

De effectiviteit van een barrière als explosie- werende maatregel



Nederlandse Academie voor
Crisisbeheersing en Brandweezorg
Postbus 7010
6801 HA Arnhem
Kemperbergerweg 783, Arnhem
www.nipv.nl
info@nipv.nl
026 355 24 00

Colofon

© Nederlands Instituut Publieke Veiligheid (NIPV), 2024

Auteur	M. Spoelstra
Datum	4 april 2024
Foto cover	Shutterstock

Deze publicatie is mede mogelijk gemaakt door een bijdrage uit het Ontwikkelbudget Nieuwe Prioriteiten Omgevingsveiligheid.

Wij hechten veel belang aan kennisdeling. Delen uit deze publicatie mogen dan ook worden overgenomen op voorwaarde van bronvermelding.

Het Nederlands Instituut Publieke Veiligheid is bij wet vastgelegd onder de naam Instituut Fysieke Veiligheid.

Inhoud

	Samenvatting	4
	Inleiding	6
1	Barrières	8
1.1	Inleiding	8
1.2	Beschermen van gebouwen tegen overdruk	8
1.3	De werking van barrières	9
1.4	Soorten barrières	11
1.5	Samenvatting	15
2	Factoren die de effectiviteit van barrières beïnvloeden	16
2.1	Inleiding	16
2.2	Definitie van effectiviteit van een barrière	16
2.3	Factoren	16
2.4	Andere overwegingen	21
2.5	Samenvatting	22
3	Effectiviteit van barrières	23
3.1	Inleiding	23
3.2	Blastwalls bij een waterstoftankstation	23
3.3	Voorbeeld aan de hand van een vereenvoudigde formule	26
3.4	Samenvatting	29
	Referenties	30

Samenvatting

Dit rapport beschrijft de resultaten van een literatuuronderzoek dat tot doel heeft om te bepalen hoe goed fysieke barrières de effecten van een (waterstof)explosie beperken voor een gebouw dat in een explosieaandachtsgebied ligt.

Een barrière die tussen een explosie en het te beschermen gebouw staat, kan de overdruk verlagen waaraan dat gebouw wordt blootgesteld. De werking van een barrière berust op een of meer van onderstaande principes:

- > Reflectie: de drukgolf die ontstaat als gevolg van een explosie wordt door de barrière weerkaatst, zodat de drukgolf het te beschermen gebouw niet kan bereiken.
- > Absorptie: de overdruk van de drukgolf wordt (deels) geabsorbeerd door de barrière.
- > Afbuiging of diffractie: de drukgolf wordt afgebogen als die de rand van een barrière raakt. Hierdoor kan de drukgolf het te beschermen gebouw niet bereiken of moet een langere weg afleggen om bij het gebouw te komen, waardoor de overdruk van de drukgolf afneemt.

De resultaten worden hieronder beschreven aan de hand van de drie onderzoeksvragen.

Onderzoeksvraag 1: Welke barrières worden in de literatuur beschreven om de gevolgen van explosies te beperken?

Een barrière hindert de drukgolf en verlaagt de overdruk van de drukgolf. Een barrière heeft meestal de vorm van een muur en veelgebruikte materialen zijn zand, steen en beton. Er zijn ook barrières die uit meerlaagse systemen bestaan. Dergelijke barrières hebben een harde buitenkant en een zachte binnenkant.

Onderzoeksvraag 2: Aan welke ontwerp- en beheerseisen moeten barrières voldoen om effectief te kunnen zijn?

Er zijn veel factoren die de effectiviteit van een barrière bepalen. Het gaat bijvoorbeeld om de kracht van de explosie, de hoogte waarop de explosie plaatsvindt, de hoek waaronder de drukgolf op de barrière valt, de onderlinge afstanden tussen de barrière, de explosielocatie en het te beschermen gebouw, de dimensies van de barrière, de materialen waaruit de barrière is opgebouwd, de vorm van de barrière en de hoogte van het te beschermen gebouw. Gezien deze veelheid aan factoren moet iedere barrière specifiek ontworpen worden voor de locatie waar deze komt te staan.

Andere factoren die van belang zijn bij het bepalen of en zo ja waar een barrière komt te staan en welke materialen worden gebruikt, zijn het beschermingsdoel, de kosten, esthetische factoren, het gevoel van (on)veiligheid dat een barrière kan geven en de belemmering die een barrière kan geven als het gaat om de bereikbaarheid en de bestrijdbaarheid van incidenten in de directe omgeving van de barrière.

Onderzoeksvraag 3: Hoe effectief zijn deze barrières in het bieden van bescherming?

Om effectief te kunnen zijn, moet een barrière zodanig zijn geconstrueerd dat deze de overdruk van de verwachte explosie kan weerstaan en daarbij niet dermate wordt beschadigd, dat brokstukken in de omgeving schade kunnen veroorzaken.

Achter de barrière is de drukverlaging het grootst. De drukverlaging en daarmee de effectiviteit van een barrière worden groter als de barrière hoger is en als de barrière dichter bij de explosielocatie staat. De 'schaduwwerking' van de barrière is in die situaties het grootst, waardoor een relatief lage barrière een hoog gebouw in theorie kan beschermen.

Als de afstand tussen de barrière en het te beschermen gebouw toeneemt, zal het gebouw (deels) niet meer in schaduwzone van de barrière staan en kan de barrière het gebouw niet meer volledig beschermen. Bij voorkeur is de afstand tussen barrière en het te beschermen gebouw niet meer dan drie keer de hoogte van de barrière. Het blijft echter de vraag of een barrière (alleen) de overdruk van een drukgolf voldoende kan verlagen om een achterliggend gebouw te beschermen. Mogelijk zijn aanvullende maatregelen nodig om het beschermingsdoel te halen.

Inleiding

Nederland is een klein land waardoor goed nagedacht moet worden over de ruimtelijke inpassing van de aanwezigheid en het transport van gevaarlijke stoffen. Nederland heeft immers niet de luxe om gevaarlijke stoffen zoveel mogelijk te verbannen uit de stedelijke omgeving. Die ruimte is er simpelweg niet. Ons land heeft daarom als een van de weinige landen ter wereld een risicobeleid. Dit houdt in dat bij de ruimtelijke inpassing niet alleen gekeken wordt naar de mogelijke effecten van incidenten waarbij gevaarlijke stoffen vrijkomen, maar ook naar de kansen op die incidenten. Risico's moeten natuurlijk zo klein mogelijk zijn en het beleid hieromtrent is vastgelegd in diverse wet- en regelgevingen, waaronder het Besluit kwaliteit leefomgeving (Bkl) en het Besluit bouwwerken leefomgeving (Bbl). Deze besluiten maken onderdeel uit van de Omgevingswet die per 1 januari 2024 van kracht is geworden.

Het Bkl geeft aan dat gemeenten bij nieuwe ruimtelijke ontwikkelingen rekening moeten houden met de aanwezigheid van aandachtsgebieden (art. 5.15 Bkl). Een aandachtsgebied is een gebied waar mensen in een gebouw onvoldoende beschermd kunnen zijn tegen de gevolgen van een brand, explosie of gifwolk die van buitenaf komt (RIVM, z.d.). Gemeenten moeten bij de realisatie van nieuwe gebouwen in aandachtsgebieden bepalen welke beschermende maatregelen nodig zijn om de mensen in de gebouwen te beschermen. Die maatregelen kunnen divers van aard zijn. Zo zijn er bronmaatregelen, omgevingsmaatregelen, organisatorische maatregelen, communicatiemaatregelen en bouwkundige maatregelen (Rebel, 2023).

Hoewel er veel maatregelen zijn, is de effectiviteit van die maatregelen vaak onbekend. Er is bijvoorbeeld onvoldoende kennis over de mate van bescherming die omgevingsmaatregelen als muren en aarden wallen kunnen bieden en welke voorwaarden er daarbij gelden. Die kennis moet ontwikkeld en ontsloten worden.

Doel

Het doel van dit onderzoek is om kennis te ontwikkelen over fysieke barrières die als omgevingsmaatregel de effecten van een explosie kunnen beperken ter bescherming van een gebouw in een explosieaandachtsgebied. De nadruk ligt op explosies als gevolg van een incident met waterstof.

Opzet

Om het doel te bereiken, heeft het Nederlands Instituut Publieke Veiligheid (NIPV) samengewerkt met het Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM). Het RIVM heeft een literatuurstudie gedaan naar de effecten die op kunnen treden bij een explosie in het algemeen en van waterstof in het bijzonder (RIVM, 2024). Het NIPV heeft een literatuurstudie uitgevoerd naar de effectiviteit van fysieke barrières.

Voorliggend rapport beschrijft de resultaten van die studie. De uitkomsten van beide literatuuronderzoeken zijn samengevat in een brochure (NIPV, 2024). Deze brochure bevat casussen die laten zien wanneer fysieke barrières zinvol zijn of niet.

Onderzoeksvragen

Dit rapport geeft antwoord op de volgende vragen:

- A. Welke fysieke barrières worden in de literatuur beschreven om de gevolgen van explosies te beperken?
- B. Aan welke ontwerp- en beheerseisen moeten fysieke barrières voldoen om effectief te kunnen zijn?
- C. Hoe effectief zijn deze fysieke barrières in het bieden van bescherming?

Onderzoeksmethode

Bovenstaande onderzoeksvragen zijn beantwoord door middel van literatuuronderzoek. De meeste artikelen zijn verkregen door specifiek in ScienceDirect op een onderwerp te zoeken (bijvoorbeeld 'blast wall' en 'side-on pressure explosion building'), doordat ze als bron in andere artikelen vermeld werden ('sneeuwbalmethode') of doordat ze tijdens andere onderzoeksactiviteiten op het gebied van waterstofveiligheid naar voren kwamen.

Afbakening

- > Het onderzoek richt zich op de werking en effectiviteit van fysieke barrières die tussen een explosie en het te beschermen gebouw staan.
- > Het onderzoek richt zich niet op de bescherming van mensen in het te beschermen gebouw en ook niet op de bescherming van mensen die buiten zijn.
- > Het onderzoek richt zich niet op aanvullende (bouwkundige) maatregelen die ervoor kunnen zorgen dat schade aan het gebouw en aan mensen binnen het gebouw beperkt kan worden.

Leeswijzer

Om de resultaten van het onderzoek te begrijpen, is uitleg over de verschillende typen barrières en hun werking nodig. Die is te vinden in hoofdstuk 1. Hoofdstuk 2 gaat in op de diverse factoren die de effectiviteit van een barrière bepalen, terwijl hoofdstuk 3 de effectiviteit van barrières in kwantitatieve zin beschrijft aan de hand van voorbeelden.

1 Barrières

1.1 Inleiding

Dit hoofdstuk geeft een overzicht van de diverse soorten barrières die in de literatuur beschreven worden. Wat in een bepaalde situatie de 'beste' barrière is, is van veel factoren afhankelijk. Een aantal factoren heeft betrekking op de barrière zelf, zoals de kosten en het uiterlijk van de barrière. Andere factoren die een rol spelen, zoals de kracht van de explosie, de grootte van het te beschermen gebouw, de onderlinge afstanden en het gewenste beschermingsniveau, worden in hoofdstuk 2 beschreven.

1.2 Beschermen van gebouwen tegen overdruk

Er zijn diverse manieren om een gebouw te beschermen tegen de overdruk van een (waterstof)explosie. Het doel van die maatregelen is om instorten van een deel van het gebouw of van het gehele gebouw te voorkomen, zodat de mensen in het gebouw geen letsel oplopen en het gebouw kan functioneren waarvoor het bedoeld is (Hinman, 2017; Shirbhate et al, 2021). Enkele belangrijke maatregelen zijn:

- > **Afstand houden:** de overdruk van een explosie neemt exponentieel af met de afstand (Shirbhate et al, 2021). Afstand houden is daarom een effectieve maatregel. In Nederland in het algemeen en in een stedelijke omgeving in het bijzonder is voldoende afstand houden echter niet overal mogelijk en zijn aanvullende maatregelen nodig.
- > **Het versterken van het te beschermen gebouw:** een gebouw in Nederland hoeft van de wetgever niet bestand te zijn tegen de overdruk van een explosie buiten het gebouw. Een gebouw moet sterk genoeg zijn om het eigen gewicht te dragen en om zijwaartse belasting door wind en botsing te kunnen weerstaan (NEN 1991, 2019). Om een bestaand gebouw tegen de overdruk van een explosie te beschermen, kan de constructie van het gebouw versterkt worden ('retrofit') (Smilowitz, 2016; Watch et al, 2017).

Een fysieke barrière tussen de explosie en het te beschermen gebouw: een fysieke barrière biedt bescherming, doordat de barrière de invloed van een drukgolf op een gebouw beperkt en daarmee schade aan en slachtoffers in het gebouw beperkt of voorkomt. Een barrière vergroot daarnaast het gebied waar het haalbaar is om gebouwen voldoende explosiebestendig te maken met bouwkundige maatregelen als bijvoorbeeld scherfvrij glas.

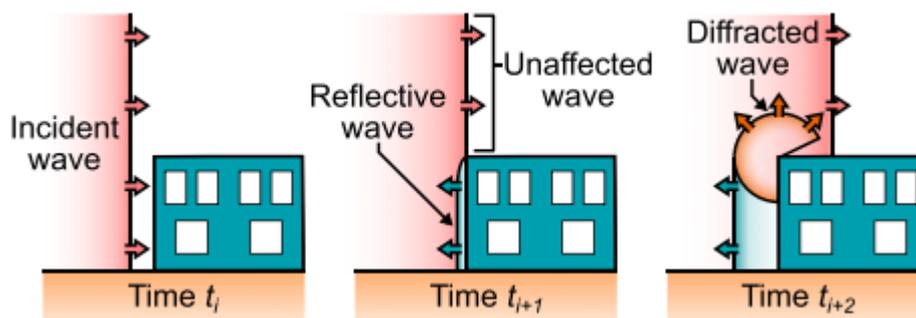
In de volgende paragrafen wordt dieper ingegaan op de diverse soorten fysieke barrières, op hun werking en aan welke voorwaarden zij moeten voldoen om effectief te zijn. In de tekst worden fysieke barrières verder aangeduid als 'barrières'.

1.3 De werking van barrières

Een barrière tussen de explosie en het te beschermen gebouw zal idealiter de vorm van de drukgolf van de explosie veranderen en de kracht van de explosie op het gebouw verminderen. Hierdoor ontstaat achter de barrière een 'schaduw'zone waar de overdruk lager is en bescherming het meest effectief is.¹ De werking van een barrière berust op een of meer van de volgende factoren (Shirbhate et al, 2021):

- > reflectie van de invallende drukgolf
- > absorptie van de invallende drukgolf
- > afbuiging van de invallende drukgolf.

Figuur 1.1 laat de reflectie en de afbuiging van de drukgolf zien.



Figuur 1.1 Schematische weergave van reflectie (midden) en afbuiging (rechts) van een drukgolf. Bron: (Isaac et al, 2023)

1.3.1 Reflectie

Als een drukgolf een onbuigzaam oppervlak raakt, wordt een deel van de drukgolf gereflecteerd. De overdruk van de gereflecteerde drukgolf is groter dan de overdruk van de invallende drukgolf. De mate waarin een barrière een drukgolf reflecteert, hangt af van:

- > de stijfheid van het materiaal waaruit de barrière is opgebouwd
- > de hoek waaronder de drukgolf op de barrière valt
- > de kracht van de invallende drukgolf.

Zodra een drukgolf de barrière raakt, neemt dus de druk op de voorkant van de barrière als gevolg van reflectie instantaan toe. De druk die de barrière ervaart, is daarom groter dan de druk van de invallende drukgolf.

Een materiaal met een hoge dichtheid zal een drukgolf beter kunnen reflecteren dan een materiaal met een lage dichtheid. De verhouding tussen de gereflecteerde overdruk en de invallende overdruk is de reflectiefactor. Hoe hoger de invallende overdruk, hoe hoger de reflectiefactor. Als een drukgolf loodrecht op een barrière valt, is de reflectiefactor het hoogst en minimaal ≥ 2 (Isaac et al, 2023). In de praktijk wordt een reflectiefactor van 2,5 gehanteerd (Antea Group, 2021).

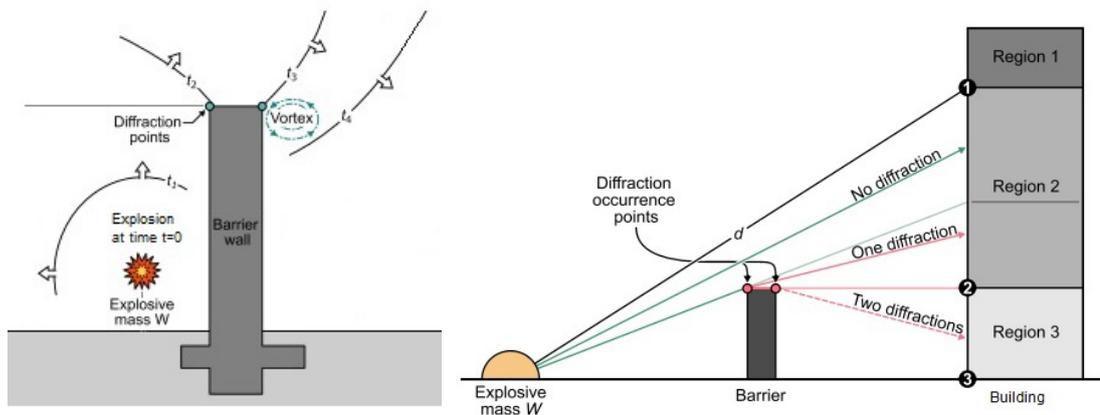
¹ Een barrière kan ook de ligging en de grootte van een vrije gaswolk beïnvloeden en daarmee de effecten van een mogelijke gaswolkexplosie. Bij een waterstoftankstation in Noorwegen worden bijvoorbeeld barrières gebruikt om invloed uit te oefenen op de afvoer van gassen en/of verbrandingsproducten. De barrières liggen bij dit tankstation tegenover elkaar (Huser et al, 2021). Zie ook paragraaf 3.2. Als een barrière echter te dicht bij een explosiebron staat, kan de barrière de kracht van de explosie versterken. Dit is het geval bij een gaswolkexplosie waar de barrière voor vlamversnelling kan zorgen doordat de verbrandingsreactie in de gaswolk door opmenging sneller plaatsvindt.

1.3.2 Absorptie

Een deel van de drukgolf die op een barrière valt, zal worden geabsorbeerd door de materialen waaruit de barrière is opgebouwd. De absorptie gaat gepaard met het vervormen van de barrière: metalen kunnen permanent vervormd worden of breken, vezels in vezelversterkte polymeren kunnen scheuren en bij meerlaagse systemen kan delaminatie optreden (Pai et al, 2022).

1.3.3 Afbuiging

Als een drukgolf de rand van een barrière raakt, wordt de drukgolf afgebogen. Dit is gunstig als de drukgolf een te beschermen gebouw dan niet kan bereiken of er langer over doet (Figuur 1.2). De kracht van de drukgolf op het gebouw zal dan lager zijn. Als de barrière echter te laag is, wordt een deel van de drukgolf niet gehinderd en zal hoger gelegen delen van het te beschermen gebouw bereiken.



Figuur 1.2 Links: het afbuigen ('diffraction') van een drukgolf door de randen van een barrière. Rechts: het pad van de drukgolf met en zonder afbuiging(en). Bron: (Isaac et al, 2023)

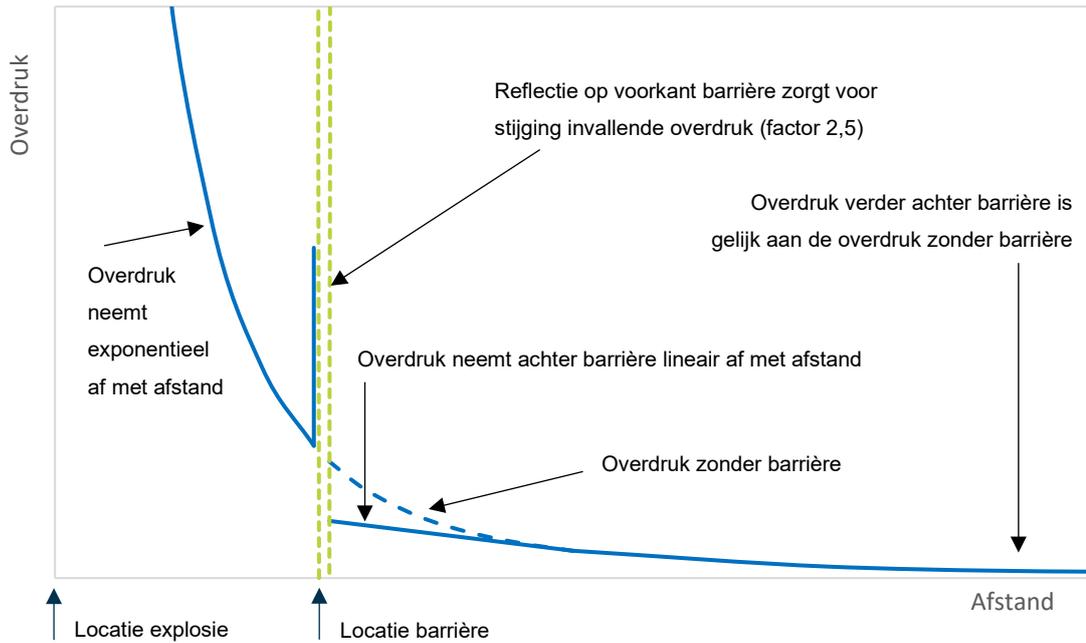
1.3.4 Druk achter de barrière

In de open lucht neemt de overdruk van een drukgolf af met het kwadraat van de afstand volgens formule [1] (exponentiële afname): de afname in overdruk is op korte afstand van de explosie het grootst, maar op grote afstand neemt de overdruk nog maar weinig af.

$$\text{overdruk} \approx \frac{1}{\text{afstand}^2} \quad [1]$$

Achter de barrière is de overdruk van de drukgolf lager: deze afname is lineair en duurt totdat de overdruk de waarde bereikt heeft die de drukgolf gehad zou hebben als er geen barrière had gestaan. Zie Figuur 1.3.

Het is belangrijk om aan te geven dat de schaduwzone aan de voorkant van de barrière begint, dus aan de zijde waar de explosie plaats vindt. Als een barrière heel diep is, bijvoorbeeld als de barrière een gebouw is, dan neemt de diepte van het gebouw een groot deel van de schaduwzone in beslag. Er blijft daardoor achter het gebouw weinig ruimte over waarin het gebouw bescherming kan bieden.



Figuur 1.3 Schematische weergave van het verloop van de overdruk van een drukgolf als functie van de afstand, in aan- en afwezigheid van een barrière

1.4 Soorten barrières

Er is een heel spectrum aan barrières voor het beschermen van gebouwen tegen explosies. De werking van die barrières is gebaseerd op reflectie, afbuiging en/of absorptie van de drukgolf. Van oudsher worden barrières vaak gemaakt van zandzakken of van blokken gewapend beton. Tegenover deze eenvoudige barrières staan 'high-tech' barrières met een sandwichstructuur. De volgende subparagrafen beschrijven diverse soorten barrières en hun voor- en nadelen.²

1.4.1 Zandzakken, aarden wal en systemen gevuld met zand

Barrières van zand worden veel gebruikt om mensen en gebouwen te beschermen tegen de impact van kogels, maar ze geven ook bescherming tegen drukgolven van explosies. De werking van barrières van zand is gebaseerd op het absorberen van de energie van de drukgolf. Hoe dikker de zandbarrière, hoe beter deze energie geabsorbeerd wordt.

Barrières van zand hebben het voordeel dat zand overal beschikbaar is, dat het materiaal goedkoop is en dat de barrières relatief eenvoudig te bouwen zijn. Een ander belangrijk voordeel is dat zand niet zorgt voor schade aan gebouwen als de barrière getroffen wordt door een explosie (secundaire schade). Nadelen van zandbarrières zijn dat ze een gevoel van onveiligheid kunnen creëren en dat ze esthetisch gezien niet geschikt zijn in een stedelijke omgeving (Hussein, 2020).

² Een barrière tegen overdruk kan ook kan bij andere scenario's van nut zijn. Zo kunnen sommige barrières de verspreiding van een vloeistofplas beperken of de effecten van de warmtestraling van een brand.



**Figuur 1.4 Voorbeelden van zandbarrières: zandzakken (links) en aarden wal (rechts).
Bron: (Shutterstock)**

1.4.2 Bomen en struiken

In een stedelijke omgeving kunnen groenvoorzieningen bescherming bieden tegen de drukgolf van een explosie. Bomen en struiken moeten dan wel wintergroen, dicht en ondoorzichtig zijn en het gebladerte moet klein zijn. Bomen en struiken met naalden (coniferen en taxus) presteren beter dan bomen en struiken met blaadjes, omdat naaldbomen en -struiken de energie van een drukgolf beter absorberen door hun hogere dichtheid en doordat de naalden niet van de takken gerukt worden.³

Voordelen van een ‘groene’ barrière zijn dat de kosten laag zijn, dat naaldbomen en -struiken esthetisch gezien goed passen in een stedelijke omgeving en dat ze intact blijven. Het nadeel is echter dat de effectiviteit beperkt is tot 1 à 2 meter achter de barrière (Warnstedt et al, 2020).



Figuur 1.5 Testopstelling met coniferen als barrière. Links voor de explosie en rechts na de explosie. Bron: (Warnstedt et al, 2020)

1.4.3 Stenen muur

Met een stenen muur wordt in dit rapport een muur bedoeld die uit bakstenen en voegsel bestaat en niet versterkt is. De werking van een stenen muur is vooral gebaseerd op het absorberen en afbuigen van drukgolven. Een stenen muur zal door het absorberen van de drukgolf beschadigd raken bij zijn zwakke plekken, te weten de grensvlakken tussen de stenen en de voegen. De muur kan scheuren, afbrokkelen en brokstukken geven, scheef gaan staan of zelfs instorten (Wu et al, 2022).

³ Hier staat tegenover dat vegetatie mogelijk voor vlamversnelling kan zorgen in een brandbare wolk waardoor hoge overdrukken kunnen ontstaan. Men vermoedt dat dit het geval was bij de explosie in Buncefield in 2005 (Bakke et al, 2010).

Om bestand te zijn tegen een explosie, moet de doorbuiging van een stenen muur kleiner zijn dan de dikte van de muur (Wei et al, 2010). Een dikke stenen muur zal daarom een betere barrière zijn dan een dunne muur: een bakstenen muur met een dikte van bijna een halve meter kan een overdruk van 0,7 bar aan (Hinman, 2017).

Een nadeel van een stenen muur is de mogelijkheid dat bij een explosie stukken steen of muur afbreken. Deze worden weggeslingerd en kunnen mensen en gebouwen raken. Het afbreken wordt veroorzaakt door de brosheid van steen, waardoor het materiaal bij een drukgolf weinig vervormt en snel zal breken (NCMA, 2022).

De werking van een stenen muur kan op verschillende manieren verbeterd worden (Wu et al, 2022):

- > Versterken van de muur door wapening of door gebruik van cement in holle bakstenen.
- > Verbeteren van de taaiheid door de muur te bekleden met vezeldoek, een polymere coating, metaallagen of combinaties hiervan.⁴
- > Voorkomen dat brokstukken weggeslingerd worden door het toepassen van een polymere coating op of in de muur.



Figuur 1.6 Testopstelling met stenen muur. Bron: (Wu et al, 2022)

1.4.4 Betonnen muur

Een betonnen muur bestaat meestal uit blokken gewapend beton die aan elkaar gekoppeld worden. Bij een explosie gaan drukkrachten door de betonnen muur naar de achterkant en veroorzaakt daar trekkrachten. Dit proces kan tot betonafspat leiden (Tai, 2011), maar het betonstaal vangt de trekkrachten op, waardoor betonafspat voor een deel voorkomen wordt.

⁴ De taaiheid van een materiaal is de hoeveel energie die dat materiaal kan absorberen voor het breekt. Een taai materiaal kan veel energie absorberen en daarbij vervormen voordat het breekt. Een bros materiaal kan weinig energie opnemen en zal weinig vervormen.



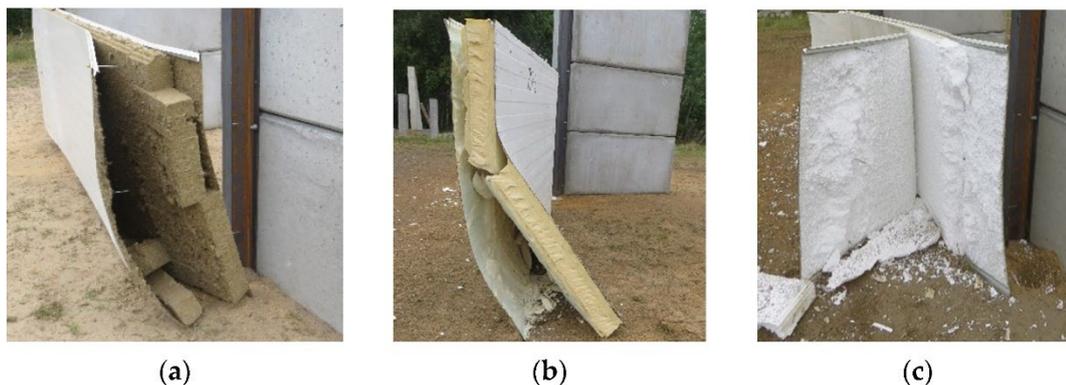
Figuur 1.7 Voorbeeld van een betonnen muur. Bron: (Shutterstock)

1.4.5 Meerlaagse barrière

Een barrière kan uit meerdere lagen bestaan, elk met haar eigen eigenschappen. De voorkant⁵ van zo'n meerlaagse barrière wordt gevormd door metalen met een hoge dichtheid en een hoge taaigheid. De metaallaag aan de voorkant heeft tot doel om een groot deel van de drukgolf te reflecteren en te absorberen. De kracht van de resterende drukgolf wordt geabsorbeerd door de kern van de meerlaagse barrière. Deze moet daarom bestaan uit een materiaal dat goed samen te drukken is en een lage dichtheid heeft. De kern kan hierbij permanent vervormd worden, waardoor de barrière niet meer bruikbaar is.

Meerlaagse barrières zijn de meest effectieve barrières, maar ook de duurste, en worden daarom beperkt toegepast (Hussein, 2020). Figuur 1.8 laat voorbeelden zien van een meerlaagse barrière met verschillende kernen.

⁵ Met de voorkant van de barrière wordt de zijde bedoeld die door de drukgolf geraakt zal worden.



Figuur 1.8 Drie voorbeelden van zachte sandwichpanelen na explosietesten. De panelen bestaan uit staalplaten met daartussen een kern van minerale wol (a), polyisocyanuraat (b) of polystyreen (c). Bron: (Studzinski, 2020)

1.5 Samenvatting

Een barrière die de drukgolf van een explosie moet beperken, doet dit door de invallende drukgolf te reflecteren, te absorberen en/of af te buigen. De opbouw en de materiaalkeuze van de barrière hebben daarom grote invloed op de werking van de barrière. Tabel 1.1 vat de in dit hoofdstuk beschreven resultaten samen, dat wil zeggen de werking van diverse soorten barrières en hun voor- en nadelen. De waardering in de vorm van '+', '±' en '-' is de interpretatie van de auteur, waarbij een voordeel of een positief aspect van een barrière is aangeduid met een + en een nadeel of een negatief aspect met een -. Als een aspect niet duidelijk positief of negatief is, is dat aangegeven met ±.

Tabel 1.1 De werking en de voor- en nadelen van diverse soorten barrières

	Zand	Naaldbomen	Steen	Beton	Meerlaags
Belangrijkste werking	Absorptie	Absorptie	Afbuiging Absorptie	Afbuiging Reflectie Absorptie	Reflectie Absorptie
Kosten	+	+	-	-	-
Passend in stedelijk gebied	-	+	-	-	-
Eenvoudig	+	+	±	±	±
Blijft intact	-	+	-	±	+
Geen secundaire schade	+	+	-	±	+

2 Factoren die de effectiviteit van barrières beïnvloeden

2.1 Inleiding

In hoofdstuk 1 is de werking van verschillende barrières besproken en de diverse voor- en nadelen die bij deze barrières horen. De voor- en nadelen zeggen niets over de effectiviteit van de barrière. Die wordt namelijk door een groot aantal andere factoren bepaald. Om een uitspraak te kunnen doen over de effectiviteit van een barrière, is kennis van deze factoren nodig en van de manier waarop een drukgolf achter een barrière in kracht afneemt. Dit hoofdstuk beschrijft wat met de effectiviteit van een barrière wordt bedoeld en gaat daarna in op de diverse factoren die de effectiviteit van een barrière beïnvloeden.

2.2 Definitie van effectiviteit van een barrière

Met de effectiviteit van een barrière worden in de praktijk twee aspecten bedoeld:

- > De mate waarin de overdruk aan de achterkant van de barrière lager is dan de overdruk aan de voorkant.
- > De grootte van het gebied achter de barrière waarin de overdruk significant lager is dan de overdruk aan de voorkant van de barrière.

Strikt genomen is de grootte van het veilige gebied achter de barrière het gevolg van de mate waarin een barrière de overdruk van een explosie verlaagt. In dit rapport wordt daarom met de effectiviteit van een barrière de mate bedoeld waarin de overdruk aan de achterkant van de barrière lager is dan de overdruk aan de voorkant.⁶

2.3 Factoren

Als eerder aangegeven, is de werking van barrières gebaseerd op reflectie, afbuiging en/of absorptie van de drukgolf. Factoren als de kracht van de explosie, de dimensies van de barrière en het materiaal waarvan de barrière gemaakt is, hebben invloed op de mate van reflectie, afbuiging en/of absorptie en daarmee op de effectiviteit van de barrière. Deze factoren kunnen niet los van elkaar gezien worden vanwege hun onderlinge samenhang. Zo zal het plaatsen van een barrière dicht bij een mogelijke explosie een sterkere barrière vereisen dan een barrière die verder weg wordt geplaatst. Deze paragraaf beschrijft de factoren die in belangrijke mate de effectiviteit van een barrière bepalen.

⁶ Het is de keuze van de auteur om met 'de overdruk aan de voorkant' de overdruk van de invallende drukgolf te duiden en niet de gereflecteerde overdruk.

2.3.1 Kracht van de explosie

Literatuur over explosies in combinatie met de effectiviteit van barrières heeft meestal betrekking op explosies van trinitrotolueen (TNT), omdat er veel kennis is over deze stof en omdat explosies met TNT goed reproduceerbaar zijn. In de literatuur is daarentegen relatief weinig geschreven over gaswolkexplosies in relatie tot de effectiviteit van barrières. In artikelen over gaswolkexplosies van waterstof is de waterstofconcentratie in de gaswolk steeds circa 30 vol.% (stoichiometrische concentratie), want bij deze concentratie is de kracht van een explosie het sterkst.⁷

TNT is een vaste stof en een explosief. Explosies van TNT zijn detonaties die gepaard gaan met een schokgolf, terwijl gaswolkexplosies zoals van waterstof over het algemeen deflagraties zijn die gepaard gaan met een drukgolf (voor de eenvoud zal in dit rapport alleen gebruikgemaakt worden van de term drukgolf). De overdruk van een detonatie is groter dan de overdruk van een deflagratie en dit heeft invloed op de effectiviteit van een barrière.⁸

De impuls van een explosie speelt ook een rol bij de effectiviteit van een barrière. De impuls van een explosie is gerelateerd aan de tijdsduur van de explosie (RIVM, 2024). Een explosie laat een constructie trillen. De frequentie waarmee de constructie gaat bewegen als een drukgolf de constructie heeft geraakt, wordt de eigenfrequentie genoemd (f_E). Bij de eigenfrequentie treedt resonantie op en is de beweging van een gebouw maximaal. De eigenfrequentie van woningen en lage gebouwen is ongeveer 5 Hz; dit wordt lager naarmate het gebouw hoger wordt (tot 0,1 Hz) (PGS, 2003). De duur van een trilling bij de eigenfrequentie wordt de eigentrillingstijd genoemd ($T_E = 1/f_E$). De eigentrillingstijd van een woning is ongeveer 200 ms en deze periode is over het algemeen langer dan de duur van een explosie.

2.3.2 Hoogte van de explosie

- > Als de barrière niet hoog genoeg is, kan de drukgolf over de barrière heengaan en het te beschermen gebouw treffen. In de bestudeerde literatuur vonden veel explosies plaats op een hoogte van maximaal 1,5 m boven de grond.
- > Waterstof heeft een lagere dichtheid dan lucht en zal bij onbedoeld vrijkomen stijgen. Een waterstofwolk kan daardoor hoger komen dan een barrière. Als er dan ontsteking plaatsvindt en een explosie voor een drukgolf zorgt, zal een barrière deze drukgolf niet kunnen tegenhouden of de overdruk doen verminderen.
- > Bij een explosie op of laag bij de grond zal een deel van de drukgolf zich door de grond verplaatsen en een grondschok geven (als een kleine aardbeving). Hierdoor kan schade ontstaan aan de draagconstructie van de barrière en/of het te beschermen gebouw (Hinman, 2017).

2.3.3 Invalshoek

- > Barrières die loodrecht op de drukgolf staan, zijn het effectiefst. Bij transport van gevaarlijke stoffen over weg of spoor (lijnbron) is de kans groot dat een explosie zich niet recht voor een gebouw voor doet, maar op enige afstand ervan. Hierdoor valt de drukgolf niet loodrecht op een barrière, maar onder een hoek.

⁷ Als andere explosieven dan TNT gebruikt worden, wordt de hoeveelheid explosief omgerekend naar de equivalente hoeveelheid TNT. Hetzelfde gebeurt ook bij waterstof: de hoeveelheid waterstof die zich in een gaswolk bevindt, wordt omgerekend naar de equivalente hoeveelheid 30 vol.% waterstof. Zie ook paragraaf 3.3.

⁸ Meer informatie over detonaties, deflagratie, drukgolven en schokgolven is te vinden in het rapport *Effecten van waterstofexplosies* van het RIVM (RIVM, 2024).

Een deel van de drukgolf gaat dan achter de barrière langs, zodat het te beschermen object rechtstreeks getroffen kan worden door de drukgolf.

- > Als een explosie de voorzijde van een barrière onder een hoek raakt, beïnvloedt dat de mate waarin de invallende drukgolf gereflecteerd wordt. Bij overdrukken tot 4 bar neemt de reflectiefactor weinig af als de drukgolf onder een hoek van minder dan 40 graden op een barrière valt. Wordt die hoek groter, dan neemt de reflectiefactor af en wordt 1 als de drukgolf niet meer op de barrière valt maar daar parallel aan loopt (Isaac et al, 2023).

2.3.4 Afstand barrière tot explosie

Een barrière bevindt zich tussen de locatie waar de mogelijke explosie plaats kan vinden en de locatie van het te beschermen gebouw. De afstand van de explosielocatie tot de barrière wordt de 'standoff distance' genoemd.⁹ De plaatsing van een barrière moet voor iedere situatie onderbouwd worden, omdat er veel aspecten zijn waar rekening mee gehouden moet worden. Die aspecten worden in deze paragraaf toegelicht.

- > Als het gaat om het plaatsen van een barrière, zijn er over het algemeen twee mogelijkheden:
 - De barrière staat dicht bij het te beschermen gebouw. De barrière is dan effectief, omdat het gebouw in het gebied staat direct achter de barrière waar de overdruk van de explosie verlaagd wordt.
 - De barrière staat dicht bij de locatie waar de explosie kan optreden. De drukgolf is dan nog beperkt van omvang is en de energiedichtheid is groot. Een barrière die dicht bij de explosie staat, is dan effectief omdat er veel energie onttrokken kan worden uit de drukgolf.

Welke locatie de voorkeur heeft, verschilt in de literatuur. Zo geven Hajek en Zhou aan dat een barrière effectiever is als deze zich dicht bij de explosie bevindt (Hajek et al, 2016; Zhou en Hao, 2008), terwijl Chapman aangeeft dat een barrière effectiever is als de afstand tot de explosie groter is (Chapman et al, 1995). In experimenten of simulaties die in de literatuur beschreven worden, is de afstand tussen de barrière en de explosie meestal beperkt tot enkele meters (2-5 m), omdat de werking van een barrière dan maximaal is.

- > Een barrière moet niet ergens halverwege de explosie en het te beschermen gebouw staan, omdat voorkomen moet worden dat achter een barrière lokaal pieken in overdruk ontstaan door reflecties tussen de barrière, de grond en het te beschermen gebouw (Zhou et al, 2023) of door afgebogen drukgolven die daar samenkomen (HySafe, 2006; Dusenberry, 2010). De dimensies en de locatie van de barrière moeten daarom met zorg en aan de hand van specifieke berekeningen worden bepaald. Daarnaast is de effectiviteit van een barrière halverwege de explosie en het gebouw niet maximaal.
- > Als een barrière dicht bij de locatie staat waar een explosie kan optreden, is de kans groter dat de barrière verbrijzeld wordt en brokstukken geeft die met grote kracht de omgeving in worden geslingerd. Dit is een ongewenst neveneffect.
- > Een barrière die dicht bij een explosie staat, moet sterker zijn dan een barrière die verder weg staat. Dit zal doorwerken in de kosten en dimensies van de barrière.
- > De locatie waar een explosie zich voor kan doen, is vooraf niet altijd te bepalen. Zo kan bij een transportroute een explosie op ieder punt op die route plaatsvinden en heeft de wind invloed op de verspreiding van een gaswolk en daarmee op de locatie waar de

⁹ Omdat er geen goede Nederlandse vertaling voor dit woord bestaat, wordt in dit rapport deze term aangehouden.

gaswolk kan exploderen. Deze aspecten pleiten ervoor om een barrière niet dicht bij de explosie te plaatsen, maar voor het te beschermen gebouw (HySafe, 2006).

2.3.5 Dimensies barrière

Een drukgolf dijt bolvormig uit en gaat naar de gebieden toe waar de druk laag is. Een barrière verstoort de weg van de drukgolf en de dimensies van een barrière spelen daarom een belangrijke rol in het beschermen van een gebouw tegen de overdruk van een explosie. Deze paragraaf beschrijft de invloed van de hoogte, de lengte en de breedte van een barrière op de effectiviteit ervan.

Hoogte

- > Hoe hoger de barrière, hoe groter de schaduwzone achter de barrière (HySafe, 2006). De literatuur is niet eenduidig over de lengte van de schaduwzone; Dusenberry geeft aan dat die lengte in het algemeen niet meer dan tien keer de hoogte van de barrière bedraagt (zie paragraaf 2.3.2). Anderen beschrijven situaties waarin een factor 2 à 3 (Groethe, 2007), een factor 4 (De Jager, 2024) of een factor 8 (Isaac et al, 2023) wordt aangehouden.
- > Dusenberry geeft met het oog op terrorismebestrijding een vuistregel over hoe hoog een barrière zou moeten zijn. De vuistregel is gebaseerd op detonaties van explosieven en luidt:

$$\text{hoogte barrière} = \text{gewicht TNT}^{1/3} \times \text{constante} \quad [2]$$

De hoogte is in foot (ft) en het gewicht van TNT is in pounds (lb). De constante ligt tussen 0,8 – 1,3.¹⁰

Voorbeeld:

100 kg TNT komt overeen met 220 lb TNT. De hoogte van de barrière moet dan 4,8 – 7,8 foot zijn. Dat is 1,5 - 2,4 m.

- > Dusenberry geeft ook aan dat de afstand van de explosie tot de barrière kleiner of gelijk moet zijn aan de hoogte van de barrière (1 H) en dat het plaatsen van een barrière niet zinvol is, als de afstand van de explosie tot het te beschermen gebouw groter is dan 20 H (Dusenberry, 2010).

Lengte

- > Bij een explosie die slechts mogelijk is op één bepaalde locatie (puntbron) moet een barrière lengte hebben om effectief te kunnen zijn. Het langer maken van een barrière verbetert de effectiviteit, maar als de lengte van de barrière groter is dan zes keer haar hoogte, is de maximale effectiviteit over het algemeen bereikt en voegt het langer maken van de barrière niets meer toe aan de effectiviteit (Vyazmina et al, 2015). Voor een barrière van 2 meter hoog, is een lengte van 12 m zinvol.
- > Nozu en Groethe noemen een lengte van 10 m (Nozu et al, 2005; Groethe et al, 2007), terwijl modelberekeningen door Zhou laten zien dat de effectiviteit van een barrière niet meer toeneemt als deze langer is dan 40 m (Zhou en Hao, 2008).

¹⁰ Dusenberry geeft geen informatie over de constante en welke waarde aangehouden kan worden.

Breedte

- > Over de breedte (dikte) van een barrière is weinig geschreven. De breedte van een barrière is gerelateerd aan de hoogte van de barrière vanwege het kunnen dragen van de krachten van een mogelijke explosie en om niet te falen. In modelberekeningen wordt vaak een breedte van 25 – 30 cm aangehouden bij een hoogte van 2 à 3 m. Zhou geeft ook aan dat het weinig zinvol is om een barrières breder dan 30 cm te maken (Zhou en Hao, 2008). Toch lijken bredere barrières er wel te zijn, omdat volgens Hinman een bakstenen muur van 46 cm door zijn gewicht bestand is tegen een overdruk van 0,7 bar (Hinman, 2017). Daarnaast zijn aarden wallen vaak meters dik.
- > Een Koreaanse norm voor waterstoftankstations geeft aan dat een barrière die de impact van een gasexplosie moet weerstaan, een breedte moet hebben van minimaal 15 cm als ze gemaakt is van betonblokken, terwijl dat voor gewapend beton 12 cm is (KGS, 2022).

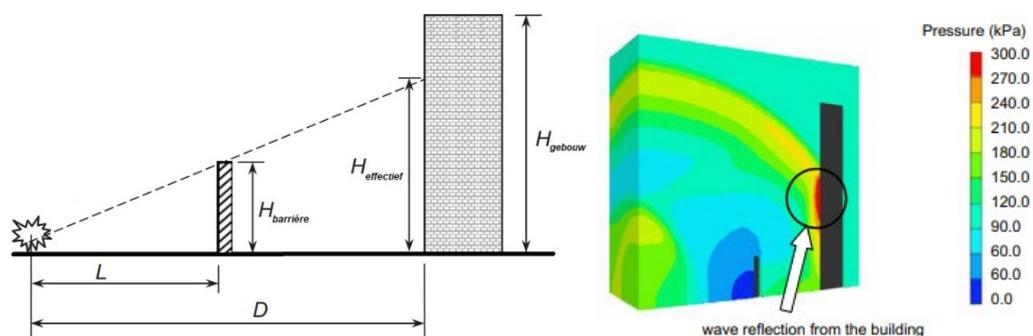
Naast elkaar gelegen gebouwen kunnen fungeren als barrière om achterliggende gebouwen te beschermen tegen de drukgolf van een explosie. Omdat een drukgolf de weg van de minste weerstand kiest, zal ze zich bewegen naar en bundelen in de ruimte tussen de gebouwen. De beschermende werking van de naast elkaar gelegen gebouwen kan teniet worden gedaan door de trechterende – en daarmee drukverhogende – werking van de ruimte tussen deze gebouwen.

2.3.6 Vorm barrière

Fysieke barrières zijn er in vele vormen en maten. Wat de beste vorm is, wordt niet duidelijk uit de literatuur: waar de een de voorkeur geeft aan een parallellepipedum (Sochet et al, 2017), geeft de ander aan dat een rechtop staande muur de beste resultaten geeft (Sha, 2012; Dusenberry, 2010). Het effect van schuine of hellende barrières is veel lager (Dusenberry, 2010).

2.3.7 Hoogte te beschermen object

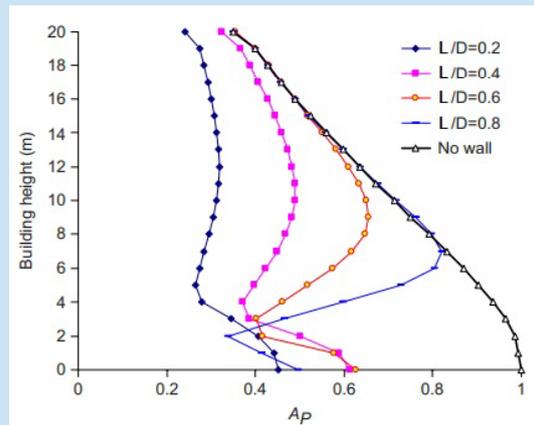
In Figuur 2.1 (links) is L de afstand tussen de explosie en de barrière en D de afstand tussen de explosie en het te beschermen gebouw. Idealiter zijn de hoogte van een barrière en de onderlinge afstanden L en D dusdanig dat het gebouw achter de barrière volledig beschermd wordt tegen de overdrukeffecten van de explosie.



Figuur 2.1 Links: de gebouwhoogte ($H_{\text{effectief}}$) tot waar een barrière effectief kan zijn. Rechts: reflectie van de drukgolf op een gebouw doordat de barrière te laag is. Bron: (Zhou en Hao, 2008)

Als de barrière te laag is of te ver van het te beschermen gebouw staat, kan de drukgolf een hoger gelegen deel van het gebouw treffen. Dit is te zien in Figuur 2.1 (rechts). Door reflectie is de overdruk op het gebouw groter dan de invallende overdruk (zie paragraaf 1.3.1).

De overdruk op diverse hoogten van een gebouw verandert wanneer de verhouding L/D verandert. Figuur 2.2 laat dit zien voor een gebouw van 20 m hoog dat op 20 m afstand van de explosielocatie staat. Een barrière van 2,5 m hoogte staat tussen de explosie en het gebouw. A_P is de gereflecteerde overdruk op het gebouw gedeeld door de druk op het gebouw op grondhoogte zonder een barrière. De explosie wordt veroorzaakt door 1000 kg TNT die op de grond geplaatst is. Als de barrière op 4 m van de explosie staat ($L/D = 0,2$), is A_P het kleinst en de drukafname op grote delen van het gebouw het grootst. Als de barrière verder van de explosie af komt te staan (L/D wordt groter), is de drukafname op het gebouw door de aanwezigheid van de barrière minder groot en neemt A_P toe. Bovendien worden hoger gelegen delen van het gebouw dan niet meer beschermd door de barrière; het maakt op die hoogte niet meer uit of er een barrière staat.



Figuur 2.2 De invloed van de barrièrelocatie op de overdruk op diverse hoogtes van een gebouw. Bron: (Zhou en Hao, 2008)

2.4 Andere overwegingen

Wanneer een barrière als omgevingsmaatregel wordt overwogen om mensen in gebouwen te beschermen tegen overdrukeffecten van een explosie, is een aantal overwegingen relevant die soms weinig van doen hebben met de effectiviteit van een barrière. Deze overwegingen zijn mogelijk wel bepalend voor het al dan niet plaatsen van een barrière. Deze paragraaf beschrijft een aantal van die overwegingen.

2.4.1 Beschermingsdoel

Een gebouw kan op diverse manieren beschermd worden tegen de gevolgen van een explosie. In paragraaf 1.2 is aangegeven dat het doel van die bescherming vaak is om instorten van een deel van het gebouw of van het gehele gebouw te voorkomen, zodat de mensen in het gebouw geen letsels oplopen en het gebouw kan functioneren waarvoor het bedoeld is. De mate waarin schade aan gebouwen en letsels bij mensen geaccepteerd wordt, heeft grote invloed op het type en de locatie van een barrière (Parisi et al., 2016). Als het gewond raken van mensen door brokstukken, hetzij van de barrière, hetzij van het te beschermen gebouw, niet wordt geaccepteerd, zullen de eisen die aan een barrière worden gesteld anders zijn dan wanneer het gewond raken door brokstukken wel wordt geaccepteerd. Het beschermingsdoel is dus een belangrijke factor, want hoe hoger het beschermingsdoel, hoe effectiever een barrière moet zijn.

2.4.2 Kosten

Een barrière is een omgevingsmaatregel die ontworpen moet worden gegeven de locatie-specifieke omstandigheden. Dat maakt dat in generieke zin moeilijk iets te zeggen valt over de kosten van een barrière, terwijl kosten wel een grote rol spelen bij het maken van de keuze om wel of geen barrière te plaatsen.

In de literatuur is alleen in kwalitatieve zin informatie over de kosten van een barrière gevonden.¹¹ Vooraf moet in ieder geval duidelijk zijn of het acceptabel is dat een barrière instort of permanent verbuigt door een explosie. Bij een relatief goedkope barrière kan dat acceptabel zijn, maar bij een kostbare barrière niet. Ook kan het acceptabel zijn dat de barrière beschadigd raakt als de kans op een explosie klein wordt geacht (HySafe, 2006).

2.4.3 Welstand

De term 'welstand' heeft betrekking op de mate waarin een bouwwerk esthetisch gezien past in de omgeving waarin het staat. Het is sociaal geaccepteerd dat een grote en lange barrière als een geluidsscherm dicht langs een transportroute staat. Daar staat tegenover dat het ongewenst kan zijn om een stenen of betonnen muur dicht op een bouwwerk te plaatsen, omdat zo'n muur 'niet positief bijdraagt aan de kwaliteit van de openbare ruimte' (Welstand-nota, 2019). Naast welstandsnormen kan een barrière ook ongewenst zijn, omdat het uitzicht vanuit het bouwwerk fors wordt belemmerd. In een stedelijke omgeving moet een barrière daarom idealiter onopvallend zijn en opgaan in de omgeving (Isaac et al, 2023).

2.4.4 Gevoel van veiligheid

Waar het plaatsen van een barrière in oorlogsgebieden een gevoel van veiligheid geeft, kan dezelfde barrière in veilige gebieden juist een gevoel van onveiligheid creëren. De gedachte zal zijn dat het risico van het vrijkomen van gevaarlijke stoffen kennelijk groot genoeg wordt gevonden om mensen in gebouwen te moeten beschermen.

2.4.5 Bereikbaarheid en bestrijdbaarheid

Door het plaatsen van een barrière kunnen de bereikbaarheid en bestrijdbaarheid van een incident worden verslechterd, doordat de toegang voor hulpverleners versperd wordt en zij niet dicht genoeg bij het incident kunnen komen.

2.5 Samenvatting

- > Barrières kunnen de overdruk van een explosie verlagen en daarmee een achterliggend gebouw beschermen. Er zijn veel factoren die de effectiviteit beïnvloeden, waardoor het ontwerpen van een barrière per situatie onderzocht moet worden.
- > De drukafname door een barrière is vlak erachter het grootst. De effectiviteit van een barrière is daarom het grootst direct achter de barrière.
- > De effectiviteit van een barrière neemt af als de afstand tot het te beschermen gebouw groter wordt. De afstand van de barrière tot het te beschermen gebouw is bij voorkeur kleiner of gelijk aan twee tot drie keer de hoogte van de barrière.

¹¹ Informatie over bouwkosten is wel tegen betaling te verkrijgen via de [website](#) van [bouwkosten.nl](#).

3 Effectiviteit van barrières

3.1 Inleiding

Hoofdstuk 2 heeft laten zien dat er veel factoren zijn die de overdruk achter een barrière bepalen. Dat maakt het op voorhand lastig om deze overdruk – en daarmee de effectiviteit van een barrière – kwantitatief te bepalen. Dit gegeven wordt verder bemoeilijkt door onderstaande aspecten:

- > Er zijn softwaremodellen beschikbaar waarmee de overdruk achter een barrière berekend kan worden. Deze software is echter alleen beschikbaar is voor Amerikaanse bedrijven en organisaties. Voorbeelden van softwaremodellen zijn CONWEB¹², ATBlast, HAZL en WINGARD.
- > Veel formules waarmee de overdruk achter een barrière berekend kan worden, zijn gebaseerd op explosieven, met name trinitrotolueen (TNT). TNT geeft bij ontsteking een detonatie, terwijl het ontsteken van een brandbare gaswolk eerder zal leiden tot een deflagratie dan tot een detonatie. Hoewel met behulp van die formules eenvoudig en snel antwoorden gegeven kunnen worden, is het de vraag hoe passend ze zijn voor het bepalen van de effectiviteit van een barrière.
- > Daar komt bij dat de berekeningsmethodes complex zijn. Er zijn wel eenvoudige en empirisch bepaalde formules beschikbaar, maar daarvan wordt aangegeven dat die een te eenvoudige voorstelling van zaken geven. Iedere situatie is uniek en er zijn CFD-berekeningen nodig¹³ om de effectiviteit van een barrière op een specifieke locatie te bepalen (Badshah et al, 2017).

Om toch gevoel te krijgen voor de effectiviteit van een barrière, wordt in paragraaf 3.2 een voorbeeld gegeven dat afkomstig is uit de literatuur. In paragraaf 3.3 wordt een ander voorbeeld uitgewerkt met behulp van een vereenvoudigde formule die is afgeleid van de resultaten van simulatieberekeningen.

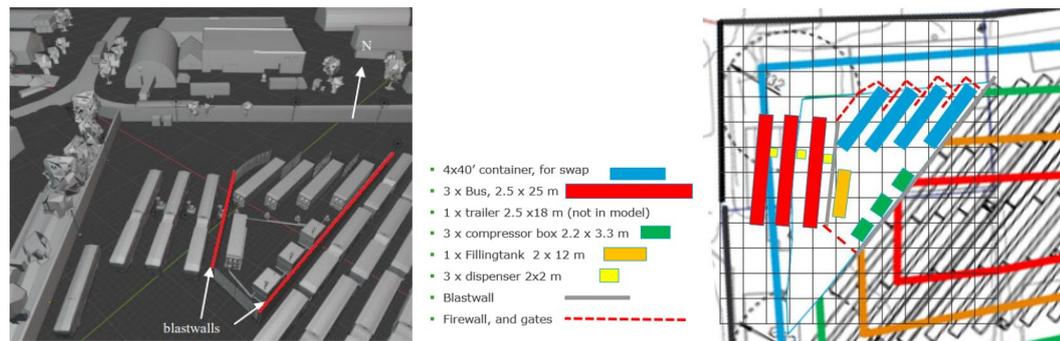
3.2 Blastwalls bij een waterstoftankstation

Voor het opschalen van een waterstoftankstation voor bussen in Oslo heeft DNV uitgebreid onderzoek gedaan naar de plaatsing en de effectiviteit van twee explosiewerende muren ('blastwalls') die schuin tegenover elkaar geplaatst zijn (DNV, 2021; Huser et al., 2021). Zie Figuur 3.1. De ligging van de muren is dusdanig, dat ze richting geven aan zowel een vrijkomende gaswolk als aan een mogelijke explosie van die gaswolk. De muren verhinderen dat een brandbare gaswolk een gebied in kan drijven waar installatiedelen dicht op elkaar staan die ter plaatse voor 'opsluiting' van de gaswolk zorgen. De muren voorkomen dat bij een mogelijke ontsteking van de gaswolk onnodig veel overdruk wordt gecreëerd. Er worden geen details gegeven over de explosiewerende muren, alleen dat ze een hoogte hebben van 4 meter en daarmee hoger zijn dan een bus.

¹² CONWEB is gebaseerd op empirisch afgeleide formules die beschreven worden in TM 5-855-1 'Design and analysis of hardened structures to conventional weapons effects' (US Army, 1986).

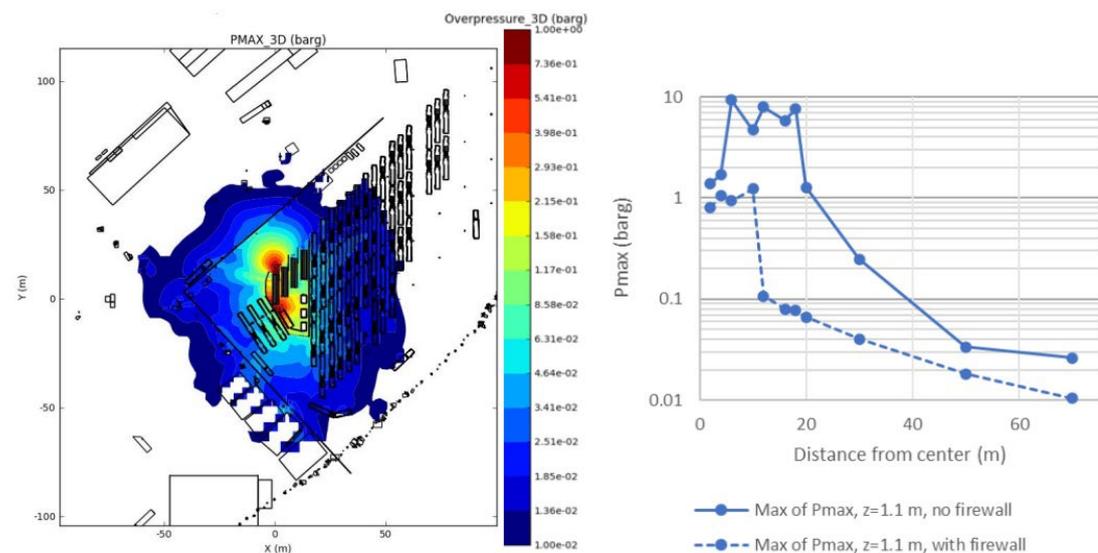
¹³ CFD = Computational Fluid Dynamics.

Ook worden er geen details gegeven over de locatie van de explosie. De waterstofsyste­men op het terrein hebben een druk van 500 bar en bevinden zich in containers.



Figuur 3.1 Layout (links) en schematische weergave (rechts) van het waterstoffank­station in Oslo. Bron: (DNV, 2021)

Eerst zijn simulaties met CFD gedaan om de omvang van een mogelijke waterstof­wolk te bepalen. Deze omvang varieerde tussen 10 m^3 en 160 m^3 met steeds een waterstof­concentratie van 30 vol.%, afhankelijk van het scenario en de uitstroomcondities.¹⁴ Daarna zijn deze resultaten gebruikt om met behulp van het CFD-programma FLACS de overdruk op en achter de explosiewerende muren te berekenen.

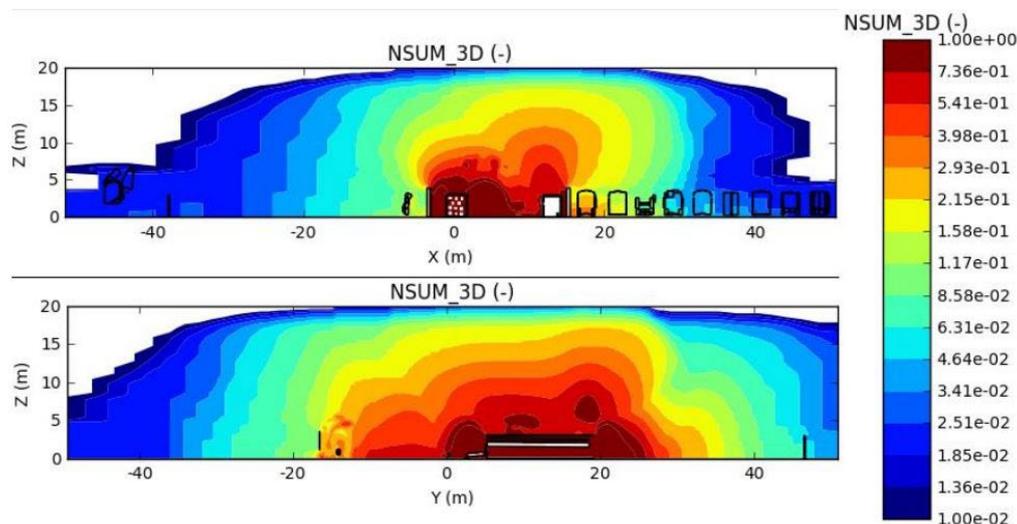


Figuur 3.2 Links: Overdrukken op een hoogte van 1,1 m van een explosie van een waterstofwolk van 60 m^3 en 30 vol.%. Rechts: de maximale overdruk als functie van de afstand tot het centrum de explosie. De afstand van de blastwalls tot de explosie bedraagt ongeveer 10 m. Bron: (DNV, 2021)

Een explosie van een waterstofwolk kan op diverse locaties op het waterstoffank­station plaatsvinden. Hoe groter de waterstofwolk, hoe groter de overdruk zal zijn. Figuur 3.2 laat de overdrukken zien van een explosie van een waterstofwolk van 60 m^3 waarbij explosieweren­de muren op ongeveer 10 m afstand van de explosie staan.

¹⁴ Een gaswolk heeft een complexe vorm en een complexe waterstofverdeling. In simulaties wordt een gaswolk daarom vaak vereenvoudigd door er een rechthoekige wolk ('Q9-wolk') van te maken met een homogeen verdeelde waterstof­concentratie van 30 vol.%. Men neemt aan dat een Q9-gaswolk een vergelijkbare overdruk geeft als de oorspronkelijke gaswolk (Van der Schoor et al., 2013). Gemiddeld genomen is de Q9-wolk zestien keer kleiner dan de eigenlijke waterstofwolk (Huser et al., 2021).

De hoogste overdrukken worden in deze situatie gevonden bij de westelijk gelegen explosiewerende muur en bij de noordelijk gelegen brandwerende muur (de donkerrode gebieden in Figuur 3.2 links). In andere simulaties werden pieken in overdruk gevonden in de containers zelf en tussen de containers. Direct achter de explosiewerende muren was de overdruk een factor 10 lager, terwijl deze 50 m achter de muren nog een factor 2 was.



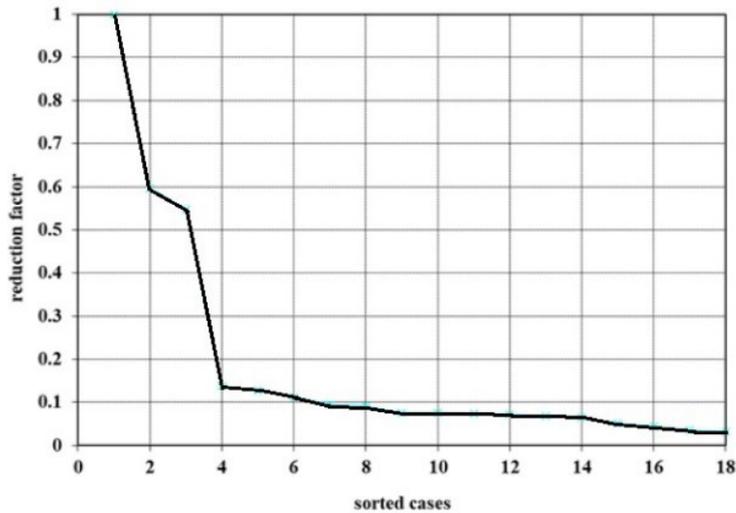
Figuur 3.3 Zijaanzichten van de overdruk (bar) als functie van de afstand (m). Boven: zijaanzicht waarbij het snijvlak door beide explosiewerende muren gaat. Onder: zijaanzicht waarbij het snijvlak niet door de explosiewerende muren gaat. De gegeven overdrukken zijn het gemiddelde van alle maximale overdrukken van alle berekeningen. Bron: (DNV, 2021)

Figuur 3.3 laat het zijaanzicht zien voor de situatie dat de explosiewerende muren wel aanwezig zijn (boven) en voor de situatie dat ze niet aanwezig zijn (onder). Door de aanwezigheid van de muren blijven de hoogste overdrukken beperkt tot het gebied tussen de muren. De explosiewerende muren voorkomen echter niet dat op hoogte nog steeds forse overdrukken worden gehaald.

Voor het instorten van gebouwen wordt vaak een overdruk van 0,3 bar aangehouden (RIVM, 2021).¹⁵ In het gegeven voorbeeld wordt deze overdruk gevonden op een afstand van 30 m van de explosie. Door het plaatsen van een explosiewerende muur, wordt deze afstand teruggebracht tot circa 10 m.

Het artikel geeft geen verdere informatie over de doorgerekende situaties, alleen dat de overdruk op de explosiewerende muren meestal kleiner was dan 1 bar. Voor achttien situaties waarbij de gaswolk een omvang had tussen 40 en 60 m³, is de reductiefactor R_f van de explosiewerende muren bepaald, zie Figuur 3.4. De reductiefactor varieerde van 1 tot 0,05, wat wil zeggen dat de overdruk van de exploderende gaswolk niet ($R_f = 1$) c.q. tot een factor 20 werd gereduceerd ($R_f = 0,05$). Deze resultaten zijn gebruikt om acceptatiecriteria voor het waterstoftankstation af te leiden en om de lay-out van het tankstation te bepalen.

¹⁵ Opgemerkt moet worden dat wanneer in de literatuur schade aan gebouwen gekoppeld wordt aan een specifieke waarde van de overdruk, hiermee de ongerefecteerde overdruk wordt bedoeld. Om de werkelijke druk op een gebouw te bepalen, moet een constructeur rekening houden met de reflectiefactor (De Jager, 2024).



Figuur 3.4 Reductiefactor gebaseerd op 18 van de explosiesimulaties van waterstofwolken van 40 m³ tot 60 m³. Bron: (DNV, 2021)

3.3 Voorbeeld aan de hand van een vereenvoudigde formule

De formule die in de voorbeeldberekening in deze paragraaf wordt gebruikt om de effectiviteit van een barrière te berekenen (Zhou en Hao, 2008), is:

$$F_{P_{max}} = -0,1359 + \left(0,3272 + 0,1995 \times \log\left(\frac{H}{D}\right)\right) \times \log Z - 0,5626 \times \log\left(\frac{H}{D}\right) + 0,4666\left(\frac{L}{D}\right) \quad [3]$$

$F_{P_{max}}$ = maximale effectiviteit van de barrière op gevel van het te beschermen gebouw (-)

H = hoogte van de barrière (m)

L = afstand van de explosie tot de barrière (m)

D = afstand van de explosie tot het te beschermen gebouw (m)

Z = geschaalde afstand = $L/\sqrt[3]{W}$ [4]

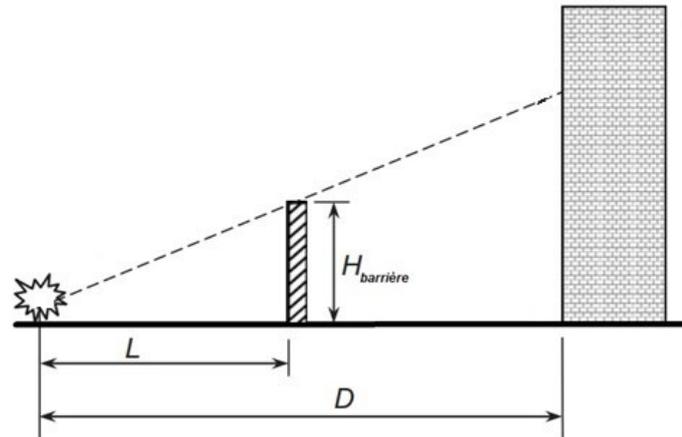
W = massa TNT (kg)

Om de druk op het te beschermen gebouw te bepalen, moet $F_{P_{max}}$ vermenigvuldigd worden met de gereflecteerde overdruk op het te beschermen gebouw voor de situatie dat er geen barrière is. Anders gezegd:

$$F_{P_{max}} = \frac{P_{\text{gereflecteerd, met barrière}}}{P_{\text{gereflecteerd, zonder barrière}}} \quad [5]$$

De maximale effectiviteit van een barrière $F_{P_{max}}$ is een waarde tussen 0 en 1. Hoe lager $F_{P_{max}}$, hoe groter de drukvermindering. Een waarde van 0,3 betekent een drukvermindering van 70 % achter een barrière vergeleken met de situatie zonder barrière; een waarde van 0,2 betekent een drukvermindering van 80 %.

Het gebruik van formule [3] is bedoeld om de lezer gevoel te geven voor de effectiviteit van een barrière en om de invloed van parameters te onderzoeken. Uitgangspunten bij het gebruik van de formule zijn dat de barrière intact blijft, dat de barrière heel lang is, dat de effectiviteit constant is over de hoogte van het te beschermen gebouw en dat de explosie recht voor de barrière en het te beschermen gebouw plaatsvindt. Dit zijn meestal geen reële omstandigheden. Ook het gebruik van TNT (dat een detonatie veroorzaakt) om de kracht van de explosie te bepalen, is een bron van onnauwkeurigheid, aangezien gaswolkexplosies over het algemeen deflagraties zijn. Het is aan te bevelen de werkelijke effectiviteit per situatie te bepalen met behulp van simulaties met zoveel mogelijk realistische aannames.



Figuur 3.5 Zijaanzicht van de situatie zoals die in formule [3] wordt gebruikt

Twee factoren zijn van belang bij toepassing van formule [3]. De eerste factor is het gebruik van de geschaalde afstand Z. Dit is een wiskundige factor waarbij afstanden worden gedeeld door de derdemachtswortel van de hoeveelheid TNT. De geschaalde afstand Z wordt gebruikt om de resultaten van een kleine hoeveelheid explosief te vertalen naar de resultaten van een grotere hoeveelheid explosief (Hajek et al, 2016). Men gebruikt in experimenten meestal kleine hoeveelheden explosief, omdat het te gevaarlijk is om te experimenteren met grote hoeveelheden. Formule [4] kan gebruikt worden als de explosie dichtbij is (< 6 m) en gezien kan worden als een puntbron. Een kleine Z geeft een grote explosie aan.

De tweede factor is het gebruik van de TNT-equivalentenmethode om de kracht van een gaswolkexplosie te bepalen. Hierbij wordt het aantal kilogrammen gas dat meedoet in een gaswolkexplosie omgerekend naar een equivalente hoeveelheid TNT die hetzelfde schadebeeld geeft (Chen et al, 2023). De vuistregel is:

$$M_{TNT} = \eta M_{H_2} \frac{Q_{H_2}}{Q_{TNT}} \quad [3]$$

- M_{TNT} = massa TNT (kg)¹⁶
- η = effectiviteit explosie (0,1 voor waterstof)
- M_{H_2} = massa waterstof in de gaswolk (kg)
- Q_{H_2} = verbrandingsenergie waterstofgas = 142 MJ/kg
- Q_{TNT} = verbrandingsenergie TNT = 4,6 MJ/kg

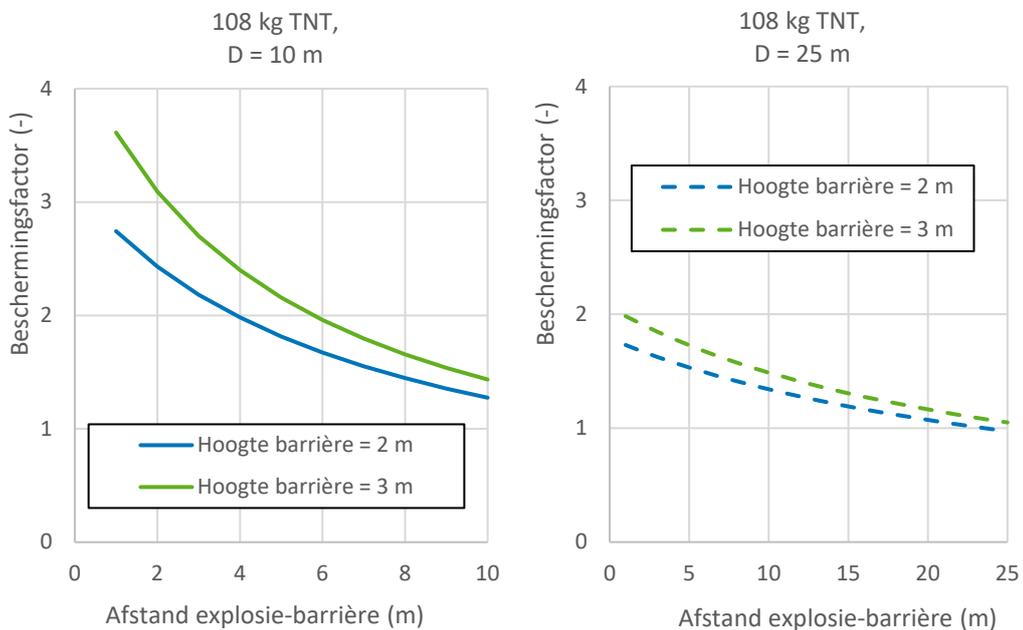
¹⁶ In formule [3] wordt M_{TNT} weergegeven als W.

In een gaswolkexplosie doet maar een deel van het gas mee met de explosie; dit hangt af van de reactiviteit van het gas en de mate waarin de gaswolk besloten is. Voor koolwaterstoffen wordt dit aandeel (η) geschat op 1-10 %. Voor de effectiviteit van een waterstofexplosie 10 % aangehouden (Chen et al, 2023).

In onderstaand voorbeeld wordt ervan uitgegaan dat er 35 kg waterstof uit een tube vrijkomt (RIVM, 2020). Ook wordt aangenomen dat alle waterstof zich in de wolk bevindt vlak boven de grond. Energetisch gezien komt 35 kg waterstof overeen met 108 kg TNT. Bij het uitwerken van formule [3] zijn de volgende parameters gebruikt: de hoogte van de barrière is 2 m of 3 m en de afstand van de explosie tot het te beschermen gebouw (D in formule [3]) is 10 m of 25 m.

Op pagina 25 is aangegeven dat de maximale effectiviteit van een barrière $F_{P_{max}}$ een waarde is tussen 0 en 1. Hoe lager de waarde van $F_{P_{max}}$, hoe hoger de effectiviteit van een barrière. Dit voelt lastig aan en daarom is gekozen om in deze paragraaf te werken met de reciproke waarde van $F_{P_{max}}$ ($1/F_{P_{max}}$) en dit getal de beschermingsfactor te noemen. Hoe lager deze factor, hoe lager de effectiviteit van een barrière.

Zonder barrière zou de gereflecteerde overdruk op het te beschermen gebouw op 10 m afstand 9 bar zijn (UN SaferGuard, z.d.). Als de barrière op 1 m afstand van de explosie staat, is de beschermingsfactor 2,7 – 3,4. Dit is af te lezen uit de linker grafiek van Figuur 3.6. De gereflecteerde overdruk op het gebouw wordt daarmee 2,6 – 3,3 bar. Als de barrière op 9 m afstand staat van de explosie (en dus vlak voor het te beschermen gebouw), is de beschermingsfactor nog maar 1,4 – 1,5. De gereflecteerde overdruk op het gebouw is dan 6,0 - 6,4 bar.



Figuur 3.6 De beschermingsfactor van een barrière als functie van de afstand van de barrière tot de explosie (L in formule [3])

Als een gebouw op grotere afstand van de explosie staat, zal de gereflecteerde overdruk op de gevel van het gebouw ook lager zijn. Voor een gebouw dat op 25 m afstand van de explosie staat, is de gereflecteerde overdruk op de gevel 0,9 bar als er geen barrière is (UN SaferGuard, z.d.). Als de barrière op 1 m afstand van de explosie staat, is de beschermingsfactor 1,7 – 2,0, zie Figuur 3.6 rechts. De gereflecteerde overdruk op het gebouw is dan ongeveer 0,5 bar. Als de barrière vlak voor het te beschermen gebouw staat ($L = 24$ m), biedt ze nauwelijks nog bescherming, omdat de beschermingsfactor bijna 1 is geworden (1,07 – 1,09). De gereflecteerde overdruk op het gebouw is in die situatie zo'n 0,8 bar.

Hoewel de hoogste beschermingsfactor wordt bereikt als de barrière dicht bij de explosielocatie wordt geplaatst, is het plaatsen van een barrière in beide voorbeelden niet zinvol, omdat de verlaging van de overdruk onvoldoende is om het gebouw te beschermen. De overdrukken zijn veel groter dan 0,3 bar, de grens die in Nederlandse risico- en effectberekeningen wordt gebruikt om het instorten van gebouwen aan te geven. Mogelijk dat met aanvullende maatregelen het gebouw wel voldoende beschermd kan worden.

3.4 Samenvatting

Om in kwantitatieve zin gevoel te krijgen voor de effectiviteit van een barrière, is in dit hoofdstuk een voorbeeld beschreven uit de literatuur en is een voorbeeld uitgewerkt met behulp van wiskundige formules.

Het eerste voorbeeld beschrijft de effectiviteit van twee explosiemuren bij een waterstoftankstation aan de hand van CFD-computersimulaties. Men heeft daartoe waterstofwolken van verschillende omvang en op diverse afstanden tot de explosiemuren laten ontsteken en de overdrukken op het tankstation berekend. De explosiemuren verlaagden de overdruk van de explosie direct erachter tot een factor 20. De resultaten zijn gebruikt om criteria voor en de lay-out van het waterstoftankstation te bepalen.

In het tweede voorbeeld is met behulp van een vereenvoudigde wiskundige formule een fictieve situatie doorgerekend waarbij een lekkage van een waterstoftube leidt tot een gaswolkexplosie. De uitkomsten van de berekeningen geven de drukvermindering op het te beschermen gebouw aan (en niet de drukvermindering direct achter de barrière). De twee voorbeeldberekeningen laten zien dat een barrière de gereflecteerde overdruk op het te beschermen gebouw tot een factor 3,4 verlaagt (en op zich dus effectief is), maar ook dat deze verlaging onvoldoende is om het gebouw te beschermen. Mogelijk dat met aanvullende maatregelen het gebouw wel voldoende beschermd kan worden.

Referenties

- > Antea Group (2021). [Beglazing in explosieaandachtsgebieden](#), versie 1.1.
- > Badshah, E. (2017). [Review of Blast Loading Models, Masonry Response and Mitigation](#). *Shock and Vibration* 2017, 1-15, article ID 6708341.
- > Bakke, J.R. et al (2010). [A study on the effect of trees on gas explosions](#). *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 23, 878 – 884.
- > Chapman, T.C. et al. (1995). [Reflected blast wave resultants behind cantilever walls: a new prediction technique](#). *International Journal on Impact Engineering* 16, 397 - 403.
- > Chen. D. et al (2023). [Assessment of modeling methods for predicting load resulting from hydrogen-air detonation](#). *Process safety and Environmental Protection* 180, 752 – 765.
- > DNV (2021). [Refueling Station for Hydrogen Buses – Concept Risk Analysis](#). Report No.: 2021-0184, Rev. 0.
- > Dusenberry, D.O (2010). Handbook for Blast-Resistant Design of Buildings. John Wiley & Sons.
- > Federal Emergency Management Agency (FEMA, 2011). [Reference Manual to Mitigate Potential Terrorist Attacks Against Buildings](#). FEMA-426, 2nd ed.
- > Hajek, R. et al. (2016). [Influence of barrier material and barrier shape on blast wave mitigation](#). *Construction and Building Materials* 120, 54 - 64.
- > Hinman, E. (2017). [Blast Safety Of The Building Envelope](#). Geraadpleegd op 18 juli 2023.
- > Huser, A. et al. (2021). [Quantitative Risk Analysis of Scaled-up Hydrogen Facilities](#). International Conference on Hydrogen Safety (ICHS). Paper ID 27. Edinburgh.
- > Hussein, A.T. (2020). [Blast protection wall systems: Literature review](#). *WIT Transactions on The Built Environment* 198, 93 – 109.
- > HySafe (2006). Chapter 5 of the Biennial report on hydrogen safety: [Hydrogen safety barriers and safety measures](#). Versie 1.0
- > Isaac, O.S. et al. (2023). [Blast wave interaction with structures – An overview](#). *International Journal of Protective Structures* 14(4), 584 - 630
- > Jager, M. de (2024). Persoonlijke communicatie via Teams, d.d. 11 januari 2024.
- > Kim, S. et al. (2023). [Behavior of Barrier Wall under Hydrogen Storage Tank Explosion with Simulation and TNT Equivalent Weight Method](#). *Applied Science* 12, 3744.
- > Korean Gas Safety (2022). [Code for Facilities, Technology and Inspection for Vehicles Refueling by Type of Compressed Hydrogen Delivery](#) (KGS FP217 2022).
- > National Masonry Concrete Association (NMCA, 2022). [Design of concrete masonry walls for blast loading](#). TEK 14-21A.
- > Nederlands Instituut Publieke Veiligheid (NIPV, 2024). <https://nipv.nl/wp-content/uploads/2024/04/20240404-NIPV-De-effectiviteit-van-een-fysieke-barriere-in-een-explosieaandachtsgebied.pdf>
- > Nederlandse Normalisatie Instituut (NEN, 2019). [NEN-EN 1991-1-1+C1+C11 \(nl\)](#) Eurocode 1: Belastingen op constructies - Deel 1-1: Algemene belastingen – Volumieke gewichten, eigen gewicht en gebruiksbelastingen voor gebouwen.
- > Pai, A. et al. (2022). [Development of materials and structures for shielding applications against Blast and Ballistic impact: A Detailed Review](#). *Thin-Walled Structures* 179, 109664.
- > Parisi, F. et al (2016). [Blast resistance of tuff stone masonry walls](#). *Engineering Structures* 113, 233 – 244.

- > Publicatiereeks Gevaarlijke Stoffen (PGS, 2003). [Deel 2B: Effecten van explosie op constructies](#).
- > Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM, z.d.). [Afstanden en gebieden](#). Geraadpleegd op 18 juli 2023.
- > Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM, 2021). [Handleiding risicoberekeningen Bevi](#), versie 4.3.
- > Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM, 2022). [Rekenmethode om de risico's te berekenen van het vervoer van samengeperste gassen en tot vloeistof gekoelde gassen](#). RIVM-briefrapport 2022-0116.
- > Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM, 2024). [Effecten van waterstof-explosies. RIVM-briefrapport 2024-0032](#).
- > Schoor van der, F. et al (2013). [Risk analysis of LPG \(liquefied petroleum gas\) vehicles in enclosed car parks](#). *Fire Safety Journal* 57, 58-68
- > Shirbhate, P.A. et al. (2021). [A Critical Review of Blast Wave Parameters and Approaches for Blast Load Mitigation](#). *Archives of Computational Methods in Engineering* 28, 1713–1730.
- > Smilowitz, R. (2016). [Designing Buildings To Resist Explosive Threats](#). Geraadpleegd op 18 juli 2023.
- > UN SaferGuard. [Kingery-Bulmash Blast Parameter Calculator](#). Geraadpleegd op 23 november 2023.
- > Vyazmina, E. et al. (2015). [CFD design of protective walls against the effects of vapor cloud fast deflagration of hydrogen](#). *Process Safety Progress* 37, 56-66.
- > Warnstedt, P. et al (2020). [Innovative protection of urban areas – Experimental research on the blast mitigating potential of hedges](#). *Landscape and Urban Planning* 202, 103876.
- > Watch, D. et al. (2017). [Retrofitting Existing Buildings To Resist Explosive Threats](#). Geraadpleegd op 18 juli 2023.
- > Wei, X. et al. (2010). [Model validation and parametric study on the blast response of unreinforced brick masonry walls](#). *International Journal of Impact Engineering* 37, 1150-1159.
- > Welstandsnota.nl (2019). [Algemene criteria voor welstand](#) van de gemeente Rheden. Geraadpleegd op 31 oktober 2023.
- > Wu, G. et al. (2022). [Blast response of clay brick masonry unit walls unreinforced and reinforced with polyurea elastomer](#). *Defence Technology* 4, 643-662.
- > Zhou, X.Q. en Hao, H. (2008). [Prediction of airblast loads on structures behind a protective barrier](#). *International Journal of Impact Engineering* 35, 363 – 375.
- > Zhou, Y. et al. (2023). [Experimental investigation on the effect of a barrier wall on unconfined hydrogen explosion](#). *International Journal on Hydrogen Safety* 48, 33763 – 33773.