Forensische en Medische Aspecten van een Bomexplosie: een Literatuurstudie

Forensic and Medical Aspects of a Bomb Explosion: a Review

Masterproef voorgedragen tot het behalen van de graad van Master in de geneeskunde door

**Eloïse VERMYLEN**

 Afdeling: Forensische Biomedische Wetenschappen

 Departement: Beeldvorming & Pathologie

Promotor: Prof. Dr. Wim Van de Voorde

2018-2019

*“Dit proefschrift is een examendocument dat na verdediging niet werd gecorrigeerd voor eventueel vastgestelde fouten. In publicaties mag naar dit werk gerefereerd worden, mits schriftelijke toelating van de promotor(en) die met naam vermeld zijn op de titelpagina.”*

Forensische en Medische Aspecten van een Bomexplosie: een Literatuurstudie

Forensic and Medical Aspects of a Bomb Explosion: a Review

Masterproef voorgedragen tot het behalen van de graad van Master in de geneeskunde door

**Eloïse VERMYLEN**

 Afdeling: Forensische Biomedische Wetenschappen

 Departement: Beeldvorming & Pathologie

Promotor: Prof. Dr. Wim Van de Voorde

Vermylen Eloïse
KULeuven
eloise.vermylen@student.kuleuven.be

[Naam hoofdredacteur]
[Hoofdredacteur]
[Naam tijdschrift]

[Datum]

Geachte mevrouw/meneer,

Het is mij een genoegen om u mijn proefschrift genaamd “forensische en medische aspecten van een bomexplosie: een literatuurstudie” toe te sturen ter overweging van een publicatie in [naam tijdschrift]. Dit proefschrift werd geschreven onder toezicht en begeleiding van Prof. Dr. Wim Van de Voorde.

Met deze literatuurstudie wil ik de kennis omtrent de werking van explosieven en de pathofysiologie van explosie-gerelateerde verwondingen helpen toelichten om zo te kunnen bijdragen aan een optimale preventie en behandeling. Niet-militair medisch personeel heeft immers een beperkte tot geen ervaring met deze materie. In dit proefschrift spitsen we hoofdzakelijk toe op het letselbilan van primaire en secundaire letsels. De drie overige categorieën (tertiaire, quaternaire en quinaire letsels) worden slechts summier besproken omdat deze reeds beter gekend zijn onder het medisch personeel.

Gezien de actualiteit en complexiciteit van deze problematiek hoop ik dat dit proefschrift in aanmerking komt voor publicatie in [naam tijdschrift].

Dit manuscript werd nog niet gepubliceerd noch ter publicatie aangeboden aan een ander tijdschrift.

Graag zie ik uw reactie tegemoet.

Met vriendelijke groet.

Eloïse Vermylen

Inhoudsopgave

[Abstract 6](#_Toc423583)

[Introductie 8](#_Toc423584)

[Wat is een bomexplosie? 9](#_Toc423585)

[Literatuurstudie 10](#_Toc423586)

[Doelstelling 10](#_Toc423587)

[Methode 11](#_Toc423588)

[Resultaten 11](#_Toc423589)

[1.Letselbilan 11](#_Toc423590)

[1.1. Bepalende factoren 11](#_Toc423591)

[1.2. Categorieën van letsels 12](#_Toc423592)

[2. Setting 14](#_Toc423593)

[3. Primaire blastletsels 16](#_Toc423594)

[3.1. Ontstaansmechanisme 16](#_Toc423595)

[3.2. Bepalende factoren 17](#_Toc423596)

[3.3. Vatbare structuren 17](#_Toc423597)

[4. Secundaire letsels 19](#_Toc423598)

[4.1. Ontstaansmechanisme secundaire letsels 20](#_Toc423599)

[4.2. Bepalende factoren 20](#_Toc423600)

[5. Letsels ter hoogte van de extremiteiten 20](#_Toc423601)

[5.1. Traumatische amputaties 20](#_Toc423602)

[5.2. Compartiment syndroom 21](#_Toc423603)

[Conclusie 21](#_Toc423604)

[Conflict of Interest 22](#_Toc423605)

[Financial Disclosure 22](#_Toc423606)

[Referenties 22](#_Toc423607)

# Abstract

**Achtergrond:** Civiele settings zijn meer en meer het mikpunt van terroristische dreigingen. Dit stelt de medische wereld voor een belangrijke uitdaging gezien de beperkte ervaring van niet-militair medisch persoon met de gevolgen van explosies.

**Methodiek:** De PubMed/Medline- en Embase databanken werden gescreend voor reviews, originele studies en tijdschriftartikels. Op PubMed werden alle artikels gepubliceerd voor 2005 en omtrent dierlijke subjecten uitgesloten. In de Embase databank werden alleen de artikels en reviews gepubliceerd na 31/12/2001 geïncludeerd. Studies op dieren werden uitgesloten. Op basis van de titels gebeurde er een selectie waarvan de abstracten doorgenomen werden. 26 artikels werden weerhouden. Tevens werd een presentatie van Prof. Dr. Van de Voorde W. opgenomen in de studie.

**Resultaten:** De intensiteit en complexiteit van verwondingen worden bepaald door: de afstand, het type explosief en de omgeving. Explosie-gerelateerde letsels worden naargelang hun ontstaansmechanisme in 5 categorieën opgedeeld. In deze studie wordt er voornamelijk gefocust op primaire- en secundaire letsels, aangezien deze het meest kenmerkend zijn voor het explosie-gerelateerd letselbilan. Primaire blastletsels komen uitsluitend voor bij explosies. Secundaire letsels zijn in de meeste gevallen verantwoordelijk voor het grootste aandeel van explosie-gerelateerde verwondingen. Explosies kaderend in oorlogs- en terroristische context worden gekenmerkt door meer letsels ter hoogte van de onderste ledematen in vergelijking tot de bovenste ledematen.

**Conclusie:** Kennis omtrent primaire- en secundaire blastletsels vormt de basis voor ontwikkeling van preventie- en behandelingsplannen in kader van explosies. Explosies kaderend in oorlogs-en terroristische settings vertonen in vergelijking met gasexplosies meer letsels ter hoogte van de onderste dan ter hoogte van de bovenste extremiteiten. Dit kan tot op heden niet verklaard worden en vergt verder onderzoek.

**Abstract**

**Background:** Civil settings have become increasingly the target of terrorist threats. This poses a major challenge for the medical world in view of the limited experience of non-military medical personnel with explosions.

**Methodology**: The PubMed/Medline and Embase databases were screened for reviews, original studies and journal articles. In PubMed all articles published before 2005 and articles on animals were excluded. In the Embase database only articles and reviews published after 31/12/2001 were included. Studies on animals were excluded. Based on titles, a selection was made of which the abstracts were reviewed. 26 articles were retained. A presentation by Prof. Dr. Van de Voorde W. was also included in the study.

**Results:** The intensity and complexity of injuries are determined by: the distance, the type of explosive and the environment. Explosion-related injuries are divided into 5 categories according the mechanism causing the injury. This study mainly focuses on primary and secondary injuries. Primary blast lesions only occur in explosions. Secondary injuries are in most cases responsible for the largest share of explosion-related injuries. Explosions in war and terrorist settings are characterized by more injuries in the lower limbs compared to the upper limbs.

**Conclusion:** Knowledge about primary and secondary blast lesions forms the basis for the development of prevention and treatment plans in the context of explosions. Explosions in war and terrorist settings show more injuries compared to gas explosions at the lower than at the upper extremities. Until present this cannot be explained and requires further research.

# Introductie

Het intentionele gebruik van explosieve materialen kende gedurende de 20e eeuw een stevige opmars.1-6 Wereldoorlog I & II, de Koude Oorlog, de Vietnamoorlog, de oorlog in Cambodja en de recentere oorlogen in Afghanistan en Irak zijn enkelen van de conflicten waarbij explosies onder vorm van bommen en granaten dienst deden.1,2,4,7-11,21 Sinds de 20e eeuw zijn explosies de hoofdoorzaak van overlijden op-en-rond het slagveld.7,10,12

Bovendien maken ook de mijnbouw en diverse afbraakprocedures in belangrijke mate gebruik van gecontroleerde ontploffingen.5 De wereld is ook meer en meer getuige van accidentele explosies, waarbij er onbedoeld veel schade kan optreden.2,3,13,14 Zo was er in 1917 de Halifax explosie in Canada, veroorzaakt door de botsing van twee vrachtschepen. Het was de grootste niet-nucleaire explosie veroorzaakt door de mens met naar schatting 1950 doden en 8000 gewonden tot gevolg.14

Door de wereldwijde opmars van het terrorisme wordt het Westen bovendien in toenemende mate geconfronteerd met aanslagen waarbij gretig gebruik wordt gemaakt van explosieven.2-4,6,10-12,15-20 Tussen 1999 en 2006 was er naar schatting een verviervoudiging van het aantal terroristische aanslagen met een verachtvoudiging van de verwondingen als gevolg.3,11,12 Ook België werd het laatste decennium niet gespaard van terroristische aanslagen. Op 22 maart 2016 vonden de dodelijkste aanslagen ooit in België plaats. De bomexplosies in de luchthaven van Zaventem en het metrostation Maalbeek gingen gepaard met tientallen doden en honderden gewonden.20,21

Bomexplosies veroorzaken niet-te-onderschatten psychische effecten en een complex patroon aan verwondingen. Dit gepaard gaande met de beperkte ervaring van niet-militair medisch personeel met explosies en hun gevolgen, stelt de medische wereld voor een belangrijke uitdaging.3,4,10-13,16,19,22

# Wat is een bomexplosie?

Een explosie kan gedefinieerd worden als “een krachtige *blowing apart*, veroorzaakt door energie die voortkomt uit een snelle chemische reactie, een nucleaire reactie, of door de ontsnapping van gassen onder druk”.3,8,15,21

Een explosief is een materiaal dat aanleiding geeft tot de explosie.5,13,15 Deze materialen zetten hun energie vrij in slechts enkele microseconden door een snelle omzetting van vaste of vloeibare substanties in gassen.3,5,11,13,15

De vrijgekomen gassen zorgen voor compressie van het omringende medium, met een drukstijging tot gevolg. Deze drukstijging creëert een *blast wave* die zich voortplant in de omgeving.1,3,5,6,8,10-16,18

We kunnen een onderscheid maken tussen *low-order* en *high-order* explosieve materialen.1,5,11,15,21

*Low-order* explosieve materialen zetten hun energie vrij door deflagratie, een verbrandingsproces. In een omsloten ruimte kan het ontstaan van het grote volume gas aanleiding geven tot een explosie. De hieruit ontstane *blast wave* wordt gekenmerkt door snelheden <1000 m/s. *Low-order* explosieve materialen zijn stabieler en bijgevolg makkelijker te controleren dan high-order explosieve materialen. Voorbeelden van *low-order* explosieven zijn buskruit en vuurwerk.1,5,11,13,21

Bij *high-order* explosieve materialen komt de omzetting tot gassen tot stand door een proces genaamd detonatie, waarbij de chemische verbindingen binnen het materiaal worden afgebroken. Hierbij ontstaat een *blast wave* met supersonische snelheden (3000 tot 9000 m/s). Door de krachtigere *blast wave* hebben *high-order* explosieven een groter verwondingspotentieel dan *low-order* explosieven. Hier jirfijigszVoorbeelden van *high-order* explosieven zijn Trinitrotoluene (TNT), compositie C-4 en Semtex.1,3,5,10,11,13,15,16,21,23

De drukveranderingen van de *blast wave* in een open ruimte zonder obstakels, kunnen beschreven worden aan de hand van de Friedlandercurve (figuur 1). Hierbij wordt gekeken naar de drukveranderingen over de tijd op een bepaalde plaats in de ruimte. Vlak na de explosie is er een positieve drukfase (overdruk), waarbij snel een maximale of piekdruk wordt bereikt. Verplaatsing en verdunning van de lucht na passage van de blast wave zorgt vervolgens voor een tijdelijke negatieve druk (onderdruk) alvorens de druk weer normaliseert. 1,3,5,6,8,10,13,15,16,21

De overdruk en de onderdruk van de *blast wave* zijn 2 van de 3 componenten die de basis vormen voor explosie-gerelateerde letsels.1,10,15,16,19

De grootte van de *blast* overdruk, de snelheid van de blast wave en de kans op explosie-gerelateerde verwondingen zijn afhankelijk van een aantal factoren, zoals de aard van het medium, de afstand van de persoon tot het centrum van de explosie en de ruimte (open versus gesloten ruimte).1,3-6,8,11-15,18,19,22,23 In een gesloten ruimte worden de drukgolven teruggekaatst, hetgeen zowel een hogere maximale positieve druk als een verlengde positieve drukfase teweegbrengt. Het destructief vermogen in gesloten ruimten is bijgevolg veel groter dan in open ruimten en veroorzaakt meer gewonden en sterfgevallen.1,3,5,6,8,11,12,13,15,18,19,23 In een gesloten ruimte of ruimten met obstakels hebben de drukveranderingen over de tijd een complexer en onregelmatiger verloop dan de Friedlandercurve (figuur 1).1,3,13,19

Naast de drukveranderingen, is de *blast wave* tevens verantwoordelijk voor de verplaatsing van omgevende lucht. Deze massabeweging van lucht, de *blast wind*, is naast de positieve- en negatieve drukfase van de *blast wave*, de derde component die verantwoordelijk is voor explosie-gerelateerde letsels. Ze is in staat om objecten en personen weg te slingeren. De *blast wind* kan even schadelijk zijn als de explosie zelf.1,3,5,6,8,10-13,15,16,18,19



**Figuur 1. 6**

A. Druk-tijdcurve bij open-ruimte explosie (Friedlander curve)
B. Druk-tijd curve bij gesloten-ruimte explosie

# Literatuurstudie

## Doelstelling

Deze literatuurstudie wil de kennis omtrent de werking van explosieven en de pathofysiologie van explosie-gerelateerde verwondingen helpen toelichten om zo te kunnen bijdragen aan een optimale preventie en behandeling.3,7,12,13,15 Niet-militair medisch personeel heeft immers een beperkte tot geen ervaring met deze materie.4,7,10,11,13,15,16

In deze literatuurstudie wordt er hoofdzakelijk toegespitst op de pathofysiologie en determinatie van de meeste kenmerkende explosie-gerelateerde letsel: de primaire en secundaire letsels.

## Methode

De volgende databanken werden gescreend voor (*systematic*) reviews, originele studies en tijdschriftartikels: PubMed/Medline en Embase. Op PubMed werd gezocht aan de hand van de volgende MesHtermen en verschillende combinaties van deze: *Blast injury, blast injuries, terrorism, mass casualty, explosions, etiology, classification, adverse effects, pathophysiology, pathology, explosive agents* en *mechanism of action*. Referenties van artikels werden eveneens doornomen. In het totaal konden 7671 artikels op PubMed weerhouden worden. In de Embase databank werd er met volgende zoektermen (onder vorm van *quick search* en *author keywords*) en combinaties gewerkt: *Blast injury, explosions, weapon, forensic* en *pathology*. Dit leverde 401 artikels op. Inclusie- en exclusiecriteria zijn opgesteld om te bepalen of bepaalde artikelen in aanmerking kwamen voor de review. Tijdens de screening van de PubMed database werden enkel Engelstalige tijdschriftartikels en (systematic) reviews geïncludeerd. Artikels gepubliceerd voor 2005 werden geëxcludeerd. Verder moest er de mogelijkheid zijn tot toegang tot de volledige tekst en werden studies omtrent dierlijke subjecten niet weerhouden. Zo konden 1854 artikels op PubMed weerhouden worden. In de Embase databank werden enkel artikels en reviews, gepubliceerd na 31/12/2001, geïncludeerd. Studies op dieren werden geëxcludeerd. 244 artikels voldeden aan deze criteria. In het totaal hielden we 2098 artikels over. Binnen het bestek van deze literatuurstudie was dit een te groot aantal. Op basis van de titels gebeurde er een verdere selectie waarvan het abstract gelezen werd. Op die manier werden er 26 artikels weerhouden. Verder werd een presentatie van Prof. Dr. W. Van de Voorde omtrent terroristische bomexplosies opgenomen in deze studie.

## Resultaten

### 1.Letselbilan

#### 1.1. Bepalende factoren

Explosie-gerelateerde letsels vinden hun oorsprong in zowel de *blast wave* als de *blast wind* die met explosie gepaard gaan.1,10,13,15,18,19 De complexiteit en intensiteit van de letsels variëren naargelang een aantal factoren. Bepalende factoren zijn onder andere de afstand tot het epicentrum van de explosie, de eigenschappen van het explosief materiaal en de omgeving (open versus gesloten, water versus lucht, de aanwezigheid van voorwerpen of obstakels,…).1-6,11-13,15,18,19,22,23 In de volgende paragrafen gaan we verder in op de factoren afstand en omgeving. De factor eigenschap van het explosief materiaal (*low-order* versus *high-order*) werd in het deel “*Wat is een bomexplosie?”* reeds aangehaald.

* + 1. Afstand

Hoe kleiner de afstand tussen een persoon en de kern van de explosie, des te groter de *blast* overdruk zal zijn.3,5,6,11,15 De grootte van de drukgolf is omgekeerd evenredig met de derde macht van de afstand.3,6,10,15 Naarmate de *blast* *wave* uitdijt, verliest deze aldus snel zijn energie.2,3

* + 1. Omgeving

Het effect van een explosie verschilt significant naargelang het in een open- of gesloten ruimte plaatsvindt. Zo vergroot de omsluiting van een ruimte de destructieve capaciteit door het reflecteren van de drukgolf en ontstaan er grote aantallen secundaire fragmenten door afbraak van structuren. Bijgevolg worden explosies in gesloten ruimten geassocieerd met meer letsels en sterfgevallen.1-3,6,8,11-13,15,18,19,22,23

Net zoals in gesloten ruimten, verhoogt de aanwezigheid van materialen in de buurt van de explosie de verwondingscapaciteit. Door de reflectie van de drukgolf, wordt deze gedurende een langere periode voortgeleid.18

Ook het medium is een bepalende factor voor de kans op explosie-gerelateerde verwondingen (3)(11)(13). Ten opzichte van lucht is water een relatief niet-samendrukbaar medium. Een *blast wave* in water wordt langer voortgeleid over een grotere afstand. Dit verhoogt de verwondingscapaciteit van het explosief.3,11,13,22

#### 1.2. Categorieën van letsels

De verwondingen werden traditioneel in de klinische literatuur onderverdeeld in vier categorieën gebaseerd op de verschillende mechanismen die de verwondingen veroorzaken.1-3,6,8,10,11,15,16,18,19,22,23 Recent werd een vijfde categorie toegevoegd aan deze onderverdeling. De vijf categorieën worden gedefinieerd volgens de Department of Defense Directive 6025.21E (tabel 1).4,11-13,16,22

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Categorie | Definitie | Typische letsels |
| Primaire letsels | Ontstaan door contact *blast wave* met lichaamVoornamelijk holle organen zijn vatbaar | Trommelvliesruptuur*Blast lung*Letsels ter hoogte van de ogenHersenen |
| Secundaire letsels | Ontstaan door rondvliegend debris (*missiles*) (weggekatapulteerd van detonatieplaats)  | Penetrerende wondenStompe traumata |
| Tertiaire letsels | Ontstaan door verplaatsing van individuen en instorten van structuren door *blast wind* | Stompe traumata (zoals scheurwonden, fracturen en plettraumata) |
| Quaternaire letsels | Andere explosie-gerelateerde verwondingen, in het bijzonder door hitte/vuur; exacerbaties of complicaties van bestaande ziektes of condities; psychologische gevolgen  | BrandwondenInhalatietraumata |
| Quinaire letsels | Ontstaan door niet-projectiele addities aan het explosief Vb. pathogenen, feces |  |

**Tabel 1.12** Categorieën van explosie-gerelateerde letsels

Kenmerkend voor slachtoffers van ontploffingen, is dat ze vaak getroffen zijn door meer dan één van deze verschillende letseltypes, verspreid over de verschillende lichaamsdelen.3,6,7,11,13,22 Bovendien worden bepaalde letsels vaak veroorzaakt door een combinatie van verschillende letseltypes.3,12,15

Primaire en secundaire letsels, respectievelijk veroorzaakt door de *blast wave* en rondvliegend debris (zgn. *missiles*), zijn het meest kenmerkend voor het explosie-gerelateerde letselbilan. In tegenstelling tot wat vaak gedacht wordt, zorgen niet primaire, maar wel secundaire letsels in de meeste omstandigheden voor het grootste aandeel van verwondingen en zijn ze de hoofdoorzaak van overlijden in zowel militaire als niet-militaire settings.1,3,6,12,13,15,16,18,19,22 Echter, in bepaalde situaties, zoals bij onderwaterexplosies of explosies in gesloten ruimten, kunnen primaire *blast injuries* domineren.3,12,19,22

1.2.1. Primaire blastletsels

Primaire blastletsels of *blast injuries* zijn het gevolg van drukveranderingen (*blast wave*).1-4,6,11,13,15,16,18,21,22 Na een initiële stijging van de druk, is er opeenvolgend een kortdurende negatieve drukfase. Dit zorgt voor compressie en verplaatsing van weefsels ten opzichte van elkaar, resulterend in letsels van holle organen.1-5,11,13,15,16,18,22 Met name de met gas gevulde organen, zoals de longen en het middenoor zijn zeer vatbaar voor drukveranderingen.1-6,11-13,15,16,18,21,22,23

1.2.2. Secundaire letsels

Secundaire en tertiaire letsels vinden hun oorsprong in de *blast wind.*11,12,18,23
Secundaire letsels omvatten stompe en in hoofdzaak scherpe traumata (*missile injury*) afkomstig van weggekatapulteerd/rondvliegend debris.1-3,6,10,11,13,15,16,18,21,22,23 Deze fragmenten kunnen zowel afkomstig zijn van onderdelen (vb. spijkers) of het omhulsel van het explosief materiaal (primaire fragmenten) als van de omgeving (secundaire fragmenten).1-6,10,11,13,15,18,23 Alle interne organen kunnen door directe penetrerende impact beschadigd worden.12,15

1.2.3. Tertiaire letsels

De verplaatsing van subjecten en instorting van structuren als gevolg van de *blast wind*, liggen aan de basis van de tertiaire teerde letsels.1-4,6,10-13,15,16,18,22,23 Deze groep omvat voornamelijk stompe- en plettrauma.1-3,10-13,16,22 Wanneer skeletspieren worden verpletterd, kan het *Crush syndroom* ontstaan, met vrijzetting van myoglobine, uraten, fosfaten en kalium uit de myocyten.10,11,13,18,22 Onbehandeld kan dit leiden tot renale dysfunctie en overlijden door acidose en metabole ontregelingen.10,11,13,18,22 We zien hier vaak fracturen en scheurwonden van ledematen en ingewanden.12,15

1.2.4. Quaternaire letsels

Brandwonden, inhalatietrauma (van stof of toxines), blootstelling aan straling, asfyxie, complicaties of exacerbaties van bepaalde ziektes (vb. astma-opstoot) of condities (vb. gevolgen voor de zwangerschap) en psychologische gevolgen vallen onder de categorie van quaternaire letsels.1-4,6,11-13,15,16,18,22,23

1.2.5. Quinaire letsels

De vijfde groep van letsels omvat de morbiditeit veroorzaakt door niet-projectiele addities aan het explosief (vb. feces, straling, pathogenen etc.).2-4,11-13,22

In deze studie zullen we voornamelijk de primaire en secundaire blastletsels uitvoerig bespreken.

### 2. Setting

Een onderverdeling tussen ruwweg open- versus gesloten ruimten zoals men terugvindt in de meeste studies is te weinig genuanceerd en onvolledig om alle of zelfs meeste “real-life” scenario’s te beschrijven. Zo wordt in de enge zin geen onderscheid gemaakt tussen een “echte” open plaats (vb. een plein) versus een half-open plaats (vb. huizenrij langs straatkant), hoewel dit wel degelijk resulteert in andere letselpatronen.

Naar aanleiding van deze problematiek werd in 2016 door *Rozenfeld et al.* een studie gepubliceerd die het belang van klinische verschillen tussen explosies op diverse plaatsen onderstreept. Daarbij werd de bestaande tweedelige classificatie uitgebreid naar 5 categorieën van settings: gesloten ruimte – halfopen ruimte – in een bus – in de buurt van een bus – open ruimte (figuur 2). Het doel van de studie was om naargelang het type ruimte een meer nauwkeurige voorspelling te maken van de types en ernst van de verwondingen.17

De studie heeft significante verschillen aangetoond tussen de verschillende settings in termen van letsels, benodigde ziekenhuisverzorging en klinische uitkomsten (tabel 2). Zo gaan explosies in gesloten ruimten gepaard met de hoogste proportie van ernstige en kritische verwondingen, terwijl explosies in de nabijheid van een bus geassocieerd zijn met de laagste proportie. In gesloten ruimten, half open plaatsen of bussen is er meer kans om meerdere verwondingen op te lopen. Explosies in de nabijheid van een bus worden gekenmerkt door voornamelijk stompe traumata (vb. fracturen, scheurwonden, plettraumata), terwijl in de andere settings penetrerende traumata overheersen. Brandwonden komen het vaakst voor bij explosies in gesloten ruimten en bussen.17

Tevens wordt elke setting gekarakteriseerd door een verschillend distributiepatroon van *blast-* en *missile injuries* (tabel 2). De proportie van traumatische hersenschade is het grootst in gesloten ruimten. In bussen zien we meer nektraumata en ernstige thoraxletsels. Half-open plaatsen gaan voornamelijk gepaard met traumata aan het hoofd en extremiteiten. Patiënten van explosies op open plaatsen vertoonden hoofdzakelijk extremiteitsletsels. Bij ontploffingen in de nabijheid van bussen worden weinig abdominale- en thoracale letsels weerhouden, maar zijn er wel veel externe, niet ernstige, hoofd- en nekverwondingen. Tevens wordt deze setting gekenmerkt door significant meer beenfracturen en kneuzingen.17

De studie besluit bijgevolg dat de specificiteit van de 5-categorieën taxonomie significant hoger is dan de traditionele 2-categorieën (open-gesloten) onderverdeling en pleit bijgevolg voor een uitbreiding van de bestaande classificatie. Op basis van een nieuwe en verdere onderverdeling, kan het medisch personeel de verwachte letselprofielen beter inschatten en zich hier beter op voorbereiden.17

**Figuur 2.17** Soorten settings

|  |  |
| --- | --- |
| Setting | Letseltype & distributie  |
| Open ruimten | Type letsels: Penetrerende traumata Hoofdzakelijk letsels ter hoogte van extremiteiten |
| Half-open ruimten  | Vaak **meerdere** verwondingenType letsels: Penetrerende traumataHoofdzakelijk traumata aan hoofd en extremiteiten |
| Nabijheid van bus  | **Laagste proportie** ernstige en kritische letselsType letsels: Stompe traumata (vb. fracturen, plettraumata en scheurwonden)Hoofdzakelijk externe, niet ernstige hoofd- en nekverwondingen, beenfracturen en kneuzingen |
| In bus  | Vaak **meerdere** verwondingenType letsels: Penetrerende traumataHoofdzakelijk nektraumata en ernstige thoracale letsels |
| Gesloten ruimten  | Vaak **meerdere** verwondingen**Hoogste proportie** ernstige en kritische letselsType letsels: Penetrerende traumataHoofdzakelijk traumatische hersenschade |

**Tabel 2.17**Letsels naargelang de setting

### 3. Primaire blastletsels

Primaire blastletsels (*blast injuries*) komen uitsluitend voor bij explosies en veroorzaken hoofdzakelijk letsels binnen een tiental meter van het epicentrum (figuur 3).3,6,12,15 Binnen een diameter van om en rond de 5 meter van de detonatieplaats, is de *blast wave* quasi 100% dodelijk.21

**Figuur 3**.**12**
Letsels naargelang de afstand tot het epicentrum van de explosie

#### 3.1. Ontstaansmechanisme

Wanneer een *blast wave* op zijn traject ‘botst’ met een scheidingsvlak van materialen met een verschillende densiteit, wordt de golf deels gereflecteerd en deels doorgegeven.1,11,16 De combinatie van hoog frequente stressgolven en laag frequente schuifgolven op het lucht-lichaam of vloeistof-lichaam scheidingsvlak is verantwoordelijk voor het ontstaan van *blast injuries.*1,2,6,10,12,13,16,18

Afhankelijk van de locatie en de kenmerken van de explosie, zal ofwel het effect van de stressgolf ofwel het effect van de schuifgolf overheersen.13,18 De eerste drukgolf die ontstaat bij snelle detonatie is meestal een stressgolf met supersonische oppervlakte snelheden van 80 tot 90 m/s (ongeveer 300 km/u). Deze kortdurende golf zorgt voor versplintering op de scheidingsvlakken, waardoor het weefsel gefragmenteerd en verplaatst wordt.1,13 Dit proces wordt ook wel *spalling en implosie* genoemd (figuur 4)*. Spalling* treedt op tijdens de positieve drukfase, en betreft het verplaatsen en versplinteren van het dense weefsel/medium in het minder dense weefsel/medium (vb. bloed in de longcapillairen is denser en minder samendrukbaar dan de lucht in de longalveolen, door de positieve druk wordt het bloed doorheen de endotheelwand in de alveolen geperst, resulterend in een pulmonale alveolaire bloeding). Bij *implosie*, tijdens de negatieve drukfase, wordt het minder dense weefsel in het dense weefsel versplinterd (vb. door de negatieve druk zet de lucht in de alveolen uit, waardoor er lucht in de bloedvaten geperst wordt, resulterend in longembolen).1,3,6,11,13 Vervolgens zijn er langer durende schuifkrachten die letsels veroorzaken die we kunnen vergelijken met klassieke stompe trauma, met oppervlaktesnelheden van 20 tot 25 m/s (70 – 90 km/u). Deze zijn verantwoordelijk voor orgaanschade door asymmetrische verplaatsing van weefsels ten op zichte van elkaar, waardoor ze van hun aanhechtingen worden gescheurd.1,3,6,11,13,16 Dit proces staat ook bekend als *inertie.*1,3,6,11

**A. B.**



**Figuur 4.6**A. Spalling (positieve druk) in longen met ontstaan alveolaire bloedingenB. Implosie (negatieve druk) in longen met ontstaan luchtembolen

#### 3.2. Bepalende factoren

Het effect van de *blast wave* wordt groter naarmate er een groter verschil is in densiteit tussen twee materialen. Organen met een grote luchtinhoud zijn dus het meest vatbaar voor primaire blastletsels.3,5,11,12,15,16,18,22,23

Tevens impliceert een groter scheidingsvlak tussen weefsel en lucht, een grotere kans op verscheuring van het scheidingsoppervlak (tussen weefsels met verschillende densiteit).2,13

#### 3.3. Vatbare structuren

Ruptuur van het trommelvlies en van andere holle organen, evenals longschade en luchtembolie, behoren tot de meest geobserveerde *blast injuries.*1-6,11-13,15,16,18,21,22 Ook de ogen (vb. ruptuur oogbol, sereuze retinitis, hyphema) en de hersenen (vnl. contusie) zijn vaak betrokken.2-4,6,11,13,18,22

3.3.1. Trommelvlies

Trommelvliesschade is het meest voorkomende primaire blastletsel.3,6,11-13,15,18

Vanaf een overdruk van 35 kPa is er kans op een ruptuur van het trommelvlies.15,16,21 Bij een overdruk van 104 kPa zal ongeveer de helft van alle trommelvliezen geruptureerd zijn.3,16,21

De aan- of afwezigheid van een trommelvliesruptuur correleert echter weinig met de aanwezigheid van andere blastletsels en kan dus niet beschouwd worden als predictieve marker.2,3,6,11,16 Omgekeerd kan men bij afwezigheid van trommelvliesschade niet besluiten tot afwezigheid van andere, mogelijks ernstige, *blast injuries.*2,3,11

Na een explosie kunnen eveneens sensineurale doofheid, tinnitus, duizeligheid en evenwichtsproblemen optreden.3,4,611,12,15,16,18 Deze klachten verdwijnen vaak spontaan binnen enkele uren. Echter, de incidentie van blijvend gehoorverlies is niet te onderschatten en bedraagt evenwel 55%.4,11,16

3.3.2. Longen

Primaire blastletsels ter hoogte van de longen gaan gepaard met de hoogste mortaliteit onder de *blast injuries* (mortaliteit van ongeveer 11%).4,6,11,15 We treffen *blast lungs* vaker aan bij gesneuvelden dan bij overlevenden.11,15

Vanaf 280kPa kunnen de longen beschadigd worden.15 Het enorme aantal lucht-vloeistof oppervlakten maakt de longen zeer vatbaar voor primaire blastletsels.2,3

*3.3.2.1. Ontstaansmechanisme blast lung*

De *blast wave* verplaatst zich enerzijds via de luchtweg tot in de longen en oefent anderzijds tegelijkertijd een externe druk op de thorax uit, met een intra-thoracale drukstijging als gevolg. Doordat de drukverandering langs de luchtweg langzamer verlopen, ontstaan er multipele drukverschillen die de basis vormen voor primaire blastletsels.13

De *stress wave* veroorzaakt scheurtjes in de inter-alveolaire septa (en soms in het parenchym) met bloedingen tot gevolg.2-4,11,15,16,18,22 Waar de stressgolf het meest geconcentreerd is, is de schade het grootst (costofrenische hoeken, plaatsen dichtbij het mediastinum en de intercostaal ruimten).3,6,13,15,16 Een parallel gestreept patroon is kenmerkend voor schade ter hoogte van de intercostaal ruimten (*rib markings*).3,13,16

Door scheurtjes in de oppervlakkige (subpleurale) alveoli en pleura is er kans op subcutaan en interstitieel emfyseem, evenals op het ontstaan van een (hemo-)pneumothorax.2,3,4,6,11,13,15,16,18,22

De scheiding tussen capillairen en steunweefsel, zorgt voor het ontstaan van perivasculaire, met bloed gevulde ruimten. De formatie van alveolaire-veneuze fistels (door ruptuur) resulteert in de ontwikkeling van luchtembolen die schade op afstand kunnen veroorzaken.2,3,6,13,15,16,18,22

Doordat de alveolen overspoeld worden met vloeistof en cellulair debris, ontstaat er een ventilatie-perfusie mismatch met een negatieve invloed op de oxygenatie. Dit resulteert in een klinische *blast lung.3,*11,15,16,22

*3.3.2.2. Bepalende factoren*

Bij een hoge blast overdruk en een verlengde positieve drukfase (zoals in gesloten ruimten) kan de incidentie van *blast lungs* verdrievoudigen.3

In gesloten ruimten zien we voornamelijk bilaterale *blast lungs*, in open ruimten is er voornamelijk ipsilaterale longschade.11

*3.3.2.3. Presentatie blast lung*

Symptomen van primaire longschade zijn: dyspnee, retrosternale pijn, een initieel droge hoest evoluerend naar een hoest met schuimige sputa en in een later stadium hemoptoe.3,4,6,11,15,16

Bij het klinisch onderzoek kan er tachycardie, cyanose, dofheid bij percussie, verminderd vesiculair ademgeruis en verspreide ruwe rhonchi weerhouden worden.11,16

Op een thoraxradiografie kunnen *blast lungs* zich presenteren als bilaterale pulmonaire infiltraten met een typisch perihilair vlinderpatroon.2,3,6,15,16

3.3.3. Gastro-intestinale organen

Primaire *blast injuries* ter hoogte van het gastro-intestinaal systeem worden minder vaak geobserveerd dan *blast lungs.*6,11,15

Algemeen is er in gesloten ruimten en bij onderwaterexplosies een grotere kans op primaire darmschade.3,4,6,11,15,16

De grote hoeveelheid gas in het colon, maakt deze van alle viscerale organen het meest vatbaar voor primaire darmschade.3,11,13,18

*3.3.3.1 Ontstaansmechanisme*

De stressgolf kan ter hoogte van het mucosaoppervlakte van de darm tot contusie en zelfs perforatie leiden. Het intramuraal oedeem en de bloedingen als gevolg van de contusies, kunnen de vorming van microtrombosen in de hand werken. Microtrombosen kunnen de perfusie compromitteren en kunnen op die manier aanleiding geven tot een uitgestelde (ischemische) darmperforatie (tot twee weken na het event).3,4,6,11,15,16,22

Door de *shearing forces* en de verplaatsing van de abdominale wand kunnen ook de solide abdominale organen, het retroperitoneale colon en het mesenterium (met bloedvaten) van de dunne darm beschadigd worden.3,15,16

*3.3.3.2. Presentatie darmschade*

Primaire schade van de maag-darm tractus kan gepaard gaan met overgeven, misselijkheid, abdominale pijn, peritonitis, melena en/of hematemesis.11,15

### 4. Secundaire letsels

Secundaire letsels zijn de meest voorkomende explosie-gerelateerde letsels en hebben geen predilictieplaats.1,13,15,16

Secundaire letsels omvatten penetrerende (*missile injuries*) en stompe traumata afkomstig van debris dat meegesleurd wordt met de blast wind. Het debris kan afkomstig zijn van de omgeving, maar kan evenzeer doelbewust verwerkt zijn in het explosief (zgn. splinter- of spijkerbom) om de morbiditeit en mortaliteit te verhogen (vb. nagels, naalden, stenen, glas etc.).1-3,5,6,10,11,13,15,16,18,21-23

De penetrerende fragmenten verspreiden zich in de omgeving aan een hoge snelheid en kunnen letsels veroorzaken tot op een afstand van 500 en uitzonderlijk zelfs duizend meter verwijderd van de ontploffingssite (figuur 3).12,13,15,16

#### 4.1. Ontstaansmechanisme secundaire letsels

Fragmenten die het lichaam penetreren, zorgen voor laceratie en verplaatsing van het omgevende weefsel met tijdelijke caviteitvorming. Door de subatmosferische druk ter hoogte van de caviteit, kunnen externe contaminerende partikels aangezogen worden.10,16

#### 4.2. Bepalende factoren

Elastische weefsel (vb. longen) zijn meer bestand tegen de caviteitsvorming dan weefsels met een hogere densiteit (vb. lever). Weefsels met een hoge densiteit zullen bijgevolg sneller scheuren en aldus meer schade oplopen.10,16

Ook de hoeveelheid gekoppelde energie en de aan-of afwezigheid van contaminerende agentia bepalen de ernst en mate van secundaire letsels.10,16

Bij terroristische aanvallen in een burgerlijke setting zien we frequenter penetrerende wonden dan bij militaire explosies. Dit kan grotendeels verklaard worden door de afwezigheid van lichaamsbeschermende materialen/kledij in civiele settings.11

### 5. Letsels ter hoogte van de extremiteiten

Letsels aan de extremiteiten, zowel orthopedische als musculocutane, zijn frequent bij slachtoffers van bomexplosies en kunnen hun oorsprong vinden in elk van de vijf onstaansmechanismen van explosie-gerelateerde verwondingen.2,3,6,8,11,24 Door hun complex ontstaansmechanisme en destructief karakter zijn extremiteitsletsels moeilijk te behandelen.2

Secundaire en tertiaire letsels hebben het grootste aandeel in schade aan de ledematen.2,6,11,23 Extremiteitschade als gevolg van de primaire *blast* effecten gaat gepaard met de hoogste mortaliteit en zien we voornamelijk bij slachtoffers dicht bij de detonatieplaats.10

Bij explosies kaderend in oorlogs- en terroristische context hebben letsels ter hoogte van de onderste extremiteiten een groter aandeel dan letsels ter hoogte van de bovenste extremiteiten.1,24 Een retrospectieve studie gepubliceerd in 2010 omtrent civiele gasexplosies kon echter geen fracturen ter hoogte van de lange beenderen, het bekken en de wervelzuil weerhouden. Dit opmerkelijk verschil in letselpatronen tussen gasexplosies en explosies in terroristische- en oorlogssettings kan tot op heden niet eenduidig verklaard worden.25,26 De betrokkenheid van onderste ledematen bij landmijnen zou verklaard kunnen worden aan de hand van de opwaartse beweging van de *shockwave* rondom de explosieplaatsna de detonatie.1 Deze bevinding verklaart echter niet waarom de onderste extremiteiten bij niet-landmijn explosies in oorlogs- en terroristische settings zo vaak betrokken zijn en vergt verder onderzoek.

#### 5.1. Traumatische amputaties

Van alle muskuloskeletale schade, is de traumatische amputatie (samen met open fracturen van het bekken) de meest ernstige.15,24 1 tot 7% van de slachtoffers van explosies presenteren zich met een traumatische amputatie.3,11,15 Het gaat gepaard met een hoge mortaliteit en een hoge verdenking op geassocieerde letsels.3,11,15,24,27 Ze komen vaak voor ter hoogte van de onderste extremiteiten en gebeuren slechts zelden doorheen gewrichten.1,6,8,16,23,24 Amputaties die proximaal (bovenbeen) gelegen zijn (moeilijke bloedstelping) of geassocieerd zijn met een bekkenfractuur of abdominaal letsel, hebben de slechtste prognose.8,9,11,27

Traumatische amputaties zijn een resultaat van verschillende verwondingsmechanismen.8,15,23,24 De *blast wave* is verantwoordelijk voor het ontstaan van fracturen (vnL met een korte schuine- of transversale fractuurlijn), met een predilictieplaats ter hoogte van het proximale derde van de humerus en voorarm, evenals ter hoogte van het distale derde van de femur en proximale derde van de tibia.3,6,8,10,11,13,15,16,23,24 Vervolgens kan de *blast wind* het lidmaat van de rest van het lichaam scheiden.3,11,15,16,23,24 Ook rondvliegend debris of verplaatsing van het individu speelt een belangrijke rol in fractuurvorming of zelfs amputatie van een lidmaat (weggekatapulteerd debris zorgt voornamelijk voor communitieve, multi-fragmentaire fracturen met veel schade ter hoogte van de omgevende weke delen; fracturen als gevolg van verplaatsing van het individu zijn eerder spiraalvormig en gaan gepaard met plettraumata).8,10,15,16,23,24

#### 5.2. Compartiment syndroom

Ook compartiment syndromen worden vaak gezien bij slachtoffers van explosies. Dit is een bedreigende conditie voor de ledematen waarbij de perfusiedruk onder de druk in de osteofasciale ruimte valt. Fracturen, inflammatie en oedemen kunnen de weefseldrukken verhogen met ischemie en necrose tot gevolg.3,4,10,13,22

# Conclusie

Civiele settings vormen vaak het mikpunt van de toenemende terroristische dreiging. Dit stelt de medische wereld voor een enorme uitdaging. Immers, tot voor kort bleef niet-militair medisch personeel quasi gespaard van explosie-gerelateerde verwondingen. Bijgevolg is het van groot belang dat er inzicht verworven wordt in het ontstaan en het herkennen van het complex verwondingspatroon, zodat er zelfs op de meest stressvolle momenten een optimale preventie en behandeling verleend kan worden.3,4,10-13,15,16,19,22

Bepalende factoren voor de intensiteit en complexiciteit van explosiegerelateerde letsels zijn onder meer de afstand tot het centrum van de explosie, de eigenschappen van het explosief materiaal en het type van omgeving waar de explosie plaatsvindt.1-6,11-13,15,18,19,22,23 Deze gegevens kunnen het medisch team op weg helpen om op cruciale momenten de ernst en urgentie van de situatie in te schatten.

De drukveranderingen van de *blast wave* en de massabeweging van lucht (de *blast wind)*, hebben het grootste aandeel in het ontstaan van explosie-gerelateerde verwondingen.1,10,13,15,18,19 Hedendaags maakt men meestal gebruik van een vijfdelige classificatie van explosie-gerelateerde letsels. Deze onderverdeling is gebaseerd op het ontstaansmechanisme.1-4,6,8,10-12,15,16,18,19,22,23 Primaire *blast injuries*, veroorzaakt door drukveranderingen, komen uitsluitend voor bij explosies. Bijgevolg kunnen we stellen dat niet-militair medisch personeel amper tot geen ervaring heeft met dit soort letsels, waardoor deze een belangrijk aandachtspunt vormen in de hedendaagse medische wereld.3,6,12,15 Secundaire letsels, veroorzaakt door rondvliegend debris, of zogenaamde *missile injuries* zorgen in de meeste situaties voor het grootste aandeel van verwondingen. Een goede kennis omtrent dit soort verwondingen mag dan ook niet ontberen.1,13,15,16 Door de reeds ruime ervaring van medisch personeel met de drie overige categorieën (met name de tertiaire, quaternaire en quinaire letsels) werden deze niet in detail besproken.

Letsels ter hoogte van de extremiteiten zijn frequent aanwezig bij slachtoffers van bomexplosies.2,3,6,8,11,24 In,vergelijking met gasexplosies hebben bomexplosies kaderend in een oorlogs- en terroristische context meer letsels ter hoogte van de onderste extremiteiten dan ter hoogte van de bovenste extremiteiten.1,24 Deze bevinding kan echter tot op heden niet eenduidig verklaard worden en vergt verder onderzoek.25,26

# Conflict of Interest

Geen

# Financial Disclosure

Geen

# Referenties

1. Dussault MC, Smith M, Osselton D. Blast injury and the human skeleton: An important emerging aspect of conflict-related trauma. J Forensic Sci 2014, 59(3):606-12.

2. Lesperance RN, Nunez TC. Blast Injury. Impact on Brain and Internal Organs. Crit Care Nurs Clin N Am 2015, 27(2):277-87.

3. Wolf SJ, Bebarta VS, Bonnett CJ, Pons PT, Cantrill S V. Blast injuries. The Lancet 2009, 374(9687):405-15.

4. Finlay SE, Earby M, Baker DJ, Murray VSG. Explosions and human health: The long-term effects of blast injury. Prehospital and Disaster Medicine 2012, 27(4):385-91.

5. Proud WG. The physical basis of explosion and blast injury processes. J R Army Med Corps 2013, 159 Suppl 1:i4-9.

6. Yeh DD, Schecter WP. Primary blast injuries - An updated concise review. World J Surg 2012, 36(5):966-72.

7. Cannon JW, Hofmann LJ, Glasgow SC, Potter BK, Rodriguez CJ, Cancio LC, et al. Dismounted Complex Blast Injuries: A Comprehensive Review of the Modern Combat Experience. In: Journal of the American College of Surgeons 2016, 223(4):652-664.

8. Ramasamy A, Hill AM, Masouros S, Gibb I, Bull AMJ, Clasper JC. Blast-related fracture patterns: A forensic biomechanical approach. J R Soc Interface 2011, 8(58):689-98.

9. Morrison J, Hunt N, Midwinter M, Jansen J. Associated injuries in casualties with traumatic lower extremity amputations caused by improvised explosive devices. Br J Surg 2012, 99(3):362-6.

10. Ramasamy A, Cooper GA, Sargeant ID, Evriviades D, Porter K, Kendrew JM. (i) An overview of the pathophysiology of blast injury with management guidelines. Orthop Trauma 2013, 27(1):1-8.

11. Mathews ZR, Koyfman A. Blast Injuries. J Emerg Med 2015, 49(4):573-87.

12. Champion HR, Holcomb JB, Young LA. Injuries from explosions: Physics, biophysics, pathology, and required research focus. Journal of Trauma - Injury, Infection and Critical Care 2009, 66(5):1468-77.

13. Westrol MS, Donovan CM, Kapitanyan R. Blast Physics and Pathophysiology of Explosive Injuries. Ann Emerg Med 2017, 69(1S):S4-S9.

14. McAlister CN, Marble AE, Murray TJ. The 1917 Halifax Explosion: the first coordinated local civilian medical response to disaster in Canada. Can J Surg 2017, 60(6):372-374.

15. Singh AK, Ditkofsky NG, York JD, Abujudeh HH, Avery LA, Brunner JF, et al. Blast Injuries: From Improvised Explosive Device Blasts to the Boston Marathon Bombing. RadioGraphics 2016, 36(1):295-307.

16. Garner MJ, Brett SJ. Mechanisms of Injury by Explosive Devices. Anesthesiology Clinics 2007, 25(1):147-60.

17. Rozenfeld M, Givon A, Shenhar G, Renert L, Peleg K. A new paradigm of injuries from terrorist explosions as a function of explosion setting type. Ann Surg 2016, 263(6):1228-34.

18. DePalma RG, Burris DG, Champion HR, Hodgson MJ. Blast Injuries. N Engl J Med 2005, 352(13):1335-42.

19. Edwards DS, McMenemy L, Stapley SA, Patel HDL, Clasper JC. 40 years of terrorist bombings - A meta-analysis of the casualty and injury profile. Injury 2016, 47(3):646-52.

20. De Cauwer H, Somville F, Sabbe M, Mortelmans LJ, Dimpna AS. Hospitals: Soft Target for Terrorism? Prehosp Disaster Med 2017, 32(1):94-100.

21. Van de Voorde W. Presentatie Terroristische bomexplosie (zelfmoordterroristen-spijkerbommen), Brussels Airport 22/03/2016. Seasonal Meeting forensische geneeskunde UZLeuven-UZA 2016.

22. Plurad DS. Blast Injury. Mil Med 2011, 176(3):276-82.

23. Weil YA, Mosheiff R, Liebergall M. Blast and penetrating fragment injuries to the extremities. J Am Acad Orthop Surg 2006, 14(10 Spec No.):S136-9.

24. Singleton JAG, Gibb IE, Bull AMJ, Clasper JC. Blast-mediated traumatic amputation: Evidence for a revised, multiple injury mechanism theory. J R Army Med Corps 2014, 160(2):175-9.

25. Busche MN, Gohritz A, Seifert S, Herold C, Ipaktchi R, Knobloch K, et al. Trauma mechanisms, patterns of injury, and outcomes in a retrospective study of 71 burns from civil gas explosions. J Trauma 2010, 69(4):928-33.

26. Dong L, Zhu F, Jin X, Suresh M, Jiang B, Sevagan G, et al. Blast effect on the lower extremities and its mitigation: A computational study. J Mech Behav Biomed Mater 2013, 28:111-24.

27. Clasper J, Eliahoo J, Masouros SD, Webster CE, Stinner DJ. Characterization of Lower Extremity Blast Injury. Mil Med 2018, 183(9-10): e448–e453.