Explosies: Oorzaak en Gevolg

AGS module Explosieven

Dr. **Brecht Egle**

Begle@its.jnj.com

Brecht@live.com

Maart 2022

Inhoud Cursus

1. Inleiding
2. Oorzaken
3. Effecten

Extra: IED, HME

Deel 1:
Inleiding

Wat is een Explosie?

Wat is een Explosie?

Zeer snelle vrijstelling van energie met expansie van gas (drukgolf)



Wat is een Explosie?

Zeer **snelle** vrijstelling van **energie** met expansie van gas (**drukgolf**)

Zeer plots fenomeen

Energieopbouw vereist (diverse bronnen)

Verschillende schademechanismen

Incidenten met explosiegevaar:

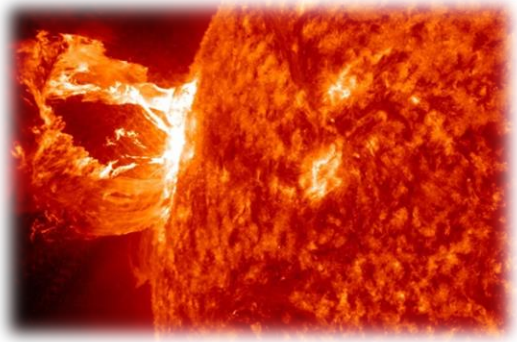
- Industrie
- Terrorisme/banditisme
- Transport
- …

Oorzaken van Explosies

Chemisch



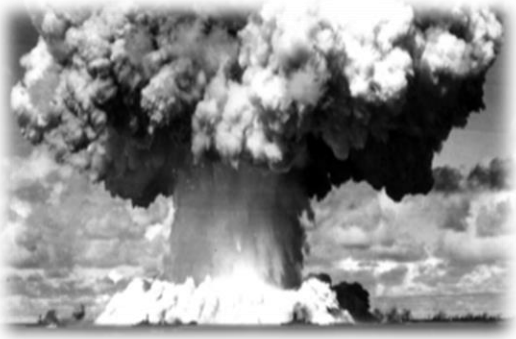
Andere



Explosies

Fysisch





Nucleair

Gevolgen van Explosies

R

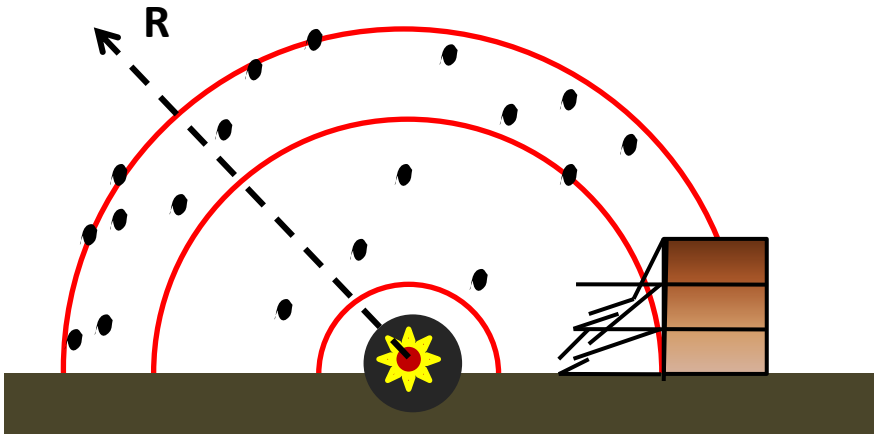
- *Krater*
- *Hitte/brand*
- *Schokgolf*
- *Fragmentatie*
- *Secundaire schade*
- (*Penetratie)*





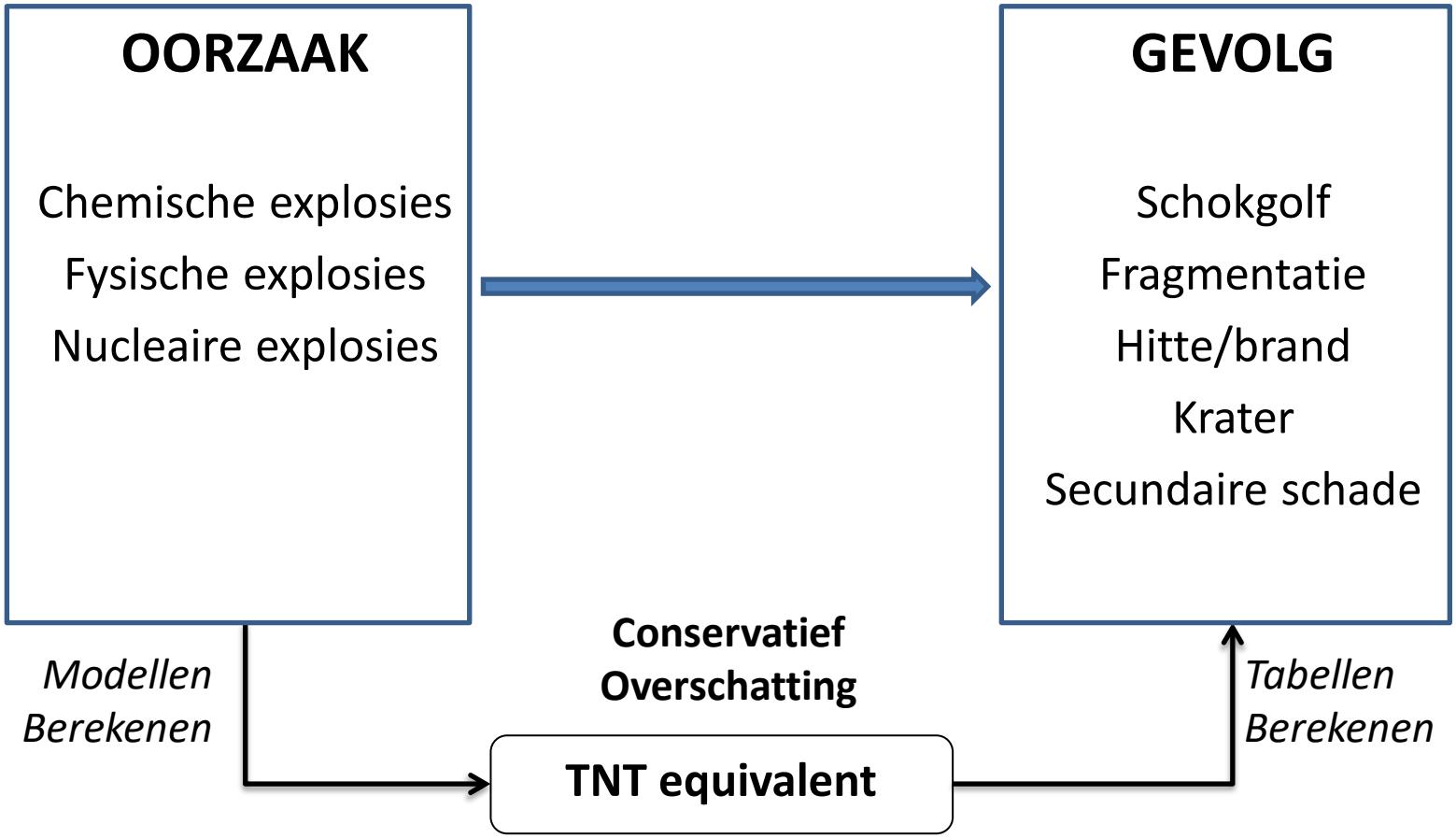








Koppeling Oorzaak – Gevolg: het TNT model



TNT-equivalentie: maat voor explosiekracht

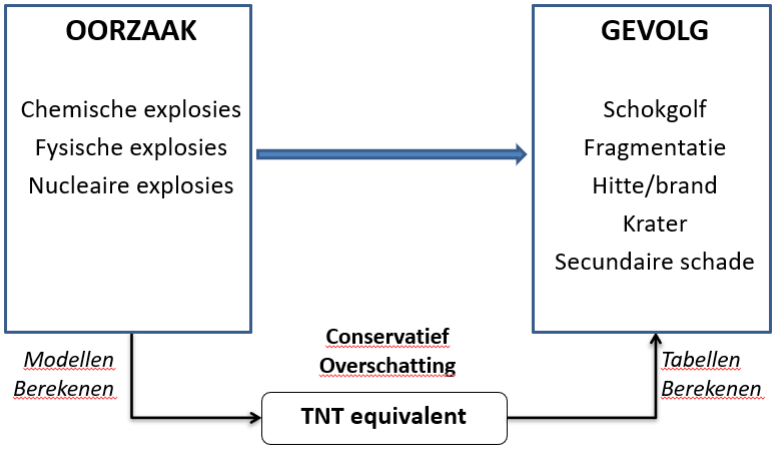
Zet explosiebron om in equivalente massa TNT: $\mathbf{M_{eq,TNT}}$

Vaak uitgedrukt in % TNT of explosie efficiëntie (α): $\boldsymbol{\alpha}$ x $\mathbf{M_{ex}} = \mathbf{M_{eq,TNT}}$

Eenvoudig model, zeer breed toepasbaar, conservatieve schatting

Minder accuraat als complexere modellen (bv. CFD), maar snel en makkelijk

TNT is een gecondenseerd explosief!

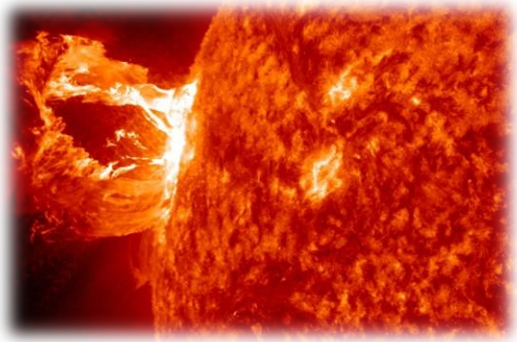


Deel 2:
Oorzaken van Explosies

Chemisch



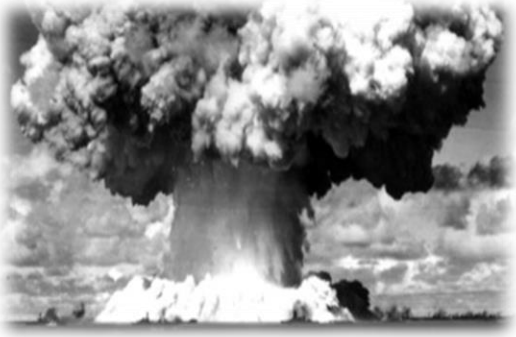
Andere



Explosies

Fysisch





Nucleair

Deel 2: Oorzaken van Explosies

2.1 Chemische explosies

- Detonatie vs deflagratie
- Gecondenseerd: High explosives
- Gecondenseerd: Low explosives
- ADR transportklassen
- Volumetrisch: Gevoeligheid en ernst
- Volumetrisch: Vapour Cloud Explosie (VCE)
- Volumetrisch: Stofexplosie

2.2 Fysische explosies

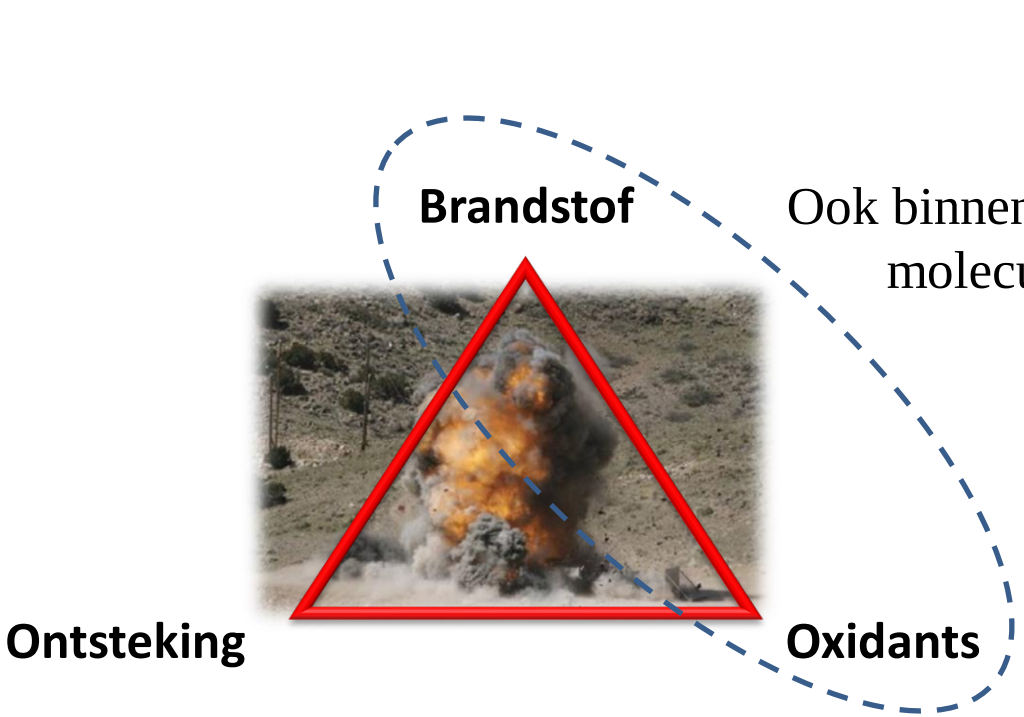
- Drukvat explosie
- BLEVE
- Implosie
- Thermische explosie

2.3 Nucleaire explosies

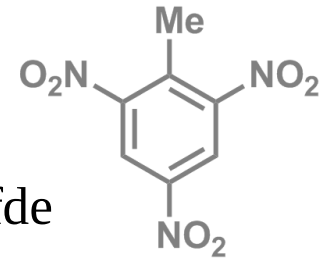
2.1 Chemische Explosies

Vrijgave energie door *snelle* chemische reactie (of hoog oppervlak/volume)

Meestal **exotherme oxidatiereactie:**



Ook binnen zelfde molecule



2.1 Chemische Explosies

Vrijgave energie door *snelle* chemische reactie (of hoog oppervlak/volume)

Meestal exotherme oxidatiereactie

Of **explosieve decompositiereactie:**

- Ethyleen oxide
- Ethylene
- Acetyleen
- > 92 % waterstofperoxide





2.1 Chemische Explosies

Ontsteking

Voldoende energie toevoegen om de explosiereactie te starten

1. **Mechanisch:**
   - Impact: productie vonken. Vooral Mg,Al,Ti legeringen met roestig metaal -> Thermietreactie
   - Wrijving: wekt warmte op

2. **Thermisch**:
   - Hete oppervlakten/deeltjes
   - Open vlam
   - Verbrandingsmotoren
   - Schokgolven (adiabatische compressie)

2.1 Chemische Explosies

Ontsteking

Voldoende energie toevoegen om de explosiereactie te starten

3. **Elektrisch**:
   - Electrostatische ontlading
   - Bliksem
   - Hoogfrequente EM straling
   - Elektrische schakelaars
   - Gefocust licht

4. **Chemisch**:
   - Exotherme reacties
   - Decompositie
   - Polymerisatie

2.1 Chemische Explosies

Deflagratie vs Detonatie

Subsonische reactiezone (< 300 m/s)

Schokgolf sneller dan reactiefront

Druk ≈ 10 bar

Insluiting nodig voor explosie





2.1 Chemische Explosies

Deflagratie vs **Detonatie**

Supersonische reactiezone (> 300 m/s), typisch 2000-9000 m/s

Schokgolf en reactiefront gekoppeld

Drukken ≈ 300.000 bar

Veroorzaakt in elk geval een explosie

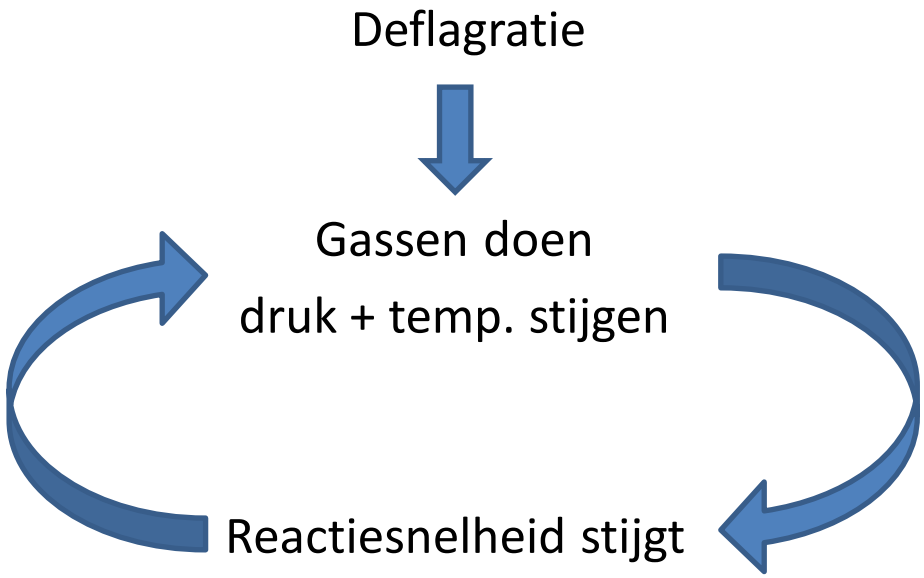
Brisantie





2.1 Chemische Explosies

Deflagratie naar detonatie transfer (DDT)



Kettingreactie tot drukken/reactiesnelheden hoog genoeg zijn voor detonatie

2.1 Chemische Explosies

Deflagratie naar detonatie transfer (DDT)

Brandende explosieven kunnen exploderen via dit mechanisme

Factoren die DDT waarschijnlijker maken:

- Sterke vlamversnelling (turbulentie)
- Insluiting
- Porositeit materiaal (hoger: makkelijker DDT)
- Zeer krachtige ontstekingsbron



2.1 Chemische Explosies

Klassering

Chemische explosie

Gecondenseerde explosieven
Snelle (**auto-oxidatie)** reactie





Volumetrische explosieven
Reactie met atmosferische zuurstof

- High explosives (HE) — **Detonatie**
  - **Primair:** gevoelig
  - **Secundair**: matig gevoelig
  - **Tertiair**: ongevoelig
- Low explosives (LE) — **Deflagratie**
  - **Pyrotechniek**
  - **Aandrijfstoffen**

- VCE: vapour cloud explosion
- Stofexplosie

2.1 Chemische Explosies

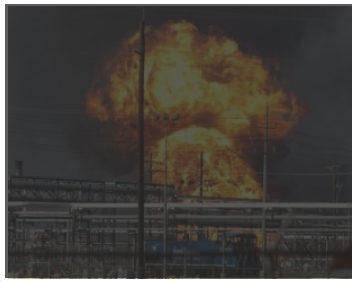
Klassering

Gecondenseerde explosieven

Snelle (**auto-oxidatie)** reactie



Chemische explosie



Volumetrische explosieven

Reactie met Atmosferische zuurstof

- High explosives (HE) — **Detonatie**
  - **Primair:** gevoelig
  - **Secundair**: matig gevoelig
  - **Tertiair**: ongevoelig
- Low explosives (LE)
  - **Pyrotechniek**
  - **Aandrijfstoffen**

- VCE: vapour cloud explosion
- Stofexplosie

2.1 Chemische Explosies

HE: Primaire explosieven (ADR 1.1A, 1.1D)

Makkelijk detoneerbaar (DDT)

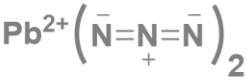
Gevaarlijk om te hanteren (schok/frictiegevoelig)

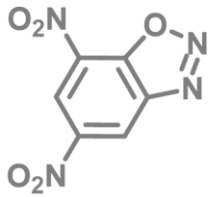
Meestal in kleine hoeveelheden (≤ 1g)

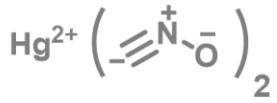
Belangrijkste component in detonatoren

Veel voorkomende:

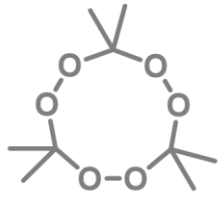
- *Lood azide* (lead azide, LA, PbN3)
- *DDNP* (diazodinitrophenol, DINOL)
- *Kwik fulminaat* (mercury fulminate)
- *HMTD* (Hexamethylenetriperoxidediamine)
- *Aceton peroxide* (AP; TCAP, CTAP, TATP)











2.1 Chemische Explosies

HE: Secundaire explosieven (ADR 1.1D,E,F)

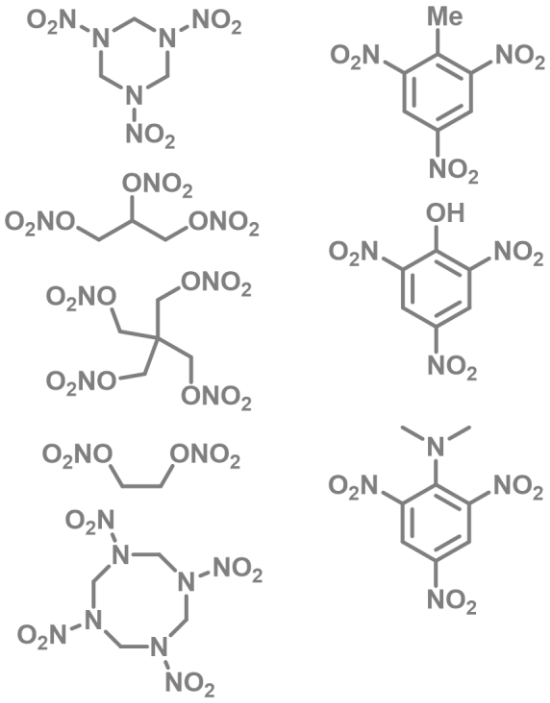
Matig gevoelig (varieert)

Grootste groep explosieven

Grote variatie in sterkte + toepassingsgebied

Enkele veel voorkomende:

- RDX (cyclotrimethylenetrinitramine)
- Nitroglycerine
- PETN (pentaerythritol tetranitraat, Pentriet)
- Nitroglycol
- HMX
- TNT (trinitrotolueen)
- Picrinezuur (TNP, picric acid)
- Tetryl



2.1 Chemische Explosies

HE: Tertiaire explosieven (ADR 1.4, 1.5, 1.6)



Zeer ongevoelig

Vooral ANFO, of bep. militaire munitie (IHE: FOX-7, NTO, TATB)

ANFO: Ammonium nitraat (poeder/korrels) + vloeibare brandstof (2-5%)

Makkelijk te maken + goedkoop → gebruikt in grote hoeveelheden

Veel gebruikt in commerciële toepassingen (mijnbouw)

“Kunstmestbom”: ammonium nitraat verkrijgbaar als kunstmest (NPK 33-0-0)

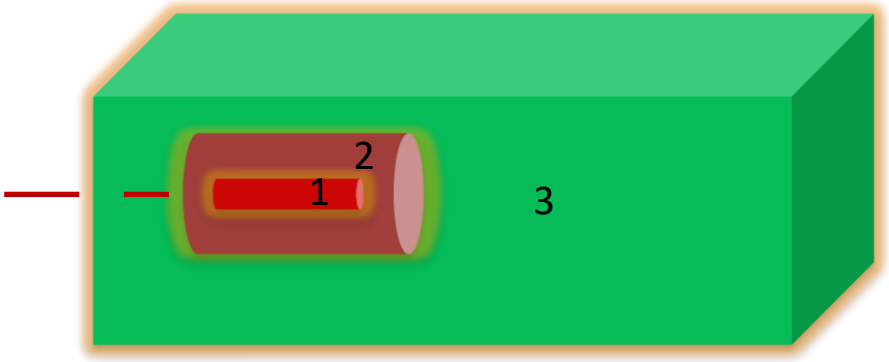
Ammonium nitraat: explosie mogelijk bij brand ingesloten ruimte

2.1 Chemische Explosies

Explosive train

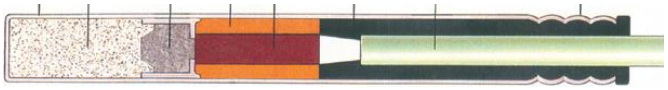
Initiatie explosieven: *Explosive train*

Gevoeliger explosief om hoofdlading te detoneren

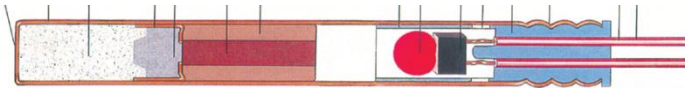


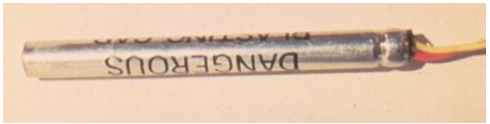
1. Detonator
2. Booster
3. Hoofdlading

Detonator: primair explosief, onsteking via elektrische stroom of lont







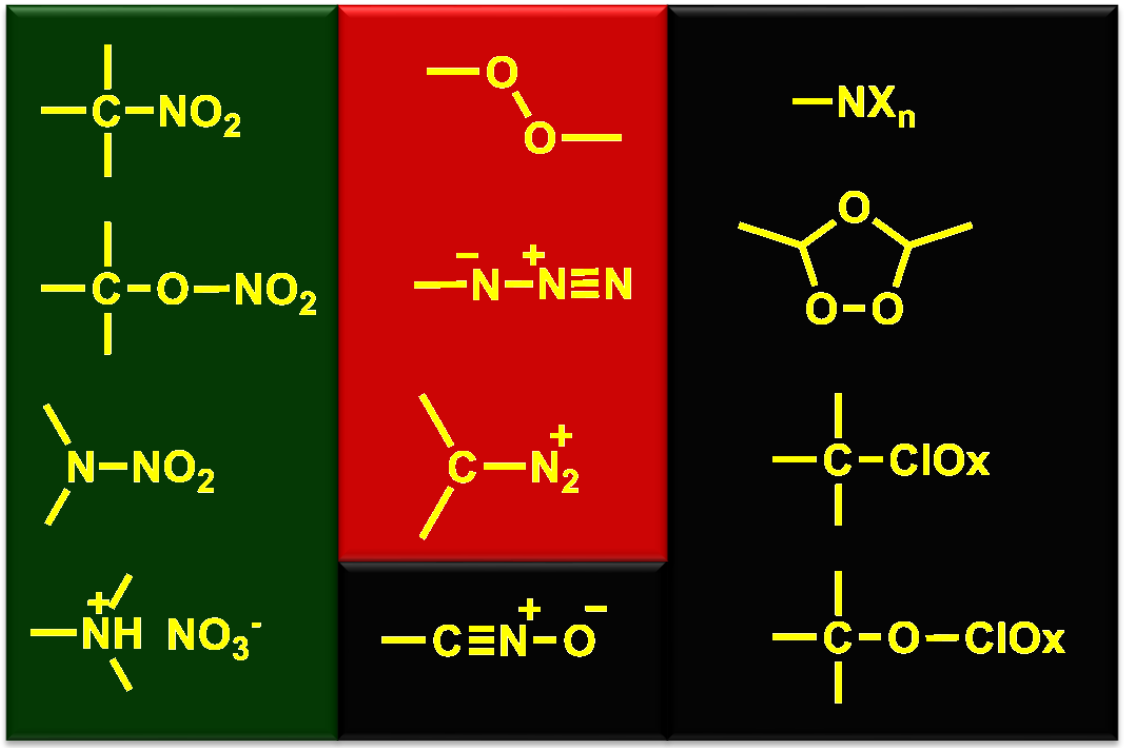


2.1 Chemische Explosies

Explosieve organische verbindingen

Meestal onstabiel

Meestal vrij stabiel



Zeer onstabiel, (Uitz.: -NF_2)

2.1 Chemische Explosies

Explosieve anorganische verbindingen

(Per)Chloraat zouten

Ammonium nitraat

Metaal carbiden

Waterstofperoxide (> 90 %)

Metaal azide zouten

Waterstofazide

Hydrazine zouten (nitraat, metaal complexen)

(*Fulminaat zouten)*

(Stikstof halides)

(Stikstof sulfide)

2.1 Chemische Explosies

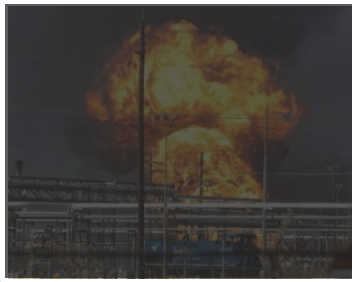
Klassering

Gecondenseerde explosieven

Snelle (**auto-oxidatie)** reactie



Chemische explosie



Volumetrische explosieven

Reactie met Atmosferische zuurstof

- High explosives (HE) — **Detonatie**
  - **Primair:** gevoelig
  - **Secundair**: matig gevoelig
  - **Tertiair**: ongevoelig
- Low explosives (LE) — **Deflagratie**
  - **Pyrotechniek**
  - **Aandrijfstoffen**

- VCE: vapour cloud explosion
- Stofexplosie

2.1 Chemische Explosies

LE: Pyrotechnisch materiaal (ADR 1.1, 1.3, 1.4 **G)**

Meestal fysieke mengsels van brandstof en oxidants:

Buskruit (koolstof + zwavel + kalium nitraat)

Lucifer (zwavel + kalium chloraat)

Maar ook zuiver stoffen zoals nitrocellulose

Kunnen zeer gevoelig zijn aan ontbranding door vonken, vlammen, …

Insluiting/grote hoeveelheden: zeer destructief (vb. Vuurwerkramp Enschede)







2.1 Chemische Explosies

LE: Pyrotechnisch materiaal (ADR 1.1, 1.3, 1.4 **G)**

Ook het meeste vuurwerk valt hieronder

Compositie hangt af van gewenste effect (licht, geluid, rook, …)

Vuurwerk type	**Bestanddelen**
Ontstekingsas (first fire)	Buskruit, (per)chloraat
Vertragingscompositie	Chromaten/metaaloxiden + brandstof
Rook effect	Sublimerende kleurstof, witte fosfor,…
Licht effect	Mg of Al poeder + oxidants
Geluid effect	Sas + picraten

Maar ook airbags, gordelspanners (natrium azide of stikstofrijke moleculen)

2.1 Chemische Explosies

TNT equivalentie voor gecondenseerde explosieven

$$M_{eq,TNT} = \alpha \times M_{ex} \qquad \alpha = \frac{TNT\ eq.(\%)}{100}$$

Explosief	TNT eq. (%)	Explosief	TNT eq. (%)
Lood azide	40	Picrinezuur	110
DDNP	105	Tetryl	130
Kwik fulminaat	51	ANFO	30-80*
TATP	80	Nitromethaan	101
RDX	150	C4	130
Nitroglycerine	140	PETN	145
HMX	150	AN	56
TNT	100	Dynamiet	105

Voor low explosives (vuurwerk, …): neem 40 % TNT (worst case)

*: Afhankelijk van hoeveelheid + type toegevoegde brandstof

2.1 Chemische Explosies

TNT equivalentie voor gecondenseerde explosieven

$$\mathbf{M_{eq,TNT} = \alpha \times M_{ex}} \qquad \boldsymbol{\alpha} = \frac{\boldsymbol{TNT\ eq.(\%)}}{\mathbf{100}}$$

Vb: wat is de geschatte equivalente hoeveelheid TNT voor een explosie van 100 kg TATP?

TATP heeft een TNT equivalentie van 80 %:

$$\alpha = \frac{TNT\ eq.(\%)}{100} = \frac{80}{100} = 0.8$$

$M_{eq,TNT} = \alpha \times M_{ex} = 0.8 \times 100\ kg =$ **80 kg**

Een explosie van 100 kg TATP heeft de explosiekracht van ongeveer **80 kg TNT**.

2.1 Chemische Explosies

(Legitiem) transport van explosieven: ADR klasse

Explosieven: ADR klasse 1

Ook pyrotechnische materialen vallen hieronder (vuurwerk)

Uitgezonderd:



- Explosieven die gedesensitiseerd zijn met water/alcohol
- Stoffen die een explosief mengsel kunnen vormen (bv. met lucht) maar zelf niet explosief zijn
- Organische peroxiden: **klasse 5.2**

UN nummer begint met 0.



2.1 Chemische Explosies

(Legitiem) transport van explosieven: ADR klasse

Subklasse	
1.1	Massa explosie gevaar
1.2	Fragmentatie gevaar, maar geen massa explosie
1.3	Gevaar voor brand, maar weinig massa explosie/fragmentatie gevaar
1.4	Klein risico op lokale explosies, geen fragmentatie of massaexplosie
1.5	Ongevoelige explosieven (die wel massa explosie kunnen ondergaan)
1.6	Zeer ongevoelige explosieven die geen massa explosie kunnen ondergaan

Massa explosie: explosie waarbij gehele lading in zijn geheel kan exploderen

Compatibiliteit	
A	Primair explosief
B	Primair explosief, in detonatoren
C	Deflagrerend explosief
D	Secundair explosief of buskruit of primair explosief met >2 veiligheidsmaatregelen
E	Secundair explosief met aandrijflading
F	Secundair explosief met eigen initiatiemogelijkheid
G	Pyrotechnische stof
H	Explosieve stof en witte fosfor
J	Explosieve stof en brandbare vloeistof of gel
K	Explosieve stof en toxische chemicaliën
L	Explosieve stof die bijzondere incombabiliteit heeft (bv. Water)
N	Enkel zeer ongevoelige explosieven
S	Weinig gevaarlijke artikelen die bij brand geen significante hinder opleveren

2.1 Chemische Explosies

Hantering beperkte hoeveelheden gecondenseerde explosieven

- Zo veel mogelijk afstand houden
- Beschermende kledij (vooral ogen, vitale delen, oren)
- Fragmentatie in rekening nemen (glazen recipiënten,…)
- Contaminatie kan explosief extra onstabiel maken, vooral (sterke) zuren en metalen
- Opletten voor breken grote kristallen
- Wrijving/impact/hitte vermijden
- Statische elektriciteit
- Sublimatie op schroefdeksel
- Vermijd insluiting
- Vooral opletten bij: oude stalen, primaire explosieven, zelfgemaakte explosieven

2.1 Chemische Explosies

Interventie bij grote hoeveelheden ADR klasse 1

- Evacueren als lading in brand staat
- Overspoelen met **water** (uitz. watergevoelige stoffen)
- Ontstekingsbronnen verwijderen bij lek
- Niet opruimen zonder raad expert
- Perimeter: zie deel 2 of ERG:
  - ADR *1.1, 1.2, 1.3, 1.5*: **800 m** (lek) / **1600 m** (brand)
  - ADR *1.4, 1.6*: **250 m** (lek) / **500 m** (brand)
  - ADR *1.4S*: **15 m**

2.1 Chemische Explosies

Klassering

Gecondenseerde explosieven

Snelle (**auto-oxidatie)** reactie



Chemische explosie



Volumetrische explosieven

Reactie met Atmosferische zuurstof

- High explosives (HE) — **Detonatie**
  - **Primair:** gevoelig
  - **Secundair**: matig gevoelig
  - **Tertiair**: ongevoelig
- Low explosives (LE) — **Deflagratie**
  - **Pyrotechniek**
  - **Aandrijfstoffen**

- VCE: vapour cloud explosion
- Stofexplosie

2.1 Chemische Explosies

Volumetrische explosieven: gevoeligheid

LEL (Lower Explosive Limit): Minimale concentratie in lucht voor een explosie

UEL (Upper Explosive Limit): Maximale concentratie in lucht voor een explosie

Zelfonstekingstemperatuur:

- **MCIT**: ontstekingstemperatuur wolk (stof)
- **LIT:** ontstekingstemperatuur laag (stof)
- **AIT**: ontstekingstemperatuur damp (vloeistof/gas)

Minimale onstekingsenergie (MIE): Minimale elektrische energie om brandstof-lucht mengsel te onsteken

2.1 Chemische Explosies

Volumetrische explosieven: gevoeligheid

Vloeistof/Gas	LEL (%)	UEL (%)	Vlampunt (°C)	Zelfonsteking (°C)	MIE (mJ)
Aceton	2,6	12,8	-20	465	1,15
Acetyleen	2,5	100	-18	305	0,02
Ammoniak	15	28	11	651	680
CS_2	1,3	50	-30	90	0,009
Cyclohexaan	1,3	8	-20	245	0,223
Diethyl ether	1,9	36	-45	180	0,19
Ethanol	3,3	19	13	363	0,65
Waterstof	4	75	-253	570	0,018
Methaan	5	15	-188	537	0,280
Methanol	6,7	36	11	464	0,140
Tolueen	1,27	6,75	4	480	0,24
Propaan	2,1	9,5	-104	450	0,250
CO	12,5	74	-191	609	<0,3
Ethyleenoxide	3	100	-55	429	0,062
Diesel	0,5	7,5	52-96	254-446	0,23

2.1 Chemische Explosies

Volumetrische explosieven: gevoeligheid

Stof (med Ø)	LEL (g/m³)	MCIT (°C)	MIE (mJ)
Cellulose (51)	100	500	250
Koffiepoeder (<10)	60	470	-
Melkpoeder (165)	60	460	75
Bruin steenkool (41)	30	420	160
Tarwemeel (65)	60	410	>100
Polyethylene (150)	150	480	-
Aluminium (23)	60	560	10
Zink (15)	400	540	750
Zwavel (180)	-	260	100-300

2.1 Chemische Explosies

Volumetrische explosieven: gevoeligheid

Parameter	LEL/UEL	Zelfonstekingstemp.	MIE
Temperatuur ↑	↓/↑	-	↓
Druk ↑	↓/↑	↓	↓
Ontstekingsenergie ↑	↓/↑	-	-
Vochtigheid ↑	↑/-	↑	↑
Zuurstofconc. ↑	-/↑	↓	↓
Partikelgrootte ↓	↓/-	-	↓
Turbulentie ↑	-	-	↑

2.1 Chemische Explosies

Volumetrische explosieven: ernst

Snelheid drukstijging:

- **K_{st}** (stofexplosie)
- **K_g** (gas/dampexplosie)

P_{max}: Maximale explosiedruk

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

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

Vooral belangrijk voor keuze installatie en explosieveiligheden



Klasse	K_{st} (bar-m/s)
0	0
1	0-200
2	201-300
3	>300
Stof (Ø)	**K_{st} (bar-m/sec)**
Zaagmeel (29 µm)	205
Poedersuiker (30 µm)	138
Polystyreen (155 µm)	110
Zwavelstof (20 µm)	151
Aluminium (29 µm)	415
Polyethyleen (10 µm)	156

2.1 Chemische Explosies

Volumetrische explosieven: ernst

Gas	K_g (bar-m/sec)
Waterstof	659
Methaan	64
Propaan	96
Ethanol	78

2.1 Chemische Explosies

Volumetrische explosieven: ernst

Parameter	P_{max}	K_{st} of K_g
Temperatuur ↑	↓	-
Druk ↑	↑	↑
Vochtigheid ↑	-	↓
Zuurstofconc. ↑	↑	↑
Partikelgrootte ↓	↑	↑
Turbulentie ↑	-	↑

- Stofexplosie: P_{max} bij **overmaat** brandstof
- Gasexplosie: P_{max} bij **stoechimetrische** concentratie

2.1 Chemische Explosies

Klassering

Gecondenseerde explosieven

Snelle (**auto-oxidatie)** reactie



Chemische explosie



Volumetrische explosieven

Reactie met Atmosferische zuurstof

- High explosives (HE) — **Detonatie**
  - **Primair:** gevoelig
  - **Secundair**: matig gevoelig
  - **Tertiair**: ongevoelig
- Low explosives (LE) — **Deflagratie**
  - **Pyrotechniek**
  - **Aandrijfstoffen**

- VCE: vapour cloud explosion
- Stofexplosie

2.1 Chemische Explosies

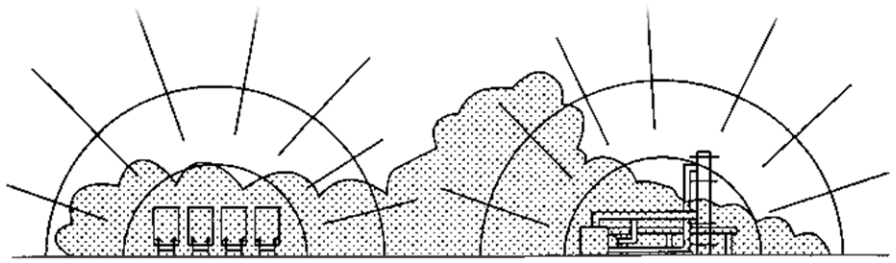
VCE (Vapour Cloud Explosion)

Deflagreren/detoneren van brandstofwolk met overdruk (tot 10 bar)

Bv. na lek of in pijpleidingen/reactorvaten + ontsteking

Insluiting nodig voor explosie (afgesloten ruimte, omringende gebouwen,…)





2.1 Chemische Explosies

VCE (Vapour Cloud Explosion)

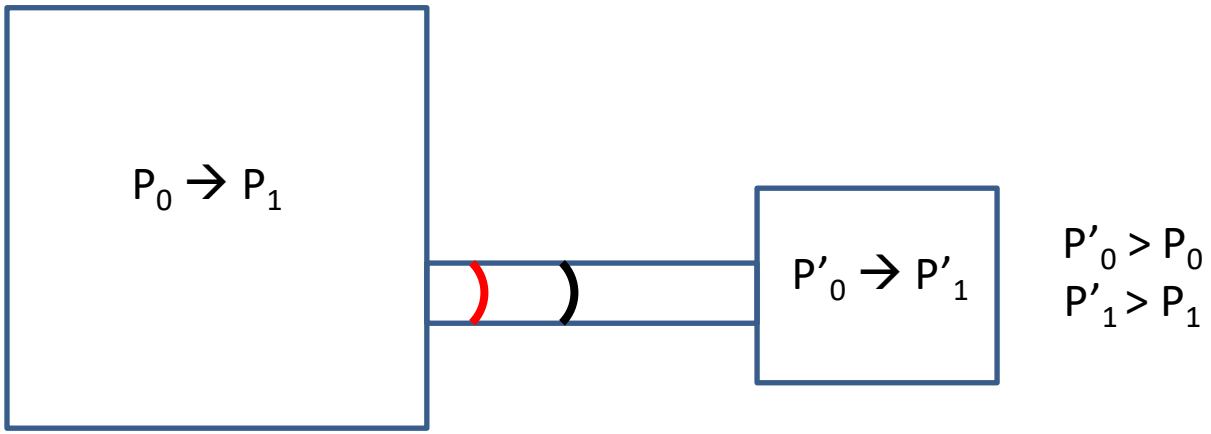
Gas verspreidt zich gemakkelijk, concentratie kan traag opbouwen

Veel lagere MIE als stofexplosies (uitz. metaalstof, ammoniak)

Meestal onzichtbaar (tenzij nevel)

Meer turbulentie (obstakels, etc.): vlamsnelheid stijgt, mogelijk DDT

Drukstijging is relatief t.o.v. de begindruk!! → *Pressure Piling*



2.1 Chemische Explosies

VCE (Vapour Cloud Explosion): TNT equivalentie

Harris-Wickens model, op basis van verbrandingsenergie van brandstof :

$$M_{TNT} = 0.2 \frac{\Delta H_c \, M_{fuel}}{4680 \; kJ/kg}$$

Met ΔH_c = verbrandingsenthalpie (kJ/kg), M_{fuel} = ingesloten massa brandstof (kg), M_{TNT} = equivalente massa TNT (kg)

α = 0.2 , 4680 kJ/kg = explosie energie van TNT

Enkel massa van ingesloten brandstofwolk

Worst-case scenario van geavanceerdere modellen

Overdruk in brandstofwolk wordt gelijk aan **1 bar** gesteld

Overschat zwakke explosies (overdruk < 1 bar)

2.1 Chemische Explosies

VCE (Vapour Cloud Explosion): TNT equivalentie

Verbrandingsenthalpieën

Stof	ΔH_c [kJ/kg]
Waterstof	142900
Ammoniak	22518
Hydrazine	20847
Methaan	55675
Acetyleen	50042
Propane	50436
Ethanol	29713
Diethyl ether	36809
Aceton	30860
Azijnzuur	14570

2.1 Chemische Explosies

VCE (Vapour Cloud Explosion): TNT equivalentie

Vb. *Een propaanlek van 1000 kg heeft een gaswolk gevormd waarvan ongeveer 40 % zich verspreid heeft in een installatie (de rest is in open terrein).*

Indien een ontsteking en explosie van deze gaswolk zou plaatsvinden, wat is dan de geschatte explosiekracht in eq. TNT?

$$M_{TNT} = 0.2 \frac{\Delta H_c \, M_{fuel}}{4680 \; kJ/kg}$$

M_{fuel} = 0.4 x 1000 kg = 400 kg
ΔH_c = 50 436 kJ/kg

$$\boldsymbol{M_{TNT} = 0.2 \frac{50436 \frac{kJ}{kg} \times 400 kg}{4680 \; kJ/kg}} = \textbf{862 kg TNT}$$

2.1 Chemische Explosies

Klassering

Chemische explosie

Gecondenseerde explosieven

Snelle (**auto-oxidatie)** reactie





Volumetrische explosieven

Reactie met Atmosferische zuurstof

- High explosives (HE) — **Detonatie**
  - **Primair:** gevoelig
  - **Secundair**: matig gevoelig
  - **Tertiair**: ongevoelig
- Low explosives (LE) — **Deflagratie**
  - **Pyrotechniek**
  - **Aandrijfstoffen**

- VCE: vapour cloud explosion
- Stofexplosie

2.1 Chemische Explosies

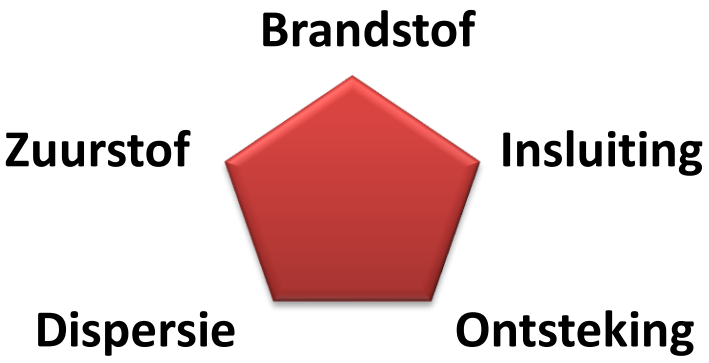
Stofexlosies

Deflagratie brandbare stofwolk (Ø < 0.5 mm) met overdruk generatie

Door grote specifieke oppervlakte: snelle ontbranding

Insluiting en dispersie is noodzakelijk voor explosie

Stofexplosie pentagon:



2.1 Chemische Explosies

Stofexlosies

Meestal minder hevig dan gasexplosies (tragere verbranding)

Zeer breed explosiedomein: LEL = 20-60 g/m^3 , UEL = 2-3 kg/m^3

Concentratie stof in wolk niet homogeen



LEL stofexplosie >> toxische concentratie stof

Duidelijk zichtbaar: belemmert zicht

Stofwolk slaat neer zonder turbulentie

Stoflagen kunnen onopgemerkt blijven

Metaalstof (Al, Mg): zeer hevige explosies, lage MIE

Aanwezigheid brandbaar gas (hybride mengsels): LEL↓ , MIE↓, overdruk ↑

2.1 Chemische Explosies

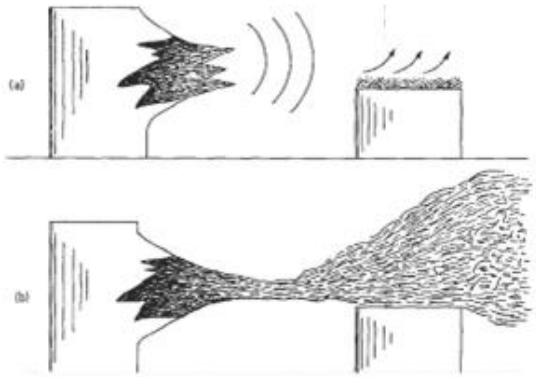
Stofexlosies

Vaak eerst kleine primaire explosie: opgehoopt stof dwarrelt op en ontsteekt

→ Veel krachtigere secundaire explosie

Stelregels, gevaar bij

- Stofophoping: **zodra men erin kan schrijven of voetstappen zien**
- Stofwolk: **25W lamp niet meer goed zichtbaar op 2 m afstand of eigen uitgestrekte arm niet meer zichtbaar**







2.1 Chemische Explosies

Stofexlosies: TNT equivalentie

Meestal minder hevig dan gasexplosies (tragere verbranding)

Maar voor zelfde volume: meer brandstof i.v.m. VCE

Vaak deel onverbrand stof naar buiten geslingerd: kan dan ontbranden

TNT equivalentie (α = 0,1):

$$M_{TNT} = 0.1 \frac{\Delta H_c \, M_{fuel}}{4680 \; kJ/kg}$$

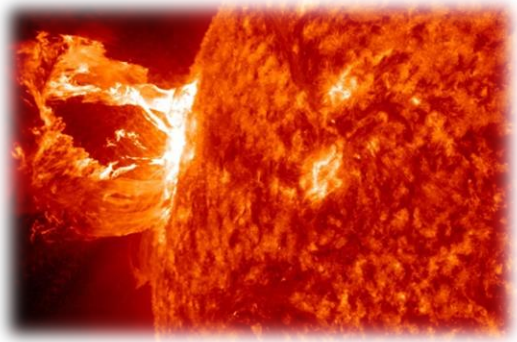
Met ΔH_c = verbrandingsenthalpie (kJ/kg), M_{fuel} = massa brandstof (kg), M_{TNT} = equivalente massa TNT (kg)

Stof	ΔH_c [kJ/kg]
Hout	21700
Steenkool	32500
Zwavel	9163
Aluminium	61111

Chemisch



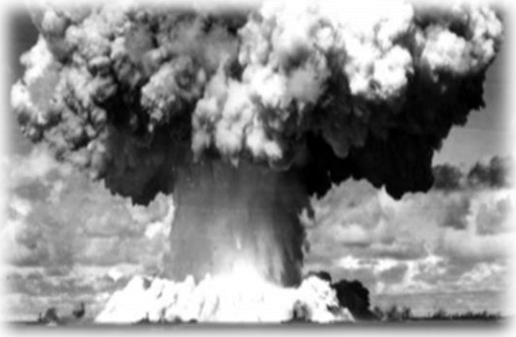
Andere



Explosies

Fysisch





Nucleair

Deel 2: Oorzaken van Explosies

2.1 Chemische explosies

- Detonatie vs deflagratie
- Gecondenseerd: High explosives
- Gecondenseerd: Low explosives
- ADR transportklassen
- Volumetrisch: Gevoeligheid en ernst
- Volumetrisch: Vapour Cloud Explosie (VCE)
- Volumetrisch: Stofexplosie

2.2 Fysische explosies

- Drukvat explosie
- BLEVE
- Implosie
- Thermische explosie

2.3 Nucleaire explosies

2.2 Fysische Explosies

Explosie door snelle expansie gas of snelle fasetransitie naar gas (of beide)

Geen explosieve chemische reactie

Geen vuur, tenzij ontvlambare stoffen

Voorbeelden:

- Drukvat explosie
- BLEVE
- Thermische explosie
- (Implosie)

2.2 Fysische Explosies

Drukvat explosie

Falen recipiënt met gas dat onder (hoge) druk staat

Plotse drukstijging door snelle expansie → explosie

Volume en druk in recipiënt bepalen de explosiekracht

Door overvullen, chemische reactie, verwering vat, impact, brand, …

- Gasvormingsreactie
- Runaway reactie (T >> Tb)
- Decompositiereactie











2.2 Fysische Explosies

Drukvat explosive: TNT equivalentie

Model van *Baker* (ideaal gas) :

$$\mathbf{M_{TNT} = 0.04 \frac{P_1 V}{4680 kJ/kg \times (\gamma - 1)} \left(1 - \left(\frac{P_0}{P_1}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}\right)}$$

Met P_1 = Druk in vat (bar), V = volume vat (L), P_0 = atmosferische druk (bar), γ = warmte capaciteit ratio

- Meeste gecompresseerde gassen kunnen beschouwd worden als ideaal (N_2, lucht, …)
- Uitzondering: vloeibare gassen zoals LNG, ammoniak, propaan → BLEVE (zie verder)

Gas	γ
Waterstof	1,41
Argon	1,67
Helium	1,66
Lucht	1,4
CO2	1,3
Zuurstof	1,4
Stikstof	1,4
Ammoniak	1,31

2.2 Fysische Explosies

Drukvat explosive: TNT equivalentie

Vb.: *Een gascilinder van 80 L met stikstofgas op 200 bar is sterk gecorrodeerd en breekt open. Hoe sterk is de kracht van de explosive in eq. TNT?*

$$\mathrm{M_{TNT}} = 0.04\,\frac{P_1 V}{4680 \times (\gamma - 1)}\left(1 - \left(\frac{P_0}{P_1}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}\right)$$

$$\mathrm{M_{TNT}} = 0.04\,\frac{200\ bar \times 80\ L}{4680\ kJ/kg \times (1.4-1)}\left(1 - \left(\frac{1.013\ bar}{200\ bar}\right)^{\frac{1.4-1}{1.4}}\right) = \mathbf{0.266\ kg\ TNT}$$

! TNT = gecondenseerd explosief (overschatting) !

2.2 Fysische Explosies

Implosie

Falen recipiënt in zeer lage onderdruk (<< 1 bar)

Atmosferische lucht stroomt snel inwaarts

Weinig energie vrijgave wegens klein drukverschil (<1 bar)

Voor zeer lage drukken:

$$M_{TNT} = \frac{0.1\,VP_0}{4680\ kJ/kg}$$

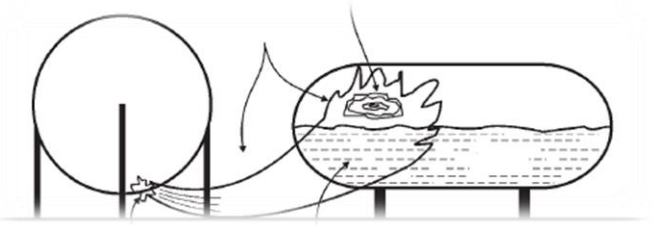
Met V = volume recipiënt (L) ,
P_0 = atmosferische druk (bar)

Na implosie mogelijk fragmenten van recipiënt uitwaarts geslingerd

2.2 Fysische Explosies

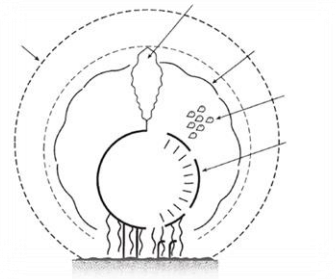
BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion)

Vloeistof boven kookpunt in drukvat, dat plots openbarst met explosieve verdamping (*flashing*) tot gevolg



Meestal door externe brand:

- Brand doet vloeistof verdampen: P stijgt
- Veiligheidsklep opent: uitdampen vloeistof
- Tot brand boven vloeistofniveau: T_{wand} ↑ tot deze scheurt
- Explosieve *flashing* van deel resterende vloeistof



Vloeistof hoeft niet brandbaar te zijn (vuurbal mogelijk indien wel)

2.2 Fysische Explosies

BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion)

Veiligheidsklep kan indicatie gevaar zijn (continu open = veel verdamping)

BLEVE onder controle houden: tank koelen! (10 L/min per m^2)

Druk ontlasten indien mogelijk

Extern vuur blussen

Typische tijd van begin brand tot BLEVE: 5-30 min, als tank geïsoleerd: tijd ↑

Hoger risico op BLEVE:

- Tank volledig verzwolgen door vuur
- Steekvlam op tank
- Contact vuur hoog op tank

Mogelijke vrijgave toxische producten!

2.2 Fysische Explosies

BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion)

Belangrijke factor: T_s = Superheat limit voor explosieve flashing

$T_s = 0.895\ T_c$, *met T_c = kritische temperatuur*

$T < T_s$: "koude" BLEVE: drukvat explosie

$T \geq T_s$: "warme" BLEVE

- Berekening explosiekracht is complex
- Voor LPG en simpele KWS: $\mathbf{M_{TNT} = 0.013\ M_{KWS}}$

Andere effecten: zie volgend deel cursus

Stof	T_c (°C)	T_s (°C)
Propaan	97	87
Ammoniak	132	118
Methaan	-82	-73
Zuurstof	-119	-107
Lucht	-141	-126
Water	374	335

2.2 Fysische Explosies

Thermische explosie

Zeer plotse opwarming van vloeistof/vaste stof

Zeer snelle faseovergang vloeistof/vaste stof → gas

Expansie veroorzaakt schokgolf

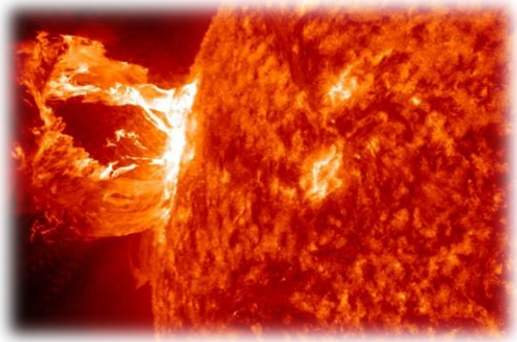
Bv.: gesmolten staal + water, Hete olie + water,…



Chemisch



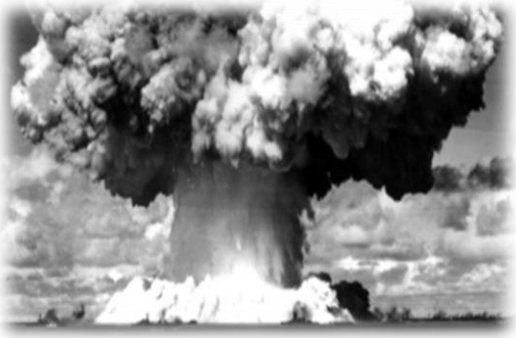
Andere



Explosies

Fysisch





Nucleair

2.3 Nucleaire Explosies

Energie door fissie of fusie atoomkernen

Enorme kracht (kiloton – megaton TNT equivalent)

Effecten (afh type bom):

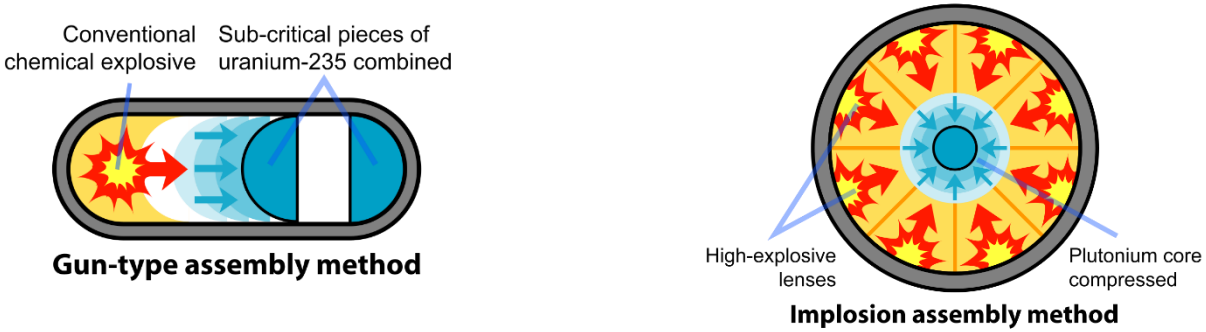
- Schokgolf (± 50%)
- Thermische straling (± 35%)
- Nucleaire straling (± 5%)
- Residuele straling (± 10%)

T ≈ 10 miljoen °C

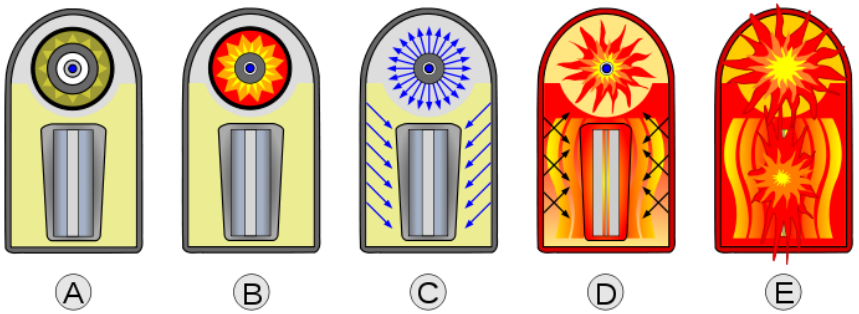


2.3 Nucleaire Explosies

Basisprincipe fissiebom: Kritische massa bereiken (kettingreactie)



Principe thermonucleair(fusie) wapen: via fissie kernfusie initiëren



TNT equivalentie: kracht kernbom is standaard uitgedrukt in ton TNT.

Einde deel 2