

Maatregelen ter bescherming van de mens bij explosies vanuit lijnbronnen met gevaarlijke stoffen

Inhoudelijke input voor de Maatregelencatalogus
bij het Handboek Omgevingsveiligheid



Daphne Heemsbergen

Studentnummer: 424571

Saxion hogeschool Deventer
Academie Bestuur, Recht en Ruimte
Integrale Veiligheidskunde

Praktijkbegeleider: Arjan Boxman
Schoolcoach: Volker Stillig
Tweede lezer: Wilbert Rodenhuis

Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu
Centrum Veiligheid (Model en Scenario Onderzoek)

Versie 1

27 mei 2019, Bilthoven

Voorwoord

Voor u ligt de scriptie 'Maatregelen ter bescherming van de mens bij explosies vanuit lijnbronnen met gevaarlijke stoffen'. Het onderzoek is uitgevoerd in opdracht van het Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM).

Deze scriptie is geschreven in het kader van mijn afstuderen voor de HBO bachelor opleiding Integrale Veiligheidskunde aan de Saxion Hogeschool te Deventer.

In overleg met praktijkcoach Arjan Boxman zijn de probleemstelling en onderzoeksvragen van dit onderzoek geformuleerd. Voor de data-verzameling is literatuuronderzoek gedaan en zijn er diverse mensen uit het werkveld geïnterviewd. De resultaten van dit onderzoek dienen als inhoudelijke input voor de Maatregelencatalogus Omgevingsveiligheid, die bij het RIVM in ontwikkeling is.

Graag wil ik mijn praktijkcoach Arjan Boxman bedanken voor zijn begeleiding en vertrouwen tijdens mijn afstudeerperiode. Daarnaast wil ik ook mijn schoolcoach Volker Stillig en tweede lezer Wilbert Rodenhuis bedanken voor hun aanvullende begeleiding bij het afstudeertraject. Ook wil ik mijn medestagiaires Iris van Malsen en Lars Helmond en alle betrokken collega's bij het RIVM bedanken voor hun steun en samenwerking in de afgelopen weken. Tot slot, wil ik alle mensen die ik heb mogen interviewen hartelijk bedanken voor hun medewerking en aandeel in mijn afstudeerscriptie.

Daphne Heemsbergen

Bilthoven, 27 mei 2019

Samenvatting

In dit onderzoek is er gepoogd antwoord te krijgen op de vraag: *Hoe kan de mens beschermd worden tegen de gevolgen van een explosie vanuit een lijnbron met gevaarlijke stoffen?* De resultaten van het onderzoek dienen als inhoudelijke input voor de Maatregelencatalogus Omgevingsveiligheid, die bij het Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu in ontwikkeling is.

Uit het onderzoek is gebleken wat de gevolgen van verschillende typen explosies zijn voor de mens. Om dit te visualiseren is er een vlinderdasmodel (alleen de rechterkant) gemaakt voor de gevolgen van een explosie met gevaarlijke stoffen, waarin de mogelijke gevolgen van verschillende typen explosies zijn gecombineerd. De gevaren die hieruit naar voren zijn gekomen: de directe impact van de drukgolf op organen, botsen/vallen tegen een object, instorting, vliegvuil en scherfwerking. Voor de gevolgen van een explosiescenario in combinatie met brand en/of het vrijkomen van gevaarlijke stoffen zijn de volgende gevaren naar voren gekomen: vlamcontact, hittestraling, inhalatie, huidcontact en ingestie. Tevens is er een koppeling gemaakt tussen deze gevaren en het type letsel dat het op kan leveren. Of slachtoffers van een explosie komen te overlijden aan het opgelopen letsel, is onder andere afhankelijk van de aard van het letsel en de snelheid en kwaliteit van de geboden medische zorg na het incident.

Ook is uit het onderzoek gebleken dat er maatregelen zijn die mogelijk effectief zijn bij de bescherming van de mens tegen de gevolgen van een explosie. In dit onderzoek is geprobeerd relevante informatie te verzamelen over deze maatregelen. Gebleken is dat er nog te weinig kennis is over de maatregelen om te kunnen kwantificeren hoeveel effect ze hebben bij een specifiek scenario. Het onderzoek heeft zich om deze reden beperkt tot een kwalitatieve omschrijving van de werking van de maatregel. Tevens is in het kader van dit onderzoek gezocht naar factoren die van invloed zijn op de werking van maatregelen. Daarin is naar voren gekomen dat de tijd die je hebt voorafgaand aan een explosie een grote rol speelt in de keuze van maatregelen bij explosiegevaar. Ook een combinatie van gevaren kan ertoe leiden dat personen onvoldoende beschermd worden door een maatregel, omdat de maatregel wel bescherming biedt voor gevaar A maar niet voor gevaar B. Dit is bijvoorbeeld het geval bij een BLEVE met een vuurbal, waarbij hittebestendige ramen bezwijken door de drukgolf die vooraf is gegaan aan de vuurbal en geen bescherming meer bieden tegen de hittestraling. Of bij een aarden wal die wel bescherming kan bieden tegen de gevolgen van de drukgolf, maar niet tegen de gevolgen van een vuurbal.

Uit het onderzoek volgen een aantal aanbevelingen in de richting van de opdrachtgever (en derden). Zo dient er in de communicatie rekening gehouden te worden met de mate waarin mensen in het werkveld kennis hebben over explosiescenario's. Het visualiseren van de gevolgen van een explosie zou kunnen helpen om een beter beeld te krijgen van de impact van een explosie. Daarnaast kan het ook bijdragen aan het creëren van draagvlak voor het nemen van maatregelen. Ook kan nagedacht worden over de manier waarop dit thema aandacht krijgt binnen relevante opleidingen. Daarnaast wordt geadviseerd om met de Maatregelencatalogus aan te sluiten op de behoeften van potentiële gebruikers. Zo is tijdens interviews aangegeven dat er behoefte is aan kennis over de effectiviteit van maatregelen en de veiligheidswinst die het oplevert. Andere aanbevelingen die gedaan worden zijn aanvullend onderzoek doen naar onder andere de factoren die van invloed zijn op de effectiviteit van maatregelen en meer onderscheid maken tussen typen explosies. Dit laatste omdat gebleken is dat er belangrijke verschillen zijn tussen typen explosies, die mede kunnen bepalen of een maatregel effectief is.

Inhoudsopgave

Voorwoord	1
Samenvatting.....	2
Inhoudsopgave	3
Leeswijzer.....	5
Figuren- en tabellenlijst	6
1 Inleiding.....	7
1.1 Aanleiding	7
1.1.1 Stelselherziening	7
1.1.2 Modernisering omgevingsveiligheid	7
1.1.3 Vraag naar praktijkvoorbeelden	7
1.2 Rol van het RIVM	8
1.3 Doelstelling.....	8
1.4 Probleemstelling	8
1.5 Onderzoeksvragen	9
1.6 Belanghebbenden	10
1.6.1 De overheid	10
1.6.2 Bedrijven	10
1.6.3 Burgers.....	11
2 Theoretisch kader.....	12
2.1.1 Omgevingsveiligheid	12
2.1.2 Plaatsgebonden risico.....	12
2.1.3 Aandachtsgebieden	12
2.1.4 Explosieaandachtsgebied.....	12
2.1.5 Voorschriftengebied	12
2.2 Explosiegevaar.....	13
2.2.1 Soorten explosies.....	13
2.2.2 Warme en koude BLEVE	14
2.2.3 Mogelijke gevolgen van een explosie.....	14
2.3 Vlinderdasmodel	15
2.4 Lijnbronnen.....	15
2.4.1 Weg-, water- en spoorvervoer gevaarlijke stoffen	15
2.4.2 Buisleidingen.....	15
2.4.3 Verschillen lijn- en puntbronnen	16

3	Juridisch kader	17
3.1	Zorgplicht.....	17
3.2	Afwegingsruimte binnen de kaders	17
3.2.1	Besluit kwaliteit leefomgeving.....	17
3.2.2	Besluit activiteiten leefomgeving.....	19
3.3	Mate van bescherming	19
4	Onderzoeksmethode.....	20
4.1	Onderzoeksmethode per onderzoeksvraag.....	20
4.2	Eenheden, variabelen en waarden.....	22
4.3	Betrouwbaarheid en validiteit.....	24
5	Gevolgen van een explosie voor de mens	25
5.1	Gevolgen van de drukgolf.....	25
5.1.1	Directe gevolgen op de mens.....	26
5.1.2	Scherfwerking en vliegvuil.....	26
5.1.3	Instorting	27
5.1.4	Botsen en vallen	27
5.2	Relatie tussen explosie, brand en het vrijkomen van gevaarlijke stoffen.....	27
5.2.1	Brand en de gevolgen voor de mens	27
5.2.2	Vrijkomen van gevaarlijke stoffen en de gevolgen voor de mens.....	28
5.3	Psychologische gevolgen	29
5.4	Verminderde zelfredzaamheid.....	30
5.5	Conclusie.....	31
6	Bescherming van de mens	32
6.1	Stappen in het bieden van bescherming	32
6.2	Afstand houden tot de risico's	32
6.2.1	Afstand houden in relatie tot de drukgolf.....	33
6.2.2	Afstand houden in relatie tot andere scenario's.....	33
6.2.3	Afstand houden bij lijnbronnen	34
6.3	Bouwwerken en omgeving bieden bescherming	34
6.3.1	Afbuigen en absorberen van de drukgolf.....	34
6.3.2	Maatregelen aan gebouwen.....	35
6.3.3	Tegengaan van scherfwerking en vliegvuil.....	37
6.3.4	Effectiviteit van constructieve maatregelen	37
6.4	Bouwwerken en gebieden zijn snel en veilig te verlaten.....	38
6.4.1	Benodigde tijd versus beschikbare tijd.....	38

6.4.2	Vluchtwegen.....	39
6.5	Optreden van hulpdiensten en passende hulp	39
6.6	Conclusie.....	39
	Conclusie	40
	Discussie.....	42
	Aanbevelingen	44
	Literatuurlijst.....	46
Bijlage 1	Transcripten interviews.....	51
Bijlage 2	Vlinderdasmodel explosiescenario's.....	54
Bijlage 3	Vlinderdasmodel explosiescenario's met barrières	55
Bijlage 4	Factoren.....	56
Bijlage 5	Tabel relatie letsel, vaardigheden en zelfredzaamheid	57

Leeswijzer

In hoofdstuk 1 is de aanleiding en context van het vraagstuk omschreven. Ook zijn de probleemstelling en onderzoeksvragen hier beschreven.

Hoofdstuk 2 vormt een theoretisch kader waarbij ingegaan wordt op een aantal centrale begrippen en principes bij het vraagstuk.

Hoofdstuk 3 vormt het juridisch kader en gaat in op de relevante wetgeving bij het vraagstuk.

In hoofdstuk 4 wordt de onderzoekopzet omschreven met daarbij aandacht voor de betrouwbaarheid en validiteit van het onderzoek.

In hoofdstuk 5 en 6 zijn de gevonden resultaten van het onderzoek gegeven.

Tot slot volgen de conclusie, aanbevelingen en discussie. In de conclusie is antwoord gegeven op de probleemstelling. In de discussie zijn de beperkingen van het onderzoek beschreven. Suggesties voor vervolgonderzoek zijn ondergebracht bij het hoofdstuk 'Aanbevelingen'.

Bijlage 1A t/m 1K bevatten de transcripten van de gehouden interviews. Deze zijn niet openbaar. In de tekst wordt verwezen naar de interviews. Hierbij wordt bij de eerste verwijzing de bronvermelding gegeven. Bij herhaalde verwijzing wordt alleen nog aangegeven in welke bijlage en in welk deel de informatie terug te vinden is (vanaf welke regelaanduiding).

Figuren- en tabellenlijst

Figuur 1	Explosiedriehoek (Kennisbank ATEX, z.d. –b)
Figuur 2	Vlinderdasmodel (De Dianous & Fievez, 2006)
Figuur 3	Punt- en lijnbronnen (Machielsen, 2012)
Figuur 4	Operationalisatie onderzoeksvraag 1
Figuur 5	Operationalisatie onderzoeksvraag 2
Figuur 6	Operationalisatie onderzoeksvraag 3
Figuur 7	Camping Los Alfaques in Spanje (Bendrihem, 1978)
Figuur 8	La Voulte sur Rhône 1993 (Le Dauphiné Libéré, 1993)
Figuur 9	Krater na de explosie Gellingen (SSC BV, 2010)
Figuur 10	De ‘rode driehoek’(IPO & Brabant veiliger, 2009)
Figuur 11	Invloed van een aarden wal op de drukgolf
Figuur 12	Invloed van gebouwworm op de explosiebelasting (Hinman, 2003)
Figuur 13	Verskil tussen ongehard glas (links), gehard glas (midden) en explosiebestendig gelaagd glas met PVB-folie (rechts) (Cormie e.a., 2009; Morris, 2009; Focus Online, 2011)
Figuur 14	Te onderscheiden onderdelen van de benodigde tijd (Trijssenaar e.a., 2013)
Tabel 1	Typen explosies (Lees, 2012)
Tabel 2	Bestuurlijke afwegingsruimte (Besluit Kwaliteit Leefomgeving)
Tabel 3	Methoden ten behoeve van betrouwbaarheid en validiteit

1 Inleiding

In dit hoofdstuk zijn de aanleiding van het vraagstuk en de doelstelling van het onderzoek omschreven. Dit aan de hand van literatuurstudie en juridisch onderzoek. Ook is rekening gehouden met de context van zowel de stage-verlenende instelling als ook van het vraagstuk zelf.

1.1 Aanleiding

De aanleiding van het vraagstuk valt samen met verschillende ontwikkelingen die onderling samenhangen. De directe aanleiding zal uitgelegd worden aan de hand van een bredere context die relevant is voor het vraagstuk.

1.1.1 Stelselherziening

Er vindt een herziening plaats van het stelsel voor omgevingsrecht. Daar zijn twee belangrijke redenen voor. In de eerste plaats was de oude regelgeving niet bestand tegen de huidige en toekomstige ontwikkelingen, zoals duurzaamheid. Ook regionale verschillen kregen onvoldoende aandacht en er werd geen gehoor gegeven aan de behoefte aan maatwerk en vroegtijdige betrokkenheid van belanghebbenden bij de besluitvorming over projecten. In de tweede plaats was de oude regelgeving over omgevingsrecht verdeeld over een grote hoeveelheid wetten. Deze verbrokkeling leidde tot problemen in de coördinatie en afstemming. Ook wisten gebruikers, vanwege de versnipperde regelgeving, vaak niet of ze wel alle regelgeving gevonden hadden die van toepassing was. Met de Omgevingswet worden de wetten gebundeld tot één wet met vier Algemene Maatregelen van Bestuur (AMvB's). De stelselherziening moet leiden tot betere mogelijkheden voor integraal beleid en vereenvoudiging van het omgevingsrecht (Besluit kwaliteit leefomgeving, nota van toelichting §1.1). De beoogde datum voor inwerkingtreding van de Omgevingswet is 1 januari 2021 (Rijksoverheid, z.d.-b).

1.1.2 Modernisering omgevingsveiligheid

De komst van de Omgevingswet biedt kansen om verbeteringen aan te brengen in het omgevingsveiligheidsbeleid. Het nieuwe omgevingsveiligheidsbeleid is gericht op een integrale afweging waarbij veiligheid vooraan in het ontwerpproces verankerd wordt. Daarnaast biedt het meer ruimte voor maatwerk (Mansveld, 2014)¹. Deze ontwikkelingen hebben gevolgen voor de rollen en taken van iedere organisatie die te maken heeft met het werkveld omgevingsveiligheid. Het Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM) ontwikkelt, in opdracht van het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, een handboek omgevingsveiligheid. Dit om alle betrokkenen te ondersteunen bij de implementatie en uitvoering van omgevingsveiligheidsbeleid (RIVM, z.d.-a).

1.1.3 Vraag naar praktijkvoorbeelden

Waar voorheen de focus vooral lag op het beperken van de dichtheid van personen, wordt met het nieuwe beleid gestimuleerd om (omgevings-)maatregelen te nemen. Hierdoor is behoefte ontstaan naar voorbeelden van maatregelen die bescherming kunnen bieden tegen de gevolgen van een brand, explosie en/of een gifwolk. Om deze reden is het RIVM gestart met het opstellen van een Maatregelencatalogus Omgevingsveiligheid die de komende tijd gevuld zal gaan worden met maatregelen. Hiervoor zal kennis over maatregelen verzameld moeten worden.

¹ Kamerbrief Uitvoeringsprogramma Modernisering Omgevingsveiligheid

1.2 Rol van het RIVM

Het Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu schrijft het Handboek omgevingsveiligheid in opdracht van het Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat (IenW). Dit ministerie is verantwoordelijk voor de beleidskeuzes en de inrichting van het omgevingsveiligheidsbeleid (RIVM, z.d.-a).

Het RIVM heeft als rol om als onafhankelijk instituut kennis te leveren. De technische kennis en wetenschappelijke inzichten kunnen worden benut bij beleidsvorming en –uitvoering, bijvoorbeeld ter onderbouwing van beleidsmatige keuzes (RIVM, z.d.-a).

1.3 Doelstelling

Het doel van het onderzoek is om inhoudelijke en relevante input te leveren voor de Maatregelencatalogus Omgevingsveiligheid. Deze maatregelencatalogus heeft als doel dat derden ermee kunnen vaststellen of een maatregel in hun specifieke casus een effectieve bescherming kan bieden. Deze informatie dient onderbouwd te zijn met input uit wetenschappelijke literatuur én met een onderzoek onder beoogde gebruikers van het handboek (veiligheidsregio's, omgevingsdiensten, GHOR/GGD, gemeenten, provincies, et cetera).

1.4 Probleemstelling

De probleemstelling van dit onderzoek luidt:

Hoe kan de mens beschermd worden tegen de gevolgen van een explosie vanuit een lijnbron met gevaarlijke stoffen?

De doelstelling van het RIVM is om een maatregelencatalogus te ontwikkelen met maatregelen tegen een explosie, brand en/of gifwolk. Gezien de tijd die beschikbaar is voor dit onderzoek, is er nu specifiek gekeken naar één van deze drie gevaren. Er is gekozen voor explosiegevaar, omdat dit een gevaar is dat niet erg vaak voorkomt maar wel grote effecten kan hebben als het zich toch voordoet. Daarnaast wordt er in dit onderzoek gekeken naar lijnbronnen, omdat het beschermen van mensen tegen gevaar vanuit een dergelijke bron interessante uitdagingen met zich meebrengt (zie ook paragraaf 2.4.3). Puntbronnen worden dus, mede door de beperkte beschikbare tijd, achterwege gelaten. Toch zullen veel van de inzichten ook bruikbaar zijn voor puntbronnen.

1.5 Onderzoeksvragen

De probleemstelling is onderverdeeld in de volgende drie onderzoeksvragen:

1. Wat zijn de gevolgen van een explosie vanuit een lijnbron met gevaarlijke stoffen voor de mens?
2. Welke beschermende maatregelen zijn er tegen de gevolgen van een explosie vanuit een lijnbron met gevaarlijke stoffen?
3. Welke factoren kunnen invloed hebben op de beschermende werking van de maatregelen?

De probleemstelling is opgedeeld in drie verschillende blokken. Het eerste blok gaat over de denkbare scenario's bij explosiegevaar en over wat de gevolgen in deze scenario's betekenen voor de veiligheid van de mens. Dit blok wordt beantwoord in onderzoeksvraag 1.

Blok 2 gaat verder in op deze gevolgen en gaat over de maatregelen die de gevolgen voor de mens, die naar voren gekomen zijn in blok 1, kunnen tegengaan of mitigeren.

Tot slot gaat blok 3 over factoren die invloed hebben op de beschermende werking van de maatregelen die gevonden zijn in blok 2. Er wordt daarbij gekeken naar wanneer de maatregel wel werkt en wanneer niet (of minder goed) en waardoor dit komt. Dit wordt beantwoord in onderzoeksvraag 3. De uitkomst van deze onderzoeksvraag kan behulpzaam zijn bij het bepalen of een maatregel ook in een lokale situatie zinvol is. Dit sluit goed aan bij de doelstelling die het RIVM met de maatregelencatalogus voor ogen heeft.

De beantwoording van de drie onderzoeksvragen levert een beeld op over hoe de mens beschermd kan worden tegen de gevolgen die een explosie heeft voor de mens en van welke factoren deze bescherming afhankelijk is.

1.6 Belanghebbenden

Allereerst heeft iedereen volgens de Omgevingswet een rol en verantwoordelijkheid bij de zorg voor de kwaliteit van de leefomgeving (art. 1.6 Omgevingswet). Deze ‘zorgplicht’ zal in het juridisch kader nader toegelicht worden. Kort gezegd zijn de overheid, bedrijven en burgers gezamenlijk verantwoordelijk voor een veilige en gezonde leefomgeving.

1.6.1 De overheid

‘De overheid’ is een breed begrip waarbinnen veel verschillende organisaties vallen. Er kan onderscheid gemaakt worden tussen het Rijk, de provincies en de gemeenten. Zij worden allen geconfronteerd met de dilemma’s die de beperkte ruimte in Nederland met zich meebrengt. Enerzijds willen ze de beschikbare ruimte zoveel mogelijk gebruiken voor mooie projecten die het gebied een ‘boost’ kunnen geven, bijvoorbeeld omdat er veel werkgelegenheid mee gecreëerd wordt of omdat het goed is voor de economische groei van Nederland. Anderzijds hebben zij ook de plicht om een veilige leefomgeving te creëren voor de mensen die in het gebied wonen. Zij zullen bij ruimtelijke ontwikkelingen een afweging moeten maken, waarbij ze de verschillende belangen integraal afwegen. Met de resultaten van het onderzoek krijgen de (decentrale) overheden inzicht in mogelijke maatregelen die de omgevingsveiligheid in het geval van explosiegevaar kunnen verhogen. Hiermee kunnen zij (deels) invulling geven aan de uitvoering van de zorgplicht.

Daarnaast zijn er ook andere partijen binnen de overheid die belang kunnen hebben bij het onderzoek. Zo adviseert de omgevingsdienst in het ruimtelijk planproces over omgevingsveiligheid en verleent het vergunningen aan bedrijven. Maar ook de controle op naleving van de milieuwetgeving en het opleggen van sancties behoren tot de taken van de omgevingsdienst (Omgevingsdienst West-Holland, z.d.). De omgevingsdienst heeft dus belang bij een veilige leefomgeving en kan de resultaten van het onderzoek gebruiken in de adviserende taak die zij heeft in het ruimtelijk planproces.

Ook de veiligheidsregio heeft een adviserende rol als het gaat om omgevingsveiligheid. Daarnaast heeft de veiligheidsregio een actieve rol in de bestrijding wanneer een ongeval met gevaarlijke stoffen zich heeft voorgedaan (NCTV, z.d.). Zij zal bij de advisering dus ook rekening houden met de rol die zij in een later stadium wellicht zal vervullen. Hier kan de veiligheidsregio op proberen te anticiperen door bijvoorbeeld aandacht te besteden aan aanrijroutes en bluswatervoorzieningen.

1.6.2 Bedrijven

Zoals al gezegd hebben ook bedrijven te voldoen aan de zorgplicht voor de kwaliteit van de leefomgeving. Bedrijven zullen bij het uitvoeren van activiteiten met gevaarlijke stoffen, rekening moeten houden met de negatieve gevolgen voor de omgeving en deze zoveel mogelijk moeten beperken. De uitkomsten van dit onderzoek kunnen een bijdrage leveren aan het beperken van die negatieve gevolgen voor de omgeving, waardoor ook bedrijven die werken met gevaarlijke stoffen een belang hebben bij de uitkomst ervan.

Belangrijk is om te definiëren wie er in dit geval bedoeld worden met ‘bedrijven’. Het onderzoek richt zich namelijk niet op inrichtingen met gevaarlijke stoffen (puntbronnen) maar op transport van gevaarlijke stoffen via spoor, weg, water of via buisleidingen. Toch zijn er bij het vervoer van gevaarlijke stoffen ook veel bedrijven betrokken. Zo is bij het vervoer van gevaarlijke stoffen een afzender die een bepaalde gevaarlijke stof vervoerd wil hebben en een vervoerder die de gevaarlijke stof naar de

geadresseerde brengt. Voor het transport plaats kan vinden, moet de gevaarlijke stof eerst verpakt worden en zal de tankcontainer of transporttank beladen of gevuld moeten worden. De exploitant van de container of tank is verantwoordelijk voor de constructie, maar ook voor het onderhoud en de periodieke keuring (Inspectie leefomgeving en transport, z.d.). Voor de exploitant van een buisleiding voor het vervoer van gevaarlijke stoffen geldt dat hij verantwoordelijk is voor de aanleg, het beheer, het gebruik en het onderhoud van een buisleiding (art.1 Besluit externe veiligheid buisleidingen). Naast het belang dat bedrijven hebben om aan de zorgplicht te voldoen, hebben ze ook een winstbelang. Deze twee kunnen in conflict raken wanneer een maatregel ten behoeve van de omgevingsveiligheid hoge kosten met zich meebrengt, waardoor er minder winst gemaakt kan worden.

Afgezien van de bedrijven die een risicobron vormen, zijn er ook projectontwikkelaars die projecten willen realiseren in een gebied dat wellicht blootgesteld wordt aan een risicobron. Ook zij zullen rekening moeten houden met de zorgplicht voor de kwaliteit van de leefomgeving. Toch hebben ook zij meerdere belangen als het gaat om ruimtelijke ontwikkelingen. Naast het winstbelang kunnen bijvoorbeeld ook esthetische belangen of wensen van de doelgroep van het project meespelen.

Tot slot bestaan er adviesbureaus die advies geven over veiligheid in relatie tot ruimtelijke ontwikkelingen. Zij verdienen geld met het geven van advies over het thema van dit onderzoek. Zij hebben er belang bij dat zij voldoende klanten hebben, om zo veel winst te kunnen maken. Je kunt je echter afvragen of adviesbureaus het wenselijk zouden vinden wanneer hun potentiële klanten straks een maatregelencatalogus kunnen raadplegen. Anderzijds kunnen de adviesbureaus hier ook nieuwe kennis uithalen, die ze in hun advisering kunnen toepassen.

1.6.3 Burgers

Ook burgers hebben belang bij een veilige leefomgeving. Het gaat tenslotte over hun eigen veiligheid. Burgers die nabij een risicobron wonen, zullen bescherming willen hebben tegen de gevolgen van een mogelijk ongeval met gevaarlijke stoffen. Daarnaast spelen voor hen wellicht ook andere belangen mee, zoals het hebben van een mooi uitzicht vanuit de tuin of het goed kunnen bereiken van diverse locaties. Dit zou een conflict op kunnen leveren, bijvoorbeeld wanneer een aarden wal het uitzicht belemmert.

Verder kan het onderzoek ook maatregelen opleveren die burgers zelf toe kunnen passen, zoals handelingsperspectieven bij verschillende explosiescenario's.

2 Theoretisch kader

Dit hoofdstuk biedt een theoretisch kader bij het onderzoek. Er zal ingegaan worden op omgevingsveiligheid bij explosiegevaar en de centrale begrippen die bij dit thema horen. Ook zal de relatie tussen de verschillende begrippen toegelicht worden.

2.1 Omgevingsveiligheid

Binnen het nieuwe omgevingsveiligheidsbeleid worden een aantal dingen veranderd ten opzichte van het externe veiligheidsbeleid. Het plaatsgebonden risico blijft gelijk aan de huidige situatie, maar nieuw zijn de aandachtsgebieden en de voorschriftengebieden. De zojuist genoemde termen zullen nu nader toegelicht worden.

2.1.1 Omgevingsveiligheid

Bij omgevingsveiligheid gaat het erover hoe we de beperkte ruimte die we in Nederland hebben veilig kunnen benutten. De risico's die de opslag, de productie, het gebruik en het vervoer van gevaarlijke stoffen voor de omgeving met zich meebrengen zullen zoveel mogelijk beperkt moeten worden. Bij omgevingsveiligheid wordt gekeken hoe dit gedaan kan worden (RIVM, 2016).

2.1.2 Plaatsgebonden risico

Het plaatsgebonden risico is de kans op het overlijden van een onbeschermd en continue aanwezig persoon buiten de begrenzing van de locatie waar een activiteit wordt verricht als een reeks gevolg van een ongewoon voorval veroorzaakt door die activiteit (art. 5.6 Bkl).

2.1.3 Aandachtsgebieden

Dit zijn gebieden waar mensen binnenshuis, zonder aanvullende maatregelen onvoldoende beschermd zijn tegen de mogelijke gevaren in hun omgeving. Er zijn drie typen aandachtsgebieden: brandaandachtsgebied, explosieaandachtsgebied en gifwolkaandachtsgebied. Door de verschillende aandachtsgebieden te bepalen wordt inzichtelijk welke gevaren er in het gebied kunnen optreden. Binnen de aandachtsgebieden is er extra aandacht nodig om aanwezige personen te beschermen tegen mogelijke ongevallen bij activiteiten met gevaarlijke stoffen (RIVM, z.d.-c). In het Besluit kwaliteit leefomgeving staat de begrenzing van de drie typen aandachtsgebieden omschreven (artikel 5.12 Bkl).

2.1.4 Explosieaandachtsgebied

Een explosieaandachtsgebied houdt in de locatie begrensd door de afstand, waar als gevolg van een ongewoon voorval dat leidt tot:

- Een kokende vloeistof-gasexpansie-explosie (Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion, BLEVE), de warmtestraling ten hoogste 35 kW/m² is; of
- Een explosie, anders dan bij het vorige punt, de overdruk ten hoogste 10 kPa is (art. 5.12 Bkl).

2.1.5 Voorschriftengebied

Gebieden rond een activiteit met gevaarlijke stoffen kunnen door het bevoegd gezag aangewezen worden als voorschriftengebied. Er gelden in dat gebied dan aanvullende bouweisen voor nieuwbouw, welke opgenomen zijn in de artikelen 4.90 tot en met 4.96 van het Besluit bouwwerken leefomgeving

(RIVM, z.d.-c). Een nadere toelichting op de bestuurlijke afwegingsruimte die het bevoegd gezag hierbij heeft, volgt in het juridisch kader.

2.2 Explosiegevaar

Explosiegevaar treedt op in verschillende vormen en er zijn dan ook verschillende soorten scenario's denkbaar waarbij er een explosie met gevaarlijke stoffen plaatsvindt. In deze paragraaf zal hier verder op ingegaan worden.

2.2.1 Soorten explosies

Een explosie kan omschreven worden als een snelle verbranding met een drukeffect. De snelle verbranding zorgt ervoor dat er een grote hoeveelheid gas ontstaat die door de snelheid en door de vaak afgesloten ruimte een drukgolf (en een vlamfront) tot gevolg heeft. Alle brandbare stoffen kunnen in de juiste verhouding met lucht en een ontstekingsbron een explosie geven (Kennisbank ATEX, z.d.-b). Deze elementen zijn weergegeven in de zogenaamde explosiedriehoek (zie figuur 1).



Figuur 1 Explosiedriehoek (Kennisbank ATEX, z.d.-b)

Er zijn verschillende typen explosies te onderscheiden. Deze zijn in onderstaande tabel weergegeven.

Vaste stof explosie: een explosie met 'explosieven', zoals vuurwerk, munitie en dynamiet.

Inwendige (tank) explosie: dit zijn explosies van stoffen of producten binnen een omhulling (zoals een vat, tankauto, leiding). De Engelse term voor dit type explosie is *tank explosion* of *vessel burst explosion*. Er zijn verschillende subtypen van inwendige (tank) explosies te onderscheiden

BLEVE: dit is een explosieve verdamping van een stof bij een druk en temperatuur ver boven het kookpunt. Bij ontlambare stoffen zoals LPG, is dit een explosie die vaker voorkomt.

Runaway Reaction: dit is een explosieve chemische reactie in een omhulling.

Explosie ontlambaar mengsel in omhulling: dit is een ontsteking van een ontlambaar mengsel in een omhulling, de omhulling zorgt voor de drukopbouw omdat de gassen niet weg kunnen. Een bijzonder geval van een explosie van een ontlambaar mengsel in een omhulling is een stofexplosie in een omhulling. Brandbaar materiaal in vaste vorm veroorzaakt dan een explosie. Een voorbeeld van een dergelijke explosie is een explosie in een graansilo.

Uitwendige explosie: dit zijn explosies die niet in de oorspronkelijke omhulling plaatsvinden. Er zijn verschillende subtypen te onderscheiden.

Explosieve decompressie: dit is bijvoorbeeld wanneer bij een lek in een leiding onder hele hoge druk het gas met een drukgolf vrijkomt, zoals bij een lek in een aardgasleiding. De omvang van de drukgolf is echter wel beperkt.

Gas-/dampexplosie in uitwendig object: ontvlambare stoffen die zijn vrijgekomen ontsteken en exploderen in een object in de omgeving. Vanwege de gedeeltelijke omhulling ontstaat drukopbouw. Een typisch voorbeeld van een dergelijke explosie is een explosie in een riool. De Engelse term voor dit type explosie is *confined vapour cloud explosion*.

Gaswolke explosie: onder uitzonderlijke omstandigheden kan een ontvlambare wolk in de (open) buitenlucht exploderen. Afhankelijk van de dichtheid van objecten in de wolk is er sprake van een *partially vapour explosion* of een *unconfined vapour explosion (UVCE)*. Voorwaarden voor dit soort explosies zijn dat er ergens in de omgeving drukopbouw moet plaatsvinden, bijvoorbeeld onder invloed van objecten (via insluiting of turbulentie).

Rapid phase transition: tot vloeistof gekoelde gassen komen in contact met een warme omgeving en verdampen explosief snel. Scenario dat alleen lokaal overdruk geeft en onder meer relevant is voor LNG.

Tabel 1 Typen explosies (Lees, 2012)

2.2.2 Warme en koude BLEVE

Een BLEVE is een bijzondere soort explosie. BLEVE staat voor Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion en is een explosie waarbij een houder met vloeistof onder druk bezwijkt. Er ontstaat een overdruk doordat de kokende vloeistof verdampt. De overdruk blaast de houder dan als het ware op. Het verschil tussen een warme en een koude BLEVE zit in de oorzaak van het bezwijken van het drukvat. Bij een warme BLEVE ligt de oorzaak bij de verhoogde temperatuur waardoor de sterkte van het drukvat afneemt. Dit kan ertoe leiden dat bij een hoge dampdruk de tank openscheurt. Bij een koude BLEVE heeft de oorzaak niet te maken met een temperatuurstijging, maar met iets anders. Dit kan bijvoorbeeld mechanische impact zijn (Busch, 2008).

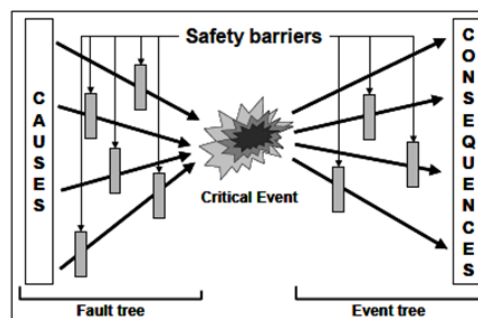
2.2.3 Mogelijke gevolgen van een explosie

In het Scenarioboek Externe Veiligheid (Laboratorium voor Externe Veiligheid, 2019) worden een aantal gevolgen van een explosie omschreven. De effecten die genoemd worden zijn: hittestraling, overdruk en scherfwerking. Hierbij zijn hittestraling en overdruk primaire effecten en behoort scherfwerking tot de secundaire gevolgen. Scherfwerking wordt namelijk veroorzaakt door de overdruk. Andere secundaire effecten van een explosie die van invloed kunnen zijn op de veiligheid van de mens, zijn het instorten

van gebouwen, vliegvuil, scherfwerking en meesleureffecten (VROM e.a., 2003). Daarnaast kunnen er bij een BLEVE ook secundaire branden ontstaan die een gevaar kunnen vormen voor de veiligheid van mensen (Petiet & van der Vorm, 2012). In dit onderzoek wordt met scherfwerking bedoeld, datgene dat van de explosiebron afkomstig is en met vliegvuil alles wat uit de omgeving rond geslingerd wordt. Dit is de definitie die ook door het RIVM aangehouden wordt.

2.3 Vlinderdasmodel

De vlinderdas-methode is een methode voor een kwalitatieve risicoanalyse, waarmee op schematische wijze een beeld kan worden geschetst van risico's en preventieve- en beschermingsmaatregelen die hierop ingezet kunnen worden. Centraal staat de ongewenste gebeurtenis, links de oorzaken en rechts de gevolgen. De maatregelen worden getoond in de vorm van barrières (Vlaamse overheid, z.d.). In figuur 2 is afgebeeld hoe een vlinderdasmodel eruit ziet.



Figuur 2 Vlinderdasmodel (De Dianous & Fievez, 2006)

2.4 Lijnbronnen

Als we bij omgevingsveiligheid kijken naar de verschillende soorten risicobronnen, dan vallen er grofweg twee soorten te onderscheiden: puntbronnen en lijnbronnen. Een puntbron is bijvoorbeeld een bedrijf dat werkt met gevaarlijke stoffen en daarom een gevaar vormt voor de omgeving. Dit is een risico dat een vaste plek kent. Bij een lijnbron is het moeilijker om te voorspellen waar het fout gaat, omdat het risico verspreid is over een bepaalde route. Bij lijnbronnen gaat het hier om het vervoer van gevaarlijke stoffen over de weg, het water, het spoor of via buisleidingen.

2.4.1 Weg-, water- en spoorvervoer gevaarlijke stoffen

Gevaarlijke stoffen worden zowel op nationaal als op internationaal niveau vervoerd. Dit gebeurt over het spoor, de weg, de binnenwateren, de zee en door de lucht (RIVM, z.d.-b). In Nederland worden dagelijks honderdduizenden tonnen gevaarlijke stoffen vervoerd (Inspectie Leefomgeving en Transport, z.d.).

Het vervoeren van gevaarlijke stoffen is risicovol en leidt tot beperkingen voor de ruimtelijke ordening. Het Rijk heeft een basisnet vastgesteld. Dit is een landelijk aangewezen netwerk voor het vervoer van gevaarlijke stoffen. Het doel hiervan is dat er op lange termijn een evenwicht gecreëerd kan worden tussen de belangen van het vervoer van gevaarlijke stoffen, de bebouwde omgeving en de veiligheid van mensen (InfoMil, z.d.).

2.4.2 Buisleidingen

In de Nederlandse bodem ligt ongeveer 300.000 kilometer aan buisleidingen (Rijksoverheid, z.d.-c). Hiervan is ongeveer 19.000 kilometer voor het transport van gevaarlijke stoffen, namelijk van aardgas onder hoge druk, aardolieproducten en chemicaliën (RIVM, 2011).

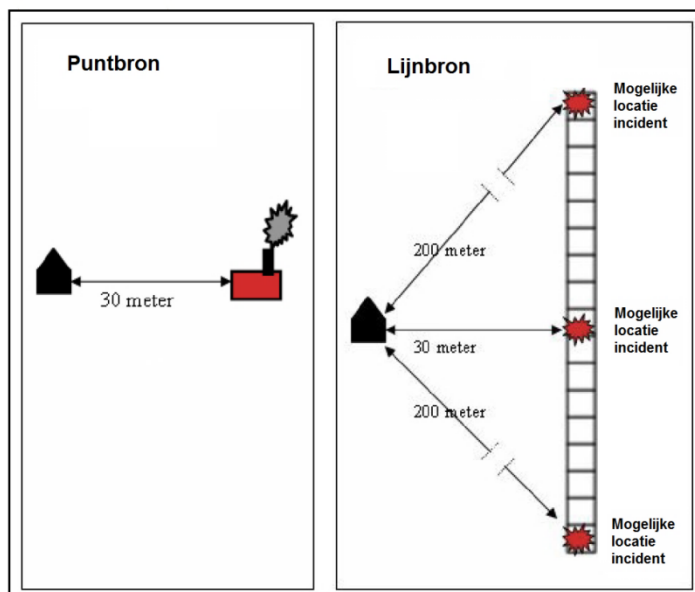
Het rijk heeft daarnaast in de Structuurvisie Buisleidingen aangegeven waar zij tot 2035 ruimte wil vrijhouden voor nieuwe buisleidingen. Het gaat dan om buisleidingen die gevaarlijke stoffen over lange

afstanden moeten vervoeren en om buisleidingen voor transport over de grens. De nieuwe leidingen komen zoveel mogelijk langs bestaande te liggen (Rijksoverheid, z.d.-c).

Gemeenten en provincies hun ruimtelijke plannen afstemmen op de Structuurvisie Buisleidingen (Rijksoverheid, z.d.-c).

2.4.3 Verschillen lijn- en puntbronnen

Bij het bepalen van maatregelen tegen de effecten van een explosie is het van belang om te kijken naar het type van de bron (lijn- of puntbron). Met welk type bron je te maken hebt, heeft gevolgen voor bijvoorbeeld de afstand tot de risicobron en de effectiviteit van maatregelen. In figuur 3 is links de situatie bij een puntbron geschetst en rechts de situatie bij een lijnbron (Machielsen, 2012). Bij een puntbron is er sprake van een vaste afstand tussen het kwetsbare object en de risicobron. Bij een lijnbron kan het incident zich op



Figuur 3 Punt- en lijnbronnen (Machielsen, 2012)

meerdere plaatsen voordoen, waardoor er geen vaste afstand is tussen het kwetsbare object en de risicobron. De kans dat het incident zich voordoet op de kleinste afstand tot het kwetsbare object is kleiner dan de kans dat het incident zich voordoet op een grotere afstand van het kwetsbare object. Daarnaast kan ook nog gelden dat maatregelen niet effectief zijn op een korte afstand tot de risicobron, maar wel effectief zijn op een grotere afstand tot de risicobron (Machielsen, 2012). Een voorbeeld hiervan is dat bij een explosie dicht bij een kwetsbaar object een bepaald type ruit onvoldoende bescherming biedt tegen de overdruk die er is, terwijl dit type ruit wel voldoende bescherming biedt tegen de overdruk wanneer de explosie verder van het kwetsbare object plaatsvindt (RIVM, z.d.-d). Een ander voorbeeld waarbij de locatie van het ongeval van belang is voor de effectiviteit van de maatregel, is het plaatsen van gebouwen haaks op de risicobron. Wanneer een explosie plaatsvindt recht voor de korte zijde van het gebouw biedt het een mate van bescherming, maar wanneer het een paar meter verder plaatsvindt, is het effect van de explosie misschien wel erger door de maatregel. Het is daarom van belang om tijdens het onderzoek na te gaan hoe bruikbaar de maatregelen zijn voor lijnbronnen. Wat voor een puntbron een goede maatregel is, kan voor een lijnbron veel minder goed uitpakken.

Naast het aspect van effectiviteit, brengt het nemen van maatregelen ook meer kosten met zich mee. Bij een lijnbron zal je (om de omgeving te beschermen) maatregelen moeten nemen langs de gehele lijnbron. Het is denkbaar dat daarbij veel kosten ontstaan, wat wellicht leidt tot een kritischere kosten-baten afweging.

3 Juridisch kader

In dit hoofdstuk wordt wetgeving behandeld die van belang is voor het thema van het onderzoek. Veel van deze wetgeving komt uit de Omgevingswet, die waarschijnlijk in 2021 van kracht wordt. Echter is de Omgevingswet al wel te raadplegen en kan men al inspelen op de nieuwe wetgeving. Er zal in dit hoofdstuk in het bijzonder gekeken worden naar de wetgeving over omgevingsveiligheid binnen de ruimtelijke ordening.

3.1 Zorgplicht

Artikel 1.6 van de Omgevingswet omschrijft een zorgplicht voor de fysieke leefomgeving. Iedereen heeft een rol en verantwoordelijkheid bij de zorg voor de kwaliteit van de leefomgeving. Daarnaast bepaalt artikel 1.7 van de Omgevingswet dat ieder die weet of redelijkerwijs kan vermoeden dat zijn activiteit nadelige gevolgen kan hebben voor de fysieke leefomgeving, verplicht is maatregelen te nemen om die gevolgen te voorkomen. Als voorkomen niet mogelijk is, is hij verplicht om de gevolgen zo veel mogelijk te beperken of ongedaan te maken. Als geen van eerder genoemden mogelijk is, dan is hij verplicht de activiteiten achterwege te laten voor zover dat redelijkerwijs van hem kan worden gevergd. Ook het waarborgen van omgevingsveiligheid valt onder de zorgplicht voor de leefomgeving (RIVM, z.d.-e). Het veilig inrichten van de leefomgeving is niet alleen een taak van de overheid, het is ook een verantwoordelijkheid van private partijen.

3.2 Afwegingsruimte binnen de kaders

Het bevoegd gezag heeft afwegingsruimte om een integrale benadering van belangen toe te passen. In de afweging wordt rekening gehouden met de kans dat er maatschappelijke ontwrichting ontstaat, dit kan bijvoorbeeld ontstaan wanneer er doden en gewonden vallen maar ook wanneer er economische schade of milieuschade is (RIVM, z.d.-e).

3.2.1 Besluit kwaliteit leefomgeving

Deze afwegingsruimte is (o.a.) vastgelegd in het Besluit kwaliteit leefomgeving (Bkl). Op welke punten het bevoegd gezag afwegingsruimte heeft en op welke punten niet, is juridisch vastgelegd. Dit is af te lezen aan het karakter van de instructieregels in het Besluit kwaliteit leefomgeving. Zo betekenen instructieregels met het karakter 'rekening houden met' een inhoudelijke sturing op de door het bestuursorgaan uit te voeren belangenafweging, waarbij de bestuurder een zekere afwegingsruimte heeft bij de wijze waarop voldaan wordt aan de instructieregel (Nota van toelichting Bkl, paragraaf 2.3.2.3). Instructieregels met het karakter 'in acht nemen' houden in dat het bestuursorgaan zich bij de uitvoering van de bevoegdheid aan de gestelde regel moet houden. Deze instructieregels sturen dan ook dwingend op de uitkomst van de belangenafweging (Nota van toelichting Bkl, paragraaf 2.3.2.3).

In tabel 2 is een overzicht weergegeven van de belangrijkste instructieregels uit het Besluit kwaliteit leefomgeving (Bkl) en is aangegeven waar wel en waar geen bestuurlijke afwegingsruimte is gegeven vanuit dit besluit.

Bestuurlijke afwegingsruimte	Geen bestuurlijke afwegingsruimte
<p>Rekening houden met het voorkomen, beperken en bestrijden van branden, rampen en crises en de mogelijkheden voor zelfredzaamheid en geneeskundige hulpverlening (art. 5.2 Bkl). Dit heeft betrekking op bescherming zowel binnen als buiten een aandachtsgebied.</p>	<p>De grenswaarde voor het plaatsgebonden risico dient voor kwetsbare en zeer kwetsbare gebouwen en kwetsbare locaties ten hoogste een op de miljoen per jaar (10^{-6}) te zijn (art. 5.7 Bkl). Deze grenswaarde moet in het omgevingsplan worden gewaarborgd. Voor het bepalen van het plaatsgebonden risico gelden voor sommige activiteiten vaste afstanden en voor anderen moet het plaatsgebonden risico worden berekend (art. 5.8 Bkl).</p>
<p>Een brandvoorschriftengebied en/of explosievoorschriftengebied kan aangewezen en geometrisch begrensd worden als op de locatie een brandaandachtsgebied of een explosieaandachtsgebied geldt (art. 5.14 Bkl). De bestuurder mag dus besluiten om het aandachtsgebied slechts gedeeltelijk of niet aan te wijzen als voorschriftengebied. Om dit besluit te motiveren kunnen al aanwezige beschermende maatregelen worden meegenomen.</p>	<p>Het bevoegd gezag is verplicht om locaties met zeer kwetsbare objecten die binnen een brand- of explosieaandachtsgebied vallen, in het omgevingsplan aan te wijzen als voorschriftengebied (art. 5.14 lid 3 Bkl).</p>
<p>Voor beperkt kwetsbare, kwetsbare en zeer kwetsbare gebouwen en beperkt kwetsbare en kwetsbare locaties binnen een brand-, explosie- en gifwolkaandachtsgebied moet rekening gehouden worden met de kans op overlijden van een groep van 10 of meer personen per jaar als rechtstreeks gevolg van een ongewoon voorval veroorzaakt door een activiteit met externe veiligheidsrisico's (art. 5.15 Bkl). Het bevoegd gezag heeft hiermee keuzeruimte hoe invulling te geven aan het beperken van de kans op het overlijden van een groep personen.</p>	<p>Het bevoegd gezag heeft geen afwegingsruimte als het gaat over het bepalen van de afstand van een aandachtsgebied. De afstand die hiervoor moet worden aangehouden volgt uit bijlage VII van het Bkl, het Bal (Besluit activiteiten leefomgeving) of de stappenplannen uit het Handboek Omgevingsveiligheid.</p>
<p>Bij aanvragen kan in plaats van een in algemene regel voorgeschreven maatregel een gelijkwaardige maatregel getroffen worden (art. 4.7 lid 1 Omgevingswet).</p>	

Tabel 2 Bestuurlijke afwegingsruimte (Besluit kwaliteit leefomgeving)

3.2.2 Besluit activiteiten leefomgeving

Met de ingang van het Besluit activiteiten leefomgeving (Bal) gelden voor diverse activiteiten geen algemene regels meer. De rijksregels voor deze activiteiten worden geschrapt en gemeenten dienen (indien gewenst) zelf regels op te nemen in hun Omgevingsplan. Hierdoor is er meer lokale afwegingsruimte voor de gemeente (Omgevingsdienst West-Holland e.a., 2017).

3.3 Mate van bescherming

Het bevoegd gezag heeft de ruimte om binnen kaders eigen afwegingen te maken over de bescherming van de leefomgeving. Hierdoor kan regelgeving worden toegespitst op de lokale situatie en ambities. Wel moet hierover, in lijn met de Algemene wet Bestuursrecht, transparantie zijn en moeten de bestuurlijke keuzes onderbouwd worden. De ambities die een provincie of gemeente heeft voor haar gebied worden vastgelegd in de omgevingsvisie (RIVM, z.d.-e).

4 Onderzoeksmethode

In dit hoofdstuk is aangegeven welke onderzoeksmethoden gebruikt zijn om de data te verzamelen die antwoord geven op de onderzoeksvragen. Daarnaast zijn de gebruikte variabelen in dit onderzoek nader toegelicht en is aandacht besteed aan de betrouwbaarheid en validiteit van het onderzoek.

4.1 Onderzoeksmethode per onderzoeksvraag

De onderzoeksvragen van dit onderzoek zijn aan de hand van verschillende methoden beantwoord.

1. Wat zijn de gevolgen van een explosie vanuit een lijnbron met gevaarlijke stoffen voor de mens?

De eerste onderzoeksvraag, zoals hierboven beschreven, is voornamelijk beantwoord door middel van literatuuronderzoek. Verschillende literatuur is met elkaar vergeleken, om zo tot resultaten te komen die door meerdere bronnen worden bevestigd. Echter is voor het maken van de koppeling tussen de technische gevolgen van een explosie en de fysieke impact op de mens gebruik gemaakt van informatie uit interviews met artsen maatschappij en gezondheid (Medische Milieukunde). Dit omdat deze specifieke koppeling in de literatuur niet tot nauwelijks gevonden is. De resultaten die het literatuuronderzoek en de interviews op hebben geleverd, zijn verwerkt in een vlinderdasmodel en deze is getoetst bij experts op het gebied omgevingsveiligheid van verschillende partijen. Daarnaast zijn de resultaten aangevuld met casuïstiek, waarin elementen van de gevonden resultaten terugkomen.

2. Welke beschermende maatregelen zijn er tegen de gevolgen van een explosie vanuit een lijnbron met gevaarlijke stoffen?

Onderzoeksvraag 2 was aanvankelijk opgedeeld in vraag 2a en 2b waarbij 2a ging over de beschermende maatregelen die al genomen worden en vraag 2b over beschermende maatregelen die nog in ontwikkeling zijn. Echter is tijdens de interviews gebleken dat er bij de adviseurs van de diverse veiligheidsregio behoefte is aan meer kennis over de effectiviteit van maatregelen tegen explosies, zodat zij voldoende in staat zijn om advies te geven over beschermende maatregelen. Momenteel is deze kennis gering, waardoor het binnen dit onderzoek niet mogelijk is om aan te geven welke maatregelen er in de praktijk genomen worden, die ook aantoonbaar bescherming bieden. In het discussiehoofdstuk zal hier verder op ingegaan worden. De onderzoeksvraag hierboven is beantwoord zonder onderscheid te maken in maatregelen die al genomen worden en maatregelen die in ontwikkeling zijn. Er is gekeken naar mogelijke maatregelen die bescherming kunnen bieden bij een explosie. Hiervoor is zowel data uit interviews gebruikt als ook data uit literatuuronderzoek.

De interviews die hebben plaatsgevonden met experts op het gebied van omgevingsveiligheid of met kennis van gevaarlijke stoffen, hadden een semigestructureerd karakter. Het waren met name personen met een adviserende functie omtrent omgevingsveiligheid bij overheden, maar ook bij private partijen. Voor sommige specifieke vragen hebben interviews plaatsgevonden met personen die specialistische

kennis bezitten van een bepaald onderwerp. Zo zijn artsen maatschappij en gezondheid (Medische Milieukunde) geraadpleegd voor de invulling van de fysieke impact op de mens en is een communicatie-expert geraadpleegd voor de communicatie naar burgers. De interviews hebben een semigestructureerd karakter, omdat dit ruimte biedt om in te kunnen spelen op de situatie en vragen aan te passen aan de kennis die de geïnterviewde over bepaalde thema's heeft. Er is wel gebruik gemaakt van topiclijsten met voorbeeldvragen. De interviews zijn uitgewerkt in een interviewverslag en ter controle teruggestuurd naar de geïnterviewde. Daarbij is gevraagd of de geïnterviewde opmerkingen of aanvullingen had op het verslag en wanneer dit zo was, zijn de opmerkingen en aanvullingen meegenomen.

Tijdens de interviews is er ook gevraagd naar relevante literatuur, aanbevelingen voor te interviewen personen en praktijkvoorbeelden van maatregelen bij explosies met gevaarlijke stoffen. Dit om te voorkomen dat er belangrijke documenten over het hoofd gezien worden of de kennis die personen in het werkveld hebben, niet betrokken wordt bij het onderzoek. De praktijkvoorbeelden hebben als functie dat er aan de hand van dergelijke concrete voorbeelden de diepte in gegaan kan worden over de maatregelen en het makkelijker wordt om de werking van de maatregel te analyseren. Ook zijn er voorbeelden van maatregelen naar voren gekomen die juist niet effectief zijn gebleken.

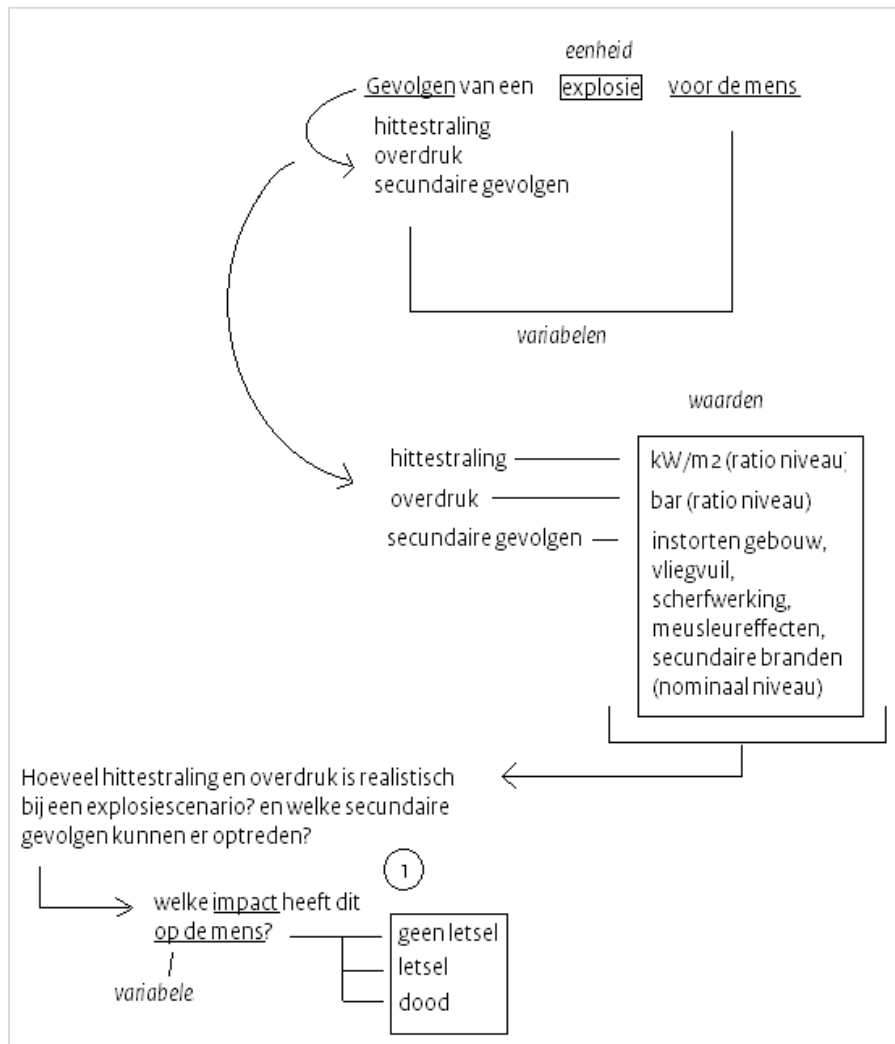
Bij de beantwoording van deze onderzoeksvraag is het vlinderdasmodel van onderzoeksvraag 1 gebruikt. Deze heeft ondersteuning geboden tijdens de interviews om zo gericht naar maatregelen te zoeken die de gevolgen van een explosie voor de mens tegengaan of mitigeren. Het vlinderdasmodel is telkens na een interview aangevuld met mogelijke 'barrières' die werden genoemd in de interviews. Deze aangepaste versie van het vlinderdasmodel is vervolgens getoetst en aangevuld bij een volgende interview. Op basis van de genoemde 'barrières' is gezocht naar meer inhoudelijke data over de wijze waarop bescherming geboden kan worden. Hiervoor is literatuur geraadpleegd (onder andere literatuur aangeleverd door experts met wie een interview heeft plaatsgevonden) en zijn experts geïnterviewd.

3. Welke factoren kunnen invloed hebben op de beschermende werking van de maatregelen?

Voor de beantwoording van onderzoeksvraag 3 is deels gebruik gemaakt van literatuuronderzoek naar de effectiviteit van de desbetreffende beschermende maatregel. Er is gezocht naar literatuur die iets zegt over omstandigheden die nodig zijn om een maatregel bescherming te laten bieden. Daarnaast zijn experts geraadpleegd om meer inzicht te krijgen in de wijze waarop de maatregelen bescherming bieden aan de mens en welke factoren hierbij van invloed zijn. Hiervoor zijn wederom semigestructureerde interviews gehouden. Deze interviewvragen zijn samengevoegd met de interviewvragen van onderzoeksvraag 2. Foto's kunnen ondersteuning bieden bij het analyseren van factoren die van invloed zijn op de beschermende werking van de maatregel. Echter is ook al aangegeven dat de kennis over de effectiviteit van maatregelen momenteel nog gering is, waardoor het nemen van foto's van maatregelen die bescherming bieden binnen dit onderzoek niet mogelijk was.

4.2 Eenheden, variabelen en waarden

Onderzoeksvraag 1 gaat over de gevolgen van een explosie voor de mens. Een explosie kan, afhankelijk van het scenario, hittestraling en overdruk tot gevolg hebben. Daarnaast kunnen hittestraling en overdruk ook secundaire gevolgen veroorzaken. Hittestraling, overdruk en de secundaire gevolgen vormen de variabelen in onderzoeksvraag 1. Hittestraling wordt gemeten in kW/m² en is dus een meetwaarde op het ratio niveau. De overdruk wordt gemeten in bar en is daarmee eveneens een meetwaarde op ratio niveau. Over secundaire gevolgen valt moeilijker te zeggen in welke mate ze optreden. Er zal daarom omschreven worden welke secundaire gevolgen realistisch zijn bij het scenario; het meetniveau is daarmee nominaal. In figuur 4 zijn eenheid, variabelen en waarden weergegeven. De omcirkelde cijfers in de figuren laten het verband tussen de verschillende onderzoeksvragen zien. Zo komt de uitkomst van onderzoeksvraag 1, terug in onderzoeksvraag 2.



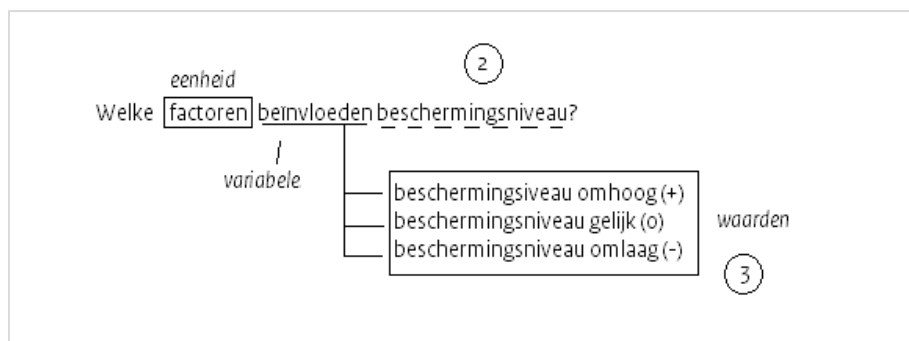
Figuur 4 Operationalisatie onderzoeksvraag 1

Bij onderzoeksvraag 2 staan de maatregelen tegen de gevolgen van een explosie voor de mens centraal. De variabele die in het kader van de onderzoeksvraag gekoppeld kan worden aan de eenheid 'maatregel' is de bescherming die het biedt voor de mens. Het is binnen dit onderzoek niet haalbaar om de mate van bescherming uit te drukken in een getal, omdat dit erg veel tijd in beslag neemt en deze tijd niet beschikbaar is. Daarom zal gekeken worden of de maatregel de impact op de mens voorkomt, verkleint, vergroot of dat de maatregel geen impact heeft. Voor de uitkomst van het onderzoek zal vooral gekeken worden naar welke maatregelen de impact van een explosie op de mens verkleinen. In figuur 5 is de operationalisatie van onderzoeksvraag 2 weergegeven.



Figuur 5 Operationalisatie onderzoeksvraag 2

Bij onderzoeksvraag 3 wordt ingegaan op de factoren die van invloed zijn op het beschermingsniveau van de maatregelen. Hierbij geldt dat de factoren eenheden zijn en dat de invloed van de factor op het beschermingsniveau gezien kan worden als een variabele van deze factor. De waarden die gegeven worden aan deze variabele zijn: positief, neutraal en negatief. In figuur 6 is de operationalisatie nader uitgewerkt.



Figuur 6 Operationalisatie onderzoeksvraag 3

4.3 Betrouwbaarheid en validiteit

In deze paragraaf wordt besproken worden hoe de betrouwbaarheid en validiteit van het onderzoek gewaarborgd zijn. Het onderzoek dient namelijk reproduceerbaar te zijn en dient daarnaast ook echt te meten wat er gemeten moet worden.

Het onderzoek dat uitgevoerd is, is grotendeels een kwalitatief onderzoek. Bij de uitvoering van een kwalitatief onderzoek is het van belang om subjectiviteit en interpretatie zoveel mogelijk te beperken. Daarom is er gekozen voor een aantal methoden die toegepast zijn om een betrouwbaar en valide onderzoek neer te kunnen zetten. In onderstaande tabel zijn deze methoden weergegeven.

Validiteit	<i>Triangulatie:</i> combineren van verschillende onderzoeksmethoden en het gebruik van verschillende databronnen. Er is gebruik gemaakt van zowel literatuur als ook van data uit interviews. Daarnaast zijn er verschillende partijen geïnterviewd en is eerder gegeven informatie getoetst door de informatie voor te leggen aan een tweede expert. Ook zijn de resultaten uit literatuuronderzoek getoetst aan de experts tijdens de interviews. Tot slot, zijn een aantal van de aanbevelingen die uit het onderzoek naar voren zijn gekomen, getoetst bij personen uit het werkveld tijdens de netwerkdag Omgevingsveiligheid.
	<i>Zoeken naar ontkrachtend bewijs:</i> er is actief op zoek gegaan naar gevallen waarin een bepaalde bewering niet van toepassing is. Zo is bijvoorbeeld gekeken of er situaties zijn waarin een bepaalde maatregel niet werkt. Naar aanleiding van deze vondsten, zijn beweringen genuanceerd.
Betrouwbaarheid	<i>Voldoende inzicht in dataverzameling en analysemethoden:</i> bij het verzamelen van data is helder omschreven hoe tot de data gekomen is en op welke manier de data geanalyseerd is. Daarnaast zijn de transcripten van de afgenomen interviews als bijlage toegevoegd aan het onderzoeksrapport (niet openbaar in verband met vertrouwelijkheid).
	<i>Controle door tweede persoon:</i> gedurende het onderzoek heeft controle plaatsvonden op de gebruikte onderzoeksmethoden. Hierin hebben de school- en praktijkcoach een rol gespeeld, zij beoordelen of de onderzoeksmethoden voldoende betrouwbaar zijn.

Tabel 3 Methoden ten behoeve van betrouwbaarheid en validiteit

5 Gevolgen van een explosie voor de mens

In dit hoofdstuk zullen de onderzoeksresultaten van onderzoeksvraag 1 worden beschreven. Door middel van literatuuronderzoek en gesprekken met experts op het gebied van gevaarlijke stoffen is in kaart gebracht wat de mogelijke gevolgen van een explosie voor de mens kunnen zijn. Deze gevolgen en de impact op de mens zijn verwerkt in een vlinderdasmodel (zie bijlage 2). Dit hoofdstuk vormt de inhoudelijke onderbouwing bij het vlinderdasmodel.

Paragraaf 5.1 gaat in op de gevolgen van de drukgolf die bij een explosie ontstaan. Dit zijn zowel de directe als indirecte gevolgen van de drukgolf. In de paragrafen 5.2 t/m 5.4 zal ingegaan worden op andere gevolgen die mogelijk kunnen optreden in het geval van een explosie. Tussen de verschillende paragrafen zal een koppeling worden gemaakt. Tevens zal casuïstiek gebruikt worden ter ondersteuning van de gevonden resultaten.

Verspreiding van het gevaar naar de omgeving

Bij een explosie kunnen de overdrukeffecten worden gevisualiseerd als een zich uitdijende bolvorm met als middelpunt de bron van de explosie. De overdruk vertrekt met de geluidssnelheid en is in die zin vergelijkbaar met een geluidsgolf. De drukgolf plant zich via de lucht of via de bodem voort en komt terecht bij mensen of objecten. De kracht van overdrukeffecten neemt af als de afstand vanaf de explosie toeneemt. Een mens of object in de omgeving van de explosie zal eerst worden geraakt door het front van de drukgolf (de piekoverdruk). Als de drukgolf voorbij trekt neemt de druk weer af en kan er een negatieve fase (zuiging) optreden waarbij de druk achter de golf korte tijd lager is ten opzichte van de omgeving. De mate waarin deze negatieve druk gevolgen heeft hangt af van het type explosie en de omgeving (Arjan Boxman, persoonlijke communicatie, 23 mei 2019). Fragmenten (scherven en vliegvuil) kunnen door de blast vooruit geduwd worden, maar kunnen ook door de zuiging meegenomen worden (Luc Stoot, persoonlijke communicatie, 10 april 2019, zie bijlage 11 regel 60 en 65).

Bij een explosie wordt een deel van de explosieve energie omgezet in warmte (Frencken, 2013). De vormen van warmteoverdracht die van belang zijn bij een explosie, zijn straling en stroming.

Wanneer gas uit een omhulling ontsnapt, zal de gaswolk met de wind mee trekken. Als de atmosfeer niet stabiel is, zal er meer sprake zijn van wervelingen en opmenging. Het gas zal zich dan beter vermengen met lucht en de concentratie zal lager zijn. Vooral de onderste luchtlagen bepalen de verspreiding van de gaswolk (Oude Wolbers, 2015).

5.1 Gevolgen van de drukgolf

In de Publicatierreeks Gevaarlijke Stoffen (PGS) 1 deel 2A: Effecten van explosie op personen (Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer e.a., 2003), worden de resultaten gegeven van een onderzoek naar de uitwerking op mensen van diverse gevolgen die bij een explosie kunnen optreden. Hierin worden blast (algemene term voor schok- en drukgolven), meesleureffecten, scherven en brokstukken en instorten van gebouwen uitgewerkt. Bij blast kan longschade en gehoorschade optreden. Ook in het TNO onderzoek naar kwantificering van aantallen gewonden (Trijssenaar e.a., 2011) zijn deze gevolgen (afgezien van instorting) meegenomen.

5.1.1 Directe gevolgen op de mens

Longschade en gehoorschade vallen onder de medische term ‘barotrauma’ (Giard & Overbeke, 2006) en zijn directe gevolgen van een drukgolf. Het barotrauma werkt hoofdzakelijk in op lucht of gas bevattende organen en wordt veroorzaakt door de plotselinge drukverandering die bij een explosie ontstaat. Wanneer een drukverandering geleidelijk gaat, is de mens goed in staat om hiermee om te gaan. De drukverandering kan dan namelijk gecompenseerd worden door de druk in de organen waar zich lucht bevindt aan te passen. Echter krijgt het lichaam bij een explosie niet de kans om de snelle drukverhoging te compenseren. Hierdoor kan niet alleen schade ontstaan aan het gehoor of aan de longen, maar ook aan de darmen (Femke de Zwart, persoonlijke communicatie, 14 maart 2019, zie bijlage 1A regel 30). Of een explosie leidt tot letsel aan gehoor, longen en/of darmen is afhankelijk van de duur van de belasting en de grootte van de overdruk (Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer e.a., 2003). Als dit letsel leidt tot bemoeilijking van de ademhaling kan het slachtoffer zonder behandeling komen te overlijden. Hetzelfde geldt voor slachtoffers die bloedvergiftiging krijgen door het afscheuren van stukken darm. Dit vraagt om een goede intensive care (IC) faciliteit en operatie kamer (OK) faciliteit (zie bijlage 1A regel 25 en 30).

Daarnaast beschrijft Stephen J. Wolf e.a. (2009) een ander direct gevolg van de drukgolf op de mens, namelijk hersenletsel. Ook in het rapport van TNO (Trijssenaar e.a., 2011) wordt benoemd dat uit studies uitgevoerd in de Verenigde Staten naar aanleiding van missies van Defensie gebleken is dat blast directe gevolgen heeft voor de hersenen en letsel kan veroorzaken. Dit worden ‘mild traumatic brain injuries’ genoemd. Echter is onderzoek naar primaire blast-gerelateerd hersenletsel schaars en zijn de resultaten die er wel zijn moeilijk te interpreteren (Wolf e.a., 2009), zo is er onvoldoende kennis over de oorzaken van de hersen gerelateerde letselmechanismen (Trijssenaar e.a., 2011).

Tijdens de interviews is door meerdere experts gesteld dat het menselijk lichaam over het algemeen redelijk goed in staat is om de drukgolf bij een explosie te doorstaan; veel beter dan gebouwen. Het meeste drukgolf gerelateerd letsel zou dan ook ontstaan door indirecte gevolgen: scherfwerking en vliegvuil, instorting en botsen en vallen.

5.1.2 Scherfwerking en vliegvuil

Zowel in de Publicatiereeks Gevaarlijke Stoffen (Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer e.a., 2003), als ook in de Kennisbank ATEX (z.d.-a), worden ‘scherven en brokstukken’ genoemd als gevaren bij een explosie. Scherven ontstaan direct uit de explosiebron, terwijl brokstukken door voorwerpen in de omgeving ontstaan en als gevolg van de druk- of schokgolf worden weggeworpen. In het Handboek Omgevingsveiligheid wordt hiervoor niet de term brokstukken, maar de term vliegvuil gebruikt. Dit zal ook aangehouden worden in het onderzoek. Ook valt er onderscheid te maken tussen fragmenten die snijdend zijn (penetrerend trauma) en fragmenten die niet-snijdend zijn (stomp trauma). De fragmenten die niet snijdend zijn kunnen eveneens letsel veroorzaken zonder dat er aan de buitenkant iets te zien is (zie bijlage 1A regel 70 en 105). Bij snijdende fragmenten, kunnen er ook infectierisico’s ontstaan. Scherfwerking en vliegvuil kunnen ernstig tot dodelijk letsel opleveren (Trijssenaar e.a., 2011).

Vliegvuil ontstaan doordat de drukgolf van de explosie objecten in de omgeving wegslingert. Denk hierbij bijvoorbeeld aan losliggend grind dat door een explosie weggeslingerd wordt. Daarnaast kunnen

objecten ook (deels) bezwijken waardoor fragmenten gevormd worden. Dit is het geval wanneer de ramen van een gebouw bezwijken en de glasscherven door de lucht vliegen. Scherven die ontstaan uit de explosiebron zijn bijvoorbeeld delen van een tank of van een buisleiding. Zo werd bij de gasexplosie in Gellingen een stuk pijpleiding gevonden op 155 meter van de krater (Safety Solutions Consultants BV, 2004). In het TNO-rapport over de vuurwerkexplosie in Culemborg wordt gesproken van rondvliegende fragmenten die dwars door muren en daken heengeslagen waren (Mercx, 1991). Ook wordt hierin aangegeven dat tot op 650 meter afstand stukken beton (10 a 20 kg) en stukken staalprofiel teruggevonden zijn. Hoeveel scherven en vliegvuil er in beweging gaan bij een explosie, hangt af van de directe omgeving van de explosie (Inge Trijssenaar, persoonlijke communicatie, 26 april 2019, zie bijlage 1J regel 15).

5.1.3 Instorting

Het instorten van objecten als gevolg van een explosie, kan letsel veroorzaken aan de mens. Niet alleen kunnen gebouwen instorten, maar ook objecten in de omgeving kunnen instorten (bijvoorbeeld een brug of een gevel). Bij instorting kan letsel ontstaan zoals botbreuken en stomp trauma (zie bijlage 1A regel 70). Organen als de lever, de milt en de longen, zijn erg gevoelig voor dit soort letsels vanwege hun rijke doorbloeding. In het borst en buik gebied zitten de belangrijkste slagaderen en bloedrijke organen, maar ook de het hoofd met de hersenen verdienen extra aandacht (zie bijlage 1A regel 70).

5.1.4 Botsen en vallen

Letsel kan ook ontstaan wanneer mensen door de kracht van de explosie door de lucht worden geslingerd en op een ongelukkige manier terecht komen. De schedel wordt in de PGS 1 genoemd als het meest kwetsbare deel als het gaat om vallen door de kracht van een explosie. Als iemand op zijn hoofd terecht komt, kan dit leiden tot een schedelbasisfractuur (Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer e.a., 2003). Daarnaast kan iemand door de kracht van de explosie ook tegen een object worden gestuwd. Afhankelijk van de vorm en hardheid van het object en de snelheid van de botsing, kan stomp- of penetrerend letsel worden veroorzaakt (Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer e.a., 2003). Daarnaast kunnen er ook botbreuken ontstaan door botsen en vallen (zie bijlage 1A regel 120). Tot slot wordt in het Nederlands Tijdschrift voor de Geneeskunde (Giard & Overbeke, 2006) gesteld dat er ook traumatische amputaties kunnen plaatsvinden, wanneer mensen door de lucht geslingerd worden. Dit is echter gebaseerd op bomaanslagen, waarbij het de vraag is of de beschreven gevolgen ook relevant zijn bij een explosie met gevaarlijke stoffen vanuit lijnbronnen.

5.2 Relatie tussen explosie, brand en het vrijkomen van gevaarlijke stoffen

Naast de gevolgen die de druk- of schokgolf heeft voor de mens, kan een explosie ook samengaan met andere gevaarlijke situaties als brand en het vrijkomen van gevaarlijke stoffen. Dit kan op zijn beurt ook weer gevolgen hebben voor de mens. Het is daarom van belang om ook aandacht te besteden aan de samenhang tussen deze scenario's en de gevolgen die het mogelijk kan hebben voor de mens.

5.2.1 Brand en de gevolgen voor de mens

Brand kan enerzijds een explosie veroorzaken, doordat het drukopbouw geeft waardoor een omhulling kan bezwijken. Echter hoeft er geen brand te zijn om een explosie te krijgen. Wel kan het zo zijn dat bij de explosie ontvlambaar materiaal vrijkomt dat ontbrandt. Er is dan wederom sprake van brand. Deze

brand zou kunnen leiden tot secundaire explosies (door de drukopbouw die de brand veroorzaakt). Daarnaast kan de brand ook overslaan op objecten in de omgeving, waardoor secundaire branden kunnen ontstaan (Lees, 2012).

Brand kent twee belangrijke elementen die impact kunnen hebben op de mens. Dit zijn hittestraling en eventueel contact met de vlammen van de brand. Hittestraling kan leiden tot brandwonden en trauma van de luchtwegen (zie bijlage 1A regel 40 en 45). Vlamcontact kan wederom leiden tot brandwonden. Ook zou het vrijkomen van rook bij een brand leiden tot toxicatie, wanneer de rook geïnhaleerd wordt (Rinske Keuken, persoonlijke communicatie, 12 maart 2019, zie bijlage 1F regel 10 en 35). Slachtoffers met brandwonden zullen, naarmate de ernst van de wonden groter is, specialistische zorg nodig hebben (zie bijlage 1A regel 45).

Tankwagen explodeert in Tarragona

In 1978 raakt een tankwagen met 43.000 liter propaan van de weg in Tarragona (Spanje), kantelt, en explodeert in de vorm van een BLEVE. Brandend gas schiet een nabijgelegen camping op wat een kettingreactie aan explosies van butagasstelletjes veroorzaakt. De eerste explosie is zo krachtig dat sommige mensen de zee in worden geworpen. 102 mensen overlijden direct in de vuurzee en 130 mensen raken zwaar gewond. Uiteindelijk vallen er 216 doden (Reformatorisch Dagblad, 1978).



Figuur 7 Camping Los Alfaques in Spanje (Bendrihem, 1978)

5.2.2 Vrijkomen van gevaarlijke stoffen en de gevolgen voor de mens

In het geval van een explosie zal maar een gedeelte van de stof verbranden. Het vrijkomen van gevaarlijke stoffen kan direct gevolgen hebben voor de mens, maar kan ook leiden tot vertraagde explosies. Deze kunnen op de volgende wijze ontstaan (Lees, 2012):

- *Insluiting in een uitwendig object:* gedeeltelijke omsluiting (omhulling), waardoor drukopbouw ontstaat;
- *Turbulentie onder invloed van objecten:* onder invloed van objecten kan drukopbouw ontstaan. De objecten veroorzaken wervels waardoor drukopbouw plaatsvindt.

In het 'gele boek' van TNO (van den Bosch e.a., 1996) zijn potentiële bronnen voor een sterke explosie genoemd (pagina 5.48).

De directe gevolgen van het vrijkomen van gevaarlijke stoffen voor de mens, zijn inhalatie, ingestie (via de mond binnenkrijgen van gevaarlijke stoffen) en huidcontact (zie bijlage 1F regel 25). Huidcontact en ingestie zullen vooral spelen bij mensen die dicht tot de bron staan. Dit kunnen bijvoorbeeld hulpverleners zijn die dicht bij de bron komen voor de bestrijding en hulpverlening. Huidcontact met gevaarlijke stoffen zou, afhankelijk van het type stof, kunnen leiden tot brandwonden. Verder van de

bron af is vooral inhalatie van gevaarlijke stoffen een scenario om rekening mee te houden. Er kan dan, net als bij ingestie en huidcontact, toxicatie plaatsvinden (zie bijlage 1A regel 50).

Explosies La Voulte sur Rhône

In 1993 ontspoord er in Frankrijk een trein met koolwaterstoffen. De trein lekt brandstof na het ontsporen en veroorzaakt een hevig vuur. 15 à 20 minuten later kantelt een van de wagens en de zijkant van de wagen splijt open. Een explosie en een vuurbal zijn het gevolg. Brandende stromen koolwaterstoffen komen in het rioleringsstelsel terecht en veroorzaken een reeks nieuwe explosies. Zes mensen raken gewond (Bureau for Analysis of Industrial Risks and Pollutions, z.d.)



Figuur 8 La Voulte sur Rhône 1993 (Le Dauphiné Libéré, 1993)

5.3 Psychologische gevolgen

In de vorige paragrafen is gekeken naar de fysieke gevolgen die een explosie kan hebben voor de mens. Naast de fysieke gevolgen kan een explosie ook psychologische gevolgen hebben voor de betrokkenen.

Erik De Soir (2015) is doctor in de psychologie (Utrecht) en in de sociale en militaire wetenschappen (Koninklijke Militaire School) en schreef een artikel over de geestelijke gezondheidsproblemen als gevolg van een explosie van een gasleiding in Gellingen (België). In het artikel stelt hij dat de psychologische gevolgen van een ontploffing zich voornamelijk situeren op het vlak van de psychotraumatologie. Dit houdt in dat er sprake is van indringende herbelevingen van de explosie, actief vermijdingsgedrag met betrekking tot mensen, plaatsen of activiteiten die opnieuw aan de ramp doen denken, een gewijzigd wereldbeeld, een veranderde stemming en een blijvende verhoogde waakzaamheid en activatie. Dit laatste is voornamelijk op momenten waarop de angst voor herhaling ontstaat aanwezig. De zojuist genoemde symptomen wijzen op een posttraumatische stressstoornis (PTSS), wanneer de symptomen meer dan een maand aanwezig blijven en het sociaal en professioneel functioneren van de getroffensten verstoren.

Uit de empirische studie die is gedaan naar de ramp, bleek een klein gedeelte van de overlevenden van de ramp te lijden aan PTSS. Bij de volwassen overlevenden leed 6,6% na 14 maanden na de ramp nog aan PTSS. De risicofactoren hangen volgens De Soir samen met peritraumatische dissociatie (verlies aan integratie van de beleving en bewustzijnsverandering zoals verder in dit artikel beschreven is), de mate van blootstelling aan de ramp, de voldoening over de gekregen sociale steun en de ernst van de symptomen bij een eerste meting. Bij kinderen die betrokken waren bij de ramp, lag het percentage na 14 maanden op 4,3 %. Voor deze groep waren de belangrijkste risicofactoren de mate van blootstelling, de ervaren bedreiging en peritraumatische dissociatie.

Gasexplosie Gellingen

Op 30 juli 2004 vindt in Gellingen (België) een explosie plaats van een gasleiding. Er komen 24 mensen om door de gasexplosie en de grote brand die volgt. Onder de dodelijke slachtoffers vallen vijf brandweermannen en een politieagent. Daarnaast raken 132 mensen gewond. Er zijn met name veel slachtoffers van brandwonden. Daarnaast heeft de ramp een grote emotionele impact op zowel de getroffen en, als ook op de hulpdiensten. De emotionele impact bij de brandweelieden hangt samen met de ervaren levensbedreiging, maar vooral ook met het verlies van vijf collega's. De emotionele impact op het personeel van ziekenhuizen wordt, met name, veroorzaakt door de massieve toestroom van slachtoffers met ernstige brandwonden en hun mate van lijden (De Soir, 2015).



Figuur 9 Krater na de explosie Gellingen (SSC BV, 2010)

5.4 Verminderde zelfredzaamheid

Tijdens de interviews die gehouden zijn voor dit onderzoek, is het thema verminderde zelfredzaamheid aan bod gekomen. Aangegeven werd dat mensen na een explosie niet in staat kunnen zijn om te vluchten, bijvoorbeeld omdat ze verward zijn of omdat hun trommelvliezen gescheurd zijn en ze geen geluidsignalen meer opvangen (René van Santvoort, persoonlijke communicatie, 19 maart 2019, zie bijlage 1E regel 45). Zoals we eerder in dit hoofdstuk hebben gesteld, is één van de directe gevolgen van de drukgolf van een explosie dat de trommelvliezen kunnen scheuren. In dat geval kunnen deze mensen niet bereikt worden met geluidssignalen. TNO heeft onderzoek gedaan naar de relatie tussen letsel, vaardigheden en zelfredzaamheid (Trijssenaar e.a., 2011). Bij het scoren van het letsel is gebruik gemaakt van de Abbreviated Injury Scale (AIS). De AIS geven de ernst van het letsel weer bij een gezond individu. Er wordt dus geen rekening gehouden met letsels of ziektes die al aanwezig zijn. Daarnaast worden lange-termijn uitkomsten niet meegenomen. In het onderzoek wordt daarnaast gebruik gemaakt van een lijst met specifieke vaardigheden die gebruikt wordt om een inschatting te maken over de restcapaciteit van een militair na een incident. Deze zijn gekoppeld aan de voor zelfredzaamheid een rol spelende aspecten: waarnemen (zicht en gehoor), denken (mentaal) en handelen (fysiek en uithoudingsvermogen).

Tot slot is er binnen het onderzoek van TNO gebruik gemaakt van de volgende schaalverdeling voor zelfredzaamheid (Trijssenaar e.a., 2011):

- Zelfredzaam: iemand heeft geen of nauwelijks letsel en is volledig zelfredzaam
- Beperkt zelfredzaam: letsel is van dien aard dat persoon nog beperkt zelfredzaam is.
- Niet zelfredzaam: letsel is van dien aard dat de persoon 100% belemmerd is in zijn zelfredzaamheid.

Onder zelfredzaamheid wordt hierbij verstaan: vermogens en handelingen van burgers om incidenten te voorkomen of te beheersen, om zichzelf én anderen te kunnen helpen de gevolgen van het incident te beperken. Hierbij rekening houdend met het vermogen om te vluchten na blootstelling aan de effecten van een explosie (Trijsenaar e.a., 2011).

In bijlage 5 is een tabel gegeven met daarin de relatie tussen letsel, vaardigheden en zelfredzaamheid. Belangrijk hierbij is dat aan alle voorwaarden met betrekking tot letselernst moet worden voldaan, om de gerelateerde vaardigheid te hebben. Overigens zijn de psychische aspecten niet meegenomen in het onderzoek van TNO. Wel wordt aangegeven dat deze aspecten een grote rol spelen op de mate van zelfredzaamheid.

5.5 Conclusie

Afhankelijk van het type explosie zijn er verschillende gevolgen die invloed hebben op de mens. Hoewel overdruk kan leiden tot een barotrauma, kan over het algemeen gesteld worden dat mensen goed in staat zijn de drukgolf op te vangen en zijn zij beter bestand tegen dit directe gevolg van de explosie dan gebouwen. Scherven en vliegvuil dat ontstaan door de drukgolf kunnen letsel veroorzaken. Ook kunnen de scenario's brand en het vrijkomen van gevaarlijke stoffen in beeld komen bij een explosiescenario. Daarnaast kan een explosie ook vertraagde explosies, secundaire explosies en secundaire branden tot gevolg hebben. Door de verscheidenheid aan gevolgen en de verschillende letsels die veroorzaakt worden door deze gevolgen, is het waarschijnlijk dat men bij een explosie te maken krijgt met multitrauma patiënten. Dit heeft gevolgen voor de wijze waarop de patiënten moeten worden behandeld. Ook moet rekening gehouden worden met de psychologische impact van het incident en de verminderde zelfredzaamheid als gevolg van de explosie. Of slachtoffers van een explosie overlijden als gevolg van het opgelopen letsel, is onder andere afhankelijk van de aard van het letsel en de snelheid en kwaliteit van de medische zorg die na het incident wordt geboden.

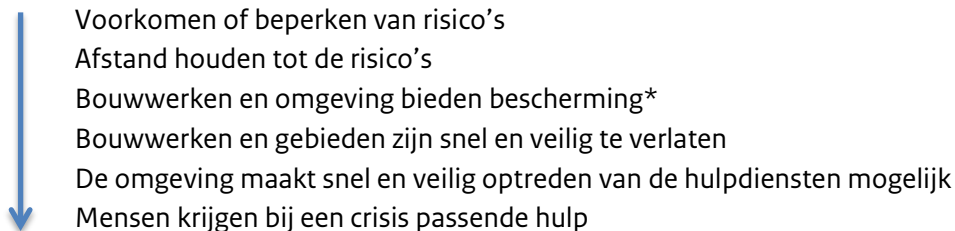
In het volgende hoofdstuk zal worden behandeld hoe de gevolgen voor de mens, zoals beschreven in dit hoofdstuk, voorkomen of beperkt kunnen worden door afstand te houden tot de risicobron, te vluchten voor het gevaar of te schuilen voor het gevaar.

6 Bescherming van de mens

In hoofdstuk 5 is gekeken naar de gevolgen die een explosie heeft voor de mens. De resultaten van hoofdstuk 5 zijn verwerkt in een vlinderdasmodel (bijlage 2). In dit hoofdstuk staan deze beschermende maatregelen en de factoren die daarbij van invloed zijn centraal. Het vlinderdasmodel is aangevuld met de resultaten uit dit hoofdstuk (bijlage 3). In bijlage 4 is een overzicht te vinden van de factoren die naar voren zijn gekomen in de analyse van de maatregelen in dit hoofdstuk.

6.1 Stappen in het bieden van bescherming

De veiligheidsregio's hebben ontwerpprincipes voor veiligheid in de leefomgeving opgesteld, deze principes werken als een stappenbenadering (Brandweer Nederland, 2018). Bij de ontwerpprincipes wordt de volgende volgorde aangehouden:



* Onder 'bouwwerken en omgeving bieden bescherming', kan zowel gedacht worden aan het waarderen van de bestaande bescherming als ook het overwegen van aanvullende bescherming. Dat kan door bewuste keuzes te maken in bijvoorbeeld gebiedsindeling, locatiekeuzes, manier van bouw, het type bebouwing en de inrichting van gebouwen.

In dit onderzoek wordt geen aandacht besteed aan het voorkomen of beperken van risico's met gevaarlijke stoffen. De overige ontwerpprincipes worden nader geanalyseerd in paragraaf 6.2 t/m 6.5

6.2 Afstand houden tot de risico's

Als de veiligheid bij de risicobron niet (verder) verhoogd kan worden, dient de omgeving zodanig ingericht te zijn dat het risico voor de omgeving wordt beperkt. Dit kan door afstand te realiseren tussen de risicobron en (zeer kwetsbare en kwetsbare) objecten. De gevolgen nemen kwadratisch af met de afstand tot de bron (Suddle, 2004). Ook kunnen domino effecten, zoals secundaire explosies en branden worden voorkomen door onderlinge afstand tussen verschillende risicobronnen aan te houden.

Uit de interviews met experts en de verschillende literatuur die zij hebben aangereikt, zijn een aantal vormen van afstand houden naar voren gekomen:

- Verplaatsen van de risicobron;
- Verplaatsen van een (zeer kwetsbaar of kwetsbaar) object;
- Bovenwinds situeren van (zeer kwetsbaar of kwetsbaar) objecten.

Daarnaast kan ook afstand worden gecreëerd in tijd, bijvoorbeeld wanneer er venstertijden worden toegepast. Een ander voorbeeld is het plaatsen van gebouwen waar alleen overdag mensen aanwezig zijn (zoals kantoren), langs een spoorlijn waar 's nachts vervoer van gevaarlijke stoffen plaatsvindt.

6.2.1 Afstand houden in relatie tot de drukgolf

Om te weten wat een voldoende veilige afstand is in het geval van een explosie, zal in kaart moeten worden gebracht wat het 'worst case' scenario is op de specifieke locatie en welke impuls (de druk in combinatie met de tijd tijdens een positieve fase) er dan verwacht kan worden.

Eerder werd al gesteld dat een drukgolf een barotrauma kan veroorzaken maar ook kan leiden tot het bezwijken van objecten en het door de lucht geslingerd worden van mensen en objecten. Naarmate de afstand tot de bron toeneemt, neemt de overdruk af. In het Scenarioboek Externe Veiligheid (LEV, 2019) zijn de effectafstanden van hittestraling en overdruk bij de explosiescenario's warme BLEVE, koude BLEVE en gaswolkexplosie inzichtelijk uitgewerkt voor verschillende situaties. Voor deze modellering is gebruik gemaakt van de modelleringsoftware TNO Effects 10.0.6. De effectafstanden voor scherfwerking en vliegvuil zijn hierin echter niet meegenomen.

Echter heeft de omgeving ook invloed op het gedrag van een drukgolf. Zo kunnen gebouwen reflecties veroorzaken, waardoor andere gebouwen op een andere manier worden belast dan wanneer een drukgolf in een vrij veld plaatsvindt. Hoe de drukgolf zich verspreidt in een gebied, hangt dus samen met de inrichting van de omgeving (IPO & Brabant veiliger, 2009).

6.2.2 Afstand houden in relatie tot andere scenario's

Zoals gezegd is dit onderzoek gericht op de gevolgen van een explosie en zal daardoor minder aandacht besteed worden aan de gevolgen van brand en het vrijkomen van gevaarlijke stoffen. Toch wordt benadrukt dat afstand houden ook bij deze twee scenario's bescherming kan bieden aan de mens. Tevens kan een explosie ook samengaan met een vuurbal, waarbij afstand houden ook bescherming biedt. In de situatie van een warme BLEVE bij een treinwagon, wordt uitgegaan van 100 % letaliteit binnen een straal van 175 meter van de wagon. Er wordt verondersteld dat alle aanwezigen die door een vuurbal worden getroffen komen te overlijden en dat er daarnaast dodelijke slachtoffers vallen op afstand van de vuurbal door hittestraling (Arcadis, 2005). Hierbij wordt er echter van uitgegaan dat de mensen die blootgesteld worden geen bescherming hebben van kleding, gebouwen, de omgeving et cetera. Als deze bescherming wel geboden wordt, zullen de gevolgen voor de mens sterk verminderd worden. Het is dus niet zo dat er geen beschermende maatregelen getroffen kunnen worden op een dergelijke afstand tot een incident.

6.2.3 Afstand houden bij lijnbronnen

Tot nu toe is er bij de analyse van onderzoeksresultaten nog geen aandacht besteed aan het feit dat vervoer van gevaarlijke stoffen over spoor, weg, water en via buisleidingen, lijnbronnen zijn en geen puntbronnen. Bij puntbronnen is het relatief eenvoudig om de afstand tussen de risicobron en objecten ten in de omgeving te bepalen. Bij lijnbronnen is dit ingewikkelder, omdat je niet weet waar het incident zich voor zal doen. In de catalogus bouwkundige maatregelen externe veiligheid van IPO & Brabant veiliger (2009) wordt afstand bij een lijnbron uitgelegd aan de hand van een 'rode driehoek' (zie figuur 10). Zij stellen dat bij lijnbronnen de kans groter is dat een incident op grotere afstand plaatsvindt dan op de kortste afstand. Een maatregel die pas effectief is vanaf een bepaalde afstand, kan dus wel werken in de gele of oranje gedeelten van de driehoek, maar niet in het rode gedeelte van de driehoek. Wanneer uitgegaan wordt van de kortste afstand, zouden bepaalde maatregelen misschien niet genomen worden terwijl die wel degelijk bescherming kunnen bieden bij een lijnbron. Daarnaast wordt de driehoek smaller naarmate de afstand tot de lijnbron toeneemt.



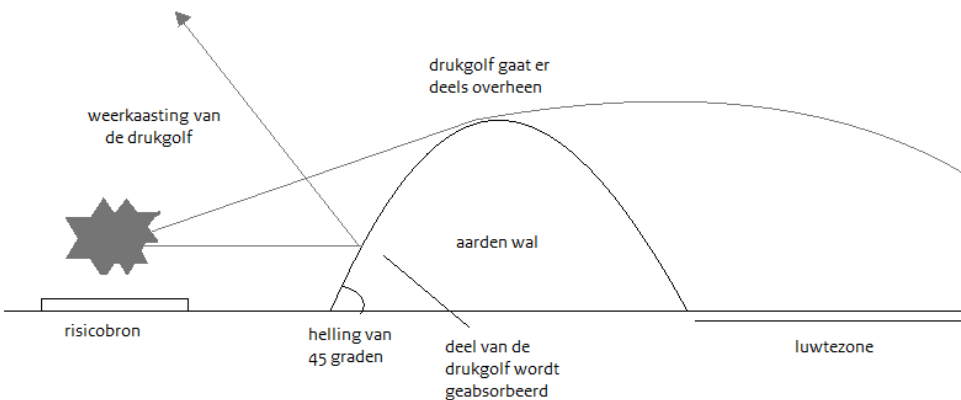
Figuur 10 De 'rode driehoek' (IPO & Brabant veiliger, 2009)

6.3 Bouwwerken en omgeving bieden bescherming

Zoals eerder al gesteld werd, is afstand houden tot de risicobron niet altijd een maatregel die realiseerbaar is in Nederland. In paragraaf 6.3 t/m 6.5 zullen daarom andere maatregelen worden besproken die mensen bescherming kunnen bieden bij een explosie met gevaarlijke stoffen.

6.3.1 Afbuigen en absorberen van de drukgolf

Door een aarden wal vlak naast de risicobron of vlak voor het te beschermen object te plaatsen, kan een gebied achter de aarden wal in een bepaalde mate beschermd worden tegen de gevolgen van de drukgolf. In het TNO-rapport over de vuurwerkexplosie van Culemborg is te lezen dat net als bij wind, luwtezones ontstaan achter obstakels. Er wordt gesteld dat deze luwtezone bij een dijklichaam drie à vijf maal de hoogte van de dijk is (Mercx, 1991). Een deel van de drukgolf zal geabsorbeerd worden door de aarden wal en een deel zal weerkaatsen (zie figuur 11). Een betonnen muur zou eenzelfde effect kunnen hebben. Hierbij moet wel voorkomen worden dat de muur vliegvuil aflevert. De drukgolf zal echter over de aarden wal of betonnen muur heel vloeien, waardoor op een bepaald punt de gevolgen van de drukgolf weer op het oude niveau zijn. Bij een betonnen muur zou de reductie vanaf 2 à 3 keer de hoogte van de muur 0% zijn (Suddle, 2004).



Figuur 11 Invloed van een aarden wal op de drukgolf

Daarnaast zou het verdiept aanleggen van het spoor of van de weg ervoor kunnen zorgen dat de drukgolf gereduceerd wordt. Er moet dan wel aandacht zijn voor de grondschock, maar deze is kleiner dan de luchtschock (Suddle, 2004). De kosten van deze maatregel zijn echter hoog.

Voor een BLEVE met een vuurbal zal een verdiepte aanleg, een betonnen muur of een aarden wal (of een combinatie) alleen effect hebben op de drukgolf. De omvang van de vuurbal is zo groot, dat aangenomen kan worden dat deze altijd over de maatregel heen zal reiken (Suddle, 2004).

6.3.2 Maatregelen aan gebouwen

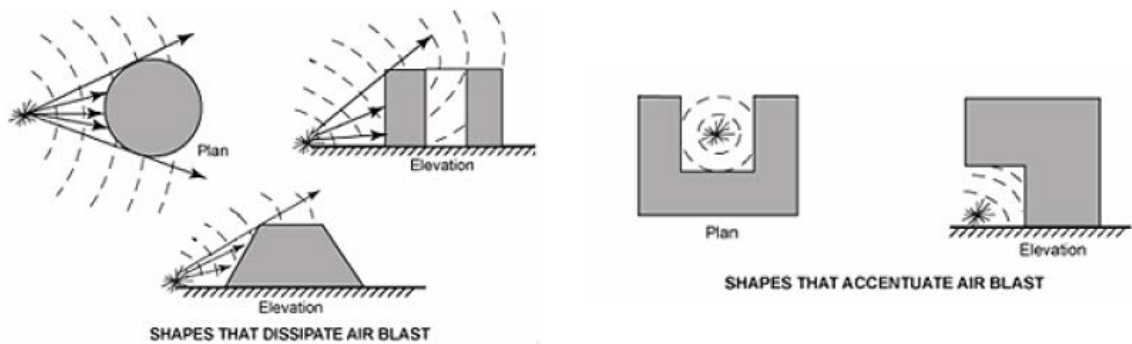
Daarnaast kunnen gebouwen in de omgeving ook bescherming bieden bij een explosie met gevaarlijke stoffen. Dit zodat de mensen in de omgeving van een risicobron bewust of onbewust kunnen schuilen in het geval van een explosie. Voorkomen moet worden dat de gebouwen (deels) instorten en/of ruiten breken en voor scherfwerking zorgen. Wanneer gebouwen blijven staan, bieden zij voldoende bescherming tegen overdruk voor mensen binnen het gebouw (Sorkale, 2015). Mogelijke maatregelen aan gebouwen tegen de drukgolf kunnen genomen worden op het gebied van (Arbeidsinspectie, 1989):

- Gebouwworm;
- Gebouwhoogte (met een laag gebouw zal de kans op opsluiting en turbulentie van een gaswolk verkleind worden en is het daarnaast gemakkelijker om een stevigere constructie te realiseren);
- Materiaalkeuze;
- Openingen aan gebouwen (ramen, deuren en doorvoeringen kunnen worden gezien als zwakke plekken en verdienen daarom extra aandacht).

Een aantal van deze maatregelen zal nader toegelicht worden. Ook zal ingegaan worden op maatregelen ten behoeve van ventilatiereductie.

Gebouwworm

De vorm van een gebouw is van invloed op de explosiebelasting. Zoals in figuur 12 te zien is, treden er bij luifels, uitkragingen en naar binnen tredende hoeken, reflecties op. Hierdoor is de gereflecteerde piekoverdruk op de gevel veel hoger dan de invallende piekoverdruk. Wanneer een drukgolf tussen twee gebouwen 'opgesloten' zit, leidt dit eveneens tot een hogere belasting. Bij bolle gebouwvormen zal de gereflecteerde druk sneller afnemen (Frencken, 2013).



Figuur 12 Invloed van gebouwworm op de explosiebelasting (Hinman, 2003)

Ramen en materiaalkeuze

De toepasbaarheid van de maatregel hangt af van de impuls die verwacht kan worden op een bepaalde locatie. Op korte afstand van de explosie zijn constructieve maatregelen weinig zinvol, omdat de druk te hoog is. Verder van de explosie af kan dit type maatregelen wel aanvullende bescherming bieden (Sorkale, 2015). Dit kan bijvoorbeeld door het toepassen van gehard glas of gelaagd glas met PVB-folie (polyvinylbutyral). In paragraaf 6.2.3 is uitgelegd hoe afstand van invloed is op maatregelen bij lijnbronnen. In figuur 13 is te zien hoe de scherfwerking verminderd kan worden door deze twee maatregelen. Gehard glas heeft een verhoogde sterkte en in geval van breuk valt het glas uiteen in kleine fragmenten zonder grote scherpe randen. De kleine glasdeeltjes worden in het geval van een explosie wel met hoge snelheid de achterliggende ruimte in geblazen, waardoor er alsnog letsel opgelopen kan worden. Echter is het gevaar hiervan aanzienlijk kleiner dan wanneer ongehard glas door een explosie bezwijkt. Met PVB-folie wordt voorkomen dat glasscherven de ruimte in worden geblazen, doordat het gebroken glas hecht aan de folie. Echter moet niet alleen gekeken worden naar het type beglazing, maar ook of de beglazing in het geval van een explosie in de sponning blijft zitten. Constructieve siliconenvoegen kunnen hiervoor toegepast worden (Frencken, 2013). Daarnaast moet de gevel zelf bestand zijn tegen de drukgolf en moet ook de achterliggende constructie sterk genoeg zijn om de belasting van de gevel op te vangen. Gewapend beton en staalplaten zijn materialen met goede eigenschappen om de klap van een explosie op te vangen. De informatie die in deze alinea is gegeven is, werd ook bevestigd tijdens een interview met een expert op het gebied van omgevingsveiligheid (Luc Stoot, persoonlijke communicatie, 2 mei 2019, zie bijlage 11 regel 25-45).



Figuur 13 Verskil tussen ongehard glas (links), gehard glas (midden) en explosiebestendig gelaagd glas met PVB-folie (rechts) (Cormie e.a., 2009; Morris, 2009; Focus Online, 2011)

Ventilatiereductie

Ventilatiereductie is niet alleen een effectieve maatregel bij een gifwolk, maar kan ook toegepast worden om te voorkomen dat er gaswolkexplosies ontstaan door insluiting in gebouwen. Een aantal maatregelen dat genomen kan worden zijn:

- Mechanische ventilatie die op afstand (vanuit de meldkamer) uit te schakelen is. Dit wordt bediening op Afstand – Ventilatie (BOA-V) genoemd (IFV, 2010). Daarnaast dient de mechanische ventilatie ook handmatig uit te schakelen zijn en dienen bewoners of de BHV organisatie deze te bedienen indien nodig;
- Gasdetectie bij de luchttoevoer, waarna een gasalarm afgaat en automatisch de mechanische ventilatie wordt uitgeschakeld;
- Plaatsing inlaat ventilatie opening aan risicoluwe zijde en een hoge plaatsing (Sorkale, 2015).

6.3.3 Tegengaan van scherfwerking en vliegvuil

In het vorige hoofdstuk werd gesteld dat scherven en vliegvuil ernstig tot dodelijk letsel kunnen veroorzaken. In deze paragraaf wordt kort aandacht besteed aan het voorkomen van scherven en vliegvuil bij een explosie. In het ontwerp van de omgeving kan rekening gehouden worden met het plaatsen van objecten die voor vliegvuil kunnen zorgen. Hierbij kan gedacht worden aan een betonnen geluidsscherm dat uit elkaar spat bij een explosie, maar ook aan losliggende materialen (zoals grind) die met de explosiewind door de lucht geslingerd worden. Zeker omdat deze gevolgen van een explosie ernstig letsel op kan leveren, is het aan te raden om bij de inrichting van de omgeving rekening te houden met het mogelijk ontstaan van scherven en vliegvuil bij een explosie. Daarnaast kunnen maatregelen genomen worden om te voorkomen dat glasscherven door de explosie door de lucht worden geblazen (zie 6.3.2).

6.3.4 Effectiviteit van constructieve maatregelen

Uit gesprekken met diverse veiligheidsregio's (Amsterdam-Amstelland, Groningen en Brabant-Noord) kwam naar voren dat zij steeds vaker de vraag krijgen wat er technisch voor nodig is om maatregelen effectief te laten zijn en welk effect maatregelen uitoefenen op het scenario. Specialistische kennis over de (kosten)effectiviteit van bouwmaatregelen bij explosies heeft de veiligheidsregio niet in huis. Er lijkt

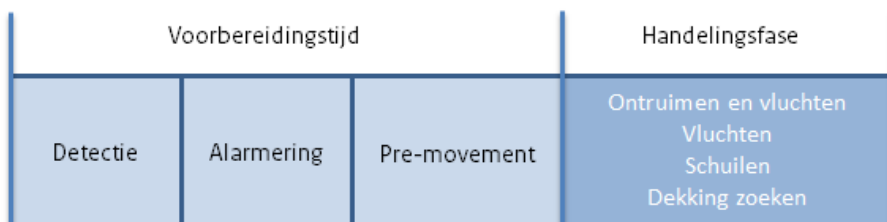
ook onvoldoende bruikbaar onderzoek gedaan te zijn naar de veiligheidswinst van technische maatregelen bij explosies met gevaarlijke stoffen. Dit maakt het lastig om te onderbouwen dat een bepaalde maatregel slachtoffers bij een explosie kan voorkomen of mitigeren. Ook naar het voorkomen of mitigeren van letsel door scherven en vliegvuil zou nader onderzoek gedaan moeten worden, om tot bruikbare en effectieve maatregelen te komen.

6.4 Bouwwerken en gebieden zijn snel en veilig te verlaten

Bij het snel en veilig verlaten van gebouwen en gebieden, speelt de tijdsfactor een grote rol. In veel gevallen zal er geen tijd zijn om bewust te schuilen of te vluchten. In het geval van een warme BLEVE of een gaswolkexplosie is er mogelijk wel tijd om te handelen (zie bijlage 1J regel 90).

6.4.1 Benodigde tijd versus beschikbare tijd

Er moet gekeken worden naar de beschikbare tijd en de benodigde tijd. De beschikbare tijd bij een warme BLEVE met een tankauto is afhankelijk van de coating van de tank. Zonder coating kan de beschikbare tijd geschat worden op 5-25 minuten en met coating op maximaal 75 minuten (Molag e.a., 2005). Tankauto's die LPG tankstations bevoorraden hebben zo'n sterkere hittewerende coating (Menno de Jonge & Mark-Olaf Sorkale, persoonlijke communicatie, 24 april 2019, zie bijlage 1G regel 35 en 40). Als we kijken naar de benodigde tijd, zijn er verschillende fasen te onderscheiden (zie figuur 14). Hoeveel tijd de verschillende fasen in beslag nemen, is afhankelijk van het type gebouw (woningen of kantoren), de alertheid van mensen (Trijssenaar e.a., 2013) en de vluchtafstand die men af moet leggen (Trijssenaar & Reinders, 2017). Bij een explosie kan er enige tijd zijn om te handelen, maar waarschijnlijk is deze tijd in veel gevallen te kort voor hulpdiensten om burgers te alarmeren. Er zal uitgegaan moeten worden van het eigen initiatief van mensen. Risicocommunicatie kan hierbij een grote rol spelen (zie bijlage 1J regel 95).



Figuur 14 Te onderscheiden onderdelen van de benodigde tijd (Trijssenaar e.a., 2013)

Zowel de beschikbare tijd als de benodigde tijd zou enigszins vergroot kunnen worden door maatregelen te treffen. Zo zou de beschikbare tijd vergroot kunnen worden door aanpassingen te doen aan de tank of ketel, waardoor deze beter bestand is tegen hittestraling. Daarnaast kan de benodigde tijd verkort worden door de voorbereidingstijd en de handelingstijd te verkorten. In Bevolkingszorg op orde 2.0 staat de prestatie-eis dat uiterlijk 30 minuten na aanvang van het incident feitelijke informatie beschikbaar wordt gesteld aan de betrokkenen, zodat zij zelfredzaam kunnen handelen (Veiligheidsberaad, 2014). In het geval van een dreigende explosie zal 30 minuten in veel gevallen te lang zijn en zal een handelingsperspectief te laat komen. Door deze tijd te verkorten, kunnen mensen misschien wel op tijd de benodigde informatie krijgen en zelfredzaam handelen. Voor secundaire gevolgen als rook, brand of een tweede explosie kan ook gevlucht of bewust geschuild worden. Wel geldt dan dat mensen (nog) zelfredzaam moeten zijn. In paragraaf 5.4 is gesteld dat een explosie kan leiden tot verminderde zelfredzaamheid, indien de mensen niet of onvoldoende beschermd zijn tegen

de gevolgen van de explosie. Om te kunnen handelen (schuilen of vluchten) na een explosie zullen mensen dus een vorm van bescherming nodig hebben tijdens de explosie.

6.4.2 Vluchtwegen

Bij het plaatsen van vluchtwegen is het van belang dat bewoners onder dekking kunnen vluchten. In het geval van een dreigende explosie (bijvoorbeeld bij een dreigende warme BLEVE of gaswolkexplosie) kunnen bewoners van de risicobron af vluchten. Als zij geen dekking hebben tijdens het vluchten, kan de explosie wellicht meer schade aanrichten dan wanneer de bewoners binnen waren gebleven (zie bijlage 1J regel 105).

6.5 Optreden van hulpdiensten en passende hulp

Van het optreden van hulpdiensten zal in de beginfase van het incident nog geen sprake zijn. De hulpdiensten hebben een opkomsttijd en daardoor zullen getroffen in de eerste minuten na een explosie op zichzelf aangewezen zijn. Echter kunnen ze door opgelopen letsel, verminderd zelfredzaam zijn (zie paragraaf 5.4). Het inzetten van de hulpdiensten bij een dreigende (secundaire of vertraagde) explosie is daarnaast ook een lastig punt. Dit levert namelijk veiligheidsrisico's op voor de medewerkers van de hulpdiensten. Als laatste zou passende (medische) hulp de gevolgen van een explosie voor de mens kunnen beperken. In het vorige hoofdstuk hebben we kunnen zien tot welke typen letsel een explosie kan leiden. Mogelijk is er in het geval van een explosie een groot aantal slachtoffers dat snel een behandeling nodig heeft. De capaciteit bij de geneeskundige hulp dient aan te sluiten op het te verwachte slachtofferbeeld, om de gevolgen van een explosie voor de mens enigszins te kunnen beperken. Uit casuïstiek blijkt dat in veel gevallen burgers ook initiatief nemen bij een ramp (Starmans & Oberijé, 2016). Zo was er na de Vuurwerkkramp in Enschede sprake van grote inzet van vrijwilligers, die zich met name met de opvang en verzorging van slachtoffers bezighielden (Commissie onderzoek Vuurwerkkramp, 2001). Hulpdiensten dienen voorbereid te zijn op deze burgerparticipatie na rampen.

6.6 Conclusie

Om tot bescherming van de mens te komen, is het van belang om in beeld te hebben hoe de gevaren zich verspreiden naar de omgeving. In dit hoofdstuk is daarom aandacht besteed aan de wijze waarop blast, warmte, fragmenten en gas zich naar de omgeving verspreiden. Afstand bepaalt de mate van blootstelling aan overdruk en hittestraling, maar daarmee ook of bepaalde maatregelen bescherming kunnen bieden. Op korte afstand tot de bron hebben gebouwmaatregelen weinig effect, omdat de blootstelling aan het gebouw daar te hoog is. Daarnaast is dicht bij de bron de vluchtafstand naar een veilige plek groter, waardoor de benodigde tijd om te vluchten langer wordt. Bij lijnbronnen kan een incident zowel op korte afstand plaatsvinden, als ook op langere afstand. Om deze reden kunnen maatregelen op korte afstand van de lijnbron bescherming bieden wanneer een incident verder weg plaatsvindt. Dit is een verschil ten opzichte van bescherming bij puntbronnen. Wat daarnaast van belang is, is dat er scenario's zijn waarbij geen tijd is voorafgaand aan de explosie, waardoor het geven van een handelingsperspectief weinig zinvol is. Ook moet bij het geven van een handelingsperspectief rekening worden gehouden met de zelfredzaamheid van mensen. Het afbuigen en/of absorberen van de drukgolf door bijvoorbeeld een aarden wal te plaatsen, is alleen zinvol als deze vlakbij de risicobron geplaatst wordt of vlak voor het te beschermen object. Dergelijke obstakels hebben weinig effect op een vuurball bij een BLEVE. Tot slot, moet er voorkomen worden dat er vliegvuil wordt gevormd door het obstakel, bijvoorbeeld wanneer het uit elkaar spat.

Conclusie

In dit onderzoek is gezocht naar een antwoord op de probleemstelling: *Hoe kan de mens beschermd worden tegen de gevolgen van een explosie vanuit een lijnbron met gevaarlijke stoffen?*

Allereerst is in kaart gebracht wat de mogelijke gevolgen van een explosie zijn voor de mens. Geconcludeerd kan worden dat, afhankelijk van het specifieke explosiescenario en de omgeving waarin de explosie plaatsvindt, een explosie kan leiden tot zowel verschillende typen fysiek letsel als ook tot psychologische schade. Het fysieke letsel wordt veroorzaakt door de directe impact van de drukgolf op het menselijk lichaam, maar ook door scherfwerking, vliegvuil, vallen/botsen tegen objecten en instorting als gevolg van de drukgolf. Wanneer de drukgolf gepaard gaat met een vlamfront, leiden ook hittestraling en vlamcontact tot fysiek letsel. Daarnaast kan het vrijkomen van gevaarlijke stoffen (waaronder rook) leiden tot inhalatie van, huidcontact met en ingestie van gevaarlijke stoffen. Dit heeft eveneens fysieke gevolgen voor de mens. Bepaalde typen letsels die kunnen ontstaan bij een explosiescenario, vragen om een specialistische behandeling die niet in ieder ziekenhuis uitgevoerd kan worden. Bovendien moet er bij explosiescenario's rekening worden gehouden met multitrauma letsels. Door de letsels die veroorzaakt worden zal ook de zelfredzaamheid van de personen in het getroffen gebied afnemen. Of slachtoffers van een explosie komen te overlijden aan het opgelopen letsel, is onder andere afhankelijk van de aard van het letsel en de snelheid en kwaliteit van de geboden medische zorg na het incident.

Om bescherming te kunnen bieden tegen de gevolgen van een explosie, is het van belang om te weten hoe het gevaar zich naar de omgeving toe verspreidt. De blast plant zich met het geluid voort door de lucht en door de bodem. De blast duwt daarnaast fragmenten (scherven en vliegvuil) voorwaarts of neemt deze mee in de zuiging. Een deel van de explosieve kracht wordt bij een explosie omgezet in warmte, die via straling of stroming bij mensen of objecten terecht kan komen. Wanneer gas ontsnapt uit een omhulling, zal dit meegevoerd worden met de lucht. Om de gevolgen van een drukgolf te voorkomen of te mitigeren, kan de afstand tot de risicobron worden vergroot (dit kan ook door te vluchten), de drukgolf worden afgebogen en/of geabsorbeerd en kan extra stevigheid worden gegeven aan gebouwen tegen instortingsgevaar en vliegvuil.

Verder zijn uit het onderzoek een aantal factoren naar voren gekomen die een rol spelen bij de effectiviteit van maatregelen bij explosies met gevaarlijke stoffen. Deze factoren zijn tijd, afstand (tot het incident), blootstelling, zelfredzaamheid en omgeving. Zo is vluchten en bewust schuilen alleen mogelijk bij scenario's waarbij er tijd is voorafgaand aan de explosie. Wanneer er gevlucht wordt voor secundaire gevolgen na een explosie, is het van belang dat de mensen nog voldoende zelfredzaam zijn om te kunnen vluchten. Ook dient er risicocommunicatie plaats te vinden, zodat men weet hoe er gehandeld moet worden bij een specifiek scenario. Bij het nemen van maatregelen aan gebouwen, moet rekening gehouden worden met de impact van de drukgolf op het gebouw. Dicht bij de risicobron is de druk te hoog en is het niet zinvol om constructieve maatregelen te treffen. Verder van de risicobron af, biedt dit wel bescherming. Bij lijnbronnen kan een incident zowel op korte afstand van een bepaald punt plaatsvinden, als ook op langere afstand van datzelfde punt. Maatregelen op korte afstand van een lijnbron kunnen zo bescherming bieden wanneer een incident verder weg plaatsvindt. Hulpdiensten hebben een beperkte rol in het bestrijden van een (dreigende) explosie. De veiligheid van deze

hulpdiensten komt dan namelijk in gevaar, waardoor optreden niet altijd verstandig zou zijn. Eveneens kan er gekeken worden naar het verwachte slachtofferbeeld en de beschikbare medische capaciteit, met als doel de gevolgen van een explosie met gevaarlijke stoffen nog enigszins te doen beperken.

Tot slot kan geconcludeerd worden dat de juiste toepassing van maatregelen sterk afhankelijk is van het specifieke scenario en de omgeving van de risicobron. Om deze reden lijken er geen generieke uitspraken gedaan te kunnen worden over de effectiviteit van specifieke maatregelen, zonder daarbij gebruik te maken van aannames. Er zal dus lokaal gekeken moeten worden hoe een bepaalde maatregel zal uitpakken bij een explosie op die locatie.

Discussie

Dit onderzoek heeft een beeld opgeleverd van de mogelijke impact van een explosie op de mens. Ook is er gekeken hoe deze impact op de mens beperkt of voorkomen kan worden en welke factoren hierbij een rol kunnen spelen.

In dit onderzoek is maar een klein onderdeel van een groter geheel onderzocht. Zo is enkel gekeken naar de gevolgen van een explosie op de fysieke veiligheid van de mens en zijn andere soorten impact, zoals sociaal-politieke impact niet meegenomen. Ook is in dit onderzoek weinig aandacht besteed aan de psychologische gevolgen van een explosie. Wel is gebleken dat psychologische schade kan ontstaan als gevolg van een dergelijk incident. Tevens is in dit onderzoek geen aandacht besteed aan de nazorg van een ramp als een explosie met gevaarlijke stoffen. Ook dit kan wel degelijke grote vraagstukken met zich meebrengen, waar van tevoren over nagedacht kan worden. Zo werden bij de vuurwerkcramp in Enschede 10.000 personen gedwongen om minstens een nacht elders te overnachten (Commissie onderzoek Vuurwerkcramp, 2001). Vanwege de beschikbare tijd heeft het onderzoek dat heeft plaatsgevonden een beperkt bereik.

Bij het interviewen van experts, is ervan uitgegaan dat hieruit relevante data gehaald kon worden voor het onderzoek. Echter bleek de verwachting over de aanwezige kennis niet altijd overeen te komen met de werkelijke situatie. Hierdoor is er andere data uit de interviews gehaald, dan verwacht. Wel hebben de geïnterviewde personen veel relevante literatuur kunnen aanleveren, die gebruikt is voor dit onderzoek. Door de beperkte data die geïnterviewden konden leveren over de effectiviteit van maatregelen, kunnen daarnaast weinig uitspraken gedaan worden over maatregelen die in de praktijk toegepast zijn en ook aantoonbaar bescherming bieden. Om een succesvolle overgang naar het nieuwe (omgevingsveiligheids)beleid mogelijk te maken, zal kennis over bescherming bij explosies gedeeld moeten worden met partijen die bezig gaan met omgevingsveiligheid.

Specialistische kennis over de werking en effectiviteit van maatregelen bij explosies lijkt schaars te zijn. Voor het onderzoek is geprobeerd complexe literatuur te gebruiken, maar gezien de studieachtergrond waarmee deze scriptie is geschreven, is het lastig gebleken om toegang te krijgen tot deze complexe kennis. Ook is het lastig gebleken om informatie bij experts met specialistische kennis op het gebied van explosies te ontsluiten en in simpelere woorden te vatten. Dit geeft een beeld van de toegankelijkheid van informatie rond explosiescenario's. Ook tijdens de Netwerkdag Omgevingsveiligheid werd aangegeven dat er nog veel te winnen is op het gebied van informatievoorziening over explosiescenario's. Zo werd er aangegeven dat er wel veel informatie te vinden is, maar dat deze niet per se geschikt is voor explosies in relatie tot gevaarlijke stoffen. Hiervoor is nog een vertaalslag nodig. Daarnaast werd aangegeven dat er maar weinig aantoonbare experimenten en tests zijn uitgevoerd. Verder werd gezegd dat het van belang is dat ook niet-experts meegenomen worden.

Voor het onderzoek zijn interviews gehouden met diverse partijen. Echter zijn er door de beperkte tijd keuzes gemaakt in de te benaderen partijen. Zo is er wel contact geweest met Defensie en is er doorverwezen naar diverse Defensie onderdelen die wellicht relevante kennis hebben, maar hebben er geen interviews plaatsgevonden met personen binnen deze Defensieonderdelen. Het is mogelijk dat er relevante kennis bij partijen aanwezig is, maar deze in dit onderzoek niet naar voren zijn gekomen.

De resultaten van dit onderzoek geven denkrichtingen van maatregelen die door experts uit het werkveld zijn gegeven en die in de literatuur zijn genoemd. Echter kan voor de meeste maatregelen nog geen uitspraak gedaan worden over de mate van effectiviteit van de maatregel, omdat kennis hierover ontbreekt of nog onduidelijk is gebleken waardoor de maatregel beïnvloed wordt. Ook is het mogelijk dat er naast de genoemde factoren (die invloed hebben op de effectiviteit van maatregelen), nog andere factoren een rol spelen die niet uit het onderzoek naar voren zijn gekomen. Het huidige onderzoeksverslag geeft wel een eerste beeld van factoren die een rol spelen, waar op voortgebouwd kan worden door andere onderzoekers.

In het volgende hoofdstuk zullen aan de hand van de beperkingen die er bij dit onderzoek golden en de constatering die zijn gedaan, aanbevelingen worden gedaan in de richting van de opdrachtgever.

Aanbevelingen

In dit hoofdstuk worden er, naar aanleiding van het onderzoek, een aantal aanbevelingen gedaan.

Rekening houden met de mate van kennis over explosiescenario's

Uit het onderzoek is gebleken dat kennis over explosiescenario's en beschermende maatregelen niet (of in beperkte mate) bij alle partijen in het werkveld aanwezig is. Een oorzaak daarvan kan zijn dat de inhoud van de genoten opleiding van de functionarissen niet goed aansluit op de adviserende taak die zij hebben op het gebied van bescherming bij explosies. Ook komen explosies met gevaarlijke stoffen in beperkte mate voor. In de richting van onderwijsinstellingen kan geadviseerd worden dit thema onder de aandacht te brengen bij studenten die in het werkveld omgevingsveiligheid terecht komen. Voor het RIVM is het van belang dat zij in hun communicatie over explosiescenario's en beschermende maatregelen, rekening houden met het kennisniveau van verschillende partijen uit het werkveld. Het in beeld brengen van explosiescenario's door middel van beeldmateriaal zou functionarissen op het gebied van omgevingsveiligheid, een betere indruk kunnen geven van de kracht en impact van een explosie. Zo zouden bijvoorbeeld video's gemaakt kunnen worden van verschillende typen explosies, waarbij aangegeven wordt wat de impact van zo'n explosie is op een bepaalde afstand. Tijdens de Netwerkdag Omgevingsveiligheid werd aangegeven dat het visualiseren van explosiescenario's ook bij zou kunnen dragen aan het creëren van draagvlak voor het nemen van maatregelen. Momenteel wordt er eens in de zoveel tijd een dag georganiseerd waarbij getoond wordt wat de kracht van een explosie is, door een explosie te demonstreren op defensieterrein. Door een geïnterviewde is aangegeven dat dit een positief effect heeft gehad en hij hierdoor beter beeld heeft gekregen van explosiescenario's. Activiteiten als demonstraties, maar ook het tonen van animaties (waarin het verloop van een explosiescenario wordt geschetst) tijdens trainingen van het RIVM of gebruik ervan binnen relevante opleidingen, kan bijdragen aan een beter beeld en begrip van explosies met gevaarlijke stoffen. Wellicht kunnen dergelijke acties worden uitgevoerd in samenwerking met onderwijsinstellingen, bijvoorbeeld met hogescholen die Integrale Veiligheidskunde aanbieden en met het Instituut Fysieke Veiligheid die de vakbekwaamheid van functionarissen binnen veiligheidsregio's verzorgen. Wanneer de kennis bij de bedoelde partijen blijft zoals het nu is, zal dat negatieve gevolgen hebben voor de kwaliteit van advisering op het gebied van bescherming bij explosiescenario's.

Aansluiten op de behoeften van potentiële gebruikers van de Maatregelencatalogus

Gebleken is dat veel van de geïnterviewde personen die advies geven op het gebied van omgevingsveiligheid, behoefte hebben aan kwantificering van de effectiviteit en veiligheidswinst van maatregelen in relatie tot explosiescenario's. Mede doordat dat de advisering naar het bevoegd gezag sterker maakt. Slechts enkele geïnterviewden bleken over gespecialiseerde kennis over bescherming bij explosies te beschikken. Zij zouden in de maatregelencatalogus een beeld kunnen schetsen over de mate van effectiviteit van maatregelen en de factoren die daarbij van belang zijn, zodat deze kennis op lokaal niveau meegenomen kan worden. Echter staat dit haaks op de gedachte die het RIVM heeft over haar rol binnen de maatregelencatalogus. Het RIVM wil namelijk voorkomen dat gebruikers van de maatregelencatalogus de maatregelen zien als 'goedgekeurd door het RIVM'. Hierdoor is het RIVM terughoudend over het doen van uitspraken over de effectiviteit. Toch heeft de maatregelencatalogus als doel om ondersteuning te bieden aan het werkveld. Wanneer er in de maatregelencatalogus denkrichtingen worden opgenomen, zonder onderbouwing van de effectiviteit (en dus de mate waarin

dit bewezen is), zullen bepaalde partijen in het werkveld weinig geholpen zijn met de maatregelen-catalogus. Er wordt namelijk niet ingespeeld op de behoeften die zij kenbaar hebben gemaakt. De maatregelen-catalogus zal in dat geval weinig effectief zijn. Om deze reden wordt geadviseerd om wel in kaart te brengen wat de effectiviteit van maatregelen is of op welke wijze men dit op lokaal niveau kan bepalen. Wellicht kunnen externe partijen genoemd worden als partijen die de maatregel hebben getest. Echter dient het RIVM dan wel te controleren of de maatregel op een gedegen wijze is getest, om te voorkomen dat er maatregelen onterecht als effectief worden bestempeld. Er kan een oproep gedaan worden vanuit het RIVM richting adviesbureaus, maar ook richting onderzoeksinstituten (bijvoorbeeld universiteiten) om 'best practices', waarvan zij kunnen bewijzen dat ze effectief zijn, te delen. Deze kunnen dan, indien de effectiviteit op een gedegen manier bewezen is, opgenomen worden in de maatregelen-catalogus. Er zal dus een aantal voorwaarde moeten worden opgesteld waaraan de 'best practice' moet voldoen. Daarnaast is het van belang dat alle adviesbureaus en onderzoeksinstituten de kans krijgen om zich aan te sluiten, dit omdat het RIVM een overheidsinstelling is en het niet de bedoeling is dat de overheid de markt verstoort. Wel moet gekeken worden hoe zo'n publiek-private samenwerking er in economische zin uit zou komen te zien.

Typen explosies onderscheiden

In dit onderzoek is al een aanzet gedaan om onderscheid te maken tussen verschillende soorten explosies en het verschil ervan in de (mate van) gevolgen. Dit zou gedetailleerder in beeld gebracht kunnen worden om zo ook in de beschermingsopgave de bescherming tegen verschillende typen explosies mee te wegen. Een gaswolkexplosie ontwikkelt zich anders ten opzichte van een BLEVE en de genomen maatregelen kunnen daardoor ook anders uitpakken. Naar vertraagde explosies lijkt, uitgaande van de interviews die gehouden zijn, nog niet zoveel aandacht uit te gaan. In het Handboek Omgevingsveiligheid zou een beter onderscheid kunnen worden gemaakt tussen typen explosies, zodat er in de maatregelen-catalogus ook maatregelen worden opgenomen voor de verschillende typen explosies. Er wordt nu bijvoorbeeld niet expliciet aandacht besteed aan het voorkomen dat vertraagde explosies plaatsvinden, terwijl dit wel iets is dat in de omgeving van een incident kan meespelen.

Aanbevelingen voor aanvullend onderzoek

Naar aanleiding van dit onderzoek en de beperkingen zoals besproken in de discussie, kunnen aanbevelingen gedaan worden voor nader onderzoek. Zo zou nader onderzoek naar factoren die van invloed zijn op de beschermende werking van maatregelen zinvol zijn voor de toepassing van maatregelen in de praktijk. Daarnaast zou verder onderzocht kunnen worden of er relevante kennis is binnen Defensie (Defensie Pijpleiding Organisatie en het Munitiebedrijf) en hoe deze kennis vertaald kan worden naar het werkveld omgevingsveiligheid. Ook de bredere impact van een explosie, bijvoorbeeld door te kijken naar de impactcriteria uit het Nationaal Veiligheidsprofiel, zou interessant kunnen zijn gezien het integrale karakter van het nieuwe beleid. In het Nationaal Veiligheidsprofiel (Analistennetwerk Nationale Veiligheid, 2016) zijn vijf nationale veiligheidsbelangen omschreven met bijbehorende impactcriteria. Ook kan nog aandacht besteed worden aan de psychologische gevolgen van een explosie en de nazorg die nodig is naar aanleiding van een explosie. Deze onderzoeken kunnen worden uitgevoerd door (afstudeer)onderzoekers die nu of in de toekomst werkzaam zijn bij het RIVM. Daarnaast kunnen dergelijke onderzoeken ook uitgevoerd worden bij andere organisaties die zich bezighouden met omgevingsveiligheid.

Literatuurlijst

- Analistennetwerk Nationale Veiligheid. (2016). *Nationaal Veiligheidsprofiel 2016*. Geraadpleegd op 9 mei 2019 van https://www.nctv.nl/binaries/Nationaal%20Veiligheidsprofiel%202016_tcm31-232083.pdf
- Arbeidsinspectie. (1989). *Veiligheid van gebouwen in de procesindustrie*. Den Haag: Directoraat-Generaal van de Arbeid van het Ministerie van Sociale Zaken en Werkgelegenheid.
- Arcadis. (2005). *Externe veiligheid langs transportassen studie naar bouwkundige voorzieningen*. Geraadpleegd op 4 april 2019 van <https://relevant.nl/download/attachments/1230/NB%20EV%20langs%20transportassen%20-%20studie%20bouwkundige%20voorziening.pdf?version=1&modificationDate=1165511949728&api=v2>
- Bendrihem, G. (1978, 11 juli). L'explosion d'un camionciterne chargé de propane à proximité d'un camping à Los Alfaques (Espagne) fait 215 morts [foto]. Geraadpleegd op 1 mei 2019 van <https://twitter.com/afparchives/status/88477429802778214>
- Besluit kwaliteit leefomgeving. (2018, 3 juli). Geraadpleegd op 21 februari van <https://www.omgevingswetportaal.nl/wet-en-regelgeving/documenten/publicaties/2018/08/31/besluit-kwaliteit-leefomgeving-in-het-staatsblad>
- Brandweer Nederland. (2018). *Inbreng veiligheidsregio's in omgevingsvisies Handreiking*. Geraadpleegd op 7 mei 2019 van <https://www.ifv.nl/kennisplein/Documents/20181005-BRWNL-IOV-Inbreng-veiligheidsregios-in-omgevingsvisies-Handreiking.pdf>
- Bureau for Analysis of Industrial Risks and Pollutions. (z.d.). *Derailment of a train transporting hydrocarbons*. Geraadpleegd op 17 april 2019 van https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/fiche_detaillee/4225_en/?lang=en
- Busch, C. (2008). BLEVE. Geraadpleegd op 15 februari 2019 van http://www.infrasite.nl/definitions/definition.php?ID_content=137
- Commissie onderzoek Vuurwerkkramp. (2001). *De Vuurwerkkramp Eindrapport*. Geraadpleegd op 7 mei 2019 van https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=2ahUKEwjUu8HCg4niAhWE6aQKH RDyA8IQFjAAegQIABAC&url=https%3A%2F%2Fwww.vuurwerkkramp.enschede.nl%2Fpublicaties%2F00005%2FEindrapport_Commissie_Oosting_compleet.pdf%2Fmanage.download.html&usg=AOvVawivksoyFAF8MnTCmHbDfso
- Cormie, D., Mays, G., & Smith, P. D. (2009). *Blast Effects on Buildings*, 2nd edition. Londen: Thomas Telford Ltd.
- De Dianous, V., Fievez, C. (2006). ARAMIS project: a more explicit demonstration of risk control through the use of bow-tie diagrams and the evaluation of safety barrier performance. *Journal of Hazardous Materials, Elsevier*, 130 (3), 220-233.
- De Soir, E. (2015). *Trauma and Mental Health in the Wake of Technological Disaster: The Ghislenghien Gas Explosion* (doctoraatsthesis). Geraadpleegd op 15 april 2019 van <https://dspace.library.uu.nl/handle/1874/32732>
- Focus Online. (22-7-2011). *Zerstörte Fenster in der Gegend, in der die Autobombe explodierte*. Geraadpleegd op 2 mei 2019 van <https://pure.tue.nl/ws/portalfiles/portal/46952868/765925-1.pdf>

Frencken, J.M.W.J.D. (2013). *Explosiebestendige gevels: Numeriek onderzoek naar het gedrag en de prestaties van conventionele aluminium vliesgevels* (master thesis). Geraadpleegd op 2 mei 2019 van <https://pure.tue.nl/ws/portalfiles/portal/46952868/765925-1.pdf>

Giard, R.W.M., Overbeke, A.J.P.M. (2006). De opvang van slachtoffers van bomaanslagen: logistieke en medisch-inhoudelijke aspecten. *Nederlands Tijdschrift voor Geneeskunde*, 150(27), 1497- 1502.

Hinman, E. (2003). *Primer for Design of Commercial Buildings to Mitigate Terrorist Attacks*. Washington D.C.: Federal Emergency Management Agency. Geraadpleegd op 2 mei 2019 van <https://www.fema.gov/media-library-data/20130726-1455-20490-6114/fema427.pdf>

IFV. (2010). *Op afstand schakelen van centrale mechanische ventilatie – BOA-V*. Geraadpleegd op 2 mei 2019 van <https://www.ifv.nl/kennisplein/brandpreventie-fire-safety-engineering/incidenten/op-afstand-schakelen-van-centrale-mechanische-ventilatie-boa-v#>

Inspectie Leefomgeving en Transport. (z.d.). *Transport gevaarlijke stoffen*. Geraadpleegd op 18 februari 2019 van <https://www.ilent.nl/onderwerpen/themas/gevaarlijke-stoffen>

Inspectie Leefomgeving en Transport. (z.d.). *Plichten van betrokkenen*. Geraadpleegd op 18 februari 2019 van <https://www.ilent.nl/onderwerpen/gevaarlijke-stoffen-weg/voorbereiden-vervoer-gevaarlijke-stoffen-over-de-weg/plichten-van-betrokkenen>

IPO & Brabant veiliger. (2009). *Bouwkundige maatregelen externe veiligheid*. Geraadpleegd op 4 april 2019 van <https://relevant.nl/download/attachments/5341232/Catalogus+bouwkundige+maatregelen+externe+veiligheid+november+2009.pdf>

InfoMil. (z.d.). *Basisnet*. Geraadpleegd op 22 februari 2019 van <https://www.infomil.nl/onderwerpen/veiligheid/basisnet-o/>

Kennisbank ATEX. (z.d.-a). *Explosie-effecten en -risico's*. Geraadpleegd op 22 februari 2019 van <http://atex.cobouw.nl/naslag/explosies/explosie-effecten-en-risicos>

Kennisbank ATEX. (z.d.-b). *Soorten explosies*. Geraadpleegd op 16 april 2019 van <http://atex.cobouw.nl/naslag/explosies/soorten-explosies>

Laboratorium voor Externe Veiligheid. (2019). *Scenarioboek Externe Veiligheid*. Geraadpleegd op 7 mei 2019 van <https://www.scenarioboekv.nl/overzichtstabel-scenariokaarten/>

Le Dauphiné Libéré. (1993, 13 januari). *La catastrophe ferroviaire a marqué les Voulains. Nombreux sont ceux qui se souviennent parfaitement de cette nuit-là* [foto]. Geraadpleegd op 1 mei 2019 van <https://www.ledauphine.com/ardeche/2013/01/12/une-nuit-en-plein-chaos-pour-les-voulains>

Lees, F. (2012). *Loss Prevention in the Process Industries – Hazard identification, assessment and control*, Fourth edition. Oxford: Butterworth-Heinemann.

Machielsen, C.J.M. (2012). *Onderzoek Externe Veiligheid vervoer gevaarlijke stoffen – Bestemmingsplan Defensie-eiland te Woerden*. Geraadpleegd op 19 februari 2019 van https://www.woerden.nl/geo/ro-online/plannen/NL.IMRO.0632.defensieeiland-/NL.IMRO.0632.defensieeiland-bVA1/tb_NL.IMRO.0632.defensieeiland-bVA1_18.pdf

Mansveld, W.J. (2014, 18 december). Uitvoeringsprogramma Modernisering Omgevingsveiligheid [kamerbrief] Geraadpleegd op 21 februari 2019 van <https://relevant.nl/download/attachments/31686771/Kamerbrief%20Uitvoeringsprogramma%20Modernisering%20Omgevingsveiligheid%20-%2018%20december%202015.pdf?version=1&modificationDate=1453717396158&api=v2>

Mercx, W. P. M. (1991). *Verslag van het Prins Maurits Laboratorium TNO betreffende de explosie van de vuurwerfabriek 'MS Vuurwerk' te Culemborg op donderdag 14 februari 1991*. Rijswijk: TNO.

Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer, Ministerie van Binnenlandse Zaken en Werkgelegenheid, Ministerie van Sociale Zaken en Werkgelegenheid & Ministerie van Verkeer en Waterstaat. (2003). *PGS1 Deel 2a: Effecten van explosie op personen*. Geraadpleegd op 22 februari 2019 van <http://content.publicatiereeksgevaarlijkstoffennl/documents/PGS1/PGS1-2005-vo.1-deel-2a.pdf>

Molag M. & Kruithof A. (2005). *'BLEVE prevention of a LPG tank vehicle or a LPG tank wagon'*. Den Haag: TNO.

Morris, T. (23-10-2009). *Broken glass at bus stop*. Geraadpleegd op 2 mei 2019 van <https://pure.tue.nl/ws/portalfiles/portal/46952868/765925-1.pdf>

NCTV. (z.d.). *Veiligheidsregio's*. Geraadpleegd op 19 februari 2019 van <https://www.nctv.nl/organisatie/veiligheidsregios/index.aspx>

NSW Institute of Trauma and Injury Management. (z.d.). *Abbreviated Injury Scale*. Geraadpleegd op 21 mei 2019 van https://www.aci.health.nsw.gov.au/get-involved/institute-of-trauma-and-injury-management/Data/injury-scoring/abbreviated_injury_scale

Omgevingsdienst West-Holland. (2017). *Impactanalyse bestuurlijke afwegingsruimte*. Geraadpleegd op 21 februari 2019 van <https://aandeslagmetdeomgevingswet.nl/actueel/interviews/interviews/elkaars-rollen-nemen/@163679/impactanalyse/>

Omgevingsdienst West-Holland. (z.d.). *Taken*. Geraadpleegd op 19 februari 2019 van <https://www.odwh.nl/Configuratie/Algemeen/Taken>

Oude Wolbers, M. (2015). *Brandweeroptreden bij incidenten met LNG*. Arnhem: Instituut Fysieke Veiligheid. Geraadpleegd op 23 mei 2019 van <https://www.ifv.nl/kennisplein/Documents/20151118-BA-Brandweeroptreden-bij-incidenten-met-LNG.pdf>

Petiet, P.J., Van der Vorm, J.K.J. (2012). *Technologieverkenning Mijden Groot Gevaar: BLEVE*. Geraadpleegd op 22 februari 2019 van https://www.scenarioboek.nl/wp-content/uploads/tno-dv_2012_ino43_-_technologieverkenning_mgg_-_bleve.pdf

Reformatorisch Dagblad. (1978, 12 juli). *Meer dan honderd slachtoffers na ontploffing bij Spaanse camping*. Geraadpleegd op 17 april 2019 van <https://www.digibron.nl/search/detail/012ea117fe5aec5963525426/meer-dan-honderd-slachtoffers-na-ontploffing-bij-spaanse-camping>

Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu. (2011). *Buisleidingen*. Geraadpleegd op 14 februari 2019 van <https://www.rivm.nl/omgevingsveiligheid/buisleidingen>

Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu. (2016). *Omgevingsveiligheid*. Geraadpleegd op 21 februari 2019 van <https://www.rivm.nl/omgevingsveiligheid>

- Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu. (z.d.-a). *Rol ministerie en rol RIVM*. Geraadpleegd op 6 februari 2019 van <https://omgevingsveiligheid.rivm.nl/over-het-handboek>
- Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu. (z.d.-b). *Vervoer gevaarlijke stoffen*. Geraadpleegd op 18 februari 2019 van <https://www.rivm.nl/vervoer-gevaarlijke-stoffen>
- Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu. (z.d.-c). *Wat is omgevingsveiligheid?* Geraadpleegd op 6 februari 2019 van <https://omgevingsveiligheid.rivm.nl/over-het-handboek>
- Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu. (z.d.-d). *Bescherming*. Geraadpleegd op 6 februari 2019 van <https://omgevingsveiligheid.rivm.nl/bescherming>
- Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu. (z.d.-e). *Juridisch kader*. Geraadpleegd op 6 februari 2019 van <https://omgevingsveiligheid.rivm.nl/juridisch-kader>
- Rijksoverheid. (z.d.-a). *Nieuwe omgevingswet maakt omgevingsrecht eenvoudiger*. Geraadpleegd op 11 februari 2019 van <https://www.rijksoverheid.nl/onderwerpen/omgevingswet/vernieuwing-omgevingsrecht>
- Rijksoverheid. (z.d.-b). *Omgevingswet*. Geraadpleegd op 21 februari 2019 van <https://www.rijksoverheid.nl/onderwerpen/omgevingswet>
- Rijksoverheid. (z.d.-c). *Transport van gevaarlijke stoffen via buisleidingen*. Geraadpleegd op 14 februari 2019 van <https://www.rijksoverheid.nl/onderwerpen/goederenvervoer/transport-van-gevaarlijke-stoffen-via-buisleidingen>
- Safety Solutions Consultants BV. (2004, 30 juli). *Hoge druk gasleiding ramp - Perspectief brandweer -Gellingen (B)* [pdf]. Geraadpleegd op 2 mei 2019 van http://www.safety-sc.com/862_Gasramp%20Gellingen.pdf
- Sorkale, M. (2015). *Veiligheidsplan 'Kennispark Weiwerd'* (proeve). Groningen: Veiligheidsregio Groningen.
- Starmans, I. & Oberijé, N. (2006). *Burgerparticipatie bij rampen en zware ongevallen*. Geraadpleegd op 7 mei 2019 van <https://www.ifv.nl/kennisplein/Documents/10-11-06-def-rapport-burgerparticipatie-bij-rampen-en-zw-ongev.pdf>
- Suddle, S. I. (2004). Bijlage I Bouwkundige en constructieve maatregelen in Veiligheidsstudie spoorzone Dordrecht/Zwijndrecht. Geraadpleegd op 7 mei 2019 van <https://relevant.nl/download/attachments/1251/ZH+rapport+veiligheidsstudie+spoorzone+Dordrecht+Zwijndrecht.pdf?version=1&modificationDate=1165509641656%20>
- Trijssenaar, I., Van der Horst, M., Simons, R., Sterkenburg, R., Raben, I. (2011). *TNO-rapport over kwantificering van de effectiviteit van maatregelen voor ongevallen met gevaarlijke stoffen, Fase 1: kwantificeren van aantallen gewonden*. Geraadpleegd op 15 april 2019 van https://www.tno.nl/media/2180/kwantificering_effectiviteit_maatregelen_ongevallen_tno_o6o_ut_2011_01712.pdf
- Trijssenaar, I. & Reinders, J. (2017). *Methodieken voor bepalen handelingsperspectieven en schade bij ongevallen met gevaarlijke stoffen*. Geraadpleegd op 15 april 2019 van <https://www.scenarioboek.nl/wp-content/uploads/TNO-2017-Methodieken-bepalen-handelingsperspectieven-schade-ongevallen.pdf>
- Trijssenaar, I., Thijssen, C., Sterkenburg, R., Raben, I. & Kobes, M. (2013). *Kwantificering van de effectiviteit van zelfredzaamheidsbevorderende maatregelen voor ongevallen met gevaarlijke stoffen, Fase 2*. Geraadpleegd op 15 mei 2019 van <https://www.ifv.nl/kennisplein/Documents/20131224-TNO-Kwantificering-van-de-effectiviteit-van-zelfredzaamheidsbevorderende-maatregelen.pdf>

Van den Bosch, C.J.H., Weterings, R.A.P.M., Duijm, N.J., Bakkum, E.A., Mercx, W.P.M., Engelhard, W.F.J.M., Van Doormaal, J.C.A.M. & Van Wees, R.M.M. (1996). *Methods for the calculation of physical effects*. Geraadpleegd op 7 mei 2019 van <http://content.publicatiereeksgevaarlijkstoffennl/documents/PGS2/PGS2-1997-vo.1-physical-effects.pdf>

Veiligheidsberaad. (2014). *Bevolkingszorg op orde 2.0 - Eigentijdse bevolkingszorg, volgens afspraak*. Geraadpleegd op 7 mei 2019 van https://www.ifv.nl/kennisplein/Documents/201404-vb-bevolkingszorg-op-orde-2_o.pdf

Vlaamse overheid. (z .d.). *Vlinderdasmodel*. Geraadpleegd op 7 mei 2019 van <https://overheid.vlaanderen.be/organisatie/risico-en-bedrijfscontinu%C3%A4fheidsmanagement/vlinderdasmodel>

Wolf, S. J., Bebarta, V. S., Bonnet, C. J., Pons, P. T., & Cantrill, S. V. (2009). Blast injuries. *Lancet*, 347, 1 -1.

Bijlage 1 Transcripten interviews

Voor dit onderzoek zijn diverse mensen uit het werkveld geïnterviewd. In sommige gevallen hebben meerdere personen aan één interview deelgenomen. De transcripten van deze interviews zijn niet openbaar. Met onderstaande personen heeft een interview plaatsgevonden:

- Femke de Zwart (Arts M&G MMK/GAGS | GGD regio Utrecht);
- Ferry El-Aaïdi (Adviseur Omgevingsveiligheid | Brandweer Amsterdam-Amstelland);
- Cees Mars (Adviseur Omgevingsveiligheid | Brandweer Amsterdam-Amstelland);
- Josta van Oostrom (houdt zich bezig met taxonomie van maatregelen | Brandweer Amsterdam-Amstelland);
- Paul de Kort (Adviseur Omgevingsveiligheid | Brandweer Brabant-Noord);
- Peter Robbe (Programma-manager omgevingsveiligheid | ProRail);
- Roel Amesz (Incidentbestrijding | ProRail en AGS Brandweer);
- René van Santvoort (AGS | Veiligheidsregio Brabant-Noord);
- Rinske Keuken (Arts M&G MMK/GAGS | GGD Kennemerland);
- Menno de Jonge (Veiligheidsconsultant Omgevingsveiligheid | Veiligheidsregio Groningen);
- Mark-Olaf Sorkale (Veiligheidsadviseur Risicobeheersing | Veiligheidsregio Groningen);
- Gert Lems (Senior adviseur omgevingsveiligheid | Rijkswaterstaat);
- Manon Kruiskamp (Kennis van gevaarlijke stoffen | Rijkswaterstaat);
- Luc Stoot (Business Unit Manager Building and Structures | adviesbureau Volantis);
- Inge Trijssenaar (Onderzoeker met kennis over bescherming bij incidenten met gevaarlijke stoffen | IFV/TNO);
- Liesbeth Spoelma (Beleidsmedewerker Directie Omgevingsveiligheid en Milieurisico's | Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat).

Bijlage 1A

Geïnterviewde: Femke de Zwart
Functie: Arts M&G MMK/GAGS | GGD regio Utrecht
Datum: 14 maart 2019

Bijlage 1B

Geïnterviewden: Ferry El-Aaïdi, Cees Mars & Josta van Oostrom
Functie: Adviseurs Omgevingsveiligheid | Brandweer Amsterdam-Amstelland
Datum: 2 april 2019

Bijlage 1C

Geïnterviewde: Paul de Kort
Functie: Adviseur Omgevingsveiligheid Brandweer | Brabant-Noord
Datum: 25 maart 2019

Bijlage 1D

Geïnterviewden: Peter Robbe en Roel Amesz
Functie: Programma-manager omgevingsveiligheid en medewerker Incidentbestrijding en AGS Brandweer | ProRail
Datum: 26 maart 2019

Bijlage 1E

Geïnterviewde: René van Santvoort
Functie: AGS | Veiligheidsregio Brabant-Noord
Datum: 19 maart 2019

Bijlage 1F

Geïnterviewde: Rinske Keuken
Functie: Arts M&G MMK/GAGS | GGD Kennemerland
Datum: 12 maart 2019

Bijlage 1G

Geïnterviewden: Menno de Jonge en Mark-Olaf Sorkale
Functie: Veiligheidsconsultant Omgevingsveiligheid en Veiligheidsadviseur
Risicobeheersing | Veiligheidsregio Groningen
Datum: 24 april 2019

Bijlage 1H

Geïnterviewden: Gert Lems en Manon Kruiskamp
Functie: Senior adviseur omgevingsveiligheid en expert gevaarlijke stoffen |
Rijkswaterstaat
Datum: 10 april 2019

Bijlage 1I

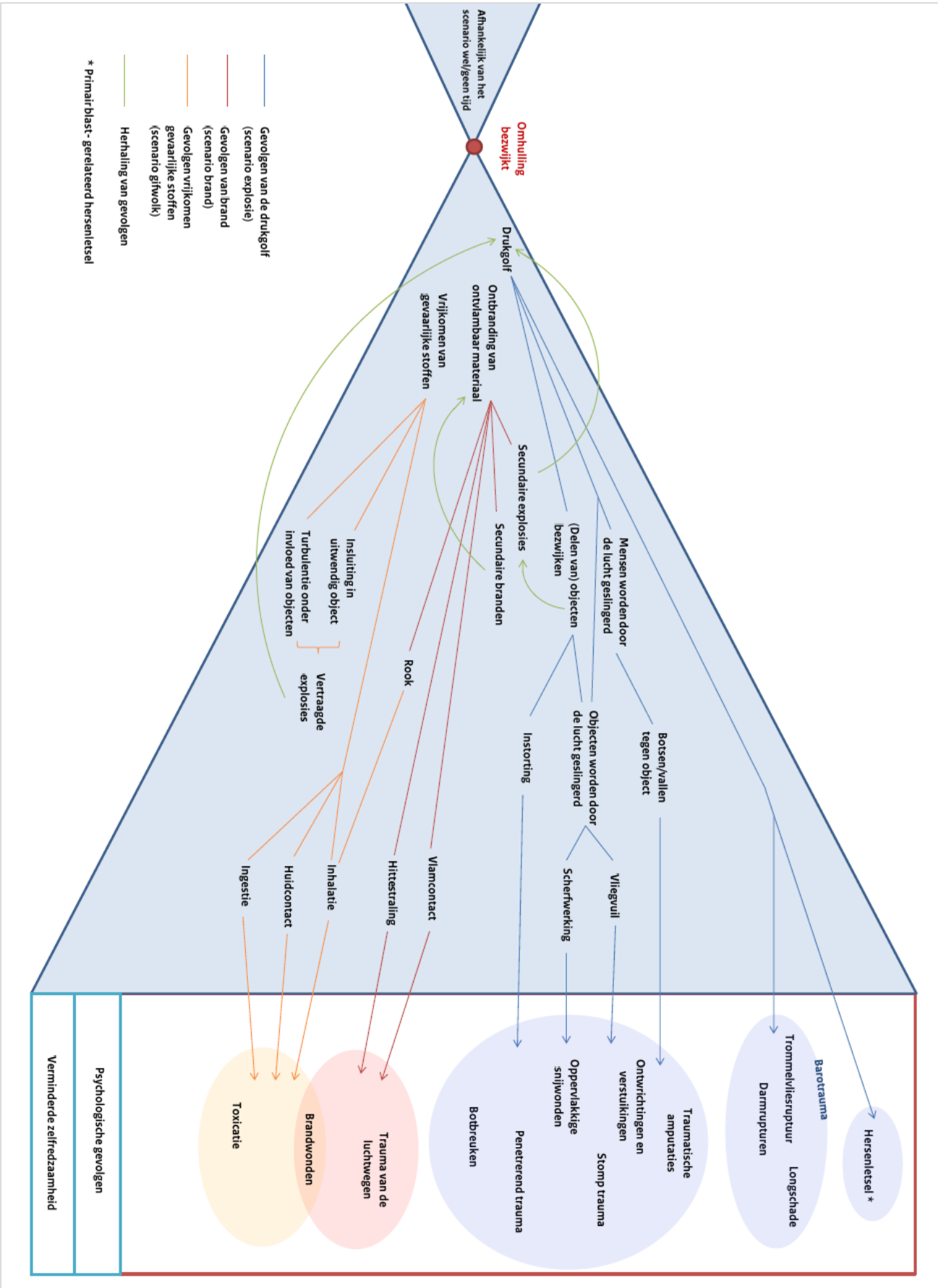
Geïnterviewde: Luc Stoot
Functie: Business Unit Manager Building and Structures | Adviesbureau Volantis
Datum: 11 april 2019

Bijlage 1J

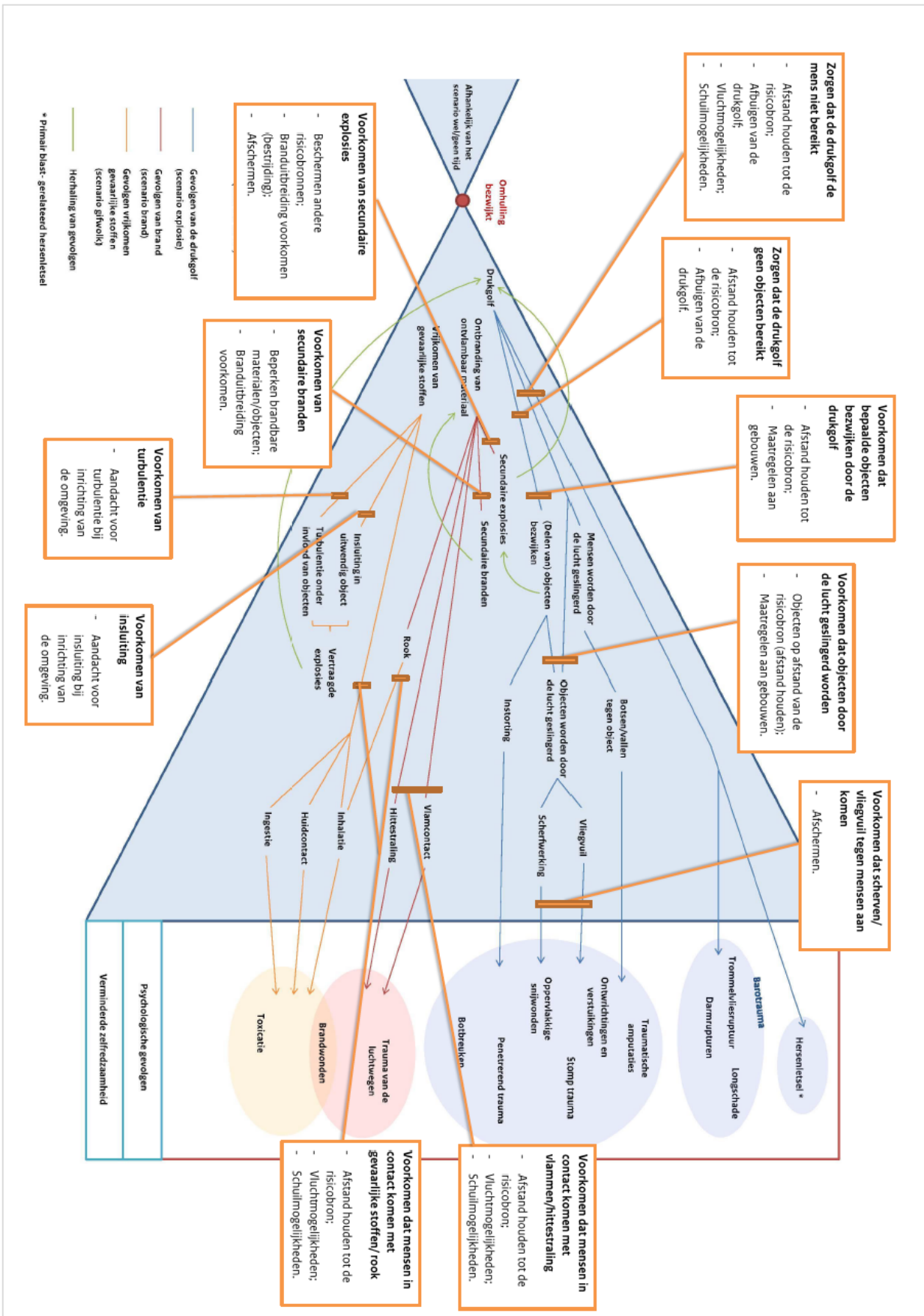
Geïnterviewde: Inge Trijssenaar
Functie: Onderzoeker met kennis over bescherming bij incidenten met gevaarlijke
stoffen | IFV/TNO
Datum: 26 april 2019

Bijlage 1K

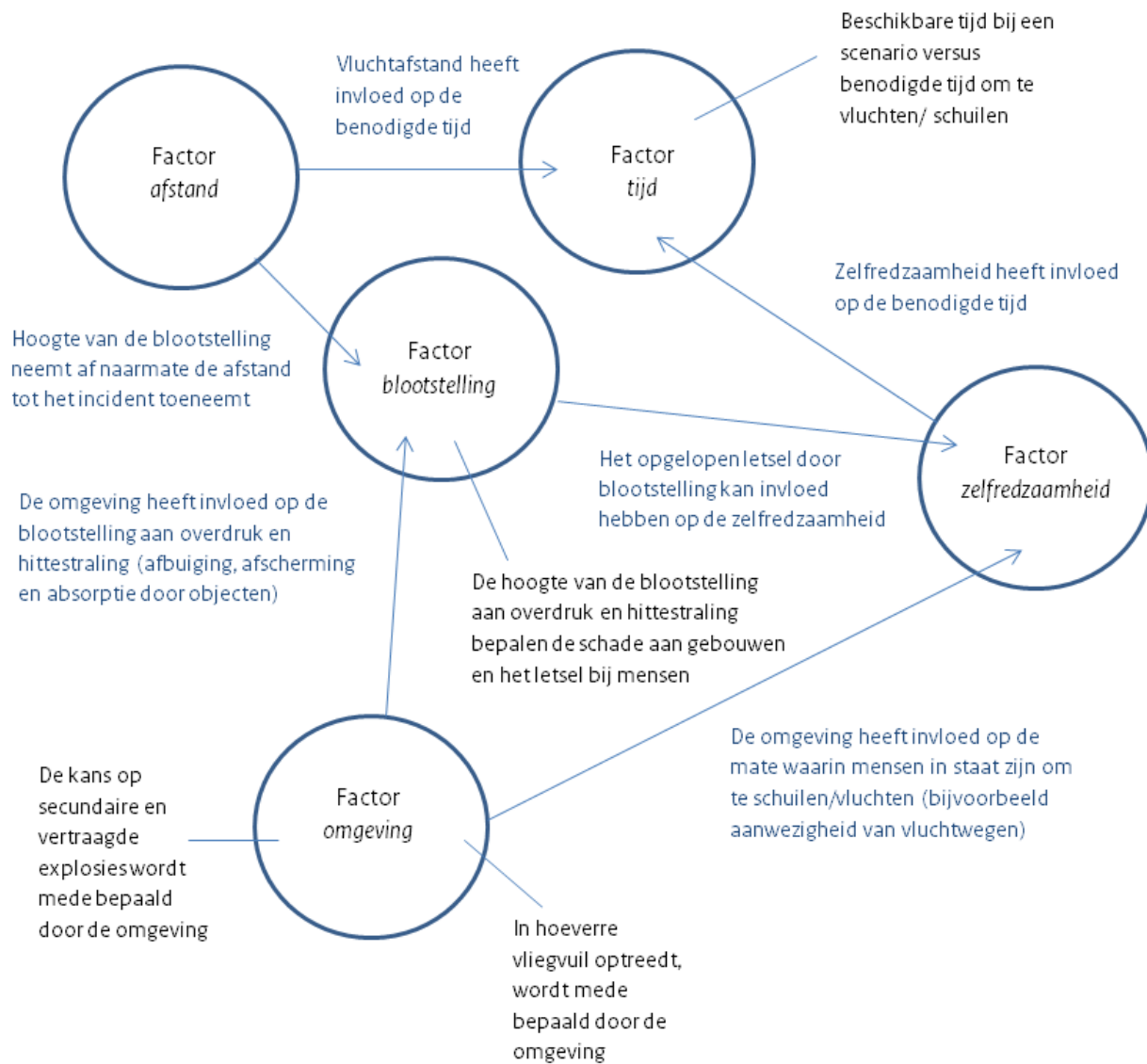
Geïnterviewde: Liesbeth Spoelma
Functie: Beleidsmedewerker Directie Omgevingsveiligheid en Milieurisico's | Ministerie
van Infrastructuur en Waterstaat
Datum: 9 mei 2019



Bijlage 3 Vlinderdasmodel explosiescenario's met barrières



Bijlage 4 Factoren



Bijlage 5 Tabel relatie letsel, vaardigheden en zelfredzaamheid

Onderstaande tabel is afkomstig uit het TNO-onderzoeksrapport geschreven door Trijssenaar e.a. (2011) dat gaat over de kwantificering van de effectiviteit van maatregelen voor ongevallen met gevaarlijke stoffen (fase 1). De volgende classificatie geldt bij de Abbreviated Injury Scale: AIS 1 = minor, AIS 2 = moderate, AIS 3 = serious, AIS 4 = severe, AIS 5 = critical, AIS 6 = maximal (currently untreatable) (NSW Institute of Trauma and Injury Management, z.d.).

De toelichting bij de verantwoording waarom bepaalde lichaamsdelen gekoppeld zijn aan die specifieke vaardigheden luidt: een aantal essentiële organen /zenuwen/ bloedvaten zitten in die lichaamsdelen en zijn van belang voor die vaardigheden (Inge Trijssenaar & Marike van der Horst, persoonlijke communicatie, 16 mei 2019).

		Zelfredzaamheid			
		Zelfredzaam (+)	Beperkt (B)	Niet zelfredzaam (A)	
vaardigheden	LichaamsDeel	(AIS≤x)	(AIS=x)	(AIS≥x)	
Waarnemen	Zicht	Head	2	3	4
		Face	1	2	3
		Thorax	3	4	5
		Abdomen & Pelvis	3	4	5
		Eye	0	1	2
	Gehoor	Head	2	3	4
		Face	1	2	3
		Thorax	3	4	5
		Abdomen & Pelvis	3	4	5
		Ear	0	1	2
Denken	Mentaal	Head	1	2-3	4
		Thorax	1	2-3	4
		Abdomen & Pelvis	1	2-3	4
Handelen	Fysiek	Head	2	3	4
		Arms	1	2	3
		Legs	1	2	3
		Spine	1	2	3
		Thorax	2	3	4
		Abdomen & Pelvis	2	3	4
	Uithoudingsvermogen	External	1	2-3	4
		Spine	0	1	2
		Thorax	0	1	2
		Abdomen & Pelvis	0	1	2
	External (=huid)	1	2-3	4	