Explosies: Oorzaak en Gevolg

AGS module Explosieven

Dr. **Brecht Egle**

Begle@its.jnj.com

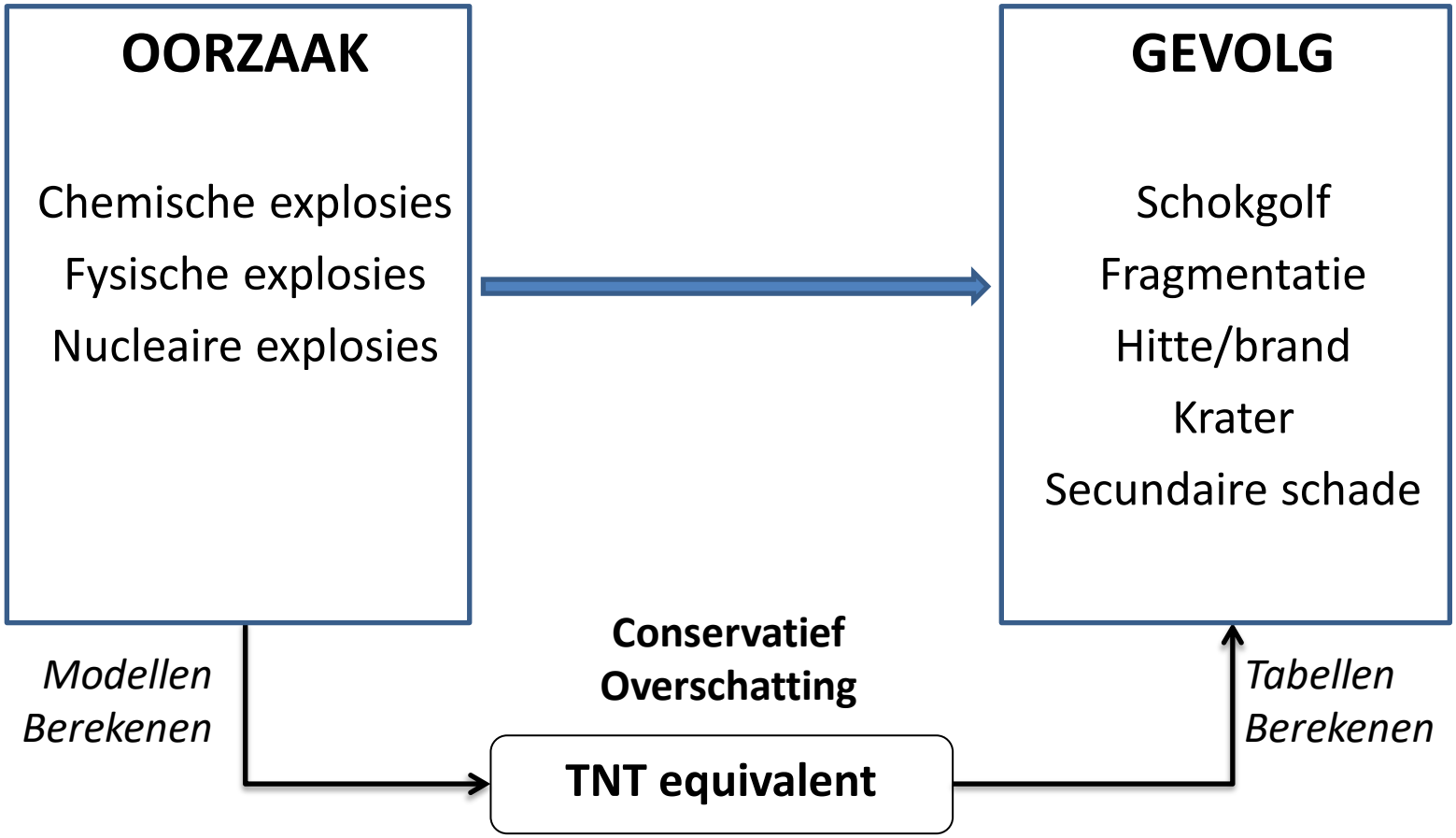
Brecht@live.com

April 2022

Inhoud Cursus

1. Inleiding
2. Oorzaken
3. Effecten

Koppeling Oorzaak – Gevolg: het TNT model



Deel 3:
Effecten

Gevolgen van Explosies

R

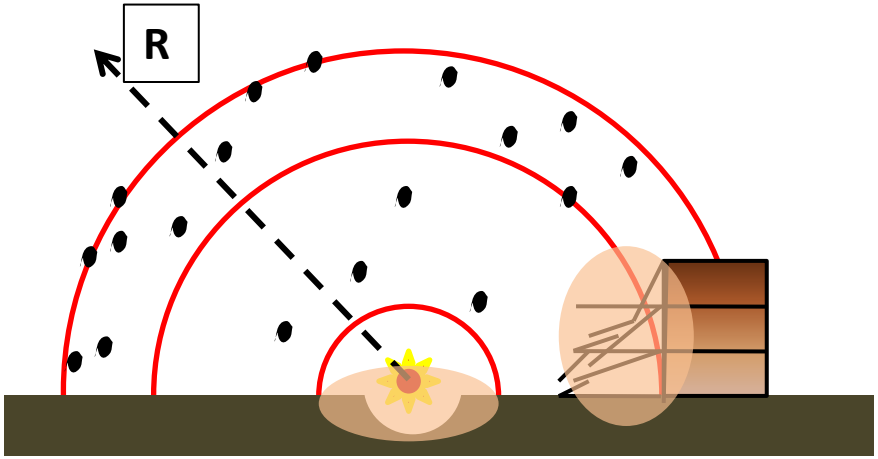
- *Krater*
- *Hitte/brand*
- *Schokgolf*
- *Fragmentatie*
- *Secundaire schade*
- (*Penetratie*)













Hopkinson-Cranz schaling

Effecten van explosies schalen d.m.v. **schalingsfactor Z** (dimensie: $m/kg^{1/3}$):

$$Z = \frac{R}{\sqrt[3]{M}}$$ *Met R = afstand (m), M = massa TNT (kg)*

- Effect op **dubbele afstand** → 2^3= **8 x meer explosief** nodig

Z factor gekend voor bepaald effect: afstand berekenen voor iedere hoeveelheid explosief

$$R_{effect} = Z \times \sqrt[3]{M}$$

Wordt veel gebruikt (aka: K-factor, correlatieconstante, ...)

Explosie grondoppervlak vs in lucht!

Let op eenheden!!

3. Explosies: Effecten

3.1 Kratervorming en Aardschok

3.2 Hitte en Vuur

3.3 Schokgolf

3.4 Fragmentatie

3.5 Shaped Charges (penetratie)

3.6 Secundaire schade

3.7 Impact op objecten

3.8 Impact op mensen

3.9 Richtlijnen zware explosies

Voorbeeldberekening schadestralen

3. Explosies: Effecten

3.1 Kratervorming en Aardschok

3.2 Hitte en Vuur

3.3 Schokgolf

3.4 Fragmentatie

3.5 Shaped Charges (penetratie)

3.6 Secundaire schade

3.7 Impact op objecten

3.8 Impact op mensen

3.9 Richtlijnen zware explosies

Voorbeeldberekening schadestralen

3.1 Kratervorming en Aardschok

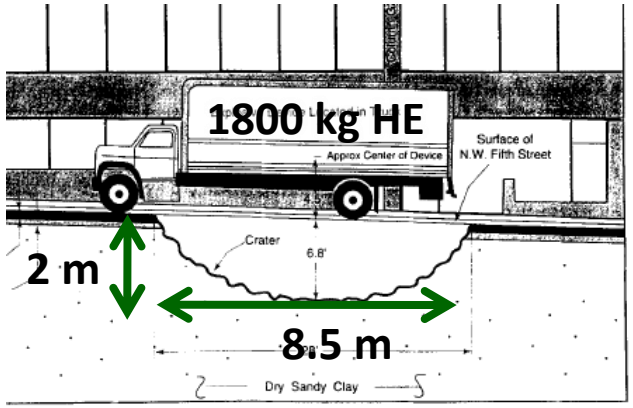
Explosie op/onder aardoppervlak

Schokgolf + explosiegassen dringen grond binnen: stoten materiaal omhoog

Zelden bij volumetrische explosies

$$D = 0.8 \times \sqrt[3]{M}$$
$$Diepte = 0.25 \times \mathrm{D}$$

Met D *= diameter krater (m), M = massa TNT (kg)*



Afhankelijk van: grondtype, **HOB** (hoogte explosie)

- HOB = 0 m → ±33 % energie in grond ; HOB = 2.5 r → ±1 % in grond

Veilige diepte om een explosief in te graven:

$$DOB = \frac{M^{7/24}}{0.417}$$

Met DOB = diepte explosie (m), M = massa TNT (kg)

3.2 Hitte en Vuur

Temperatuur in vuurbal van gecondenseerde explosie ≈ 3000°C

Afterburn: nabranden explosieproducten

Diameter vuurbal (gecondenseerde explosieven):

$$D = 3.5 \times \sqrt[3]{M}$$

$$t_d = 0.3 \times \sqrt[3]{M}$$

Met D = diameter vuurbal (m), M = massa TNT (kg),
t_d = duurtijd vuurbal (s)

Mogelijk secundaire branden:

$$R = 15 \times \sqrt[3]{M}$$

Met R = afstand (m), M = massa TNT (kg)



3.2 Hitte en Vuur

BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion)

Vuurbal:

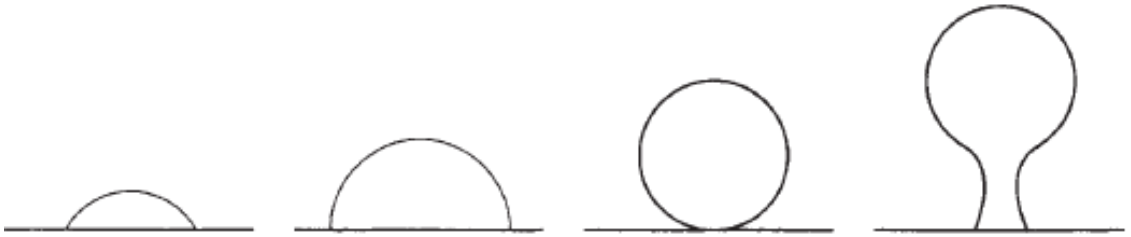
- Ontbranden brandstof
- Model van Roberts (KWS):

$$R = 3 \times M^{0.33}$$

$$t_d = 0.49 \times M^{0.32}$$

Met R = straal vuurbal (m), M = massa brandstof (kg), t_d = duurtijd (s)

- Secundaire branden: **2 x R**
- 2/3^e graads brandwonden: **3 x R**



3. Explosies: Effecten

3.1 Kratervorming en Aardschok

3.2 Hitte en Vuur

3.3 Schokgolf

3.4 Fragmentatie

3.5 Shaped Charges (penetratie)

3.6 Secundaire schade

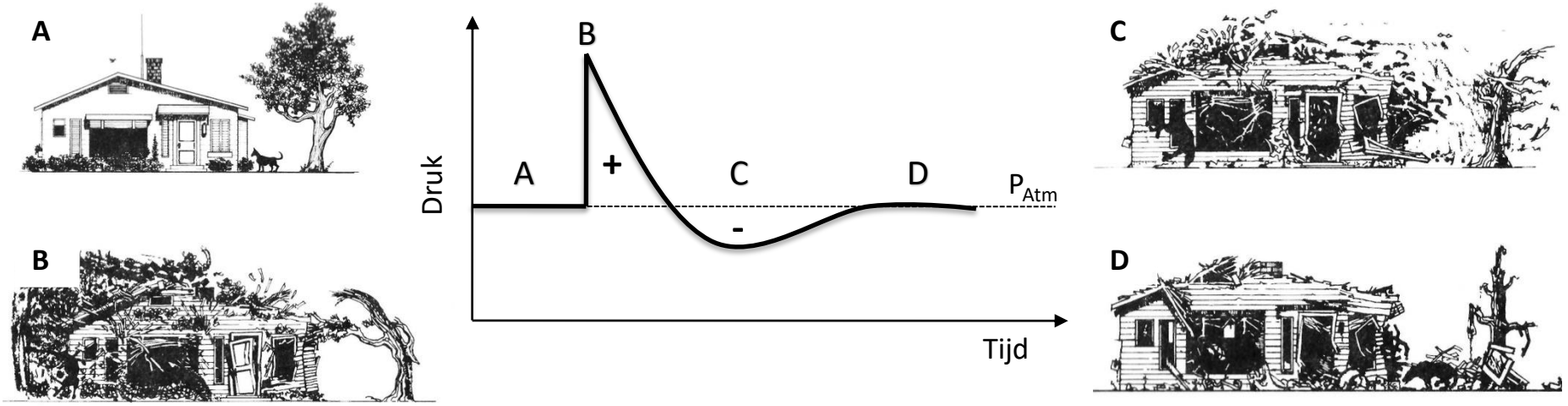
3.7 Impact op objecten

3.8 Impact op mensen

3.9 Richtlijnen zware explosies

Voorbeeldberekening schadestralen

3.3 Schokgolf



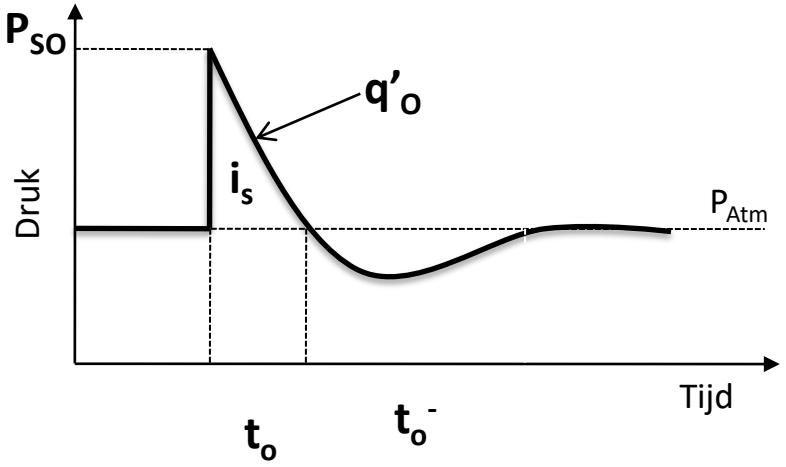
A: Beginsituatie, atmosferische druk (P_{atm})

B: Schokgolf (*positieve fase*) → Schokfront (**slageffect**) + luchtstoot (**duwend effect**)

C: Onderdruk (*negatieve fase*) → Lage drukgebied (**trekkend effect**)

D: Atmosferische druk

3.3 Schokgolf



P_{SO}: Piekoverdruk schokgolf

t_o: Duurtijd positieve fase

i_s: Specifieke impuls positieve fase

t_o^-: Duurtijd negatieve fase

q'_o: Dynamische overdruk

Vooral piekoverdruk (P_{SO}) en specifieke impuls (i_s) bepalen schade

3.3 Schokgolf

Schokgolf:

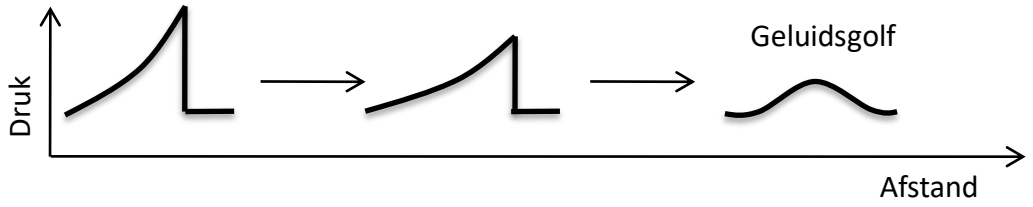
Discontinue (*zeer* snelle) drukstijging

2 interagerende schokgolven: **totale druk > som schokgolven**

Reflecteren bij raken objecten (druk ↑)

Deeltjes achter schokfront bewegen trager:

- achterkant schokgolf “smeert” uit → Ontspanningsgolf
- Doet schokgolf uiteindelijk afnemen tot geluidsgolf



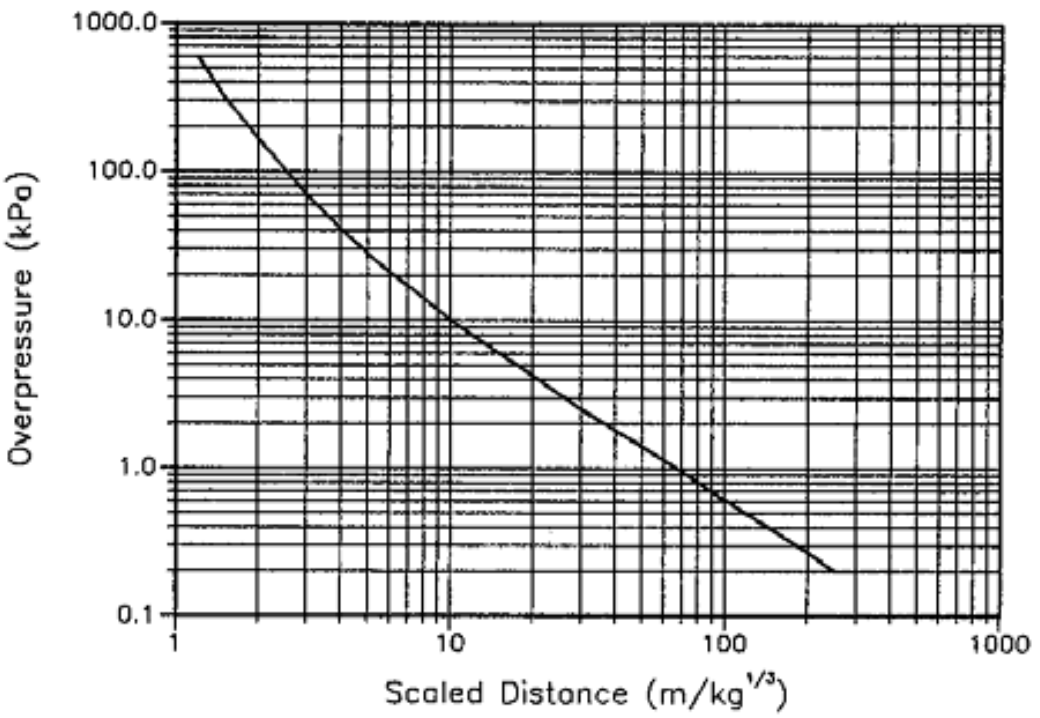
3.3 Schokgolf

Explosie in lucht

Explosie boven grondoppervlak: schokgolf naar alle richtingen (+- sferisch)

Schokgolf overdrukken: tot ~500 bar

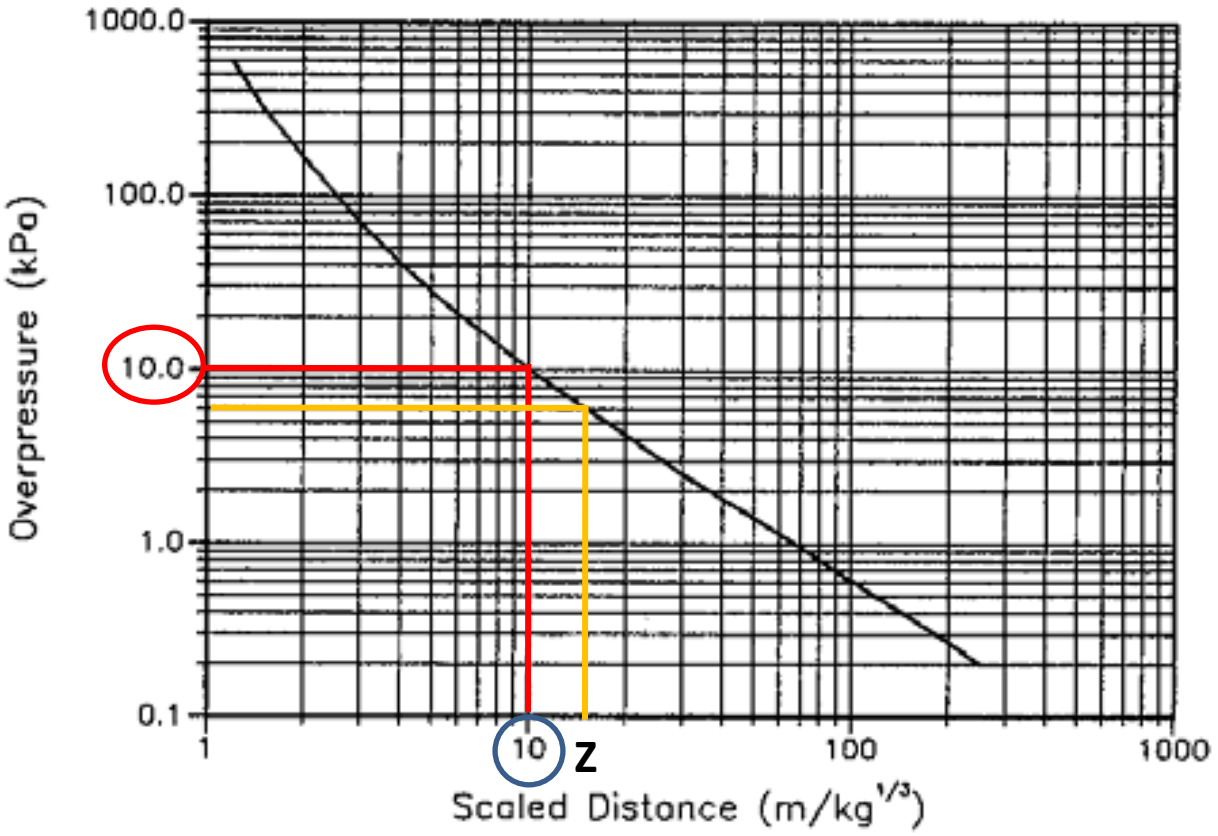
Schalen van piekoverdruk/impuls: Hopkinson-Cranz



3.3 Schokgolf

Explosie in lucht

Voorbeeld: Overdruk van explosie 1000 kg TNT in lucht op 100 m afstand?



$$Z = \frac{R}{\sqrt[3]{M}}$$

- **Z** = 100 / $(1000)^{1/3}$ = 10
- Uit grafiek:

  P_{so} = 10.0 kPa = 0.1 bar

Let op: logaritmische schaal

(Z=15 → 6 kPa)

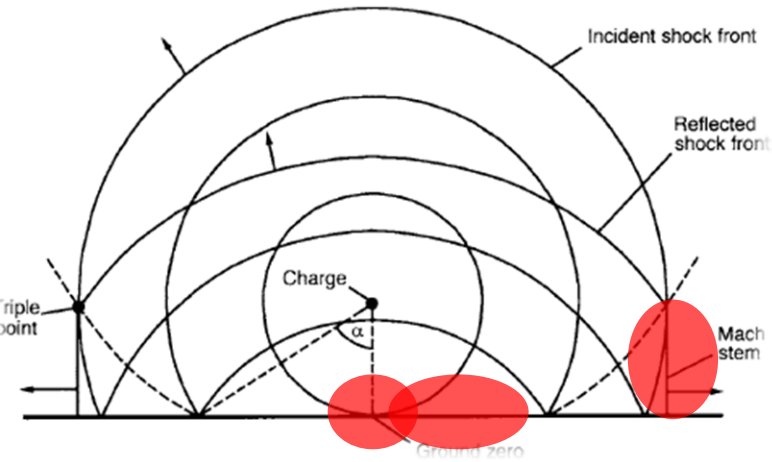
3.3 Schokgolf

Explosie in lucht

Als schokgolf object raakt: **reflectie** + **amplificatie**

Druk **verhoogt** bij reflectie, afhankelijk van oorspronkelijke druk en invalshoek

= Gereflecteerde overdruk $\mathbf{P_r}$ (> P_{SO})

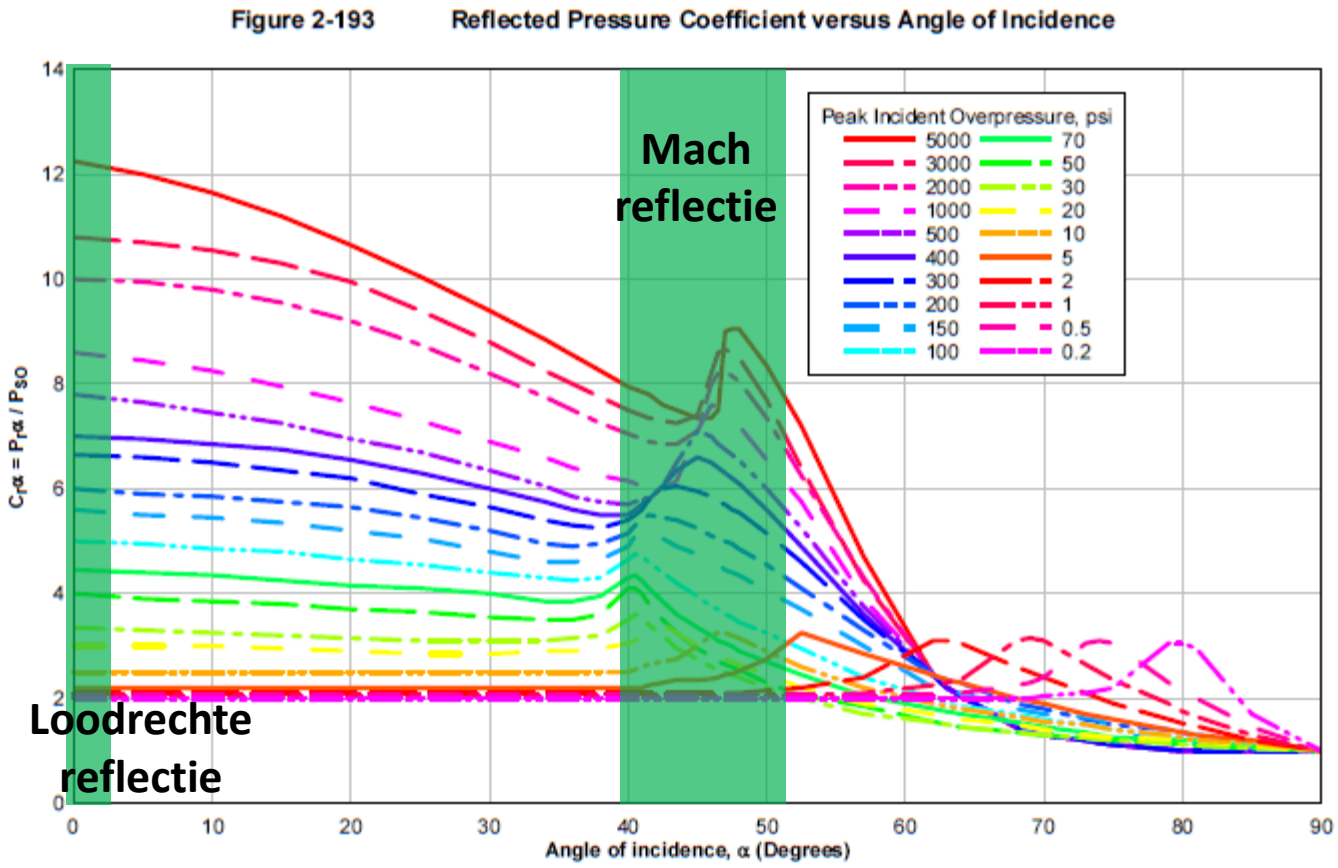


- *Loodrechte inval*: P_r tot 8 x P_{SO} (ideaal gas, realiteit tot 20 x P_{SO})
- *Kleinere invalshoek:* P_r kleiner dan bij loodrechte inval (wel nog > P_{SO})
- *Hoek 45-55°*: **Mach reflectie**: bijna **verticaal schokfront** gecreëert met **hoge P_r**
- *Parallel met oppervlak*: geen reflectie

3.3 Schokgolf

Explosie in lucht

Gereflecteerde overdruk vs invalshoek



3.3 Schokgolf

Explosie op grondoppervlak

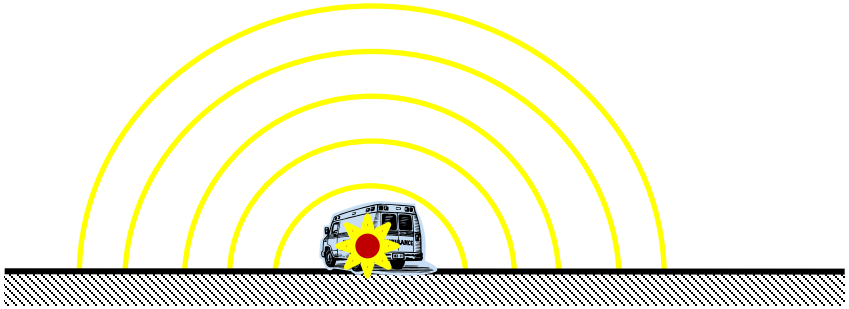
Energie gefocuseert in hemisfeer (weerkaatsing)

→ **Amplificatie explosiesterkte!**

Idem als explosie in lucht maar **massa explosie wordt dubbel geteld**

Realiteit: deel energie in grond ter vorming van een krater + aardschok

Geen Mach reflectie op oppervlak





3.3 Schokgolf

Interne explosie





Explosie in gebouw, tunnel of andere ingesloten ruimte

Of schokgolf van buitenaf die structuur binnendringt

Schokgolf reflecteert en herreflecteert op wanden: serie pulsen

Explosiegassen + opgewarmde lucht kan niet snel weg → Druk ↑

- Hoe kleiner vrije volume kamer, hoe hoger druk

Druk ontspant door *venting* + afkoelen gassen

- Via openingen + kwetsbare elementen van structuur
- Groter openingsoppervlak: snellere drukafname, lagere P_{max}
- Uittredende schokgolf: gefocuseerd + fragmentatie mogelijk

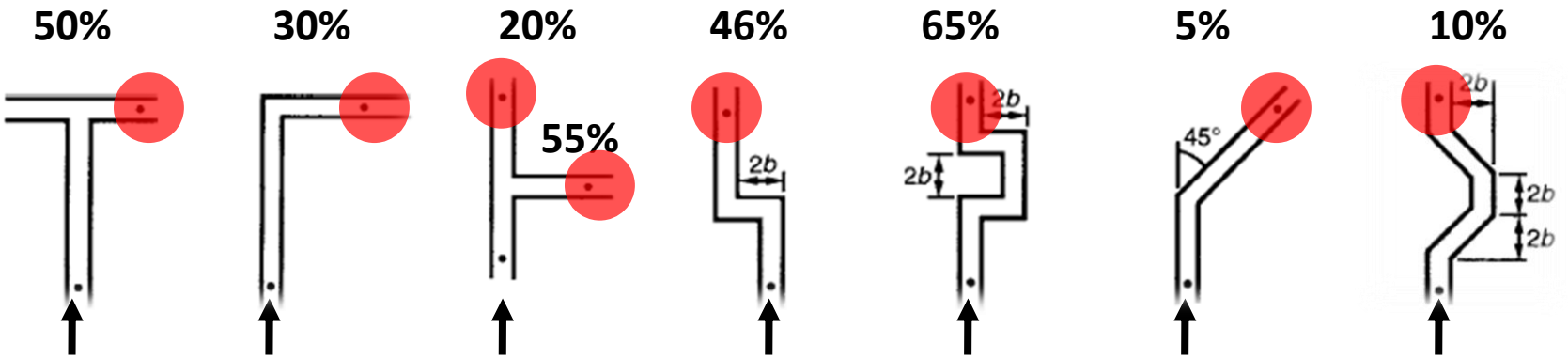
3.3 Schokgolf

Interne explosie

T**unnels/gangen of straten met hoge gebouwen**:

- Smaller: hogere drukken
- Schokgolf sterft trager uit: verder bereik
- Hoge overdrukken in bochten (reflectie)

Reductie overdruk (%) na doorgang schokgolf door splitsing/bochten:



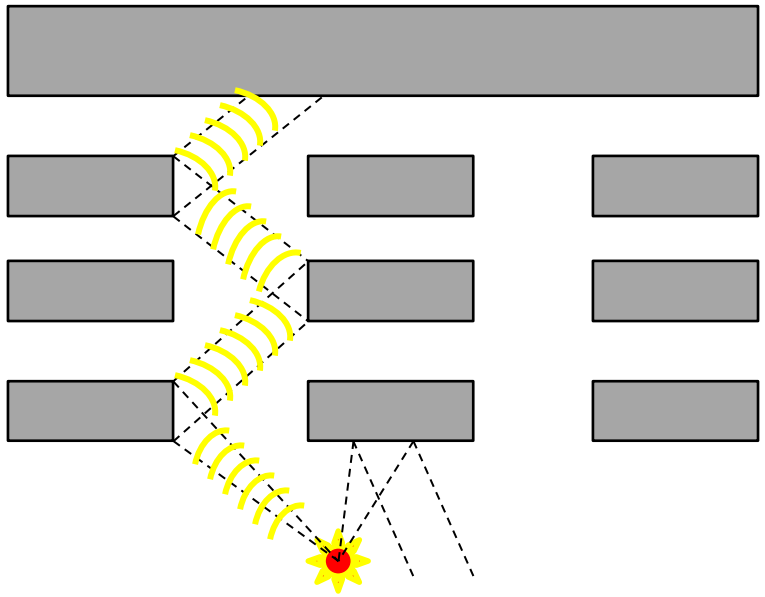
Gladde wanden: minder drukreductie.

3.3 Schokgolf

Interne explosie

Explosies in **stadsomgeving**:

- Smalle straten sluiten explosie in: schokgolf sterft veel trager uit
- Reflectie van gebouwen: schokgolf propageert door straten
- Gebouwen kunnen optreden als barrières



3.3 Schokgolf

Interne volumetrische explosie

Bij **interne damp- of stofexplosie:** P stijgt trager (deflagratie)

Belangrijke parameters:

- **P_{max}**: Maximale explosiedruk over hele conc. domein
- **K_g** (gas/damp) of **K_{st}** (stof)

$$\frac{dP}{dt} = \frac{K}{\sqrt[3]{V}}$$

Met P = druk, t = tijd, K = explosieconstante, V = vrij volume

- Kleiner vrije volume: snellere drukstijging

Gassen explosie kunnen moeilijker ontsnappen: mogelijke opbouw toxische gassen (CO,NOx…)

3.3 Schokgolf

Schade interne gecondenseerde vs volumetrische explosie



Gasexplosie



Gecondenseerde explosie

3.3 Schokgolf

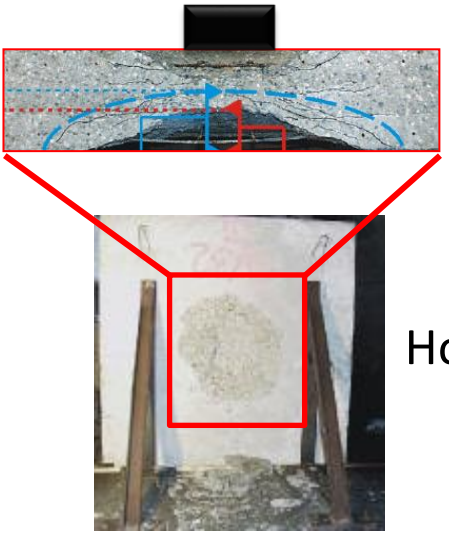
Contactexplosie

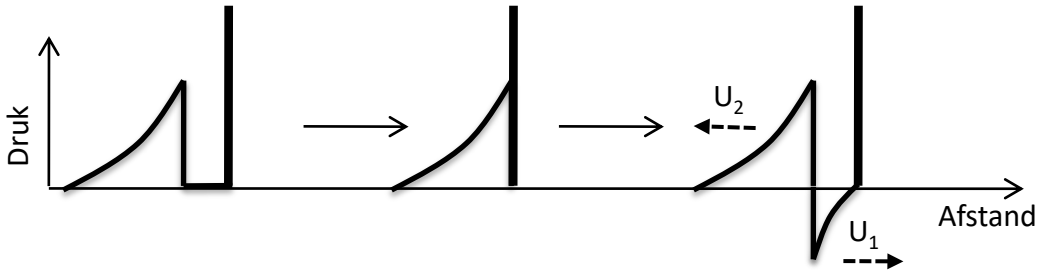
Explosief in **direct contact** met object

Schokgolf niet via lucht doorgegeven → veel hogere drukken (~100.000 bar)

Zeer destructief voor getroffen object

Schokgolf bereikt vrij oppervlakte : **afsplintering** → gevaarlijke fragmenten







Hoe beter insluiting, hoe meer energie getransfereerd naar object:



3.3 Schokgolf

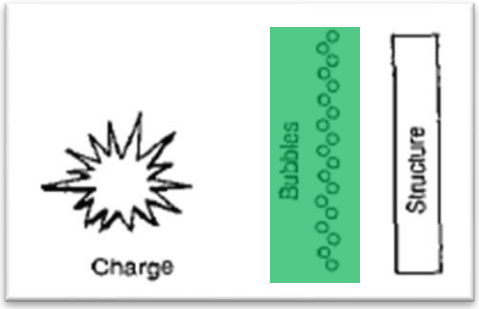
Onderwater Explosies

Water: minder samendrukbaar als lucht → **Hogere P_{max}**

Fragmenten ondervinden meer weerstand van water: minder gevaarlijk

Schokgolf:

- Zelfde gedrag als in lucht, maar hogere drukken
- Bij bereiken opp. water: veel zwakkere schokgolf
- Reflectie van bodem watermassa
- Bescherming onderwaterstructuren: luchtbellenscherm



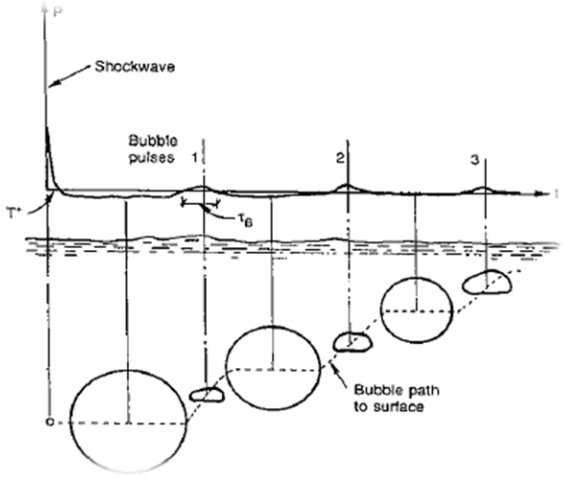
3.3 Schokgolf

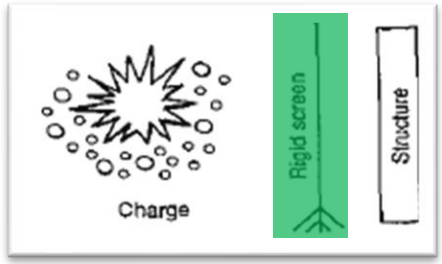
Onderwater Explosies



Gasbelpuls:

- Expanderende gassen explosie creëren gasbel onderwater
- Gasbel expandeert en krimpt dan door druk water, krimpen verhoogt druk in bel weer: expansie, terug krimpen, enz. → **Verschillende drukpulsen na elkaar**
- Bescherming: explosieschermen





Vooral schadelijk voor objecten onderwater, doelwitten op het wateroppervlak (boten e.d.) minder aangetast, tenzij ze in direct contact komen met gasbel

→ waterjet gevormd

3. Explosies: Effecten

3.1 Kratervorming en Aardschok

3.2 Hitte en Vuur

3.3 Schokgolf

3.4 Fragmentatie

3.5 Shaped Charges (penetratie)

3.6 Secundaire schade

3.7 Impact op objecten

3.8 Impact op mensen

3.9 Richtlijnen zware explosies

Voorbeeldberekening schadestralen

3.4 Fragmentatie

Algemeen

Versnellen + projecteren materie door explosie

Meestal verste bereik van alle schade effecten

Twee soorten: primair en secundair





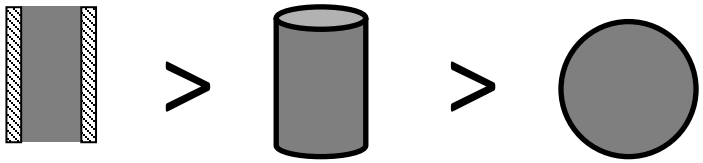


3.4 Fragmentatie

Primaire fragmenten

Fragmenten van materialen in contact met explosief (bv. omhulsel): *Shrapnel*

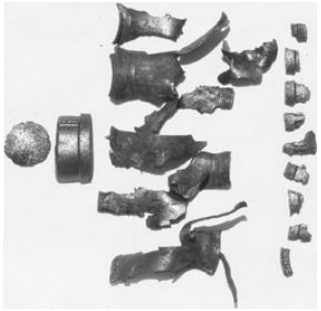
- Hoge snelheden: ~1000 m/s
- LE/volumetrische explosieven: minder en grotere fragmenten
- Snelheid fragmenten daalt snel met afstand (~$e^{-(afstand)}$)
- Beginsnelheid ook afhankelijk van geometrie bom:



- HE: grote hoeveelheid kleine fragmenten (brisantie):



Primaire fragmenten van een LE



Primaire fragmenten van een ME

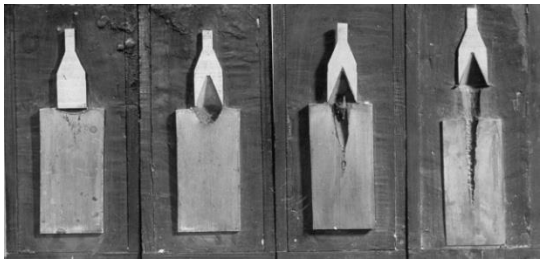
3.4 Fragmentatie

Secundaire fragmenten

Materialen door schokgolf versneld maar niet in direct contact met explosief

- Door interactie van schokgolf in lucht: materialen voortgestuwd
- Meestal lagere snelheden als primaire fragmenten, maar hogere massa
- Impuls schokgolf bepaald snelheid (hogere impuls, hogere snelheid)
- Bij krachtige explosies

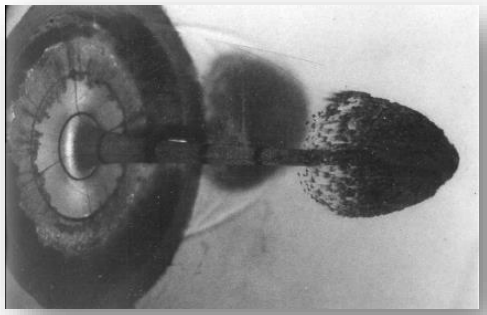
3.5 Shaped Charges (Penetratie)



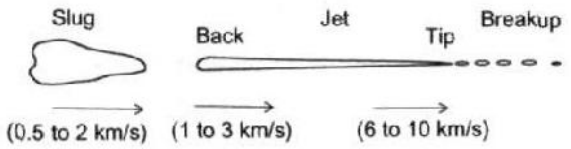
Munroe-Neumann effect: Holle explosieve lading, diepere penetratie in doelwit

- Collisie schokgolven in caviteit: P↑↑

Liner: wand holte bedekt met metaal: effect **4x sterker**



- Metalen liner samengeperst en uitgestoten
- ***Jet*** **+** *Slug*
  - "lage" snelheid (1000 m/s)
  - **Extreme snelheid (tot 10.000 m/s)**
- Optimale **standoff**: afstand lading tot doelwit
  - Te kort: geen goede vorming *jet*
  - Te ver: *jet* al opgebroken



3.5 Shaped Charges (Penetratie)

Jet oefent extreme druk uit op doelwit (≈300.000 bar)

Doelwit gedraagd zich als “vloeistof” bij deze drukken

Klein maar diep gat gemaakt (tot **12 x diameter lading diep**)

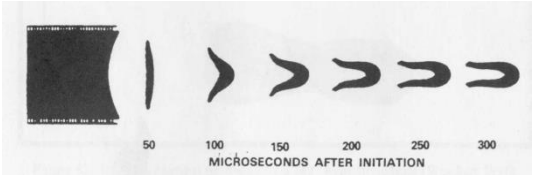
Zowel militair als civiel gebruik

Anti-pantser wapens, staal doorsnijden

Verschillende types: Conisch, linear, **EFP** (Explosively Formed Penetrator),…











3.6 Secundaire Schade

Indirecte effecten van explosie: gevaar dat blijft nadat explosie gedaan is

Voorbeelden:

- Branden veroorzaakt door hete fragmenten, hittestraling
- Destabilisatie gebouwen na schokgolf
- Vrijgave gevaarlijke materialen na schade door explosie
- Giftige explosiegassen (in afgesloten ruimte)
- Psychologisch trauma slachtoffers
- …

Moeilijk te kwantificeren, zeer afhankelijk van omstandigheden

Hou rekening met de omgeving/omstandigheden om inschatting te maken van secundaire effecten

3. Explosies: Effecten

3.1 Kratervorming en Aardschok

3.2 Hitte en Vuur

3.3 Schokgolf

3.4 Fragmentatie

3.5 Shaped Charges (penetratie)

3.6 Secundaire schade

3.7 Impact op objecten

3.8 Impact op mensen

3.9 Richtlijnen zware explosies

Voorbeeldberekening schadestralen

3.7 Impact op Objecten

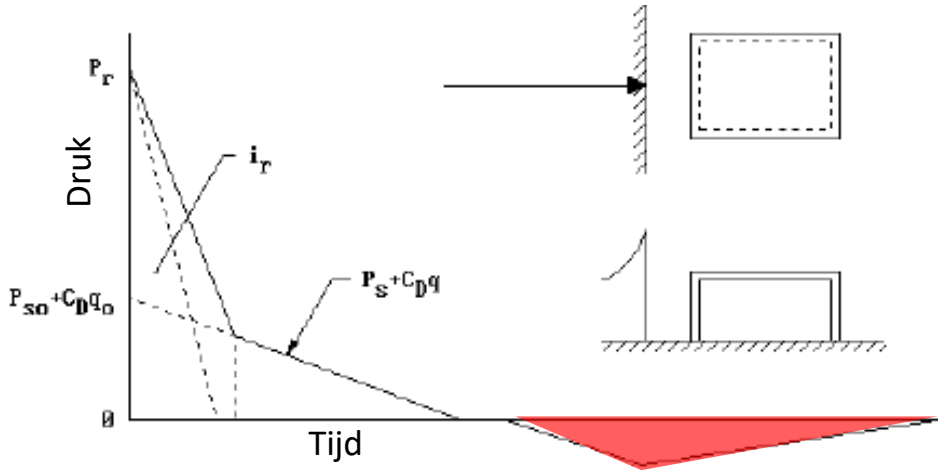
Schademechanisme	Effect
Krater	Grondschok, beschadiging ondergrondse objecten
Hitte	Brand mogelijk
Schokgolf	*Klein object:* schade, verplaatsing *Groot object:* structurele schade
Fragmenten	Schade, doorboring

Afhankelijk van omstandigheden, maar **schokgolf** meestal belangrijkste effect

- Uitz.: bv. grote vuurbal (BLEVE) of zware fragmenten

3.7 Impact op Objecten

Effect schokgolf op objecten



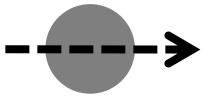
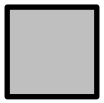
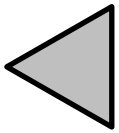
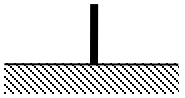
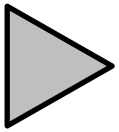
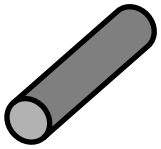
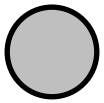
1. **Gereflecteerde** overdruk (P_r) → korte duur
2. **Dynamische** overdruk ($P_s + C_dq$) → langere duur
3. **Negatieve** fase explosie

C_D = *weerstandscoëfficiënt*: weerstand tegen luchtstoot

- ➢ hoger: object voelt sterker effect van explosie luchtstoot

3.7 Impact op Objecten

Weerstandscoëfficienten voor verschillende vormen

 Bol	**0.47**	 Zuil	**2**		**2.05**		**0.8**
 Halve Bol	**0.42**	 Zuil	**1.55**		**1.45**		**1.25**
 Halve Bol	**1.42**	 Zuil	**2**		**2.2**		**1.26**
	**1.2**	 Zuil	**1.2**		**2.3**		**1.20**
	**0.82**		**2**		**1.2**		**1**

3.7 Impact op Objecten

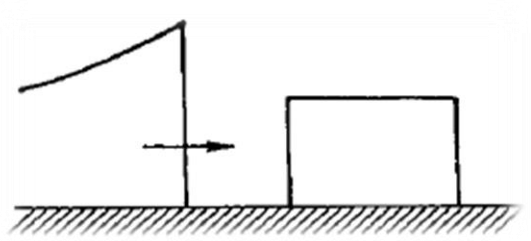
Effect schokgolf op objecten

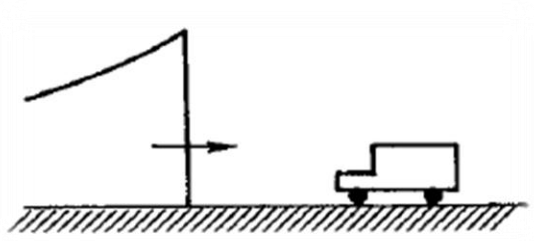
Diffractie doelwit: grote structuren en korte duur positieve fase

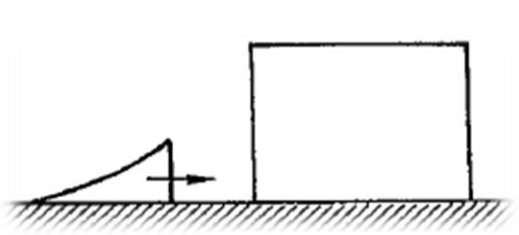
- Schokgolf overspoelt structuur maar deze **beweegt niet of weinig**
- Vooral (gereflecteerde) piekoverdruk is van belang
- Vb. Grote gebouwen of kleine explosies

*Weerstands (*drag*) doelwit*: kleine structuren en lange duur positieve fase

- Schokgolf overspoelt/plet en **verplaatst** doelwit
- Vooral dynamische overdruk (luchtstoot) is van belang
- Vb. Zuilen, skeletachtige structuren, auto's, …



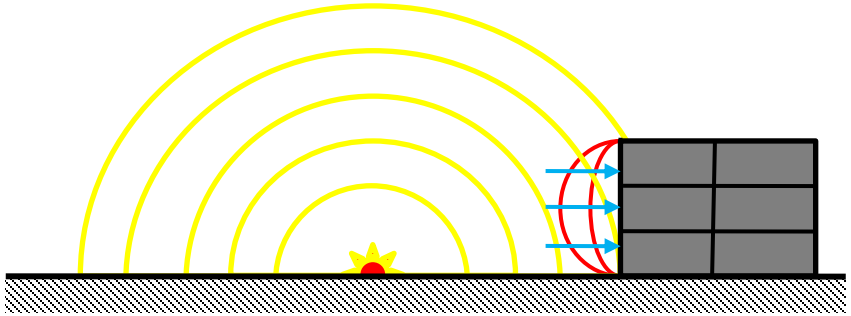




3.7 Impact op Objecten

Effect schokgolf op gebouwen: tijdslijn

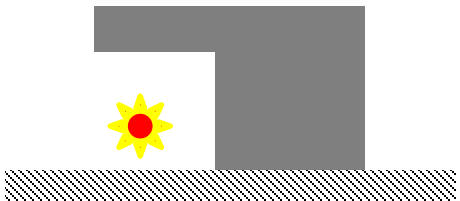
1. *Schokgolf bereikt gevel:*

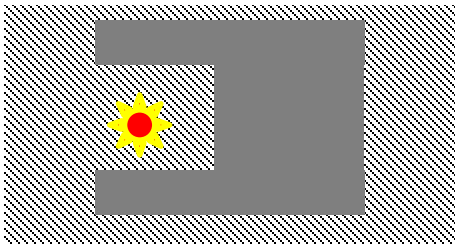


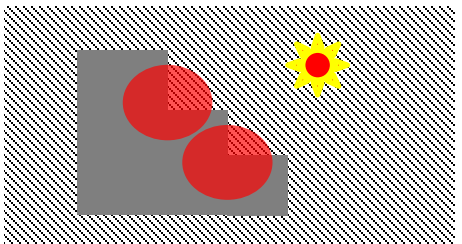
Niet-verstevigde elementen (deuren, ramen, …) vernietigd→ fragmentatie

Grotere inertie (= massa) verminderd effect → lichte gebouwen kwetsbaarder

Concave (holle) vormen in gebouwen versterken effect:



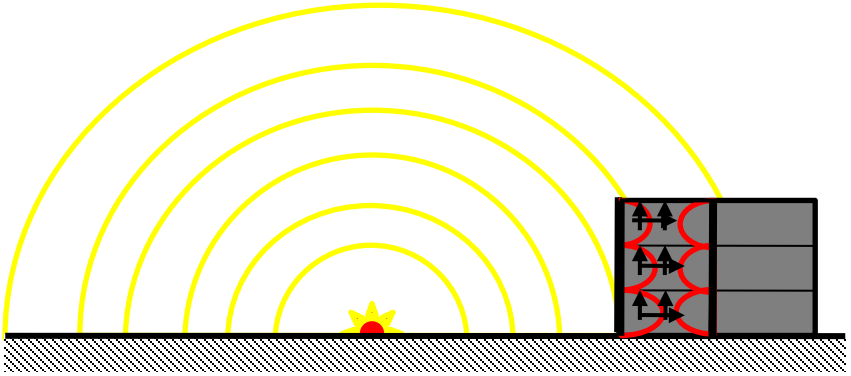




3.7 Impact op Objecten

Effect schokgolf op gebouwen: tijdslijn

2. *Schokgolf treedt gebouw binnen via ramen/deuren:*



Groter openingsoppervlak: sterker binnentredende schokgolf

Binnengedrongen schokgolf reflecteert tegen binnenmuren: hoge overdrukken

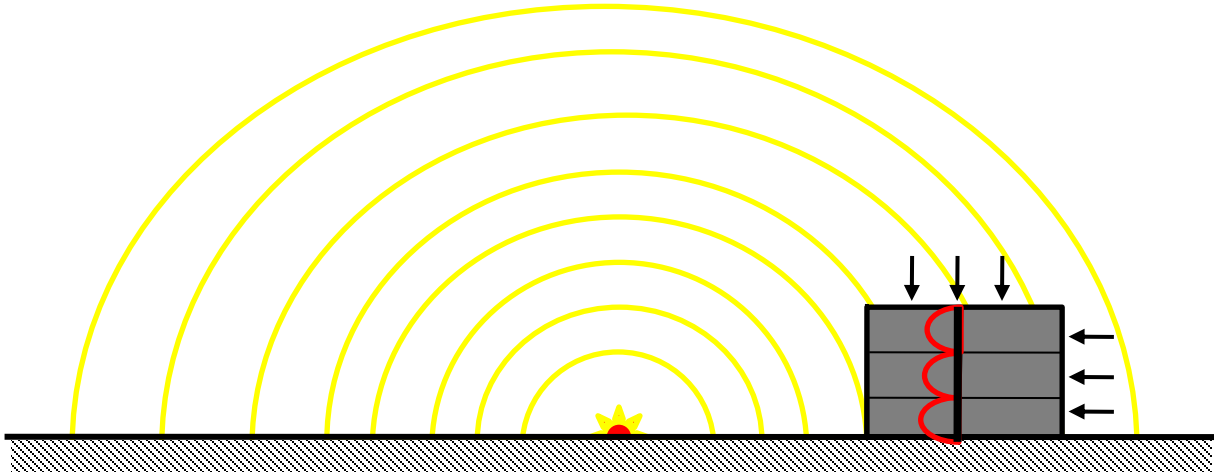
Zwakke binnenmuren vernietigd

Druk uitgeoefent op plafond (en vloer) → mogelijk instorting

3.7 Impact op Objecten

Effect schokgolf op gebouwen: tijdslijn

3. *Schokgolf passeert over structuur (indien krachtig genoeg):*



Neerwaartse druk op het dak: meestal goed getolereerd

Als schokgolf einde structuur bereikt: druk tegen achterste gevel

Totale belasting op structuur = (belasting vooraan) – (belasting achteraan)

3.7 Impact op Objecten

Effect schokgolf op gebouwen

Structuur mogelijk gedestabiliseerd: (gedeeltelijke) instorting

- Meestal binnen enkele seconden na explosie
- Veroorzaakt vaak veel slachtoffers

Bakstenen (draag)muren : zeer kwetsbaar voor schokgolven

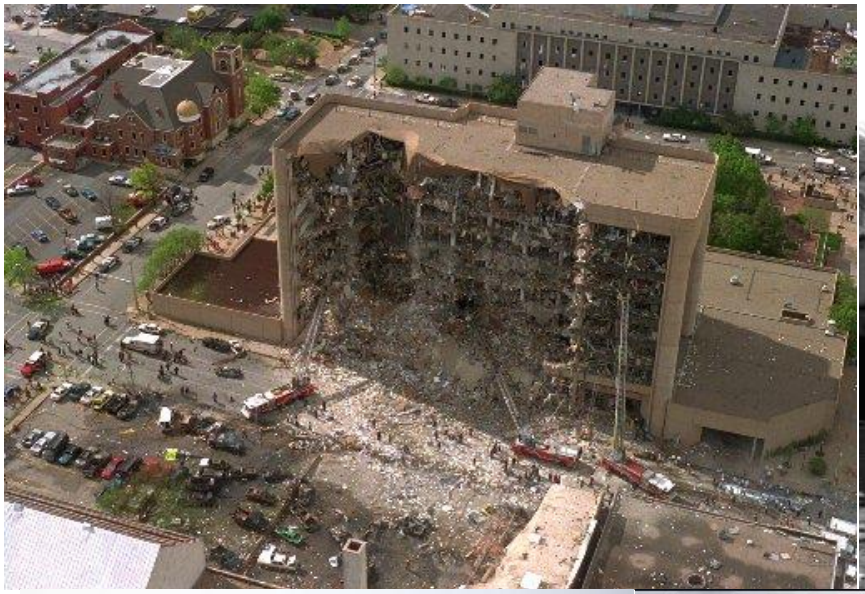
Gebouwen met stalen/betonnen frame: beter bestand

Gewapend beton = beste bescherming

Kleine explosies: effect op afzonderlijke structurele elementen

3.7 Impact op Objecten

Effect schokgolf op gebouwen











3.7 Impact op Objecten

Effectafstanden schokgolf

Uit *piekoverdruk – schade tabel of Z waarden:* $R_{effect} = Z \times \sqrt[3]{M}$

Piekoverdruk (bar)	Z	Effect
0.015	60	Breken ruiten
0.03	35	Ruitbreuk + gevaarlijke fragmentatie ruiten
0.048	24	Milde structurele schade aan gebouwen
0.09	16	Metalen panelen vervormen
0.17	9	Matig-ernstige schade aan gebouwen (mogelijk instorten)
0.24	7	Olietanken scheuren/beschadigd
0.35	5.5	Houten palen breken
0.4	5	Volledige verwoesting huizen
0.48	4.2	Omvallen volle treinwagons
0.69	3.7	Verwoesting meeste gebouwen

3.7 Impact op Objecten

Effectafstanden schokgolf

Uit *piekoverdruk – schade tabel of Z waarden:* $R_{effect} = Z \times \sqrt[3]{M}$

Voorbeeld: Op welke afstand kan men ruitbreuk met gevaarlijke fragmenten verwachten voor een 1000 kg TNT equivalente explosie?

Piekoverdruk (bar)	Z	Effect
0.03	35	Ruitbreuk + gevaarlijke fragmentatie ruiten

$$R_{effect} = Z \times \sqrt[3]{M} = 35 \times \sqrt[3]{1000} = \mathbf{350\ m}$$

3.8 Impact op Mensen

Algemeen

Schademechanisme	Effect
Contact	Amputatie
Hitte	Brandwonden
Schokgolf	Longschade, gehoorschade, verplaatsing
Fragmenten	Zware verwondingen

Menselijk lichaam vrij goed bestand tegen overdrukken van korte duur

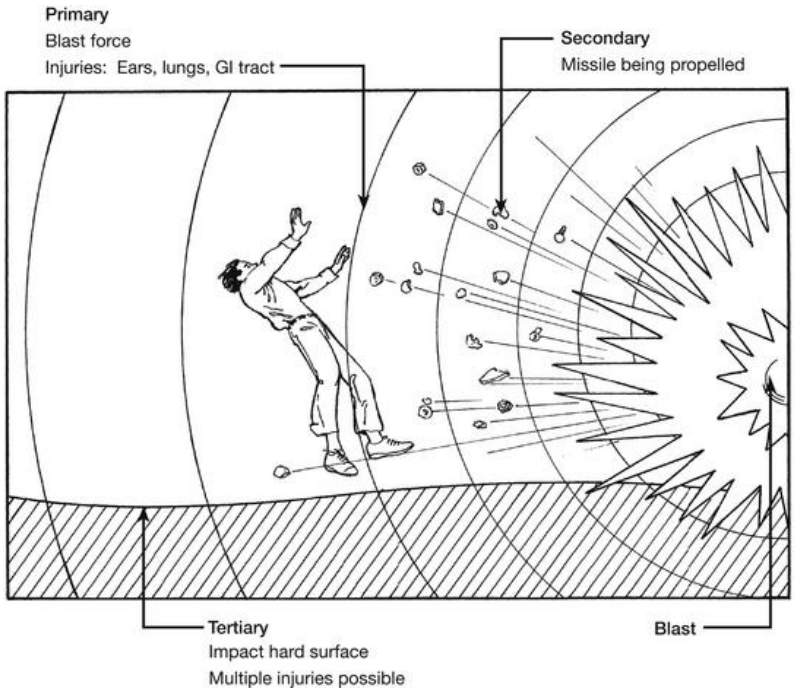
Zeer kwetsbaar voor fragmenten

3.8 Impact op Mensen

Algemeen

Indeling verwondingen:

- **Primair**: door schokgolf
- **Secundair**: door fragmentatie
- **Tertiar:** door verplaatsing
- **Quaternair**: alle andere oorzaken



3.8 Impact op Mensen

Primaire verwonding: Effect schokgolf op lichaam

Organen die lucht bevatten zijn kwetsbaar (longen, darmen,…)

Beschadiging trommelvlies meest voorkomende verwonding

- Tinnitis, bloed uit oren, gehoorverlies

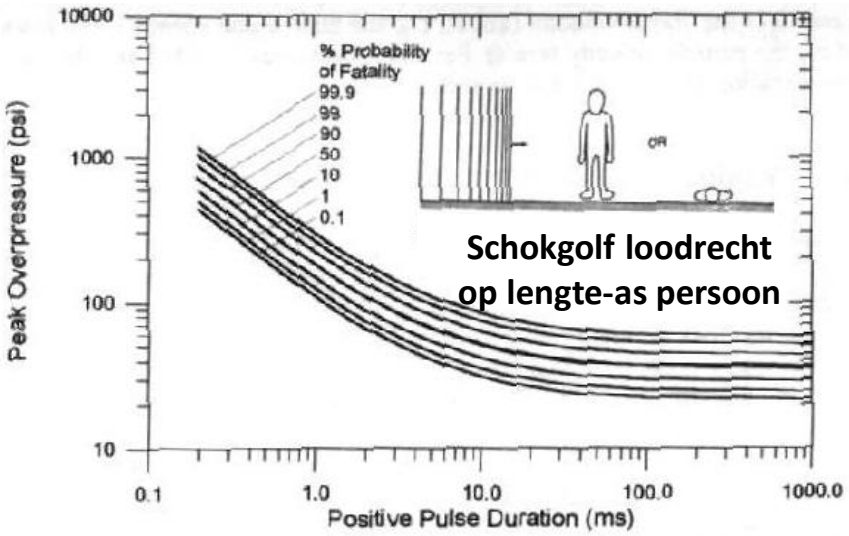
Blast lung: beschadiging longen, geen uitwendige tekens, levensbedrijgend

→ pijn in borststreek, ademhalingsproblemen

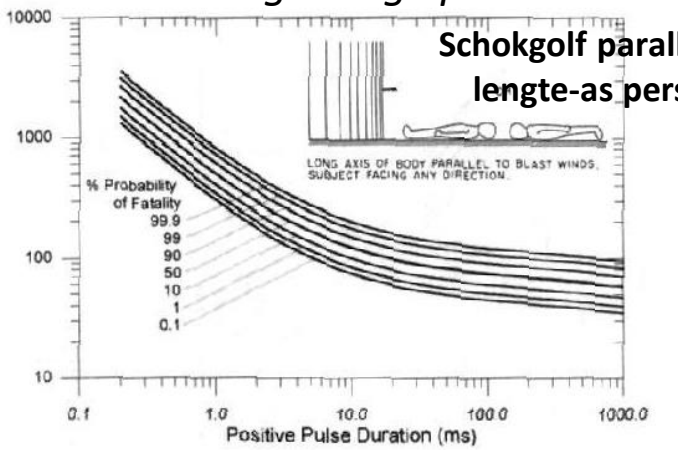
- Als > 10% verwondingen door hitte/fragmenten → kans op blast lung
- Medisch personeel zelden mee vertrouwd
- Meestal bij personen dichtbij explosie, onderwater of bij interne explosie

3.8 Impact op Mensen

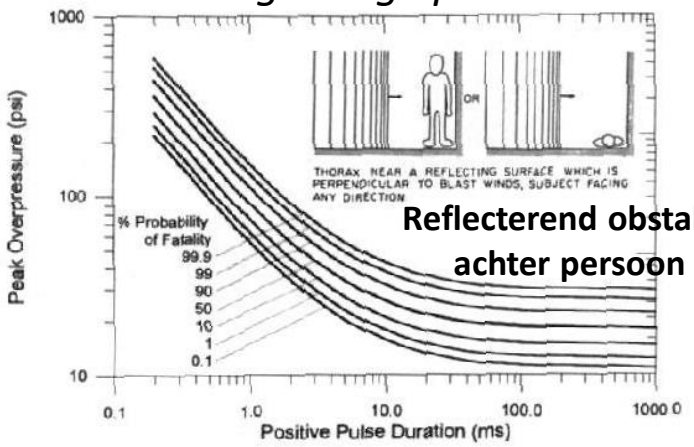
Primaire verwonding: Effect schokgolf op lichaam



***Meest** gunstige positie:*



***Minst** gunstige positie:*



Langere duurtijd positieve fase schokgolf:

- Minder hoge overdruk nodig om longverwondingen te veroorzaken

3.8 Impact op Mensen

Primaire verwonding: effectafstanden schokgolf (mens)

$$R = Z \times \sqrt[3]{M}$$

Met R = afstand (m), M = massa TNT (kg)

Overdruk (bar)	Z	Effect
0.02	45	Gehoorschade (tijdelijk)
0.1	13	Personen vallen om door schokgolf
0.35	5.5	Mogelijke scheuren trommelvlies
1	3	Grenswaarde voor longschade
14	1	Dodelijk

3.8 Impact op Mensen

Secundaire verwonding: effect van fragmentatie

Meestal penetratie fragmenten in lichaam (zelden stomp trauma)

Snijwonden, fracturen, bloedingen

Zeer vaak voorkomend bij explosie

Zelfs kleine fragmenten kunnen zware verwondingen veroorzaken

Meestal grote hoeveelheid verwondingen (>1 fragment)





3.8 Impact op Mensen

Secundaire verwonding: Effectafstanden fragmentatie

$$R = 45 \times \sqrt[3]{M}$$

Graham-Kinney: $R = 120 \times \sqrt[3]{M}$

TM-60A-1-1-4: $R = 109.62 \times M^{0.164}$

Met R = afstand (m), M = massa TNT (kg)
Minimaal 100 meter afstand

LOS (*line of sight*) met explosief = fragmentatiegevaar

Bescherming tegen fragmentatie → dekking (natuurlijk/barrières)

3.8 Impact op Mensen

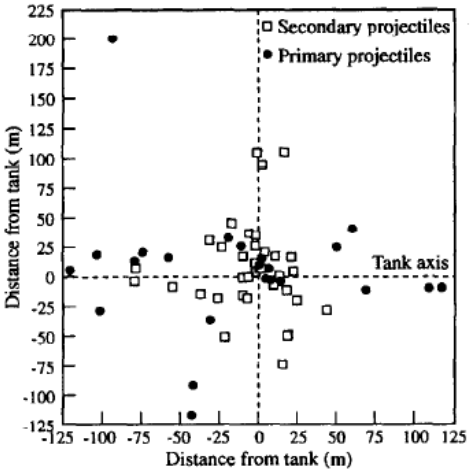
Secundaire verwonding: Effectafstanden fragmentatie

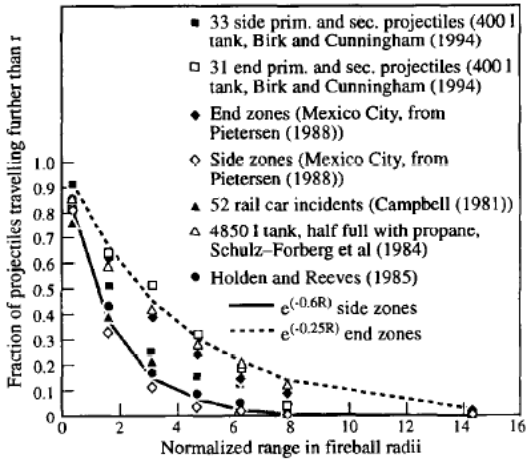
Aparte effectafstanden voor een BLEVE explosie:

$R = 90M^{0.33}$ Voor tank **< 5 m³**

$R = 465M^{0.1}$ Voor tank **> 5 m³**

Met R = afstand (m), M = massa brandstof (kg)
Minimaal 100 meter afstand





3.8 Impact op Mensen

Tertiar and quaternaire verwonding

Tertiair: Verwonding door verplaatsing lichaam door explosie luchtstoot

- Vooral *stomp trauma*, door tegen objecten geslagen te worden
- Veel voorkomend



Quaternair: Verwonding door andere oorzaak

- Toxische gassen, brand, instorting,…



3.8 Impact op Mensen

Algemene observaties explosie incidenten

Grote hoeveelheid slachtoffers op korte tijd

Combinatie van verwondingen (extremiteiten vaak getroffen)

Doodbloeden belangrijkste doodsoorzaak initieel overlevenden

Dichtbij *ground zero*: amputaties (lage overlevingskans) + primaire verwondingen

- *Vrije explosie*: meeste overlevenden
- *Interne explosie*: minste overlevenden, meer primaire verwondingen
- *Explosie met instorting*: meeste slachtoffers door instorting
- *Meer fragmentatie*: meer slachtoffers + ernstigere kwetsuren
- *Onderwater explosie*: meer primaire verwondingen

3.9 Richtlijnen Zware Explosies

- **Afstand!**
- Vermijd ramen → fragmentatie
- Gebouwen zonder frame → meer kans op instorting
- Rekening houden met reflectie schokgolven in omgeving met veel gebouwen + focussering schokgolf
- **Dekking tegen fragmentatie**: nader potentieel explosief onder dekking
- Bij vermoeden van aanslag: mogelijk secundaire explosies (*second strike*)
- Veroorzaken brand/lek/… door fragmenten
- Insluiting vermijden
- Secundaire fragmenten kunnen aanzienelijke massa hebben
- Explosie immanent: plat op grond, bescherm hoofd

Voorbeeld berekenen effectafstanden

Ontploffing van een lading van 2500 kg ANFO

- TNT equivalent = α x M = 0.40 x 2500 kg = **1000 kg TNT**
- Berekening effectafstanden:

$$R = Z \times \sqrt[3]{M} = Z \times \sqrt[3]{1000} = Z \times 10$$

Voorbeeld berekenen effectafstanden

$$R = Z \times \sqrt[3]{M} = Z \times \sqrt[3]{1000} = Z \times 10$$

Piekoverdruk (bar)	Z	Effect	Afstand
0.015	60	Breken ruiten	600 m
0.03	35	Ruitbreuk + gevaarlijke fragmentatie ruiten	350 m
0.048	24	Milde structurele schade aan gebouwen	240 m
0.09	16	Metalen panelen vervormen	160 m
0.17	9	Matig-ernstige schade aan gebouwen (mogelijk instorten)	90 m
0.24	7	Olietanken scheuren/beschadigd	70 m
0.35	5.5	Houten palen breken	55 m
0.4	5	Volledige verwoesting huizen	50 m
0.48	4.2	Omvallen volle treinwagons	42 m
0.69	3.7	Verwoesting meeste gebouwen	37 m

Voorbeeld berekenen effectafstanden

$$R = Z \times \sqrt[3]{M} = Z \times \sqrt[3]{1000} = Z \times 10$$

Overdruk (bar)	Z	Effect	Afstand
0.02	45	Gehoorschade (tijdelijk)	450 m
0.1	13	Personen vallen om door schokgolf	130 m
0.35	6	Mogelijke scheuren trommelvlies	60 m
1	3	Grenswaarde voor longschade	30 m
14	1	Dodelijk	10 m

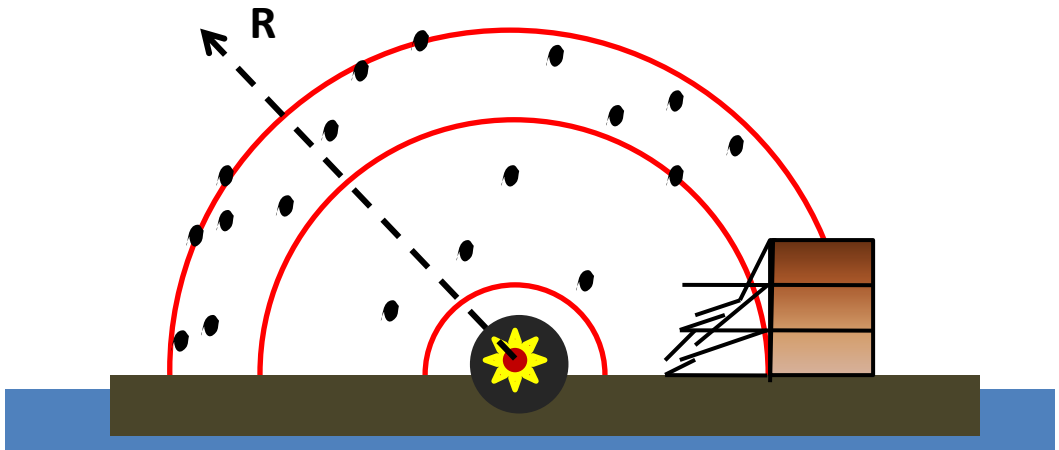
Fragmentatie: $R = 120\sqrt[3]{M} = 120\sqrt[3]{1000} = \mathbf{1200\ m}$ *(Graham-Kinney)*

$R = 109.62\ M^{0.162} = 109.62 \times 1000^{0.162}$ = **340 m** *(TM-60A-1-1-4)*

Samenvatting afstanden

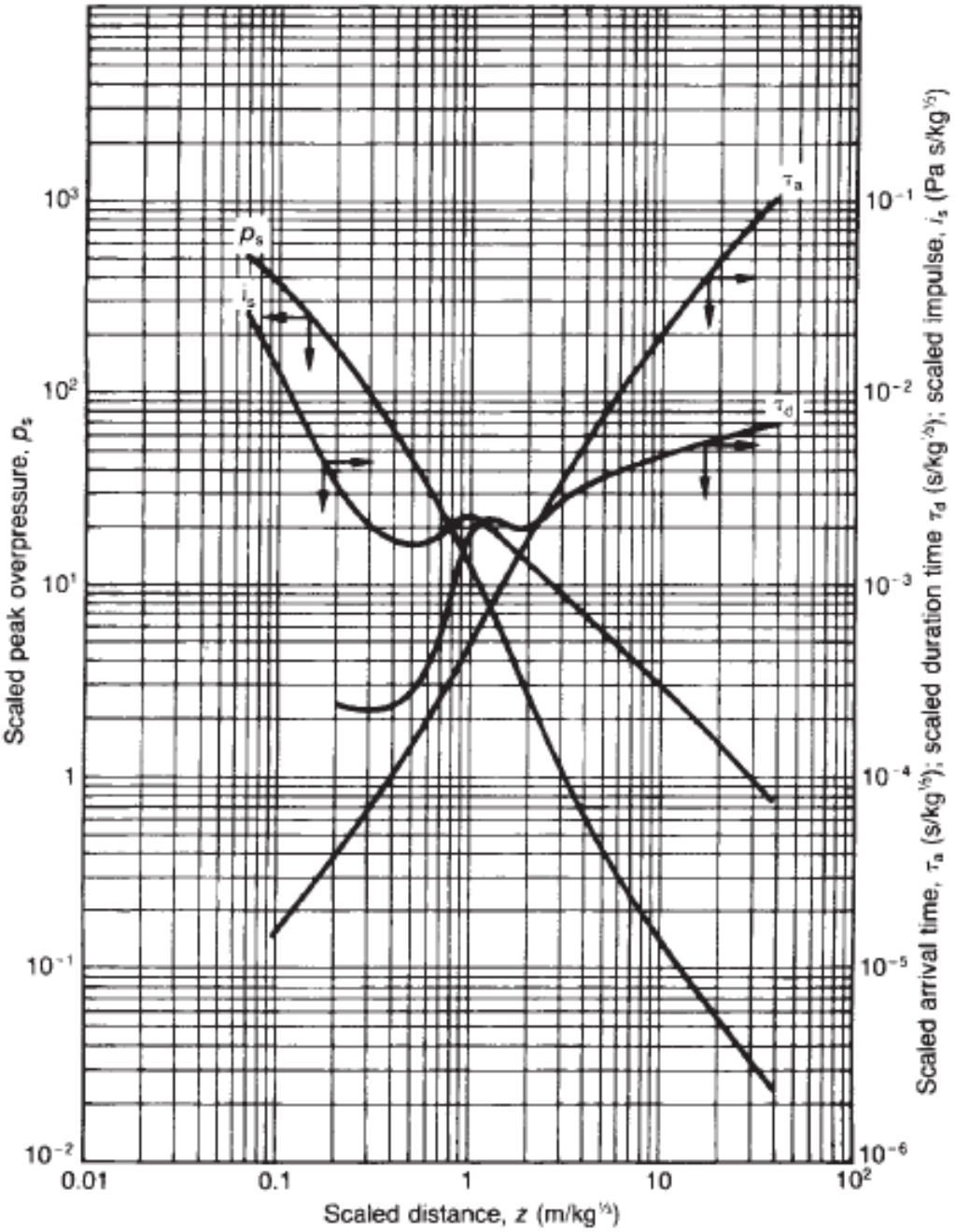
Explosie op grondniveau (afstanden in meter):

		TNT equivalent			
Effect	*Z*	10 kg	100 kg	1000 kg	5000 kg
Krater diameter	**0.8**	2	4	8	14
Vuurbal diameter	**3.5**	8	16	35	60
Sec. branden	**15**	32	70	150	256
Glasbreuk (fragmenten)	**35**	75	162	350	598
Fragmentatie	**120**	259	557	1200	2052
Fragmentatie *(TM-60A-1-1-4)*	**-**	160	233	340	443



Einde deel 3

Appendix: explosieparameters vs geschaalde afstand



Voor explosie ***op grondoppervlak***

$$Z = \frac{R}{\sqrt[3]{M}}$$

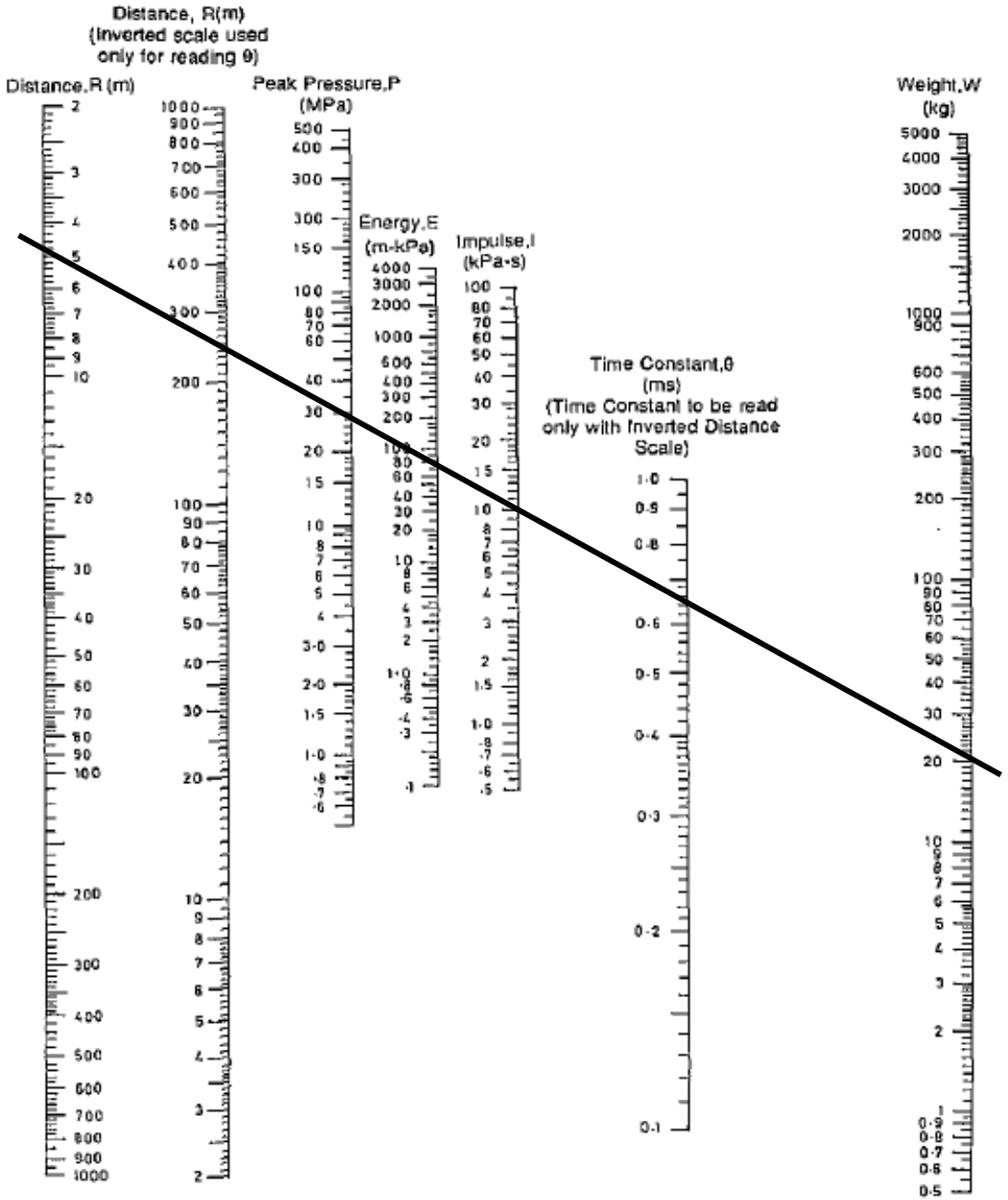
$$P_s = \frac{P_{SO}}{P_a}$$

$$i_S = \frac{i_s}{\sqrt[3]{M}}$$

$$\tau_d = \frac{t_d}{\sqrt[3]{M}}$$

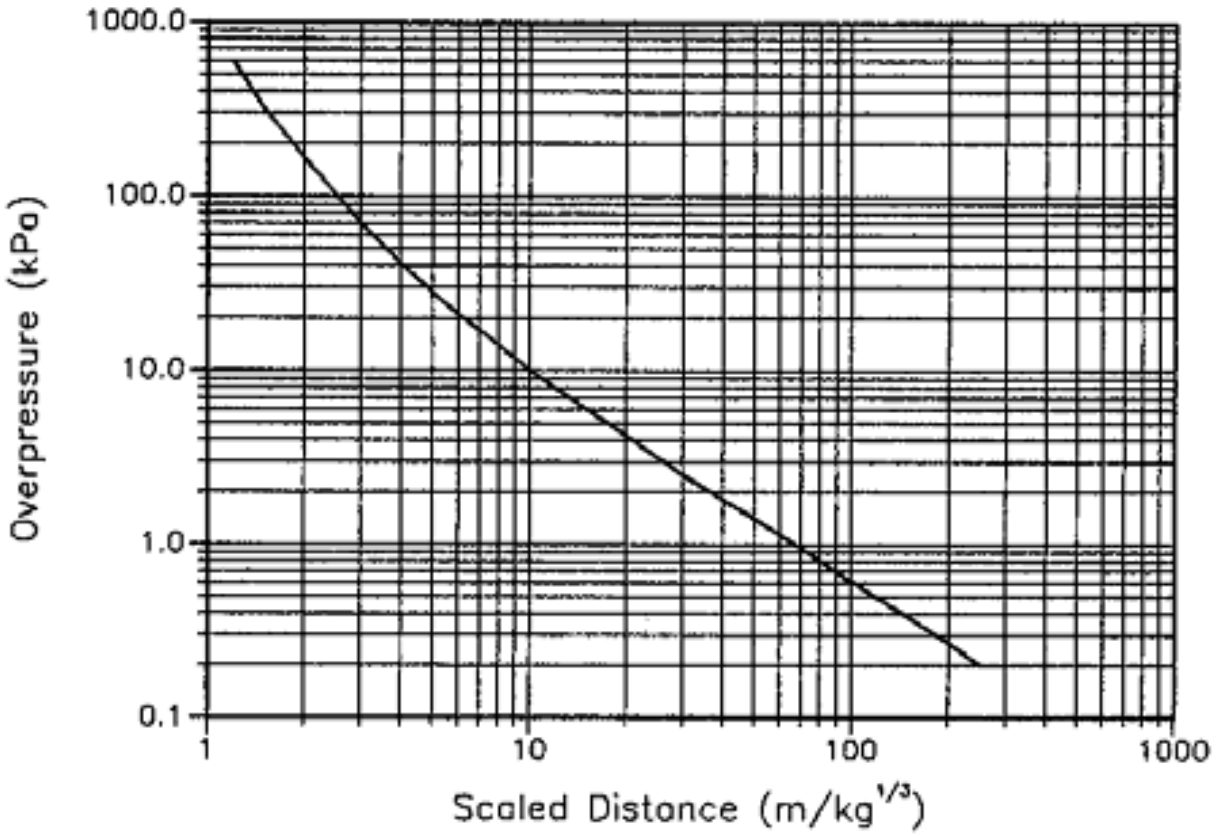
Met R = afstand (m),
M = massa TNT (kg),
P_a = atmosferische druk ,
P_{SO} = piekoverdruk,
I_s = specifieke impuls (Pa s)
t_d = duurtijd positieve fase (s)

Appendix: nomogram onderwater explosie



Appendix: explosieparameters vs geschaalde afstand

- Voor vrije explosie in lucht **boven grondoppervlak:**



Appendix: Overdrukken vs schade in industriële omgeving

Equipment	Overpressure, psi																								
	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	8.5	9.0	9.5	10	12	14	16	18	20
Control house steel roof	A	C	D				N																		
Control house concrete roof	A	E	P	D			N																		
Cooling tower	B			F			O																		
Tank: cone roof		D				K							U												
Instrument cubicle			A			LM						T													
Fired heater				G	I					T															
Reactor: chemical				A				I					P					T							
Filter				H					F										V		T				
Regenerator						I				IP					T										
Tank: floating roof						K							U												D
Reactor: cracking							I							I							T				
Pipe supports							P					SO													
Utilities: gas meter									Q																
Utilities: electronic									H						I					T					
Electric motor										H								I							V
Blower										Q										T					
Fractionation column											R			T											
Pressure vessel horizontal												PI						T							
Utilities: gas regulator												I								MQ					
Extraction column													I							V	T				
Steam turbine															I						M	S			V
Heat exchanger															I			T							
Tank sphere																I						I	T		
Pressure vessel: vertical																					I	T			
Pump																					I		V		

A. Windows and gauges broken
B. Louvers fall at 0.2–0.5 psi
C. Switchgear is damaged from roof collapse
D. Roof collapses
E. Instruments are damaged
F. Inner parts are damaged
G. Brick cracks
H. Debris—missile damage occurs
I. Unit moves and pipes break
J. Bracing falls
K. Unit uplifts (half tilted)
L. Power lines are severed
M. Controls are damaged
N. Block walls fall
O. Frame collapses
P. Frame deforms
Q. Case is damaged
R. Frame cracks
S. Piping breaks
T. Unit overturns or is destroyed
U. Unit uplifts (0.9 tilted)
V. Unit moves on foundation

$$\frac{P(psi)}{14.5} = P(bar)$$