijk van de maximale overdruk en de fase-duur van de schokgolf. Deze grafieken zijn toepasbaar op mensen met een gewicht van 70 kg en bij een atmosferische druk van 100 kPa. De keuze van de juiste grafiek wordt bepaald door de positie van de mens ten opzichte van de voortplantingsrichting van de schokgolf. Dit is noodzakelijk omdat de door de schokgolf op de mens uitgeoefende overdruk als gevolg van reflectie en omstroming groter kan worden dan de maximale overdruk in de schokgolf.

Wordt de werkelijke overdruk bepaald die op de mens wordt uitgeoefend, dan blijkt dat de bijbehorende overlevingskans onafhankelijk is van de positie van de mens.

In Figuur 3-2 is het verloop van de overlijdenskans weergegeven afhankelijk van de werkelijke piekoverdruk  $P$  die op de mens wordt uitgeoefend en de fase-duur van de schokgolf.



**Figuur 3-2. Overlijdenskans voor een mens ten gevolge van primaire effecten van ideale schokgolven [1].**

Afhankelijk van de positie van de mens kan de piekoverdruk  $P_s$  van de schokgolf worden vertaald in de werkelijk op de mens uitgeoefende overdruk  $P$ .

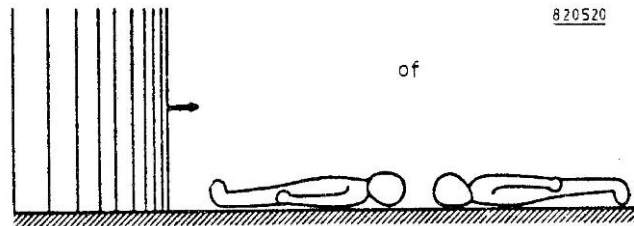
Voor de positie wordt onderscheid gemaakt in drie gevallen.

- a) De schokgolf loopt zonder enige belemmering over de mens heen.
- b) De schokgolf stroomt om de mens heen.
- c) De mens bevindt zich in een willekeurige positie direct voor een vlak waartegen de schokgolf reflecteert.

Deze mogelijke posities van de mens ten opzichte van de schokgolf worden hierna besproken.

a) De schokgolf loopt zonder enige belemmering over de mens heen (Figuur 3-3).

In dit geval ligt de lengteas van het lichaam in de richting van de schokgolf.



**Figuur 3-3 Geen belemmering van de schok- of drukgolf door het menselijk lichaam**

De geschaalde piek overdruk  $\bar{P}$  en de geschaalde positieve fase duur  $\bar{t}$  worden gedefinieerd als:

$$\bar{P} = \frac{P}{p_o} \quad (3)$$

$$\bar{t} = t_p * \left( \frac{C_9}{m} \right)^{\frac{1}{3}} * \sqrt{\frac{p_o}{p_{o,ref}}} \quad (4)$$

waarin:

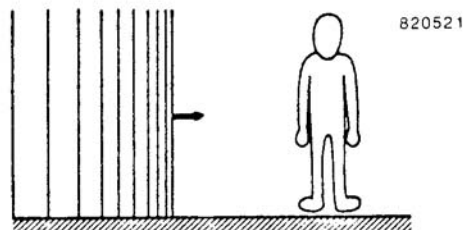
$p_o$	: heersende atmosferische druk	[Pa]
$p_{o,ref}$	: standaard atmosferische druk, $1,013 * 10^5$	[Pa]
$P$	: druk waaraan de persoon wordt blootgesteld	[Pa]
$t_p$	: positieve fase duur van de schokgolf	[s]
$m$	: massa van de persoon	[kg]
en $C_9$	: constante, 70	[kg].

De volgende waarden voor de massa 'm' worden aangeraden:

- 5 kg voor baby's
- 25 kg voor kinderen
- 65 kg voor volwassen vrouwen
- 80 kg voor volwassen mannen

b) De schokgolf stroomt om de mens heen (Figuur 3-4).

De lengte as van het lichaam staat loodrecht op de richting van de schokgolf.



**Figuur 3-4. Omstroming van het menselijk lichaam door de schok- of drukgolf.**

Door deze omstroming wordt een extra kracht op de mens uitgeoefend, de dynamische druk of stuwdruk  $Q$  genaamd.

De in totaal uitgeoefende overdruk is dan:

$$P = P_s + Q \quad (5)$$

De stuwdruk  $Q$  kan worden bepaald met de volgende vergelijking [2]:

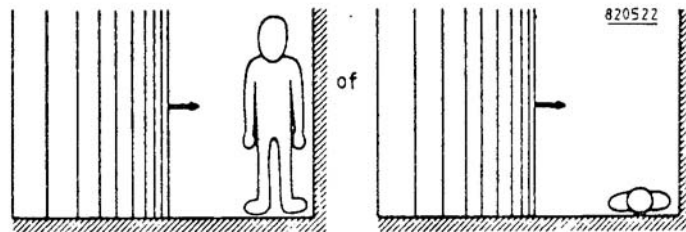
$$Q = \frac{5P_s^2}{2P_s + 14p_o} \quad (6)$$

waarin:

$Q$  = dynamische druk of stuwdruk [Pa]

$P_s$  = piekoverdruk in de aankomende druk- of schokgolf [Pa]

c) De mens bevindt zich in een willekeurige positie direct voor een vlak waartegen de schokgolf reflecteert (Figuur 3-5).



**Figuur 3-5. Reflectie van de druk- of schokgolf tegen een direct in de omgeving van het menselijk lichaam aanwezig vlak.**

In het gebied voor dit vlak heerst nu de gereflecteerde druk  $P_r$ :

$$P = P_r \quad (7)$$

De gereflecteerde druk is te bepalen met vergelijking 8:

$$P_r = \frac{8P_s^2 + 14P_s * p_o}{P_s + 7p_o} \quad (8)$$

waarin  $P_r$  en  $P_s$  wederom in Pascal zijn uitgedrukt.

Nota bene:

De persoon wordt blootgesteld aan twee schokgolven; één van de aankomende golf, en kort daarna de reflecterende golf.

Figuur 3-2 is alleen van toepassing op ideale schokgolven namelijk golven met een instantane drukverhoging gevolgd door een exponentiële afname. Axelsson en Yelverton [19] ontwikkelden een model met één vrijheidsgraad (SDOF-model) voor de menselijke borstkas dat het mogelijk maakt om de reactie op elk type schok-/druk golf of combinatie van golven te bepalen. Zij kwamen erachter dat letsel aan longen en het maag-darmstelsel gerelateerd is aan de naar binnen gerichte pieksnelheid op de borst. Het SDOF-model wordt als volgt weergegeven:

$$m_{ch} \frac{d^2 * x_{ch}}{dt^2} + J_{ch} * \frac{dx_{ch}}{dt} + k_{ch} * x_{ch} = A_{ch} * \left( P(t) + p_0 - \left( \frac{V_{ch}}{V_{ch} - A_{ch} * x_{ch}} \right)^{\gamma_{ch}} * p_0 \right) \quad (9)$$

waarin:

$A_{ch}$ :	geschaald oppervlak van de borstkas	$0,082 [m^2] * (m/C_9)^{2/3}$	$[m^2]$
$J_{ch}$ :	geschaalde demping van de borstkas	$696 [Ns/m] * (m/C_9)^{2/3}$	$[Ns/m]$
$k_{ch}$ :	geschaalde veerconstante van de borstkas	$989 [N/m] * (m/C_9)^{1/3}$	$[N/m]$
$m_{ch}$ :	geschaalde massa van de borstkas	$2,03 [kg] * (m/C_9)$	$[kg]$

P(t) :	overdruk van schok-/druk golf als functie van de tijd		
V <sub>ch</sub> :	geschaald volume van de longen	1,82*10 <sup>-3</sup> [m <sup>3</sup> ] * (m/C <sub>9</sub> )	[m <sup>3</sup> ]
X <sub>ch</sub> :	verplaatsing van de borstkas (inwaarts positief)		[m]
Y <sub>ch</sub> :	'ratio van soortelijke warmtes' voor longweefsel	1,2	[-]

Axelsson en Yelverton [19] leidden dit model af naar aanleiding van 'blast'-experimenten op schapen. Het model komt redelijk overeen met Figuur 3-2 in die zin dat ideale schokgolven van verschillende tijdsduur die een bepaald niveau van schade veroorzaken alle resulteren in (ongeveer) gelijke naar binnen gerichte piek snelheden op de borst. Bijvoorbeeld, voor een kans van 50%, variëren de snelheden van 12 m/s tot 17 m/s. Voor schokgolven met een lange duur zijn de snelheden als volgt:

- drempel voor longschade: 4,2 m/s
- 1% letaliteit (kans op overlijden): 12,0 m/s
- 10% letaliteit: 14,0 m/s
- 50% letaliteit: 16,6 m/s
- 90% letaliteit: 19,7 m/s
- 99% letaliteit: 22,6 m/s

Toepassing van dit model op drukgolven laat zien dat de meeste drukgolven geen longschade kunnen veroorzaken. Dit werd bevestigd door experimenten van White et al. [4]. Alleen kortdurende drukgolven met een grote amplitude kunnen longschade veroorzaken. Dergelijke golven bestaan in de praktijk niet, omdat ze snel zouden overgaan in schokgolven. Drukgolven van welke duur en amplitude dan ook, veroorzaken nooit meer longschade dan schokgolven van lange duur met gelijke amplitude.

Om in staat te zijn de kans op letaliteit analytisch te bepalen, werd Figuur 3-2 benaderd door een zogenaamde probit-functie. Met deze probitfunctie wordt een probit Pr bepaald waarmee met Tabel I-1 uit Bijlage I de overlijdenskans kan worden vastgesteld.

De Probit-functie voor primair letsel door een blast is:

$$Pr = 5,0 + 5,7 * \ln(V) \quad (10)$$

waarin:

$$V = \frac{\bar{P}}{4,17 - (1,64 * 10^{-3}) * \frac{\ln(\bar{t})}{\bar{t}} + \frac{0,0161}{\bar{t}}} \quad (11)$$

Deze functie wordt afgeleid in Bijlage I.

De methode voor het bepalen van de letaliteit ten gevolge primair letsel door blast veroorzaakt door schokgolven kan als volgt worden samengevat.

- Bepaal de piekoverdruk ten gevolge van het incident en de positieve fasesduur van de schokgolf op de locatie waar de persoon zich bevindt.
- Bepaal de werkelijke druk die op de persoon wordt uitgeoefend, afhankelijk van de positie van de persoon.
- Bepaal de geschaalde piekoverdruk en de geschaalde tijdsduur, afhankelijk van de

atmosferische druk en het lichaamsgewicht (massa)

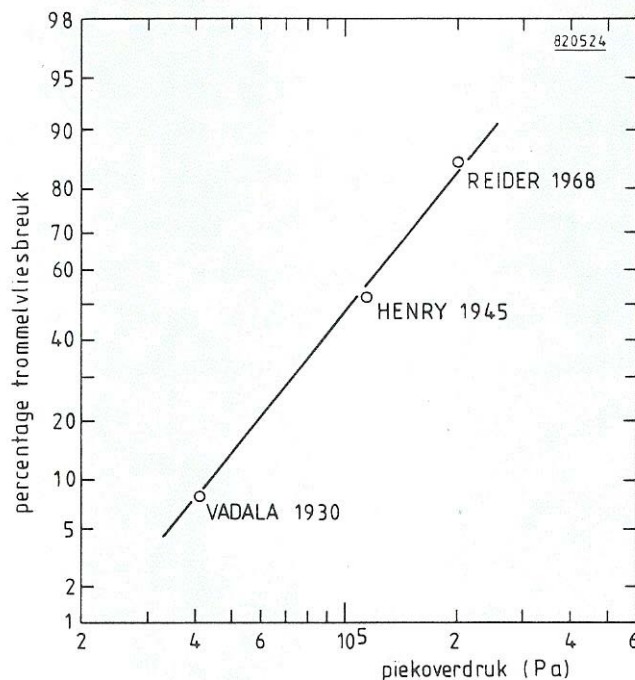
- d) Bepaal het letaliteitspercentage gebruik makend van Figuur 3-2 of vergelijkingen 10 en 11. Gebruik het model van Axelsson en Yelverton als de schok-/druk golf een niet-ideale vorm heeft.

Letaliteit ten gevolge van letsel door een blast zal alleen plaatsvinden bij hoge overdrukken en lange duur (van de golf). In de meeste ongevalsituaties hebben andere explosie effecten een veel grotere overlijdenskans tot gevolg.

### 3.2 Gehoorschade

Het oor is een gevoelig orgaan dat reageert op zeer kleine drukvariaties.

Uit een studie, beschreven in referentie [3] blijkt dat trommelvliesbreuk maatgevend is voor gehoorbeschadiging. Op basis van gegevens uit andere bronnen wordt in [3] aangegeven wat de kans op trommelvliesbreuk is bij een bepaalde piekoverdruk (zie ).



**Figuur 3-6 Trommelvliesbreuk als functie van de overdruk, ref. [3].**

In geen enkele referentie is iets te vinden over de invloed van de duur van de overdruk op het percentage trommelvliesbreuk. Verwacht zou mogen worden dat ook hier sprake is van een druk- en een impulsasymptoot. Het oor is in staat signalen te registreren met frequenties van circa 10 kHz, dat wil zeggen met een tijdsduur van 0,1 ms. Het lijkt daarom waarschijnlijk dat een schok- of drukgolf altijd in het drukgebied ligt.

Ook voor wat betreft de invloed van omstroming en reflectie wordt niets vermeld in de literatuur. Het



lijkt echter waarschijnlijk dat er altijd enige reflectie tegen het lichaam zal plaatsvinden waardoor, gedurende korte tijd, de werkelijk op het oor uitgeoefende druk, de gereflecteerde druk is. Het zal daardoor niet nodig zijn de waarden uit aan de oriëntatie aan te passen.

De probitfunctie waarmee de kans op trommelvliesbreuk kan worden bepaald, is:

$$\text{Pr} = -12,9 + 1,54 * \ln\left(\frac{P_s}{C_5}\right) \quad (12)$$

Zie voor de afleiding van (12) Bijlage I.

## 4 Uitwerking van meesleureffecten

Een sterke schokgolf of drukgolf wordt vergezeld door een explosiewind van orkaankracht. Deze wind kan mensen meesleuren. Een persoon kan in de lucht ronddraaien en op zijn hoofd terecht komen of hij kan tegen een hard object worden gestuwd. Zo'n gehele lichaamsverplaatsing vindt alleen plaats wanneer de persoon rechtop staat, zoals te zien is in Figuur 3-4.

Tijdens het verplaatsen kunnen door het rollen en glijden over de al dan niet harde ondergrond, verwondingen ontstaan. De mogelijkheid bestaat echter dat gedurende het verplaatsen een botsing met een star voorwerp plaatsvindt. De eventuele letale gevolgen van het meesleuren worden voornamelijk veroorzaakt door deze botsingen. De gevolgen die hierbij op kunnen treden, zijn sterk afhankelijk van de botsingssnelheid, hardheid en vorm van het voorwerp of obstakel en het deel van het lichaam dat bij de botsing is betrokken.

### 4.1 Criteria voor bepaling van overlijdenskans

Algemeen wordt aanvaard dat bij botsing van het menselijk lichaam met voorwerpen, de schedel het meest kwetsbare deel van het lichaam is. In de literatuur worden derhalve criteria gegeven waarmee de overlijdenskans kan worden bepaald indien de schedel een star en hard voorwerp treft. Tabel 4-1(uit ref. [2]) geeft kritieke impactsnelheden die behoren bij een bepaalde kans op schedelbasisfractuur.

**Tabel 4-1 Kans op schedelbasisfractuur afhankelijk van botsingssnelheid**

Botsingssnelheid (m/s)	Criterium: kans op schedelbasisfractuur
3,0	Veilig
4,0	Drempel
5,5	50%
7,0	bijna 100%

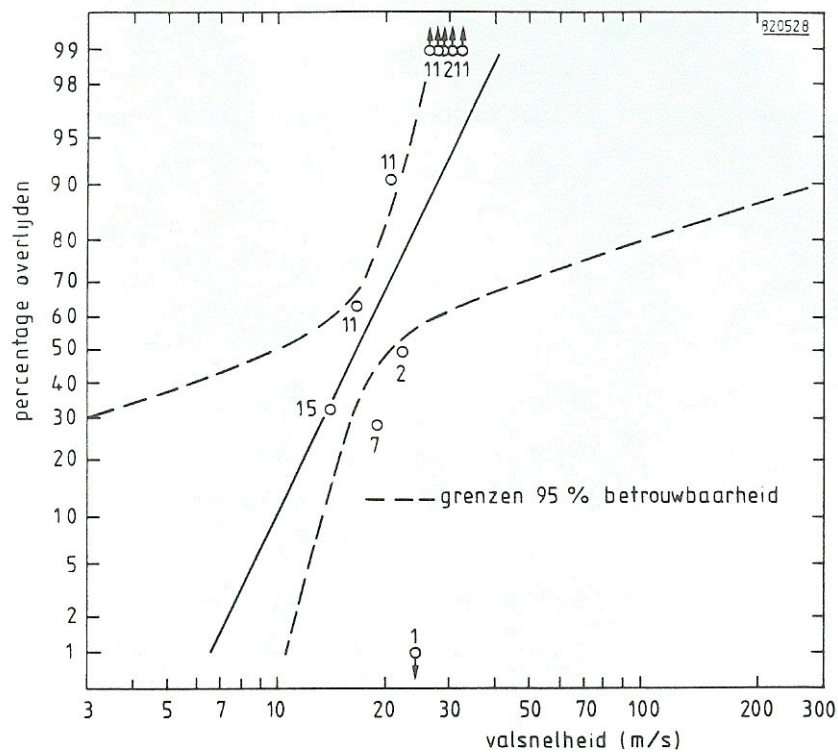
De vermelde snelheden zijn afgeleid van resultaten van proeven met dieren.

Naast de kritieke botsingssnelheden voor impact van de schedel worden ook criteria gegeven voor het bepalen van overlijdenskansen bij een botsing van het hele lichaam met een star voorwerp, waarbij geen speciaal deel van het lichaam wordt beschouwd (Tabel 4-2, uit [2]).

**Tabel 4-2: Kans op overlijden bij impact van het hele lichaam, afhankelijk van botsingsnelheid**

Botsingsnelheid (m/s)	Criterium: kans op overlijden
3,0	veilig
6,5	drempel
16,5	50%
42,0	bijna 100%

De waarden uit Tabel 4-2 zijn bepaald aan de hand van een groot aantal ongevallen waarbij mensen van een bekende hoogte naar beneden zijn gevallen. In Figuur 4-1 uit referentie [4] wordt een waarschijnlijkheidscurve gegeven die gebaseerd is op gegevens uit [5].



**Figuur 4-1. Overlijdenspercentage bij vallen op beton.**

De cijfers in de figuur geven het aantal bijbehorende gevallen. Opvallend is dat Tabel 4-1 en Tabel 4-2 beide een gelijke waarde voor de impactsnelheid geven die als veilig wordt beschouwd. Met als uitgangspunt dat de schedel belangrijk kwetsbaarder is dan de rest van het lichaam kunnen de hogere snelheden van Tabel 4-2 worden verklaard. De kans namelijk dat bij een botsing van het hele lichaam

juist de schedel is betrokken, is kleiner dan één, waardoor een gelijk effect pas bij een hogere snelheid op zal treden.

## 4.2 Druk-impuls diagrammen

De stuw- of dynamische druk  $Q$  die door de explosiewind wordt uitgeoefend op een stilstaand voorwerp of mens is gelijk aan:

$$Q = \frac{1}{2} C_D * \rho_1 * u^2 \quad (13)$$

waarin:

$C_D$	: de 'drag'coëfficiënt	[-]
$\rho_1$	: de luchtdichtheid achter de blastgolf	[kg/m <sup>3</sup> ]
$u$	: de voortplantingsnelheid van de golf	[m/s]

De versnelling  $\dot{v}_m$  die een meegesleurd voorwerp ondervindt is dan te bepalen uit:

$$m * \dot{v}_m = \frac{1}{2} C_D * A * \rho_1 * (u - v_m)^2 \quad (14)$$

waarin:

$\dot{v}_m$	: versnelling die een meegesleurd voorwerp ondervindt	[m/s <sup>2</sup> ]
$v_m$	: meesleursnelheid	[m/s]
$m$	: de massa van het meegesleurde voorwerp	[kg]
$A$	: het loodrecht op de voortplantingsrichting van de golf geprojecteerde oppervlak.	[m <sup>2</sup> ]

De deeltjessnelheid  $u$  en de dichtheid  $\rho_1$  zijn afhankelijk van de atmosferische druk  $p_o$ , de druk  $P_s$  en de dichtheid  $\rho_o$  van de lucht voor de blastgolf volgens (zie [2]):

$$\rho_1(t) = \rho_o * \frac{7p_o + 6P_s(t)}{7p_o + P_s(t)} \quad (15)$$

en

$$u(t) = c_o * \frac{5P_s(t)}{7P_o * \sqrt{1 + \frac{6P_s(t)}{7P_o}}} \quad (16)$$

Hierin is  $c_o$  de geluidssnelheid in stilstaande lucht, normaal rond de 340 m/s.

De maximale meesleursnelheid kan worden bepaald door het oplossen van de differentiaalvergelijking (14) na substitutie van (15) en (16).

---

In de figuren Figuur 4-2 en Figuur 2-1 zijn de combinaties van  $P_s$  en  $I_s$  bepaald die behoren bij de waarden voor de meesleurnsnelheden uit Tabel 4-1 en Tabel 4-2. De volgende aannamen zijn gedaan ten einde de figuren te kunnen samenstellen.

Uitgegaan is van een mens met een massa  $m$  van 70 kg, een dichtheid van  $1 \text{ kg/dm}^3$  en een lengte-breedteverhouding van 7. Wordt het menselijk lichaam geschematiseerd tot een cilinder dan is het getroffen oppervlak  $A$  van een rechtopstaande mens gelijk aan  $0,382 \text{ m}^2$ .

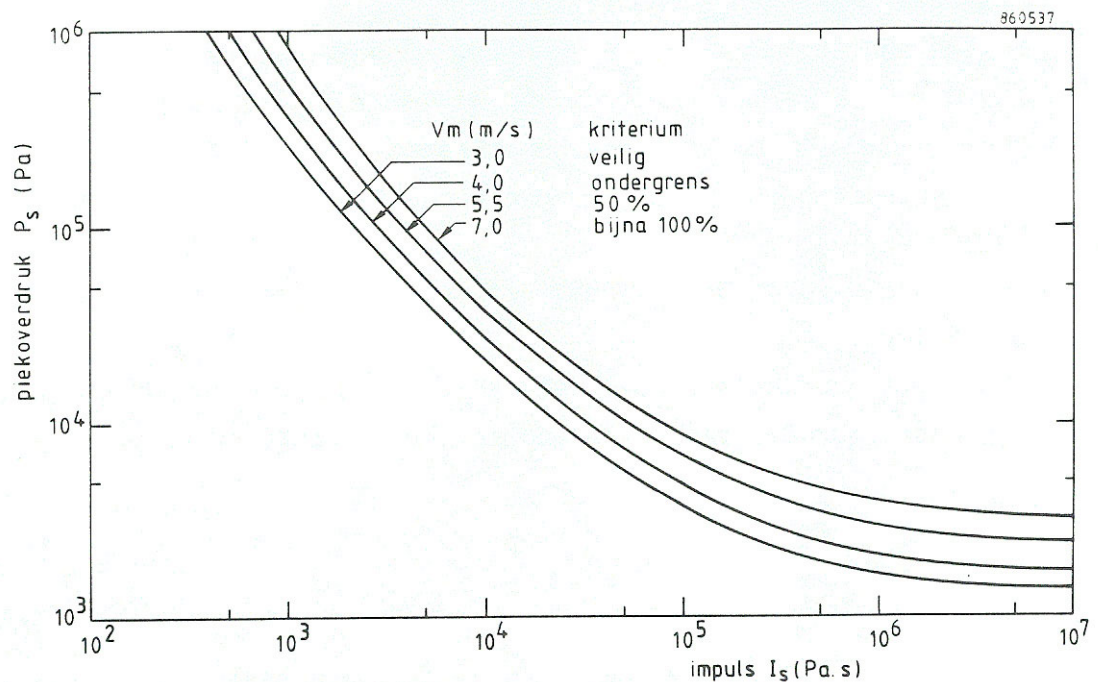
In werkelijkheid zal het lichaam roteren parallel aan de explosiewind. Deze aanname leidt dus tot een overschatting van de snelheid.

Voor het verloop van de blastgolf is het tot een driehoek geschematiseerde verloop van een schokgolf aangehouden volgens:

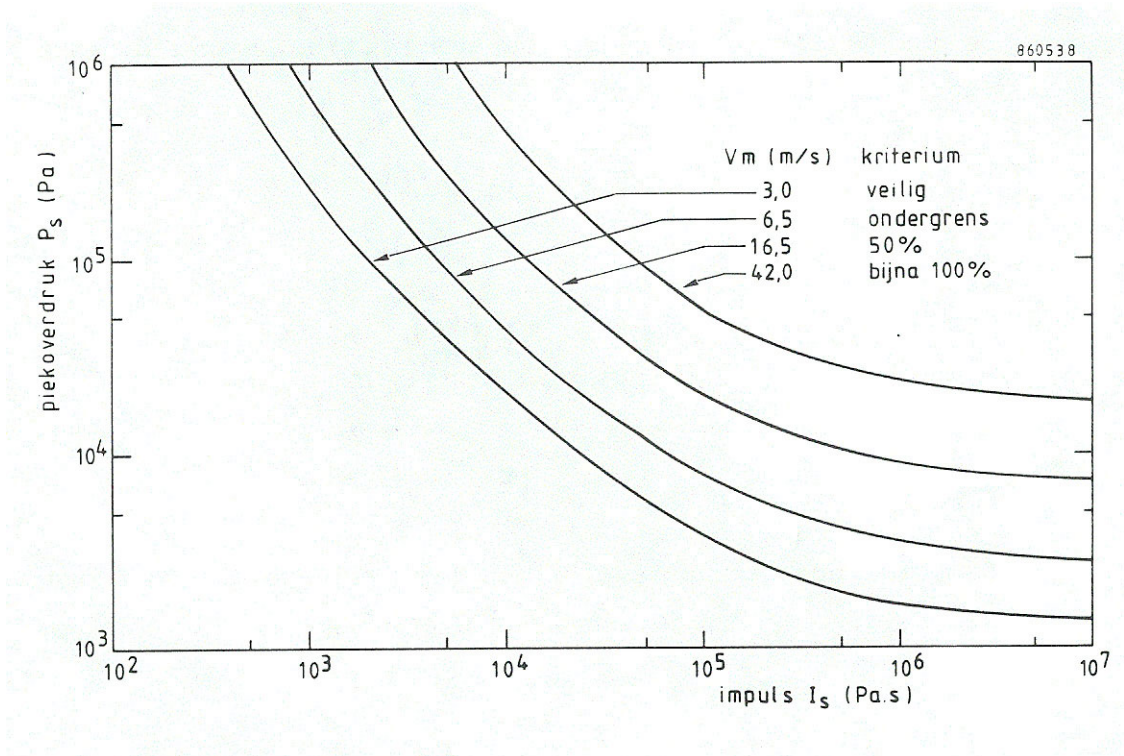
$$P_s(t) = P_s * \left(1 - \frac{t}{t_p}\right) \quad (17)$$

In de figuren Figuur 4-2 en Figuur 4-3 zijn de overdrukken beperkt tot  $10^6 \text{ Pa}$  omdat bij hogere overdrukken en de bij de bepaalde meesleurnsnelheden horende impulsen het model niet meer geldig is.

Indien sprake is van meesleuren kan nu afhankelijk van piekoverdruk en impuls de maximale meesleurnsnelheid worden bepaald. Indien wordt aangenomen dat met deze snelheid een botsing plaatsvindt met een star voorwerp, kan de overlidenskans worden bepaald.



**Figuur 4-2. P-I diagram voor schedelbasisfractuur.**



**Figuur 4-3. P-I diagram voor impact hele lichaam.**

De probitfunctie voor het bepalen van de overlijdenskans na impact van het hoofd is:

$$Pr = 5,0 - 8,49 \cdot \ln S \quad (18)$$

Waarin

$$S = \frac{2,43 \cdot 10^3}{P_s} + \frac{4 \cdot 10^8}{P_s \cdot i_s} \quad (19)$$

De probitfunctie voor het bepalen van de overlijdenskans na impact met het hele lichaam is:

$$Pr = 5,0 - 2,44 \cdot \ln S \quad (20)$$

waarin:

$$S = \frac{7,28 \cdot 10^3}{P_s} + \frac{1,3 \cdot 10^9}{P_s \cdot i_s} \quad (21)$$

De beide probitfuncties (18) en (20) zijn geldig voor overdrukken  $P_s$  die lager zijn dan  $0,4$  à  $0,5 \cdot 10^6$  Pa.

Figuur 4-2 en Figuur 4-3 en de corresponderende probitfuncties zijn afgeleid uitgaande van conservatieve aannames. Hierdoor overschatten deze de overlijdenskans. Echter, ondanks deze conservatieve aannames zijn de overdrukken en vooral de impulsen die nodig zijn om verwondingen op de leveren hoog. Geconcludeerd kan worden dat de meesleureffecten alleen in beschouwing moet worden genomen bij grote explosies.

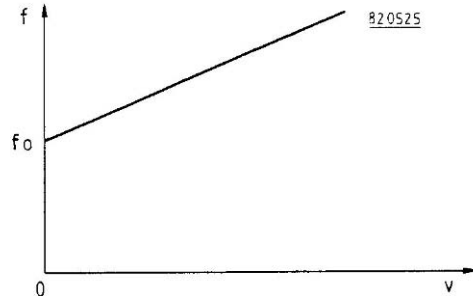
## 5 Uitwerking van scherven en brokstukken

Als gevolg van een explosie kunnen scherven ontstaan die met een bepaalde snelheid worden weggeslingerd en gevaar op kunnen leveren voor mensen indien die worden getroffen. De scherven kunnen ontstaan ofwel direct uit de explosiebron, ofwel doordat voorwerpen in de omgeving van de explosiebron als gevolg van de ontstane blast worden weggegooid.

Bij de uitwerking van scherven op het menselijk lichaam wordt veelal onderscheid gemaakt tussen snijdende en niet-snijdende scherven. Snijdende scherven penetreren door de huid; deze categorie wordt vaak aangeduid als scherven. Bij de niet-snijdende scherven ontstaat letsel als gevolg van contactdruk; deze categorie wordt meestal aangeduid als brokstukken.

### 5.1 Scherven

Het penetreren van scherven wordt veelal bepaald door uit te gaan van een theoretisch model waarbij de huid als een ideaal star-visceus medium wordt beschouwd. De weerstand  $f$  van een dergelijk medium, als functie van de snelheid  $v$  van de scherf, is weergegeven in de onderstaande figuur.



**Figuur 5-1 Karakteristiek van de penetratieweerstand van een ideaal star-visceus medium.**

In formulevorm is de vergelijking voor de weerstand:

$$f = f_0 + C * v \quad (22)$$

waarin:

$f =$	visceuze weerstand van de huid	[Pa]
$f_0 =$	constante visceuze weerstand	[Pa]
$C =$	visceuze weerstandcoëfficiënt	[Pa.s/m]
$v =$	snelheid	[m/s]

Voor een scherf met een oppervlakte  $A$  van de doorsnede loodrecht op de verplaatsingsrichting en een massa  $m$  geldt dan de volgende relatie tussen de maximale indringdiepte  $x$  en de trefsnelheid  $v_0$ :

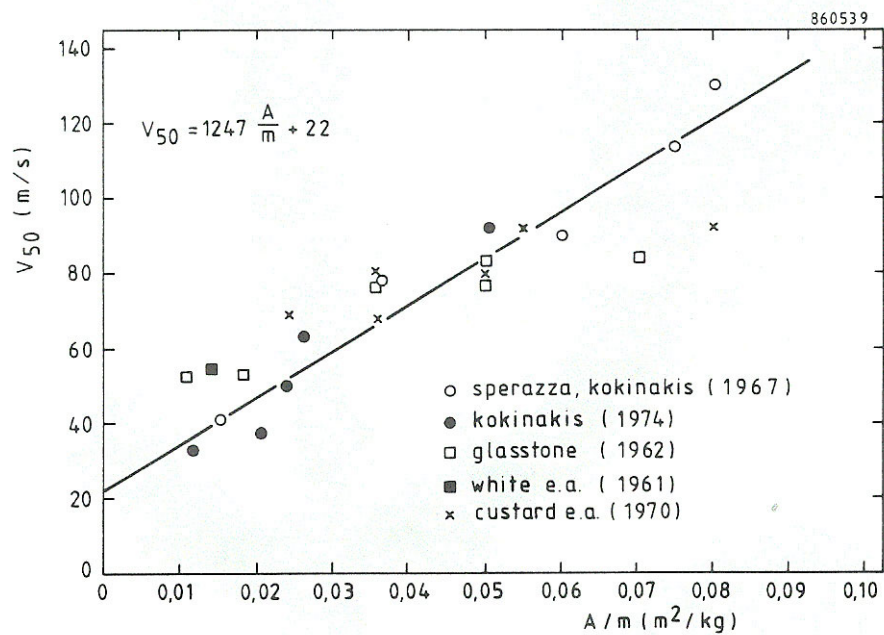


$$v_o = x * C * \frac{A}{m} + \frac{f_o}{C} \quad (23)$$

- $v_o$  = impact- of trefsnelheid van een scherf of brokstuk [m/s]  
 $x$  = maximale penetratiediepte [m]  
 $A$  = oppervlak (hier: van de scherf) [m<sup>2</sup>]

In [2] wordt een overzicht gegeven van proefresultaten van diverse onderzoekers. Deze zijn vergeleken met een door Sperrazza en Kokinakis afgeleide relatie (Figuur 5-2):

$$v_{50} = 1247,1 * \frac{A}{m} + 22,03 \quad (24)$$



**Figuur 5-2. Trefsnelheid, waarbij 50% van de scherven die het lichaam treffen, door de huid penetreert, als functie van de oppervlakte-massaverhouding [2]**

De snelheid  $v_{50}$  wordt gedefinieerd als de trefsnelheid van de scherven waarbij 50% van de scherven die het lichaam treffen door de huid penetreert. Aangenomen wordt dat de restsnelheid van de gepenetreerde scherf hoog genoeg is om ernstige verwondingen te veroorzaken.

Referentie [6] vermeldt dat ernstige verwondingen zullen ontstaan indien de scherven 1 cm of meer doordringen of worden gestopt door een bot. De in de Figuur 5-2 weergegeven resultaten zijn gemiddelden van een groot aantal vergelijkbare proefresultaten. Om de vorm van een projectiel te karakteriseren is de verhouding  $A/m$  niet geschikt, omdat deze bij geometrische schaling niet constant blijft.

Een gebruikelijke vormfactor is  $k$ , gedefinieerd als

$$k = \frac{m}{A^{\frac{2}{3}}} \quad (25)$$

Deze vormfactor wordt o.a. gebruikt in referentie [7]. Formule (24) kan dan geschreven worden als

$$v_{50} = 1247 * \frac{1}{(k^2 * m)^{\frac{1}{3}}} + 22,03 \quad (26)$$

Referentie [7] geeft ook enkele waarden voor  $k$ .

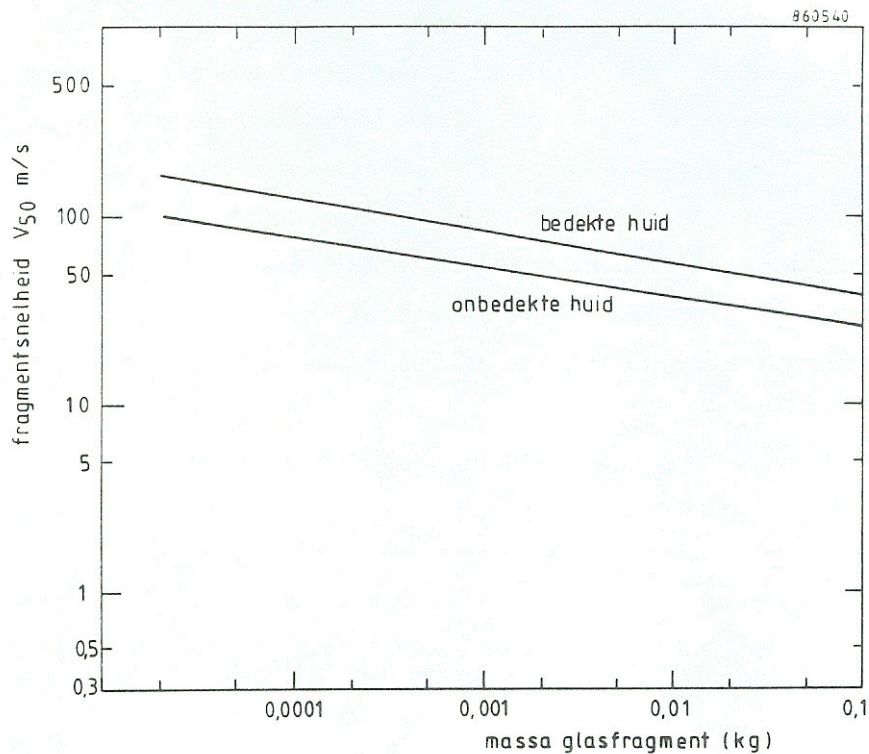
Voor de scherven afkomstig van bommen en projectielen geldt  $k = 2370 \text{ kg/m}^3$  en voor de meest effectieve scherven geldt  $k = 4740 \text{ kg/m}^3$ .

In referentie [6] zijn kritieke trefsnelheden voor glasscherven bepaald aan de hand van proeven op dieren met bedekte en onbedekte huid. Resultaten zijn weergegeven in Figuur 5-3.

Ook worden in dezelfde referentie waarden voor  $v_{50}$  gegeven indien de glasscherven die het hoofd troffen schedelbreuk veroorzaakten. Afhankelijk van de hoek van inval en de massa van de glasscherf zijn in Tabel 5-1 deze waarden weergegeven.

**Tabel 5-1  $v_{50}$  voor schedelbreuk door glasscherven.**

Massa (kg)	Hoek van inval (°)	$v_{50}$ (m/s)
0,001	45	39,9 ± 3,7
0,01	180	36,3 ± 1,0
0,01	90	14,7 ± 1,2
0,01	45	10,8 ± 0,9
0,1	90	4,7 ± 0,6
0,1	45	2,7 ± 0,4



**Figuur 5-3. Scherftrefsneldheid waarbij 50% penetratie optreedt als functie van de scherfmassa.**

## 5.2 Brokstukken

Brokstukken veroorzaken, bij botsing tegen een menselijk lichaam, in dit lichaam grote drukspanningen en vervormingen. Grote spanningen kunnen leiden tot het breken van stijve, brosse delen: de botten. Grote vervormingen kunnen eveneens leiden tot beschadiging van allerlei organen, met als gevolg inwendige bloedingen en dergelijke.

Doordat het menselijk lichaam een zeer gecompliceerd geheel is, is het vrijwel onmogelijk theoretisch te voorspellen welke grootheden bepalend zijn voor de optredende verwondingen. Bovendien hangt het al dan niet optreden van letsel sterk af van de plaats waar het lichaam wordt getroffen.

In de literatuur worden dan ook maar enkele zeer algemene criteria gevonden voor het optreden van letsel bij botsing van mensen en brokstukken.

Volgens explosie veiligheids criteria in de USA wordt een brokstuk als gevaarlijk beschouwd indien de kinetische energie ervan groter of gelijk is aan 79 joules, zie bijvoorbeeld [7].

In een studie over valhelmen [10] wordt vermeld dat ernstige verwondingen aan het voorhoofd kunnen ontstaan bij impact van fragmenten met een kinetische energie tussen 40 en 60 joules. In de literatuur (o.a. in [2]) worden snelheden genoemd voor een brokstuk van 4,5 kg met betrekking tot schedelbasisfractuur (Tabel 5-2).

**Tabel 5-2 Kritieke snelheid voor impact van een brokstuk van 4,5 kg tegen een schedel**

<b>Impactsnelheid (m/s)</b>	<b>Criterium: kans op schedelbasisfractuur</b>
3,0	veilig
4,5	ondergrens
7,0	bijna 100%

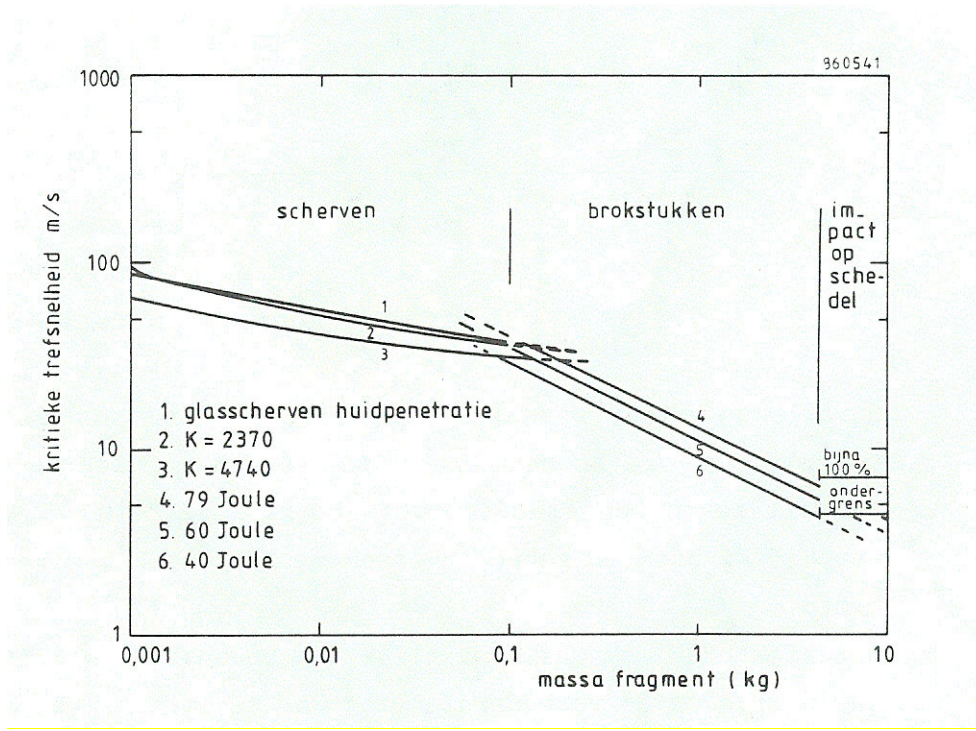
Opvallend is dat dezelfde snelheden eveneens schedelbasisfractuur tot gevolg hebben in het geval van meesleuren waarbij de schedel tegen een star voorwerp botst (zie Tabel 5-2). Een massa van 4,5 kg stemt ongeveer overeen met de massa van het menselijk hoofd.

Het lijkt dan ook waarschijnlijk dat bovenstaande criteria gebaseerd zijn op de veronderstelling dat de botsing van een betrekkelijk groot brokstuk tegen het hoofd, identiek is aan de botsing van het hoofd tegen een starre massa. Deze vergelijking gaat echter alleen op indien de massa van het brokstuk 4,5 kg of meer bedraagt. Deze conclusie wordt echter nergens in de betreffende literatuur aangetroffen.

### **5.3 Letselcriterium**

Uit de schaarse en onvolledige gegevens die beschikbaar zijn, is het moeilijk om een duidelijk letselcriterium vast te stellen. De in de paragrafen 5.1 en 5.2 genoemde criteria zijn in Figuur 5-4 verzameld. De impactsnelheid en de massa van scherven en brokstukken zijn daarbij uitgezet. Ondanks de gebrekkige gegevens kan met behulp van Figuur 5-4 toch een indruk worden verkregen of een bepaalde scherf of brokstuk letsel kan veroorzaken. Voor brokstukmassa's kleiner dan 0,1 kg is het scherfcriterium maatgevend.

Voor massa's tussen 0,1 en 4,5 kg is het energiecriterium voor impact van brokstukken maatgevend. Voor massa's groter dan 4,5 kg zal de kans op schedelbasisfractuur maatgevend zijn.



**Figuur 5-4. Letselcriterium voor scherven en brokstukken.**

De probitfuncties voor het bepalen van de overlijdenskans voor secundaire effecten zijn hieronder opgenomen.

Voor fragmentmassa's groter dan 4,5 kg geldt:

$$Pr = - 13,19 + 10,54 \cdot \ln v_o \quad (27)$$

Voor fragmentmassa's tussen 0,1 en 4,5 kg geldt:

$$Pr = - 17,56 + 5,30 \cdot \ln S \quad (28)$$

met

$$S = \frac{1}{2} m \cdot v_o^2 \quad (29)$$

Voor fragmentmassa's tussen 0,001 kg en 0,1 kg geldt:

$$Pr = - 29,15 + 2,10 \cdot \ln S \quad (30)$$

met

$$S = m \cdot v_0^{5,115} \quad (31)$$

## 5.4 Glasscherven

Op grotere afstand van een explosie zal vanwege de geringe overdruk, de schade aan gebouwen grotendeels alleen maar bestaan uit ruitbreuk. De snelheid en massa van de glasscherven kunnen echter nog dermate hoog zijn dat deze letsel aan personen veroorzaken die zich tijdens de explosie achter ruiten bevinden. Letsel door glasscherven zal zich daarom tot op grote afstand van het explosiecentrum kunnen voordoen. Dit is een belangrijke reden om voor de uitwerking van glasscherven een aparte probitfunctie af te leiden.

De beginsnelheid en de massa van glasscherven afkomstig van een bezwijkende ruit zijn afhankelijk van de afmetingen van de ruit (lengte, breedte, dikte) en de belasting op de ruit. Is de belasting een aantal factoren hoger dan de bezwijkbelasting van de ruit dan zullen gevaarlijker scherven ontstaan dan bij een belasting die iets groter dan de bezwijkbelasting is. Een persoon vlak achter de ruit wordt getroffen door snellere scherven dan iemand verder van de ruit. Ook de positie van een persoon ten opzichte van de ruit is van invloed.

Uit proefresultaten [6], [10] blijkt dat een grote spreiding optreedt van snelheid en massa van de glasscherven bij de beproefde ruiten. Wel blijkt uit het door het PML-TNO uitgevoerde onderzoek (o.a. [18]) dat desondanks bij een belasting die twee maal zo hoog is als de bezwijkbelasting van de ruit de snelheidsverdeling zodanig is dat deze boven de  $v_{50}$  voor schedelbreuk ligt. Met behulp van gegevens uit [18] is te bepalen dat de kans in dit geval op schedelbreuk 94% bedraagt. De massasnelheidsverdeling is bepaald op 1,75 m achter ruiten met afmetingen 1,68 x 1,13 m<sup>2</sup>.

Ook is gebleken dat de ruimtelijke spreiding van de scherven beperkt blijft; het grootste gedeelte werd teruggevonden in het vlak recht achter de ruit.

Voor een zich achter de ruit bevindende persoon bestaat er een grote kans dat deze getroffen wordt tegen het hoofd. Een overlijdenskans kan dan ook worden bepaald op basis van de schedelbreuk door glasscherven. In Bijlage I is afgeleid dat geldt voor de overlijdenskans door glasscherven:

$$Pr = 2,67 + 3,38 \ln \frac{DLF * P}{P_{st}} \quad (32)$$

waarin  $P_{st}$  en DLF afhankelijk zijn van de ruitafmetingen en de dynamische belasting. Deze zijn te bepalen met behulp van gegevens uit deel 2B "Effecten van explosie op constructies".

Indien de afmetingen van de ruit onbekend zijn moet gebruik gemaakt worden van de volgende probitfunctie uit deel 2B "Effecten van explosie op constructies":

$$Pr = -16,58 + 2,53 \ln P_s.$$

Deze vergelijking geldt voor huizen gebouwd na 1975 en waar 50 % glasbreuk optreedt bij een invallende piekoverdruk van 5 kPa. In combinatie met vergelijking 32 kan de probitfunctie afgeleid worden voor personen die zich achter de beglazing bevinden van gelijk welke afmeting en oriëntatie, hetzij enkele of dubbele beglazing.

---

$$\text{Pr} = -15,7 + 2,20 * \ln\left(\frac{P_s}{C_5}\right) \quad (33)$$

In deze functie moet de invallende piekoverdruk  $P_s$  gebruikt worden, en niet de werkelijke druk op het raam.

Vervolgens moet de overlijdenskans, wanneer getroffen, vermenigvuldigd worden met de kans om geraakt te worden door glasscherven. Deze is ruwweg gelijk aan de kans dat een persoon zich binnen enkele meters achter het glas bevindt. Een kans van 5% is aannemelijk voor de meeste situaties. Voor kantoren tijdens werkuren is mogelijk een hogere waarde nodig.

Tenslotte moet de uitkomst vermenigvuldigd worden met het aantal binnen het gebouw aanwezige mensen.

Opmerking:

Uit de vergelijking met data verkregen tijdens de Tweede Wereldoorlog, blijkt dat de resultaten verkregen uit de probitfuncties overeenkomen met de waarnemingen in het verre veld voor grote (nucleaire) explosies. Voor kleinere (conventionele) explosies wordt de kans op overlijden overschat.

## **6 Instorten van gebouwen**

Gebouwen kunnen instorten bij belastingen als gevolg van blast die veel lager zijn dan die waarbij directe schade aan mensen optreedt. Indien in een instortend gebouw personen aanwezig zijn, kunnen deze hierdoor ernstig worden verwond of zelfs gedood. Doordat zich onder een instortend gebouw veelal gewelven vormen (tegen elkaar hangende wanden en dergelijke) die enige bescherming kunnen bieden, is het zeker niet zo dat alle aanwezige personen altijd zullen omkomen.

### **6.1 Kans op overlijden bij instorting van gebouw**

Gegevens over het aantal doden en gewonden ten gevolge van het instorten van gebouwen door explosies zijn schaars. Gebruik kan worden gemaakt van gegevens over instortende gebouwen door aardbevingen. Beide gebeurtenissen, explosie en aardbeving, zullen op een onverwacht moment plaatsvinden zodat de aanwezige personen niet van te voren gewaarschuwd zullen zijn en een veilige plaats zullen hebben opgezocht.

Door Glass e.a. [7] is gevonden dat het aantal doden onder de door een instorting van een gebouw getroffen mensen afhangt van de leeftijd van de getroffen. In woonhuizen hadden jonge kinderen en bejaarden een kleinere kans op overleven. Ook bleek dat in nagenoeg alle leeftijdscategorieën meer vrouwen dan mannen ernstig of dodelijk gewond waren.

Voor wat betreft de grootte van het gebouw bleek dat er meer ernstig of dodelijk letsel voorkwam in de grotere huizen (zeven of meer personen, dan in de kleinere). Ook de ouderdom van een gebouw is van belang. In de oudere gebouwen (8 jaar en ouder) kwam een hoger percentage ernstig of dodelijk letsel voor dan in de jongere gebouwen.

In [15] wordt vermeld dat bij het volledig instorten van een gebouw als gevolg van een aardbeving er 100% slachtoffers zullen zijn waarvan 50% gewond en 50% gedood. In een herzien rapport [16] wordt deze verdeling gesteld op 80% gewonden en 20% doden. Blume doet in [11] de aanname dat 50% van de gebruikers van een gebouw bij de instorting door een aardbeving zal omkomen.

Bij een in [14] aangehaalde instorting van een flatgebouw, veroorzaakt door een springstofexplosie, werd ongeveer 40% van de bewoners gedood.

Concluderend uit bovenstaande gegevens kan worden gesteld dat indien een gebouw instort ten gevolge van een aardbeving, 20 tot 50% van de aanwezige personen dodelijk gewond zullen raken. Hierbij is aangenomen dat ten gevolge van het instorten van gebouwen door explosies, hetzelfde percentage doden zal opleveren, als bij een aardbeving het geval is.

### **6.2 Niet-letaal letsel**

De fractie personen die gewond raakt, kan geschat worden op basis van het aantal personen dat overlijdt. Hadjipavlou en Carr-Hill [20] hebben een relatie afgeleid tussen de kans op verwonding 'IR' (Injured Ratio) en de kans op sterfte 'LR' (Lethal Ratio) voor mensen in huizen op basis van data uit het Verenigd Koninkrijk tijdens de Tweede Wereldoorlog. Deze relatie werd afgeleid voor alle verwondingsoorzaken, niet alleen instorting, maar ook primaire en tertiaire explosie effecten, alsmede

---



scherven en brokstukken.

$$IR = 0,27 * e^{-\left(\frac{1}{3,5} * \left(\ln\left(\frac{LR}{1-LR}\right) + 2\right)\right)^2} \quad (33)$$

waarin:

IR	: fractie mensen die gewond raken	[-]
LR	: fractie doden	[-]

## 7 Voorbeeldberekeningen

### 7.1 Voorbeeld 1

Een mens met een gewicht van 70 kg wordt getroffen door een schokgolf met een piekoverdruk  $P_s$  van  $3 \cdot 10^5$  Pa en een positieve fase-duur  $t_p$  van 0,05 s. De atmosferische druk  $p_0$  bedraagt  $1 \cdot 10^5$  Pa. Wat is de overlijdenskans van deze mens afhankelijk van zijn oriëntatie, voor de primaire en tertiaire effecten?

De overlijdenskans zal worden bepaald met behulp van de in dit deel gegeven probitfuncties.

Oplossing:

1) De mens bevindt zich in een liggende positie.

De op de mens uitgeoefende piekoverdruk  $P$  is gelijk aan:  $P = P_s = 3 \cdot 10^5$  Pa. De overlijdenskans kan met behulp van de vergelijkingen 3, 4, 10 en 11 worden bepaald.

De geschaalde piekoverdruk  $\bar{P}$  is gelijk aan:

$$\bar{P} = \frac{3 \cdot 10^5}{1 \cdot 10^5} = 3$$

De geschaalde positieve fase-duur is gelijk aan:

$$\bar{t} = 0,05 * \left(\frac{70}{70}\right)^{\frac{1}{3}} * \sqrt{\frac{1,0 \cdot 10^5}{1,013 \cdot 10^5}} = 0,0497$$

Met behulp van de probitfunctie (10) en (11) volgt

$$V = \frac{3}{4,17 - (1,64 \cdot 10^{-3}) * \frac{\ln(0,0497)}{0,0497} + \frac{0,0161}{0,0497}} = 0,653$$

$$Pr = 5,0 + 5,7 * \ln(0,653) = 2,57$$

De bijbehorende overlijdenskans wordt bepaald met behulp van Tabel I-1 uit Bijlage I en bedraagt minder dan 1%.

2) De mens bevindt zich dichtbij een vlak waartegen de schokgolf reflecteert.

De op de mens uitgeoefende piekoverdruk  $P$  is met vergelijking (7) te bepalen:

$$P = P_r = \frac{8 * (3 \cdot 10^5)^2 + 14 * (3 \cdot 10^5) * 10^5}{3 \cdot 10^5 + 7 \cdot 10^5} = 11,4 \cdot 10^5 \text{ Pa}$$

De geschaalde piekoverdruk bedraagt:  $\bar{P} = 11,4$ . Uit probitfunctie (10) en vergelijking 11 volgt:

$$V = \frac{11,4}{4,17 - (1,64 * 10^{-3}) * \frac{\ln(0,0497)}{0,0497} + \frac{0,0161}{0,0497}} = 2,48$$

$$Pr = 5,0 + 5,7 * \ln(2,48) = 10,2$$

De bijbehorende overlijdenskans wordt bepaald met behulp van Tabel I-1 uit Bijlage I en bedraagt meer dan 99%.

3) De mens bevindt zich in rechtopstaande positie, niet in de buurt van een vlak waartegen reflectie kan plaatsvinden.

In dit geval zal er omstroming plaatsvinden.

De bijbehorende stuwdruk Q is te bepalen met vergelijking (5):

$$Q = \frac{5 * (3 * 10^5)^2}{2 * 3 * 10^5 + 14 * 10^5} = 2,25 * 10^5 Pa$$

De op de mens uitgeoefende piekoverdruk bedraagt:  $P = P_s + Q = 2,25 * 10^5 + 3 * 10^5 = 5,25 * 10^5 Pa$ .

$$V = \frac{5,25}{4,17 - (1,64 * 10^{-3}) * \frac{\ln(0,0497)}{0,0497} + \frac{0,0161}{0,0497}} = 1,14$$

$$Pr = 5,0 + 5,7 * \ln(1,14) = 5,75$$

De bijbehorende overlijdenskans wordt bepaald met behulp van Tabel I-1 uit Bijlage I en bedraagt circa 77%.

De impuls  $i_s$  bedraagt:

$$\bar{i} = 0,5 * (5,25 * 10^5) * 0,0497 = 1,31 * 10^4 Pa.s$$

Met de geschaalde piekoverdruk  $\bar{P} = 5,25$  en de geschaalde impuls  $i = 41,0$  volgt uit Figuur 3-2 een overlijdenskans van ongeveer 85%.

In dit geval treedt er tevens meesleuren op. Wordt gebruik gemaakt van Figuur 4-3 dan volgt dat de maximale meesleursnelheid ongeveer 25 m/s bedraagt en de geschatte overlijdenskans 75%. Wordt de overlevingskans met behulp van de probitfunctie (19) bepaald, dan volgt:

$$S = \frac{7,28 * 10^3}{3 * 10^5} + \frac{1,3 * 10^9}{(3 * 10^5) * (7,5 * 10^3)}$$

en  $Pr = 5 - 2,44 * \ln 0,60 = 6,25$ . Hiermee is de overlijdenskans 89%

---

Opgemerkt dient te worden dat het verschil met de met behulp van Figuur 4-3 geschatte kans van 25% kan ontstaan doordat de probitfunctie een benadering van de figuur is.

De overlevingskans voor een mens in rechtopstaande positie die, nadat hij getroffen wordt door een schokgolf, wordt meegesleurd en met maximale snelheid tegen een star voorwerp botst, is gelijk aan  $(0,23 * 0,11) * 100\% = 2,5\%$ .

## 7.2 Voorbeeld 2

Wat is voor de mens uit voorbeeld 1 de kans op trommelvliesbreuk, afhankelijk van zijn oriëntatie?

Bij het bepalen van de gehoorschade is alleen de piekoverdruk van de aankomende golf van belang. Deze bedraagt  $3 * 10^5$  Pa. Uit Figuur 3-6 volgt dat de kans op trommelvliesbreuk 94% bedraagt. De kans berekend met de probitfunctie (12) bedraagt:

$$Pr = -12,9 + 1,54 * \ln\left(\frac{3 * 10^5}{1}\right) = 6,52, \text{ zodat de kans op trommelvliesbreuk } 93 \text{ à } 94\% \text{ bedraagt.}$$

## 7.3 Voorbeeld 3

Drie fragmenten met massa's van respectievelijk 0,01; 0,1 en 10 kg en een gelijke snelheid van 30 m/s treffen een mens. Wat is zijn overlijdenskans?

Met behulp van Figuur 5-4 volgt dat het fragment met een massa van 0,01 kg geen letsel toe zal brengen. De kans op letsel bij een impact met een fragment van 0,1 kg is vrij klein. Impact van de schedel en het brokstuk van 10 kg zal de mens niet overleven. Met behulp van de probitfuncties (26), (27) en (29) en de vergelijkingen (28) en (30) kunnen de overlevingskansen worden bepaald.

Voor het fragment van 0,01 kg volgt:

$$S = 0,01 * 30^{5,115} = 3,59 * 10^5$$

$$Pr = -29,15 + 2,10 * \ln 3,59 * 10^5 = 2,29 \text{ waaruit volgt dat de overlijdenskans kleiner is dan } 1\%.$$

Voor het fragment van 0,1 kg volgt:

$$S = 0,5 * 0,1 * 30^2 = 45,0$$

$$Pr = -17,56 + 5,30 * \ln 45 = 2,62 \text{ waaruit volgt dat de overlijdenskans iets kleiner is dan } 1\%.$$

Voor het fragment van 10 kg volgt met

$$S = 30$$

$$Pr = -13,19 + 10,54 * \ln 30 = 22,7 \text{ overeenkomend met een overlijdenskans die groter is dan } 99\%.$$

---

## 8 Conclusies

Het is mogelijk gebleken om voor de uitwerking van de meeste in dit hoofdstuk behandelde effecten van explosies op mens, criteria te geven waarmee overlijdenskansen kunnen worden afgeschat. Dit kan geschieden met behulp van de gegeven figuren of met behulp van de ontwikkelde probitfuncties.

De uitwerking van de directe blasteffecten is het meest onderzocht; deze zullen echter pas bij hoge piekoverdrukken van invloed worden.

Voor de secundaire effecten, de impact van scherven en brokstukken, kan ondanks de globale gegevens toch aangegeven worden of, afhankelijk van snelheid en massa, een fragment als gevaarlijk moet worden beschouwd. Het bepalen van de fragmentmassa en snelheidsverdeling uit de blastparameters komt in dit hoofdstuk niet aan de orde. Hiervoor wordt verwezen naar PGS 2.

De uitwerking van tertiaire effecten wordt bepaald door er van uit te gaan dat een mens met maximale meesleurnsnelheid tegen een star voorwerp botst. Deze aanname zal een overschatting van het effect aangeven. Voor het bepalen van de maximale meesleurnsnelheid uit de blastparameters is een eenvoudig model opgesteld. Dit model is echter niet geldig voor combinaties van hoge waarden voor piekoverdrukken en kleine waarden voor impulsen.

Voor het bepalen van de uitwerking van het instorten van gebouwen als gevolg van een explosie zijn slechts zeer globale gegevens uit de literatuur bekend.

## REFERENTIES

- [1] Bowen J.G., Fletcher E.R., Richmond D.R. Estimate of man's tolerance to the direct effects of air blast. Lovelace Foundation for Medical Education and Research, Albuquerque, New Mexico, 1968. DASA-2113.
- [2] Baker W.E., Cox P.A., Westine P.S., e.a. Explosion hazards and evaluation. Elseviers scientific publishing company, 1983.
- [3] Hirsch F.G. Effects of overpressure on the ear- a review. Annals of the New York Academy of Sciences, 1968.
- [4] White C.S, Jones R.K., Damon E.G. The biodynamics of airblast. Lovelace Foundation for Medical Education and Research, Albuquerque, New Mexico, 1971. DNA 2738T.
- [5] Lewis W.S., e.a. Jumpers Syndrom - The trauma of high, free-fall as seen at Harlem Hospital. J. Trauma, 5: 812 - 818, 1965
- [6] Fletcher E.R., Richmond D.R., Yelverton J.T. Glass fragment hazard from windows broken by airblast. Lovelace Biomedical and Environmental Research Institute, Albuquerque, New Mexico, 1980. DNA\*5593T.
- [7] Zaker T.A. Fragment and debris hazards. Department of Defense Explosive Safety Board, Washington D.C., 1975. DDESB TP12.
- [8] Merz H. A. Letalitatskriterien fur explosionen mit konventionellen Sprengstoff. Forschungsinstitut fur militarischen bautechnik, Zurich, 1976. FMB 76-10.
- [9] Fegulso L.E., Rathmann C.E. Effect of earth cover on far-field fragment distributions. Department of Defense Explosive Safety Board, Washington D.C., 1973. Minutes, 15th DDESB seminar.
- [10] Proctor T.D. A review of research relating to industrial helmet design. Journal of Occupational Accidents, 3: 259-272, 1982.
- [11] Blume J.A. Civil structures and earthquake safety. Interim report of the special subcommittee on the San Fernando earthquake study, 1971.
- [12] Glass R.J. e.a. Earthquake injuries related to housing in a Guatemalan village. Science, volume 197: 638-643, 1977
- [13] Clemedson C.J., Jönsson A. Effects of the frequency content in complex air shockwaves on lunginjuries in rabbits. Aviation, Space and Environmental Medicine: 1143-1152, November 1976.
- [14] Somes N.F. Abnormal loading on buildings and progressive collapse building practices for disaster mitigation.
-

- [15] Scenarios of buildings in given earthquake damage states. U.S. Department of Commerce, National Technical Information Service PB 80/150949, 1972.
- [16] Scenarios of buildings in given earthquake damage states. Revision I. U.S. Department of commerce, National Technical Information Service PB 80/106156, 1973.
- [17] Methoden voor het berekenen van de fysische effecten van het incidenteel vrijkomen van gevaarlijke stoffen. Directoraat Generaal van de Arbeid, 1979.
- [18] Nowee J. Dynamische bezwijkbelasting en scherfwerking van thermisch geharde glazen ruiten. PML 1985-C-103.
- [19] Axelsson, H en Yelverton, J.T. Chest wall velocity as a predictor of non-auditory blast injury in a complex wave environment. 7<sup>th</sup> International Symposium of Weapons Traumatology and Wound Ballistics, St. Petersburg, Russia, 20-23 September 1994.
- [20] Hadjipavlou, S. en Carr-Hill, G.; A review of the blast casualties rules applicable to UK houses, publ. 34/86, (London, Sci. Res. Dev. Branch, Home Office), 1986
- [21] PGS 2, Methods for the calculation of physical effects (het "Gele Boek"). (Voorheen CPR 14E, rapport van de Commissie Preventie van Rampen door gevaarlijke stoffen, Sdu Uitgevers, 3e editie 1997.)
- [22] R.M.M. van Wees, TNO Prins Maurits Laboratory; Update of Chapters 2 and 3 of the 'Green Book'; rapport PML 1999-C102, Version 2 (final), December 1999
-

## Lijst van gebruikte symbolen

A	: oppervlakte	[m <sup>2</sup> ]
A <sub>ch</sub>	: geschaalde oppervlak van een borstkas (0,082 m <sup>2</sup> * (m/70 kg) <sup>2/3</sup> )	[m <sup>2</sup> ]
a	: constante	
b	: constante	
C	: viskeuze weerstandcoëfficiënt	[Pa.s/m]
C <sub>D</sub>	: de 'drag'coëfficiënt	
c <sub>o</sub>	: snelheid van het geluid in stilstaande lucht (normaal rond de 340 m/s)	[m/s]
C <sub>5</sub>	: constante die gebruikt wordt om non-dimensionale waarden te krijgen	[Pa]
C <sub>9</sub>	: constante	[kg]
DLF	: dynamische belastingfactor	
f	: viskeuze weerstand van de huid	[Pa]
f <sub>o</sub>	: constante viskeuze weerstand	[Pa]
I	: fractie mensen die gewond raken	
i	: impuls van de op de mens uitgeoefende druk	[Pa.s]
$\bar{i}$	: geschaalde impuls i	[Pa <sup>1/2</sup> .s*kg <sup>-1/3</sup> ]
i <sub>m</sub>	: impuls van de meegesleurde mens	[Pa.s]
i <sub>s</sub>	: impuls van de aankomende druk- of schokgolf	[Pa.s]
IR	: fractie mensen die gewond raken ofwel 'injury rate'	[-]
J <sub>ch</sub>	: geschaalde druk op borstkas (696 Ns/m * (m/70 kg) <sup>2/3</sup> )	[Ns/m]
k <sub>ch</sub>	: geschaalde veerconstante van borstkas (989 N/m * (m/70 kg) <sup>2/3</sup> )	[N/m]
k	: vormfactor van een scherf	[kg/m <sup>3</sup> ]
LR	: fractie doden ofwel 'mortality rate'	[-]
m	: massa	[kg]
m <sub>ch</sub>	: geschaalde massa van borstkas (2,03 kg * (m/70 kg) <sup>2/3</sup> )	[kg]
P	: op de mens of constructie uitgeoefende piekoverdruk	[Pa]
P <sub>r</sub>	: gereflecteerde piekoverdruk	[Pa]
P(t)	: overdruk van een schokgolf als functie van de tijd	[Pa]
$\bar{P}$	: geschaalde piek overdruk	
Pr	: probit	
P <sub>s</sub>	: piekoverdruk in de aankomende druk- of schokgolf	[Pa]
P <sub>st</sub>	: statische sterkte van de ruit	Pa
p <sub>o</sub>	: atmosferische druk	[Pa]
p <sub>0,ref</sub>	: standaard atmosferische druk	[Pa]
Q	: dynamische druk of stuwdruk	[Pa]
S	: variabele	
t	: tijd	[s]
t <sub>p</sub>	: positieve faseduur	[s]
$\bar{t}$	: geschaalde positieve fase duur	[s]
u	: deeltjessnelheid	[m/s]
V	: variabele	
v	: snelheid	[m/s]
V <sub>ch</sub>	: geschaalde volume van de longen (1,82 * 10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup> * (m/70 kg) <sup>2/3</sup> )	[m <sup>3</sup> ]
y <sub>ch</sub>	: ratio van specifieke warmte voor longweefsel (1,2)	



$v_m$	: meesleursnelheid	[m/s]
$v_o$	: impactsnelheid van een scherf of brokstuk	[m/s]
$v_{50}$	: impactsnelheid waarbij 50% van de scherven penetreert	[m/s]
$x$	: maximale penetratiediepte	[m]
$x_{ch}$	: opschuiving van de borstkas (inwaards)	[m]
$\rho_o$	: luchtdichtheid bij atmosferische druk	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_1$	: luchtdichtheid in de schok- of drukgolf	[kg/m <sup>3</sup> ]

Bovenvoegsels:

$\bar{x}$	: geschaalde $x$
$x'$	: limietwaarde van $x$

---

## Bijlage I

### Probitfuncties

Met behulp van de probitfunctie:

$$Pr = a + b \cdot \ln V \quad (I-1)$$

waarin

Pr : de probit  
 a en b : constanten  
 V : een variabele

kan afhankelijk van de waarde van de variabele V een percentage worden bepaald dat de kans op een bepaalde gebeurtenis aangeeft.

In dit rapport is deze gebeurtenis in het algemeen het overlijden als gevolg van een van de explosie-effecten.

Het percentage dat bij een bepaalde waarde van de probit Pr behoort, volgt uit Tabel I-1:

**Tabel I-1. Relatie tussen kansen en probits.**

%	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	--	2,67	2,95	3,12	3,25	3,36	3,45	3,52	3,59	3,66
10	3,72	3,77	3,82	3,897	3,92	3,96	4,01	4,05	4,08	4,12
20	4,16	4,19	4,23	4,26	4,29	4,33	4,36	4,39	4,42	4,45
30	4,48	4,50	4,53	4,56	4,59	4,61	4,64	4,67	4,69	4,72
40	4,75	4,77	4,80	4,82	4,85	4,87	4,90	4,92	4,95	4,97
50	5,00	5,03	5,05	5,08	5,10	5,13	5,15	5,18	5,20	5,23
60	5,25	5,28	5,31	5,33	5,36	5,39	5,41	5,44	5,47	5,50
70	5,52	5,55	5,58	5,61	5,64	5,67	5,71	5,74	5,77	5,81
80	5,84	5,88	5,92	5,95	5,99	6,04	6,08	6,13	6,18	6,23
90	6,28	6,34	6,41	6,48	6,55	6,64	6,75	6,88	7,05	7,33
--	0,0	0,1	0,3	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
99	7,33	7,37	7,41	7,46	7,51	7,58	7,65	7,75	7,88	8,09

### I.1 Gehoorschade

De probitfunctie voor het bepalen van de kans op trommelvliesbreuk:

$$Pr = -12,9 + 1,54 * \ln \left( \frac{P_s}{C_5} \right) \quad (I-2)$$

is bepaald aan de hand van de in Tabel I-2 vermelde waarden.

**Tabel I-2 Kans op trommelvliesbreuk.**

Kans	$P_s$ (N/m <sup>2</sup> )
1%	$21,5 \cdot 10^3$
10%	$42,8 \cdot 10^3$
50%	$103,8 \cdot 10^3$
90%	$240,4 \cdot 10^3$

De constanten a en b zijn bepaald met de drukken behorende bij de 50% en 90% kansen.

### I-2 Primair letsel door blast (longschade)

De probitfunctie voor primair letsel door blast wordt afgeleid uit Figuur 3-2 (par. 3.1.1), welke weer is afgeleid van Bowen et al. [1968]. De 50% sterftecurve in Figuur 3-2 komt goed overeen met de volgende functie:

$$\bar{P} = 4,17 - 1,64 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{\ln(\bar{t})}{\bar{t}} + \frac{0,0161}{\bar{t}} \quad (I-3)$$

Nader onderzoek leert dat deze probitfunctie gebruikt is om Figuur 3-2 te tekenen. Na bestudering van de originele figuren in Bowen et al. [1968] blijkt dat de andere curves in Figuur 3-2 afgeleid zijn van de 50% curve met behulp van een vaste ratio in druk.

**Tabel II Ratio van druk die een gegeven kans op overlijden geeft tengevolge van de primaire explosie verwonding**

Kans op overlijden	Ratio van druk tot de druk die 50% kans geeft op overlijden	Probit
Drempel voor letsel	1/5	-
1%	1/1,5	2,68
10%	1/1,25	3,72
50%	1	5,00
90%	1,25	6,28
99%	1,5	7,33

De constanten in vergelijking 11 (par. 3.1.1) waren bepaald met behulp van lineaire regressie op basis van de data punten in Tabel II (zonder de verwondingsgrens).

### I-3. Meesleureffecten

Het bepalen van de meesleureffecten wordt gedaan met behulp van de maximale snelheid waarmee een mens door de explosiewind wordt meegesleurd.

Onderscheid wordt daarbij gemaakt tussen impact van het hoofd en impact van het gehele lichaam tegen een star voorwerp. Voor beide gevallen zal een probitfunctie worden afgeleid. Gebruik wordt gemaakt van de grafieken uit Figuur 4-2 en Figuur 4-3 en de getallen uit Tabel 4-1 en Tabel 4-2, waarbij aangehouden is dat het criterium: "bijna 100% kans" op overlijden, een kans van 99% betekent en dat het criterium "drempel", een kans van 1% betekent.

#### Impact gehele lichaam

Uitgegaan wordt van de lijn voor 50% overlijdenskans behorende bij een impactsnelheid van 16,5 m/s. Voor zeer grote waarden voor de impuls  $i_s$  nadert de druk  $P_s$  tot  $7,38 \cdot 10^3$  Pa.

Voor lage waarden voor de impuls  $i_s$  en drukken  $P_s$  kleiner dan  $0,9$  á  $0,5 \cdot 10^6$  Pa kan de lijn benaderd worden door  $P_s \cdot i_s = 1,3 \cdot 10^9$  Pa<sup>2</sup>.s. Wordt wederom gebruik gemaakt van een variabele S dan wordt deze bepaald door:

$$S = \frac{7,38 \cdot 10^3}{P_s} + \frac{1,3 \cdot 10^9}{P_s \cdot i_s} \quad (21)$$

Voor de overlijdenskansen 1%, 50% en 99% krijgt S een gemiddelde waarde van respectievelijk 2,57; 1 en 0,38. Hiermee kunnen de constanten a en b voor de probitfunctie worden bepaald.

Er volgt:

$$\text{Pr} = 5 - 2,44 \cdot \ln S \quad (20)$$

met S bepaald volgens (21) en geldend voor drukken  $P_s$  kleiner dan  $0,4$  á  $0,5 \cdot 10^6$  Pa.

#### Impact op het hoofd

Voor zeer grote waarden voor de impuls  $i_s$ , nadert de druk  $P_s$  behorende bij een impactsnelheid van 5,5 m/s naar  $2,43 \cdot 10^3$  Pa. Voor lage impuls en drukken kleiner dan  $0,4$  á  $0,5 \cdot 10^6$  Pa geldt  $P_s \cdot i_s$  is ongeveer  $4 \cdot 10^8$  Pa<sup>2</sup>.s, zodat S bepaald wordt door:

$$S = \frac{2,43 \cdot 10^3}{P_s} + \frac{4 \cdot 10^8}{P_s \cdot i_s} \quad (19)$$

De gemiddelde waarden voor S voor de kansen 1% en 99% zijn resp. 1,45 en 0,80. Hieruit volgt:

$$\text{Pr} = 5 - 8,49 \cdot \ln S \quad (18)$$

Met S volgens (19) en geldend voor drukken  $P_s$  kleiner dan  $0,4$  á  $0,5 \cdot 10^6$  Pa.

---

#### I-4 Brokstukken en scherven

Voor het bepalen van de probitfunctie wordt gebruik gemaakt van Figuur 5-4. Het blijkt niet mogelijk te zijn om tot één algemene probitfunctie voor de uitwerking van scherven en brokstukken te komen. Daarom zal voor ieder van de drie gebieden voor de fragmentmassa's waar een criterium maatgevend is, een probitfunctie worden bepaald. Uitgaande van het criterium: "schedelbasisfractuur" worden de probitfuncties zodanig bepaald dat deze op elkaar aansluiten.

##### $m > 4,5$ kg:

Voor de impact van een brokstuk tegen het menselijk hoofd wordt voor de variabele  $V$  in (I-1) de impactsnelheid  $v_o$  aangehouden.

De impactsnelheid  $v_o$  waarbij 1% schedelbasisfractuur optreedt bedraagt 4,5 m/s. Bij een overlijdenskans van 99% hoort een snelheid  $v_o$  van 7,0 m/s.

De probitfuncties voor fragmentmassa's groter dan 4,5 kg wordt bepaald door:

$$P_s = -13,19 + 10,54 \cdot \ln v_o \quad (27)$$

##### $0,1 < m < 4,5$ kg

Het criterium voor de impact van een brokstuk wordt bepaald door de kinetische energie. Voor de hand ligt dan ook om voor de variabele  $V$  in (Bijlage I-1) de kinetische energie  $\frac{1}{2}m \cdot v_o^2$  te gebruiken. Om aansluiting te krijgen met de probitfunctie voor schedelbasisfractuur voor een fragmentmassa van 4,5 kg moet voor de overlijdenskansen 1%, 50% en 99%, waarden van de kinetische energie worden aangehouden van respectievelijk 46,71 en 110 J. Deze waarden komen op bevredigende wijze overeen met de gegeven criteria voor brokstukken. Voor fragmentmassa's tussen 0,1 en 4,5 kg kan de volgende probitfunctie worden bepaald:

$$P_r = -17,56 + 5,30 \cdot \ln (\frac{1}{2}m \cdot v_o^2) \quad (28)$$

##### $m < 0,1$ kg

De in Figuur 5-4 gegeven lijnen voor scherven behoren allen bij een snelheid waarbij 50% van de bepaalde scherf penetreert. Om aansluiting te krijgen met de 50% waarde voor brokstukken moet de fragmentsnelheid bij een massa van 0,1 kg gelijk zijn aan 37,7 m/s. De  $v_{50}$  voor een scherf met een massa  $m$  van 0,01 kg en  $K = 2370$  is gelijk aan 37,1 m/s. Deze waarden blijken goed overeen te stemmen.

Een lijn evenwijdig aan de criteria voor scherven met een massa tussen 0,001 en 0,1 kg wordt gegeven door:

$$S = m \cdot v_o^{5,115} \quad (30)$$

Voor de 1%, 50% en 99% waarden van  $S$  geldt respectievelijk:

$$S = 3,78 \cdot 10^6; 11,55 \cdot 10^6 \text{ en } 35,32 \cdot 10^6.$$

De probitfunctie die hiermee bepaald wordt is:

$$P_r = -29,15 + 2,1 \cdot \ln S \quad (29)$$

---

en is geldig voor scherfmassa's tussen 0,001 kg en 0,1 kg.

### I-5 Glasscherven

Uit experimenten waarbij de gereflecteerde piekoverdruk van de schokgolf een factor twee groter was dan de dynamische bezwijkbelasting van de beproefde ruiten bleek dat op 1,75 m achter de ruit een kans op schedelbreuk bestond van 94% [18]. Afhankelijk van de ruitafmetingen kan de statische bezwijkbelasting  $P_{st}$  worden berekend. Afhankelijk van de verhouding fase-duur van de belasting en de eigentrillingstijd van de ruit wordt een dynamische belastingfactor (DLF, dynamic load factor) berekend ( $P_{st}$  en DLF te berekenen met behulp van gegevens uit deel 2B "Effecten van explosie op constructies"). De dynamische bezwijkbelasting is gelijk aan  $P_{st}/DLF$ .

De op de ruit uitgeoefende belasting  $P$  wordt eveneens bepaald met behulp van gegevens uit deel 2B "Effecten van explosie op constructies". Uit [18] bleek 94% kans op schedelbreuk voor

$$\frac{P}{\left(\frac{P_{st}}{DLF}\right)} = 2$$

Indien wordt aangenomen dat 1% schedelbreuk optreedt bij

$$\frac{P}{\left(\frac{P_{st}}{DLF}\right)} = 1$$

ervan uitgaande dat de mens ten gevolge van de schedelbreuk zal overlijden is de volgende probit-functie afgeleid:

$$Pr = 2,67 + 3,38 * \ln \frac{DLF * P}{P_{st}} \quad (32)$$

waarmee de kans op overlijden kan worden bepaald voor een persoon die zich op 1,75 m achter de ruit bevindt en die aan het hoofd wordt getroffen.

In deel 2B "Effecten van explosie op constructies" wordt de kans gegeven op het falen van een raam met een willekeurige grootte en oriëntatie. Dit is afgeleid in Bijlage IV van dat deel. Wanneer een raam faalt moet zijn statische faaldruk gelijk zijn geweest aan de piekoverdruk gedeeld door de dynamische belastingsfactor:  $\frac{P}{(P_{st} * DLF)} = 1$ . Dit betekent dat de drukken waarbij  $\frac{P}{(P_{st} * DLF)} = 2$  twee keer zo groot zijn als bij  $\frac{P}{(P_{st} * DLF)} = 1$ . In Tabel III staan de kansen voor deze drukken.

**Tabel III Kans op het falen van het raam en schedelletsel door de impact van glasscherven**

Piekoverdruk [kPa]	$\frac{P}{(P_{st} * DLF)}$	Kans (%)	Kans op schedelletsel (%)	Totale kans op sterfte (%)
2	1	1	1	$1 * 10^{-4}$
4	2	1	94	0,94
5	1	50	1	0,5
10	2	50	94	47

Er kan een probitfunctie afgeleid worden uit deze punten met behulp van een lineaire fit. Deze functie luidt als volgt:

$$Pr = -15,7 + 2,20 * \ln\left(\frac{P_s}{C_s}\right) \quad (33)$$

## Bijlage II Nauwkeurigheid van modellen voor bepaling van uitwerking van explosies op mensen

Voor de uitwerking van explosies op mensen zijn probitfuncties opgesteld voor het bepalen van de kans op overlijden ten gevolge van:

1. longschade (10) en (11)
2. impact op het hoofd (17) en (18)
3. impact op het gehele lichaam (19) en (20)
4. impact door scherven en brokstukken (26) t/m (30)

Ook is een probitfunctie opgesteld voor het bepalen van de kans op gehoorschade.

### 1. Longschade

Parameters in de probitfunctie zijn enerzijds de druk en impuls die door de blast op het lichaam wordt uitgeoefend en anderzijds de massa van het lichaam.

In de druk en impuls die in rekening moeten worden gebracht zijn: reflectie en omstroming reeds ingecalculleerd.

De nauwkeurigheid waarmee de druk of impuls worden bepaald ter plaatse van de positie van een object (mens of constructie) is moeilijk te bepalen. Uitgegaan wordt van ideale situaties waarbij de blast zich ongestoord kan voortplanten. Zelfs dan kunnen er aanzienlijke variaties in de voorspellingen optreden. Er zijn diverse diagrammen bekend waarmee voor de explosie van springstoffen de druk op een bepaalde afstand kan worden bepaald. Onderlinge verschillen van 50% kunnen optreden.

Het druk-impuls-diagram van longschade is opgesteld met behulp van dierproeven. Variatie in proefresultaten is niet bekend. Bij de mogelijke druk-impuls-combinaties is een drukgebied te onderscheiden, waar de druk maatgevend is voor de uitwerking en een impulsgebied, waar de impuls maatgevend is. Het impulsgebied wordt begrensd door  $\bar{P} > 20$  en het drukgebied wordt begrensd door

$$\bar{i} > 10 \frac{Pa^{\frac{1}{2}}s}{kg^{\frac{1}{3}}}$$

De drukafhankelijkheid van de kans op overlijden in het drukgebied wordt gegeven door:

Kans (%)	$\bar{P}$
10	3,4
50	4,2
90	5,4

De impulsafhankelijkheid van de kans op overlijden in het impulsgebied wordt gegeven door:

kans (%)	$\bar{i}$
10	1,1
50	1,3
90	1,7

De massa van het lichaam heeft alleen invloed op de geschaalde impuls en de invloed is dan ook het



grootst in het impulsgebied. Een variatie van de massa van 10 kg t.o.v. 70 kg doet de geschaalde impuls variëren met  $\pm 5\%$ .

De geschaalde impuls voor 50% schade varieert dan tussen 1,24 en 1,37 waardoor de kans op overlijden varieert van 39 tot 62%. Hierbij moet worden opgemerkt dat het criterium is afgeleid voor schokgolven. Bij gasexplosies zullen drukgolven ontstaan. De effecten zullen minder zijn.

## 2. Impact op het hoofd

Afhankelijk van de piekoverdruk en impuls van de ongestoorde blast wordt de maximale snelheid bepaald waarmee het hoofd tegen een obstakel botst. Over de onbekendheid van variatie in druk en impuls is in het bovenstaande al ingegaan. De nauwkeurigheid van de snelheidsbepaling is niet bekend. Ook de variatie in proefresultaten is niet bekend.

Bij de probitfunctie zijn geen druk- of impulsgebieden aan te geven. Om de invloed van variatie in druk en impuls aan te geven wordt uitgegaan van een overdruk van  $5 \cdot 10^4$  Pa en een impuls van  $8 \cdot 10^3$  Pa.s. De kans op overlijden bedraagt 35%. Een variatie van de druk met 25% varieert de kans tussen 1 en 56%. Een variatie in de impuls van 25%, varieert de kans tussen 1 en 92%.

## 3. Impact op het gehele lichaam

De onzekerheden genoemd in de voorgaande paragraaf gelden ook hier. Alleen in de variatie van de kans op overlijden bij een bepaalde impactsnelheid geeft Figuur 4-1 enig inzicht. De variatie blijkt groot. De combinatie van een druk  $5 \cdot 10^4$  Pa en een impuls van  $2 \cdot 10^4$  Pa.s levert een kans op overlijden van 18%. Een variatie in druk van 25% varieert de kans van 5 tot 37%. Een variatie in impuls van 25%, varieert de kans tussen 6 en 34%.

## 4. Impact door scherven en brokstukken

Voor de uitwerking van impact van scherven en brokstukken tegen het lichaam zijn drie probitfuncties afgeleid (26 t/m 30). De kans op overlijden hangt daarbij af van de massa en snelheid van het brokstuk. Alleen voor uitwerking van scherven is de spreiding in proefresultaten bekend (Figuur 5-2). Een spreiding van 10 à 15% in de  $v_{50}$  blijkt op te treden. De volgende tabel geeft een voorbeeld van de invloed van een spreiding van 15% in de trefsneldheid voor de probitfunctie voor massa's tussen 0,001 en 0,1 kg (29) en (30).

m(kg)	v (m/s)	kans (%)
0,01	60	50
	69	95
	51	6
0,05	45	67
	52	98
	38	9

Van de overige twee probitfuncties is weinig over de gevoeligheid van proefresultaten te vermelden daar deze op grond van zeer globale criteria zijn opgesteld. Om toch enig inzicht in de gevoeligheid te verkrijgen is uitgegaan van een spreiding van 15% in de trefsneldheid. Een kans van 50% op overlijden na getroffen te zijn door een brokstuk van 1 kg bestaat indien dat brokstuk een snelheid heeft van 11,9

---

m/s. Een snelheidsvariatie van 15% varieert de kans van 5% tot 93%.

Een snelheidsvariatie van 15% heeft voor brokstukken met een massa groter dan 4,5 kg de volgende invloed. Een overlijdenskans van 50% bestaat bij een trefsnelheid van 5,6 m/s. Is de snelheid 6,5 m/s dan bedraagt de kans 99% en indien de snelheid 4,8 m/s bedraagt is de kans 4%.

#### 5. Gehoorschade

De kans op trommelvliesbreuk hangt alleen af van de overdruk (Figuur 3-6 Trommelvliesbreuk als functie van de overdruk, ref. [3].). In de figuur staat geen spreiding aangegeven. Een kans van 50% bestaat bij een druk van ongeveer  $10^5$  Pa. Een verdubbeling of halvering van deze druk verandert de kans tot 84% en 13%.

### Bijlage III Probitfuncties voor diverse letselsoorten

De probitfunctie voor dodelijke verwondingen door primaire effecten schokgolf is:

$$\text{Pr} = 5,0 + 5,7 * \ln V \quad (11a) \quad V = \frac{\bar{P}}{4,17 - 1,64 * 10^{-3} * \frac{\ln(\bar{t})}{\bar{t}} + \frac{0,0161}{\bar{t}}} \quad (11b)$$

De probitfunctie voor trommelvliesbreuk is:

$$\text{Pr} = -12,9 + 1,54 * \ln\left(\frac{P_s}{C_5}\right) \quad C_5 = 1 \text{ Pa} \quad (12)$$

De probitfunctie voor overlijden na impact hoofd is: ( $P_s < 5 * 10^5 \text{ Pa}$ )

$$\text{Pr} = 5,0 - 8,49 * \ln S \quad (17) \quad S = \frac{2,43 * 10^3}{P_s} + \frac{4 * 10^8}{P_s * l_s} \quad (18)$$

De probitfunctie voor overlijden na impact lichaam is:

$$\text{Pr} = 5,0 - 2,44 * \ln S \quad (19) \quad S = \frac{7,38 * 10^3}{P_s} + \frac{1,3 * 10^9}{P_s * l_s} \quad (20)$$

De probitfunctie voor overlijden door brokstukken is:

$$m > 4,5 \text{ kg} \quad \text{Pr} = -13,19 + 10,54 * \ln v_o \quad (26)$$

$$0,1 < m < 4,5 \text{ kg} \quad \text{Pr} = -17,56 + 5,30 * \ln S \quad (27) \quad S = \frac{1}{2} m * v_o^2 \quad (28)$$

$$0,001 < m < 0,1 \text{ kg} \quad \text{Pr} = -29,15 + 2,10 * \ln S \quad (29) \quad S = m * v_o^{5,115} \quad (30)$$

De probitfunctie voor overlijden aan schedelbasisfractuur veroorzaakt door glasscherven is:

$$\text{(positie achter ruit)} \quad \text{Pr} = 2,67 + 3,38 * \ln\left(\frac{DLF * P}{P_{st}}\right) \quad (31)$$

De probitfunctie voor overlijden door glasscherven veroorzaakt door drukgolf is:

$$\text{(schatting raakkans ~ 5\%)} \quad \text{Pr} = -15,7 + 2,20 * \ln\left(\frac{P_s}{C_5}\right) \quad C_5 = 1 \text{ Pa} \quad (32)$$