

# Onderzoek ontwerp Vuurwerkopslag

Onderzoek & Ontwerp



Student: L.J. Visser  
Studienummer: 9894506  
Datum: 25 oktober 2002

Afstudeerder:	L.J. Visser	Student B&B, CT, TU Delft
Afstudeercommissie:	Prof. dipl-ing. J.N.J.A. Vamberský (voorzitter) Ir. E.V. Brands Ir. T.H.W. Horstmeier Ir. S.I. Suddle  Dr. ir. J. Weerheijm	Hoogleraar Utiliteitsbouw, TU Delft, directeur Corsmit ProXYZ Consultancy, Gouda Civiele Bedrijfskunde, TU Delft Promovendus Veiligheid bij Meervoudig Ruimtegebruik, TU Delft Explosie preventie en bescherming, TNO Prins Maurits Laboratorium, Rijswijk (ZH)
Informanten:	Drs. M. van der Plas  Ing. J.G.A.M. Verbakel	Expertisecentrum Externe Veiligheid en Vuurwerk (CEV), RIVM, Bilthoven Ministerie van VROM, Den Haag

## VOORWOORD

In dit rapport zijn de resultaten van een onderzoek naar het ontwerp van een vuurwerkopslag dat voldoet aan de regels van het Vuurwerkbesluit [31] weergegeven.

Dit onderzoek is uitgevoerd als afronding van de studie Civiele Techniek aan de Technische Universiteit te Delft, met de afstudeerrichting Bouwtechniek en Bouwproces. Het onderzoek is uitgevoerd bij en in opdracht van ProXYZ Consultancy in Gouda.

De afstudeercommissie bestaat uit de volgende personen: Prof. dipl-ing. J.N.J.A. Vamborský (voorzitter, Hoogleraar Utiliteitsbouw TU Delft), ir. E.V. Brands (ProXYZ consultancy, Gouda), ir. T.H.W. Horstmeier (Civiele Bedrijfskunde, TU Delft), ir. S.I. Suddle (Promovendus Veiligheid bij Meervoudig Ruimtegebruik, TU Delft), dr. ir. J. Weerheijm (Explosie preventie en bescherming, TNO PML).

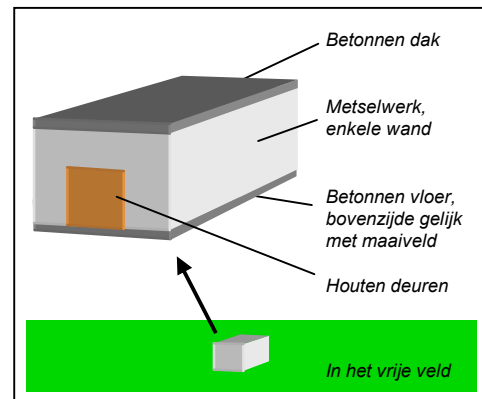
Naast de commissieleden wil ik graag de volgende personen bedanken voor hun medewerking: ing. J.G.A.M. Verbakel (Medeopsteller Vuurwerkbesluit, Ministerie van VROM), drs. M. van der Plas (Expertisecentrum Externe Veiligheid en Vuurwerk) en de heer G.J. Wagenvoort (Branchevereniging professioneel vuurwerk).

## SAMENVATTING

De vuurwerkkramp in Enschede, op 13 mei 2000, heeft het Ministerie van VROM ertoe gebracht het Vuurwerkbesluit samen te stellen met daarin de nationale regelgeving voor alle handelingen met vuurwerk. De basisgedachte van het Vuurwerkbesluit is het behalen van een hoge mate van veiligheid door het stellen van aangescherpte veiligheidseisen.

In het Vuurwerkbesluit wordt de minimale veiligheidsafstand van opslag tot een kwetsbaar object gesteld op 800 meter en de maximale hoeveelheid professioneel vuurwerk per vuurwerkinrichting op 6.000 kg.

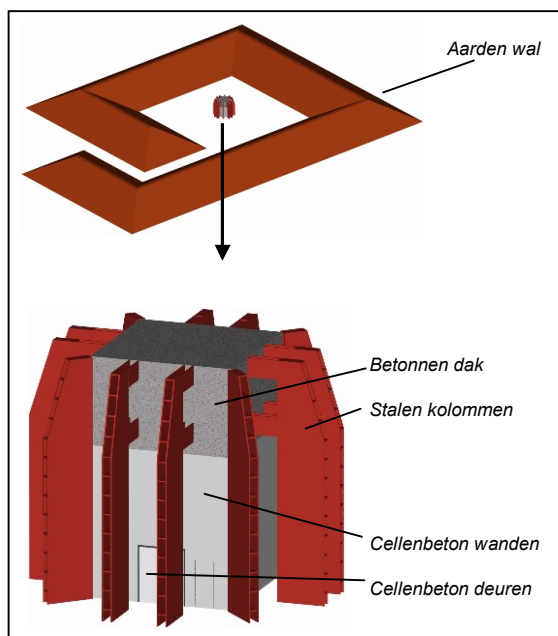
De hoge bebouwingsdichtheid in Nederland vraagt om reductie van de veiligheidsafstand. Mocht er al een geldige locatie worden gevonden, dan staat de toegestane hoeveelheid vuurwerk die opgeslagen mag worden in schril contrast met de benodigde opslagcapaciteit.



*Uitgangspuntensituatie Vuurwerkbesluit*

Daarom is dit onderzoek uitgevoerd met als doelstelling: Het ontwerpen van een vuurwerkopslag met een benodigde veiligheidsafstand kleiner dan 800 meter, op basis van dezelfde veiligheidscriteria als het Vuurwerkbesluit.

Om te komen tot dit ontwerp zijn op verschillende gebieden analyses uitgevoerd, waarvan de resultaten worden meegenomen in het opstellen van ontwerpalternatieven. Uit de analyse van het explosieproces, waarbij de verschillende explosie-effecten, de luchtschok, de grondschok, de hittestraaling en de brokstukuitwerping worden, volgt dat de brokstukuitwerping en de luchtschok de belangrijkste parameters zijn bij het bepalen van de veiligheidsafstand. Uit de analyse van de constructie blijkt dat de materiaalkeuze de brokstukeigenschappen bepaalt.



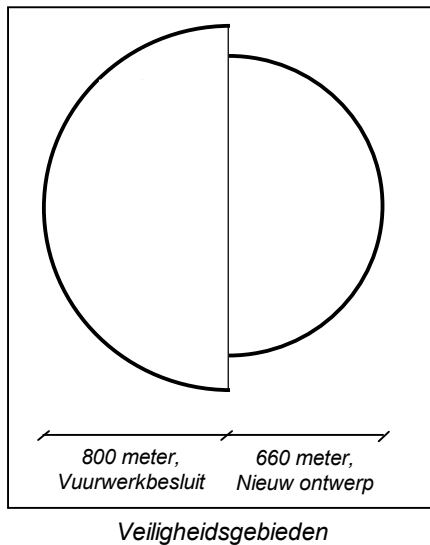
*Ontwerp*

Een constructie bezwijkt naar aanleiding van een explosie totaal of gedeeltelijk. Vanwege de verwachte beheersbaarheid van het explosie-effect brokstukken is gekozen voor de gedeeltelijk bezwijkende constructie. Het ontwerp bestaat uit een zwaar dak dat niet bezwijkt en lichte wanden die bij een explosie horizontaal worden weggeworpen. De dakconstructie wordt vastgehouden door niet bezwijkende kolommen. De weggeworpen brokstukken worden opgevangen in de rondom de constructie opgeworpen, aarden wal.

Op basis van de vastgestelde interne hoeveelheid vuurwerk (6.000 kg) zijn benodigde interne ruimteafmetingen bepaald, waarna aan de hand van de daaraan vergelijkbare hoeveelheid TNT (3.600 kg) de constructieafmetingen van het ontwerp zijn bepaald. Dit levert een constructie met een vrije hoogte van 6 meter en een interne lengte en breedte van 5,4 meter. De dakconstructie die de piekdruk moet kunnen weerstaan is ongeveer 3 meter dik. De kolommen

zijn aan de buitenzijde van de dakconstructie momentvast verbonden. Aan de onderzijde zijn de kolommen momentvast verbonden aan de vloerconstructie, zodat de kolommen zowel aan de dakconstructie als aan de vloerconstructie evenveel trekkrachten kunnen overbrengen. De wanden zijn van 150 mm dik cellenbeton en zijn opgebouwd uit 750 mm brede verticale platen, die vrij op de vloerconstructie staan en aan de bovenzijde horizontaal afsteunen tegen de dakplaat. De aarden wal

rondom de constructie heeft een bovenbreedte van 2 meter, een talud van 30, een afstand van het constructiecentrum tot de voet van het talud van 30 meter en een hoogte van 6 meter boven de bovenzijde van de wanden in de opslagconstructie.



Uit de toets op luchtschok en brokstukken volgt dat het ontwerp betreffende de brokstukuitworp sterk is verbeterd ten opzichte van de 'uitgangspuntensituatie'.

De veiligheidsafstand kan verlaagd worden naar 660 meter, omdat de luchtschok, na de geldige vermindering van het, aan het vuurwerk vergelijkbare, aantal kilo's TNT, op 800 meter lagere piekdruk waarden heeft, dan het piekdruk criterium van 2 kPa.

Om de benodigde veiligheidsafstand van het ontwerp verder te reduceren wordt aanbevolen de eigenschappen van de verschillende vuurwerksoorten en de mogelijkheden tot het scheiden ervan nader te onderzoeken.

Daarnaast wordt aanbevolen het nieuwe ontwerp verder uit te werken en te detailleren, ten einde het in de praktijk te kunnen toetsen.

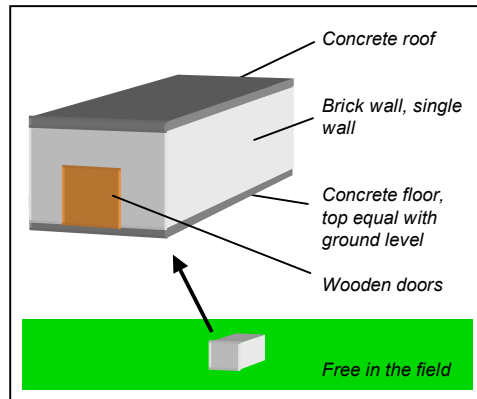
**SUMMARY**

The fireworks disaster in Enschede, which happened on the 13th of may 2002, in The Netherlands, was for the responsible ministry one of the main reasons to compose national regulations for all fireworks handlings. The basic idea of these regulations is to reach a high safety degree through several sharpened safety rules.

The required safety distance from a fireworks storage to vulnerable objects is 800 meters, the maximum amount of fireworks to be stored is 6.000 kgs.

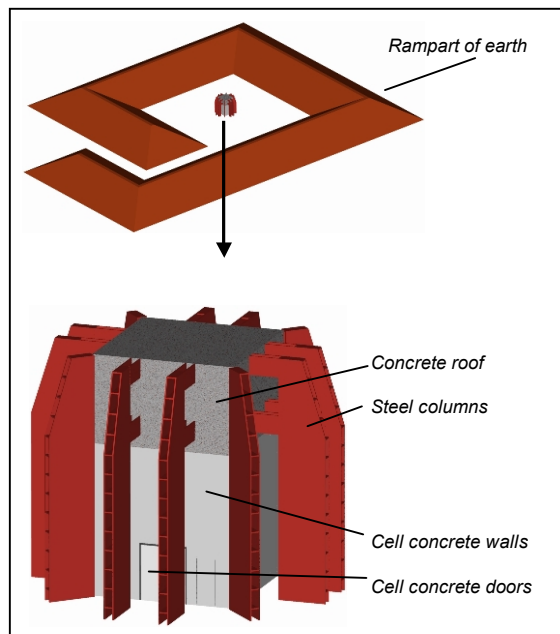
The high building density in the Netherlands requires a more less safety distance. And even if a location can be found, the maximum amount of fireworks material to be stored is smaller than the storage capacity needed.

Therefore this research aims to make a design of a fireworks storage for 6.000 kgs of the most powerful fireworks with a smaller safety distance. In this design, the same basic idea of safety as has been used in the fireworks regulations.



*Situation Fireworks regulations*

To develop a this design several analyses are made to compose alternatives. The diversity of explosives and their effects like blast wave, ground shock, thermal radiation and fragmentation are analysed in the explosion process analysis. This analysis points out that the most important explosion-effects are fragmentation and blast wave. The deviations in classification in the firework analysis is a strong argument to separate these classifications. The construction analysis shows that the occurrence and behaviour of fragmentation heavily depends on the type of material.



*Design*

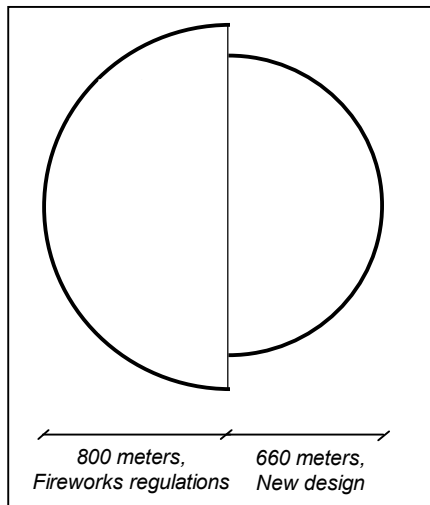
Due to an explosion the construction collapse total or partial. Because the control of the explosion effect fragmentation the design is based on partial collapse.

To prevent vertical thrown fragments a heavy roof construction and light walls are selected. Horizontal thrown fragments are caught by a rampart which surrounds the building.

The internal space needed is based on the maximum amount of fireworks allowed (6.000 kg, Classification 1.1). The construction dimensions are based on the equivalent amount of TNT (3.600 kg). This leads to a construction with an internal height of 6 meters and an internal length and width of 5,4 meters. The roof construction has a thickness of 3 meters to withstand the peak pressure of the explosion.

The columns are placed at the outside of the roof an floor construction and are connected 'moment fixed'. The columns can give as much tensile strength to

the floor as to the roof. The walls consists of 150 mm thick cell concrete vertical plates with a width of 750 mm resting on the floor construction and supported by the roof construction. The rampart of earth around the construction has an upper width of 2 metres, a slope of 30 degrees, a distance from the construction centre to the feet of the rampart of 30 metres and a height of 6 metres above the top of the walls in the storage construction.



*Comparison of safety areas*

The results of this research on both air blast and fragmentation indicates that the new design has been improved especially for the fragmentation emission.

Because the valid reduction of the equivalent kilo grams of TNT, the air blast has a lower peak pressure at 800 meters than the criteria of 2 kPa, so the safety distance can be reduced to 660 meters.

To reduce the safety distance even further is recommended to investigate the effects of storage of the different fireworks classes separately. To verify the design in practice it is also recommended to detail de new design.

**INHOUDSOPGAVE**

<b>1</b>	<b>INLEIDING</b>	<b>10</b>
<b>2</b>	<b>INLEIDING EXPLOSIEVE STOFFEN</b>	<b>11</b>
2.1	Classificatie	11
2.2	Explosie	12
2.2.1	Vuurwerk versus explosieve stoffen	12
2.3	Explosie-effecten	12
2.3.1	Luchtschok	12
2.3.2	Brokstukken	14
2.3.3	Grondschock	14
2.3.4	Hittestraling	15
2.3.5	Gifdampen	15
2.4	Verschalen van explosie-effecten	15
<b>3</b>	<b>VUURWERKBESLUIT</b>	<b>16</b>
3.1	Vuurwerkbesluit in een notendop	16
3.1.1	Vuurwerkconcentratiegebieden	16
3.2	Basisgedachte	17
3.2.1	Explosiemodel	17
3.3	Kritische blik Vuurwerkbesluit	18
3.3.1	Extern transport	18
3.3.2	Vuurwerk	19
3.3.3	Externe veiligheid	19
3.3.4	Bedrijfsvoering	20
3.3.5	Constructie	21
3.3.6	Resultaat kritische blik	22
<b>4</b>	<b>PROGRAMMA VAN EISEN</b>	<b>23</b>
4.1	Randvoorwaarden	23
4.2	Uitgangspuntensituatie Vuurwerkbesluit	25
4.3	Uitgangspunten	28
<b>5</b>	<b>KWALITATIEVE VERKENNING</b>	<b>30</b>
5.1	Vuurwerk	30
5.2	Explosieproces	30
5.2.1	Initiatie	31
5.3	Bedrijfsvoering	31
5.4	Constructie	33
5.5	Resultaat verkenningen	35
<b>6</b>	<b>UITWERKING ASPECTEN</b>	<b>36</b>
6.1	Compartimenteren	36
6.1.1	Mogelijke variaties	36
6.1.2	Invloed op explosie-effecten	36
6.1.3	Gekozen variant	37

---

6.2	Klassen scheiden	38
6.2.1	Mogelijke variaties	38
6.2.2	Invloed op explosie-effecten	39
6.2.3	Gekozen variant	39
6.3	Constructie	40
6.3.1	Mogelijke variaties	40
6.3.2	Invloed op explosie-effecten	41
6.3.3	Gekozen variant	43
6.4	Hoogteligging en omgevingsobjecten	45
6.4.1	Mogelijke variaties	45
6.4.2	Invloed op explosie-effecten	45
6.4.3	Gekozen variant	47
<b>7</b>	<b>ONTWERP UITWERKING</b>	<b>48</b>
7.1	Algemeen	48
7.1.1	Opbouw constructie principe	48
7.1.2	Inhoud compartiment	49
7.2	Compartiment functioneel	50
7.2.1	Vorm constructie	50
7.2.2	Benodigde interne afmetingen	50
7.3	Compartiment constructief	51
7.3.1	Dakplaat	51
7.3.2	Vloer	53
7.3.3	Kolommen	54
7.3.4	Wanden	61
7.3.5	Aarden wal	62
7.4	Visualisatie ontwerp	69
<b>8</b>	<b>TOETS</b>	<b>73</b>
8.1	Luchtschok	73
8.2	Brokstukken	73
8.3	Veiligheidsafstanden	75
<b>9</b>	<b>CONCLUSIE EN AANBEVELINGEN</b>	<b>76</b>
9.1	Conclusie	76
9.2	Aanbevelingen	77
<b>BIJLAGEN</b>		<b>79</b>
	Bijlage 1: Woordenlijst	79
	Bijlage 2: Literatuurlijst	82
	Bijlage 3: Personen en instanties	85
	Bijlage 4: Internetlocaties	85

# 1 Inleiding

Naar aanleiding van twee vuurwerkrampen (Culemborg 14 februari 1991 en Enschede 13 mei 2000) is er nieuwe Nederlandse wetgeving opgesteld door het ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer voor vuurwerkopslag en verhandeling van vuurwerk. Dit per 1 maart 2002 van kracht geworden Vuurwerkbesluit bundelt en verscherpt de bestaande wetgeving met betrekking tot vuurwerk en heeft betrekking op het hele vuurwerkproces van importeren tot het afsteken.



Figuur 1.1: Vuurwerkrampe Enschede, 13 mei 2000 {2}

De minimale veiligheidsafstand van opslag tot een kwetsbaar object wordt in het Vuurwerkbesluit gesteld op 800 meter, de maximale hoeveelheid vuurwerk per vuurwerkinrichting op 6.000 kg. De hoge dichtheid van kwetsbare objecten in Nederland vraagt om reductie van de veiligheidsafstand, omdat het vinden van een geschikte locatie zeer moeilijk is. Mocht er al een geldige locatie worden gevonden, dan staat de toegestane hoeveelheid in schril contrast met de benodigde opslagcapaciteit.

**Doelstelling:** “Het ontwerpen van een vuurwerkopslag, met een veiligheidsafstand kleiner dan 800 meter, op basis van dezelfde veiligheidscriteria als het Vuurwerkbesluit.”

De opbouw van dit rapport is als volgt. In hoofdstuk 2 is een inleiding op explosieve stoffen opgenomen. In hoofdstuk 3 is het Vuurwerkbesluit behandeld. Hoofdstuk 4 bevat het programma van eisen, waarin de randvoorwaarden voor het ontwerp naar aanleiding van het Vuurwerkbesluit zijn opgesteld. In hoofdstuk 5 is op diverse gebieden gezocht naar mogelijkheden om de explosie-effecten te beïnvloeden. Hoofdstuk 6 geeft de uitwerking van de in het hoofdstuk 5 gevonden aspecten en wordt het ontwerp uit de alternatieven geselecteerd. In hoofdstuk 7 wordt het ontwerp functioneel en constructief uitgewerkt. In hoofdstuk 8 is het ontwerp vergeleken met de uitgangspuntensituatie en getoetst op de luchtschok en de brokstukken. Hoofdstuk 9 bevat de conclusies en aanbevelingen.

## 2 Inleiding explosieve stoffen

Ter inleiding op explosieve stoffen zijn de indeling van explosieve stoffen in transportgevaklassen, de explosie als zodanig en de explosie-effecten in dit hoofdstuk opgenomen.

### 2.1 Classificatie

Door de VN is een transportclassificatie opgesteld, die is omschreven in het ADR [3], met het doel vervoerde goederen tijdens transport te identificeren. Transportgevakklasse 6 bevatten bijvoorbeeld de giftige stoffen en transportgevakklasse 3 de brandbare vloeistoffen. Ontplofbare stoffen vallen in de transportgevakklasse 1. Deze klasse is onderverdeeld in een zestal subklassen die representatief zijn voor een bepaald explosie-effect [3, 27]. In dit rapport wordt de transportgevaklassen voortaan kortweg met klasse aangeduid.

Tabel 2.1: Subklassen van transportgevakklasse 1

Subklassen	
1.1	: Stoffen en voorwerpen met gevaar voor massa explosie (een massa explosie is een explosie die praktisch op hetzelfde ogenblik plaatsvindt in nagenoeg de gehele lading)
1.2	: Stoffen en voorwerpen met gevaar voor scherfwerking, maar niet met gevaar voor massa explosie
1.3	: Stoffen en voorwerpen met gevaar voor brand en met een gering gevaar voor luchtdruk- of scherfwerking of met gevaar voor beide, maar niet met gevaar voor massa explosie, <ul style="list-style-type: none"> <li>• waarvan de verbranding aanleiding geeft tot een aanzienlijke warmtestraling, of</li> <li>• die één voor één uitbranden, waarbij een geringe luchtdruk- of scherfwerking of beide optreden</li> </ul>
1.4	: Stoffen en voorwerpen die slechts een gering explosiegevaar opleveren indien ze tijdens het vervoer tot ontsteking of inleiding komen. De gevolgen blijven in hoofdzaak beperkt tot het collo en leiden niet tot scherfwerking van enige omvang of reikwijdte. Een van buitenaf inwerkende brand mag niet leiden tot een explosie op praktisch hetzelfde ogenblik van vrijwel de gehele inhoud van het collo
1.5	: Stoffen die zeer ongevoelig voor initiatie zijn, maar als initiatie toch optreedt dan gedragen zij zich als massa-explosief zijnde
1.6	: Artikelen die extreem ongevoelig zijn voor initiatie. Zij zijn niet massa explosief

Handelingen met betrekking tot transport moeten overeenkomstig de bij de subklasse opgestelde procedures verlopen. Daarbij wordt onderscheid gemaakt tussen verpakt en onverpakt vuurwerk. Als toevoeging op de subklasse wordt een compatibiliteitsgroep meegegeven die iets zegt over de mate van gevoeligheid of de aard van de stof.

De compatibiliteitsgroepen die in verband met vuurwerkclassificatie veel aan de orde komen zijn G en S. Andere compatibiliteitsgroepen zijn opgenomen in de bijlage 2 en zijn overgenomen uit het ADR [3].

Tabel 2.2: Compatibiliteitsgroepen

Compatibiliteitsgroepen	
G	: Pyrotechnische stof of voorwerp dat een pyrotechnische stof bevat, of voorwerp dat zowel een ontplofbare stof als een lichtverspreidende, brandstichtende, traanverwekkende of rook producerende stof bevat (met uitzondering van een door water te activeren voorwerp of een voorwerp dat witte fosfor, fosfiden, een pyrofore stof, een brandbare vloeistof of brandbare gel of hypergolische vloeistoffen bevat)
S	: Stof of voorwerp zodanig verpakt of ontworpen dat alle gevaarlijke effecten ten gevolge van het onopzettelijk in werking treden beperkt blijven tot het inwendige van het collo, tenzij het collo is aangetast door brand. In dit laatste geval moeten alle effecten van luchtdruk of scherfwerking voldoende beperkt blijven, zodat ze de brandbestrijdings- of andere noodmaatregelen in de onmiddellijke omgeving van het collo niet aanmerkelijk hinderen of beletten

## 2.2 Explosie

Een explosie is een fysisch of chemisch proces, waarbij in een korte tijd veel energie vrijkomt door expanderende gassen en warmteontwikkeling. Het ontstaan van een chemische explosie, waarbij verschillende stoffen met elkaar reageren, treedt op na het toevoegen van de benodigde initiatie-energie door bijvoorbeeld warmte, stoot, wrijving, vonk, schok en/of straling [1, 4, 5, 8, 10, 11, 15, 23, 26]. Wanneer na initiatie van een enkel artikel alle andere aanwezige artikelen tegelijkertijd worden ontstoken, wordt dit een massa-explosie genoemd.

De reactiesnelheid van de massa-explosie is de snelheid waarmee initiatie door de stoffen plaatsvindt, de snelheid dus waarmee de stof reageert. Een reactiesnelheid boven de 1.000 m/s schrijft men toe aan detonaties (High Explosives, HE, ideale verbranding) en lagere snelheden aan deflagraties. Hoe hoger de snelheid hoe groter o.a. de piekdruk die ontstaat vanwege de expanderende gassen. Deze piekdruk is een indicatie voor het schade en letselbeeld in de omgeving.

### 2.2.1 Vuurwerk versus explosieve stoffen

In de explosieliteratuur wordt verwezen naar het detonerende explosief TNT (ideale verbranding van de springstof) om andere explosieve stoffen mee te vergelijken. Voor militaire munitiedepots wordt met deze stof gewerkt, maar daar wordt geen constructie ontworpen die bestand is tegen interne explosies (6).

Als een explosieve stof detoneert kan middels de massaspecifieke energie de kracht van de stof in TNT worden uitgedrukt.

Tabel 2.3: Enkele TNT – equivalentiecoëfficiënten [10]

Explosief	Massa specifieke energie	TNT equivalentie	Dichtheid	Detonatie snelheid	Detonatie druk
	kJ/kg		Mg/m <sup>3</sup>	km/s	Gpa
Octol, 70/30 (70% HMX, 30% TNT)	4500	0.994	1.80	8.48	34.2
Pentolite 50/50 (50% PETN, 50% TNT)	5110	1.129	1.66	7.47	28.0
Picric acid	4180	0.926	1.71	7.26	26.5
TNT	4520	1.000	1.60	6.73	21.0

In het algemeen kan professioneel vuurwerk niet met TNT vergeleken worden, omdat het vuurwerk niet massaal explodeert en dus zeker niet detoneert. Vuurwerkartikelen die ingedeeld dienen te worden in transportgevaarklasse 1.1 verbranden echter wel zo snel dat er een massa-explosie optreedt en er zelfs met een detonatie rekening gehouden moet worden.

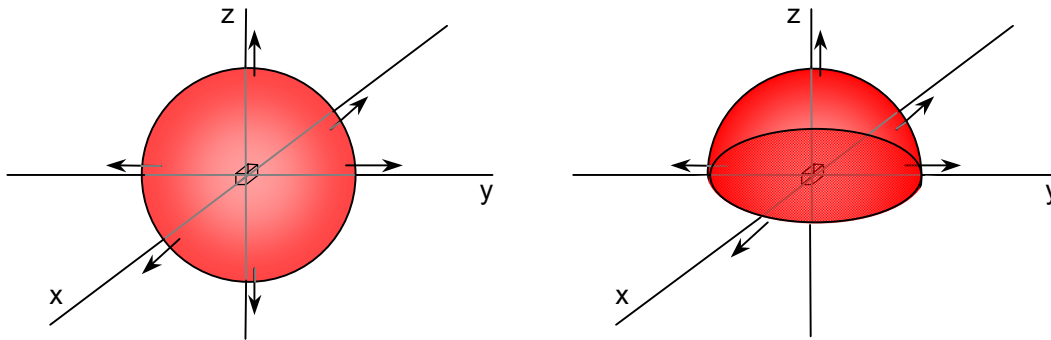
## 2.3 Explosie-effecten

Niet één explosie is gelijk omdat, afhankelijk van de samenstelling van de exploderende stoffen, het accent bij één van de optredende explosie-effecten ligt.

### 2.3.1 Luchtschok

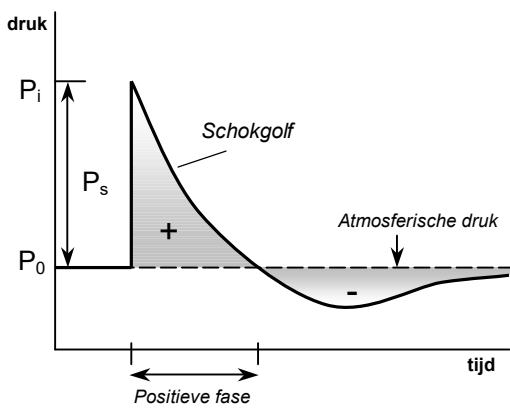
Bij een chemische explosie treedt een snelle expansie van gassen op. Dit expanderen levert afhankelijk van de snelheid en de kracht van de expansie een luchtschok op.

De luchtschok plant zich met hoge snelheid voort door de lucht, met een bepaalde piekoverdruk, duur en amplitude. In geval van een oppervlakte explosie, plant de luchtschok zich voort in de vorm van een halfbolvormig sferisch front (zie figuur 4.1) en dient de hoeveelheid explosieve stof met een compensatiefactor van ongeveer 1,7 te worden vermenigvuldigd om de hoogte van de piekdruk te bepalen ten opzichte van de explosie in de vrije lucht.

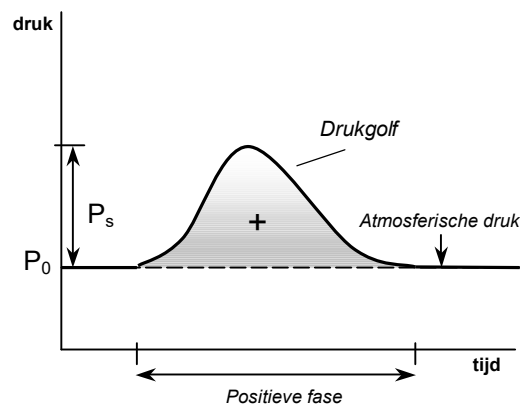


Figuur 2.1: Bolvormig explosie in de lucht en halfbolvormig oppervlakte explosie

Het typische drukverloop van de luchtschok van een detonerend explosief is te karakteriseren door een schokgolf waarin de druk instantaan toeneemt van atmosferische druk tot de statische overdruk (zie figuur 2.2). Deze instantane druktoename, piekoverdruk genoemd, neemt snel af, waarbij er zelfs geleidelijk een tijdelijke onderdruk ontstaat. De piekoverdruk karakteriseert samen met de impuls (oppervlak onder het druk-tijd diagram ofwel de totale energie) het destructieve vermogen.



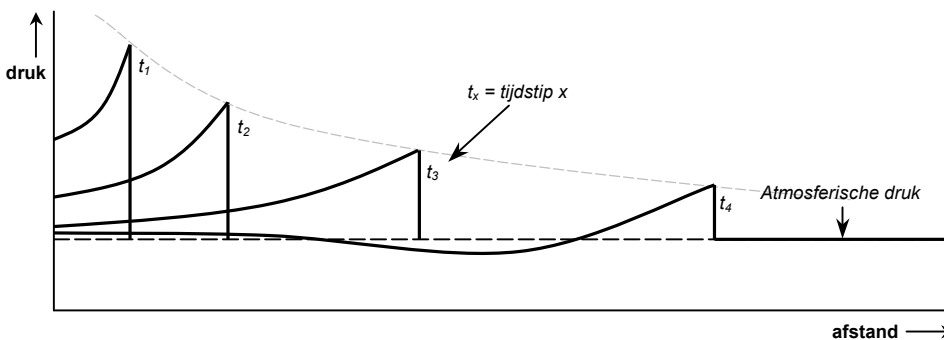
Figuur 2.2: Schokgolf



Figuur 2.3: Druk golf

Bij niet-ideale explosies (vuurwerk), treedt een drukgolf op die eerder het profiel heeft van de in figuur 2.3 geschetste drukgolf. Bij de drukgolf wordt het medium samengedrukt en deze druk wordt doorgegeven. Afhankelijk van het type golf en het type medium wordt er een maximale golfsnelheid bereikt [23].

Hoe meer objecten een luchtschok tegenkomt, hoe meer energie omgezet wordt. De uitbreiding snelheid neemt zo af en reduceert uiteindelijk tot nul.



Figuur 2.4: Schokgolf van een detonerend explosief in tijd en afstand

Op de plaats waar de schokgolf reflecteert treedt een hogere druk op dan de druk die in de schokgolf aanwezig is, dit wordt de gereflecteerde piekdruk genoemd. De maximale druk die in de dynamische

toestand rondom de constructie optreedt is de side-on piekdruk. Voor het bepalen van de side-on en de gereflecteerde piekdruk wordt gebruik gemaakt van bestaande grafieken en tabellen (bijlage 4.3).

### 2.3.2 Brokstukken

Wanneer bij een explosie de directe omhulling of beschermingsconstructie van het explosief bezwijkt worden fragmenten van verschillende grootte gevormd. Deze primaire fragmenten bezitten een zeer hoge startsnelheid en kinetische energie en zijn hierdoor een gevaar voor andere explosieve stoffen, personen en/of constructies.

Daarnaast kunnen primaire fragmenten secundaire fragmenten van de (bewaar-) constructie eromheen of in de buurt losslaan of omhullende constructie perforeren. Deze primaire en secundaire fragmenten vormen op enige afstand (100 meter) veelal een groter gevaar voor onbeschermd kwetsbare personen en objecten dan de luchtschok [23].

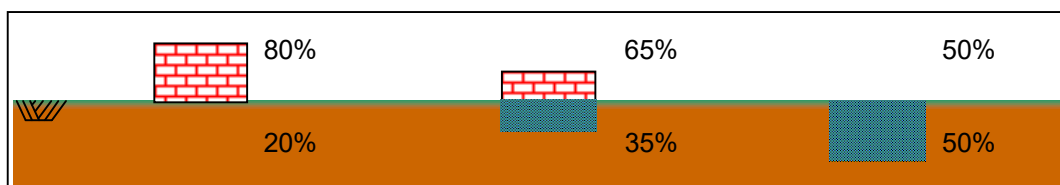
Fragmenten (brokstukken) vliegen door de lucht totdat zij door luchtweerstand, een object of de grond tot stilstand worden gebracht. Hoe groter de massa van het brokstuk, hoe meer kinetische energie het brokstuk kan bevatten en hoe verder deze wordt weggegooid. Voor de massaverdeling van primaire fragmenten, snelheid en impactsnelheid zijn verschillende formules bekend in de literatuur [10, 23].

De stromingskrachten en gravitatiekrachten die op de brokstukken werken bepalen hun richting. Deze (lucht-)stromingskrachten worden bepaald door de snelheid van het fragment door de lucht, de luchtdichtheid en de vorm en oriëntatie van het fragment op elk ogenblik in de tijd. Een accurate beschrijving van de stromingskrachten gedurende de vlucht is moeilijk, zo niet onmogelijk vanwege de onbekende grootte, vorm, richting en snelheid van het brokstuk op het moment van uitbraak [10, 11, 19].

De effecten op de omgeving kunnen niet worden bepaald zonder gebruik te maken van een risicoanalyse. Wel zijn er enkele algemene aannamen met betrekking tot de fragmenten in de literatuur [10]. Zo wordt een fragment dat minimaal 80 Joules bezit als dodelijk beschouwd. Verder wordt gesteld dat er in het vrije veld, bij een fragmentdichtheid van 1 op de 56 m<sup>2</sup>, een raakkans van 1% bestaat, omdat voor het lichaam van een mens een oppervlakte van 0,56 m<sup>2</sup> is vastgesteld [2].

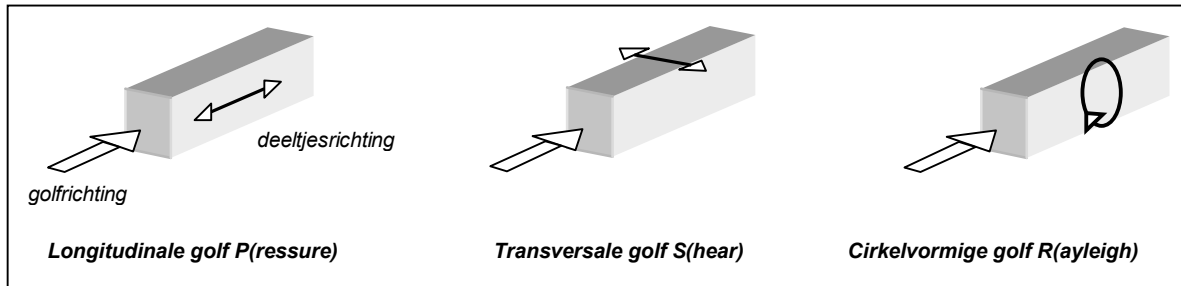
### 2.3.3 Grondschock

Een deel van de vrijgekomen explosie-energie wordt aan de grond overgedragen. De sterkte van de grondschock is afhankelijk van de locatie van de explosie ten opzichte van het maaiveld. Ingegraven explosieve stoffen leveren een hogere grondschock in de bodem en een schokgolf met een lagere piekdruk dan explosieve stoffen die aan de oppervlakte of in de lucht tot ontploffing worden gebracht.



Figuur 2.5: Energieverdeling lucht/grond

Er ontstaan drie soorten golven in de grond te weten: longitudinale golven, transversale golven en Rayleigh golven. Bij longitudinale golven bewegen de deeltjes evenwijdig aan de voortplantingsrichting. De transversale golf kenmerkt zich door een deeltjes bewegingsrichting die loodrecht staat op de voortplantingsrichting. Bij de Rayleigh golven voeren de deeltjes cirkelvormige golfbewegingen uit, te vergelijken met de golfbeweging die een zwemmer ondervindt die meedeint op de golven van de zee.



Figuur 2.6: Golftypen

De schadelijke effecten van een grondschok hangen af van de hoeveelheid explosief materiaal, het soort explosie, de positie van de explosie ten opzichte van het maaiveld, de grondopbouw, de aanwezige ondergrondse infrastructuur, het type constructie waarin de explosie plaatsvindt, het constructie materiaal zelf en de al dan niet aanwezige zijdelingse 'opvang'-constructies of objecten (bijv. bomen).

Het voornaamste schadebeeld naar aanleiding van grondschok bestaat uit de aantasting van de aanwezige infrastructurele voorzieningen als kabels en leidingen die scheuren of breken.

### 2.3.4 Hittestraling

De vuurbal die ontstaat bij een explosie bestaat uit gassen met een zeer hoge temperatuur (5.000 K) en druk. Deze vuurbal blijft afhankelijk van het type explosieve stof een bepaalde tijd bestaan en heeft, afhankelijk van de hoeveelheid geïnitieerde explosieve stof, een bepaalde afmeting.

De vuurbal levert gevaar op voor het ontstaan van externe branden of het initiëren van omliggende explosieve stoffen. In dit onderzoek wordt hittestraling ondergeschikt geacht, naar aanleiding van "The characterization and evaluation of accidental explosions" [19] waaruit blijkt dat het niet het maatgevende explosie-effect is bij het bepalen van een veiligheidsafstand.

### 2.3.5 Gifdampen

Gifdampen ontstaan bij de (onvolledige) verbranding van explosieve stoffen en de daarbij gevormde reactieproducten. Dit effect wordt niet meegenomen in het onderzoek, omdat het directe levensgevaar ten gevolge van gifdampen bij een massa-explosie van vuurwerk zeer beperkt is (1).

## 2.4 Verschalen van explosie-effecten

Omdat explosie-effecten gerelateerd zijn aan de explosie zelf, hangt de mate van het explosie-effect, op een bepaalde positie vanaf het explosiecentrum, af van de resterende kracht van het effect.

De grootte van die resterende kracht is evenredig met de grootte van de explosieve massa en omgekeerd evenredig met de 3<sup>e</sup> macht van de afstand tot de explosie, omdat de effecten zich driedimensionaal uitbreiden [1, 4, 8, 23] en de energie van de explosie voor het effect verdeeld wordt over deze uitbreidende ruimte.

## 3 Vuurwerkbesluit

In dit hoofdstuk wordt de inhoud van het Vuurwerkbesluit met betrekking tot het professionele vuurwerk verwoord. De in het Vuurwerkbesluit genoemde vuurwerkconcentratiegebieden worden, naar aanleiding van de recentelijk aangewezen gebieden nader toegelicht.

### 3.1 Vuurwerkbesluit in een notendop

Het Vuurwerkbesluit is opgesteld door het VROM onder minister Pronk na een tweetal vuurwerkrampen (Culemborg 14 februari 1991 en Enschede 13 mei 2000). Om zulke rampen in de toekomst te voorkomen zijn de bestaande regelgeving voor vuurwerkbedrijven en de nieuwe aanvullingen/wijzigingen daarop in een nieuw Vuurwerkbesluit samengesteld. Het Vuurwerkbesluit beoogt de gehele keten van vervaardigen, assembleren, verhandelen, opslaan, bewerken, transport en afsteken van zowel professioneel als consumenten vuurwerk te reguleren.

Het VROM hanteert voor het Vuurwerkbesluit een effectenbenadering in plaats van de gebruikelijke risicobenadering. Hierbij wordt uitgegaan van het nul-effect principe, waarbij na massa-explosie weinig materiële schade mag ontstaan en totaal geen dodelijke slachtoffers mogen vallen.

De voorschriften voor het opslaan en bewerken van professioneel vuurwerk zijn gebaseerd op een handboek dat is gepubliceerd door het ministerie van Defensie in een militaire publicatie, te weten MP 40-21, uitgave 1997. Deze publicatie is voor het overgrote deel overgenomen in de lijn van het NATO handboek AASTP-1. Beide handboeken bevatten voorschriften voor het opslaan van en bewerkingen aan explosieve stoffen en munitie, hetgeen als reden wordt genoemd voor het overnemen van de voorschriften en het toespitsen ervan op professioneel vuurwerk.

Het Ministerie van Defensie heeft, als praktijkdeskundige op het gebied van wapens en munitie, de functie de vuurwerkbedrijven in Nederland te adviseren en te controleren. Het bestuurlijk bevoegd gezag voor professionele vuurwerkopslag ligt in handen van de Gedeputeerde Staten (GS). De invoer, de uitvoer, de doorvoer, het vervoer en het voorhanden hebben valt onder het bestuurlijk bevoegd gezag van het Ministerie van VROM.

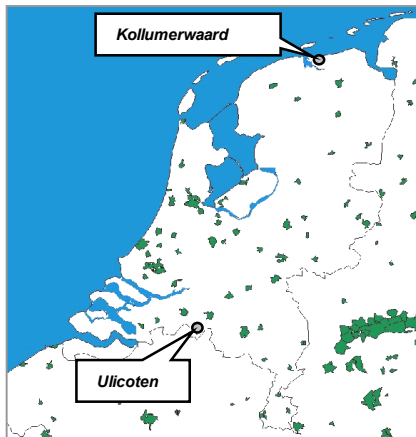
Binnen een inrichting mag, indien er professioneel vuurwerk aanwezig is, totaal (inclusief consumenten vuurwerk) maximaal 6.000 kilogram vuurwerk opgeslagen worden. De ruimten waar vuurwerk opslagen of bewerkt wordt, dienen minimaal 800 meter van een kwetsbaar object te zijn gelegen, ongeacht de hoeveelheid vuurwerk. De brandwerendheid van een bewaarplaats is minimaal 60 minuten en de wanden, vloer en afdekking ervan zijn vervaardigd van metselwerk, beton of gasbeton.

In vuurwerkconcentratiegebieden met meerdere opslagen gelden soepelere eisen als voor de losse opslagen zelf. Verder zijn tal van eisen opgenomen die tot op een zeker detailniveau beschrijven welke voorzieningen en processen binnen een inrichting moeten worden toegepast.

#### 3.1.1 Vuurwerkconcentratiegebieden

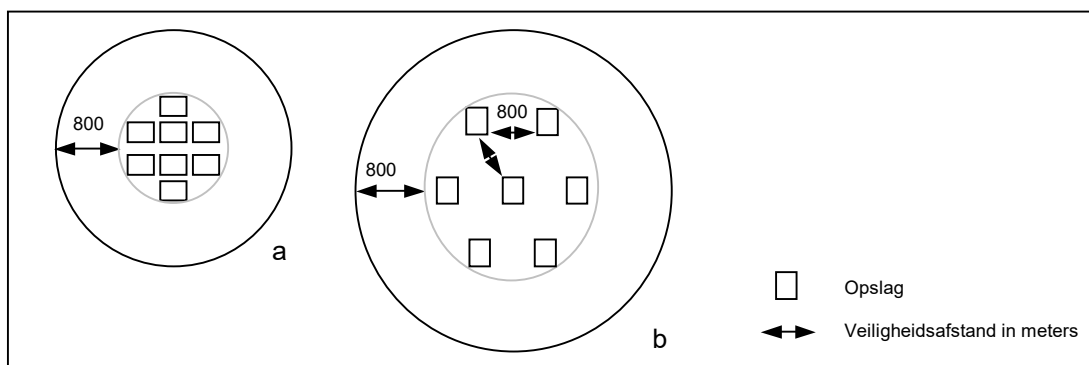
Omdat het Vuurwerkbesluit er al vanuit gaat dat de opgelegde veiligheidseisen (min. 800 meter, max. 6.000 kg) in Nederland mogelijk onhaalbaar zijn, wordt een oplossing gezocht in de vorm van vuurwerkconcentratiegebieden. Hiervoor worden door de overheid locaties gezocht en aangewezen als alternatieve locatie voor de professionele vuurwerkbedrijven. Inmiddels zijn er 2 voorlopige locaties aangewezen te weten:

- Het voormalige terrein van Muiden Chemi in de Kollumerwaard
- Het mobilisatiecomplex van Defensie in Ulicoten



Figuur 3.1: Nederland en de voorlopige vuurwerkconcentratiegebieden

In een vuurwerkconcentratiegebied mogen meerdere vuurwerkinrichtingen worden gevestigd. De externe veiligheidsafstand van een willekeurige opslag in het gebied tot een kwetsbaar object is 800 meter. Tussen de inrichtingen geldt een vrijstelling voor de veiligheidsafstand van 800 meter (figuur 2.2 a). Het gevolg is dat, omdat interne veiligheidsafstanden groter dan 800 meter het vuurwerkconcentratiegebied overbodig maken (figuur 3.2b), het uiteindelijke vuurwerkconcentratiegebied tussen de volgende twee indicatieve situaties ligt.



Figuur 3.2 a: intern kleiner dan 800 meter, extern 800 meter  
b: intern 800 meter, extern 800 meter

## 3.2 Basisgedachte

De basisgedachte van het Vuurwerkbesluit is het middels de effectenmethode creëren van een hoge mate van veiligheid voor de burger, naar aanleiding van het gebrek aan veiligheid bij opgetreden vuurwerkrampen.

Daarbij worden twee explosie-effecten als maatgevend beschouwd, namelijk de gevormde piekoverdruk van de invallende schokgolf en de uitworp van brokstukken.

### 3.2.1 Explosiemodel

Om aan de basisgedachte te voldoen heeft het VROM de verwachte explosie-effecten gebaseerd op bepaalde aannamen. Deze verzamelde aannamen vormen het explosiemodel.

Het VROM heeft bij het benaderen van de, bij de vastgestelde hoeveelheid vuurwerk behorende, explosie-effecten de volgende modellering toegepast.

- Al het in de inrichting aanwezige vuurwerk wordt, ongeacht eigenlijke transportclassificatie, ingedeeld in de zwaarste transportklasse met explosieve stoffen uit het ADR [3].

- Het bruto gewicht van het vuurwerk (energetisch materiaal + verpakking) wordt gelijkgesteld aan het netto gewicht, terwijl er maar 60-65% energetisch materiaal aanwezig is in professioneel vuurwerk.
- Tenslotte worden de explosie-effecten van het vuurwerk gelijkgesteld aan de explosie-effecten van het ideaal explosief materiaal TNT.

Van de vijf verschillende explosie-effecten zijn de luchtschok en brokstukken gebruikt bij het bepalen van de veiligheidsafstand, omdat dit de bepalende effecten zijn voor de schade op grotere afstand [2].

### Luchtschok

De geaccepteerde piekdruk van een luchtschok van 2 kPa heeft het volgende verwachte effect [3, 7, 10]:

- Niet-versterkte gebouwen lopen geringe schade op.
- Wanneer grote glasoppervlakken loodrecht worden belast, kan in 50% of meer van de gevallen glasbreuk optreden.
- Het is zeer onwaarschijnlijk dat er doden of gewonden vallen als direct gevolg van de schokgolf; wel kunnen verwondingen ontstaan ten gevolge van rondvliegend glas.

Deze maximale piekoverdruk treedt met het voorgaande explosiemodel op, op een afstand van 800 meter van een massa explosie van 6.000 kg professioneel vuurwerk.

### Brokstuk

Internationale explosieproeven hebben aangetoond dat, vanaf een afstand van 400 meter, de kans, om als onbeschermd individu in open terrein dodelijk getroffen te worden door een brokstuk, ten hoogste 1% bedraagt, maar dat dit niet uitgesloten kan worden. Deze raakkans neemt bij verhoging van de veiligheidsafstand af. De NATO geeft in het AASTP-1 [2] niet aan welke effecten en gevolgen van constructiebrokstukken te verwachten zijn op een afstand van 800 meter. Grote en zware brokstukken kunnen over een grotere afstand dan deze geschaalde afstand weggeslingerd worden en aanzienlijke constructieschade en persoonlijk (dodelijk) letsel veroorzaken, omdat zij meer energie (kunnen) bevatten dan kleine en lichte brokstukken.

In het Vuurwerkbesluit wordt de externe veiligheidsafstand voor de brokstukuitworp gelijk getrokken aan die van de luchtschok van 800 meter, omdat bij Enschede en Culemborg brokstukken werden weggeslingerd tot respectievelijk 580 en 650 meter.

Het VROM heeft zich voor het samenstellen van het Vuurwerkbesluit gebaseerd op gegevens van onder andere het AASTP-1 [2]. Daarin worden tabellen gegeven voor acceptatieniveaus van schokgolf effecten. De hoeveelheid vuurwerk die in het uitgangspuntenmodel wordt gehanteerd is 6.000 kg. Deze hoeveelheid is gebaseerd op de totale jaarlijkse hoeveelheid verbruikt vuurwerk gedeeld door het aantal vuurwerkbedrijven (7).

## 3.3 Kritische blik Vuurwerkbesluit

Deze paragraaf toont de aan het professionele vuurwerk gerelateerde stukken wettekst die in het Vuurwerkbesluit vermeld staan. Achter deze stukken zijn kritische opmerkingen geplaatst.

### 3.3.1 Extern transport

*“Binnen de inrichting mag maximaal 6 000 kg (6 ton) vuurwerk (totale hoeveelheid consumentenvuurwerk en professioneel vuurwerk) aanwezig zijn. Dit voorschrift geldt niet voor het ononderbroken lossen van vuurwerk uit een vervoermiddel in de inrichting” (Bijlage 2, Vuurwerkbesluit, Voorschrift 1.1, pagina 35)*

Het internationaal transport van vuurwerk vanuit China vindt plaats in scheepscontainers. De containers hebben een afmeting van 20 of 40 voet. De inhoud van een geheel gevulde container van 40 voet heeft in de praktijk een gewicht van ongeveer 18-25 ton. De containers zijn standaard containers voor het vervoer van goederen. Er zijn aan de containers geen speciale voorzieningen aangebracht voor het transport van vuurwerk [9].

Voor het vervoer van explosieve stoffen over de weg moeten in Nederland speciaal brandbestendige voertuigen worden gebruikt, namelijk EX/II en EX/III voertuigen. De maximaal toegestane transporthoeveelheden voor deze voertuigen zijn afhankelijk van het type voertuig en explosieve aard van de stof (8) [3] (§ 4.3) en liggen tussen de 10 en 16.000 kg (bijlage 9).

Vervoer van vuurwerk is onveiligere dan opslag, omdat hierbij de kans op externe initiatie groter is (ongeluk, technisch falen transportmiddel). De toegestane opslagcapaciteit van 6.000 kg voor een opslaggebouw staat dan wel in een schril contrast met de grote hoeveelheden die, onder bepaalde restricties, over de weg vervoerd mogen worden.

### 3.3.2 Vuurwerk

*“De gevaaraspecten van dit product rechtvaardigen een benadering waarbij voor professioneel vuurwerk en voor consumentenvuurwerk niet het risico maatgevend is voor de veiligheidseisen die aan het opslaan en bewerken van vuurwerk worden gesteld, maar uitsluitend het effect dat bij een ongeval kan optreden” (Toelichting Vuurwerkbesluit, pagina 49)*

Het is opmerkelijk dat in Nederland externe veiligheidsaspecten met een risicobenadering worden beschouwd. Alleen met betrekking tot de externe veiligheid van het vuurwerk maakt hierop een uitzondering door met een effectenmethode te werken.

Een effectenbenadering bevat echter ook risico-elementen. Om niet met deze risico's te hoeven werken wordt uitgegaan van het 'worst-case' scenario. Het is echter de vraag of daarmee daadwerkelijk de maximaal mogelijkerwijs optredende (ongewenste) effecten gevonden worden, zodat altijd een restrisico en resteffect aanwezig blijft.

Daar komt bij dat het bij een effectenmethode wel degelijk uitmaakt welke situatie wordt beoordeeld. Om dit aan te tonen het volgende voorbeeld, waarbij de effectenmethode door het toepassen op twee verschillende situaties wordt toegelicht:

*Stel in een concertgebouw wordt een jubileumconcert gegeven. Voor het jubileumfeest van de dirigent zijn vooraf 500 ballonnen opgeblazen. De volgende situaties zijn dan mogelijk.*

- De ballonnen worden los opgeslagen in een aan de concertzaal grenzend voor publiek toegankelijk vertrek met enkele scherpe voorwerpen en wanden van bordkarton.*
- De ballonnen zijn per 25 stuks in grote zakken in een aangrenzend niet voor publiek toegankelijk vertrek met geïsoleerde 20 cm dikke wanden opgeslagen.*

*Als de effectenmethode wordt losgelaten op de eerste situatie wordt deze ballonopslag niet toegestaan omdat het concert zeker wordt verstoord als er ballonnen stukgaan (scherpe voorwerpen, toegang voor publiek, los opgeslagen, dunne wanden).*

*In het tweede geval echter kan het concert onmogelijk worden verstoord door het springen van ballonnen (geen scherpe voorwerpen, geen toegang voor publiek, gecompartmenteerd opgeslagen, dikke geïsoleerde wand).*

Ondanks dat gekozen wordt voor een effectenbenadering is aangetoond dat het mogelijk is een geaccepteerd veiligheidsniveau te creëren, door aanpassing van de uitgangspuntensituatie.

### 3.3.3 Externe veiligheid

*“Voor inrichtingen voor opslag en/of bewerken van professioneel vuurwerk, blijven de in bijlage 1 en 2 opgenomen voorschriften en de in bijlage 3 opgenomen veiligheidsafstanden ten opzichte van deze inrichtingen onderling buiten toepassing, wanneer deze zijn opgenomen in het daartoe aangewezen vuurwerkconcentratiegebied” (Vuurwerkbesluit Artikel 1.1.16)*

*“Ten aanzien van industrieterreinen wordt nog opgemerkt dat de veiligheidsafstanden die zijn opgenomen in bijlage 3 van het Vuurwerkbesluit niet gelden voor vuurwerkbedrijven ten opzichte van elkaar voor zover die bedrijven zijn gevestigd in een specifiek voor dergelijke bedrijven, in een bijlage bij het Inrichtingen- en vergunningenbesluit milieubeheer aangewezen gebied. De achtergrond van deze uitzondering is ook hier dat een dergelijk gebied in het bijzonder bedoeld is voor de (her)vestiging van vuurwerkbedrijven” (Toelichting Vuurwerkbesluit, pagina 90)*

Hier wordt er van uitgegaan dat de te plaatsen constructies in een inrichting wel kunnen worden aangepast, zodat een massa-explosie uitblijft. Volledig uitsluiten van interne initiatie wordt onmogelijk geacht, derhalve wordt geconcludeerd dat er hier voorzichtig gewerkt wordt met risico's. Deze stap wordt wel gemaakt voor opslagen binnen concentratiegebieden en dus voor het concentratiegebied als geheel, maar niet voor losse inrichtingen.

Bijzonder is tevens dat de externe veiligheidsafstand gelijk blijft aan de reeds eerder gestelde waarde van 800 meter, aangezien een losse inrichting (effectenbenadering) niet mag worden vergeleken met een vuurwerkconcentratiegebied (deels risicobenadering).

*“Bij een inrichting waarin verpakt of onverpakt professioneel vuurwerk al dan niet tezamen met consumentenvuurwerk aanwezig mag zijn, dient, gemeten vanaf de bewaarplaats en, indien aanwezig, de bewerkingsruimte, tot een kwetsbaar object en een geprojecteerd kwetsbaar object de volgende veiligheidsafstand in acht te worden genomen: van 0 tot 6.000 kg 800 meter” (Bijlage 3 van het Vuurwerkbesluit, B, 1.1)*

Het is bijzonder conservatief om voor elke hoeveelheid van 0 tot 6.000 kg dezelfde veiligheidsafstand voor te schrijven. Het onderscheid van verschillende samenstellingen van vuurwerk in een opslag wordt hierbij niet gemaakt, terwijl het wel degelijk uitmaakt welk vuurwerk gecombineerd wordt.

*“Vuurwerk dat in beheer is bij of wordt gebruikt door de krijgsmacht of de politie valt buiten de werkingssfeer van het besluit. Onder het begrip beheer wordt in dit verband ook het beheer van in beslag genomen vuurwerk verstaan” (Toelichting Vuurwerkbesluit, pagina 95)*

De overheid is genooddaakt om over een buffer te kunnen beschikken om zo bijvoorbeeld in beslag genomen partijen te kunnen mogen opslaan. Door 'ontheffing' van het Vuurwerkbesluit creëert de overheid voor zichzelf de mogelijkheid van een onbeperkt grote opslag. Om de daarmee gepaard gaande risico's en effecten naar de burger te verantwoorden, wordt energie gestoken in het ontwikkelen van veilige opslagmethoden (functioneel en constructief). De vraag is waarom deze kennis niet wordt meegenomen in het Vuurwerkbesluit.

### 3.3.4 Bedrijfsvoering

*De artikelen 3.2.1 en 3.2.2 (veiligheidseisen en nadere eisen locale overheid) zijn niet van toepassing op de opslag van vuurwerk in inrichtingen waarvoor een vergunning krachtens artikel 8.1 van de Wet milieubeheer is verleend die betrekking heeft op de opslag van vuurwerk, voor zover deze plaatsvindt gedurende ten hoogste 72 uur te rekenen vanaf het moment van opslaan en in afwachting van aansluitend vervoer naar een vooraf bekende ontvanger, met inbegrip van het laden en lossen van het vuurwerk en de overbrenging daarvan naar een andere tak van vervoer, voor zover daadwerkelijk in aansluitend vervoer is voorzien en het betrokken vuurwerk in de oorspronkelijke verpakking blijft. Voor de berekening van de termijn van 72 uur worden zaterdag, zondagen en officieel erkende feestdagen niet meegerekend. (Artikel 1.1.4)*

Deze 72-uurs regeling is gevoelig voor misbruik. Het is denkbaar dat deze regeling voor extra opslagcapaciteit wordt aangewend, vanwege de beperkt toegestane opslagcapaciteit. Naast deze ongewenste ontwikkeling is het de vraag of deze toestemming niet haaks staat op de veiligheid, omdat een transportmiddel onder bepaalde restricties meer vuurwerk mag bevatten dan een vuurwerkopslag. Een veiliger methode zou zijn een opslagruimte te creëren voor zulke transportcombinaties voor 'onbepaalde' tijd, in plaats van een tijdsperiode in te stellen waarin, onder bepaalde voorwaarden, geen veiligheidseisen gesteld worden.

*“Binnen de inrichting mag maximaal 6.000 kg vuurwerk (totale hoeveelheid consumentenvuurwerk en professioneel vuurwerk) aanwezig zijn. Dit voorschrift geldt niet voor het ononderbroken lossen van vuurwerk uit een vervoermiddel in de inrichting” (Bijlage 2 Vuurwerkbesluit, B, 1.1)*

Aan de ene kant is deze regel 'zeer behouden', door te stellen dat wanneer er slechts 1 kg vuurwerk met de transportklasse 1.1 aanwezig is er nog maar 5.999 kg van een andere subklasse bij opgeslagen mag zijn. Terwijl er ook 6.000 kg vuurwerk met de transportklasse 1.1 aanwezig mag zijn. Aan de andere kant is deze regel 'onveilig' door toe te staan dat er tijdens het losproces meer vuurwerk aanwezig is in de inrichting. Bovendien vergroten de losactiviteiten de kans op initiatie.

Verder is de maximale hoeveelheid van 6.000 kg een hoeveelheid die eenvoudigweg bepaald is door de totale jaarlijkse hoeveelheid gebezigd vuurwerk te delen door het aantal betreffende bedrijven. Deze hoeveelheid komt dus niet voort uit een analyse van de maximaal optredende geaccepteerde explosie-effecten als functie van de veiligheidsafstand.

*“Omdat in dit besluit algemene, derhalve voor alle betrokken bedrijven gelijkelijk geldende regels worden gesteld, ongeacht of het Nederlandse of buitenlandse bedrijven zijn, gaat van het besluit geen marktversturende werking uit. Het besluit is evenmin van invloed op de markttoetreding in Nederland” (Toelichting Vuurwerkbesluit, pagina 87)*

Het wordt voor elk vuurwerkbedrijf even moeilijk gemaakt, zodat er onderling relatief geen versturende werking optreedt, maar het voortbestaan van de vuurwerkbranche zelf gevaar loopt.

Daar bedrijven zich als alternatief wel in het buitenland kunnen vestigen (Duitsland) wordt het transport van vuurwerk veel belangrijker. De grote aanvoertransporten kunnen echter in Duitsland afgewerkt worden. Het is essentieel om na te gaan hoe het totale transportbeeld en de gepaard gaande risico's veranderen bij de verschillende opties (naar buitenland of vuurwerkconcentratie gebieden), naar aanleiding van het Vuurwerkbesluit.

*Teneinde domino-effecten te voorkomen, is voldoende afstand in acht genomen tussen de bewaarplaats, de bewerkingsruimte en andere onderdelen van de inrichting waar gevaarlijke stoffen aanwezig kunnen zijn. Daartoe mag een brand ter plaatse van andere onderdelen van de inrichting waar gevaarlijke stoffen aanwezig kunnen zijn op de gevel van de bewaarplaats onderscheidenlijk de bewerkingsruimte geen grotere stralingsbelasting dan 15 kW per m<sup>2</sup> veroorzaken (Bijlage 2 Vuurwerkbesluit, B, 1.13).*

Ondanks de onduidelijke omschrijving van de voldoende afstand die in acht moet worden genomen wordt hier uitgegaan van verschillende onderdelen (opslag, bewerking) die voor elkaar beschermd dienen te worden. Maar eerder werd al uitgegaan van een massa-explosie, dus waarom nu aanpassen, zodat geen domino-effecten kunnen ontstaan. Dan dient ook consequent teruggekomen te worden op het uitgangspunt van het exploderen van 6.000 kg vuurwerk met transportklasse 1.1.

### 3.3.5 Constructie

*“Een bewaarplaats wordt gelijkgesteld met een brandcompartiment als bedoeld in het Bouwbesluit. De brandwerendheid van een bewaarplaats is niet lager dan 60 minuten. Bovendien zijn de wanden, vloer en afdekking van een bewaarplaats vervaardigd van metselwerk, beton of gasbeton” (Bijlage 2 Vuurwerkbesluit, B, 2.1)*

Ondanks het uitgangspunt dat al het aanwezige vuurwerk in één keer ontploft, worden er eisen gesteld aan de constructie. De keuze voor een zware constructie is overgenomen uit militaire (internationale) handboeken. Deze handboeken beschrijven constructies voor militair materieel. Vuurwerk is niet gelijk aan militair materieel.

Het is duidelijk dat de veiligheidsafstand verkort kan worden door de opslagruimte en/of bewerkingsruimte van vuurwerk dusdanig te construeren dat de effecten op de omgeving beduidend minder zijn. De constructie zelf die dan aan bepaalde eisen moet voldoen (opbouw, materiaal) wordt hier eenvoudigweg samengevat als een constructie waarbij wanden, vloer en afdekking vervaardigd zijn van de verschillende materialen metselwerk, beton of gasbeton.

*“In de landen Duitsland, het Verenigd Koninkrijk en de Verenigde Staten wordt, anders dan in het Vuurwerkbesluit, wel de mogelijkheid geboden om vuurwerk op te slaan in zware, met aarde overdekte, constructies. Omdat deze constructies veel duurder zijn dan de hier voorgeschreven constructies en zij in het algemeen niet leiden tot een verhoging van de veiligheid buiten de inrichting, is deze mogelijkheid – behoudens voor vuurwerkbedrijven in specifieke voor die bedrijven ingerichte gebieden – niet overgenomen” (Toelichting Vuurwerkbesluit, pagina 89)*

De kosten van een ondergrondse of overdekte opslag worden dermate hoog ingeschat, dat het bedrijf niet rendabel kan zijn. Ondanks dat dit probleem wellicht met nieuwe technieken verholpen kan worden, wordt ook aangevoerd dat de veiligheid in het algemeen niet verhoogd wordt. Dat deze constructie wel in vuurwerkconcentratiegebieden mag worden toegepast, lijkt dan ook inconsequent.

### 3.3.6 Resultaat kritische blik

Opslagcapaciteit:	Volgens het Vuurwerkbesluit mag er in de vuurwerkopslag minder vuurwerk opgeslagen liggen dan dat er over de weg vervoerd mag worden.
Vuurwerk:	Een effectenbenadering op twee verschillende uitgangspuntensituaties heeft een verschillend effect.
Externe veiligheid:	Het reduceren van explosie-effecten tot een bepaald geaccepteerd schadeniveau wordt binnen concentratiegebieden wel mogelijk geacht. Het geen onderscheid maken in explosie-eigenschappen noch hoeveelheid is zeer conservatief. Overheid heeft zelf een ontheffing op het vuurwerkbesluit.
Bedrijfsproces:	De 72-uurs regeling is gevoelig voor misbruik hetgeen in de hand gewerkt door lage toegestane hoeveelheid opgeslagen vuurwerk. Er treedt geen onderlinge marktverstoring op binnen de vuurwerkbranche, de vuurwerkbranche zelf loopt gevaar.
Constructie:	De gevarieerde eisen aan constructie zijn in tegenspraak met de effectenbenadering en de wens tot zoeken naar een constructie waarbij explosie-effecten kunnen worden gereduceerd. Er is een opmerkelijk verschil in benadering van het vuurwerkconcentratiegebied en de losse opslag.

## 4 Programma van eisen

Het Programma Van Eisen (PVE) bevat randvoorwaarden, met betrekking tot opslag van professioneel vuurwerk, uit het Vuurwerkbesluit. Een ontwerp conform de regels van het vuurwerkbesluit is als uitgangspuntensituatie van het Vuurwerkbesluit en ter vergelijking van de resultaten van dit onderzoek opgesteld. De opgestelde uitgangspunten bieden enerzijds ontwerprijheid en anderzijds een kader waarbinnen het ontwerp moet liggen.

### 4.1 Randvoorwaarden

De randvoorwaarden voor het ontwerp zijn in het Vuurwerkbesluit vastgelegd. Het bevoegd gezag mag nadere eisen stellen aan diverse onderdelen van het PVE. Achter de randvoorwaarden staat hoe dit in de uitgangspuntensituatie is verwerkt.

Tabel 4.1: Vuurwerk-PVE

Vuurwerk			
Nr.	Herkomst	PVE	Uitgangspuntensituatie
V.1	: Artikel 1.2.1	Vuurwerk heeft een zodanige constructie, is zodanig vervaardigd en verkeert in een zodanige staat, is wat aard, samenstelling en overige eigenschappen van het materiaal betreft en functioneert zodanig, dat bij gebruik overeenkomstig de gebruiksaanwijzing van dat vuurwerk geen letsel of schade kan ontstaan	In plaats van de netto hoeveelheid explosieve stof (50 – 60 % van vuurwerk) wordt gerekend met het bruto vuurwerkgewicht bij het bepalen van de effecten die optreden naar aanleiding van de massa explosie
V.2	: Artikel 3.1.1	Professioneel vuurwerk moet voorzien zijn van diverse classificatie vermeldingen	Al het aanwezige vuurwerk, ongeacht de classificatie, reageert als zijnde massa explosief (1.1)

Tabel 4.2: Externe veiligheid-PVE

Externe veiligheid			
Nr.	Herkomst	PVE	Uitgangspuntensituatie
E.1	: Bijlage 3, veiligheidsafstanden 1.1	Bij een inrichting waarin professioneel vuurwerk aanwezig mag zijn, dient vanaf bewerkingsruimte en opslagruimte een afstand van 800 meter tot aan een kwetsbaar object te worden gehanteerd	De bewaarplaats én de bewerkingsruimte zijn vanaf buitenconstructie 800 meter van kwetsbaar object verwijderd

Tabel 4.3: Bedrijfsproces-PVE

Bedrijfsproces			
Nr.	Herkomst	PVE	Uitgangspuntensituatie
P.1	: Artikel 3.2.2 lid 1	Het bevoegd gezag kan nadere eisen stellen aan de opslag met betrekking tot wijze van opslag, interne afstanden, compartimentering en brandalarmering	De opslag vindt binnen de bewaarplaats niet in compartimenten plaats
P.2	: Bijlage 2, voorschrift 1.1	Binnen de inrichting mag, behalve bij laden en lossen, maximaal 6.000 kg vuurwerk (totale hoeveelheid consumentenvuurwerk en professioneel vuurwerk) aanwezig zijn	Er is 6.000 kilo professioneel (1.1) vuurwerk aanwezig in één van de ruimtes in de inrichting.
P.3	: Bijlage 2, voorschrift 1.4	In bewerkingsruimte en bewaarplaats is een automatische sprinkler met automatische doorschakeling naar brandweer aanwezig	Er is een sprinklerinstallatie aanwezig, ter voorkoming van uitbreiding beginnende brand en niet ter reductie van een

<b>Bedrijfsproces</b>			
<b>Nr.</b>	<b>Herkomst</b>	<b>PVE</b>	<b>Uitgangspuntensituatie</b>
P.4	: Bijlage 2, voorschrift 1.13	De afstand tussen bewaarplaats en bewerkingsruimte is dusdanig gekozen dat een brand in een onderdeel van de inrichting geen hogere stralingsbelasting kan veroorzaken dan 15 kW per m <sup>2</sup>	massa-explosie. Dit geldt ook voor de draagbare brandblusser en de brandslanghaspels  De afstand tussen de gebouwdelen is i.v.m. brandveiligheid op 25 meter gesteld

Tabel 4.4: Constructief-PVE

<b>Constructief</b>			
<b>Nr.</b>	<b>Herkomst</b>	<b>PVE</b>	<b>Uitgangspuntensituatie</b>
C.1	: Bijlage 2, voorschrift 2.1	Een bewaarplaats en een bewerkingsruimte worden gelijkgesteld met een brandcompartiment met een brandwerendheid van ten minste 60 minuten. De wanden, vloer en afdekking van een bewaarplaats worden vervaardigd van metselwerk, beton of gasbeton	De wanden van de bewerkingsruimte en opslagruimte zijn van 110 mm dik metselwerk. De vloer en afdekking van de bewerkingsruimte en opslagruimte is een 20 cm dikke plaat van t.p.g beton
C.2	: Bijlage 2, voorschrift 2.2	In een bewaarplaats en een bewerkingsruimte zijn geen openingen of ramen aanwezig dan de toegangsdeur	Er zijn geen openingen of ramen aanwezig behalve de deur
C.3	: Bijlage 2, voorschrift 2.3	De toegangsdeur van de bewaarplaats en de bewerkingsruimte draait naar buiten, is zelfsluitend, is niet voorzien van dievenklauwen o.i.d., is steeds onbelemmerd bereikbaar en heeft een minimale oppervlakte van 4 m <sup>2</sup>	De deur draait naar buiten, is zelfsluitend, niet voorzien van dievenklauwen, onbelemmerd bereikbaar met oppervlak van 4 m <sup>2</sup>
C.4	: Bijlage 2, voorschrift 2.7	Ter voorkoming van opeenhoping van stof en ter vergemakkelijking van de reiniging, zijn de muren glad afgewerkt zonder horizontale lijsten of randen	Wordt overgenomen
C.5	: Bijlage 2, voorschrift 2.9 (zie bijlage 3 van dit rapport: samenvatting NPR 7910-2)	De bewaarplaats wordt gelijkgesteld met zone 22 van de NPR 7910-2 en de bewerkingsplaats met zone 21. Dientengevolge worden ook de daarin voorkomende installaties en werktuigen gecategoriseerd	In de bewerkingsruimte is materieel aanwezig ten behoeve van het bewerken van vuurwerk
C.6	: Bijlage 2, voorschrift 2.16	Rondom de bewaarplaats is op een afstand van ten minste 15 meter een deugdelijke afrastering van metaalvlechtwerk (min. 2 m hoog) aanwezig. Binnen de afrastering bevindt zich geen naaldhoutbeplanting en binnen een afstand van 5 m van de bewaarplaats bevindt zich bovendien geen loofhout. Daarnaast bevinden zich binnen de afrastering geen goederen, snoeimateriaal en overige materialen die door vuur tot ontbranding kunnen worden gebracht	15 meter rondom de bewaarplaats is een 2 meter hoog hekwerk geplaatst, ertussen bevinden zich totaal geen andere objecten
C.7	: Bijlage 2, voorschrift 3.9	De bewaarplaats is zodanig ingericht dat visuele inspectie van vuurwerk mogelijk is en het inbrengen en uitnemen van vuurwerk niet wordt belemmerd. In een betreedbare	Wordt overgenomen

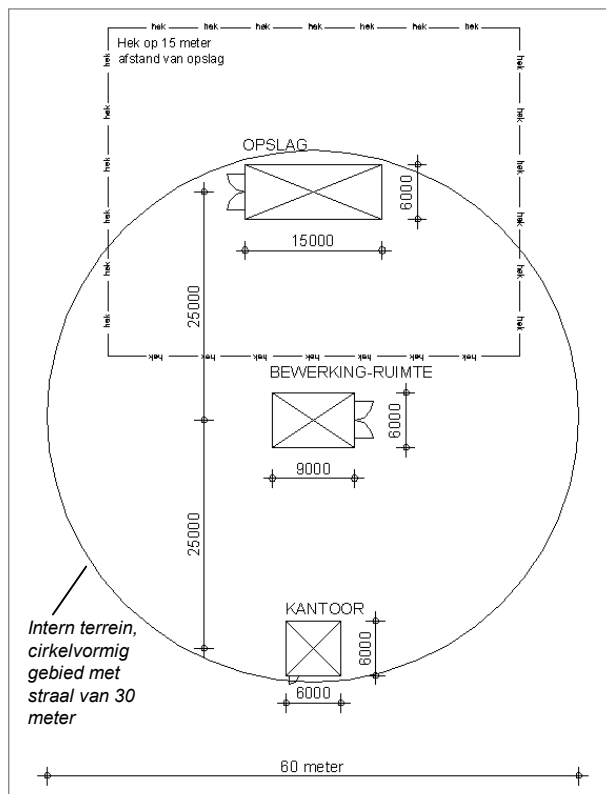
Constructief			
Nr.	Herkomst	PVE	Uitgangspuntensituatie
		bewaarplaats is daarom ten minste één gangpad met een breedte van ten minste 75 cm aanwezig	

## 4.2 Uitgangspuntensituatie Vuurwerkbesluit

De uitgangspuntensituatie van het Vuurwerkbesluit is een mogelijk ontwerp dat aan de basis van het vuurwerkbesluit heeft gelegen en voldoet aan alle regels die daarna in het Vuurwerkbesluit zijn geformuleerd. Deze wordt hier opgesteld als vergelijkingsmateriaal voor het nieuwe ontwerp.

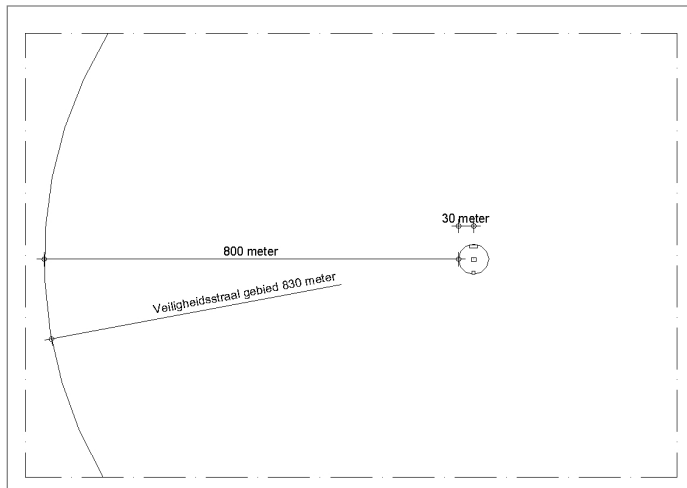
Uitgangspunten voor de op te stellen uitgangspuntensituatie:

- De constructie bevindt zich compleet boven de grond.
- In de inrichting staan 3 gebouwen, de bewerkingsruimte, de bewaarplaats en het kantorgedeelte.
- De positie van de gebouwen is zo gekozen dat de deurzijdes niet naar elkaar gericht zijn.
- De geometrie van de bewaarplaats is: 15 x 6 m ofwel 90 m<sup>2</sup>, met hoogte 4 m  
de bewerkingsruimte is: 9 x 6 m ofwel 54 m<sup>2</sup>, met hoogte 4 m  
de kantoorinrichting is: 6 x 6 m ofwel 36 m<sup>2</sup>, met hoogte 3 m
- Er worden geen effectreducerende brandbestrijdende maatregelen toegepast.
- Het vuurwerkbedrijf wordt in een gebied met een bodem van klei en veen geplaatst.
- Het materiaal en opbouw van de wanden: metselstenen (200 x 110 x 50), (1800 kg/m<sup>3</sup>)  
enkelsteens dragende muur  
het dak: beton B35 (2600 kg/m<sup>3</sup>)  
gewapend betonnen plaat, dikte 200 mm
- De drie gebouwen zijn met een interne hart op hart afstand van 25 meter van elkaar geplaatst.
- De deuropeningen zijn niet naar elkaar gericht (figuur 4.1).
- De diameter van het constructief bebouwde terrein is circa 60 meter.
- Tussen het hek en het opslaggebouw is een ruimte van 15 meter zonder erin geplaatste constructies of objecten.



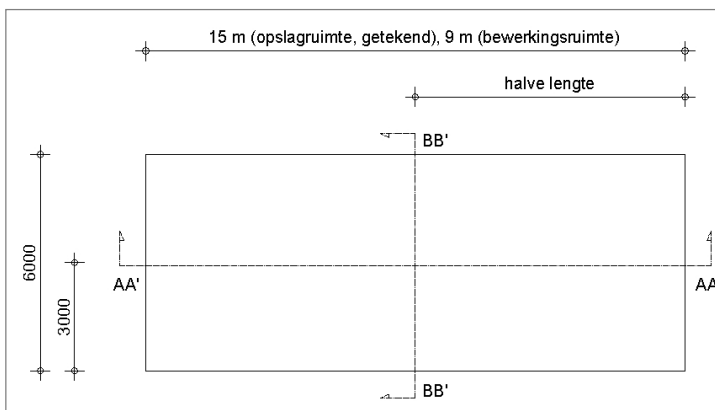
Figuur 4.1: Overzicht vuurwerkterrein uitgangspuntensituatie

In figuur 4.2 is een gedeelte van het overzicht van het veiligheidsgebied getoond. De externe veiligheidsafstand is 800 meter en 830 meter vanaf het centrum van de inrichting.

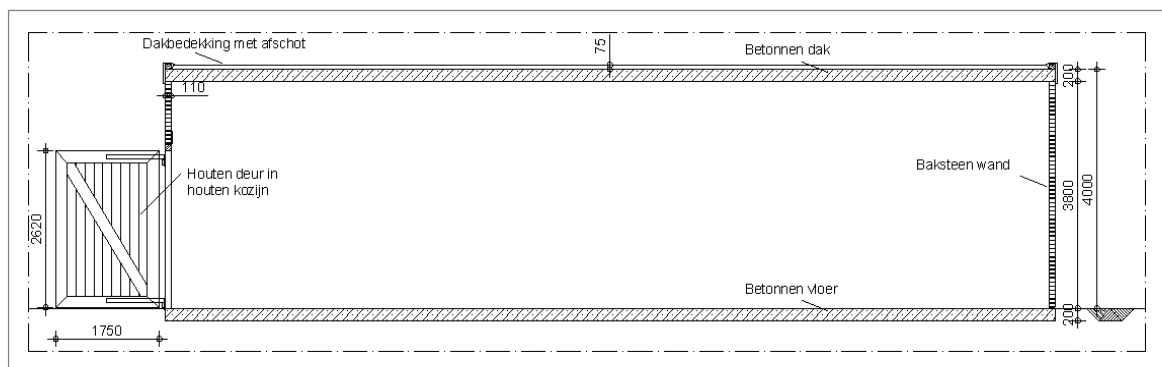


Figuur 4.2: Overzicht vuurwerkgebied uitgangspuntensituatie

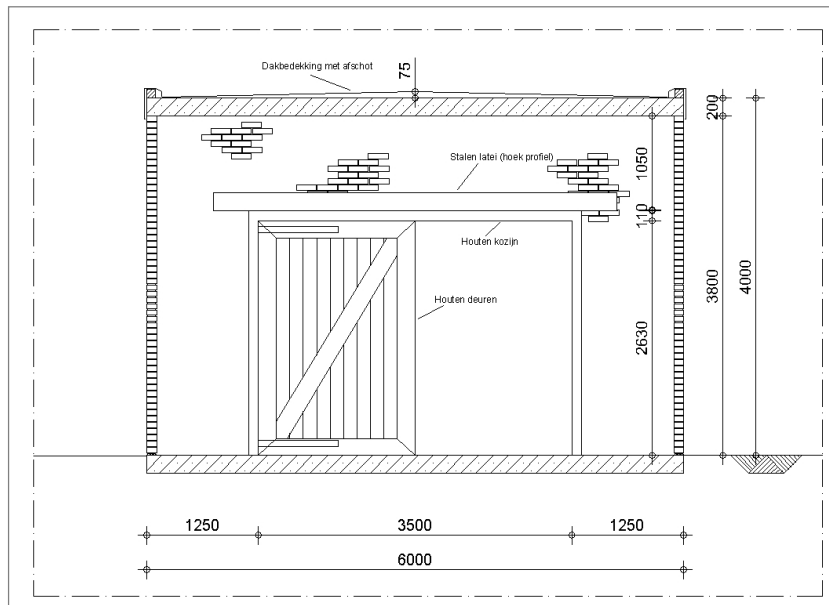
De opslag en bewerkingsruimte zijn opgetrokken uit 110 mm dikke metselwerk wanden, zonder ramen. De toegangsdeuren zijn van hout en openen naar buiten. Het dak en de vloer bestaan uit een 20 cm dikke gewapend betonnen plaat. De gebouwen zijn op staal gefundeerd.



Figuur 4.3 (a): Overzicht opslag- en bewerkingsruimte uitgangspuntensituatie



Figuur 4.3 (b): Doorsnede AA' opslag- en bewerkingsruimte uitgangspuntensituatie



Figuur 4.3 (c): Doorsnede BB' opslag- en bewerkingsruimte uitgangspuntensituatie

Het kantoorgebouw is 6 bij 6 meter. De constructie komt in grote mate overeen met de opslag- en bewerkingsruimte. In verband met de brokstukken is ook hier uitgegaan van een dakconstructie van 20 cm gewapend beton. De vloer is opgebouwd uit 20 cm dik gewapend beton. De wanden zijn van 110 mm dik metselwerk, waarbij in de zijden die niet gericht zijn naar de opslag- en bewerkingsruimte ramen zijn geplaatst. Er is één deur toegepast in de zijde tegenover de zijde gelegen tegen de bewerkingsruimte.

### 4.3 Uitgangspunten

Voor het onderzoek zijn uitgangspunten opgesteld, die zowel beperkend als ruimte scheppend werken tijdens het onderzoek.

Tabel 4.5: Uitgangspunten

Uitgangspunten	
Nr.	
U.1	: Het onderdeel kosten wordt niet meegenomen in het onderzoek, omdat voor dit onderdeel naast de gewone bouwkosten ook de kosten voor de aanschaf van het terrein meegenomen moeten worden. De aanschafkosten zijn van een hogere orde dan de bouwkosten. De bouwkosten zijn aan het ontwerp gekoppeld. Elk ontwerp heeft een eigen veiligheidsafstand. Hoe beter het ontwerp, hoe kleiner de veiligheidsafstand en hoe kleiner het aan te schaffen terrein. De bouwkosten mogen aanzienlijk zijn, wanneer er maar een reductie van de veiligheidsafstand tegenover staat.
U.2	: Er mag op een verstandige wijze buiten het concrete eisenpakket van het Vuurwerkbesluit worden getreden, mits vastgehouden wordt aan de basisgedachte ervan.
U.3	: Het initiëren van vuurwerk en de daarbij behorende materie is geen onderzoeksdoel.
U.4	: Er wordt met betrekking tot de vuurwerkexplosie uitgegaan van een detonatie i.p.v. een mogelijk optredende deflagratie van de complete hoeveelheid opgeslagen vuurwerk, tenzij naar aanleiding van het onderzoek het tegendeel kan worden aangetoond.
U.5	: Er worden geen constructieve en functionele beperkingen opgelegd bij het zoeken naar mogelijke positieve invloeden op de externe explosie-effecten.
U.6	: De vuurwerkinrichting bestaat uit een opslag, bewerkingsruimte en een kantoorgedeelte.
U.7	: Het ontwerp wordt gebaseerd op de explosie-effecten brokstukken en drukgolf, omdat dit

Uitgangspunten	
Nr.	
	de maatgevende effecten zijn geweest bij het opstellen van het Vuurwerkbesluit.
U.8	: Er wordt niet gezocht naar een constructie die alle explosie-energie op kan nemen, waarbij de constructie intact blijft en/of al de explosie-effecten: hittestraling, grondschok, luchtschok en brokstukken geheel worden voorkomen.
U.9	: Er wordt geen onderzoek gedaan naar constructieve aanpassingen in de omgeving ten einde deze beter bestand te maken tegen de explosie-effectem, omdat zo niet de oorzaak maar de gevolgen worden aangepakt.
U.10	: Het aantal externe transportactiviteiten, naar aanleiding van de procesvoering van het vuurwerkbedrijf, is geen onderzoeksdoel.
U.11	: De personen die op het terrein werkzaamheden verrichten zijn geschoold, hebben geen lichamelijke of geestelijke beperkingen en/of negatieve intentie ten opzichte van het vuurwerkbedrijf (aanslag), die het hen onmogelijk maken om op een juiste manier met de materie te kunnen omgaan.
U.12	: Er is geen materieel aanwezig in de opslag/bewerkingsruimte.
U.13	: Er wordt geen constructie ontworpen met ronde vormen, omdat dit functioneel niet praktisch is, tenzij de ronde vorm constructief noodzakelijk is.

## 5 Kwalitatieve verkenning

Een viertal kwalitatieve verkenningen, op het gebied van vuurwerk, explosieprocessen, bedrijfsvoering en constructies, maakt zichtbaar dat er talloze de explosie-effecten beïnvloeden.

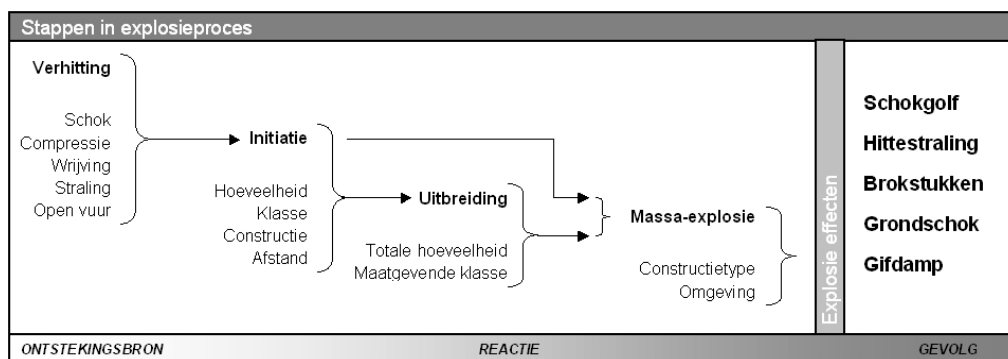
### 5.1 Vuurwerk

In het algemeen geldt: Hoe meer geïnitieerd vuurwerk hoe meer energie die vrijkomt. Daarom is het wenselijk om de hoeveelheid exploderende stof te reduceren. Dit wordt bereikt met het opdelen van de hoeveelheid stof in en deze delen vervolgens in compartimenten onder te brengen (voortaan: Compartimenteren)

Daarnaast verschillen vuurwerkartikelen sterk van elkaar in de verdeling van de energie over de explosie-effecten, de tijdsduur van het vrijkomen van de totale energie en de vrijkomende energie per tijdseenheid, hetgeen tot uitdrukking komt in de transportclassificatie ten behoeve van het vervoer van materialen. Hoe lager het subnummer van de klasse, hoe meer explosieve stof aanwezig is in het vuurwerkartikel. Als artikelen uit klasse 1.1 samen met artikelen uit andere klasse liggen opgeslagen, reageren zij door de detonerende reactie van het vuurwerk uit klasse 1.1 samen massa-explosief. Om deze combinaties te voorkomen is het wenselijk een scheiding van de artikelen uit verschillende transportklassen toe te passen (voortaan: Klassen scheiden).

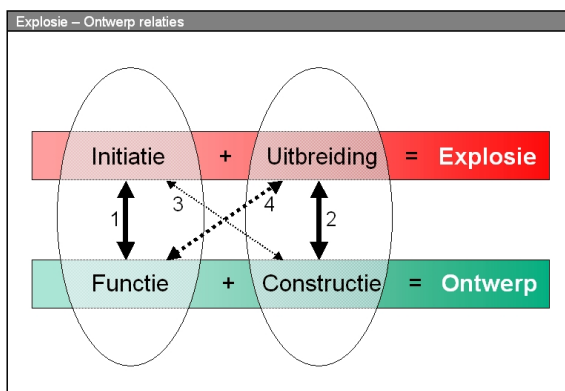
### 5.2 Explosieproces

De ontwikkeling tot een massa-explosie verloopt via het stapenschema in figuur 5.1.



Figuur 5.1: Explosie-proces

Vanuit figuur 5.1 wordt figuur 5.2 samengesteld waarin de relatie wordt getoond tussen de initiatie en uitbreiding tot massa-explosie enerzijds en de functie van een ruimte en constructie anderzijds. De functie van de ruimte en de constructie leveren een ontwerp, terwijl de initiatie en de uitbreiding een explosie opleveren.



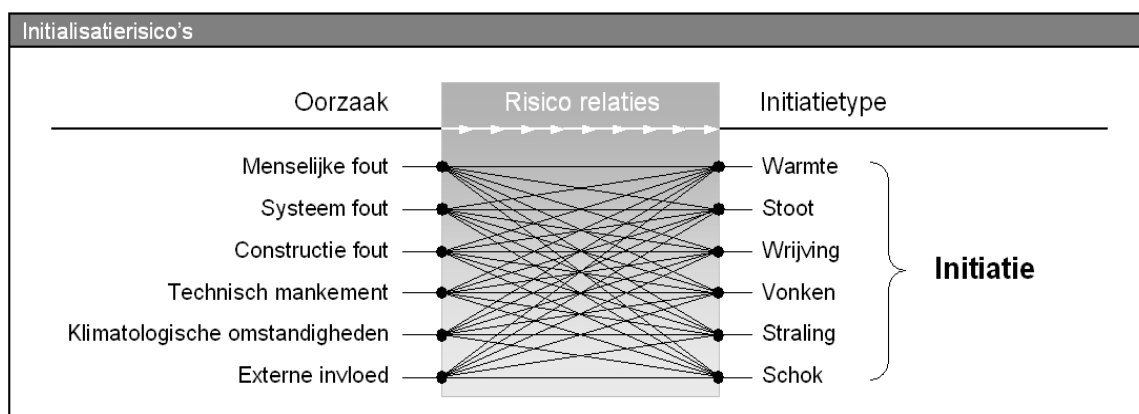
Figuur 5.2: Relaties

Voorbeelden van de genoemde relaties zijn:

- Relatie 1: In een bewerkingsruimte is de kans op initiatie groter dan in de opslag, vanwege de vele menselijke handelingen en mechanische bewegingen in deze ruimte ten einde vuurwerk te bewerken.
- Relatie 2: Hoe beter de constructieve eigenschappen (sterkere en zwaardere constructie) hoe kleiner de mogelijkheid tot uitbreiding van de ontstane initiatie.
- Relatie 3: In geval van een falend constructiedeel (instorten dak) kan initiatie ontstaan. Echter vanwege de noodzakelijke (en onwaarschijnlijke) domino-effecten van het falen van de constructie tot het ontstaan van een massa-explosie wordt deze relatie als zwak beschouwd.
- Relatie 4: De losplaats (ruimte), waar de aanvoertruck vuurwerk komt brengen, is met name door zijn functie een gevaar voor uitbreiding, omdat er zich (inclusief de tijdelijk aanwezige truck met veel vuurwerk) uitzonderlijk veel vuurwerk op het terrein bevindt.

### 5.2.1 Initiatie

Initiatie wordt veroorzaakt door locale warmte, vonk, straling, schok, wrijving en/of stoot. Deze verschillende initiatietypen worden veroorzaakt door tal van basale gebeurtenissen, zoals menselijke fout, systeemfout, constructie fout, technisch mankement, klimatologische omstandigheden of een externe invloed. Met figuur 5.3 wordt duidelijk gemaakt dat er te veel mogelijke initiatielaties zijn zodat het onhaalbaar is om alle initiatiemogelijkheden te voorkomen.



Figuur 5.3: Risico relaties

Daarom wordt initiatieonderzoek niet meegenomen en zijn dientengevolge de functionele handelingen op het bedrijfsterrein op het gebied van de initiatie ook onbelangrijk geworden. Er wordt in het ontwerp net als in het vuurwerkbesluit vanuit gegaan dat er initiatie optreedt.

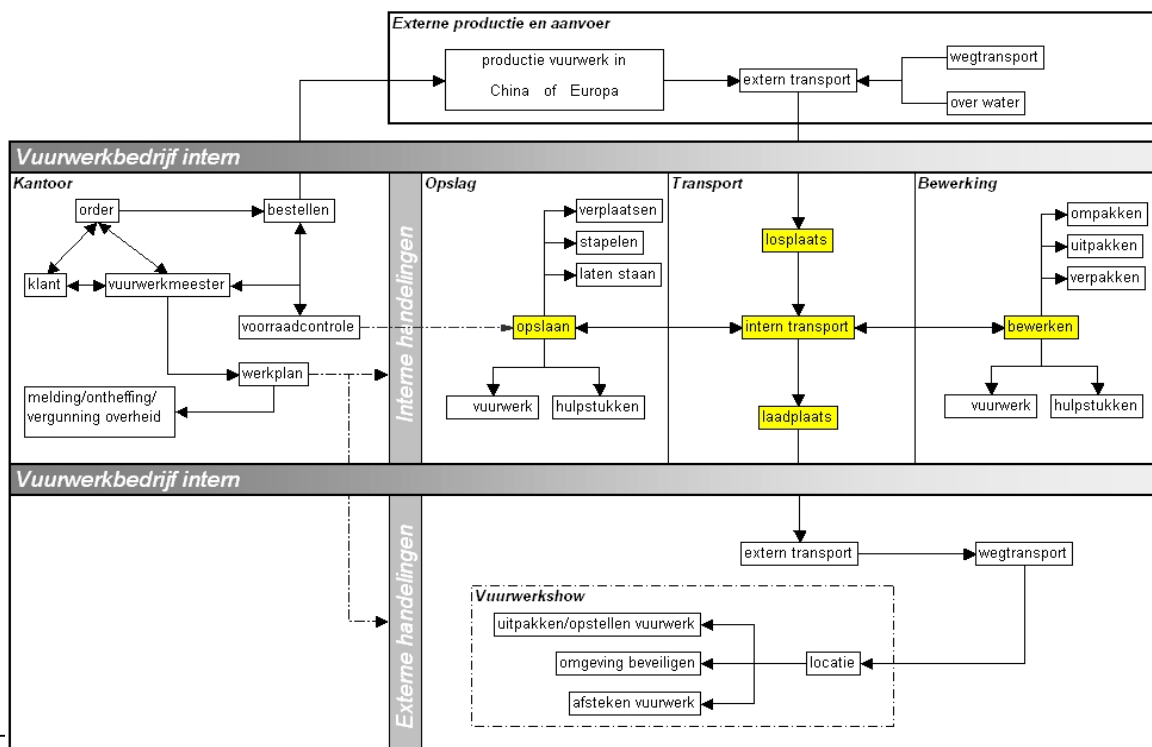
## 5.3 Bedrijfsvoering

Het bedrijfsproces omvat onder andere de functies kantoor, opslag, transport, bewerking, laden / lossen, onderhoud en activiteiten op de buitenlocatie [12]. De opslag en bewerking zijn de hoofdonderdelen, terwijl de transportactiviteiten, laad- en loswerkzaamheden, de kantoorwerkzaamheden, onderhoudswerkzaamheden en de activiteiten op de buitenlocatie geen direct beperkende werking hebben op de uitbreiding van een explosie in een bewerking- of opslagruimte.

- Opslag:** *Functie:* Het opslaan van het in de inrichting aanwezige vuurwerk.  
*Gevoeligheid:* De initiatiekans is door het geringe aantal handelingen laag, maar bij initiatie is de kans op uitbreiding door de functie van de ruimte groot.
- Bewerking:** *Functie:* Het ompakken, verzendklaar maken en bewerken van vuurwerk.  
*Gevoeligheid:* Voor de bewerkingsruimte, waarin een beperkte hoeveelheid

aanwezig, is de initiatiekans door het hoge aantal handelingen groot en de kans op uitbreiding, vanwege de beperkte hoeveelheid, gemiddeld.

- Intern transport:** *Functie:* Het verplaatsen van vuurwerk over het terrein.  
*Gevoeligheid:* Het transport is een handeling met een beperkte hoeveelheid vuurwerk zodat de uitbreidingskans klein en de initiatiekans, afhankelijk van het transportmiddel, gemiddeld is.
- Laden/lossen:** *Functie:* Het laden en/of lossen van een extern transportmiddel.  
*Gevoeligheid:* Bij laden en lossen worden er verschillende activiteiten met de artikelen uitgevoerd, hetgeen de initiatiekans verhoogt. De hoeveelheid vuurwerk op het terrein (en voornamelijk in het externe transportmiddel) is zeer groot, waarbij vuurwerk uit elke transportklasse aanwezig kan zijn, zodat bij initiatie de kans op uitbreiding hoog is. Bij het op extern transport zetten ten behoeve van vuurwerkshows gaat het om veel kleinere hoeveelheden dan bij bevoorrading van het vuurwerkbedrijf.
- Kantoor:** *Functie:* Het administreren van handelingen van de vuurwerkinrichting.  
*Gevoeligheid:* Er zijn geen handelingen binnen het kantoor die voor initiatie kunnen zorgen. Het kantoorgebouw heeft geen reducerende werking op een optredende explosie.
- Onderhoud:** *Functie:* Op onderhouden van constructies.  
*Gevoeligheid:* Onderhoud geschiedt in/om elke ruimte. De werkzaamheden in en rond de verschillende functionele ruimtes zijn niet opgenomen in het bedrijfsprocesschema. Voor onderhoudswerkzaamheden zijn in het Vuurwerkbesluit procedures opgesteld die de initiatiekans moeten beperken. De onderhoudswerkzaamheden hebben een hoge initiatiekans voor het vuurwerk dat in de buurt is, maar het hangt van de locatie ervan af wat de uitbreidingseffecten zijn.
- Activiteiten extern:** *Functie:* Het ontsteken van vuurwerk voor publiek.  
*Gevoeligheid:* Tenzij een vuurwerkshow in de omgeving van een vuurwerkopslag wordt uitgevoerd is er geen initiatiekans voor de inrichting.



Figuur 5.4: Bedrijfsproces

Voor de aankomst van goederen (lossen), het interne transport, opslag en bewerking wordt in tabel 5.1 de gevoeligheid voor initiatie en uitbreiding tot massa-explosie aangegeven. De daarbij optredende verschillen worden veroorzaakt door de processen die er plaatsvinden of de hoeveelheden en de explosie-eigenschappen van het vuurwerk dat er aanwezig is.

Tabel 5.1: Invloed bedrijfsactiviteiten op de ontwikkeling van een explosie

Hoofdproces	initiatiekans	hoeveelheid	klasse	uitbreiding
Aankomst goederen	hoog	extreem veel	alle	hoog
Intern transport	middel	weinig	beperkt aantal	laag
Opslag	laag	veel	alle	hoog
Bewerking	hoogst	middel	beperkt aantal	middel

De functie aankomst van de goederen en de functie opslag zijn beide bij initiatie van het vuurwerk zeer gevoelig om uit te breiden tot massa-explosie vanwege de grote functiegebonden hoeveelheid vuurwerk. Omdat in een opslag permanent een grote hoeveelheid aanwezig is en bij het laden en lossen slechts tijdelijk wordt alleen de opslagruimte meegenomen in het ontwerp.

## 5.4 Constructie

Bij een explosie wordt veronderstelt dat hoe zwaarder en sterker een constructie is, hoe hoger de opgebouwde druk en des te hoger de piekdruk bij het bezwijken van zo'n constructie is. Hoe zwaarder een constructie hoe zwaarder ook de brokstukken die gevormd worden. Hogere drukopbouw en hogere massa leveren een hogere brokstuk werpafstand.

De directe hittestraling is niet door de constructieonderdelen te beïnvloeden [8, 10, 15, 23]. De totale hitte die ontstaat, is mede afhankelijk van de hoeveelheid beschikbare zuurstof, in verband met de naverbranding van de explosieproducten.

De grondschok is afhankelijk van de ligging van de constructie ten opzichte van het maaiveld. Dit wordt nu kortweg de hoogteligging genoemd.

Als rondom de constructie ook omgevingsobjecten aanwezig zijn hebben deze een afschermdende werking voor de zijdelings naar de omgeving weggegooid brokstukken. Deze constructieve omgevingsobjecten zijn bijvoorbeeld betonnen constructies, aarden wallen, boomformaties en combinaties ervan (figuur 5.5).

Betonnen keerwand is gefundeerd in de bodem en heeft zeer weinig ruimte nodig. Deze constructie is materiaalintensief en heeft een permanent karakter wat niet positief is, als het bedrijf later wil verbouwen of herstructureren. De secundaire brokstukken die kunnen ontstaan zijn ongewenst.

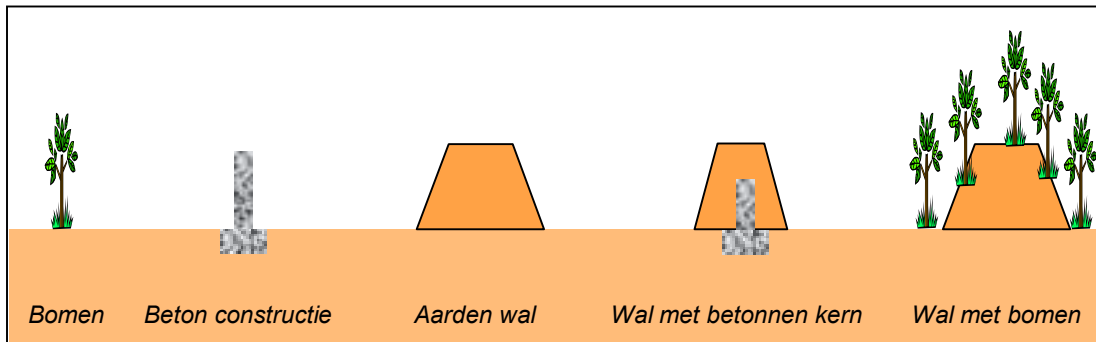
Aarden wallen rondom de constructies zijn gemakkelijk aan te leggen en hebben een minder permanent karakter dan bijvoorbeeld een betonnen constructie of een bomenrij, door de eenvoud en snelle wijze van aanleggen/modificeren. Secundaire brokstukken zijn kluiten aarde, die weinig schade aanbrengen.

Bomen hebben onderling een geringe dichtheid en er zal daarom een brede strook met begroeiing aangelegd moeten worden om het gewenste reducerende brokstukkenreductie te verkrijgen. Deze brede strook is echter tegenstrijdig met het doel om zowel interne als externe veiligheidsafstand zo klein mogelijk te krijgen. Daarnaast kunnen bomen zelf weer gevaarlijke

brokstukken opleveren (secundaire brokstukken) en zijn bomen onderhevig aan mogelijke ziektes, zodat faalbaarheid van deze objecten aanwezig is.

Aarden wal, betonkern ligt qua benodigde plaatsingsruimte tussen de aarden wal en de betonnen constructie in. Deze constructie is arbeid- en materiaalintensief en heeft een permanent karakter.

Aarden wal, bomen combineert de aarden wal met bomen. Dit levert een sterke barrière voor brokstukken, zonder brede bomenrij. Het gevaar van secundaire boombrookstukken is aanwezig.



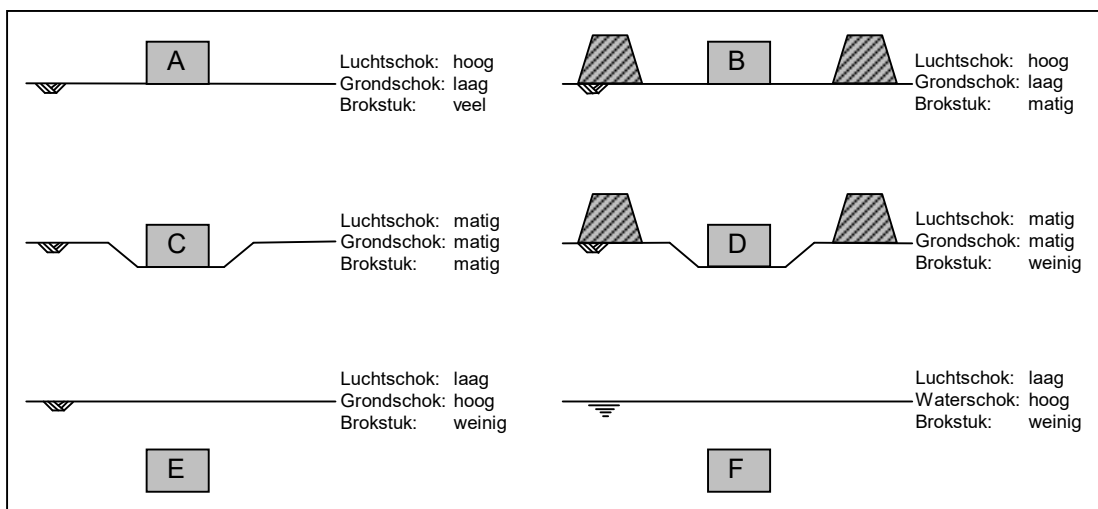
Figuur 5.5: Voorbeelden (samengestelde) constructieve omgevingsobjecten

De aarden wal wordt meegenomen in aspecten uitwerking vanwege:

- het weinig permanente karakter
- de ongevaarlijke secundaire brokstukken

Met betrekking tot de hoogteligging en omgevingsobjecten worden zes verschillende combinatiemogelijkheden gegeven en beoordeeld in figuur 5.6 voor de effecten luchtschok, grondschok en brokstukken.

- A. Bovengronds
- B. Bovengronds met aarden wal
- C. Verdiept
- D. Verdiept met aarden wal
- E. Ondergronds
- F. Onder water



Figuur 5.6: Constructieligging en aarden wal

Bovengrondse opslag: Hierbij treedt de luchtschok sterk op en is er zonder omgevingsobject geen belemmering voor de uitworp van de brokstukken. De grondschock die optreedt is minimaal omdat de explosie boven het maaiveld plaatsvindt. Zijdelijks objecten belemmeren de luchtschok in de halfsferische uitbreiding, maar op grote afstand is het effect op de luchtschok te verwaarlozen.

Verdiepte opslag: Er komen minder brokstukken vrij omdat de vrijkomende brokstukken gedeeltelijk worden afgeremd door de zijanten van het hoogteverschil. Bij toepassing van aarden wallen wordt de kans op brokstukken verder verkleind, maar wordt de grondschock verhoogd.

Ondergrondse opslag: Er treedt minder schade op aan de oppervlakte, maar een maximale grondschock. Dit is alleen mogelijk als de opslag voldoende diep wordt geplaatst. Vanwege de logistieke problemen en de slechte maakbaarheid van een (zeer) verdiepte opslag in Nederland wordt deze optie niet verder meegenomen in het onderzoek.

Opslag onder water: Er treedt een geringe schade op maaiveldniveau op. De schokenergie wordt door water opgenomen, waarbij de schok zeer ver draagt met veel grotere snelheden dan in lucht het geval is. Vanwege de logistieke problemen en de slechte maakbaarheid van opslag onder water in Nederland wordt deze optie niet verder meegenomen in het onderzoek.

De bovengrondse opslag en de verdiepte opslag worden gekozen uit het oogpunt van de haalbaarheid van plaatsing in Nederland. Een verdiepte heeft een voorkeur vanwege de afscherpende werking van de brokstukken.

## 5.5 Resultaat verkenningen

**Paragraaf 5.1:** De hoeveelheid explosief materiaal en de bijbehorende explosie-effecten zijn aan elkaar gerelateerd, zodat ook **compartimentering (§ 6.1)** wordt meegenomen in. Vuurwerkartikelen uit verschillende transportklassen verschillen sterk van elkaar en dienen ter beperking van explosie-effecten van elkaar te worden gescheiden. Meegenomen in de aspectenuitwerking wordt daarom de **klassenscheiding (§ 6.2)**.

**Paragraaf 5.2:** Initiatie is sterk gekoppeld aan de functie, terwijl externe effecten na uitbreiding sterk gekoppeld zijn aan de constructie. Initiatieonderzoek vergt een risicobenadering die is uitgesloten van het onderzoek. Beperking van uitbreiding wordt verkregen door het aanpassen van de constructie. Meegenomen in de aspecten uitwerking worden daarom de **constructie (§ 6.3)**.

**Paragraaf 5.3:** Het bedrijfsproces wordt geschematiseerd. Na een opgetreden initiatie binnen een functionele ruimte blijkt de **opslag** het belangrijkste bij het voorkomen van de uitbreiding na een initiatie. Daarom wordt de aspectenuitwerking uitgevoerd met het oog op de **opslagruimte**.

**Paragraaf 5.4:** De **constructie** waarin het vuurwerk ligt opgeslagen is van invloed op de explosie-effecten luchtschok en brokstukken (**§ 6.3**). Omgevingsobjecten vangen zijwaartse brokstukken af en hebben geringe invloed op de luchtschok uitbreiding. Meegenomen naar de aspecten uitwerking worden daarom de **aarden wal** en de **bovengrondse** en **verdiepte opslag (§ 6.4)**.

## 6 Uitwerking aspecten

In dit hoofdstuk wordt voor de opslagruimte gezocht naar de invloed van variaties in compartimentering, klassenscheiding, constructie, hoogteligging en omgevingsobjecten.

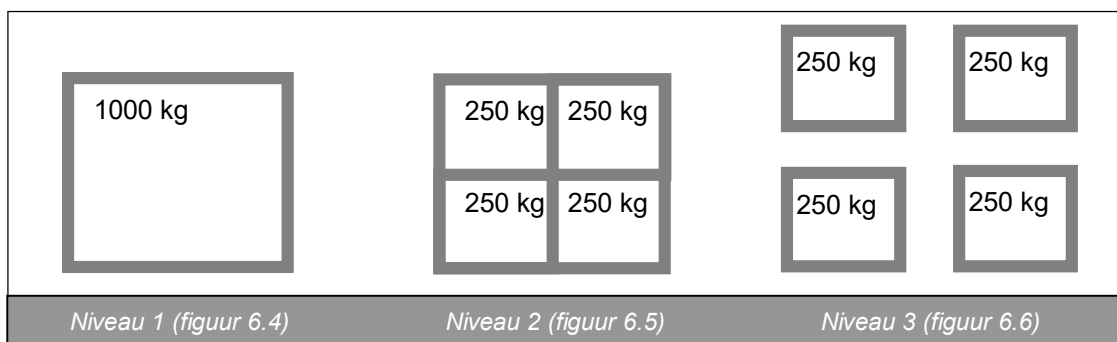
### 6.1 Compartimenteren

Compartimentering is het opdelen van een hoeveelheid stof, zodat de hoeveelheid materiaal dat deelneemt aan de explosie wordt gereduceerd, met als doel de effecten van de stof te reduceren.

#### 6.1.1 Mogelijke variaties

Het opdelen van gevaarlijke stoffen is mogelijk op verschillende niveaus, waarbij de mate van veiligheid van een optredende explosie toeneemt (figuur 6.1).

- Niveau 1: Stoffen worden niet verdeeld en bij elkaar binnen één constructie opgeslagen (geen compartimentering, maar als geheel als compartiment te beschouwen). Dit heeft geen effect op het voorkomen van een massa-explosie.
- Niveau 2: Stoffen verdeeld en door tussenwanden binnen één constructie opgeslagen. De fysieke scheiding dient voldoende sterk gemaakt te worden en de buitenconstructie zeer slap, zodat de druk naar buiten kan ontsnappen. Desondanks is het moeilijk een ontwerp te leveren waarbij de compartimenten tegen een initiatie in één van andere compartimenten feilloos worden beschermd.
- Niveau 3: Stoffen verdeeld en in verschillende constructies opgeslagen. Omdat er naast een gescheiden constructie een zekere afstand tussen de compartimenten wordt bewaard, is dit de veiligste optie, omdat het energieniveau van de explosie-effecten daalt met de afgelegde afstand.



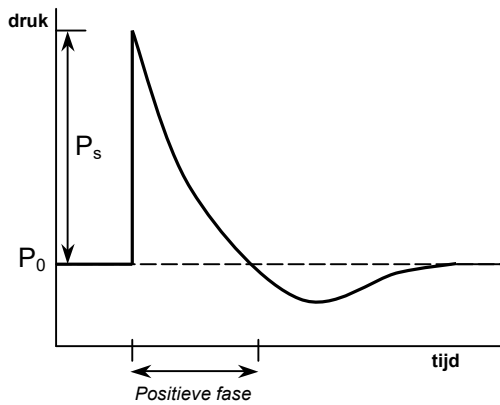
Figuur 6.1 : Compartimentering niveaus

#### 6.1.2 Invloed op explosie-effecten

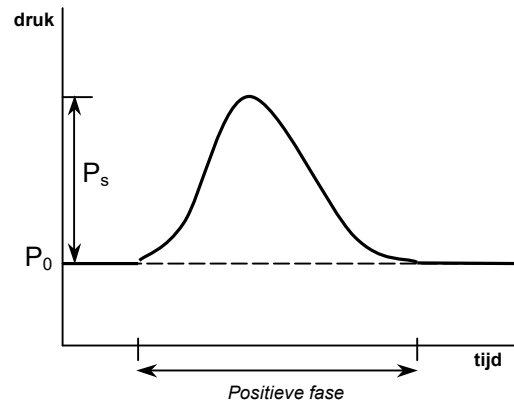
Compartimentering oefent op de explosie-effecten brokstukken en luchtschok een positieve invloed uit, omdat de explosieve hoeveelheid wordt opgedeeld in kleinere partijen die (kort) na elkaar kleinere massa-explosies leveren (figuur 6.5 en 6.6).

Het effectief toepassen van compartimenten valt of staat met de keuze van de hoeveelheid vuurwerk per compartiment en de aan deze hoeveelheid gekoppelde constructie. De gekozen vuurwerkhoeveelheid moet daarbij werkbaar blijven.

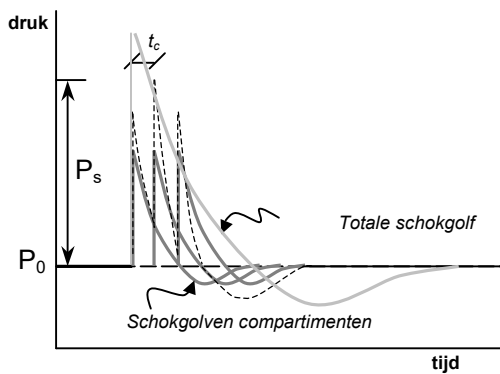
In figuur 6.2 zijn de explosieschok en explosiedruk uitgezet tegen de tijd voor een ongecompartimenteerde constructie (niveau 1). In figuur 6.3 zijn deze uitgezet voor de gecompartmenteerde constructie (niveau 2), waarbij de explosies van de compartimenten door elkaar heen lopen (de  $t_c$  is te klein). Wanneer de tijd tussen de start van de afzonderlijke explosies ( $t_c$ ), afhankelijk van het type explosie, zo groot wordt dat de explosies niet door elkaar heenlopen treedt de situatie op zoals in figuur 6.4 is weergegeven en dan is de piekdrukreductie gemaximaliseerd. Dit kan het beste met niveau 3 worden gerealiseerd, vanwege de afstand tussen de compartimenten.



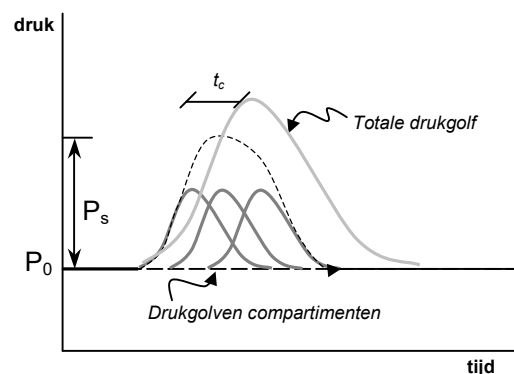
Figuur 6.2a: Schokgolf ongecompartmenteerd



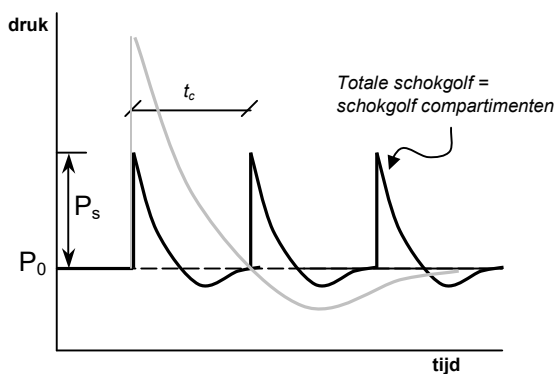
Figuur 6.2a: Druk golf ongecompartmenteerd



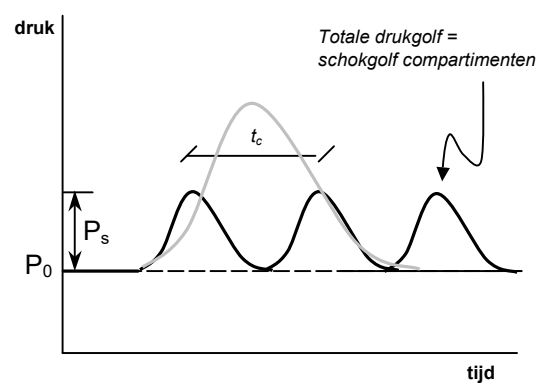
Figuur 6.3a: Schokgolf gecompartmenteerd



Figuur 6.3a: Druk golf gecompartmenteerd



Figuur 6.4a: Schokgolf gecompartmenteerd



Figuur 6.4a: Druk golf gecompartmenteerd

### 6.1.3 Gekozen variant

Compartimenteren is zinvol omdat de piekdruk die ontstaat, bij het opdelen van de opslag in verschillende compartimenten, beduidend lager is dan bij opslag van een grotere hoeveelheid vuurwerk in één compartiment. Daarnaast wordt een volledig gescheiden constructie (niveau 3, figuur 6.1) toegepast omdat de tussenafstand een positief effect heeft op de piekdruk.

## 6.2 Klassen scheiden

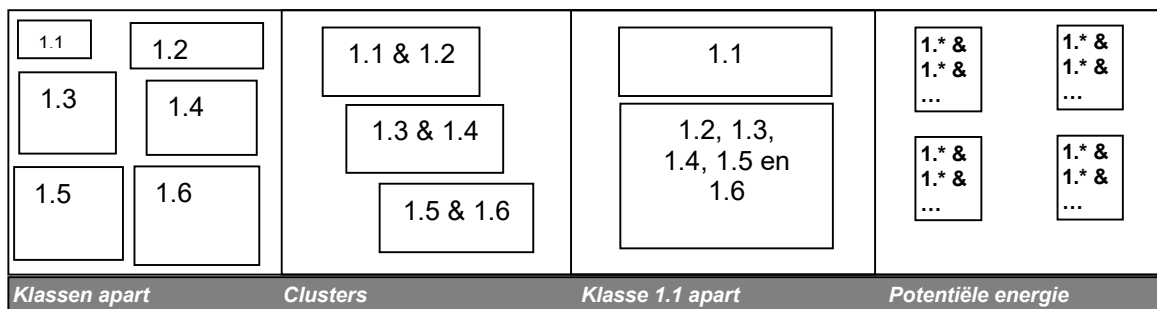
Er bestaan verschillende vuurwerkartikelen, elk met bepaalde karakteristieke explosie-eigenschappen. Door vuurwerk met verschillende transportklassen te scheiden hoeft de opslagruimte maar voor één bepaald maatgevend effect ontworpen te worden. Daarnaast is zo voorkomen dat verschillende klassen in combinatie een heviger explosie-effect veroorzaken dan de klassen afzonderlijk.

Eenduidige klassenomschrijvingen, het benodigde inzicht over de explosie-effecten van de artikelen binnen de afzonderlijke klassen alsmede de betrouwbaarheid van de transportclassificatie zijn essentieel om een klassenscheiding toe te kunnen passen.

### 6.2.1 Mogelijke variaties

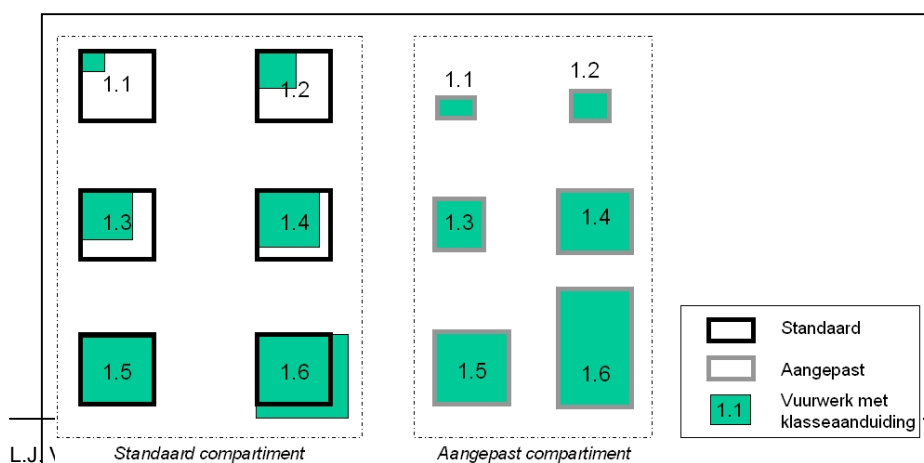
Er zijn verschillende mogelijkheden om scheiding te maken tussen de verschillende klassen.

- **Elke klasse apart:** Elke te onderscheiden klasse zijn apart opgeslagen. Zo is een reactie van een combinatie van verschillende klassen belemmerd.
- **Clusters:** Klassen die qua explosie-effecten dicht bij elkaar liggen zijn gecombineerd.
- **Klasse 1.1 apart:** Klasse 1.1 wordt apart wordt opgeslagen, zodat het grootste combinatiegevaar (1.1 met 1.\*) is voorkomen.
- **Potentiële energie:** Met de aanname dat er een massa-explosie plaatsvindt in de opslagruimte, kan met behulp van de potentiële energie een uitspraak gedaan worden over de maximale hoeveelheid vuurwerk die in de opslagruimte aanwezig mag zijn. Dan maakt het niet uit welke klassen gecombineerd worden.



Figuur 6.5: Variaties klassenscheiding

Bij het toepassen van een bepaald klassenscheiding principe moet de grootte van de opslagruimte worden bepaald. Daarbij zijn er twee mogelijkheden: Het is mogelijk alle opslagruimten dezelfde grootte en eigenschappen mee te geven of elke opslagruimte aan te passen aan de stoffen die erin worden opgeslagen (figuur 6.6).



Figuur 6.6: Standaard of aangepaste opslagruimten

Standaard compartiment:

- Nadeel: Bij de hoge klassen wordt niet de gehele ruimtelijke opslagcapaciteit benut. Per klasse dient uitgerekend te worden hoeveel vuurwerk in de opslag is toegestaan.
- Voordeel: Volledig uitwisselbare opslagruimten (flexibele bedrijfsvoering).

Aangepast compartiment:

- Nadeel: De opslagruimten zijn niet uitwisselbaar.
- Voordeel: Elke klasse heeft eigen opslag hetgeen de eenduidigheid van functionele opslaghandelingen bevordert. De volledige ruimtelijke opslagcapaciteit wordt benut.

## 6.2.2 Invloed op explosie-effecten

Bij het combineren van verschillende klassen kan de totale combinatie gaan reageren als klasse 1.1 vuurwerk. Klasse 1.1 is sterk massa-explosief en bij gezamenlijke opslag met ander geclassificeerd vuurwerk reageert de combinatie mogelijk massa-explosief. Hier heeft het Vuurwerkbesluit rekening mee gehouden door al het vuurwerk binnen een vuurwerkopslag bij klasse 1.1 onder te brengen.

Afhankelijk van de klasse treedt bij klassenscheiding een reductie van de explosie-effecten op. Zo behoudt 1.1 vuurwerk een hoge luchtschok en 1.3 een hoge verbrandingswarmte, maar de combinaties worden uitgesloten.

Klassenscheiding biedt de mogelijkheid om de afzonderlijke klassen ook als zodanig te behandelen en zo uiteindelijk de externe veiligheidsafstand sterk te reduceren.

## 6.2.3 Gekozen variant

Ondanks de voordelen die klassenscheiding met zich brengt, wordt niet gekozen voor klassenscheiding, vanwege de onbetrouwbaarheid van de toegepaste classificatie. Dit is ook bij de maken van het Vuurwerkbesluit de reden geweest om niet werken met [3], (6).

Wanneer de afzonderlijke klassen wel betrouwbaar blijken, zijn de resultaten van dit hoofdstuk bruikbaar bij het toepassen van klassenscheiding.

Daarom wordt er een standaard opslagruimte ontworpen, waarin ongescheiden stoffen worden opgeslagen. Hierbij wordt uitgegaan van de zwaarste transportklasse vuurwerk, waardoor het ontwerp van de ruimte tevens bij klassenscheiding bruikbaar is.

## 6.3 Constructie

Met de constructie wordt de scheidingsconstructie tussen binnen- en buitenomgeving bedoeld. Het accent wordt gelegd op de dak- en wandconstructie, omdat deze in contact met de omgeving staan.

Een wand is een zijdelingse afscheiding van de opslag/bewerkingsruimte waarop in geval van dragende wanden de dakconstructie rust.

De dakconstructie dekt de opslag/bewerkingsruimte aan de bovenzijde af, rust op dragende wanden of kolommen en grenst aan de open lucht.

Het PVE schrijft voor dat er in de wanden geen openingen ten behoeve van lichtinval worden opgenomen, behalve een verplichte af te sluiten opening ten behoeve van transportactiviteiten van minimaal 4 m<sup>2</sup>. De minimale brandwerendheid van de constructie is 60 minuten.

De constructieve onderdelen wand en dak vormen de bescherming tegen natuurlijke weersinvloeden zoals lichtinval, luchtvochtigheid, regen, sneeuw en hagel en zijn daarnaast bestand tegen krachten bij onderhoudswerkzaamheden en tot op zekere hoogte ook tegen invallende brokstukken.

### 6.3.1 Mogelijke variaties

#### 6.3.1.1 Variaties materiaal

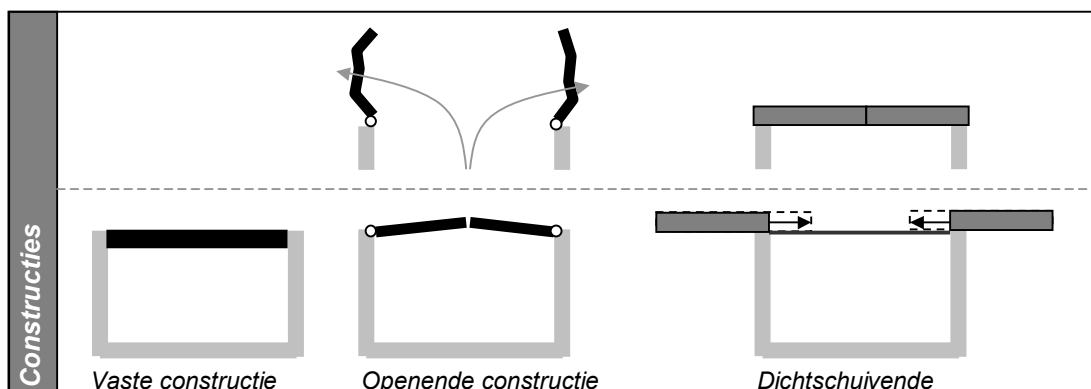
De mogelijk te gebruiken materialen voor een constructie zijn haast onbeperkt. Elk materiaal heeft unieke constructieve eigenschappen, die kunnen worden gebruikt om de explosie-effecten te beïnvloeden. Er wordt een set van drie tegenpolen van belangrijke constructieve eigenschappen opgesteld als handvat om een materiaalkeuze te maken voor de constructieve onderdelen.

Set materiaaleigenschappen:

weinig	↔	veel
licht	↔	zwaar
bros	↔	taai

#### 6.3.1.2 Variaties dak

De dakconstructie is vast of bewegend. Een vaste constructie wordt uitgevoerd door middel van een balklaag met platen of een vlakke plaat constructie. Een bewegende constructie heeft of openende delen die door interne overdruk openslaan of dichtschuivende delen die bij een externe explosie worden gesloten (figuur 6.7).

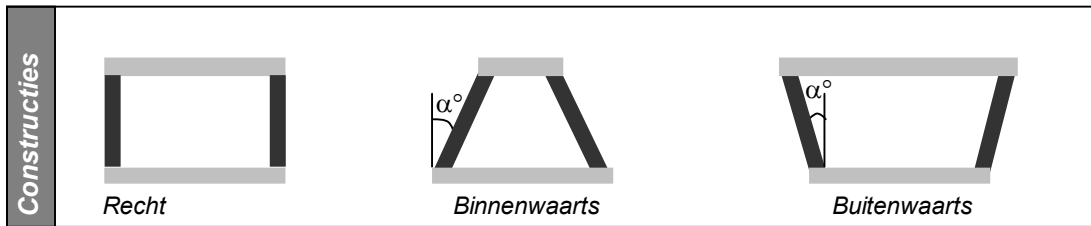


Figuur 6.7: Dakconstructietypen

#### 6.3.1.3 Variaties wand

De wand kan permanent of niet-permanent worden uitgevoerd, waarbij de richting van de wand kan variëren door deze recht of schuin te plaatsen.

Permanente constructies zijn vast en hebben geen bewegingsvrijheden. De niet-permanente constructie kan bestaan uit openslaande of af te sluiten wanden, maar wordt uitgesloten vanwege het mogelijk falen van het bezwijkmechanisme.

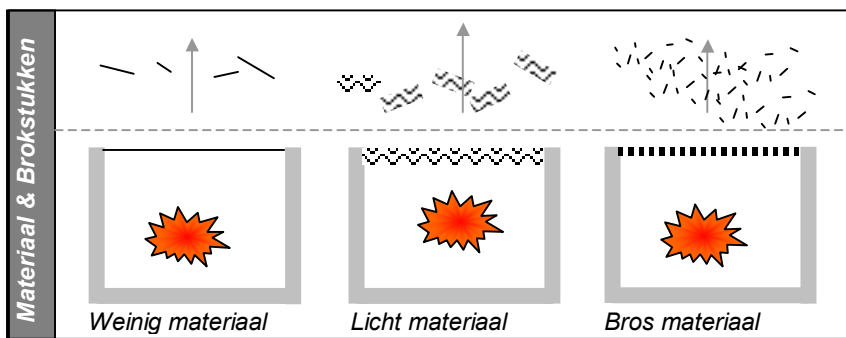


Figuur 6.8: Wandconstructies

### 6.3.2 Invloed op explosie-effecten

#### 6.3.2.1 Invloed materiaal

Afhankelijk van het materiaal en de opbouw van een constructiedeel wordt deze bij een explosie opgedeeld in brokstukken. Deze brokstukken zijn gevaarlijk voor de omgeving omdat zij andere opslagen kunnen beschadigen/initiëren en omdat zij gevaarlijk zijn voor de omgeving.

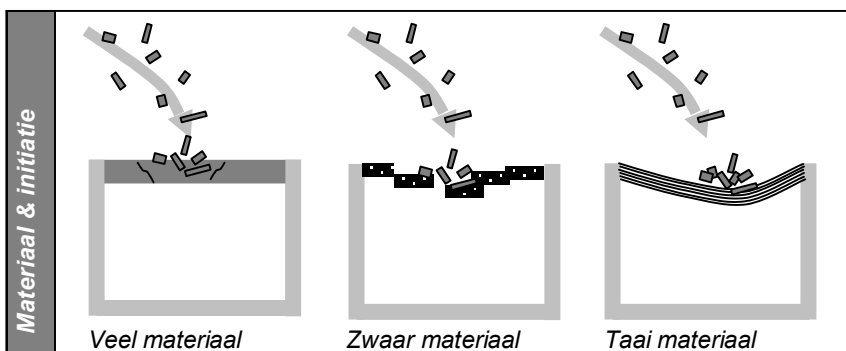


Figuur 6.9a: Invloed materiaal op ontstaan van brokstukken

Weinig materiaal: Als er niet veel materiaal in het constructiedeel zit, wordt er ook niet veel materiaal omgevormd in brokstukken.

Licht materiaal: Lichte materialen ondervinden in relatie tot zware materialen meer luchtweerstand (minder kinetische energie) en worden minder ver weggevoerd.

Bros materiaal: Een bros materiaal kan weinig rek opnemen en bij een opgelegde rek breekt het materiaal in veel kleine brokstukken. Hoe kleiner de brokstukken hoe minder kinetische energie in het brokstuk aanwezig kan zijn.



Figuur 6.9b: Invloed materiaal op inslag van brokstukken

<u>Veel materiaal:</u>	Hoe meer materiaal aanwezig is, hoe groter de weerstand bij inval van brokstukken.
<u>Zwaar materiaal:</u>	Zwaar materiaal dat geen snelheid bezit komt moeilijk op gang omdat massa traag is. De resulterende snelheid (brokstukken en bezwaken materiaal) is veel lager dan de invalsnelheid van de brokstukken.
<u>Taaï materiaal:</u>	Een sterk materiaal dat ver gerekt moet worden voordat het bezwijkt vraagt meer energie dan een even sterk materiaal dat bros is.

### 6.3.2.2 Invloed dakconstructie

Het dak heeft vooral een voor de buitenwereld beschermende functie. Wanneer een initiatie plaatsvindt in de opslag/beweringsruimte, dan belasten de daarop volgende explosie(s) de dakconstructie zwaar. In geval van bezwijken wordt de dakconstructie naar buiten geworpen.

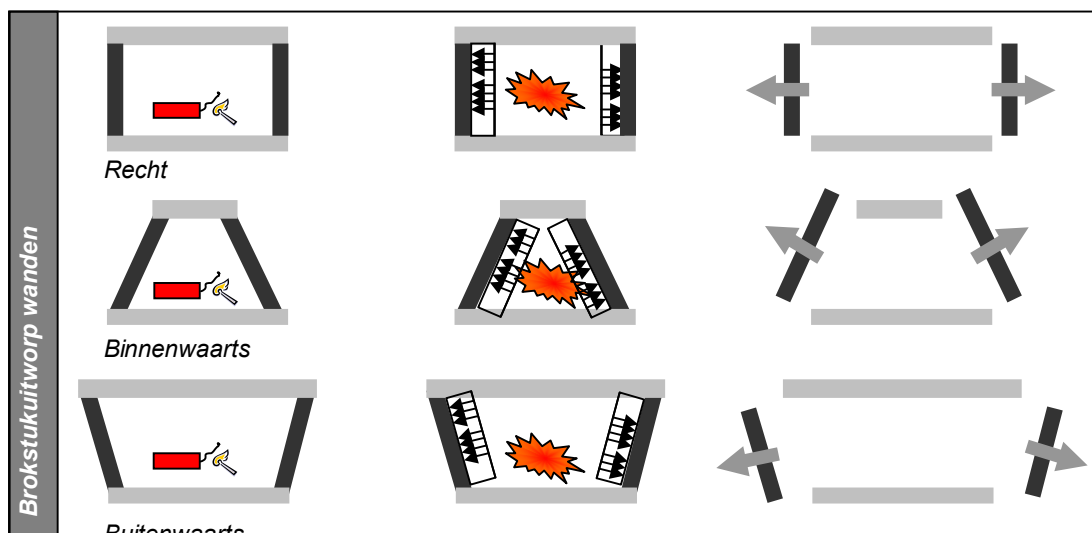
Een vaste dak constructie biedt een permanente totaalbescherming tegen weersinvloeden en in begrensde mate tegen invallende objecten. Daardoor is gegarandeerd dat de kans van initiatie van de in de ruimte aanwezige stoffen door brokstukken van elders beperkt wordt. Het nadeel van een vaste dakconstructie is dat, tenzij de constructie tegen de explosie bestand is, al het materiaal van het dak erbij wordt opgedeeld in brokstukken.

Een openende constructie slaat gemakkelijk open bij een explosie door de verhoogde luchtdruk, zodat een goede decompressie naar buiten mogelijk is. Daarbij dient het openslaande gedeelte 'intact' te blijven zodat er geen brokstukken gevormd worden. De constructie waaraan het openende dak vast blijft zitten (wand of kolom) mag ook niet bezwijken.

Een dichtschuivende constructie voorziet in de gevallen dat er elders in de vuurwerkinrichting iets gebeurt. De dicht te schuiven constructie is een zware constructie, zodat zij in staat is om brokstukken af te remmen of te stoppen en daarom initiatie middels brokstukken van buitenaf 'onmogelijk' is. Bij de opengeschoven toestand is er een minieme dakconstructie aanwezig, zodat bij een verhitting (schuiven worden niet gesloten) en explosie de brokstukken die ontstaan klein zijn. Het falen van dit systeem door het sluiten van de schuifdakconstructie bij interne verhitting leidt tot grote brokstukken, omdat de schuifconstructie is ontworpen op externe brokstukken en niet voor de explosiepiekdruk.

### 6.3.2.3 Invloed wandconstructie

Bij een explosie wordt de constructie aan de binnenzijde met een hoge piekdruk belast. Deze piekdruk staat loodrecht op de wand, zodat bij het bezwijken van de constructie de ontstane brokstukken loodrecht op het vlak van de interne wand weggevoerd worden, met een afwijking van hooguit enkele graden (6). Daardoor kan met de richting van de wand de brokstukuitworp worden beïnvloed. Hoe verder brokstukken naar beneden worden gericht hoe minder ver zij komen, omdat zij tijdens de botsing met de aarde (een gedeelte van) hun energie verliezen.



Figuur 6.10: Invloed helling wand op brokstukken

### 6.3.3 Gekozen variant

#### 6.3.3.1 Materiaalkeuze

##### Constructie bezwijkt totaal:

Welke combinatie ook wordt samengesteld er wordt altijd een constructie samengesteld van één van de volgende drie hoofdprincipes.

totaal:	Alle explosie-effecten komen naar alle richtingen vrij.
gedeeltelijk:	Bepaalde explosie-effecten worden doorgelaten/gestuurd.
niet:	Alle explosie-effecten worden tegengehouden/opgenomen (uitgesloten, U8).

In geval van een opslagterrein met verschillende compartimenten is het belangrijkste, dat de kans op uitbreiding naar andere compartimenten beperkt wordt. De gewenste en verschillende materiaaleigen-schappen 'bescherming tegen brokstukken' en het 'voorkomen van brokstukken' zijn tegenstrijdig.

Keuze 1: **Veel** materiaal, dat **taai** en bovendien **zwaar** is.  
 Gevolgen: De constructie bezwijkt nadat er een hoge drukopbouw in de constructie heeft plaatsgevonden en er ontstaat door drukopbouw een schokgolf met hoge piekdruk. De bezwaken constructie is opgedeeld in vele, grote en zware brokstukken die veel kinetische energie bezitten. Deze brokstukken worden daarom zeer ver weggegooid en dat verhoogt de benodigde veiligheidsafstand. Om bij het raken van andere compartimenten met vuurwerk het bezwijken van die constructie en het initiëren van dat vuurwerk te voorkomen, moet de geraakte constructie ook zwaar(der), taai(er) zijn en uit veel (meer) materiaal bestaan.

Keuze 2: **Weinig** materiaal, dat **bros** en bovendien **licht** is.  
 Gevolgen: De constructie bezwijkt al bij een 'lage' interne druk en er ontstaat een schokgolf met beperkte piekdruk. De bezwaken constructie is opgedeeld in kleine en lichte brokstukken die minder kinetische energie bezitten. Deze brokstukken worden daarom minder ver weggegooid en dat verlaagt de benodigde veiligheidsafstand. Om bij het raken van andere compartimenten met vuurwerk het bezwijken van die constructie en het initiëren van dat vuurwerk te voorkomen, mag de geraakte constructie minder zwaar en taai zijn en uit minder materiaal bestaan als bij keuze 1.

De gewenste materiaaleigenschappen voor bezwijkende constructieonderdelen zijn "weinig, bros en licht" (bijvoorbeeld: cellenbeton) vanwege de:

- Kleinere externe veiligheidsafstand (minder ver weggegooid brokstukken)
- Kleinere initiatiekans bij inslag brokstukken (lagere snelheid, kleinere brokken)
- Lagere drukopbouw luchtschok in de constructie voor het bezwijken ervan

##### Constructie bezwijkt gedeeltelijk:

Als er bij het optreden van een explosie slechts een gedeelte van de constructie bezwijkt, zodat expanderende gassen gemakkelijk weg kunnen, kan door de keuze van het bezwijkende deel invloed uitgeoefend worden op de richting van de brokstukuitworp. Dit wordt bereikt door het dak of één of meerdere wanden bewust zwakker uit te voeren en de resterende constructiedelen te versterken, zodat alleen de zwakke constructie bezwijkt.

#### 6.3.3.2 Keuze dakconstructie

Betreffende de dakconstructie wordt de rechte constructie gekozen, omdat bewegende constructies te gevoelig zijn voor falen (risico).

### **6.3.3.3 Keuze wandconstructie**

Voor de wandconstructie wordt de rechte optie gekozen, omdat binnenwaarts gerichte wanden een grotere wegwerpafstand van brokstukken stimuleren. Daarnaast effectueren buitenwaarts gerichte wanden weliswaar een beperktere wegwerpafstand maar de functionele ruimte die in de constructie overblijft is met de schuine wanden niet praktisch (stofophoping). Als laatste hebben de rechte wanden de minste constructieve dikte nodig, omdat er geen extra krachten in de plaat komen.

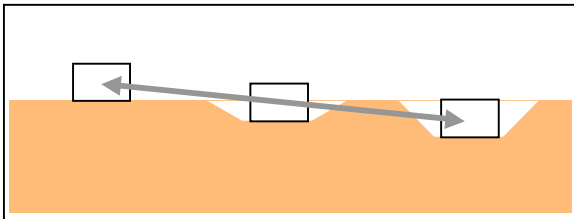
## 6.4 Hoogteligging en omgevingsobjecten

Met hoogteligging wordt de ligging van de constructie ten opzichte van het maaiveld aangeduid. De invloed hiervan is te merken aan de verhouding van de luchtschok/grondschock en de brokstukuitworp.

Met de omgevingsobjecten worden constructies boven het maaiveld in de nabijheid van de hoofdconstructie bedoeld die mogelijk een invloed uitoefenen op de explosie-effecten.

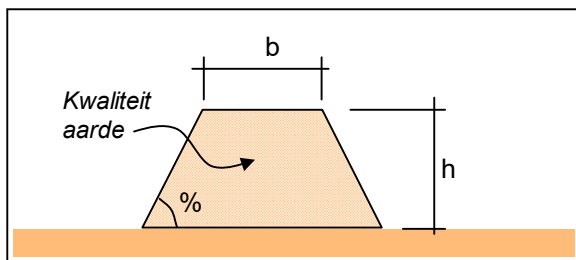
### 6.4.1 Mogelijke variaties

In § 5.4 is aangegeven dat bovengrondse en verdiepte opslag met elke ligging ertussen mogelijk is.

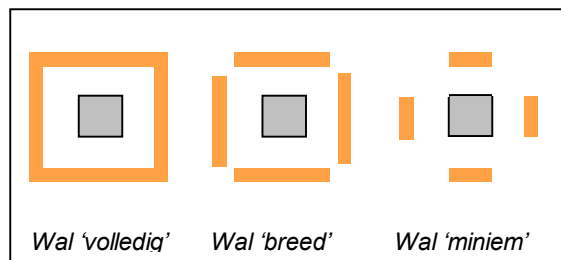


Figuur 6.11: Variatiemogelijkheden hoogteligging

Een aarden wal rond de constructie heeft als variabelen de hoogte (h), bovenbreedte (b), hellingpercentage (%), kwaliteit (opbouw) aarde en de volledigheid van omwalling zelf.



Figuur 6.12: Walconstructie

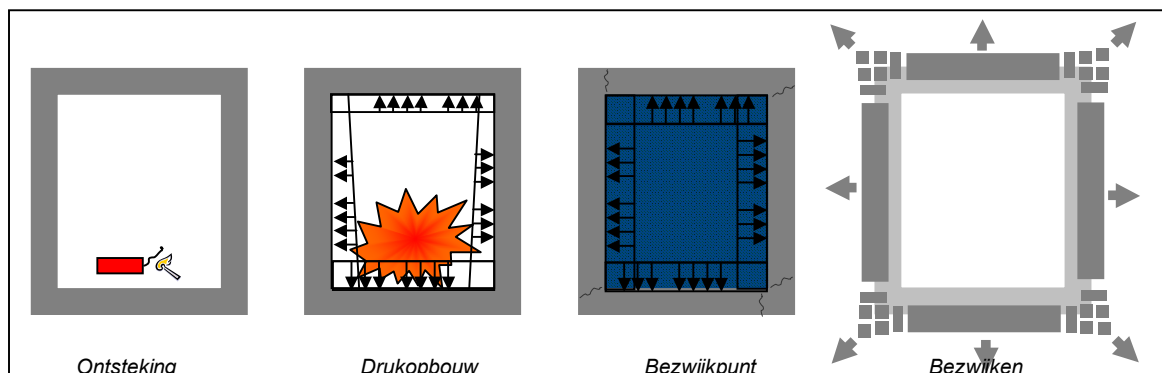


Figuur 6.13: Volledigheid omwalling

### 6.4.2 Invloed op explosie-effecten

De hoogteligging en de aarden wal hebben meer invloed op de brokstukken dan op de grondschock en luchtschock.

Brokstukken: Bij een explosie blijken de brokstukken van muur en dak in de richting te vliegen die zij op het moment van bezwijken meekrijgen. Deze richting hangt voornamelijk af van de oriëntatie van het vlak aan de binnenzijde van de constructie. Aangenomen wordt dat de drukopbouw in de constructie die tot bezwijken leidt op dat moment overal even hoog is, zodat de opgebroken constructiedelen loodrecht op het drukvlak worden weggeworpen (zie figuur 6.13 en 6.14).

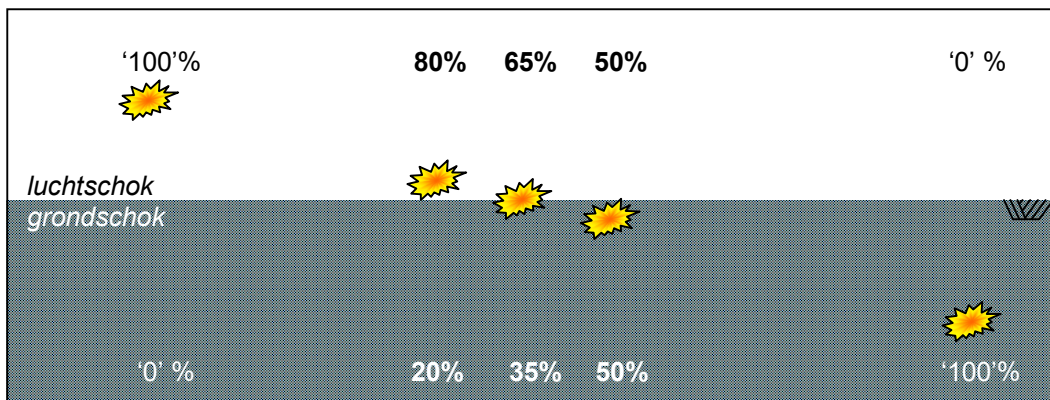


Figuur 6.14: Richting brokstukuitworp (doorsnede ruimte horizontaal of verticaal)  
 De wegwerprichting is belangrijk bij de constructieligging en bij de omgevingsobjecten. Een aarden wal die de constructie volledig omringt vangt, alle zijwaartse brokstukken op indien de wal ten opzichte van de hoogteligging van de constructie voldoende hoog is aangelegd.



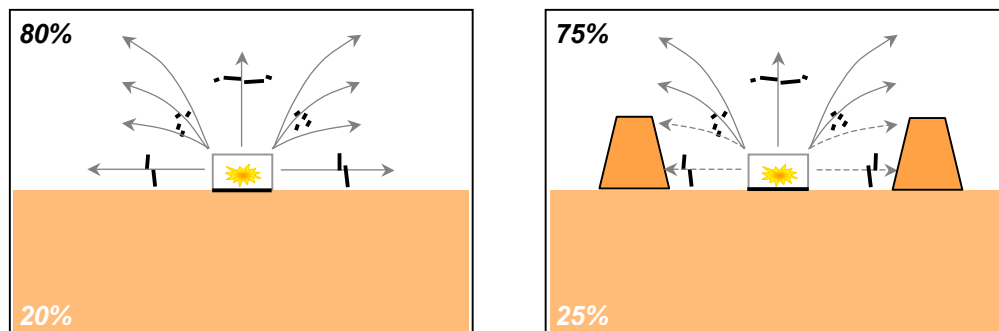
Figuur 6.15: Brokstukuitworp gasexplosie woning [10, pagina 186]

Grondschock/luchtschock: De energie van de schokgolf die ontstaat, verdeelt zich over de grondschock en de luchtschock. Wanneer een explosie volkomen in de lucht plaatsvindt (ver van aardoppervlak) is al de energie terug te vinden in de luchtschock. Bij een (diepe) ondergrondse explosie is alle energie terug te vinden in de grondschock.



Figuur 6.16: Verhouding energie luchtschock/grondschock [8]

Per genoemde **variatie** worden de eigenschappen betreffende grondschock, luchtschock en brokstukken beschreven en toegelicht met een figuur. De aangegeven percentages tussen grondschock en luchtschock zijn geïnterpoleerd tussen de literatuurgegevens uit figuur 6.16.

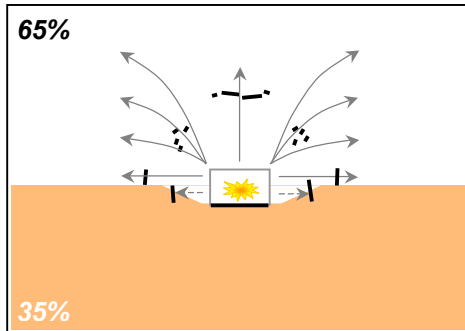


Figuur 6.17a: Bovengronds

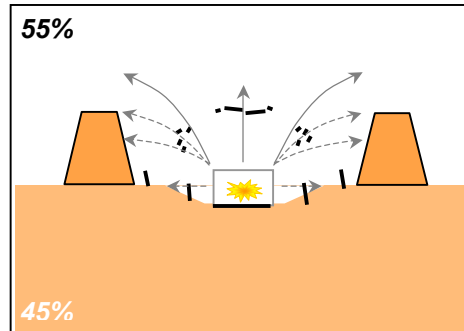
**Bovengronds:** Bij een explosie ontstaan brokstukken naar alle kanten, behalve de onderzijde. De luchtschok heeft ca. 80% van de energie van de schokgolf en de grondschok ca. 20%.

Figuur 6.17b: Bovengronds met aarden wallen

**Bovengronds met aarden wallen:** Bij het exploderen van de constructie worden brokstukken slechts naar boven en in geringe mate naar de zijkant weggegooid. De luchtschok heeft ca. 75% van de energie van de schokgolf en de grondschok ca. 25%.



Figuur 6.17c: Verdiept



Figuur 6.17d: Verdiept met aarden wallen

**Verdiept:** Bij het exploderen kunnen de brokstukken, zij het beperkt naar de zijkanten, naar alle kanten, behalve de onderzijde, weggegooid worden. De luchtschok heeft ca. 65% van de energie van de schokgolf en de grondschok 35%.

**Verdiept met aarden wallen:** Bij het exploderen van de constructie worden brokstukken slechts naar boven en in zeer geringe mate naar de zijkanten weggegooid. De luchtschok heeft ca. 55% van de energie van de schokgolf en de grondschok 45%.

### 6.4.3 Gekozen variant

De verdiepte variant is de meest veilige oplossing betreffende de brokstukken die zijwaarts weggegooid worden. Omdat bij een verdiepte constructie in Nederland echter problemen met de grondwaterstand ontstaan wordt ervoor gekozen om de bovengrondse variant te kiezen.

Met betrekking tot de omgevingsobjecten wordt gekozen om de aarden wal toe te passen, omdat deze zijwaartse brokstukken afvangt.

## 7 Ontwerp uitwerking

Bij de toepassing van losse compartimenten moeten deze, door constructie en de erin opgeslagen hoeveelheid vuurwerk, zo worden samengesteld dat zij andere compartimenten niet kunnen initiëren. Het totaalontwerp omvat één opslagcompartiment met de volledig rondom aangelegde aarden wal.

Nadat in § 7.1 de constructieve opbouw is beschreven en de hoeveelheid vuurwerk is bepaald wordt in § 7.2 het gebouwdeel functioneel ontworpen, waarna in § 7.3 de globale afmetingen van het ontwerp worden bepaald. Het ontwerp wordt in § 7.4 gevisualiseerd.

### 7.1 Algemeen

In deze paragraaf wordt de opbouw van het constructie principe bepaald en de hoeveelheid vuurwerk die erin ligt aangegeven.

#### 7.1.1 Opbouw constructie principe

Uit de aspectuitwerking komt naar voren dat de constructie bovengronds ligt, bestaat uit een permanent dak, rechte wanden en totaal of gedeeltelijk bezwijkt. Rondom de constructie ligt een aarden wal.

Totaal bezwijken

- De totale constructie zo eenvoudig, licht, bros mogelijk, met zo min mogelijk materiaalgebruik.
- De constructie bezwijkt overal 'tegelijktijd' en levert brokstukken naar boven en de zijkanten.

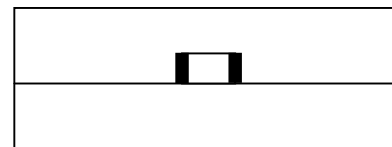
Gedeeltelijk bezwijken

- De constructie bestaat uit zowel zware als lichte constructiedelen.
- De veiligheid is door gegerelde brokstukuitworp hoger.

Vanwege de hogere veiligheid valt de keuze op **gedeeltelijk** bezwijkende constructies, waarbij er zowel het dak als de wand het bezwijkende deel kunnen vormen.

#### A. Dak

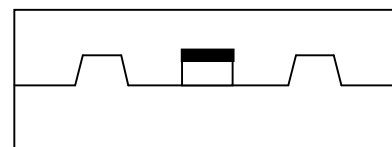
De dakconstructie wordt relatief licht, bros en met weinig materiaal uitgevoerd en de wanden zwaar, taai en met veel materiaal, met het doel dat alleen het dak bezwijkt. Een aarden wal is overbodig omdat brokstukken omhoog vliegen. De deurconstructie in de niet bezwijkende wanden mag ook niet bezwijken en is derhalve een struikelblok in dit alternatief.



- Het alternatief A heeft als voordeel dat er geen zijwaartse brokstukken ontstaan. Er komen geen brokstukken via de zijkant naar binnen. Het dak echter is zwak en levert brokstukken omhoog, die mogelijk onder invloed van wind en afwijkende wegwerphoek bij ander compartiment naar binnen kunnen dringen.

#### B. Wand

De wandconstructie wordt licht, bros en met weinig materiaal uitgevoerd en het dak zwaar, taai en met veel materiaal, met het doel dat alleen één of meer wanden bezwijken. De aarden wal is vereist zodat brokstukken worden afgeremd/opgevangen. De wanden kunnen de dakconstructie niet vasthouden zodat er kolommen nodig zijn tussen vloerconstructie en dakconstructie.



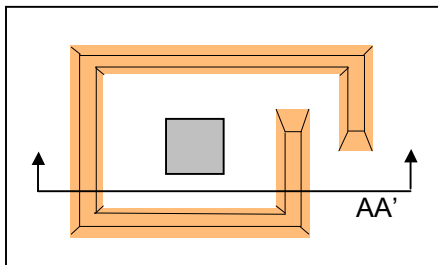
- Het alternatief B, met bezwijkende wanden, heeft als voordeel dat er geen brokstukken de lucht in worden geworpen die in andere constructies kunnen dringen.

De wanden zijn zwak en de brokstukken ervan worden zijwaarts weggeworpen en kunnen opgevangen worden door een aarden wal, zodat zij geen probleem vormen voor andere constructies

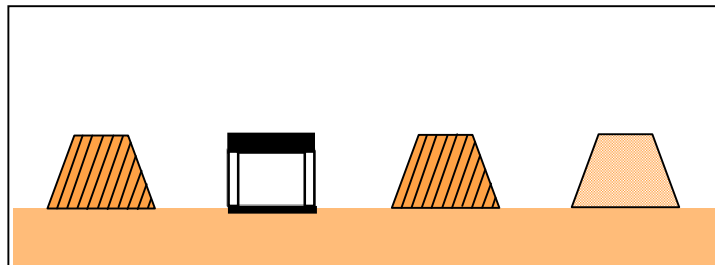
In het uiteindelijke ontwerp is gekozen voor optie B met het sterke dak en de zwakke wanden.

Zowel functionele afmetingen van de interne ruimte als constructieve afmetingen van de volgende onderdelen worden bepaald:

- Dak en Vloer: Het dak is zwaar en sterk en verdraagt de (massa-) explosie. Het dak rust op de vloer via kolommen. De kolommen tussen vloer en dak mogen niet bezwijken tijdens de explosiefase, omdat zij de dakconstructie vasthouden.
- Wanden: De wanden moeten bros en licht worden uitgevoerd, zodat deze bij explosie snel bezwijken.
- Aarden wal: De aarden wal vangt de brokstukken op, daartoe mag de wal niet door de luchtschok worden verplaatst of vervormd. Helling, afmetingen en afstand tot het compartiment moeten worden bepaald.



Figuur 7.1a: Indicatie plattegrond



Figuur 7.1b: Indicatie doorsnede AA' van ontwerp

### 7.1.2 Inhoud compartiment

Het uit te werken compartiment bevat 6.000 kg professioneel vuurwerk dat ingedeeld dient te worden in de transportgevaarklasse 1.1, omdat dan een goed vergelijk is te trekken met de situatie in het Vuurwerkbesluit.

Vuurwerk van deze klasse komt in een dergelijke hoeveelheid niet in de praktijk voor (8) en het is daarom erg conservatief om deze hoeveelheid vuurwerk rechtstreeks gelijk te stellen aan dezelfde hoeveelheid TNT. Op basis van het percentage energetische stof (60%) in het vuurwerk en de aard van de energetische stof (vuurwerk in plaats van TNT) wordt een reductiecoëfficiënt toegepast van 0.6 ten opzichte van TNT (6). De 6.000 kg 1.1 vuurwerk wordt daarmee gelijkgesteld aan 3.600 kg TNT ten behoeve van het berekenen van luchtschok en brokstukuitwerp.

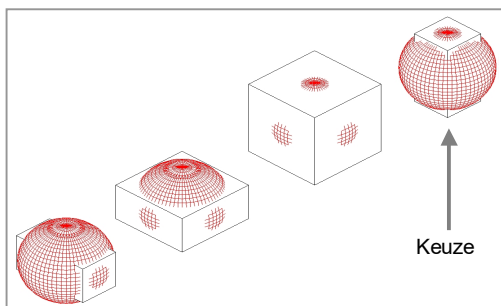
## 7.2 Compartiment functioneel

Functioneel moet het compartiment voldoen aan de gebruikseisen. De vorm van de rechthoekige ruimte (U13) hangt naast de praktische eisen aan een opslagruimte af van de gewenste krachtverdeling van de explosie over de dak- en de wandconstructie.

### 7.2.1 Vorm constructie

Bij ideale explosieve stoffen (transportklasse 1.1) breidt de explosie zich bolvormig uit. Aangenomen dat de uitbreiding vanuit het centrum van de ruimte plaatsvindt verhoudt de totale kracht die op een wand werkt zich ten opzichte van de totale kracht op de dakconstructie overeenkomstig de verhouding van de oppervlakken van wand en dak.

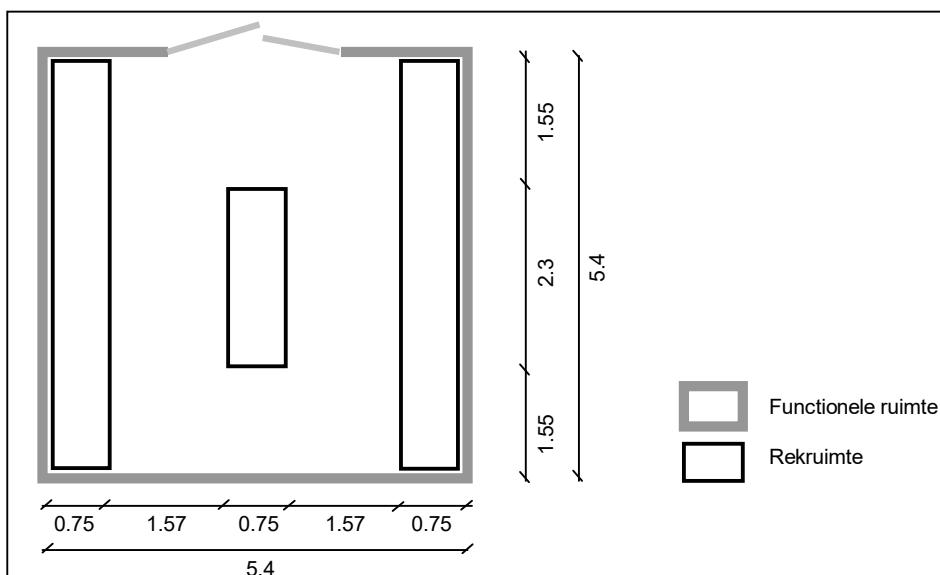
Er zijn een aantal basis ruimteverhoudingen, die in figuur 8.2 wordt getoond. De rechthoekige vorm is de constructieruimte en de bolvorm de explosie-uitbreiding. Er wordt gekozen voor de vierkante hoge ruimte, omdat de totale belasting op het (niet-bezwijkende) dak klein is ten opzichte van de totale belasting op de (bezwijkende) wanden.



Figuur 7.2: Invloed verhouding constructie (rechthoek) m.b.t. explosie (bol)

### 7.2.2 Benodigde interne afmetingen

Op basis van praktijkgegevens (8) is de opslagdichtheid van het vuurwerk inclusief de benodigde extra ruimte voor het opslagrek bepaald op  $280 \text{ kg/m}^3$ . De 6.000 kg vuurwerk vereist dan  $21,5 \text{ m}^3$  opslagruimte. Deze minimale opslagruimte wordt geplaatst in een vierkante constructie in een rek van 75 cm diep (armlengte) en 2,25 meter (reikhoogte gemiddeld persoon) hoog, zodat de lengte van dit rek gelijk is aan 13.1 meter. De functionele plattegrond waarin het benodigde opslagrek en voldoende transportruimte is getekend in onderstaande figuur. Daarin zijn geplaatst 2 rekken van 5.4 meter (10.8 meter) en een rek van 2.3 meter (samen 13.1 m).



Figuur 7.3: Indeling opslagruimte

## 7.3 Compartment constructief

De constructieve berekeningen zijn indicatieve berekeningen ten einde voor de volgende onderdelen de globale afmetingen en materialen te kunnen bepalen [17, 21, 28].

- Dak en vloer (toetsing veldmoment bij explosie)
- Kolommen (druk in rust, trek en buiging bij explosie)
- Wand en deur (moet zo snel mogelijk bezwijken)
- Aarden wal (luchtschok en brokstukken bij explosie)

Uitgangspunten bij de berekeningen:

- De berekeningen zijn statisch, waarbij gerekend wordt met de hoge gereflecteerde piekdruk.
- De piekdruk treedt op hetzelfde moment in de gehele constructie met dezelfde piek op.
- Maatgevende explosie-effecten zijn brokstukken en de luchtschok.
- Onbezweken constructiedelen mogen na de explosie door hittestraling bezwijken.
- Brokstukinslag van andere compartimenten is uitgesloten wegens de brokstukrichting en de wal.

### 7.3.1 Dakplaat

**Eisen:** Regendicht, vochtdicht, geen lichtinval, bezwijkt niet, 60 minuten brandwerend.

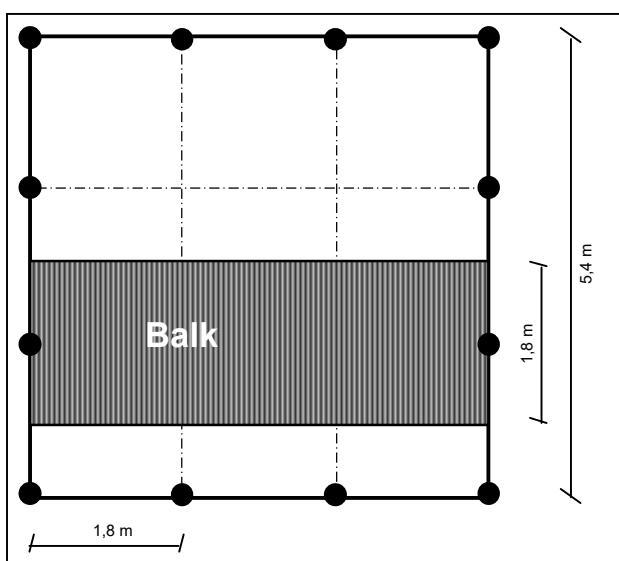
**Opbouw:** Vlakke plaat

**Materiaal:** Hoogwaardige beton en voorspanwapening

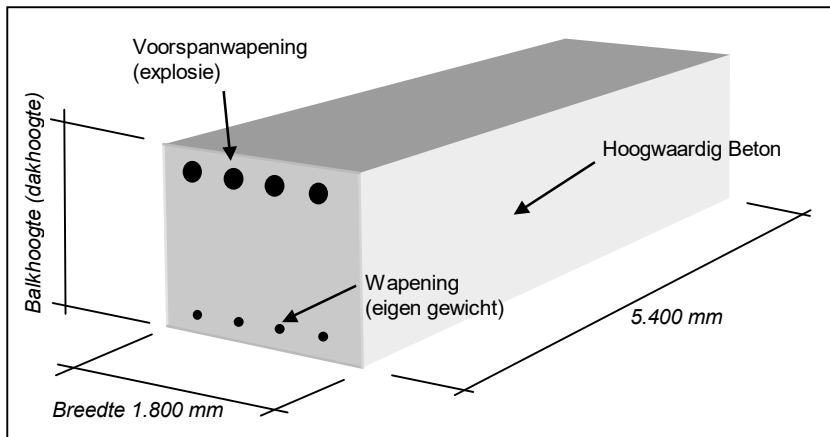
Afhankelijk van de afstand van het hoogtecentrum van de ruimte tot de onderzijde van de dakconstructie treedt er een gereflecteerde piekdruk op. Deze piekdruk vindt gedurende een zeer korte tijd over de gehele onderzijde van dakplaat plaats.

Om de hoogte van de dakplaat te bepalen wordt de dakplaat geschematiseerd als losse balken (zie figuur 7.4). Door het maatgevende moment in de balk te bepalen kan de balkhoogte worden berekend. Omdat het dak niet in een richting overspant maar in twee richtingen, is deze benadering conservatief.

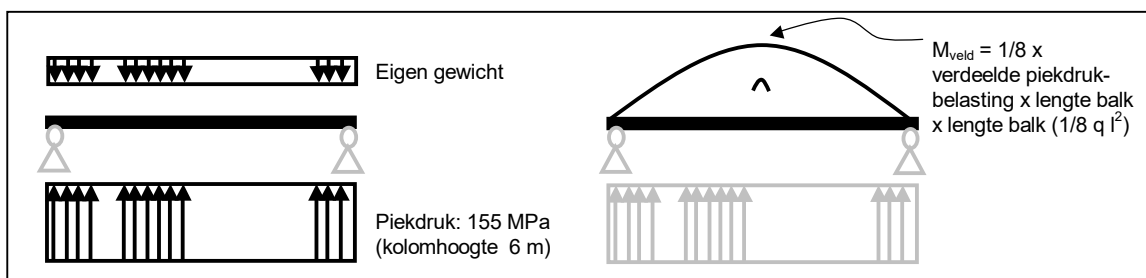
Er wordt uitgegaan van een ruimte van 5,4 meter bij 5,4 meter (functioneel ontwerp), waarbij de kolommen aan de wanden zijn geplaatst met een onderlinge afstand van 1,8 meter. Door de overspanning ontstaat er een moment in het midden van de balk (figuur 7.6).



Figuur 7.4: Modelleringsdakconstructie met balk



Figuur 7.5: Schematische balk



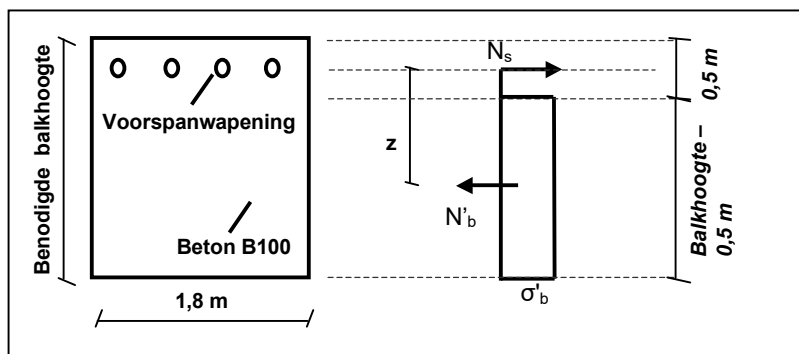
Figuur 7.6: Mechanica schema's balk en Momentenverdeling van explosie

Voor de balk wordt aangenomen dat zij scharnierend aan beide zijde is opgelegd. Het eigen gewicht dat reducerend werkt op de piekdruk ligt in een te verwaarlozen ordegrrootte.

Bij een kolomhoogte van 6 meter is de gereflecteerde piekdruk 155 N/mm<sup>2</sup>. Deze piekdruk wordt vanwege de dynamische reservecapaciteit van het beton B100 geaccepteerd. De verdeelde belasting q is de breedte van de balk (1,8 meter) maal de optredende piekdruk (155 · 10<sup>3</sup> kN/m<sup>2</sup>). Dit levert een moment in het midden van de betonbalk ter grootte van (1/8 q l<sup>2</sup>):

$$M_{\text{optredend}} = 1/8 \times 279 \cdot 10^3 \text{ (kN/m)} \times 5,4^2 \text{ (m}^2\text{)} = 1.016.955 \text{ kNm}$$

Aangenomen wordt dat de voorspanwapening in de bovenste halve meter van balk is opgenomen en de beton in de rest van de balkhoogte plastisch vervormt (figuur 7.12). Het maximaal moment wordt opgebracht door drukkracht N'<sub>b</sub> in de plastische zone en de trekkracht N<sub>s</sub> van de wapening. De afstand tussen deze gelijke krachten is met een balkhoogte van 4 m gelijk aan 2 m. Het moment levert dan voor zowel N'<sub>b</sub> als N<sub>s</sub> de kracht: 508.475 kN.



Figuur 7.7: Doorsnede strook en spanningverloop bij plastisch materiaalgedrag

Met 6% **voorspanwapening** is de kracht in de wapening dan gelijk aan  $1177 \text{ N/mm}^2$ . Om deze kracht op te nemen is voorspanstaal met een treksterkte van  $1200 \text{ N/mm}^2$ .

De **betondrukzone** heeft een oppervlak van  $63 \cdot 10^5 \text{ mm}^2$ . De kracht per vierkante millimeter beton is dan  $80 \text{ N/mm}^2$ . Beton B100 heeft een betondruksterkte met rekenwaarde voor de éénassige druksterkte van  $60 \text{ N/mm}^2$ . De gevonden druk ligt dus boven de rekenwaarde van de beton, maar omdat de belasting kortdurend is en de beton mag scheuren wordt deze waarde geaccepteerd.

De voorgaande berekening slechts dient om aan te tonen dat er een dakplaat is te ontwerpen die de druk van de explosie kan weerstaan en niet ten behoeve van de definitieve afmetingen. De aansluitdetails van kolom met de dakplaat worden niet berekend, maar aanbevolen voor nader onderzoek.

De dakhoogte wordt vastgesteld op 3,5 meter vanwege de conservatieve berekening:

- *De strokenmethode is een vereenvoudigde conservatieve modellering van de dakplaat, omdat dakplaat niet naar één zijde overspant, maar naar twee zijden.*
- *Aansluitingen met kolommen zijn niet scharnierend maar ingeklemd, zodat er eigenlijk een reductie van het optredende moment plaatsvindt, wat gunstig is voor de benodigde hoogte van de dakplaat. Hiervoor is het nodig dat de voorspanwapening in het midden van het dak aan de bovenzijde loopt en aan de randen iets meer aan de onderzijde.*

### 7.3.2 Vloer

<b><u>Eisen:</u></b>	Vochtdicht, niet bezwijken, vasthouden dakconstructie middels kolommen.
<b><u>Opbouw:</u></b>	Vlakke plaat
<b><u>Materiaal:</u></b>	Hoogwaardig beton en voorspanwapening

De afmetingen van de vloerconstructie liggen in dezelfde ordegrootte als de dakconstructie, omdat zowel dakconstructie als vloerconstructie dezelfde explosiekrachten over brengen naar de kolommen. De kolommen houden de vloer en de dakconstructie bij elkaar.

Aangezien de vloerconstructie ook weerstand van de aarde ondervindt is het buigend moment dat optreedt naar aanleiding van de explosie een stuk kleiner. Hierdoor kan de grondplaat in het midden slanker worden geconstrueerd, tenzij blijkt dat dit voor de momentvaste verbindingen van de kolommen niet is toegestaan.

De vloerafmetingen worden nu overgenomen van de dakconstructie en zijn in ieder geval conservatief.

### 7.3.3 Kolommen

<b>Eisen:</b>	Bestand tegen drukkracht, trekkracht en zijwaartse explosiedruk.
<b>Opbouw:</b>	Samengestelde trek/druk kolom.
<b>Materiaal:</b>	(hoogwaardig) constructie staal (460 N/mm <sup>2</sup> ).

Er worden eisen opgesteld voor onderstaande bezwijkmechanismen, waarna met deze eisen een kolom samengesteld wordt. De belastinggevallen (rust en explosie) worden apart behandeld, omdat in geval van een explosie de druk van het dak reducerend werkt op de explosiedruk aan de onderzijde van het dak.

- de druk van het dak in rusttoestand (knik)
- de trek van het dak tijdens de explosie (trek)
- de zijwaartse explosiedruk (buiging & afschuiving)

De kolommen mogen best bezwijken, maar dan wel nadat het dak niet meer de neiging heeft om omhoog te worden gedrukt. Een dynamische berekening zal daarom de in dit hoofdstuk gevonden afmetingen sterk reduceren. Omdat hier slechts statisch wordt gerekend, dient de kolom tijdens explosie zowel de trekkracht als de zijwaartse kracht op te kunnen nemen.

#### 7.3.3.1 Eisen kolom op basis van druk

De druk die ontstaat in de kolommen is het gewicht van het door de kolom gedragen dakdeel met een veiligheidsfactor van 1,5. Extra lasten zijn verwaarloosbaar bij het gewicht van de dakplaat.

$$\begin{array}{llll}
 \text{Kracht in kolom:} & N_k & = & \gamma_v \times A_{dak} \times d_{dak} \times \rho_{dak} \times g & (325 \text{ kN}) & (7.1) \\
 & \gamma_v & ; & \text{veiligheidsfactor} & (1,5) \\
 & A_{dak} & ; & \text{oppervlak gedragen dak} & (2,43 \text{ m}^2) \\
 & d_{dak} & ; & \text{dakdikte} & (3,5 \text{ m}) \\
 & \rho_{dak} & ; & \text{dichtheid dak (beton)} & (2.600 \text{ kg/m}^3) \\
 & g & ; & \text{zwaartekracht versnelling} & (9,81 \text{ m/s}^2)
 \end{array}$$

Met de functionele afmetingen waar ook de dakplaat mee is bepaald (5,4 . 5,4 m<sup>2</sup> en 12 kolommen) is het oppervlak per kolom gelijk aan 2,43 m<sup>2</sup>. De dakdikte is in § 7.3.2 bepaald op 3,5 meter. Met formule 8.3 wordt de drukkracht in de kolom bepaald op 325 kN. Met het gekozen constructiestaal S460 is de minimale doorsnede van de kolom dan 700 mm<sup>2</sup>.

Voordat de vloeispanning in de doorsnede wordt bereikt treedt er echter mogelijk knik op. Dit wordt met de snelle maar te optimistische Eulerse methode getoetst. Vanwege de te optimistische benadering wordt de drukkracht van te voren vermenigvuldigd met een factor 1,3, zodat de op te nemen drukkracht in verband met knik komt op 423 kN.

Het minimale traagheidsmoment van de totale doorsnede wordt met formule 7.2 bepaald, waarbij voor de kniklengte (lengte tussen twee buigpunten) de totale lengte van de kolom wordt genomen.

$$\begin{array}{llll}
 \text{Eulerse knikkracht:} & F_{y,Euler} & = & \frac{\pi^2 E_s I_y}{l_{y,knik}^2} & (423 \text{ kN}) & (7.2) \\
 & E_s & ; & \text{stijfheidmodulus staal} & (210.000 \text{ N/mm}^2) \\
 & I_y & ; & \text{minimaal traagheidsmoment} & (735.10^4 \text{ mm}^4) \\
 & l_{y,knik} & ; & \text{kniklengte} & (6 \text{ m})
 \end{array}$$

#### 7.3.3.2 Eisen kolom op basis van trek

De trekkracht in de kolom wordt bepaald door sommatie van de explosiedruk over het oppervlak van het door de kolom gedragen dak. De kracht op de onderzijde van de dakconstructie is (§ 7.3.2) 155 N/mm<sup>2</sup>. Per vierkante meter dak is deze kracht gelijk aan 1,55 . 10<sup>8</sup> N. Als deze kracht elastisch moet

worden opgenomen door een stalen kolom (elke kolom heeft 2,43 m<sup>2</sup> dak) met een treksterkte van 460 N/mm<sup>2</sup> is hiervoor een kolomdoorsnede nodig van ruim 818.910 mm<sup>2</sup> (ca. 8 x HE1000 M).

Wanneer de **plastische fase** wordt benut zijn kleinere doorsneden mogelijk. Er wordt dan gerekend met de energie die de kolommen opnemen ofwel de arbeid verricht door de kolommen bij verlenging.

De energie die door de kolom moet kunnen worden opgenomen wordt bepaald aan de hand van de gereflecteerde luchtschok impuls aan het dak. Er wordt hierbij een conservatieve aanname gedaan dat de explosie-impuls volkomen wordt overgeven aan de dakconstructie. Met een kolomlengte van 6 meter en 3.600 kg TNT in de ruimte is de impuls tegen de onderzijde van het dak 92.000 [(N/m<sup>2</sup>).s].

Met de impuls formule 8.3 wordt de snelheid van een vierkante meter dak bepaald die de dakconstructie krijgt als zij niet zou worden vastgehouden door de kolommen.

$$\begin{aligned}
 \text{Impuls:} \quad I &= M \times V && (92.000 \text{ (N/m}^2\text{).s}) && (7.3) \\
 M &; \text{ massa dak} && (3,5 \times 2.600 \text{ kg}) \\
 V &; \text{ snelheid} && (10,1 \text{ m/s})
 \end{aligned}$$

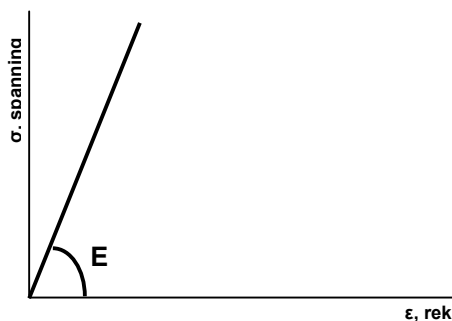
Met de kinetische energie formule 8.4 wordt de energie bepaald van 2,43 vierkante meter dak die uiteindelijk door de kolom moet worden opgenomen.

$$\begin{aligned}
 \text{Energie:} \quad E_{kin} &= f \times \frac{1}{2} \times M \times V^2 && (1.127.873 \text{ J}) && (7.4) \\
 f &; \text{ m}^2 \text{ per kolom} && (2,43 \text{ m}^2) \\
 M &; \text{ massa dak} && (3,5 \times 2.600 \text{ kg}) \\
 V &; \text{ snelheid} && (10,1 \text{ m/s})
 \end{aligned}$$

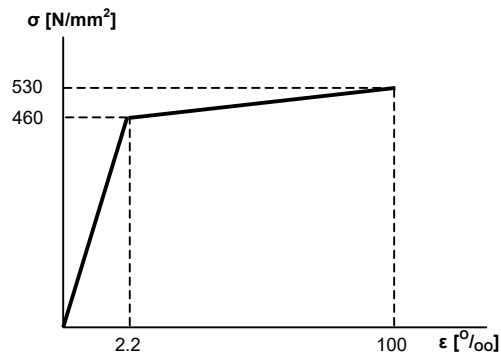
Elke vierkante millimeter kolom levert elastisch en plastisch een bepaalde hoeveelheid arbeid op. De arbeid is de verlenging naar aanleiding van een bepaalde trekkracht vermenigvuldigd met de trekkracht zelf en wordt in de formules 7.5 bepaald, waarbij gebruik gemaakt is van de figuren 7.8 en 7.9. Bij toepassing van constructiestaal S460 is de eerste 2,2 ‰ lengtetoeename is elastisch. Vervolgens neemt de rek plastisch toe tot ongeveer 100 ‰ (de rek waarbij insnoering gaat plaatsvinden).

$$\begin{aligned}
 \text{Arbeid elastisch:} \quad W_{el} &= F \times X && (3 \text{ J}) && (7.5a) \\
 F_{gem} &; \text{ gemiddelde trekkracht} && (0,5 \times 460 = 230 \text{ N}) \\
 X &; \text{ afgelegde weg} && (0,0022 \times 6 \text{ m})
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Arbeid plastisch:} \quad W_{pl} &= F \times X && (290 \text{ J}) && (7.5b) \\
 F &; \text{ trekkracht kolom} && (0,5 \times (460 + 520) = 495 \text{ N}) \\
 X &; \text{ afgelegde weg} && ((0,1 - 0,0022) \times 6 \text{ m})
 \end{aligned}$$



Figuur 7.8: E-modulus staal (S460)

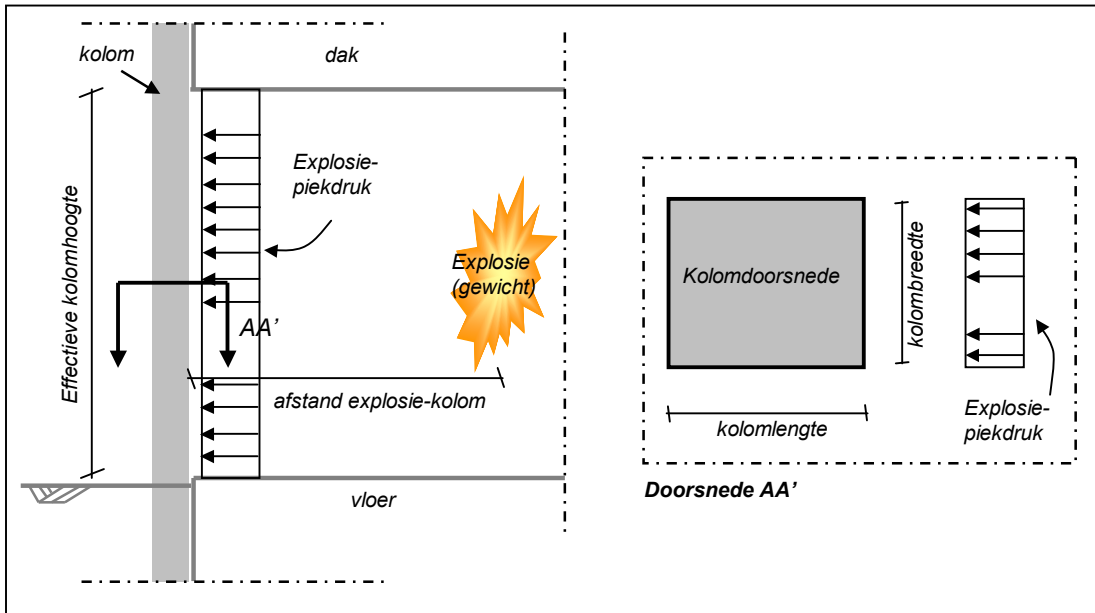


Figuur 7.9: Vereenvoudigd (conservatief) staaldiagram constructiestaal S460 (3)

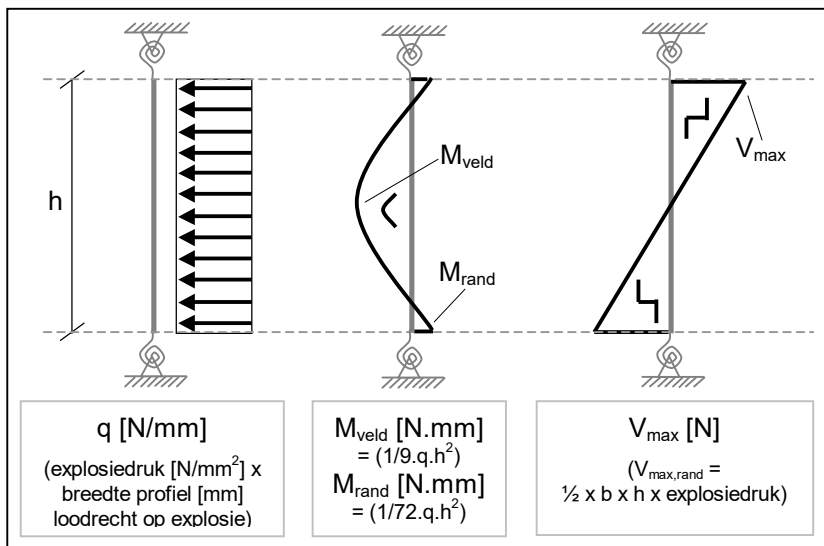
De totale arbeid verricht door een vierkante millimeter stalen kolom is  $W_{el} + W_{pl}$  ofwel  $293 \text{ N/mm}^2$ . De op te nemen hoeveelheid energie per kolom is  $1.127.873 \text{ J}$ , zodat de minimale doorsnede van de kolom gelijk is aan  $3.849 \text{ mm}^2$ .

**7.3.3.3 Eisen op basis van zijwaartse kracht**

De kolom wordt door de explosie ook zijwaarts belast. Deze druk levert een buigend moment en dwarskrachten in de kolom. In principe vangt de kolom ook een gedeelte van de wand op, maar omdat deze meteen via afschuiving breekt wordt deze kracht verwaarloosd ten opzichte van de piekdruk van de luchtschok.



Figuur 7.10: kolomschets en doorsnedenaanduidingen



Figuur 7.11: Mechanicaschema kolom

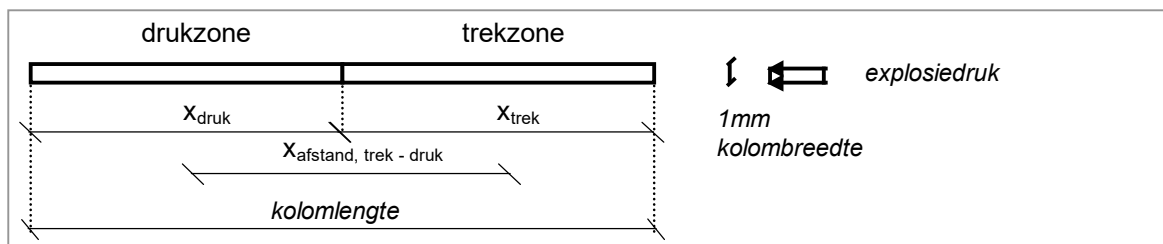
Bovenstaand schema geeft de verbinding aan met de dakplaat (en de vloer). Deze dient zodanig sterk ontworpen te worden dat het veldmoment gelijk is aan  $1/9 \times q \times h^2$  en het randmoment gelijk is aan  $1/72 \times q \times h^2$ , omdat dan de benodigde doorsnede afmetingen voor buigend moment en dwarskracht bij zowel kolommidden als kolomkop en kolomvoet gelijk blijken zijn. Voor de

dwarskracht geldt een waarde gelijk aan de halve hoogte x breedte profiel (loodrecht op explosie) x de explosiedruk.

Bij de keuze voor de kolommen aan de buitenzijde van de wanden wordt de maatgevende zijwaartse belasting de gereflecteerde piekdruk van  $100 \text{ N/mm}^2$  als de kolommen 4 meter uit het centrum van de ruimte worden geplaatst.

Het optredende moment per mm kolombreedte loodrecht op de explosierichting in het veld is dan met een kolomhoogte van 6 meter gelijk aan  $400 \text{ kNm}$  en voor de rand gelijk aan  $50 \text{ kNm}$ .

In de plastische fase is het opneembare moment van een doorsnede te bepalen door het plastische weerstandmoment te vermenigvuldigen met de maximale vloeispanning. Het weerstandmoment van een willekeurige doorsnede is het oppervlak van de drukzone vermenigvuldigd met de afstand van het centrum van de drukzone tot het centrum van de trekzone (figuur 7.12).



Figuur 7.12: Weerstandmoment horizontale kolomdoorsnede

Het minimale weerstandmoment met een staalkwaliteit van  $460 \text{ N/mm}^2$  is voor het veldmoment  $870.000 \text{ mm}^3$  en voor het randmoment  $109.000 \text{ mm}^3$ . Het weerstandmoment van een massief stalen doorsnede zoals aangegeven in figuur 7.18 is gelijk aan  $x^2$ , omdat  $x_{\text{druk}} = x_{\text{trek}} = x_{\text{afstand}} = x$ . De lengte van de massief stalen kolom is dan minimaal 2 maal de wortel uit het gewenste weerstandmoment. Voor het veldmoment en het randmoment zijn dat dan  $1.865 \text{ mm}$  respectievelijk  $660 \text{ mm}$ .

Met betrekking tot de **dwarskracht** nabij de dakplaat en de vloer is een minimale doorsnede nodig van de optredende dwarskracht gedeeld door de schuifkracht van het constructiestaal. De dwarskracht is (per mm breedte van de kolom loodrecht op de explosierichting) is gelijk aan  $300.000 \text{ N}$ . De maximale kracht die middels schuifsterkte overgebracht kan worden is gelijk aan  $460 / \sqrt{3} = 265 \text{ N/mm}^2$ . Daarom is de minimale kolomlengte voor de dwarskracht  $1130 \text{ mm}$ .

#### 7.3.3.4 Samenstelling kolom:

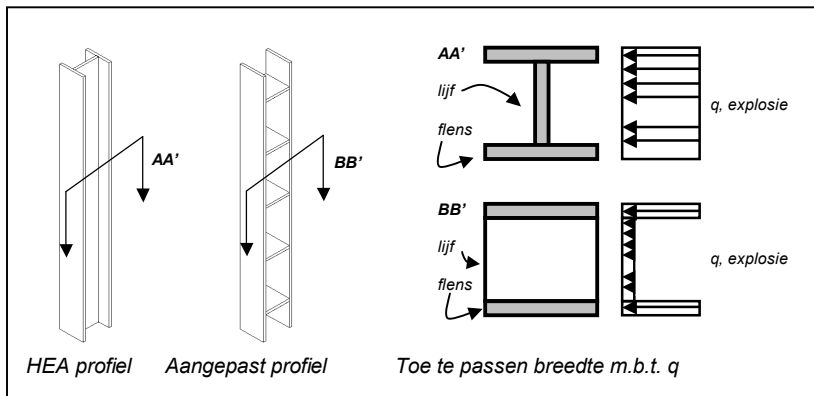
Samenvattend is voor de kolom het volgende eisenpakket op te stellen:

Druk (oppervlakte):	$700 \text{ mm}^2$ , onafhankelijk van kolombreedte
Druk (traagheidsmoment):	$7.350.000 \text{ mm}^4$ , onafhankelijk van kolombreedte
Trek (oppervlakte):	$818.910 \text{ mm}^2$ , onafhankelijk van kolombreedte (elastisch)
Trek (oppervlakte):	$3.849 \text{ mm}^2$ , onafhankelijk van kolombreedte (plastisch)
Buiging veld (lengte kolom):	$1.865 \text{ mm}^1$ , per mm kolombreedte
Buiging rand (lengte kolom):	$660 \text{ mm}^1$ , per mm kolombreedte
Dwarskracht (lengte kolom):	$1.130 \text{ mm}^1$ , per mm kolombreedte

De te ontwerpen kolom heeft een zo klein mogelijke breedte loodrecht op de explosierichting, om de dwarskracht en de momenten die in de kolom ontstaan zo klein mogelijk te houden.

Er wordt een speciaal profiel samengesteld dat is aangepast aan de gestelde eisen voor de verschillende typen krachten. Deze kolom is geschetst in figuur 7.13. Het principe van de kolom is dat het lijf van het HE profiel een kwartslag wordt gedraaid en de flenzen een forser formaat krijgen. De flenzen nemen de dwarskracht en het moment tijdens de explosie en de drukkracht in rust op. De horizontaal gedraaide tussenschotten houden de flenzen bij elkaar en dienen ervoor te zorgen dat bij buiging geen kip optreedt en dat in rust de twee flenzen één geheel vormen, zodat er geen knik kan optreden.

De kolom ondervindt in rust alleen de druk, zodat voldaan moet worden aan het minimaal opgestelde traagheidsmoment voor de totale kolom. Tijdens de explosie moet voldaan worden aan de dwarskracht, het veldmoment, het randmoment en de trekkracht.



Figuur 7.13: Toelichting invloed doorsnede

**Rand (kop en voet):**

Lengte van de kolomdoorsnede (flenslengte) ten behoeve van:

$$\begin{array}{l} \text{Dwarskracht:} \quad 1.130 \text{ mm} \\ \text{Buiging:} \quad \quad \frac{660 \text{ mm}}{1.790 \text{ mm}} + \end{array}$$

Dan moet er nog  $3.849 \text{ mm}^2$  ten behoeve van de plastische trekkracht verdeeld worden over de twee profieldelen. De verlenging van de doorsnede ten behoeve van de trekkracht hangt af van de gekozen kolombreedte. Bij een staalplaatdikte van 50 mm wordt de lengte van de kolomdoorsnede (flenslengte) voor de trekkracht vergroot met  $3.849 / (2 (\text{profiel delen}) \times 50) = 39 \text{ mm}$ . De totale lengte van de doorsnede is dan  $1.790 + 39 \text{ mm} = 1829 \text{ mm}$ .

**Veld (midden kolom):**

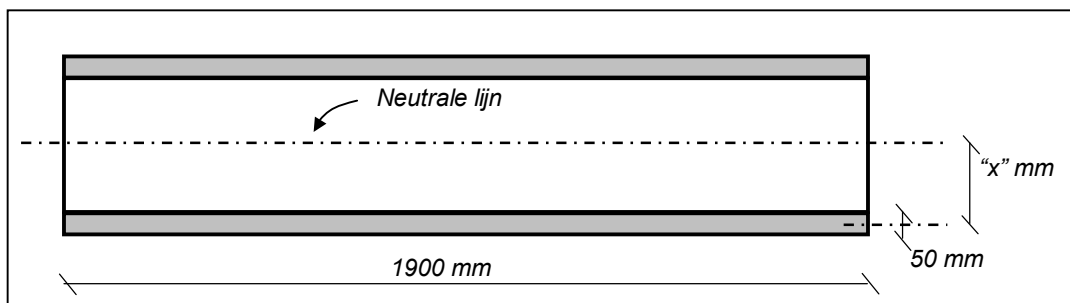
Lengte van de kolomdoorsnede (flenslengte) ten behoeve van:

$$\begin{array}{l} \text{Dwarskracht:} \quad 0 \text{ mm} \\ \text{Buiging:} \quad \quad \frac{1.865 \text{ mm}}{1.865 \text{ mm}} + \end{array}$$

Dan moet er net als bij de rand (kop en voet) nog 39 mm voor trekkracht worden opgeteld. De totale lengte van de doorsnede is dan  $1.865 + 39 \text{ mm} = \text{ca. } 1900 \text{ mm}$ .

**Totale kolom:**

De totale kolomdoorsnede ziet er als volgt uit.



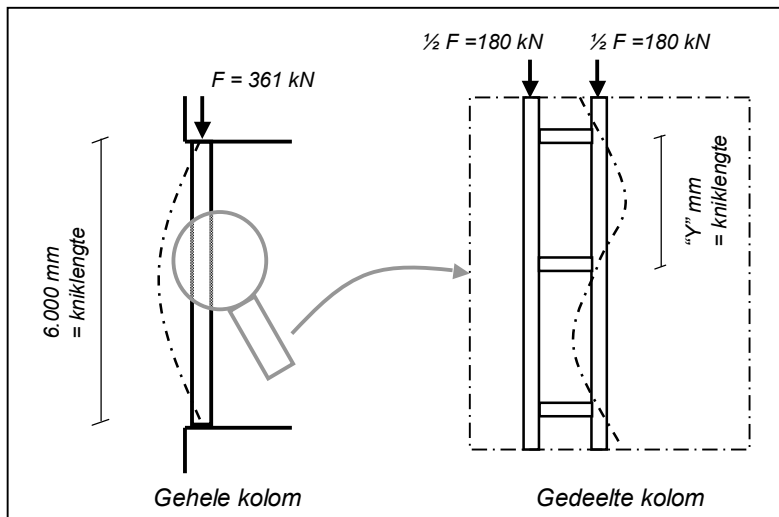
Figuur 7.14: Doorsnede kolom (bekende flenzen)

### 7.3.3.5 Controle knik en kip van kolom

Nu de afmetingen van de flenzen bekend zijn wordt bepaald wat de maatvoering en onderlinge afstand is van de tussenschotten (lijfdelen) die horizontaal tussen de twee flenzen worden verbonden. Deze schotten verzorgen een minimaal traagheidsmoment t.b.v. druk in rust en voorkomen het uitkippen van de kolom door buiging tijdens een interne explosie.

#### Controle op knik door druk:

De druk in de kolom kan de totale kolom laten knikken, maar de knik kan ook plaatsvinden in de flenzen tussen de horizontaal geplaatste schotten (zie figuur 7.15).



Figuur 8.15: Knikmogelijkheden

De zwakke as van de hele kolom is de as loodrecht op de kleinste afmetingen van de kolom, dus uit het vlak van de flenzen [6]. De totale kolom heeft zelfs zonder tussenschotjes een traagheidsmoment dat ruim voldoet aan het vereiste traagheidsmoment van 7.350.000 mm<sup>4</sup>.

Door te controleren wat de maximale kniklengte is in geval van het uitknikken van een enkele flens (figuur 7.15) kan worden bepaald wat de maximale afstand tussen de tussenschotten. Een enkele flens ondervindt de halve knikkraft die is bepaald in § 7.3.3.1 ofwel 212 kN. Een enkele flens heeft een traagheidsmoment van 1.484.10<sup>4</sup> mm<sup>4</sup>.

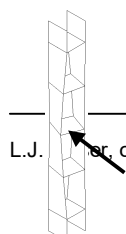
De maximale kniklengte waarbij de Eulerse knikkraft van het flensprofiel in de zwakke richting boven de 212 kN uitkomt wordt met formule 7.6 bepaald op 12 m. Voor de drukkracht blijken de flenzen dus niet gekoppeld te hoeven worden.

Eulerse knikkraft:  $F_{y,Euler} = \frac{\pi^2 E_s I_y}{l_{y,knik}^2} \quad (212 \text{ kN}) \quad (7.6)$

$E_s$	;	stijfheidmodulus staal	(210.000 N/mm <sup>2</sup> )
$I_y$	;	traagheidsmoment	(1484.10 <sup>4</sup> mm <sup>4</sup> )
$l_{y,knik}$	;	kniklengte	(12.046 mm)

#### Controle op uitknippen door explosie:

Het moment in de velddoorsnede is maatgevend bij het bepalen van de uitkipcapaciteit van de totale kolom. Het uitkipprincipe wordt in figuur 7.16 getoond en treedt alleen op bij een explosie, waarbij de kolom een groot moment te verduren krijgt. Bij het vinden van de minimale doorsnede van het kolomprofiel is geen rekening gehouden het dit uitknikken van de kolom.

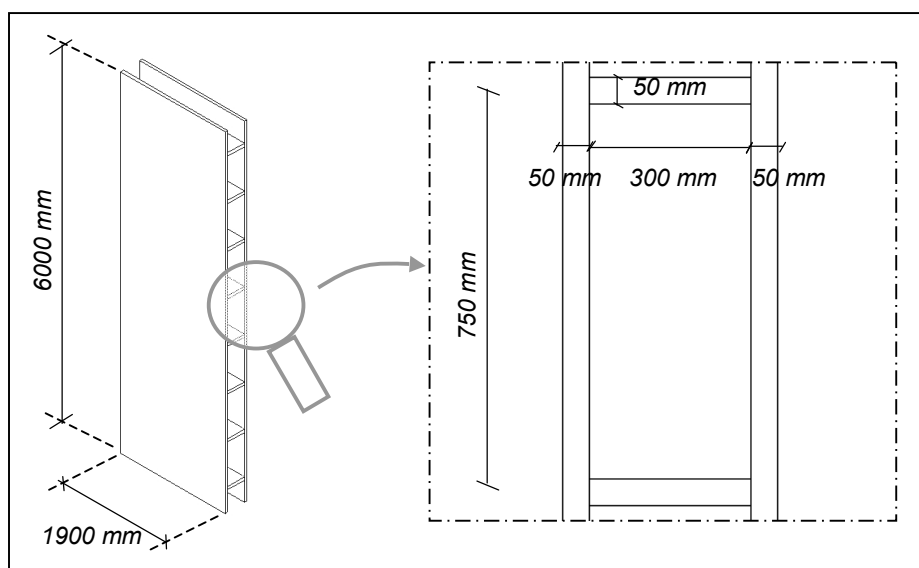


De totale doorsnede levert weerstand tegen deze draai rond de zwakke z-as. De rekenmethode die gebruikt wordt om dit principe uit te rekenen is opgenomen in de NEN 6770.

Er is hier echter sprake van een zeer kortdurende belasting, waarbij de druk die langs (en door) het profiel heen schiet corrigerend werkt op het kipprincipe en er tijdens het optredende moment ook een grote trekkracht in de kolom is die reducerend werkt op de druk die ontstaat in de uiterste vezels vanwege het moment.

Er wordt daarom niet gerekend aan tussenschotten van de kolom, maar er worden aannemelijke afmetingen gekozen. De afstand tussen de flenzen wordt gesteld op 300 mm (mede op basis van de maakbaarheid van de kolom), wat tussenschotten oplevert met de afmeting van 1900 bij 300 mm. De dikte van de tussenschotten wordt op 50 mm gesteld met een verticale tussenafstand van ongeveer 750 mm. Het uiteindelijke profiel is geschetst in figuur 7.17.

Nadrukkelijk wordt aangegeven dat er onvoldoende berekeningen zijn uitgevoerd ten aanzien van alle bezwijkmogelijkheden van de kolom. Nader onderzoek wordt in deze aanbevolen, zodat de volgende gekozen afmetingen kunnen worden verfijnd.



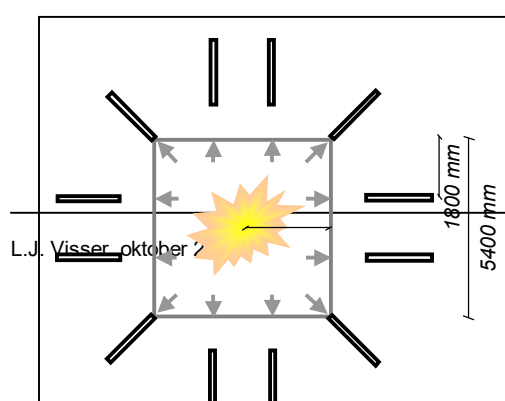
Figuur 7.17: Afmetingen samengestelde kolom tussen vloer en dak

Vanwege de plaatsing in de constructie en de minimale afstand van de kolom tot het centrum van de ruimte (4 meter) zijn de kolommen buiten de constructie geplaatst en zijn deze doorgetrokken van boven aan de dakconstructie tot onder aan de vloerconstructie (verlenging kolommen), ten einde een verbinding mogelijk te maken met de gewenste eigenschappen. Deze verbindingen zijn niet uitgewerkt.

### 7.3.3.6 Stabiliteit aangestipt

Tijdens rust moeten ook horizontale krachten (wind, ongeluk, inslag brokstukken op dak, etc) worden opgenomen. Aangezien de kolommen ingeklemd worden aan zowel vloer- als dakconstructie worden de horizontale krachten op het dak en de wanden afgedragen via dwarskracht en moment.

Omdat de kolommen zijn ontworpen op de extreme belastingen van een explosie, wordt aangenomen dat de belastingen in de gebruikssituatie kunnen worden opgenomen. In figuur 7.18 is de plaatsing van de kolommen ten behoeve van de stabiliteit en de explosiedruk opgenomen.



2700 mm

Figuur 7.18: Oriëntatie kolommen

### 7.3.4 Wanden

**Eisen:** Regendicht, vochtdicht, geen lichtinval, 'licht', bros, bezwijken, deur, niet dragend, 60 minuten brandwerend

**Opbouw:** Wand opgebouwd uit verticale platen

**Materiaal:** Licht (bros) cellenbeton

#### **Uitwerking:**

Het cellenbeton materiaal van Ytong beschikt over de vereiste brandwerende eigenschappen. Het materiaal heeft een volumegewicht van  $580 \text{ kg/m}^3$ . Dit lage gewicht en de daaraan gekoppelde brosse structuur is voordelig bij het vormen van brokstukken. Bij toepassing van verticale wandplaten is alleen boven aan de plaat een aanslag nodig, waar de plaat horizontale krachten af kan dragen. De verticale krachten worden afgedragen op de vloerconstructie waarop de platen staan. De minimale dikte is dan ten behoeve van windbelasting minimaal 150 mm. Elke plaat (750 mm breed) is dan een 'op zichzelf staande' kolom bestand tegen winddruk in alle windgebieden (9).

De buitenzijde van de wand wordt met waterdichte pleisterwerk afgewerkt. Onder het pleisterwerk kan een extra isolatielaag worden aangebracht, maar omdat de verwarming in de ruimte niet aanwezig is voor personen maar voor het vuurwerk geldt de eis voor de warmteweerstand van  $2.5 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$  niet. De warmteweerstand bij een 150 mm dikke plaat is gelijk aan  $1.25 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ .

#### 7.3.4.1 Deur

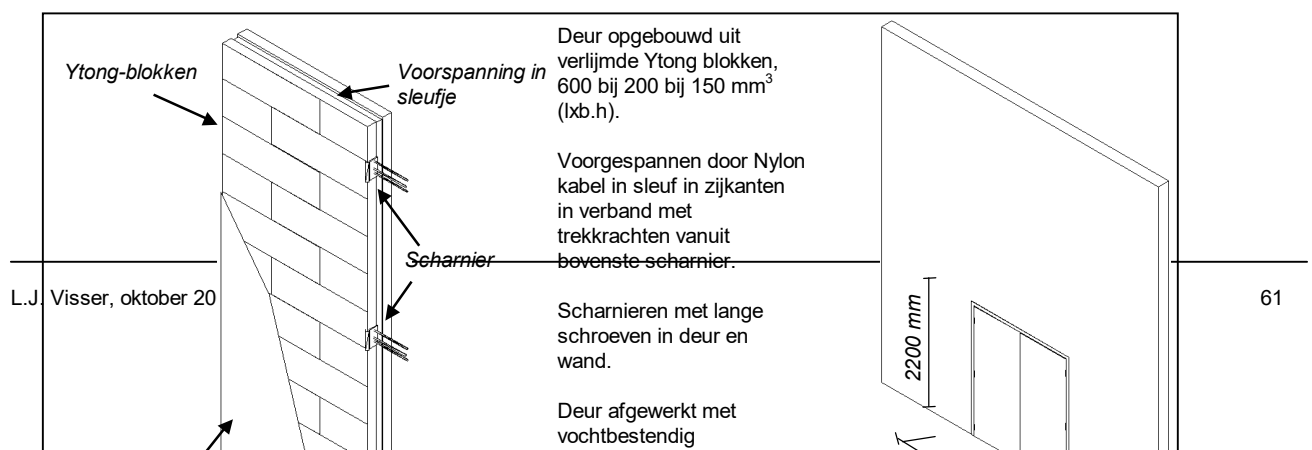
**Eisen:** Regendicht, vochtdicht, geen lichtinval, 'licht', bros, bezwijken, minimaal  $4 \text{ m}^2$ , opgenomen in wand, 60 minuten brandwerend, geen dievenklauwen, naar buiten openend, zelfsluitend.

**Materiaal:** Materiaal dat de even bros is als het wandmateriaal, om het verschil tussen de brokstukken van deur en wand zo klein mogelijk te maken.

#### **Uitwerking & Opbouw:**

De deur moet minimaal  $4 \text{ m}^2$  zijn, zodat bij een hoogte van 2,2 meter (redelijk in verband met in- en uitvoer van goederen) een deurbreedte van (dubbele deur) van iets minder dan twee meter vereist is. Omdat de wand de eigenschap heeft dat zij snel bezwijkt en opdeelt in veel brokstukken, moet ook de deur aan deze eigenschap voldoen.

Daarom wordt de deur wordt ook opgebouwd uit 150 mm dikke verlijmde blokken en desnoods wordt voorgespannen door een lichtmetalen strip of sterk kunststof (Nylon) dat in een uitgefreesde sleuf aan de kopse kanten van het paneel wordt voorgespannen. De deur wordt opgehangen in een licht stalen of kunststof frame (figuur 7.19). Het ongecontroleerde breukpatroon van dit frame is ongewenst, maar een geprefabriceerde scheurtechniek is hiervoor een oplossing (2, 5).



Figuur 7.19: Opbouw deur en plaatsing in wand

### 7.3.5 Aarden wal

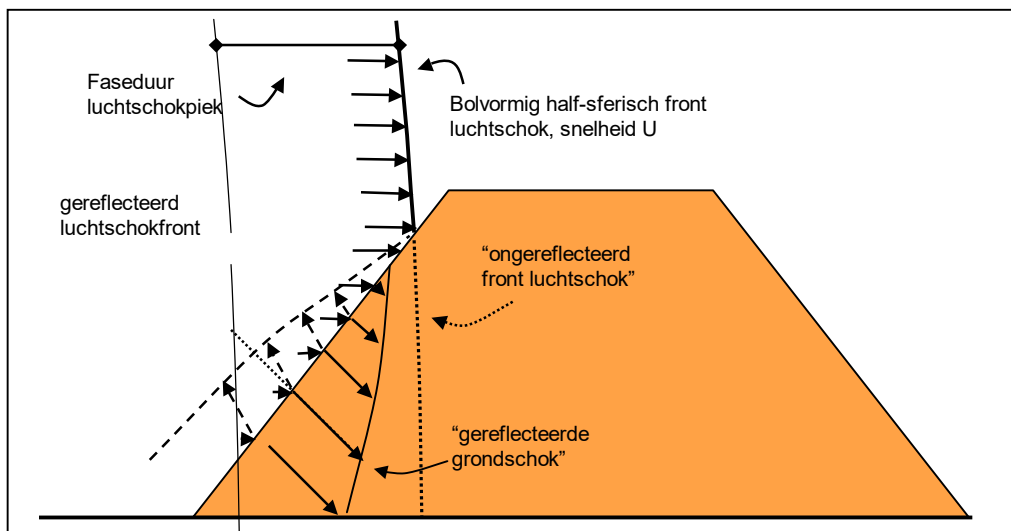
<b><u>Eisen:</u></b>	Bestand tegen luchtschok en indringing van de wandbrokstukken.
<b><u>Opbouw:</u></b>	Wal met talud van 30 graden ten opzichte van het maaiveld.
<b><u>Materiaal:</u></b>	Aarde (klei)

#### **Uitwerking:**

De aarden wal wordt in eerste instantie ontworpen op de statische piekdruk van de luchtschok die op de zijde van de wal terecht komt, vervolgens wordt gecontroleerd of de brokstukken die ontstaan niet dwars door de wal heen worden geworpen (6).

#### 7.3.5.1 Impact van luchtschok

De schok komt horizontaal tegen de aarden wal en wordt gereflecteerd tegen het talud met een bepaalde reflectiecoëfficiënt. Deze gereflecteerde luchtschok veroorzaakt een die schuin naar beneden de aarden wal in gaat. Deze is gelijk aan de reactiedruk van de originele luchtschok en diens reflectie tegen de aarden wal (figuur 7.20) en is afhankelijk van de taludhoek. De taludhoek voor een aarden wal is 30 graden met het maaiveld.



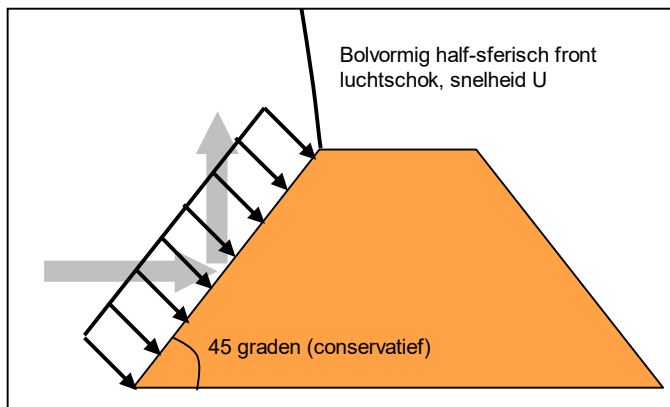
Figuur 7.20: Schokgolf aarden wal

De aarden wal wordt voor de volgende situatie met betrekking tot de luchtschok ontworpen:

**Situatie druk op enkele zijde:** Deze situatie heeft slechts zeer kort plaats. Voor deze situatie wordt er van uitgegaan dat de piekdruk over de complete taludzijde plaatsvindt en de reflecterende gronddruk wordt aangenomen over het complete talud (zie figuur 7.21).

De aarden wal bezwijkt op de manier die het minste kracht kost. Praktijkproeven moeten uitwijzen wat de daadwerkelijke reactie van de aarden wal is en wat voor bezwijkmechanisme er als eerste optreedt.

Hier worden de afmetingen bepaald aan de hand van de interne weerstand tegen afschuiven van het talud over een bepaald recht afschuifvlak. De aarden wal heeft een interne weerstand tegen verschuiven [14] over elk mogelijk afschuifvlak dat kan optreden. Er wordt gezocht naar het vlak met de minste schuifkracht en er wordt bepaald wat de bijbehorende maximale op te nemen piekdruk is.



Figuur 8.21: Belasting enkele zijde luchtschok krachten aanname

De grootte van de luchtschok ter hoogte van de aarden wal wordt, vanwege het halfsferische front, benaderd door het gewicht aan explosieve stof te vermenigvuldigen met 1,7 ( $1,7 \cdot 3.600 = 6.120$  kg TNT). Met deze hoeveelheid wordt met de grafiek voor de side-on piekdruk bepaald wat de druk is. In verband met de taludhoek wordt er nog een reflectiefactor van '2' in rekening worden gebracht [10, 11].

De gereflecteerde piekdruk oefent zowel een kracht in de richting van de schokgolf als wel een kracht neerwaarts op de aarden wal. Deze neerwaartse kracht werkt een verschuiving van een mogelijk schuifvlak tegen.

De totale schuifweerstand van de aarden wal (glijvlak op maaiveld) wordt benaderd met het "direct shear" of het "simple shear" model. Bij het de direct shear methode wordt verondersteld dat de aarden massa netjes bezwijkt via wrijving over het aangenomen glijvlak (maaiveld). Bij de simple shear methode wordt de aarden wal beschouwd als een rij met boeken die zonder boekenstandaard gemakkelijk omvalt. De bijbehorende formules zijn overgenomen uit de literatuur [14].

$$\text{Direct shear:} \quad T_f = cA + N_v \tan \phi \quad [N] \quad (7.7a)$$

$$\text{Simple shear:} \quad T_f = cA + N_v \tan \phi \frac{1 - \sin^2 \phi}{1 + \sin^2 \phi} \quad [N] \quad (7.7b)$$

$T_f$	;	bezwijkweerstand	[N]
$c$	;	cohesie factor	[Pa]
$A$	;	glijvlak (breedte wal)	[m <sup>2</sup> ]
$N_v$	;	gewichtkracht wal	[N]
$\phi$	;	inwendige wrijvingshoek	[grad]

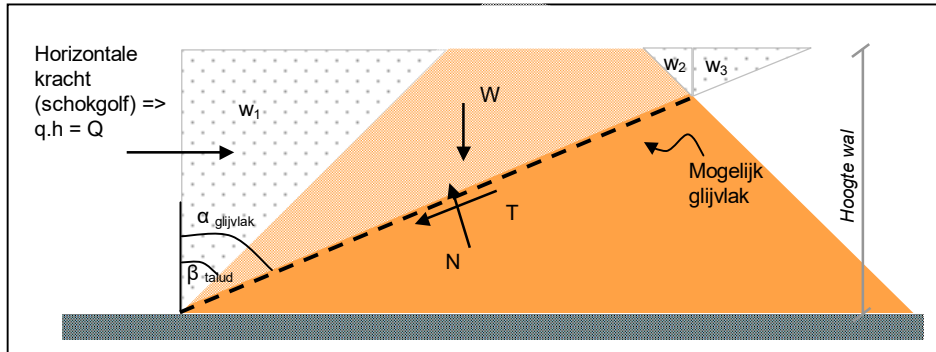
Bij een hoeveelheid van 6.120 kg TNT is op een afstand van 10 meter de piekdruk 3,6 MPa en met de reflectiecoëfficiënt van 2, 7.2 MPa.

Er wordt aangenomen dat rechte glijvlak elke hoek kan aannemen binnen de grenzen van de aarden wal. Per glijvlak hoek wordt berekend wat de kracht T is (zie figuur 7.22). T is afhankelijk van N, maar N is ook afhankelijk van T, omdat de kracht N de verticale reactiekracht van zowel W als T is. Bij bekende T en N wordt de Q bepaald, omdat deze de som is van de horizontale componenten van T en N. Het glijvlak waarbij de kleinste Q benodigd is, is het bezwijkglijvlak.

Het werkblad 7.3 in het bijlagenrapport benaderd op een numerieke wijze de aarden wal, waarbij de hoogte, de taludhoek en de breedte, alsmede de grondeigenschappen invoerparameters zijn [14]. Er wordt gevarieerd met de glijvlakhoek bij een vast ingestelde taludhoek, totdat de kleinste Q gevonden is en daarmee de glijvlakhoek bekend is.

In het model wordt de gereflecteerde piekdruk bepaald, waarna deze verdeeld wordt over de neerwaartse piekdruk en piekdruk parallel aan het maaiveld lopende piekdruk volgens een vaste

taludhoek van 45 graden. De neerwaartse piekdruk wordt gesommeerd over het taludoppervlak en bij  $W$  (het gewicht van de afschuivende moot grond) opgeteld. In het echt zal het aantal graden van de taludhoek ongeveer 30 graden zijn, maar hiermee wordt de werkelijkheid conservatief benaderd, omdat er bij een hoek van 45 graden minder druk naar beneden ontstaat (verhoogd weerstand glijvlak) en meer druk horizontaal (wegduwen moot grond).



Figuur 7.22: Schema aarden wal

Krachten in model:

$$W = \frac{1}{2} \gamma h^2 \tan \alpha_{glijvlak} - w_1 - w_2 - w_3 + (\text{verticale component van de piekdruk}) \quad (7.8)$$

$W$  ; gewichtskracht boven glijvlak  
 $\gamma$  ; dichtheid aarde  
 $h$  ; hoogte wal  
 $\alpha_{glijvlak}$  ; hoek glijvlak met normaal  
 $w_1, w_2, w_3$  ; gewicht in vlak  $w_1, w_2, w_3$

$$T = \frac{ch}{\cos \theta} + N \tan \alpha_{glijvlak} \quad (7.9)$$

$T$  ; wrijvingskracht aarde over glijvlak  
 $c$  ; cohesiefactor aarde  
 $h$  ; hoogte wal  
 $N$  ; reactiekracht loodrecht op glijvlak  
 $\alpha_{glijvlak}$  ; hoek glijvlak met normaal

$$N_{verticaal} = W + T_{verticaal} \quad (7.10)$$

$N_{verticaal}$  ; verticale component reactiekracht  $N$   
 $W$  ; gewichtskracht boven glijvlak  
 $T_{verticaal}$  ; verticale component reactiekracht  $T$

Aan de hand van de resultaten van het werkblad worden de volgende afmetingen voor de aarden wal ten behoeve van de luchtschok voorgesteld.

Afstand centrum explosie tot voet aarden wal: 30 meter  
 Hoogte aarden wal: 10 meter  
 Taludhoek aarden wal: 60 graden  
 Bovenbreedte talud: 2 meter

### 7.3.5.2 Impact van brokstukken

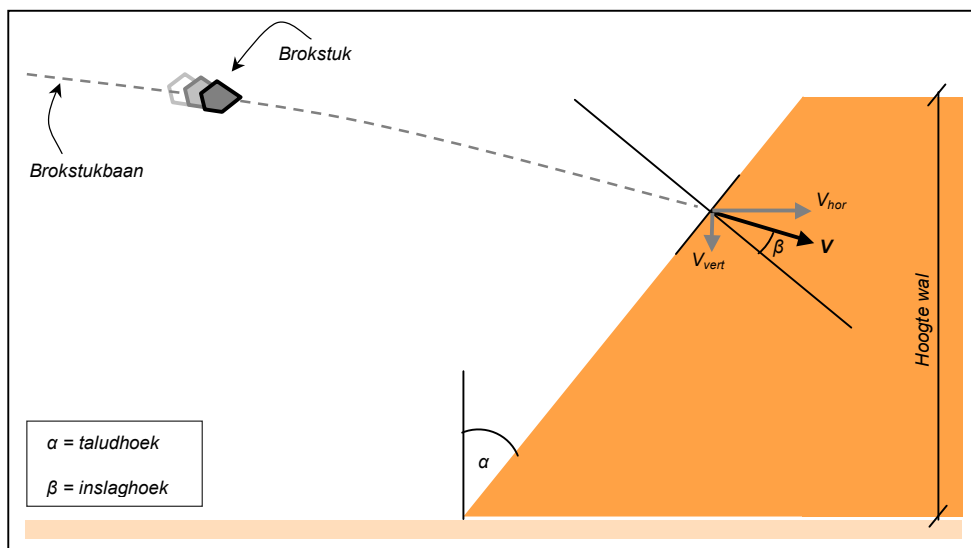
De wand deelt op in brokstukken die met een bepaalde snelheid en richting weggeworpen worden. Betreffende de energieverdeling van de explosie over de brokstukken in een wanddeel wordt aangenomen dat deze gelijk wordt verdeeld over de massa van het materiaal in de wand.

Deze energie is gekoppeld aan de luchtschok-piekdruk en de luchtschok-impuls. Uit grafieken wordt bepaald wat de piekdruk en de impuls is die werkt op het stuk wand dat het dichtst bij het centrum van de explosie is.

Voor de snelheid die aan het brokstuk wordt meegegeven wordt aangenomen dat de volledige gereflecteerde impuls op de wand van de luchtschok wordt benut voor het op snelheid brengen van de brokstukken. Dit is een conservatieve aanname, omdat dan de luchtschok niet meer zou bestaan (in werkelijkheid wordt maximaal 30% van de energie van de schokgolf aan de brokstukken meegegeven, zie bijlage 3.6). Met formule 7.11 wordt de startsnelheid van de brokstukken bepaald.

$$\begin{aligned}
 \text{Impuls:} \quad I &= M \times V && (107.000 \text{ Pa}\cdot\text{sec}) && (7.11) \\
 M &; \text{ massa } m^2 \text{ wand} && (87 \text{ kg}) \\
 V &; \text{ snelheid} && (1.230 \text{ m/s})
 \end{aligned}$$

Hoe zwaarder een brokstuk, hoe meer energie in het brokstuk en hoe langer deze in de lucht kan blijven, zonder dat de luchtweerstand alle energie opneemt. Met het brokstukkenmodel wordt bepaald wat de resterende snelheid van het brokstuk is ter hoogte van de aarden wal (bijlage 6.2). Het brokstuk treedt bij inslag in de aarden wal een stuk naar binnen toe, waarbij weerstand wordt geleverd door de aarden wal, zodat alle energie die het brokstuk nog bezig wordt omgezet in warmte en het brokstuk tot stilstand komt.



Figuur 7.23: Inslaghoek brokstuk

De indringdiepte van een object in een materiaal wordt benaderd met de formule 7.12. Deze formule is gebaseerd op het model van Young [11]. De eenheden zijn verschillend van het SI-stelsel, zodat de inslagsnelheid moet worden omgerekend naar feet/sec.

$$\begin{aligned}
 \text{Indringdiepte (Young): } p &= 0,0031 \cdot SN \sqrt{\frac{W_p}{A}} \cdot [V - 100] && (8.12) \\
 &\text{voor } V > 200 \text{ ft/sec} \\
 p &; \text{ penetratiediepte} && (18,36 \text{ feet} = 5,6 \text{ m}) \\
 W_p &; \text{ brokstukgewicht} && (2,49 \text{ lb})
 \end{aligned}$$

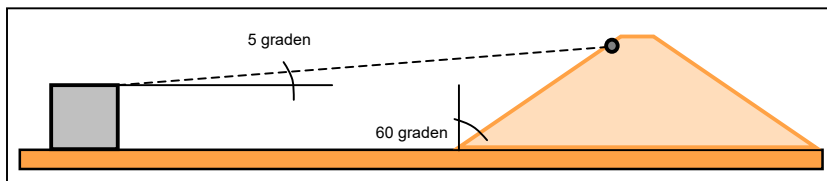
<i>A</i>	;	<i>dwarsdoorsnede brokstuk</i>	<i>(29,23 in<sup>2</sup>)</i>
<i>S</i>	;	<i>materiaal constante</i>	<i>(10 -)</i>
<i>N</i>	;	<i>brokstukvorm constante</i>	<i>(0,75 -)</i>
<i>V</i>	;	<i>inslagsnelheid brokstuk</i>	<i>(2808 ft/sec)</i>

De indringdiepte blijkt vooral af te hangen van de snelheid die het brokstuk heeft ten tijde van de uitbraak uit de wand, omdat de afstand van de bezwijkende wandconstructie tot de aarden wal pas op grote afstand een sterk reducerende werking op de snelheid van de brokstukken heeft.

**7.3.5.3 Dimensies aarden wal**

Betreffende de **luchtschok** treedt het bezwijkvlak gelijk met het maaiveld het eerste op, omdat de hoge neerwaartse druk van de piekdruk op het schuine talud steeds sterker meewerkt aan de weerstand tegen verschuiven van afschuifvlakken naar gelang het verschil in taludhoek en afschuifhoek kleiner wordt. De minimale piekdruk waarbij dit optreedt is ongeveer 0,5 MPa op een afstand van 30 meter vanaf de explosiekern. Hierbij is uitgegaan van een talud hoek van 30 graden en een walhoogte van 10 meter met een bovenbreedte van 2 meter.

De **brokstukken** dringen 5,6 meter in de aarden wal binnen. Er moet worden uitgegaan van een maatgevend brokstuk dat wegvliegt ter hoogte van de bovenzijde van de wand (6 meter) met een hoek van 5 graden (figuur 7.24) 5,6 meter de aarden wal indringt. In plaats van de voorgestelde 10 meter moet er een overhoogte van twee meter worden toegepast, zodat het brokstuk 6 meter in de aarden wal kan doordringen.

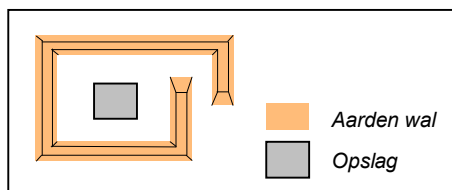


Figuur 7.24: Modellering maatgevende brokstuk t.b.v. indringdiepte in aarden wal

Tabel 7.1: Afmetingen ontwerp

<b>Afmetingen in meters</b>	
hoogte wal boven maaiveld	12
bovenbreedte wal	2
taludhoek	30
breedte wal maaiveld	43,6
totale lengte/breedte constructie + wallen	152,5

Om binnen de wal te komen moet er een doorgang worden gecreëerd (figuur 7.25). Er zijn vele mogelijke oplossingen om binnen de aarden wal te komen. Te denken is aan: tunnelconstructie onder wal door, tunnelconstructie door aarden wal, flauw hellende weg schuin over talud of het creëren van een opening in de aarden wal door de vorm van de wal aan te passen. De laatste mogelijkheid wordt toegepast in het nieuwe ontwerp vanwege de relatieve eenvoudigheid ervan.

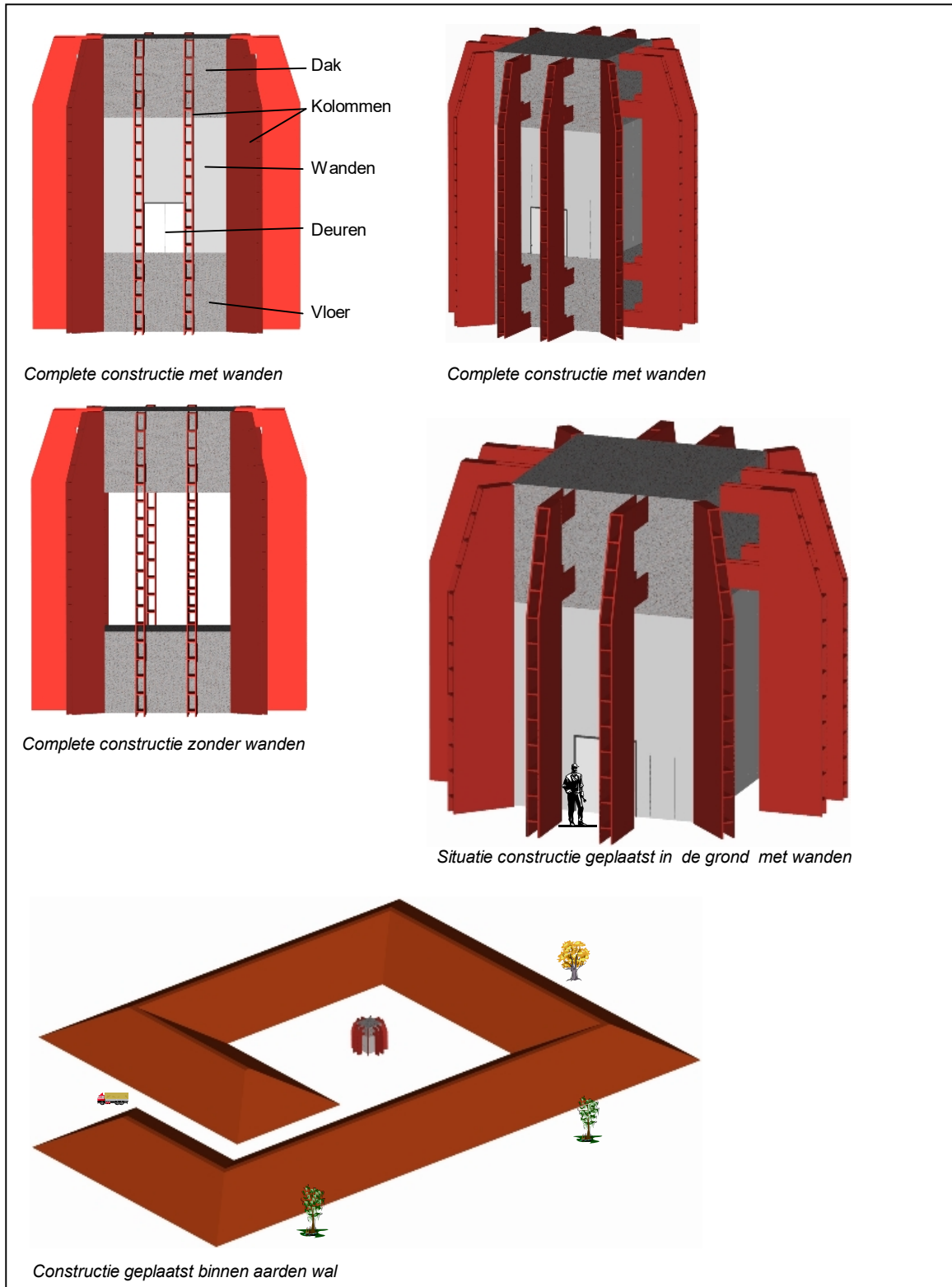


Figuur 7.25: Plattegrond gelijkvloerse principemogelijkheid doorgang aarden wal

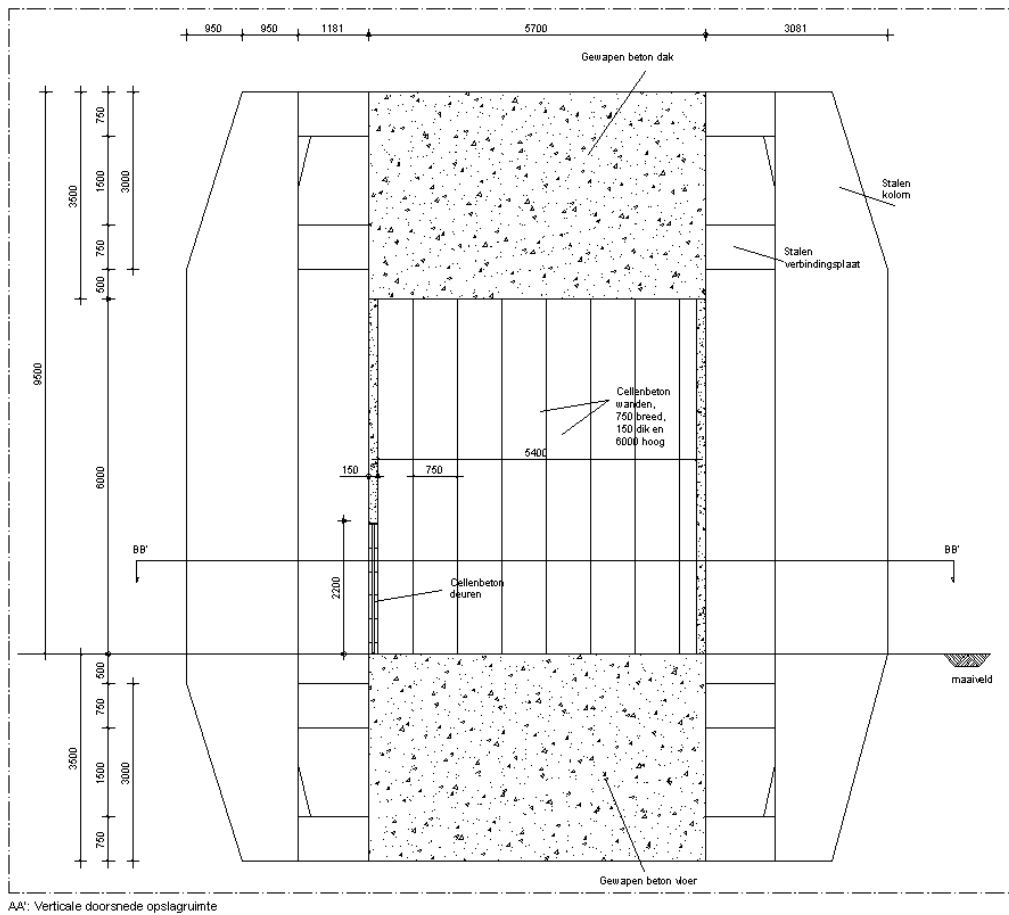


## 7.4 Visualisatie ontwerp

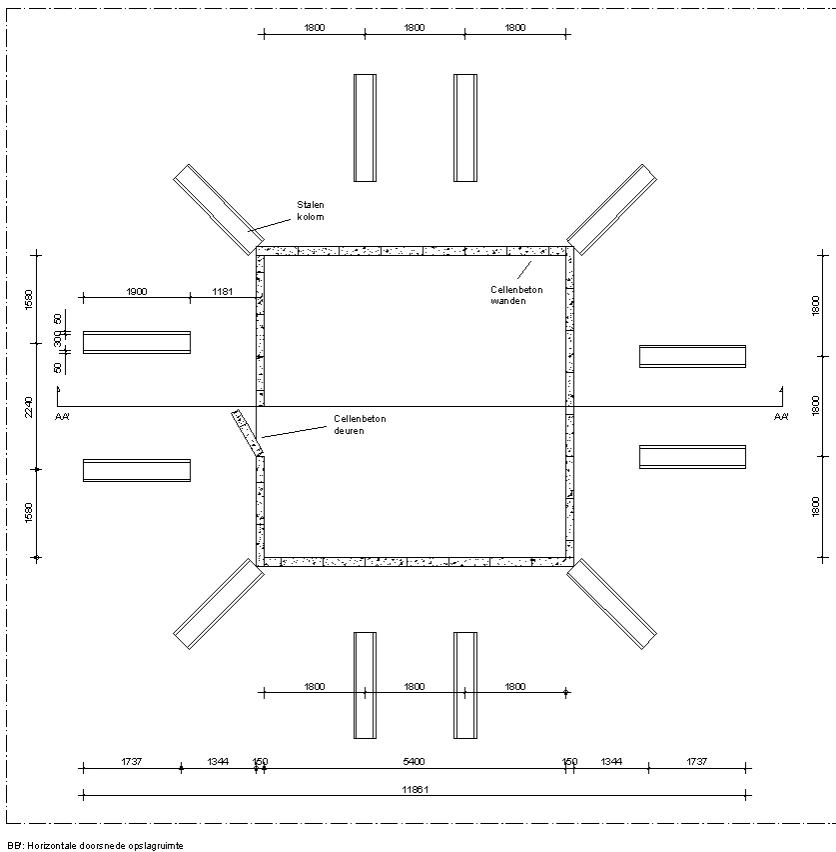
De tekeningen in dit hoofdstuk en aanvullende tekeningen zijn ook opgenomen in het bijlagenrapport. De functionele plattegrond komt overeen met figuur 8.3.



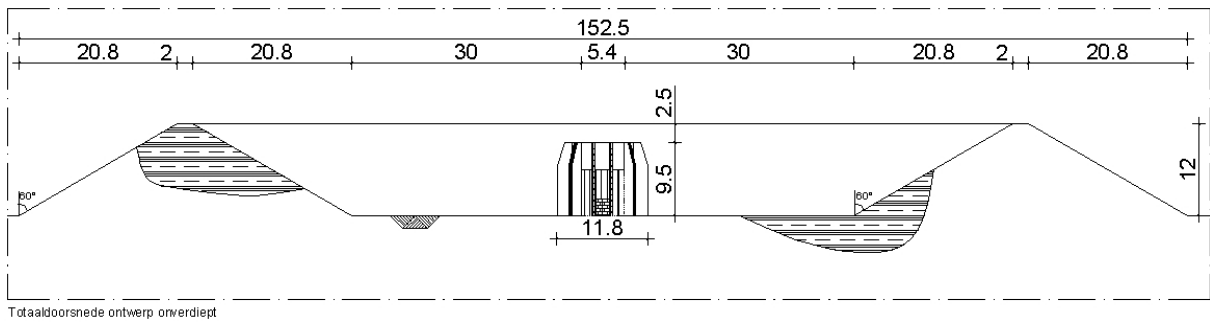
Figuur 7.26: 3D schetsen totale constructie



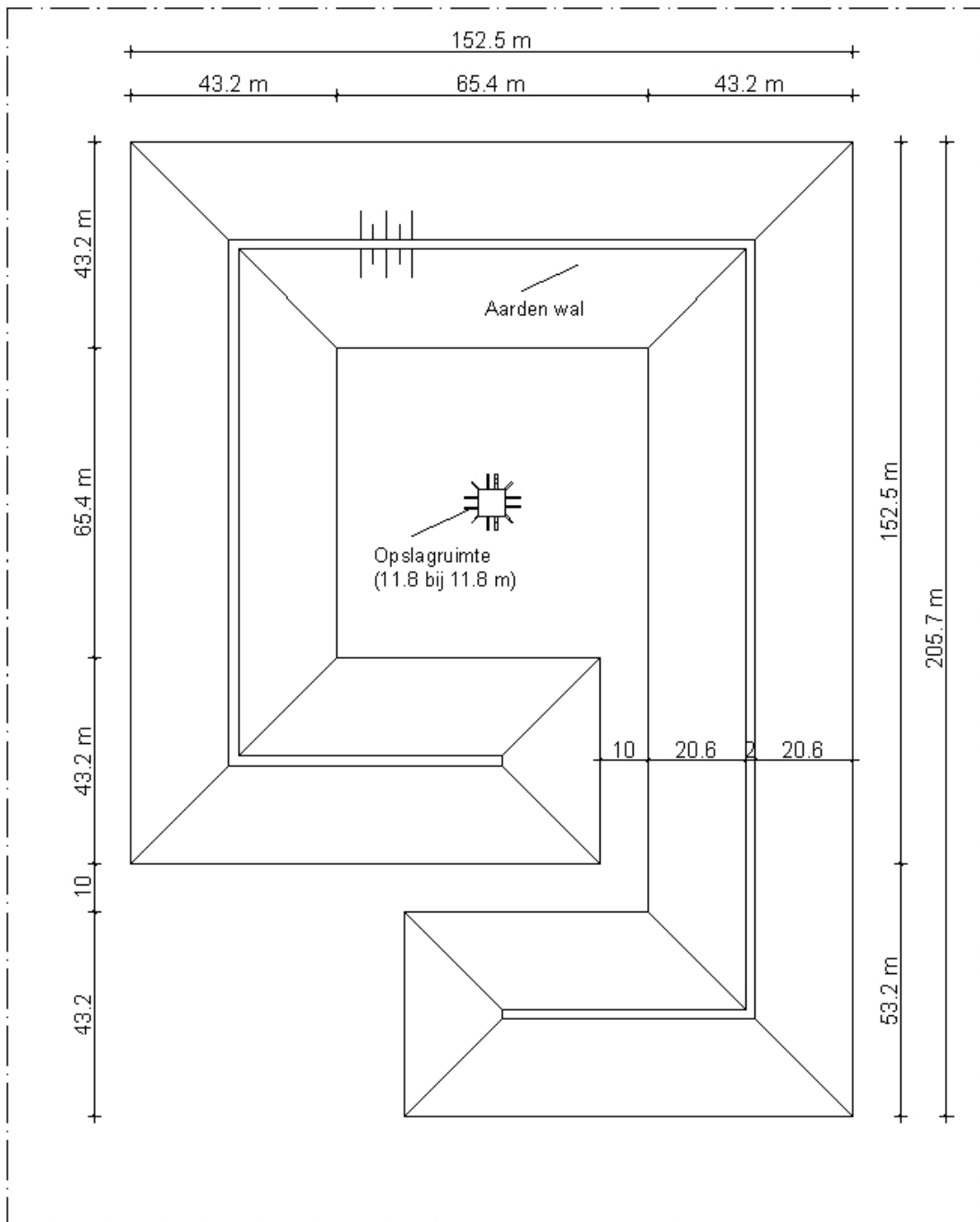
Figuur 7.27: Verticale doorsnede over deurconstructie



Figuur 7.28: Horizontale doorsnede over deurconstructie



Figuur 7.30: Doorsnede aarden wal, aanzicht constructie, onverdiept



Figuur 7.31: Plattegrond totaal onverdiepte situatie

## 8 Toets

Het ontwerp wordt getoetst op de maatgevend explosie-effecten luchtschok en brokstukken. Hiermee wordt het ontwerp kwantitatief geëvalueerd tot een interne en externe veiligheidsafstand.

**De externe veiligheidsafstand** is de afstand van de constructie tot een kwetsbaar object ten einde ernstige schade/letsel te voorkomen. Daarbij gelden de criteria die ook in het Vuurwerkbesluit zijn gehanteerd (zie § 3.2.1).

- *Maximale piekdruk 2 kPa*
- *Geén brokstukken in omgeving*

**De interne veiligheidsafstand** is de afstand vanaf een opslagconstructie naar een andere opslag ten einde uitbreiding te voorkomen. Daarbij zijn de volgende criteria gehanteerd.

- *Uit statistische gegevens uit de literatuur [30] blijkt 20 kPa een redelijke waarde voor de piekdruk met betrekking tot bezwijken van de constructie, voor de initiatie van het vuurwerk wordt dezelfde waarde aangehouden*
- *Geén brokstukken in andere compartimenten*

### 8.1 Luchtschok

De luchtschok die ontstaat bij de explosie hangt af van de hoeveelheid geëxplodeerde stoffen. Er is een vaste relatie tussen hoeveelheid en piekdruk. Het aantal kilogrammen TNT wordt vermenigvuldigd met 1,7 om de representatieve hoeveelheid ten behoeve van de halfsferische uitbreiding te krijgen.

**Oude situatie:** De consequentie van het gelijkschalen van het vuurwerk met TNT dat valt in de transportklasse 1.1 levert een hoeveelheid TNT van 6.000 kg. De side-on piekdruk van 2 kPa treedt op bij een afstand van **800** meter.

**Nieuwe situatie:** In de nieuwe situatie is uitgegaan van een equivalentiefactor van 0,6. Dat houdt in dat er 3.600 kg TNT aanwezig is. De side-on piekdruk van 2 kPa treedt dan op bij een afstand van **660** meter.

### 8.2 Brokstukken

De theorie opgenomen in het brokstukmodel in werkblad 6.1 – 6.3 in het bijlagenrapport is samengesteld is opgenomen in bijlage 6.1. Brokstukuitworp ontstaat bij het bezwijken van een constructiedeel. De impact van een brokstuk op de omgeving wordt getoetst voor zowel de oude als de nieuwe situatie.

Voor de vergelijking tussen de 'oude' en 'nieuwe' situatie moeten werkbare uitgangspunten worden berekend betreffende:

- De bezwijkende delen
- Het afmetingen van het karakteristieke brokstuk
- De snelheid van het karakteristieke brokstuk
- De richting van het karakteristieke brokstuk
- Maximale wegwerpafstand karakteristiek brokstuk

**De oude situatie:**

Rondom de constructie zijn geen constructieve omgevingsobjecten opgenomen. Zowel luchtschok als brokstukken kunnen vrij expanderen.

De bezwijkende delen: Het dak en de wanden.

Afmetingen brokstuk: De wanden en het dak zijn opgebouwd uit steenachtige materialen. Voor afmetingen wordt teruggegrepen naar het in opgestelde uitgangspuntensituatie. De brokstukken die ontstaan worden in gelijke orde van grootte aangenomen aan de brokstukken in de nieuwe situatie: een (bolvormig) brokstuk met een diameter van ongeveer 15 cm (lange wand

wordt dan opgedeeld in 3.500 brokstukken van 3,2 kg st. en de dakconstructie in 10.000 brokstukken van 4,6 kg st.).

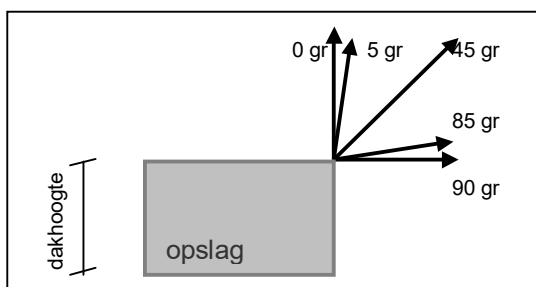
**De snelheid:** In de opslag is 6.000 kg vuurwerk aanwezig, dat gelijkgesteld wordt met 6.000 kg TNT. De afstand van het centrum van de ruimte tot de dichtstbijzijnde wand is gelijk aan 3 meter. De snelheid van de wandbrokstukken is (volgens formule 8.17) gelijk aan: 825 m/s.

Voor de dakbrokstukken geldt een afstand van centrum tot dak van 1,5 meter. De snelheid de dakbrokstukken is gelijk aan: 1048 m/s.

**De richting:** Loodrecht op de vlakken (wand en dak). Omdat niet volledig uitgesloten wordt dat in de (eveneens bezwijkende) hoeken van de constructie brokstukken met een hoek van 45 graden weggegooid worden dient deze hoek te worden meegenomen in de berekening van de brokstukbaan.

90) Dak: loodrecht op dakvlak +/- 5 graden (0, 5)  
 Wand: loodrecht op wand +/- 5 graden (85, 90)  
 Hoek dak/wand: richting mogelijk 45 graden (45)

**Wegwerpafstand:** De resultaten van de wegwerpafstand van de wandbrokstukken van 2,2 kg met een startsnelheid van 825 m/s en dakbrokstukken van 4,7 kg met een startsnelheid van 1048 m/s worden in tabel 8.1 weergegeven. Hierbij wordt uitgegaan van een dakhoogte van 3 meter.



Figuur 8.1: Toelichting uitgewerkte richtingen

Tabel 8.1: Resultaten brokstukmodel brokstukbaan oude situatie

	gewicht kg	startsnelheid m/s	starthoek graden	x, top m	y, top m	x, inslag m
Dak	4,7	1048	0	0	1.100	0
	4,7	1048	5	464	1.092	843
Dakhoek	4,7	1048	45	1.145	972	1.585
	2,2	825	45	775	656	1075
Wand	2,2	825	85	743	153	951
	2,2	825	90	0	3	337

Opmerkelijk is dat het Vuurwerkbesluit, ondanks strenge hoeveelheid beperking, onvoldoende voorziet in een afbakening van een veilig concept. De opgestelde uitgangspuntensituatie naar aanleiding van het Vuurwerkbesluit levert brokstukken op die ver buiten de externe veiligheidsafstand terecht komen. De geldigheid van deze uitspraak hangt af van de praktische opdeling in brokstukken, die slechts proefondervindelijk kan worden vastgesteld.

**De nieuwe situatie:**

Rondom de constructie is een aarden wal opgenomen voor de opvang van brokstukken uit de wanden. Het dak blijft op zijn plaats door kolommen en wordt niet weggeworpen.

De bezwijkende delen: Alleen de zijwanden bezwijken.

Afmetingen brokstuk: Al de brokstukken die ontstaan worden opgevangen door de aarden wal.

Voor de situatie dat de aarden wal niet naar behoren functioneert wordt met het brokstukmodel bepaald wat de brokstukbaan is van een brokstuk dat de helft van de snelheid verliest door de aarden wal, voor een bolvormig wandbrokstuk met een diameter van 150 mm en een gewicht van 1,2 kg.

De snelheid: De uitwerpsnelheid van een wandbrokstuk is  $1230 \text{ m/s}^2$ .

De richting: 90 of maximaal 85 graden, met een dakhoogte van 6 meter.

Wegwerpafstand: De resultaten van de wegwerpafstanden tabel 8.2 weergegeven.

Tabel 8.2: Resultaten brokstukmodel brokstukbaan oude situatie

	gewicht kg	startsnelheid m/s	starthoek graden	x, top m	y, top m	x, inslag m
Wand zonder wal	1,12	1.230	85	363	127	449
	1,12	1.230	90	0	6	253
Wand met falende wal (reductie snelheid 50%)	1,12	615	85	286	72	361
	1,12	615	90	0	6	197

Zelfs zonder toepassing van een aarden wal is het nieuwe ontwerp op het punt van brokstukken beter dan de uitgangspuntensituatie. Dit wordt verklaard door de toepassing andere materialen waaruit de brokstukken kunnen ontstaan. Hoe groter de dichtheid, hoe verder een brokstuk weggeworpen wordt. Uit het brokstukmodel komt naar voren dat bij een lage dichtheid (ongeveer onder de  $1000 \text{ kg/m}^3$ ) bij een wegwerphoek van 85 graden een brokstukinslag afstand wordt gevonden dan bij een hoek van 45 graden. Dit effect wordt mogelijk verklaard door de luchtweerstand die bij brokstukken met lage dichtheden grotere invloed uitoefent.

De maximale afstand die een brokstuk aflegt is niet alleen afhankelijk van de dichtheid, maar ook van de brokstukgrootte. De maatgevende brokstukgrootte is tijdens het ontwerp gekoppeld aan het aantal stukken waarin het bezwijkende object opdeelt. Voor de 150 mm dikke cellenbeton wanden is aangenomen dat de maximale brokstukafmeting gelijk is aan een bolvormig object met een diameter van 150 mm. Mocht in de praktijk deze waarde niet worden gehaald, dan kan nagedacht worden over een geprefabriceerd breukpatroon in de cellenbetonplaat.

### 8.3 Veiligheidsafstanden

**Externe veiligheidsafstand:** Betreffende de maximale side-on piekdruk van 2 kPa van de luchtschok wordt de veiligheidsafstand van 800 meter naar beneden bijgesteld tot 660 meter, vanwege de toegepaste verschaling, van de aan de vuurwerk equivalente hoeveelheid TNT, van 0,6.

Betreffende de brokstukken wordt de veiligheidsafstand bekort tot 0 meter vanaf de aarden wal tot een kwetsbaar object.

**Interne veiligheidsafstand:** De interne veiligheidsafstand van compartiment tot compartiment is vanwege de maximaal optredende side-on piekdruk van 20 kPa ca. 100 meter (hart op hart). De afmetingen van het nieuwe ontwerp zijn inclusief aarden wal ruim 100 meter, zodat twee opslagen gebruik gemaakt kunnen maken van dezelfde aarden wal en de interne veiligheidsafstand vanaf de aarden wal gelijk is aan 0 meter.

De brokstukken komen niet door de aarden wal heen, zodat de interne veiligheidsafstand betreffende de brokstukken vanaf de aarden wal 0 meter is.

Tabel 8.3: Resultaten onderzoek

	Uitgangspuntensituatie Vuurwerkbesluit <i>(niet in de vuurwerkconcentratiegebieden)</i>	Nieuw Ontwerp
<b>Externe veiligheidsafstand</b> 2 kPa-grens geen enkel brokstuk	800 meter 750 meter	660 meter 0 meter
<b>Interne veiligheidsafstand</b> geen enkel brokstuk en max 20 kPa	750 meter	0 meter

## 9 Conclusie en aanbevelingen

In dit hoofdstuk zijn de conclusies en aanbevelingen beschreven die uit het onderzoek naar voren komen.

### 9.1 Conclusie

Bij de toepassing van het in dit rapport voorgestelde ontwerp voor een vuurwerkopslag is een kleinere veiligheidsafstand haalbaar dan de vereiste 800 meter uit het Vuurwerkbesluit.

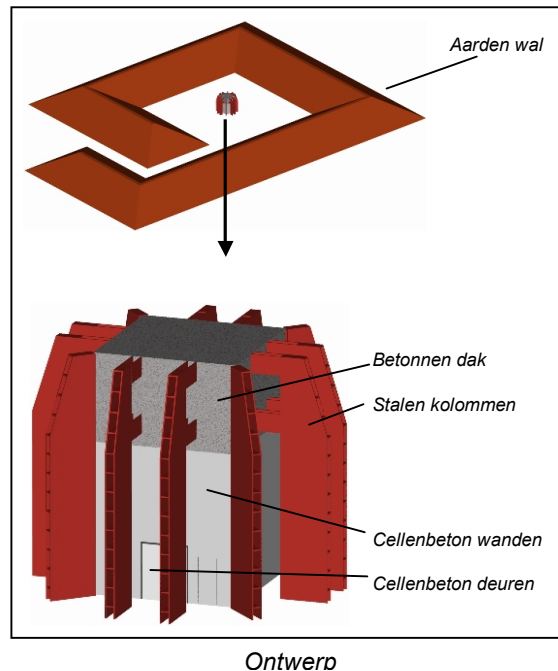
De maatgevende explosie-effecten voor het bepalen van de veiligheidsafstand zijn de brokstukuitwerp en de luchtschok.

Met het ontwerp wordt de veiligheidsafstand voor de brokstukuitwerp zo verkleind dat slechts de veiligheidsafstand voor luchtschok maatgevend zijn:

- *De veiligheidsafstand ten behoeve van de brokstukken is gereduceerd van ca. 700 meter naar 0 meter, door toepassing van een niet-bezwijkend dak en lichte bezwijkende wanden, die opdelen in horizontaal weggeworpen brokstukken, die worden opgevangen door de om de constructie heen liggende aarden wal.*
- *De veiligheidsafstand ten behoeve van de luchtschok is gereduceerd van 800 meter naar 660 meter, door toepassing van een geldige reductie van de aan het vuurwerk equivalente hoeveelheid TNT.*

**Het ontwerp** bestaat uit een de opslagconstructie met daaromheen een aarden wal (zie figuur 10.1):

- *De volledig rond de constructie aangelegde aarden wal heeft een bovenbreedte van 2 meter, een taludhoek van 30 graden, een afstand van constructiecentrum tot de voet van het talud van 30 meter en een hoogte van 6 meter boven de bovenzijde van de lichte wanden in de opslagconstructie.*
- *De constructie binnen de aarden wal heeft een interne hoogte van 6 meter en een interne lengte en breedte van 5,4 meter. De dakconstructie is ca. 3,5 meter dik. De kolommen zijn aan de buitenzijde van de dakconstructie momentvast verbonden. Aan de onderzijde zijn de kolommen momentvast verbonden aan de vloerconstructie, zodat de kolommen zowel aan de dakconstructie als aan de vloerconstructie evenveel trekkrachten kunnen overbrengen. De lichte en bezwijkende wanden zijn van 150 mm dik cellenbeton en zijn opgebouwd uit 750 mm brede verticale platen, die staan op de vloerconstructie en aan de bovenzijde zijn horizontaal afsteunen tegen de dakplaat.*
- *Het dak van de constructie bezwijkt door verbinding van kolommen met de vloer tijdens de explosie niet. De wanden bezwijken snel en vormen brokstukken die in de aarden wal worden*



*opgevangen. De luchtschok kan hierdoor gemakkelijk weg en er ontstaan geen brokstukken die in de omgeving terechtkomen.*

Na de explosie bezwijkt de constructie mogelijk op brand, door het instorten van het dak. Dit wordt geaccepteerd omdat dit verhoudingsgewijs minder gevaar voor de omgeving oplevert. Het totaalontwerp is geschikt voor een hoeveelheid vuurwerk tot 6.000 kg, met de voorwaarde dat het vuurwerk massa-explosief reageert, overeenkomstig het in het Vuurwerkbesluit aangenomen uitgangspunt.

## 9.2 Aanbevelingen

Tijdens het onderzoeksproces zijn in het kader van de doelstelling een aantal punten naar voren gekomen die verder onderzocht dienen te worden.

### **Detailering constructie:**

Het afmetingen het ontwerp dat in dit rapport is opgesteld zijn in orde van grootte berekend. Voor het uitvoeren ervan moet het geheel verder worden gedetailleerd.

Voorstel: Voer een dynamische berekening uit op de constructieonderdelen. Voer per constructieonderdeel controles uit voor alle bezwijkmechanismen. De aansluitingen van de constructieonderdelen dienen compleet te worden uitgewerkt.

Doel: Het ontwerp verfijnen naar een praktisch bouwbaar geheel.

### **Veiligheidsafstand tot kwetsbare objecten**

De veiligheidsafstand tot kwetsbare objecten is in het Vuurwerkbesluit [31] voor alle objecten hetzelfde. Een kwetsbaar object is bijvoorbeeld een woning, ziekenhuis, rijksweg of een spoorweg. Nu brokstukken niet meer maatgevend zijn is het de vraag of er voor elk kwetsbaar object dezelfde piekdruk criteria toegepast dient te worden.

Voorstel: Onderzoek het onderscheid in de veiligheidscriteria voor verschillende kwetsbare objecten, naar aanleiding van een geaccepteerde schadebeeld.

Doel: Bij nieuwe criteria horen nieuwe veiligheidsafstanden, zodat het per kwetsbaar object mogelijk gemakkelijker is een locatie voor een vuurwerkopslag te vinden.

### **Klassenscheiding**

In het Vuurwerkbesluit wordt al het vuurwerk ingedeeld in de hoogste transportgevaarklasse, terwijl in de praktijk slechts enkele artikelen in die klasse vallen.

Voorstel: Monitor de hoeveelheden vuurwerk per transportgevaarclassen in de vuurwerkinrichting en zoek hiervoor een waterdicht classificatiesysteem passend in het bedrijfsproces.

Doel: Het kunnen compartimenteren van transportklassen (klassenscheiding) in de vuurwerkinrichting en daarmee het verlagen van de vereiste veiligheidsafstand.

### **Proefopstelling constructies**

In het Vuurwerkbesluit wordt geen onderscheid gemaakt in constructies. In de praktijk is dit onderscheid er wel.

Voorstel: Definieer verschillende opslagprincipes en beproef deze in vrije veld met dezelfde hoeveelheid vuurwerk(combinatie). De proef wordt uitgebreid met een zelfde serie proeven met een andere hoeveelheid vuurwerk. Monitor hierbij alle explosie-effecten en hun invloedparameters.

Doel: Inzicht in relatie van de constructie ten opzicht van de explosie-effecten bij verschillende type explosies en basiskennis voor het bouwen van compartimenten bij klassenscheiding.

### **Aarden wal**

Het bezwijkmechanisme van de aarden wal is gemodelleerd tot een recht afschuifvlak voor de luchtschok en een bepaalde breedte voor de brokstuk indringing. Het is onbekend of er andere bezwijkmechanismen maatgevend zijn.

**Voorstel:** Voer een praktijkproef uit met een standaard hoeveelheid explosief materiaal bij aarden wallen met verschillende afmetingen, taludhoeken, materialen en begroeiingpercentages. Monitor de bezwijkwijzen van en de krachten op de aarden wal.

**Doel:** Bepalen maatgevend bezwijkmechanisme, ten einde het ontwerp te verfijnen.

## Bijlagen

In de bijlagen zijn een verklarende woordenlijst en de in het rapport genoemde bronnen opgenomen. De overige bijlagen zijn opgenomen in het bijlagenrapport.

In het rapport wordt met vierkante [x] haken verwezen naar de literatuur. Met ronde haken (x) wordt naar personen of instanties verwezen. Tenslotte wordt met accolades {x} naar de internetlocaties verwezen.

### Bijlage 1: Woordenlijst

Algemene begrippen en afkortingen zijn in onderstaande lijst alfabetisch weergegeven en bijbehorende betekenis of volledige schrijfwijze is daar achter vermeld.

A	Adiabatisch	: Er wordt geen warmte toegevoegd of onttrokken aan het betreffende proces
	ADR	: European Agreement concerning the international carriage of Dangerous goods by Road
	Ambiéente	: Rustig, zwevend, gelijke
B	B&B	: Bouwtechniek & Bouwproces: studierichting binnen CT
	Bewaarplaats	: Opslagruimte
	Bewerken	: Het bewerken van het vuurwerkartikel: verpakken, ompakken, assembleren, etc
	Brandwerendheid	: Tijd uitgedrukt in minuten, gedurende welke een bouwkundig onderdeel van een gebouw, zijn functie moet kunnen blijven vervullen bij verhitting (NEN 6090) [31]
C	Brokstukken	: Door explosie opgedeelde en versnelde delen van beschermingsconstructie en/of omgevingsobjecten
	CEV	: expertiseCentrum voor Externe Veiligheid en Vuurwerk
	Consumenten vuurwerk CT	: Vuurwerk dat is bestemd voor particulier gebruik [31] Civiele Techniek: Faculteit aan de TUD
D	Deflagratie	: Een 'langzame' explosie (niet-ideale springstoffen)
	Detonatie	: Een zeer snelle explosie
E	Effectenbenadering	: Zie par. 5.3, bestrijden/voorkomen van effecten naar aanleiding van plaatsvinden van hoofdgebeurtenis
	Energetisch	: Stof met potentiële energie
	Explosie effecten	: Alle effecten die naar aanleiding van een explosie ontstaan; luchtschok, grondschock, hittestraling en de brokstukken staan in het onderhavige rapport centraal
F	Externe veiligheid	: Veiligheid buiten een bedoeld object afhankelijk van dit object
	Fosfiden	: Zoute stof die met water een brandbaar gas vormt
	Fragmenten	: Brokstukken
G	Gebouwontwerp	: Het gehele functionele en constructieve ontwerp van een vuurwerkopslag, inclusief de concrete relevante parameters buiten de constructie zelf
H	Hoogteligging	: Hoogte van bovenzijde vloerconstructie ten opzicht van het maaiveld
	Hypergolisch	: Zelfontbrandend
I	Informant	: Persoon of instelling, die informatie verschaft t.b.v. het afstudeerwerk, waarmee contact wordt onderhouden
	Initiatie	: Het doen ontbranden/ontsteken van een explosief materiaal
	Inrichting	: Elke door de mens bedrijfsmatig of in een omvang alsof zij bedrijfsmatig was, ondernomen bedrijvigheid die binnen een zekere begrenzing pleegt te worden verricht (wet milieubeheer)

K	Klassen	: Er is door de VN een transportclassificatie opgesteld, die is omschreven in het ADR [3]. Ontpofbare stoffen vallen in de transportgevaarenklasse 1 van gevaarlijke stoffen. Deze klasse 1 is weer onderverdeeld in een zestal subklassen die representatief zijn voor een bepaald explosie-effect [3, 27]. Met klasse wordt in dit onderzoek de transportgevaarenklasse bedoeld (§ 4.3).
	Klassenscheiding Kwetsbaar object	: Het scheiden van artikelen uit verschillende transportklassen : Object met een woonfunctie, een arbeidsfunctie, een transportfunctie en/of recreatiefunctie, zoals woonhuizen, kantoren, rijkswegen, sporen, recreatieterreinen
M	Massa explosie	: Explosie waarbij al het aanwezige explosieve materiaal tegelijkertijd explodeert
	Mate van veiligheid	: Het niveau van veiligheid voor de burger dat het VROM wil bereiken
N	NATO	: North Atlantic Treaty Organisation
P	Professioneel vuurwerk	: Vuurwerk, niet zijnde consumentenvuurwerk Vuurwerk met onbekende bestemming of doeleinden [31]
	ProXYZ	: Naam van het consultancy bedrijf dat adviesdiensten verleent op het gebied van vergunningen, tevens initiator afstudeeronderwerp
	Pyrofore	: Door lucht snel oxiderend, en onder vlamverschijnsel snel verbrandend
	Pyrotechnisch	: Techniek betreffende vuurwerk
R	Reactiesnelheid	: De snelheid waar de initiatie zich voortzet door het explosieve materiaal
	Risicobenadering/ Risicoanalyse	: Voorkomen van hoofdgebeurtenis door kans op voorgaande handelingen essentiële handelingen te minimaliseren (§ 5.3)
S	Sas	: Stof die reageert, zonder dat daarvoor toevoer van energie of materie (zuurstof) voor nodig is [18]
	Simultaan	: Tegelijkertijd
	Sprinklerinstallatie	: Vast leidingstelsel voorzien van sprinklers (sproeiers) die worden afgesloten door een hittegevoelig element [31]
T	TNO-PML	: Technisch Natuurkundig Onderzoek - Prins Maurits Laboratorium: Laboratorium dat onderzoek verricht naar wapens, munitie en explosies.
	TNT	: Springstof behorende tot de aromatische categorie, $C_7H_5N_3O_6$ , Trinitroteleune.
	TUD	: Technische Universiteit Delft
	TWV	: Technische Werkgroep Vuurwerk
U	Uitgangspuntensituatie	: Opgestelde situatie van het gebouwoontwerp dat voldoet aan het Vuurwerkbesluit en dat dient ter vergelijking van het nieuwe ontwerp
V	Veiligheidsafstand	: Minimale afstand, vanaf een gevaarlijk object, waarbij een bepaalde mate van veiligheid wordt gegarandeerd
	VEN	: Vereniging Evenementenvuurwerk Nederland
	Verpakking	: Verpakking van één of meerdere vuurwerkartikelen
	VROM	: Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer
	Vuurwerk	: Product of voorwerp waarin of waarop een sas aanwezig is en dat bestemd is om voor gemakkelijksdoelen tot ontbranding gebracht te worden [31]
	Vuurwerkbesluit	: Besluit van 22 januari 2002, houdende nieuwe regels met betrekking tot consumenten en professioneel vuurwerk, van kracht geworden op 1 maart 2002
	Vuurwerkconcentratiegebied	: Een vuurwerkconcentratiegebied is een, door de overheid aangewezen, gebied waarin een bundeling van verschillende vuurwerkinrichtingen plaatsvindt [31] (§ 6.4)
	Vuurwerkopslagunit	: Het gebouwoontwerp, bestaande uit een bewaarplaats, bewerkingsruimte en kantoorruimte



## Bijlage 2: Literatuurlijst

In het rapport wordt met vierkante [x] haken verwezen naar de literatuur.

	<b>Titel</b>	<b>Omschrijving/uitgave</b>	<b>Auteur</b>	<b>Locatie</b>
[1]	A study of blast characteristics of several primary explosives and pyrotechnic compositions	Journal of Hazardous Materials, Volume 21, Issue 2, 1989, Pages 135-142	L.V. de Yong and G. Campanella	Centrale bibliotheek TUDelft, CB 3278 1.1975 -
[2]	AASTP-1	Het Allied Ammunition, Storage and Transport Publication is een handboek van de NATO over munitieopslag, 1997	NATO	Niet beschikbaar, dan voor militaire rijksinstellingen van landen aangesloten bij de NATO of instelling als TNO
[3]	ADR	european Agreement concerning the international carriage of Dangerous goods by Road (ADR), July 2001	Europese overeenkomst te Genève	<a href="http://www.veiligheidsadviseur.s.org">http://www.veiligheidsadviseur.s.org</a>
[4]	Air Blast from non-ideal explosives	Praktijkproeven van niet-ideale explosieven ter vergelijking met TNT, 28 <sup>e</sup> explosie veiligheid seminair, 1998	Michael G. Leone, Robert L. Abernathy, e.a.	New Mexico Institute of Mining and Technology Socorro, NM 87801
[5]	Chemistry of pyrotechnics	Chemische principes van pyrotechnieken, hitte, kleur, licht, rook en geluid, etc..., 1985	J.A. Conkling	Centrale bibliotheek TUDelft, CB 21845429
[6]	De op extensie en buiging belaste staaf	Collegedictaat Ctme2040 – deel 2, 1997	C. Hartsuiker / C.F. Vrijman	Collegemateriaal 2040, Faculteit Civiele Techniek, TUDelft
[7]	De vuurwerkkramp	Rapport Commissie Oosting, 28 februari 2001	mr. dr. M. Oosting, e.a.	ISBN: 90-71082-67-9
[8]	Dynamics of explosions and its use	Boek met uitgebreide beschrijving van explosie-effecten	Josef Henrich	Interne literatuur TNO-PML
[9]	Eindrapport naar de vuurwerkkramp in Enschede	Onderzoek naar de feiten, causale gebeurtenissen en schadebeeld, Februari 2001	MSNP Technisch projectrealisatie en advisering	<a href="http://www.msnp.nl">http://www.msnp.nl</a> (eindrapport vuurwerkkramp)
[10]	Explosion hazards and evaluation	Hét basisboek met uitgebreide beschrijving van explosieven, energie, hittestraling, luchtschok, brokstukken, etc..., 1983	W.E. Baker, P.A. Cox, e.a.	Centrale bibliotheek TUDelft, CB17304187
[11]	Explosive loading of engineering structures	A history of research and a review of recent developments, 1997	Bulson, P.S.	Centrale bibliotheek TUDelft, CB UJG197 / ISBN 0-419-16930-X
[12]	Functioneel ontwerpen	Collegedictaat met functioneel ontwerp methodieken, Augustus 2000	Prof.dr.ir H.A.J. de Ridder, e.a.	Sectie Civiele Bedrijfskunde, Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen, TUDelft
[13]	Gewapend beton	Collegedictaat Ctco3050, september 1998	Prof. Dr. Ir. J.C. Walraven	Collegemateriaal 3050, Faculteit Civiele Techniek, TUDelft
[14]	Grond mechanica	Belangrijkste begrippen, theorieën en technieken van de grondmechanica, VSSD, 1990	Verruijt, A	ISBN 90 6562 045 1
[15]	Introduction to the technology of explosives	Boek met beschrijving van explosieve stoffen van samenstelling tot effecten, 1996.	Paul W. Cooper, Stanley R. Kurowski	Centrale bibliotheek TUDelft, CB 24034457

	<b>Titel</b>	<b>Omschrijving/uitgave</b>	<b>Auteur</b>	<b>Locatie</b>
[16]	Kansen in de Civiele Techniek	Deel 1: Probabilistisch ontwerpen in theorie, maart 1997	Civieltechnisch Centrum Uitvoering Research en Regelgeving	ISBN 90-376-0102-2
[17]	Materiaalkunde	Collegedictaat Ctma1120, 1997	Prof. Dr. J.M.J.M. Bijen e.a.	Collegemateriaal 1120, Faculteit Civiele Techniek, TUDelft
[18]	MP 40-21	Handboek, met voorschriften voor het opslaan van en bewerkingen aan explosieve stoffen en munitie ( ministerie van Defensie), 1997	Ministerie van Defensie	Een kopie wordt na aanvraag, bij het Defensievoorlichtingscentrum aan de Kalvermarkt 38 in Den Haag, toegezonden
[19]	NASA CR 134779	The characterization and evaluation of accidental explosions, 1975	Strehlow, R.A. en Baker, W.E.	NASA Lewis Research Centre
[20]	Onderzoeksmethodologie	Collegedictaat met diverse onderzoeksmethodes, december 2000	Prof.dr.ir. Ch.F.Hendriks, e.a.	Afdeling MMC, Sectie Civieltechnische Materiaalkunde, Fac. Civiele Techniek, TUDelft
[21]	Overspannend Staal	Basisboek en Construceren A, 1996	Staalbouwkundig Genootschap	ISBN: 90-72830-18-0 en 90-72830-20-2
[22]	Physics of shock waves and high-temperature hydrodynamic phenomena	Uitvoerige beschrijvingen van schokgolf, straling, thermodynamische gassen, etc..., 1966	Zel'dovich, Yu. P. Raizer	Centrale bibliotheek TUDelft, CB 12175275, CB 12562012
[23]	PML 2001 A27	Pyrotechniek en Beschermingsconstructies	TNO Prins Maurits Laboratorium	Ongerubriceerd, alleen voor de Genistenopleiding van de KMA-II (Universiteit Twente).
[24]	PML 2001-C73	TNO rapport: "Richtlijnen voor opslaan van en bewerkingen aan explosieve stoffen en munitie". Een overzicht van de selectie en aanpassingen uit het MP40-21, mei 2001	Ing. Ph. Van Dongen, ir. W. Karthaus, ing. G.H. Lodder, dr.ir. J. Weerheijm	<a href="http://www.pml.tno.nl/en/fireworks/publications.html">http://www.pml.tno.nl/en/fireworks/publications.html</a>
[25]	Principes algemene mechanica	Collegedictaat Ctme1020, 1997	R. Booij	Collegemateriaal Ctme1020, Faculteit Civiele Techniek, TUDelft
[26]	Properties of chemical explosives and explosive simulants	Rapport met gegevens over chemische explosieven, California University, july 1974	Dobratz, B.M.	Centrale bibliotheek TUDelft, CB 19083226
[27]	RIVM rapport 610066013	Overzicht van veiligheidsafstanden voor de opslag van vuurwerk in Nederland en enkele andere landen, mei 2001	A.J.C.M. Matthijssen	<a href="http://www.rivm.nl:80/bibliotheek/rapporten/610066013.html">http://www.rivm.nl:80/bibliotheek/rapporten/610066013.html</a>
[28]	Scoop Natuurkunde	Natuurkunde voor bovenbouw vwo, Wolters-Noordhoff Groningen, 1990	Hubert Biezeveld/Louis Mathot	ISBN 90 01 076343
[29]	Toegepaste bouwfysica	Collegedictaat CT5240, hoofdstuk 2, Brandveiligheid, september 2001	Cauberg, J.J.M., Ham v/d, E.R. e.a.	Collegemateriaal 5240, Faculteit Civiele Techniek, TUDelft
[30]	Uitwerking van explosie-effecten op constructies	TNO-rapport PML 1988-C-74, juni 1988	Ir. W.P.M. Mercx	Centrale bibliotheek TUDelft, CB 20451561
[31]	Vuurwerkbesluit	Besluit van 22 januari 2002, houdende nieuwe regels met	Ministerie van VROM	<a href="http://wetten.sdu.nl/cgi-bin/login/anonymous">http://wetten.sdu.nl/cgi-bin/login/anonymous</a> , zoeken

---

<b>Titel</b>	<b>Omschrijving/uitgave</b>	<b>Auteur</b>	<b>Locatie</b>
	betrekking tot consumenten- en professioneel vuurwerk, van kracht geworden op 1 maart 2002		op 'Vuurwerkbesluit'

### Bijlage 3: Personen en instanties

Deze lijst bevat gegevens van personen en/of instanties die hun medewerking hebben verleend bij het onderzoek. Met ronde haken (x) wordt naar personen of instanties verwezen.

	<b>Persoon/instantie</b>	<b>Omschrijving</b>
(1)	CEV	: Het expertiseCentrum voor Externe Veiligheid en Vuurwerk is een onderdeel van het RijksInstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM) en houdt zich bezig met de gevaren omtrent gevaarlijke stoffen en vuurwerk. Contactpersoon ir. M. van der Plas
(2)	Fraaij, A.L.A.	: Professor bij onderzoeksafdeling Civieltechnische materiaalkunde aan de Technische Universiteit Delft
(3)	Gresnigt, Ir. A.M.	: Universiteit Delft, afdeling staal & hout, materiaalkunde
(4)	Jonge, G.J. de	: Kenner ADR via internetpagina: <a href="http://home.hetnet.nl/~jongede/page2.html">http://home.hetnet.nl/~jongede/page2.html</a>
(5)	Stübener, P.O.W.	: Leering, deurspecialist, Enschede
(6)	TNO-PML	: Het Prins Maurits Laboratorium is een onderdeel van TNO en houdt zich voornamelijk bezig met explosieven en munitie. Contactpersoon dr. ir. J. Weerheijm.
(7)	VROM	: Het ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer. Contactpersoon ir. G.J. Verbakel
(8)	Wagenvoort, G.J.	: Voorzitter branchevereniging professionele vuurwerkbranche, te Wapenveld.
(9)	Wal, A. van der	: Adviseur bij Ytong. YTONG Nederland BV is producent van cellenbeton. De producten van het bedrijf worden toegepast in gevels, vloeren, daken en wanden.

### Bijlage 4: Internetlocaties

Deze lijst bevat de internetadressen die zijn geraadpleegd bij het tot stand komen van dit rapport. Er wordt met accolades {x} in het rapport naar de internetlocaties verwezen.

	<b>Internetlocatie</b>
{1}	<a href="http://home.hetnet.nl/~jongede/page2.html">http://home.hetnet.nl/~jongede/page2.html</a>
{2}	<a href="http://web.planet.nl/news/nieuws/archief/2000/05/enschedefotos_zaterdag.shtml">http://web.planet.nl/news/nieuws/archief/2000/05/enschedefotos_zaterdag.shtml</a>
{3}	<a href="http://www.milieu-extra.nl/cpr_15-2.htm">http://www.milieu-extra.nl/cpr_15-2.htm</a>
{4}	<a href="http://www.msnp.nl">http://www.msnp.nl</a>
{5}	<a href="http://www.pml.tno.nl/en/fireworks/publications.html">http://www.pml.tno.nl/en/fireworks/publications.html</a>
{6}	<a href="http://www.rivm.nl:80/bibliotheek/rapporten/610066013.html">http://www.rivm.nl:80/bibliotheek/rapporten/610066013.html</a>
{7}	<a href="http://www.veiligheidsadviseurs.org">http://www.veiligheidsadviseurs.org</a>