

Människans tålighet mot luftstötvågor

Litteraturstudie

LARS SVENSSON



FOI-R--3905--SE ISSN 1650-1942 Februari 2015

Lars Svensson

Människans tålighet mot luftstötvågor

Litteraturstudie.

Titel

Människans tålighet mot luftstötvågor

Human tolerance to blast waves

Title

Rapportnr/Report no	FOI-R3905—SE
Månad/Month	Februari
Utgivningsår/Year	2015
Antal sidor/Pages	66 p
ISSN	1650-1942
Kund/Customer	Fortifikationsverket
Forskningsområde	11. Vapen, Skydd och säkerhet
FoT-område	Vapen och skydd
Projektnr/Project no	E26621
Godkänd av/Approved by	Torgny Carlsson
Ansvarig avdelning	Försvars och säkerhetssystem

Detta verk är skyddat enligt lagen (1960:729) om upphovsrätt till litterära och konstnärliga verk. All form av kopiering, översättning eller bearbetning utan medgivande är förbjuden.

This work is protected under the Act on Copyright in Literary and Artistic Works (SFS 1960:729). Any form of reproduction, translation or modification without permission is prohibited.

Sammanfattning

Föreliggande rapport är en inledande genomgång av kunskapsläget avseende luftstötvågors inverkan på människan. Studien genomförs på uppdrag av Fortifikationsverket och är inriktad mot i första hand primära och tertiära skadeverkningar, det vill säga skador som är orsakade direkt av luftstötvågen och skador orsakade av att människan kastas iväg. Losslitning och kast av fastsatta föremål diskuteras också. Sekundära skador, det vill säga skador från splitter och kvartära skador som omfattar brännskador och skador från giftiga gaser behandlas ej.

Det är framförallt luftfyllda organ som är känsliga för stötvågor. Örat är det organ som är känsligast och trumhinnan spricker redan vid relativt låga tryck (ca 50 - 60 kPa). Däremot är en sprucken trumhinna ingen allvarlig skada och medför sällan allvarliga konsekvenser. Det organ som hittills bedömts som mest gränssättande är lungorna. Skador på lungor kan få allvarliga konsekvenser och belastningsnivån för skada är relativt låg. Området är väl genomarbetat och etablerade gränsvärden finns framtagna.

Om man står så nära laddningen att skaderisken är stor till följd av att kroppen kastas iväg av stötvågen har man sannolikt redan svåra lungskador (gäller mindre laddningar).

Skador på centrala nervsystemet har aktualiserats i och med konflikterna i Irak och Afghanistan. Traumatiska hjärnskador (Traumatic Brain Injuries, TBI) benämns ibland som signaturskada för dessa konflikter. Området är föremål för intensiv uppmärksamhet men tillförlitliga och etablerade skadebeskrivningar eller gränsvärden för skada finns inte än.

För att få en uppfattning om resulterande hastighet hos föremål som är fastsatta i underlaget krävs en detaljerad analys av last-deformationsförloppet hos fästelementen. Sannolikt krävs försök och/ eller numerisk beräkning för att göra korrekta bedömningar. Möjligen kan konstruktionsrekommendationer tas fram för olika typfall baserat på en sådan analys.

Rapporten ger inledningsvis en kort sammanfattning av stötvågsteori följt av skadebeskrivningar och genomgång av värderingsmodeller och gränsvärden för primära och tertiära skador. Avslutningsvis redovisas tre exempel med skaderisker som funktion av avstånd för några olika skadetyper.

Nyckelord: verkan, luftstötvåg, skaderisk, gränsvärden.

Summary

This report provides an initial review of the state of knowledge regarding blast wave's effects on man. The study is conducted on behalf of the Swedish Fortifications Agency and deals primarily with primary and tertiary effects, i.e. injuries caused directly by the blast wave and injuries caused by violent motion of man. Secondary injuries, i.e. injuries from fragments and quaternary injuries involving burns and injuries from toxic gases are not considered. The force needed to pull off attached objects and the resulting velocity is also discussed.

The ear is the organ most sensitive to blast effects and eardrum rupture occur even at relatively low pressure (approx. 50 - 60 kPa). However, a ruptured eardrum is not considered as a serious damage. The lungs are considered to be the most limiting organ. Injury to the lungs can be very serious and the tolerance level is relatively low. The area is elaborated and established thresholds have been developed. Injuries to the central nervous system are a field that arose in the Iraq and Afghanistan conflicts. Traumatic Brain Injuries, TBI, are characterized at times as the signature injuries of those conflicts. The area is the subject of intense attention but reliable injury descriptions or tolerance levels are not yet established.

It is rather complex to calculate the forces needed to pull off fastened equipment and to determine the resulting velocity. It most probably requires testing and / or numerical calculation to make accurate assessments. Possibly, design recommendations can be derived for different scenarios based on such an analysis.

The report first provides a brief summary of blast wave theory followed by injury descriptions and review of injury models and tolerance levels for primary and tertiary injuries. In conclusion, three examples describing injury risks as a function of distance for a few different types of injuries are presented.

Keywords: Effects, shock wave, injury risk, tolerance level.

Innehållsförteckning

1	Inledning 7
1.1	Bakgrund7
1.2	Syfte och mål7
1.3	Omfattning och avgränsningar7
2	Luftstötvåg 8
2.1	Stötvågen8
2.2	Reflektion10
2.3	Dynamiskt tryck11
2.4	Empiriska modeller för bestämning av stötvågsparametrar12
2.5	Belastning av strukturer; diffraktion och dynamiskt tryck13
3	Skadeverkan på människan 15
3.1	Skador på människan vid exponering för luftstötvåg - indelning15
3.2	Primära Skador16
3.2.1 3.2.2 3.2.3	Skador på lungor och inre organ17 Skador på öra, hörsel19 Skador på centrala nervsystemet (CNS)20
3.3	Tertiära skador22
3.4	Skadenivåer/ skadesannolikhet23
4	Metoder och gränsvärden 25
4.1	Skador på öra och hörsel25
4.1.1 4.1.2	Hörselskada25 Trumhinneruptur26
4.2	Skador på lungor och inre organ28
4.2.1 4.2.2 4.2.3 4.2.4 4.2.5	Bowens metod
4.3	Skador på hjärnan (centrala nervsystemet, CNS)
4.3.1 4.3.2 4.3.3	Stötvågsrelaterade skador

4.4	Tertiära skador	44
4.4.1	Kastförloppet	44
4.4.2	Belastning av människokroppen	44
4.4.3	Relativ belastning av kroppsdelar	45
4.4.4	Accelerationsskador	46
4.4.5	Skador vid islag	46
4.4.6	Kasthastighet	47
4.4.7	Diskussion och slutsats	54
5	Losslitning och kast av fastsatta föremål	56
5.1	Exempel: Fastbultad låda	58
6	Applikationsexempel	61
7	Förslag på fortsatt arbete	66

1 Inledning

Arbetet behandlar de skador som kan uppkomma på människan då hon utsätts för en luftstötvåg orsakad av en detonation. Rapporten är baserad på teoretisk studie av öppet material i form av litteratur, publicerade vetenskapliga artiklar, konferensbidrag etc. samt i viss mån obekräftade källor på internet. En inte försumbar del är också resultat av diskussion med kunniga kollegor på FOI och KI.

Mycket av den kunskap som finns inom området är resultat av den forskning som bedrevs under 1950, -60 och -70-talen då kärnvapenhotet var en drivande faktor. Sverige hade en rad duktiga och ofta citerade forskare inom området, till exempel Carl-Johan Clemedsson, Arne Jönsson och Håkan Axelsson.

Under 2000 talet har effekterna på människan från luftstötvågor fått förnyad aktualitet i och med det ökande användandet av IED (Improvised Explosive Devices) i Irak och Afghanistan. Man kan också misstänka att moderna skyddade fordon och kroppsskydd liksom effektiva vårdinsatser ger ökad överlevnad mot hot som splitter och projektiler vilket medför att andra skador som till exempel stötvågsinducerade skador blir mer "synliga". Stora resurser satsas av US Department of Defence inom "Blast Injury Research Program" för att förstå, förebygga och behandla stötvågsrelaterade skador.

Nationellt bedriver framförallt Enheten för Vapentraumatologi på Karolinska Institutet forskning inom området luftstötvågors inverkan på centrala nervsystemet.

1.1 Bakgrund

Arbetet har genomförts som en beställning från Fortifikationsverket. Fortifikationsverket har under senare år genomfört verksamhet inom området skydd mot vapenverkan. När det gäller verkan från detonationer har fokus hittills varit verkan och tålighet hos olika material och strukturer. Det finns därför anledning att studera vilken verkan detonationer har på människan.

1.2 Syfte och mål

Studiens huvudsakliga syfte är att ge en uppfattning om kunskapsläget avseende verkan på människan från luftstötvågor samt föreslå tänkbara värderingsmodeller.

1.3 Omfattning och avgränsningar

Rapporten behandlar i huvudsak två av de effekter som kan orsaka skada på en människa som exponeras för en detonation, primära och tertiära effekter. Primära effekter ger upphov främst till skador på luftfyllda organ som öron och lungor till följd av luftstötvågens direkta verkan. Tertiära effekter omfattar situationer där människor kastas iväg och där skadorna orsakas främst av fall och trubbigt våld.

Skador från primär- eller sekundärsplitter (sekundära effekter) liksom termiska (kvartära effekter) eller toxiska skador (kvintära effekter) behandlas inte.

2 Luftstötvåg

2.1 Stötvågen

Avsikten med föreliggande kapitel är att ge en förståelse för de resonemang som sedan förs avseende effekter på människan från en luftstötvåg. Det är alltså inte detonationen i sig utan stötvågen som orsakas av detonationen som behandlas.

Vid en detonation i luft expanderar spränggaserna snabbt och orsakar en störning i den omgivande luften, en stötvåg. Stötvågen sprider sig ut från detonationspunkten med hög hastighet, initialt flera tusen m/s, se exempel i Figur 3. Hastigheten avtar snabbt och närmar sig så småningom ljudhastigheten i den omgivande ostörda luften.

Stötvågen sprider sig radiellt ut från detonationspunkten i ett fritt fält och ger upphov till en mycket snabb förändring av ett antal fysikaliska parametrar där ökningen av tryck (P), partikelhastighet (U), densitet (ρ) och energi (E) (bl.a. temperatur) är de mest framträdande, se Figur 1.



Figur 1 Sfärisk stötvåg

Den snabba tillståndsförändring som sker över stötvågsfronten kan i de flesta praktiska fall betraktas som momentan/ diskontinuerlig. I verkligheten förhåller det sig inte så men tidsrymden över vilken förändringen sker är mycket kort, i storleksordningen delar av mikrosekunder.

Efter att stötvågen har passerat återgår förhållandena snabbt till omgivningstillståndet med undantag av temperaturen som kan vara förhöjd under en längre period. Detta gäller vid förhållanden då gaserna kan expandera fritt och inte vid detonationer i till exempel slutna rum.

I Figur 2 beskrivs det principiella tryck-tidförloppet i en fix punkt för en luftstötvåg som utbreder sig i ett fritt fält utan reflektioner. Övertrycket P⁺ definieras som skillnaden mellan trycket före och efter stötvågspassagen, P⁺= P₁-P₀ (P benämns ibland statiskt tryck eller side on tryck). Efter den positiva övertrycksfasen följer en fas med undertryck. Vid bedömning av verkan från luftstötvågor bortses vanligtvis från den negativa fasen. Ytan under tryckkurvan är impulstäthet och skrivs $I = \int^{t_p} P^+(t) \cdot dt$. Tryck tidförlopp av det här utseendet brukar allmänt kallas ideal eller Friedlander stötvåg/kurva.



Figur 2 Friedlandervåg med övertryck P⁺(t), positiv varaktighet t_p samt positiv impulstäthet I

Genom att utnyttja konserveringslagarna för rörelsemängd, massa och energi i kombination med allmänna gaslagen kan en mängd samband (Rankine Hugoniot sambanden) mellan tillståndet före och efter stötvågspassagen ställas upp. Med vetskap om någon parameter efter stötvågspassage kan övriga parametrar bestämmas. Exempelvis kan sambandet mellan partikelhastigheten U₁ (luftens hastighet) och trycket efter stötvågspassage P₁ beskrivas i ekvation (1)

$$U_{1} = \sqrt{\frac{2}{\rho_{0}} \cdot \frac{(P_{1} - P_{0})}{(\gamma + 1)P_{1} + (\gamma - 1)P_{0}}}$$
(1)

där $\gamma = \frac{c_p}{c_v}$ är värmekapacitetskvoten. I Figur 3visas ett exempel på hur några viktiga parametrar beror av avståndet då en sfärisk trotylladdning på 10 kg detonerar och då stötvågen får sprida sig utan reflektioner. Även om beloppen är stora så verkar de under kort tid, t.ex. är varaktigheten för övertrycket ca 5 ms på ett avstånd av 5 m.



Figur 3 Maximala värden på övertryck P⁺, partikelhastighet U₁, stötvågshastighet W och densitet p_1 som funktion av avståndet från detonationspunkten för en sfärisk fritt upphängd trotylladdning med m= 10 kg. Diagrammen avser hur tillståndet strax efter stötvågspassagen, maxvärden, varierar med avståndet.

2.2 Reflektion

När stötvågen träffar en fast yta reflekteras den och tillståndet bakom den reflekterade vågen skiljer sig från tillståndet bakom den oreflekterade. I stötvågssammanhang brukar man dela in reflexioner i normalreflektion, sned reflektion och machreflektion. Sned reflektion och machreflexion kommer inte att behandlas här.

Normalreflektion, d.v.s. när ytans normal sammanfaller med stötvågens hastighetsvektor, är ett specialfall av sned reflektion och det enklaste fallet av reflektion. För normalreflektion kan förhållandet mellan det infallande statiska övertrycket P_1^+ bakom den ostörda stötvågsfronten (oreflekterade) och det reflekterade övertrycket P_r^+ , Λ , skrivas

$$\Lambda = \frac{P_r^+}{P_1^+} = \frac{8P_1 + 6P_0}{P_1 + 6P_0} \tag{2}$$

under förutsättning att värmekapacitetskvoten $\Upsilon = 1,4$ ($P_1^+ < 1000 \text{ kPa}$)¹. Reflektionen ger alltså upphov till ett övertryck mot ytan som teoretiskt kan vara upp till 8 ggr högre än det statiska övertrycket i omgivningen. Det innebär att när en struktur träffas av en stötvåg belastas den med ett övertryck som är betydligt högre än det statiska övertrycket som uppstår efter en ostörd stötvåg. För en akustisk våg där $P_1 \approx P_0$ fås $\Lambda=2$, d.v.s. övertrycket fördubblas vid normalreflektion.

¹ Morgan Johansson, Stötvågsutbredning i luft, Räddningsverket, Oktober 2002

2.3 Dynamiskt tryck

Som redan nämnts så accelererar stötvågen luften i samma riktning som stötvågen rör sig. Inledningsvis, d.v.s. strax efter stötvågspassagen är strömningshastigheten lika med den partikelhastighet U_1 som kan räknas fram med ekvation (1). För ett frifältsförlopp enligt figur 5 avtar hastigheten snabbt och efter tiden t_q (varaktigheten) är strömningshastigheten noll. t_q är oftast större än t_p beroende på tröghetskrafterna. Holm² beskriver förhållandet mellan den positiva fasens varaktighet för respektive statiskt och dynamiskt tryck enligt Figur 4. Till följd av det undertryck som uppstår börjar luften så småningom strömma tillbaka in mot detonationspunkten och strömingen är då motsatt riktad strömningen under den positiva tryckfasen.

Det dynamiska trycket q definieras som



Figur 4² Förhållande mellan det dynamiska tryckets och statiska övertryckets varaktighet som funktion av max statiskt övertryck enligt Holm.

² Knut B Holm, Beregning av dodelighet fra luftsjokk, FFI rapport 2007/01896, 30 Juni 2007



Figur 5 Tryck-tid förloppets principiella utseende för statiskt och dynamiskt övertryck (Friedlandervåg).

2.4 Empiriska modeller för bestämning av stötvågsparametrar

Med hjälp av Rankine- Hugoniot sambanden kan förhållandet mellan olika storheter före och efter stötvågfrontens passage bestämmas. För att kunna ta fram absolutvärden behövs ytterligare information. I föreliggande rapport används Conwep och Blast Effects Computer (BEC) som är programvaror som ger möjlighet att beräkna effekter från detonationer. Både Conwep och BEC använder underlag ursprungligen presenterat av Kingery och Bulmach 1983³. Kingery och Bulmachs modeller baserar sig på empiriskt underlag.

Som redan diskuterats kan tryckets variation med tiden i en fix punkt principiellt beskrivas enligt Figur 5 vid ideal stötvåg. Baker⁴ ger en ekvation som i ursprunglig form beskrivs av Friedlander 1946⁵ och som ger tryckets avtagande i den positiva tryckfasen enligt

³ Kingery, Charles N. Bulmash, Gerald, Airblast Parameters from TNT Spherical Air Burst and Hemispherical Surface Burst Defence Technical Information Center, Ballistic Research Laboratory, Aberdeen Proving Ground, Maryland, 1984.

⁴ Baker Wilfred E., Explosions in air, University of Texas Press, Austin, Texas, May 1973

$$\mathbf{P}(\mathbf{t}) = \mathbf{P}_{\max}^{+} \left(\mathbf{1} - \frac{\mathbf{t}}{\mathbf{t}_{p}} \right) \mathbf{e}^{-\frac{\mathbf{b}\mathbf{t}}{\mathbf{t}_{p}}}$$
(4)

där t är tiden från ankomst av stötvågen vid t=0 fram till $t=t_p$. b är en konstant som styr hur snabbt trycket avtar. Ekvation (4) benämns också modifierad Friedlander ekvation. Ekvation (4) används bland annat för att beskriva tryck- tid förloppet i Conwep.

Det dynamiska tryckets avtagande med tiden kan enligt Baker et al ⁶ för ett frifältsförlopp skrivas enligt

$$\mathbf{q}(\mathbf{t}) = \mathbf{q}_{\max} \left(\mathbf{1} - \frac{\mathbf{t}}{\mathbf{t}_q} \right)^2 \mathbf{e}^{-\frac{\mathbf{b}\mathbf{t}}{\mathbf{t}_q}}$$
(5)

2.5 Belastning av strukturer; diffraktion och dynamiskt tryck

Följande beskrivning är hämtat ur "The effects of nuclear weapons"⁷.

När ett solitt objekt träffas av en luftstötvåg utsätts den för belastning där olika fenomen som till exempel reflektion, diffraktion och aerodynamiska egenskaper påverkar belastningen.

I Figur 6 beskrivs principiellt ett tvådimensionellt förlopp då en stötvåg passerar en byggnad. Ett tänkbart förlopp för hur en stående människa kan belastas beskrivs närmare i kapitel 5.4.2.

När stötvågen träffar byggnadens framsida belastas den av det reflekterade trycket. Eftersom väggen inte är oändlig kommer det omgivande trycket så småningom genom en avlastningsvåg att vandra neråt från "takkanten" samtidigt som luftens rörelse, detonationsvinden, bakom stötvågen kommer att belasta strukturen med ett dynamiskt tryck. Så småningom har det reflekterade trycket helt försvunnit och framsidan belastas enbart med omgivningens statiska tryck plus det dynamiska trycket. Taket belastas i exemplet enbart av det statiska trycket eftersom det är helt platt och parallellt med vindriktningen (friktionslaster försummas).

Förloppet då stötvågen böjer sig vid passage av byggnaden benämns diffraktion. Till följd av diffraktionen kommer husets baksida inte omedelbart att belastas när stötvågen passerar utan vågen sveper ner mot marken medan huvuddelen av stötvågen fortsätter. Till följd av detonationsvinden bildas en vak som också belastar baksidan på byggnaden men i motsatt riktning jämfört med det statiska trycket.

⁵ Freidlander, F. G, The diffraction of sound pulses. I. Diffraction by a semi-infinite plate, Proc. Roy. Soc. Lond. A, 186, 322-344. , 1946

⁶ W. E. Baker, J. J. Kulesz, R. E, Ricker, R. L. Bessey, P. S. Westine, V. B. Parr and G. A. Oldham, Workbook for Predicting Pressure wave and Fragment Effects of Exploding Propellant Tanks and Gas Storage Vessels. NASA contractor report 134906, 1977.

⁷ Samuel Glasstone, Philip J. Dolan (Compiled and Edited), The Effects of Nuclear Weapons, United States Department of Defence, United States Department of Energy, 1977

Sammanfattningsvis så belastar stötvågen strukturen ur två aspekter, dels den statiska tryckförändringen över stötvågsfronten och dels en dynamisk belastning till följd av partikelhastigheten (detonationsvinden).



Figur 6 Tvådimensionell diffraktion runt en byggnad.

3 Skadeverkan på människan

3.1 Skador på människan vid exponering för luftstötvåg - indelning

"There are a number of ways of being killed by blast, of which total disintegration of the body is the extreme case met with very close to an explosion." ⁸. Med detta vill författaren ha sagt att han inte gör anspråk på någon form av medicinsk expertis inom detta komplexa område utan bara skrapar på ytan och då mest från en mekanistisk ståndpunkt.

De skador som kan uppstå då människan exponeras för en detonation brukar traditionellt uppdelas enligt olika verkansformer enligt Figur 7 nedan. Till exempel definierar U.S. Army Medical Research and Materiel Command enligt:

Primära skador betecknar de skador som direktverkan av luftstötvågen orsakar. Särskilt utsatta och känsliga organ är öron, lungor, mag-tarm systemet samt hjärnan.

Sekundära skador betecknar skador som uppstår till följd av penetrerande primära eller sekundära splitter liksom skador till följd av trubbigt våld av kringkastade föremål.

Tertiära skador betecknar skador som uppstår till följd av att kroppen kastas iväg av luftstötvågen. Skadorna uppstår främst när kroppen träffar något föremål och kan liknas vid skador som uppstår vid trafikolyckor. Traumatisk amputation liksom skador till följd av stelkroppsacceleration definieras också som tertiära skador.

Kvartära skador betecknar skador som orsakas av förbränningen av sprängämnet, till exempel termiska skador och förgiftning eller lungskador till följd av inandning av brandgaser.

Quinary (finner ingen bra svensk översättning) *skador* betecknar skador som uppstår till följd av "post detonation environmental contaminants" till exempel bakterier eller strålning ("Dirty bombs").



Figur 7 Indelning av skador orsakade av detonation.

I föreliggande studie begränsas omfattningen till primära och tertiära skador.

⁸ P.L. Krohn, D Whitteridge, S. Zuckerman, Physiological effects of blast, Lancet I: 252, 1942

3.2 Primära Skador

Det råder ingen tvekan om att luftfyllda organ är de vävnader som skadas vid lägst trycknivå vid exponering för luftstötvågor ^{9, 10, 11, 12}. Stuhmiller ⁹ beskriver relativa tröskelvärden för skada och nivå för allvarlig skada då försöksdjur exponerats för detonationer i slutna rum. Skadenivån beskrivs i form av detonationsenergi normerad med rumsvolym, se Figur 8. Struphuvud (larynx), mag-tarm systemet (gastrointestinala systemet), lungor, luftstrupe (trachea) är de organ som har lägst toleransnivå och skadas ungefär på samma nivå. Öron har lägre toleransnivå men samtidigt är en sprucken trumhinna ingen allvarlig skada. Skador på framförallt lungor får betydligt allvarligare konsekvenser. Det faller sig därför naturligt att fokus för de arbeten som genomförts avseende skadeverkan på människan från luftstötvågor har legat på lungskador.



Figur 8⁹ Relativa gränsvärden för skada och nivåer för allvarlig skada för olika organ vid exponering i slutet rum (detonationsenergi normerad med rumsvolym).

Kunskapen om primära skador, d.v.s. skador direkt orsakade av luftstötvågen, på centrala nervsystemet (CNS) och framförallt hjärnan är ett område som ur ett internationellt perspektiv legat i "träda" under de senaste 90 åren ¹³. Under första världskrigets fördes

⁹ James H. Stuhmiller, History of Blast Injury Research, RTO Human Factors and Medicine Panel (HFM), Symposium held in Halifax, Canada, 3–5 October 2011

¹⁰ Maria A. Mayorga, The Pathology of Primary Blast Overpressure Injury, Toxicology 121 (1997) 17-28

¹¹ Carl-Johan Clemedson, Holter I:son Hultman, The Cause of Death in Blast Injury, Försvarets Forskningsanstalt, Nr 1310, 1954

¹² B Schantz (Editor), Biologiska effekter av tryck- och stötvågor, FOA Rapport C 52006-H4, 1984

¹³ Cameron R. Bass, Matthew B. Panzer, Karen A Rafaels, Garrett Wood, Jay Hridharani and Bruce Capehart, Brain Injuries from Blast, Annals of Biomedical Engineering, Vol 40, No 1, January 2012.

diskussion om huruvida det neurologiskt relaterade "shell shock" (granatschock, soldiers heart, kriegsneurose, commotion cerebrale) orsakades av fysiska skador på CNS eller om det var effekter av psykisk natur. Vid krigsslutet var dock den allmänna uppfattningen att granatchock var en psykisk åkomma. Man kan misstänka att till följd av denna slutsats, men också till följd av att det är tämligen accepterat att skador med dödlig utgång inträffar vid lägre nivåer för organ som innehåller gas, d.v.s. lungor och mag-tarmsystemet (gastrointestinal) än för andra organ, som till exempel hjärnan, så har insatserna för att öka kunskapsnivån avseende stötvågsinducerade hjärnskador varit relativt små under 1900 talet ^{9, 10}.

I och med framförallt USA:s engagemang i Irak- och Afghanistankonflikterna har frågan fått förnyad aktualitet ^{13, 14, 15}. Improvised Explosive Devices (IED) har varit och är ett av de mest använda vapnen vilket fått till följd en ökad exponering för höga detonationstryck. Troligtvis har också förbättringar, både avseende personligt skydd och fordonsskydd liksom förbättrade sjukvårdsresurser, gjort att personal som exponeras för stora laddningar överlever splitter och projektiler i högre utsträckning än tidigare. Från 2001 fram till 2005 rapporterades¹³ att ca 80 % av alla förluster som rapporterats till Joint Theatre Trauma Registry var orsakade av IED och att 50-65 % av alla traumatiska hjärnskador uppkommit i samband med IED attacker. I en studie av Rand Corporation¹⁶ uppskattas att 19 % av den personal som återvände från Irak och Afghanistan fram till 2008 har någon form av hjärnskada. Traumatisk hjärnskada anses enligt US DoD som en av signaturskadorna för Afghanistan och Irak konflikterna.

3.2.1 Skador på lungor och inre organ

Lungornas uppbyggnad visas i Figur 9. Luften kommer via luftstrupen in i bronkerna som fördelas i finare och finare förgreningar som avslutas i lungblåsor (alveoler). Blodkärl, bronker och lungblåsor bildar tillsammans lungvävnaden som fördelas i lober, höger lunga har tre lober, vänster har två. I alveolerna sker ett gasutbyte mellan luft och blod, syre tillförs blodet och koldioxid passerar ut till luften. Lungorna är rent mekaniskt relativt komplext uppbyggda med styva bronker och lungkärl inbäddad i mjuk alveolär vävnad ¹².

Enligt Lau ¹⁷ uppvisar mjukdelarna i thorax (bröstet) och abdomen (buken) ett viskoelastisk beteende när de belastas av en yttre last. Vid långsam belastningshastighet är skadebeteendet oberoende av hastigheten och beror enbart på deformation av organet (kompression) vilket ger upphov till krosskador. Toleransnivån vid kompression verkar enligt Lau ligga mellan 20-40 % töjning för de flesta organ. Vid deformationshastigheter över 3 m/s inverkar hastigheten på tollerensnivån (definierad av kompression) och skadorna benämns viskösa skador. Vid deformationshastigheter typiska för stötvågsbelastningar, över 30 m/s, dominerar hastighetsfaktorn och deformationen är av sekundär betydelse. I Figur 10 visas ungefärliga toleransnivåer (compression) vid olika hastigheter.

De skador som en luftstötvåg orsakar kan grovt delas in i skador som direkt uppstår vid detonationstillfället och skador som uppkommer/utvecklas med tiden ¹². Som redan nämnts är lungan uppbyggd av alveoler, bronker och blodkärl vilka bildar ett komplext mekaniskt system bestående av både vätska, gas och vävnad. Då bröstkorgen accelereras

¹⁴ D. C. Viano, A. I. King, Biomechanics of Chest and Abdomen Impact: Second edition, CRC Press LLC, 2000

¹⁵ Hannah Fischer, U.S. Military Casualty Statistics: Operation New Dawn, Operation Iraqi Freedom, and Operation Enduring Freedom, Congressional Research Service, CRS Report for Congress, February 5 2013.

¹⁶ Terri Tanielian, Lisa H. Jaycox, Editors, Invisible Wounds of War, Psychological and Cognitive Injuries, Their Consequences, and Services to Assist Recovery, RAND Corporation, 2008

¹⁷ Ian V. Lau, David C. Viano

The Viscous Criterion – Bases and Applications of an Injury Severity Index for Soft Tissue. Biomedical Science Dept, General Motors Res Labs, 1987

in i brösthålan orsakar den krosskador på lungans yta nära bröstkorgen ⁹. Om belastningen är snabb propagerar en kompressionsvåg (30-40 m/s) in i lungvävnaden och kan orsaka skador i gränsytan mot hårdare ytor som hjärta, diafragma och ryggrad. Sannolikt orsakar också kompressionsvågen skador i alveolernas blod/luft barriär. Resultatet blir framförallt blödningar och ödem i lungvävnaden. Skador på lungorna bedöms också kunna ge upphov till luftemboli, d.v.s. att luft tränger in i blodkärlen vilket i svåra fall kan leda till döden om embolin når hjärtats kranskärl eller kärlen i hjärnan^{12, 18}. Det bör nämnas att luftemboli som dödsorsak är omtvistad^{10, 12}.

Överlevnadsbara primära lungskador kan övergå till kritiska sjukdomstillstånd långt efter (upp till 48 timmar) detonationstillfället ^{12, 19}. Acute Respiratory Distress Syndrome (ARDS), ibland benämnt "Blast lung" eller "Lung shock". ARDS karakteriseras av att alveolerna fylls med vätska vilket är ett livshotande tillstånd.



Figur 9 Lungornas uppbyggnad. Bronker, lober (övre bild) och alveolar (under bild) (Ur Grays Anatomy of the human Body, 1918 samt <u>http://creativecommons.org/licenses/by/2.5</u>)

¹⁸ Carl- Johan Clemedson, Holter I:son Hultman, Air embolism and the cause of death in blast injury, The Military Surgeon, Vol 114, No 6, June 1954

¹⁹ C.T. Born, Blast Trauma: The fourth Weapon of mass destruction, Scandinavian Journal of Surgery 94: 279-285, 2005.



Figur 10¹⁷. Hastighetsintervall för olika skadetyper för skador på organ utsatta för yttre last (kompression) enligt Viano.

3.2.2 Skador på öra, hörsel

Örat består av ytteröra mellanöra och inneröra se Figur 11. Ytterörat består av öronmusslan och hörselgången. Mellanörat avgränsas mot ytterörat av trumhinnan och innefattar hörselbenskedjan och örontrumpeten. Innerörat avgränsas mot mellanörat av ovala fönstret och omfattar hörselsnäckan med sinnesceller och båggångarna.



Figur 11 Örats uppbyggnad (http://sv.wikipedia.org/wiki/%C3%96ra)

3.2.2.1 Trumhinneruptur

Örat är det organ som är mest känsligt för skador från en luftstötvåg. I litteraturen beskrivs ofta risken för trumhinneruptur som lägsta gränsvärde för begynnande skador orsakade av en luftstötvåg^{20, 21}, sannolikt eftersom det är en högst påtaglig och mätbar

²⁰ Donald R. Richmond, Håkan Axelsson, Airblast and underwater studies with animals, J of Trauma (China), 6(2) Supplement: 229-234; 1990.

skada. Relationen mellan tillfällig och permanent hörselskada och sprucken trumhinna har författaren inte helt lyckats reda ut men det är uppenbart att det inte automatiskt innebär hörselnedsättning om trumhinnan spricker. Enligt AIS²², se kapitel 4.2, klassas sprucken trumhinna som AIS 1, alltså som en lätt skada, likaså klassas skada på mellanörats ben som AIS 1 liksom skador på hårceller i koklea (öronsnäcka). Däremot är risken för permanent skada möjligen större i de senare två fallen.

3.2.2.2 Hörselsnedsättning

Hörselnedsättning definieras som en förhöjd tröskel för hörsel²³. Hörselnedsättning kan vara både tillfällig och permanent. Permanent hörselnedsättning kan kopplas till celldöd i hörselsnäckan och orsakas ofta av vistelse i bullriga miljöer. Risken att drabbas är individuell men ökad exponeringstid och ljudstyrka ökar också risken för hörselsnedsättning.

I audiologiska sammanhang talar man ofta om buller vilket helt enkelt definieras som icke önskvärt ljud²⁴. Enligt bullerdefinitionen ingår alla typer av ljud såväl kontinuerliga som tillfälliga i bullerbegreppet. Tryck i akustiska sammanhang (ljudtryck) anges oftast med den logaritmiska decibel (dB) skalan eftersom omfånget av de trycknivåer som det mänskliga örat kan uppfatta är mycket stort. Ljudtrycksnivån L räknat i dB skrivs

$$\mathbf{L} = 20 \log\left(\frac{\mathbf{p}}{\mathbf{p}_0}\right) \, \mathbf{dB} \tag{6}$$

Där p är uppmätt ljudtryck (effektivvärde) och p_0 är ett referensvärde. Vanligtvis används $p_0=2\cdot 10^{-5}$ Pa som är det lägsta ljudtryck människan kan uppfatta.

3.2.3 Skador på centrala nervsystemet (CNS)

CNS består av hjärnan och ryggmärgen, se Figur 12. I huvudsak är det ett nätverk av nervceller (neuron) som tillsammans med stödceller (gliaceller) bildar CNS. Neuronerna består av en cellkropp samt två olika typer av utskott, dendriter och axoner där dendriten leder in signaler och axonen leder ut. Hjärnan är uppdelad funktionellt och strukturellt i fem delar: storhjärnan (cerebrum), lillhjärnan (cerebellum), mitthjärnan (mesencephalon), hjärnbryggan (pons) och förlängda märgen (medulla oblongata). Storhjärnan utgör 90 % av hjärnvolymen och är delad i två halvor. Yttre skiktet av storhjärnan, hjärnbarken eller grå substans (cortex), är ca 5 mm tjock och är kraftigt veckad. Hjärnbarken består av neuronkroppar och gliaceller. Den underliggande vita substansen består i huvudsak av neuronernas axondel och har, om man ville använda datorterminologi, funktionen som databus.

²¹Martijn van der Voort, Peter Sibma, Review of experimental data and models for auditory blast injury, TNO report TNO DV12 WS 076/cc of TNO DV12 WS 025, 14 Mars 2012.

²² Abbreviated Injury Scale (AIS) 2005 update 2008, Association for the Advancement of Automotive Medicine (AAAM)

²³ Mats Andersson, Malin Båtsman, Mirja Hägg et al, Bullerskador hos värnpliktiga män, Linköpings universitet, Läk T4, 2008

²⁴ Buller, Arbetsmiljöverkets författningssamling AFS 2005:16, ISBN 91-7930-445-9

Hjärnan är ömtålig och har en geléartad konsistens. Den omges av tre hjärnhinnor, hårda hjärnhinnan (dura mater) närmast skallbenet, spindelvävshinnan (araknoidea) och mjuka hjärnhinnan (pia mater). Mellan hårda och mjuka hjärnhinnan ligger hjärnans stora artärer. Hjärnan och ryggmärgen är omgivna av ryggmärgsvätska (cerebrospinalvätska) vilken också fyller hjärnans hålrum (ventriklar). Ryggmärgsvätskan ger hjärnan ett visst mekaniskt skydd. I övrigt är hjärnan inte förbunden med skallbenet även om kärl och nervbanor sannolikt ger en viss stadga och begränsar dess rörlighet.

Traumatiska hjärnskador kan vara av typen closed eller open head injury beroende på om skallbenet är perforerat eller inte. Fortsättningsvis förutsätts closed brain injury. Kliniskt brukar traumatiska hjärnskador delas in i två kategorier, fokala skador och diffusa skador ²⁵. Fokala skador omfattar blödningar och kontusioner (blåmärken), d.v.s. skador som också är begränsade till en specifik del av hjärnan. En variant är coup - contrecoup där hjärnan får skador (kontusioner) då den pressas mot skallbenet till följd av yttre våld, ofta förekommer då skadan både vid träffstället (coup) samt på motsatt sida av hjärnan (contrecoup).

Till de diffusa skadorna räknas hjärnsvullnad (i form av ödem), medvetslöshet och Diffuse Axonal Injury (DAI). DAI associeras med skador på axonerna till följd av mekanisk belastning.



Figur 12 Hjärnans delar och neuronens principiella uppbyggnad (www.servier.com/Powerpointimage-bank)

²⁵ Alan M. Nahum, John W. Melvin. Editors, Accidental Injury Biomechanics and prevention Second edition, Springer Verlag, ISBN 0-387-98820-3, 2002

Traumatisk hjärnskada kan klassificeras i lätt, måttlig och svår hjärnskada ^{26, 27}. Det finns olika klassificeringssystem för att göra en sådan bedömning till exempel Glasgow Coma Scale (GCS) vilket klassificerar / bedömer medvetandegraden genom att ta hänsyn till såväl ögon, verbal och motorisk respons.

En lätt traumatisk hjärnskada (Mild Traumatic Brain Injury, MTBI) innebär oftast en medvetslöshet understigande 30 min. MTBI kan också kategoriseras som hjärnskakning. Inga mätbara fysiska skador kan uppdagas men huvudvärk, humörsvängningar, problem med korttidsminne, förvirring, depressioner, trötthet och överkänslighet för stimuli som ljus och ljud är typiska symtom som kan pågå under kortare eller längre tid är vanligt.

Huvuddelen av stötvågsgenererade hjärnskador är MTBI. Av 253330 traumatiska hjärnskador rapporterade mellan 2000 till 2012 från Afghanistan och Irak (US Armed Forces Health Surveillance Center) var 77 % milda hjärnskador, 17 % måttliga hjärnskador, 2 % svåra hjärnskador (inkluderande penetrerande) samt 4 % ej klassificerade¹⁵.

Måttliga och svåra hjärnskador (Moderate and Severe TBI) resulterar i medvetslöshet mellan 30 min och flera timmar/dagar/veckor (koma). En måttlig/svår hjärnskada kan associeras till kontusion, blödning (hematom) och DAI. Måttliga och svåra hjärnskador medför ofta kognitiva, beteende eller fysiska störningar som kan vara övergående men ofta medför livslång funktionsnedsättning (svår hjärnskada).

3.3 Tertiära skador

Tertiära skador innefattar skador till följd av att kroppen kastas iväg samt traumatisk amputation. Traumatisk amputation kommer inte att behandlas här.

Ur skadesynpunkt kan det vara lämpligt att dela in kastförloppet i tre faser. Den första fasen är då kroppen belastas av stötvågen och accelereras till utgångshastighet V_0 . Andra fasen är själva kastet och tredje fasen är då kroppen landar eller träffar ett hinder.

Skador i fas ett är knutna till den direkta verkan av stötvågen som primära skador, traumatisk amputation och splitterskador. Under fas ett accelereras kroppen som en stelkropp vilket också i sig bör kunna orsaka skador om accelerationen är tillräckligt stor. Möjligen kan också rotation av framförallt skallen ge upphov till skador eftersom hjärnan är känslig för den typen av rörelser.

Under fas två, kastförloppet, utsätts inte kroppen för några yttre laster varför skador under denna fas är osannolika.

Under fas tre antingen landar kroppen på ett mer eller mindre plant underlag eller så träffar den något hinder. Skadorna skulle då kunna liknas vid skador som man ådrar sig vid ett fall, bilolycka eller liknande. Skadorna beror sannolikt på vilken del av kroppen som träffar först, utseende på eventuella hinder etc.

Var gränsen går avseende den belastning som krävs för att kasta iväg en människokropp är svårbedömt och författaren har inte lyckats hitta några bra referenser. En stående människa motstår en stelkroppsrörelse genom fötternas friktion mot marken och genom förmågan att upprätthålla balansen genom att flytta fötterna. Det är rimligt att anta att upp till en viss impuls klarar man sannolikt av att kompensera för den belastning som stötvågen orsakar men med ökande impuls ökar risken för fall. Exakt var gränsen går är svårt att förutse men rent intuitivt (författarens spekulation) så verkar ett $V_0 > 1-2$ m/s (normal gånghastighet)

²⁶ Mårten Riesling, Ulf P. Arborelius, Johan Davidsson, Three Experimental Models for evaluation of Three Different Mechanisms in Blast TBI, NATO- OTAN Symposium, Halifax, Canada, 3-5 October 2011. RTO-MP-HFM-207.

²⁷ Traumatic Brain Injury Guidebook, Barrow Neurological Institute

vara svårt att kompensera för. Förmodligen beror det på hur beredd man är och vilken del av kroppen som träffas av stötvågen.

3.4 Skadenivåer/ skadesannolikhet

Människans känslighet för olika typer av yttre påverkan varierar kraftigt från individ till individ. Faktorer som till exempel kön och ålder påverkar liksom den naturliga variationen mellan olika individer. Yttre belastningar som inte ger skador hos en person kan ge allvarliga skador hos en annan. Därför är det svårt att exakt beskriva konsekvenserna för människan även om belastningen är väl definierad. På grund av den mänskliga variationen kan det vara lämpligare att beskriva konsekvensen i form av risker, där risk är definierat som sannolikheten att drabbas av en viss skada. Det är vanligt att göra det med hjälp av skaderiskkurvor (injury risk curves). Sådana kurvor är ofta baserade på fallstudier, djurförsök, försök med PMHS (post mortem human specimens) eller försök med frivilliga²⁸. På den horisontella axeln skrivs en belastning i form av en fysikalisk parameter eller en funktion av fysikaliska parametrar som korrelerar väl med den skada man vill bedöma. På den vertikala axeln skrivs sannolikheten för att aktuell skada inträffar. I Figur 13 visas ett exempel med sex stycken skaderiskkurvor där belastningen är HIC (Head Injury Criteria, se kapitel 5.3.2) och skadekurvorna beskriver skador från mindre skada; AIS 1 till dödlig skada; AIS 6.



Figur 13 Skaderiskkurvor avseende HIC. Diagrammet beskriver skadesannolikheten som funktion av belastning (HIC) för olika skadenivåer (AIS 1- 6).

Konsekvensen av en viss skada, skadenivån, beror av flera olika orsaker, till exempel var i/på kroppen skadan sker. Sannolikt får ett brustet blodkärl i hjärnan helt andra konsekvenser än om ett blodkärl brister i benet.

För att få en uppfattning om hur allvarlig en skada är finns så kallade injury severity scores. Abbreviated Injury Scale (AIS)²⁹ utgiven av Association for Advancement of Automotive Medicine ger möjlighet att klassificera traumatiska anatomiska skador på olika kroppsdelar. Den är indelad i sex nivåer enligt Tabell 1.

²⁸ RTO-TR-HFM-090 Test Methodology for Protection of Vehicle Occupants against Anti-Vehicular Landmine Effects, NATO Scientific and Technology Organisation, ISBN 978-92-837-0068-5, April 2007 29 Abbreviated Injury Scale (AIS) 2005 update 2008, Association for the Advancement of Automotive Medicine (AAAM)

AIS score	Injury
1	Minor
2	Moderate
3	Serious
4	Severe
5	Critical
6	Maximal, currently untreatable

Tabell 1²⁹ Abbreviated Injury Scale (AIS) nivåer avseende hur allvarlig en skada är.

Det finns många faktorer som påverkar hur skadan klassificeras enligt AIS. AIS tar hänsyn till bland annat

- Risk för liv
- Form av och storlek på yttre belastning
- Funktionsnedsättning, tillfällig och permanent
- Komplexitet, resurskrav och längd för vårdinsats
- Livskvalitet

Den mest påtagliga beskrivningen av hur allvarlig en skada är ges av sannolikheten för att dö, letaliteten. Enligt AIS finns en korrelation mellan AIS nivåer och letalitet enligt tabell 2.

Tabell 2²⁹ Sannolikhet för att dö vid olika AIS nivå.

AIS Score	Letalitet [%]
1	0,7
2	0,8
3	3,5
4	14,6
5	39,6
6	79,0

Noterbart är att nivå 6 inte är detsamma som död utan avser en skada som beskrivs enligt AIS: "Maximal, currently untreatable".

4 Metoder och gränsvärden

4.1 Skador på öra och hörsel

4.1.1 Hörselskada

Enligt Arbetsmiljöverkets föreskrift ²⁴ ligger gränsvärdet för den dagliga buller exponeringsnivån på 85 dB. 85 dB är ett framräknat medelvärde för exponering över 8 timmar. Gränsvärdet är satt för att förhindra hörselskador. Både kontinuerligt buller och impulsljud skall ingå i beräkningsunderlaget. Däremot får inte impulsljudstoppvärdet överskrida 135 dB (för militär verksamhet 140 dB). En luftstötvåg från en detonation klassificeras som ett impulsljud och skall alltså räknas in i underlaget. Gränsvärdet avser ljudtryck där man tagit hänsyn till dämpning från eventuella hörselskydd.

Mil-Std-1474D³⁰ som tidigare var den tillämpade standarden inom försvarsmakten använder 140 dB som en övre gräns för det oskyddade örat vid exponering för impulsljud. Däremot anger man också ytterligare gränser beroende på om örat skyddas av proppar och eller kåpor samtidigt som begränsningar av antalet exponeringar införs. I Figur 14 visas antalet tillåtna exponeringar vid olika ljudtrycknivåer.

Maximum Permissible Number (N) of Exposures/Day ¹		
No Protection	Either Plugs or Muffs	Both Plugs and Muffs
	Unlimited Exposure	
0	2000	40000
0	100	2000
0	5	100
	Maximum Pen No Protection 0 0 0	Maximum Permissible Number (N) of E No Protection Either Plugs or Muffs Unlimited Exposure 0 2000 0 100 0 5

¹A single exposure consists of either (a) a single impulse for non-repetitive systems (systems producing not more than one impulse per second, e.g., rocket launchers fired from the shoulder), or (b) a burst for repetitive systems (systems normally producing more than one

one impulse per second, e.g., automatic weapons (see 5.4.2.)). The equation for calculating the allowable number of exposures per day is: $N_1 = 10^x$ where $x = \frac{1}{5} [177 \cdot L + 6.64 \log_{10} \frac{200}{T}]$.

N1	= 1	04	wher	e	x =	-
No	= 2	0 X	N1	911	d	1

- N_1 = allowable number of impulses/day (single protection)
- N_2 = allowable number of impulses/day (double protection)
- L = measured peak sound pressure level, in dB
- T = measured B-duration in milliseconds



Figur 14 ³⁰ Antal tillåtna exponeringar och gränsvärden avseende exponering för impulsljud enligt Mil STD 1474 D.(B-duration är varaktigheten då någon del av signalen ligger över max ljudtryck minus 20 dB)

³⁰ Noise limits MIL-STD-1474D, United States DoD Design Criteria Standard, 1997, AMSC A7245

4.1.2 Trumhinneruptur

James³¹ genomförde en experimentell studie med öron från kadaver där öronen exponerades för laddningar upp till 29 kg. Man konstaterade att det krävs ett topptryck på ca 50 till 56 kPa och en varaktighet > 2 ms vid trumhinnan för att åstadkomma en trumhinneruptur. Örats orientering mot stötvågen, form och storlek hade stor inverkan på resultatet. En av huvudfunktionerna för hörselgången är att förstärka ljudet innan det når trumhinnan vilket också är fallet när det gäller luftstötvågor. James et al konstaterade att topptrycket vid trumhinnan kunde vara flera gånger större än det uppmätta statiska topptrycket i luftstötvågen. I Figur 15 visas resultaten inlagt i ett tryck – impuls diagram där trycket avser trycket vid trumhinnan.



Figur 15 James resultat inlagda i ett tryck- impuls diagram.

James studie har vidarebehandlats av bl.a. Richmond och Axelsson²⁰ som presenterade resultatet i diagram, se exempel Figur 16, tillsammans med Bowens kriterium för lungskada (se kap 5.2.1). Richmond delade in skadenivåerna i tre stadier där nivå 1 representerar "minor rupture" - små sprickor i trumhinnan, nivå 2 "Moderate rupture" - stora sprickor eller flera mindre hål samt nivå 3 "Major rupture" – fullständigt förstörd trumhinna.

I Tabell 3 ²¹ redovisas statiskt övertryck för nivåerna med varaktigheter > 6 ms för 50 respektive 1 % sannolikhet för trumhinneruptur. Värdena avser om personen befinner sig i frifält.

Axelsson och Richmond verkar inte göra någon åtskillnad på om personen står eller ligger vänd mot stötvågen, d.v.s. vågen sveper över örat eller om personen står med sidan/örat

³¹ D. J. James, V. C. Pickett, K. J. Burdett, A. Cheesemaan, The response of the human ear to blast. Part 1: The Effect on the Ear Drum of "Short" Duration, "Fast" Rising Pressure Wave, Joint AWRE/CDE Report No O 4/82, Atomic Weapons Research Establishment, Aldermaston, Berkshire, England

mot vågen. I lungfallet spelar det mindre roll men enligt James är det stor skillnad avseende trycket mot trumhinnan i dessa bägge fall.

Model		Richmond and Axelsson, 1990
Minor 1%	Minor slits and linear	19 kPa
Minor 50%	disruptions	56 kPa
Moderate 1 %	Large tears	26 kPa
Moderate 50 %		78 kPa
Major 1%	Total disruption; large	47 kPa
Major 50%	flaps	145 kPa

Tabell 3²¹ Frifältstryck för olika grader av trumhinneruptur vid varaktigheter > 6 ms



Figur 16 Axelsson och Yelvertons kriterium för 50 % sannolikhet för trumhinneruptur. I diagrammet finns också Bowens kurvor för lungskada för stående i frifält inlagt (se kapitel 5.2.1)

4.2 Skador på lungor och inre organ

4.2.1 Bowens metod

Bowens modell ³² ger möjlighet att bedöma letaliteten för en människa som utsätts för en luftstötvåg av friedlandertyp. Dödligheten kopplas till maxtrycket och varaktigheten hos den positiva fasen av stötvågen. Bowens modell är empirisk till sin natur och baseras på 2097 försök med djur med 13 olika arter. I samtliga försök placerade djuren nära en vägg och det uppmätta trycket representerar det reflekterade trycket vid väggen. Genom att observera hur stor andel av djuren som dog inom 24 timmar kunde Bowen ställa upp ett samband mellan letalitet, tryck och och den positiva fasens varaktighet.

För att kunna använda resultat då omgivningstryck och djurets massa m varierat skalas varaktighet och tryck enligt

$$\begin{split} t_{p} &= t_{pu} \left(\frac{70 \text{ kg}}{m} \right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{P_{0}}{101, 225 \text{ kPa}} \right)^{\frac{1}{2}} \\ P_{r}^{+} &= P_{ru}^{+} \left(\frac{101, 225 \text{ kPa}}{P_{0}} \right) \end{split}$$
(7)

Där P_0 är uppmätt statiskt omgivningstryck, m djurets massa, t_{pu} uppmätt varaktighet hos den positiva fasen, tp framräknad varaktighet P_{ru}^+ .uppmätt reflekterat tryck och P_r^+ beräknat reflekterat tryck.

Bowen anpassade följande uttryck för att hitta de kombinationer av topptryck och varaktighet som ger samma letalitet:

$$\mathbf{P}^{+} = \mathbf{P}^{*}(\mathbf{1} + \mathbf{at_{p}}^{-\mathbf{b}}) \tag{8}$$

där P^+ är det statiska övertrycket, t_p varaktigheten hos den positiva fasen samt P^* , a och b konstanter. P^* kan också tolkas som "skadetrycket" vid långa varaktigheter.

 $P^{*}=643$ kPa för 99 % dödlighet, 423 kPa för 50 % dödlighet och 279 kPa för 1 % dödlighet. a=6,76 och b=1,064.

a och b är konstant för alla letalitetsnivåer medan P* varierar. Bowen införde också "injury treshhold" som sattes till 1/5 av trycket för 50 % skada.

Den ursprungliga modellen är framtagen för fallet då objektet står mycket nära en vägg och utsätts för det reflekterade trycket. Bowen antar att det är tryckdosen som är gränssättande och inte hur den åstadkoms.

Genom att göra följande antaganden och använda Rankine-Hugoniot sambanden för att räkna fram det statiska trycket ur det reflekterade trycket överförde Bowen de ursprungliga förutsättningarna till tre fall, se också Figur 17:

1. Stående eller liggande mot vägg då thorax belastas av det reflekterade trycket från väggen.

2. Liggande i frifält med huvud eller fötter mot tryckvågen, då thorax belastas av det statiska övertrycket (incident pressure).

3. Stående eller liggande parallellt med tryckvågsfronten då thorax belastas av det statiska och det dynamiska trycket.

³² L. G. Bowen, E. R. Fletcher och D. R. Richmond, Estimate on man's tolerance to the direct effects of air blast, Tekn. rapport DASA 2113, Headquarters Defense Atomic Support Agency, Washington, okt. 1968



Bowen förefaller vara en väl underbyggd modell även om vägen från djurförsök till de olika fallen med människa är ganska lång. Antalet stordjursförsök var begränsat varför en validering med en djurmodell i samma storleksklass som människan är begränsad.

Figur 17 Bowens kurvor för liggande (prone) och stående i frifält samt stående vid vägg. Max övertryck avser maximalt statiskt övertryck (incident pressure).

4.2.2 Bass metod (modifierad Bowen)

Nytillkomna resultat från stordjursförsök och diskussioner kring Bowen kurvornas giltighet vid korta varaktigheter (< 4 ms) initierade ett arbete där Bass et al analyserade resultaten från 2500 stordjursförsök från 50 olika experimentella studier. De studier som genomfördes under 60-talet och som resulterade i Bowens kurvor 1968 reviderades i två studier där man studerade effekten av luftstötvågor med kort varaktighet (< 30 ms)³³ och lång varaktighet (> 10 ms)³⁴. Både data från försök i frifält och "nära vägg" försök användes. Till skillnad från Bowen väljer Bass att använda två olika modeller för att beskriva skadeisokliner;

$$\mathbf{P} = \mathbf{P}^* \left(\mathbf{1} + \mathbf{at_p}^{-\mathbf{b}} \right) \qquad \text{för } \mathbf{t_p} < 30 \text{ms}$$

$$\ln(1 - \pi) - \mathbf{\beta_0} - \mathbf{\beta_0} \mathbf{t}$$
(9)

$$\mathbf{P} = \frac{\ln(1-\pi) - \beta_0 - \beta_2 \mathbf{t}_p}{\beta_1} \qquad \text{för } \mathbf{t}_p > 10 \text{ms}$$
(10)

För korta varaktigheter använder Bass samma uttryck som Bowen. Ingående konstanter P*, a, b, β_0 , β_1 och β_2 beskrivs inte här utan den intresserade hänvisas till ref 33 och 34.

I Figur 18 visas Bass kurvor för $t_p < 30$ ms (9). Till skillnad från Bowen likställer Bass fallen att stå vid en vägg med att stå i frifält.



Figur 18 Bass reviderade Bowenkurvor för korta varaktigheter (<30 ms)

³³ Cameron R. Dale Bass, Karin Rafaels, Robert Salzar, Pulmonary Injury risk Assessment for Short-Duration Blasts, Journal of Trauma, Vol 65, No 3, pp 604-615, sep 2008

³⁴ Karin Rafaels, Cameron R. Dale Bass, Matthew B. Panzer, Robert Salzar, Pulmonary Injury risk Assessment for Long-Duration Blasts, Journal of Trauma, Vol 69, No 2, pp 368-374, aug 2010

4.2.3 Axelssons metod för komplexa stötvågor

Bowens (och Bass) metod har ett par uppenbara begränsningar. Tryck tid förloppet förutsätts beskriva ett idealt stötvågsförlopp av friedlandertyp. I de fall stötvågen utsätts för störningar, t.ex. reflektioner i slutna rum fås tid tryck förlopp med betydligt mer komplext utseende se exempel i Figur 19. Ingen möjlighet ges heller att bedöma sannolikheten för icke letala skador.



Figur 19³⁵ Exempel på komplex tryckhistorik i ett fordon utsatt för tryckverkande stridsvagnsmina

Axelssons metod ³⁶ ger möjlighet att bedöma skadenivån som funktion av en framräknad maximal bröstkorgshastighet V_{max} . Axelsson använde sig av ett enaxligt massa fjädersystem för att beskriva thorax se Figur 20. Kraftbalansen i systemet kan beskrivas med en andra ordningens olinjär differentialekvation:

$$M\frac{d^2x_i}{dt^2} + J\frac{dx_i}{dt} + Kx_i = A[p_i(t) + p_0 - p_{i,lung}(t)]$$
(11)

$$\mathbf{p}_{i,\text{lung}}(\mathbf{t}) = \mathbf{p}_0 \left(\frac{\mathbf{V}_0}{\mathbf{V}_0 - \mathbf{A}\mathbf{x}}\right)^{\mathbf{g}}$$
(12)

Där i=1,2,3,4 representerar fyra olika givarpositioner enligt Figur 21.

³⁵ Leerdam P-J et al, Test Methodology for Protection of Vehicle Occupants against Anti-Vehicular Landmine Effects, Annex H, final Report of HFM-090 Annex H, Task Group 25, AC/323(HFM-090)TP/72, April 2007

³⁶ Håkan Axelsson och John T. Yelverton, Chest Wall Velocity as a Predictor of Non-auditory Blast Injury in a Complex Wave Environment, The Journal of Trauma, vol 40, No 3, 1996



Name	Explanation
Α	Effective area
М	Effective mass
V ₀	Lung gas volume at x=0
l	Damping factor
К	Spring constant
p ₀	Ambient pressure
p _i (t)	External (blast) loading pressure
$p_{i,hmg}(t)$	Lung pressure
g	Polytropic exponent for gas in lungs
х	Chest wall displacement

Parameter	Units	70 kg body	Scaling Factor
М	kg	2.03	(M/70)
J	Ns/m	696	(M/70) ^{2/3}
K	N/m	989	(M/70) ^{1/3}
A	m ²	0.082	(M/70) ^{2/3}
V ₀	m ³	0.00182	(M/70)
g		1.2	

Figur 20 36 Enaxligt massa-fjädersystem för att beskriva bröstkorg-lungdynamiken vid pålastning av ett yttre tryck-tid förlopp $p_i(t)$.

Indata i modellen är det yttre tryck-tid förloppet $p_i(t)$ som fås med hjälp av försöksdata från BTD (Blast Test Device) med tryckgivare placerade enligt Figur 21.





Genom att bland annat lösa ekvationen för olika punkter på samma Bowenkurva och jämföra med framräknat lungtryck $p_{lung}(t)$ och bröstkorgshastighet $V(t) = \frac{dx}{dt}(t)$ drog Axelsson slutsatsen att den maximala bröstkorgshastigheten, V_{max} , var rimligt konstant för olika kombinationer tryck-varaktighet längs kurvan och därmed lämplig som skadeindikator.

I tidigare studier gjorda av Yelverton et al [12] exponerades får för komplexa stötvågor i slutna rum. En BTD enligt figur användes för att mäta tryck- tidförloppet. Skadorna på fåren bedömdes enligt Adjusted Severity of Injury Index, ASII, för att ge en samlad bild av skadenivån. Genom att använda Yelvertons resultat kunde Axelsson koppla Vmax till ASII och genom kurvanpassning utrycka ASII som funktion av V_{max}

$$ASII = (0, 124 + 0, 117 V_{max})^{2,63}$$
(13)

Där $V_{max} = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^{4} v_{i,max} d.v.s.$ ett medelvärde av beräknade bröstkorgshastigheter för de fyra uppmätta tryck tid förloppen.

I Tabell 4 beskrivs skadenivån tillsammans med ASII och Vmax. Lägg märke till att ASII överlappar varandra mellan nivåerna vilket möjligen indikerar en osäkerhet i nivåbedömningen.

Injury Level	ASII	V (m/s)
No injury	0.0-0.2	0.0-3.6
Trace to slight	0.2-1.0	3.6-7.5
Slight to moderate	0.3-1.9	4.3-9.8
Moderate to extensive	1.0-7.1	7.5-16.9
>50% Lethality	>3.6	>12.8

Tabell 4 ³⁶ ASII nivåer kopplat till max bröstkorgshastighet.

Axelssons modell är giltig för stötvågsbelastningar med momentan uppgång av trycket. För tryckvågor med långa stigtider, från t.ex. gasexplosioner, är bröstkorgshastigheten ingen lämplig skadeindikator. Ett långvarigt övertryck kan krossa bröstkorgen även om V_{max} inte indikerar skada³⁷.

En ytterligare begränsning är att Yelvertons försök gjordes inom ett varaktighetsintervall 3,8–8,4 ms. Utanför det intervallet är modellen inte validerad.

³⁷J. C. A. M. van Doormaal och M. J. van der Horst, An approximation procedure of the axelsson model for quick injury prediction, I: 21th Symposium on Military Aspects on Blast and Shock, Jerusalem, Israel, 2010.

4.2.4 Enpunktsmodell för Axelssons metod

Axelssons metod baseras på en fullständig tryckhistorik från BTD vilken tjänar som indata till en differentialekvation som skall lösas för fyra fall. Det är ett ganska komplicerat förfarande och det kan vara önskvärt att förenkla förfarandet. Framförallt har enpunktsmodeller (single point) också visat sig ge rimliga resultat.

Doormaal ³⁷ tog fram en förenklad metod som baserar sig på antagandet att tryckpulsen kan beskrivas som en idealiserad Friedlandervåg med en triangulär form, se Figur 22, med toppövertryck P⁺, varaktighet t och impuls I. Impulsen kan då beräknas enligt I= $\frac{1}{2}$ P⁺t. Genom förenklingen fås en unik lösning för V_{max} enligt Axelssons metod för varje värde på P⁺ och I.

Metoden behandlar två fall med en respektive två stötvågspassager. Metoden med två stötvågor, se figur 24, som interagerar representerar den enklaste typen av komplex stötvåg och kan typiskt representera reflektion i mark eller vägg.

Enkel stötvåg

Stötvågen kan beskrivas enligt Figur 22.



Figur 22 Triangulär ideal stötvåg

Förhållandet mellan V_{max}, P⁺ och I fås genom kurvanpassning och kan skrivas enligt

$$\frac{V_{max}}{P^{+}} = -4,1863 \left(\frac{2I}{P^{+}}\right)^{2} + 2,003 \cdot 10^{-2} \cdot \left(\frac{2I}{P^{+}}\right) + 7,982 \cdot 10^{-9}$$

$$om \left(\frac{2I}{P^{+}}\right) \le 0,001s$$
(14)

annars

$$\frac{V_{max}}{P^+} = \left(\frac{4,5 \cdot 10^{-5}}{\frac{-6,806 - \ln\left(\frac{21}{P^+}\right)}{0.845}} - 2,1147 \cdot 10^{-5}\right) \cdot f(p^+) + 1,589 \cdot 10^{-5}$$
(15)

$$f(P^{+}) = -7,3786 \cdot 10^{-19} \cdot P^{+3} + 1,8576 \cdot 10^{-12} \cdot P^{+2} - 2,0727 \cdot 10^{-6}$$

$$\cdot P^{+} + 1,579$$
(16)

med I i Pas, P^+ i Pa och V_{max} i m/s.

Dubbel stötvåg

För dubbelstötvåg enligt Figur 23 är arbetet något mer omfattande men fortfarande baserar sig analysen på ett antal stötvågsparametrar som relativt lätt kan bestämmas. Anta att stötvågen är triangulär enligt ovan.

Med hjälp av ekvationerna (14), (15) och (16) beräknas V_{max} :

Steg1: Beräkna maximala V_{opt} med hjälp av P^+ = max (p1,p2) och I= I₁+I₂. V_{opt} representerar ett maximalt V_{max} med givna parametrar.

Steg 2: Beräkna V_{max1} för den första stötvågen genom att använda

$$\mathbf{I} = \mathbf{I}_1 + (\frac{1}{2} \cdot \frac{\mathbf{p}_{12}^2 \cdot \mathbf{t}_2}{(\mathbf{p}_1 - \mathbf{p}_{12})})$$
(17)

och $P^+ = P_1$.

Steg3: Beräkna V_{max2} för den andra stötvågen genom att använda I= I₂ och P⁺= P2.

Steg4: Korrigera V max2 för inverkan av den första stötvågen genom att multiplicera med en korrektionsfaktor F_c:

$$\mathbf{V}_{\max 2c} = \mathbf{F}_{c} \cdot \mathbf{V}_{\max 2} \tag{18}$$

Där

$$\begin{split} \mathbf{F_c} &= \mathbf{1}, \mathbf{42} \cdot \mathbf{10^{-17}} \cdot \mathbf{p_{12}^6} - \mathbf{4}, \mathbf{801} \cdot \mathbf{10^{-14}} \cdot \mathbf{p_{12}^5} + \mathbf{6}, \mathbf{465} \cdot \mathbf{10^{-11}} \cdot \mathbf{p_{12}^4} - \\ &\mathbf{4}, \mathbf{493} \cdot \mathbf{10^{-8}} \cdot \mathbf{p_{12}^3} + \mathbf{1}, \mathbf{785} \cdot \mathbf{10^{-5}} \cdot \mathbf{p_{12}^2} - \mathbf{4}, \mathbf{507} \cdot \mathbf{10^{-3}} \cdot \mathbf{p_{12}} + \mathbf{1} \end{split} \tag{19}$$

ms

med P_{12} kPa.

Steg 5: Bestäm V_{max} för en dubbel stötvåg med hjälp av följande:

$$V_{\max 2} = V_{opt} \qquad \text{om } t_1 \le 1 \text{ ms}$$

$$V_{\max 2} = \max(V_{\max 1}, V_{\max 2c}) \qquad \text{om } t_1 \ge 20 \text{ms}$$

$$V_{\max 2} = \max\left(V_{\max 1}, \frac{1}{\frac{1}{v_{opt}} - \frac{1 - \sqrt{t_1}}{\sqrt{20} - 1} \left(\frac{1}{v_{\max 2c}} - \frac{1}{v_{opt}}\right)\right) \qquad \text{i övrigt}$$

$$p_1$$

$$p_1$$

$$p_1$$

$$t_1$$

Figur 23 Dubbel stötvåg

Vid en jämförelse med beräkning av V_{max} enl. Axelssons metod fås en god överensstämmelse vid kort (≤ 1 ms) eller lång (≥ 20 ms) varaktighet^{37, 38}.

För mellanlånga varaktigheter är överenstämmelsen mindre god, sannolikt beror det på att modellerna behandlar interaktionen mellan de olika pulserna olika. TNO:s metod ger ändå en god approximation av V*max* med utgångspunkt från ett fåtal parametrar som relativt lätt kan fås ur mätningar eller beräkningar. Metoden kan användas för att få en approximativ bedömning av skadeutfallet.

I Figur 24 har Conwep (hemisfärisk ytladdning) använts för att beräkna bröstkorgshastigheten som funktion av avståndet för 10, 50 och 250 kg TNT med hjälp av TNO:s enpunktsmodell. I diagrammet finns också gränsvärden enligt Axelssons modell inlagda som streckade linjer.



Figur 24 Vmax beräknat enligt TNO:s enpunktsmodell. I diagrammet finns också inlagt skadeintervall enligt Tabell 4.

³⁸] Jan Arild Teland, Ans van Doormaal, Marike van der Horst and Eirik Svinsås

A Single point pressure approach as input for injury models with respect to complex blast loading conditions Norwegian Defence Research Establishment (FFI), Oct. 2010

4.2.5 Slutsats

Bass reviderar i viss mån Bowens kurvor framförallt vid korta varaktigheter. Den största skillnaden är att Bass använder reflekterat tryck både vid frifält och i närheten av vägg som dos till skillnad från Bowen som använder statiskt och dynamiskt tryck vid frifält. Det innebär i praktiken att i Bass fall är det ingen skillnad mellan att stå vid en vägg eller i frifält. Bass argument är att för att uppnå tillräcklig dos vid korta varaktigheter måste topptrycket vara mycket högt och det kan bara uppnås om man står nära laddningen. En bakomliggande vägg skulle då inte spela någon större roll eftersom kroppen ändå "skuggar" en stor del av stötvågen. Bass hävdade också att tillgängliga försök inte heller visade någon signifikant skillnad mellan fallen. Vid korta varaktigheter i frifält ger alltså Bass en mer konservativ bedömning, se diagram i Figur 25. I övrigt är skillnaden mellan Bass och Bowen liten.



Figur 25 Jämförelse mellan Bass och Bowen vid 50 % letalitet.

Axelssons modell är mer användbar eftersom den fungerar bra i både frifält och vid komplexa tryckfält och ger möjlighet till bedömning av flera olika skadenivåer. Problemet är att den i originalutförande kräver lösning av fyra andra ordningens differentialekvationer samt speciell mätutrustning (BTD). Doormaal enpunktsmodell ger möjlighet att göra bedömningar med utgångspunkt från förenklade tryckfält utan att lösa differentialekvationer. Vid jämförelse med Bass kurvor för stående man i frifält fås god överensstämmelse med Doormaals metod.

4.3 Skador på hjärnan (centrala nervsystemet, CNS)

4.3.1 Stötvågsrelaterade skador

Säljö ³⁹genomförde en experimentell studie där stordjur (gris) exponerades för impulsljud med topptryck från 30 kPa till 70 kPa. Tryck-tidförloppen representerade typiska exponeringsförlopp vid avfyrande av till exempel granatgevär (GRG) M86 och Haubits 77 (höga laddningar). I Figur 26 visas nivåerna för exponering jämfört med acceptansnivåer enligt Mil-STD 1474 D. Vid nivåer runt 65 kPa (190 dB) fann man små blödningar och tecken som tyder på ödem (baserat på ansamlingar av blodkroppar i kärl). Vid studier⁴⁰ med råtta som exponerades för motsvarande nivåer med hjälp av luftstötrör fann man också kognitiva störningar vid utvärdering med Morris Water Maze⁴¹.



Figur 26³⁹ Nivåer för exponering jämfört med acceptansnivå, Z kurva, enligt Mil-STD 1474 D.

Vid uppföljande studie av Kaj Blennow⁴², där frivillig militär personal exponerades för liknande tryck-tidförlopp som i Säljös studie, genomfördes analyser av olika biomarkörer. Resultatet visade inga tecken på blödning eller på någon annan hjärnpåverkan.

Ytterligare en (orapporterad) studie med genomfördes av bland andra Institutionen för Neurovetenskap, Karolinska Institutet där militär personal som exponerats för relevanta vapensystem i tjänsten, i vissa fall under mer än trettio år, undersöktes med högupplösande magnetkamera T3 MRI (Magnetic Resonance Imaging). Metoden som användes anses som mycket känslig men inte heller här kunde man finna spår efter blödning eller andra sjukliga förändringar.

³⁹A. Säljö, F. Arrhen, H. Boulouri, M. Mayorga, A Hamberger, Neuropathology and pressure in the pig brain resulting from low-impulse noise exposure, Journal of Neurotrauma, 25, 1397-1406, 2008

⁴⁰A. Säljö, B. Svensson, H. Boulouri, M. Mayorga, A Hamberger, Low-Level Blasts Raise Intracranial Pressure and Impair Cognitive Function in Rats, Journal of Neurotrauma, 25, 1397-1406, 2008

⁴¹Morris Water Maze är en försöksmetod där kognitiva funktioner undersöks genom att en simmande råtta ska försöka hitta en dold plattform placerad under ytan i en vattenbehållare.

⁴²K. Blennow, M. Jonsson, N. Andreasen, L. Rosengren, A. Wallin, P. A. Hellström, H. Zetterberg, No neurochemical evidence of brain injury after blast overpressure by repeated explosions or firing heavy weapons, Acta Neurol Scand DOI: 10.1111/j.1600-0404.2010.01408

Courtney ⁴³ utgick från att hjärnskador kan uppstå då kroppen träffas av en luftstötvåg genom att en tryckvåg propagerar från thorax genom kärlsystemet till hjärnan. Tryckvågen induceras genom att bröstkorgen trycks ihop och fortplantar på så sätt energin från stötvågen in i kroppen. Genom att använda analyser från djurstudier och epidemiologiska studier avseende beskjutning av thorax med projektiler fann Courtney en korrelation mellan avgiven mekanisk energi och hjärnskador. Energin användes för att bestämma tryck-tidförlopp hos en luftstötvåg som gav motsvarande effekt. Resultatet presenteras tillsammans med Bowens kurvor för lungskada i Figur 27. Det gröna området beskriver "region of interest", d.v.s. där någon form av påverkan på hjärnan sker, till exempel blödning, påverkat EEG eller "rapid incapasitation".



Figur 27⁴³ Föreslagen skadekorridor (grönt fält) för hjärnskador jämfört med Bowens kurvor för lungskador.

Rafaels⁴⁴ utvecklade skadekurvor för 50 % letalitet, 50 % sannolikhet för lätt meningeal blödning "mild bleeding" samt 50 % sannolikhet för "moderate/ severe bleeding". Analysen baserades på försök med kanin och iller där resultaten skalades (varaktighet) till människa. I Figur 28 presenteras resultaten. Noterbart är att sannolikheten är större för att dö av lungskador än av hjärnskador men vid lägre belastningsnivåer är sannolikheten för en mindre blödning är ungefär lika stor som risken att drabbas av lätt lungskada (tröskelvärde).

⁴³Michael W Courtney, Amy C. Courtney, Working toward exposure thresholds for blast-induced traumatic brain injury: thoracic and acceleration mechanisms, NeuroImage, Vol. 54 pp. S55-S61, January 2011

⁴⁴Rafaels, K. A., C. R. Bass, R. S. Salzar, M. B. Panzer, W. A. Woods, S. Feldman, T. Cummings, and B. P. Capehart, Survival risk assessment for brain injuries from primary blast, J. Neurotrauma, 2011



Figur 28⁴⁴ Skadekurvor för hjärnskador (varaktighet skalad för giltighet för människa) på försöksdjur och lungskador enligt Bowen.

4.3.2 Accelerationsrelaterade skador på CNS

Med accelerationsrelaterade skador avses skador orsakade av att hela huvudet accelereras (stelkroppsacceleration).

Head Injury Criteria (HIC) är ett kriterium för skall/ hjärnskada baserat på stelkroppsaccelerationen av huvudet. Kriteriet är väletablerat inom fordonssäkerhet och skrivs

$$HIC(\Delta t_{max}) = max(t_{1}, t_{2}) \left\{ \left[\frac{1}{t_{2} - t_{1}} \int_{t_{1}}^{t_{2}} a \, dt \right]^{2.5} \cdot (t_{2} - t_{1}) \right\}$$
(19)

Där a är huvudets acceleration och t_1 och t_2 är två tidpunkter under accelerationsförloppet, vanligen väljs $\Delta t_{max} = 15$ eller 36 ms. National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA)⁴⁵ anger riskkurvor för HIC och AIS nivåer baserat på arbete av Prasad/Mertz, se Figur 29. Ett försök till koppling mellan de tidigare beskrivna nivåerna lätt, måttlig och svår skada ges i Tabell 5.

⁴⁵ Final Economic Assessment, FMVSS No. 201, Upper Interior Head Protection", NHTSA, June 1995

41

Tabell 5AIS nivåer kopplat mot hjärnskadenivåer enligt kap 4.2.3

Dionne ⁴⁷ använde HIC för att bedöma letaliteten på grund av huvudacceleration vid exponering för luftstötvåg. Hybrid II krocktestdockor (Crash Test Mannequin) användes vid försöken tillsammans med laddningar mellan 0,567 – 10 kg på avstånd varierande mellan 0,6 – 3 m, för exempel se figur 31. Genom att förutsätta att $v_{huvud} = \int_{t_1}^{t_2} a \, dt$ och att huvudets impuls var proportionell mot stötvågsimpulsen kunde HIC beräknas enligt

$HIC = \alpha I^{2,5}$

där α är en framräknad parameter baserad på genomförda försök och I är impulstätheten. För ett oskyddat huvud är α =0,001984. I Figur 30 är resultat från försök med oskyddat huvud inlagda (gröna punkter) tillsammans med HIC Impulskurva enligt (20).

I senare studie baserad delvis på Dionne använde Levine ⁴⁸ samlade data från 100 försök med Hybrid II och III men med varierande laddningsmassa och avstånd, 0,6 - 20 kg samt

AIS	Skadenivå	
1 - Minor	Lätt	
2 - Moderate	Måttlig	
3 - Serious	Måttlig - Svår	
4 - Severe	Måttlig - Svår	
5 - Critical	Svår	
6 - Unsurvivable	Svår - Dödlig	

Figur 29^{45,46} Skaderiskkurvor avseende HIC.



$\langle \mathbf{a} \mathbf{a} \rangle$	
(20)	
(20)	

⁴⁶ NATO, AEP-55, Volume 2, Edition 2, Procedures for Evaluating the Protection Level of Armoured Vehicles, Mine Threat, 2011

⁴⁷ J.P. Dionne, A. Makris, I. El Maach, Blast- Induced Traumatic Brain Injury: An engineering approach, Personal Armour System Symposium PASS, 2006

⁴⁸ J. Levine, J.P Dionne, A. Makris, Blast injury charts for EOD scenarios based on scaled explosive parameters, MABS 2010

0,6 -7 m. Levine valde att skala HIC och avstånd med avseende på laddningsmassa^{1/3} (osäkert om TNT avses). HIC uttrycks som

$$\frac{\text{HIC}}{m^{\frac{1}{3}}} = 1262 \left(\frac{d}{m^{\frac{1}{3}}}\right)^{-4,2357}$$
(21)

Där m är laddningens massa, d avståndet till laddningen.



Figur 30⁴⁷ Exempel på försöksuppsättning med oskyddad Hybrid II samt HIC som funktion av impulstätheten enligt ekvation (20).

Courtney ⁴³ använde en toleranskurva för TBI framtagen av Ono⁴⁹. Onos kurva baserar sig på data från försök med trubbigt våld med primater och kadaver. Accelerationsdata från försöken omvandlades med hjälp av fundamentala mekaniska samband till tryck- tid förlopp och presenteras i Figur 31tillsammans med Bowens kurvor för lungskada. Courtney anser kurvan som mycket osäker och använder faktorer 0,5 och 2 för övertrycket (blåa fältets utsträckning) för att definiera ett "region of interest".

⁴⁹ K. Ono, A. Kikushi, M. Nakamura, H. Kobayashi, Human Head Tolerance to Sagittal Impact Reliable Estimation Deduced from Experimental Head Injury using Subhuman Primates and Human Cadaver Skulls, Biomechanics of impact injury and injury tolerances of head neck complex backaitis, S.H., ed., SAE Publication PT-43. 1980



Figur 31⁴³ Courtneys föreslagna "region of interest" för begynnande hjärnskada

4.3.3 Slutsats

Arbetet med att ta fram gränsvärden och riskkurvor avseende luftstötvågors inverkan på CNS är fortfarande i inledningsskedet. Det finns inga allmänt accepterade metoder eller gränsvärden och det är inte möjligt att dra några långtgående slutsatser avseende absoluta tal. En spekulation utgående från ovanstående begränsade urval av arbeten skulle möjligen kunna ge ett spann mellan 50-500 kPa vid varaktigheter < 10 ms som ett tänkbart gränsområde för lätta till måttliga hjärnskador vid stötvågsbelastning utan hänsyn taget till stelkroppsacceleration. Vid stelkroppsacceleration av huvudet orsakad av luftstötvåg är det oklart om det är translation eller rotation som är dominerande. Möjligen dominerar translation eftersom förloppen normalt är mycket korta vid stötvågsbelastning⁵⁰.

⁵⁰U Krave, S. Hojer, H. Hansson, Transient powerful pressures are generated in brain by a rotational acceleration impulset o the head, Eur J Neurosci 2, 2876-2882

4.4 Tertiära skador

Tertiära skador omfattar de skador som uppstår när kroppen kastas som en följd av stötvågen vilket också innefattar traumatisk amputation. Traumatisk amputation behandlas inte i denna rapport.

4.4.1 Kastförloppet

Den belastning som ett föremål utsätts för då den passeras av en luftstötvåg kan, som redan nämnts, delas in i statisk belastning och dynamisk belastning. Den summerade impuls som dessa fenomen orsakar ger upphov till en hastighet hos föremålet. Om det inte påverkas av andra yttre laster accelereras det i impulsens riktning. Under förutsättning att föremålet kan betraktas som en stelkropp, d.v.s. ingen energi går åt till deformation, och inga andra yttre laster som till exempel friktion påverkar kan hastigheten som föremålet har strax efter stötvågspassagen beräknas med hjälp av

$$\mathbf{F} = \mathbf{M} \frac{\mathbf{d}\mathbf{V}}{\mathbf{d}\mathbf{t}} \to \mathbf{V} = \frac{\mathbf{I}}{\mathbf{M}}$$
(22)

Där M är föremålets massa, I den summerade impulsen orsakad av stötvågen och V föremålets hastighet. I Figur 32 visas sambandet impuls – hastighet för ett föremål (människokropp) som har massan 70 respektive 100 kg.



Figur 32 Samband impuls - hastighet.

4.4.2 Belastning av människokroppen

En stående människa som har ansiktet mot en detonation belastas av en summa av diffraktionstryck och dynamiskt tryck $P_{tot}=P^++q$ där P^+ är det statiska övertrycket och q är det dynamiska trycket strax efter stötvågsfrontens passage. Med grund i Glasstone "The Effects of Nuclear Weapons" ⁷ skulle belastningsprocessen kunna beskrivas enligt Figur 33. En luftstötvåg med stötvågshastigheten w träffar bröstsidan (vi bortser från omgivningstrycket). Trycket ökar mycket snabbt till toppreflektionstrycket (b), vilket gör att kroppen börjar accelerera. Eftersom människokroppen har begränsad utsträckning kommer avlastningsvågor att sprida sig in från kroppens "kanter" och reflektionstrycket avtar därför snabbt och ersätts med det statiska omgivningstrycket p och dynamiskt tryck q baserat på den hastighet och tryck som omgivande luft har. Den tid det tar för belastningen på kroppens bröstsida att gå från det reflekterade topptrycket till ett tillstånd med fullt

utbildad strömning är bland annat beroende på utsträckning och form men om kroppen approximeras med ett rätblock kan ett empiriskt [13] uttryck användas

$$\mathbf{t}_{\mathbf{s}} = \frac{\mathbf{3S}}{\mathbf{W}} \tag{23}$$

Där S är det kortaste avståndet till en kant från mittpunkten (B/2) och W stötvågsfrontens hastighet. När stötvågen passerar kroppens sida (c) belastas den med det statiska trycket (röda pilar) medan luftströmmen möjligen orsakar en viss lyftkraft (därav blå pilar i motsatt riktning mot statiska trycket) samt friktion. Vid tiden

$$\mathbf{t_{b1}} = \frac{\mathbf{L}}{\mathbf{W}} \tag{24}$$

har stötvågen nått ryggsidan men det tar ytterligare tid att bygga upp trycket där. För ett rätblock föreslår Glasstone ett empiriskt uttryck

$$\mathbf{t}_{\mathbf{b}} = \frac{\mathbf{4S}}{\mathbf{W}} \tag{25}$$

från det att stötvågen nått ryggsidan tills det att ett topptryck P_b mot ryggen uppnåtts.

Trycket mot ryggen, P_b, består av det statiska trycket riktad mot kroppen samt en motsatt riktad strömningskomponent till följd av den vak som bildas bakom kroppen. Maximalt P_b kan approximativt sättas till omgivningstillståndet vid tiden $t_{b1}+t_{b2}$ på avståndet L, se Figur 33. Efter att P_b uppnåtts avtar det på samma sätt som omgivningstrycket P.



Figur 33 Principiell belastning av stående människa då den utsätts för en luftstötvåg.

4.4.3 Relativ belastning av kroppsdelar

Till följd av olika volym/massa förhållanden accelereras olika delar av kroppen olika. Ekvationen

$$\mathbf{M} \cdot \mathbf{a} = \mathbf{C}_{\mathbf{d}} \cdot \boldsymbol{\rho} \cdot \mathbf{A} \cdot \frac{\mathbf{U}^2}{2} \tag{26}$$

är aerodynamiska kraftbalansen på något som utsätts för en vindbelastning som t.ex. detonationsvind, fartvind eller liknande. C_d är aerodynamisk motsåndskoefficient, A exponerad tvärsnittsyta.

Om man approximerar arm och bål med två cylindrar så skulle man kunna tänka sig att bålen har ungefär tre gånger diameterna av en arm. Om man ser arm respektive bål var för sig och betraktar ekvation (26) ovan så inser man att m är proportionell mot kvadraten på radien medan exponerad yta A är proportionell mot radien. Eftersom accelerationen är den enda variabeln får man olika acceleration i de bägge fallen. I cylinderfallet innebär det att en "arm" skulle accelerera tre ggr snabbare än en "bål".

Skillnaden i acceleration av olika delar kan möjligen bidra till risken för traumatisk amputation av lemmar eller rotation av huvudet med TBI som följd.

4.4.4 Accelerationsskador

Viano⁵¹ beskriver människans tålighet avseende helkroppsacceleration (retardation), se Figur 34. Resultatet är baserat på slädförsök, där accelerationen på vertikalaxeln avser slädens acceleration. En fastspänd människa utsätts för högre accelerationer jämfört med släden och Viano förslår ett gränsvärde på 60 g (Average Spinal Acceleration, ASA) vid varaktigheter (duration i Figur 34) över 3 ms.



Figur 34 ⁵¹ Skadekurva enligt Viano avseende helkroppsacceleration beroende på fordonsacceleration (retardation) och accelerationens varaktighet.

4.4.5 Skador vid islag

När kroppen kastas iväg så finns en risk att skador uppstår om kroppen eller delar av kroppen träffar något solitt föremål. Kroppens hastighet kan därför vara en lämplig storhet att använda för bedömning av skadeutfallet.

Richmond⁵² beskriver konsekvenser och sannolikheten att kastas omkull då kroppen får en hastighet orsakad av en luftstötvåg, se Tabell 6.

⁵¹ D. C. Viano, A. I. King, Biomechanics of Chest and Abdomen Impact: Second edition CRC Press LLC, 2000

⁵² D.R. Richmond, E.A. Fletcher, Blast Criteria for personnel in relation to quantity- distance, Proceedings of the 13th Annual Explosives Safety Seminar Minutes, 14-16 September 1971, San Diego, Calif.

Hastighet [m/s]	Konsekvens	
0,1	0 % sannolikhet för att kastas omkull	
0,6	50 % sannolikhet för att kastas omkull	
3,9	1 % sannolikhet för att erhålla allvarlig skada (benbrott eller organskador). Stor sannolikhet för lätt skada (blåmärke)	

Tabell 6 Konsekvenser vid låga kasthastigheter då en person exponeras för en luftstötvåg.

Tatom⁵³ presenterade olika sannolikheter för skallfraktur baserat på med vilken hastighet islaget sker, se Tabell 7. Hur allvarlig skada en skallfraktur är beror både på omfattning och på placering. Enligt AIS är den mildaste formen av skallfraktur (vault fracture), vilket författaren tolkar som en spricka i något av skallens ben, en AIS 2 skada d.v.s. en måttlig (moderate) skada medan en penetrerande/krossande skada kan ge en skadenivå upp till AIS 6.

Tabell 7 Sannolikhet för skallfraktur vid olika islagshastigheter.

Hastighet vid islag [m/s]	Sannolikhet för skallfraktur
3,0	Mycket låg sannolikhet
4,0	Tröskelvärde
5,5	50 %
7,0	Nästan 100 %

White ⁵⁴ beskrev letaliteten vid islag av hela kroppen vilket presenteras i Tabell 8. Bedömningen måste ses som grov eftersom en mängd parametrar inverkar på letaliteten, särskilt vid helkroppsislag ⁵⁵, vilket inte beskrivs i Whites dokument.

Tabell 8 Letalitet då kroppen kastas eller faller mot hård yta.

Hastighet vid islag [m/s]	Letalitet
3,0	Mycket låg sannolikhet
6,5	Tröskelvärde
16,5	50 %
42,0	Nästan 100 %

4.4.6 Kasthastighet

Alla beräkningar i kapitel 5.4.6 avser stående person med bröstet (eller ryggen) mot stötvågen. Personen har en massa på 100 kg. Stötvågen är av friedlandertyp och är orsakad av en ytdetonation av en halvsfärisk TNT laddning

⁵³ Frank B. Tatom and John W. Tatom, Comparison of Head Injuries as Predicted by Three Different

Displacement Velocity Models, Engineering Analysis Inc., 715 Arcadia Circle, Huntsville, AL 35801

⁵⁴ Clayton S. White, The nature of problems involved in estimating the immediate casualties from nuclear explosions, Lovelace foundation for medical education and Research, March 1971

⁵⁵ Richard G. Snyder, Human survivability of extreme impacts in free fall, Federal Aviation Agency, Civil Aeromedical Research Institute, 1963

4.4.6.1 Dynamisk tryckbelastning (Bowen)

Bowen ⁵⁶ utvecklade en modell med utgångspunkt i belastningar orsakade av kärnvapendetonationer. Kärnvapen kan ge sekundlånga dynamiska belastningar vilket gör att vindbelastningar kan vara dominerande när det gäller den totala belastningen på ett föremål. Bowen utelämnar sannolikt därför helt diffraktionsbelastningen (se kapitel 3.5) och ställer upp en kraftbalans baserad på det dynamiska trycket enligt

$$\mathbf{F}_{d} = \mathbf{M} \frac{\mathrm{d}\mathbf{v}}{\mathrm{d}\mathbf{t}} = \frac{1}{2} \rho(\mathbf{u} - \mathbf{v})^{2} \mathbf{A} \mathbf{C}_{d} \tag{27}$$

där F_d är belastningen, u partikelhatighet, v hastigheten hos det belastade föremålet, M dess massa, A dess tvärsnittsarea och C_d motståndskoefficienten. Föremålets hastighet v(t) påverkar det dynamiska trycket under belastningsförloppet men också varaktigheten hos belastningen eftersom det är "medflygande". För att kompensera för belastningstidens beroende av föremålets hastighet införs

$$dt' = dt \frac{w}{w - v}$$
(28)

där w hastigheten hos vågfronten.

Bowen inför också accelerationskoefficienten α uttryckt som

$$\alpha = \frac{AC_d}{M}$$
(29)

vilket ger tillräckliga uppgifter om föremålet som belastas för att beräkna dess utgångskasthastighet.

Därmed kan (27) skrivas om som

$$d\mathbf{v} = \mathbf{q} \propto \left(\frac{\mathbf{u} - \mathbf{v}}{\mathbf{u}}\right)^2 \frac{\mathbf{w}}{(\mathbf{w} - \mathbf{v})} d\mathbf{t}$$
(30)

Ekvation (30) löses numeriskt. För att erhålla nödvändiga stötvågsstorheter använder Bowen empiriska samband framtagna av Brode ^{57, 58}. Bland annat tar han hänsyn till att varaktigheten hos det dynamiska trycket är längre än varaktigheten hos det statiska trycket enl. Figur 4.

Diagrammet i Figur 35² beskriver hastighet (max hastighet strax efter stötvågspassage) hos ett föremål med kännedom om α och max övertryck hos stötvågen. α är skalad för 1 kt. För att erhålla korrekt α_1 måste $\alpha_1 = m^{1/3} \alpha$ användas där m är laddningsstorlek uttryckt i kt TNT. Enligt Holm² skall m dubblas vid användande av kurvan för konventionella vapen. Det vill säga för att bestämma maximal kasthastighet då laddningen är 1000 kg TNT sätts m =2000 kg.

⁵⁶ Gerald Bowen, Ray Albright, Royce Fletcher, Clayton White, Model designed to predict the motion of objects translated by blast wave, Lovelace Foundation for Medical Education and Research, Januari 1961

⁵⁷Harold L Brode, Numerical solutions of spherical blast waves, Journal of applied Physics, 26:766-775. June 1955

⁵⁸Harold L Brode, Point source explosions in air, Report AECU-3517, The Rand Corporation, December 3, 1956

Med användande av en projicerad yta =0,95, en massa M= 100 kg och C_d =1,05 fås ett α = 0,01. Ur diagrammet i Figur 35 och med hjälp av Conwep kan kasthastighet som funktion av olika avstånd bestämmas. För 10, 50 och 250 kg TNT fås hastighet som funktion av avstånd till detonationen enligt Figur 36. Ingen fördubbling av sprängämnesmängden m har gjorts.



Ovanstående gulmarkerade måste utredas med hänsyn till Richards kommentarer:

Figur 35 Utgångskasthastighet som funktion av α för olika övertryck.



Figur 36 Utgångskasthastighet baserad på dynamiskt tryck som funktion av avståndet från 10, 50 respektive 250 kg TNT. Diagrammet i figur 35 är använt vid beräkning.

4.4.6.2 Reflektionstrycksbelastning (Levine)

Ett förenklat sätt att beräkna utgångshastigheten hos ett föremål som utsätts för stötvåg är att enbart ta hänsyn till det reflekterade trycket som verkar på den yta som är projicerad mot stötvågen.

Levine⁵⁹ genomförde beräkningar och försök för att bedöma hur långt en människa kastas om hon befinner sig på ett visst avstånd från en detonerande sprängladdning. Vid beräkning av utgångshastigheten använde Levine reflekterad impulstäthet framräknad med Conwep vilken representerar den impulstäthet som en vägg med stor utsträckning orienterad parallellt med stötvågsfronten utsätts för. Levine tar inte hänsyn till människokroppens begränsade utsträckning. En approximativ utgångshastighet för en människokropp stående med bröstet mot detonationen kan därmed beräknas enligt

$$\mathbf{V} = \frac{\mathbf{I_r}\mathbf{A}}{\mathbf{M}} \tag{31}$$

Där I_r är den reflekterade impulstätheten, A den projicerade ytan och M= kroppens massa.

Vid försöken användes en ståldummie som placerades på olika avstånd från sprängladdningen. Efter detonation uppmättes kastlängden och jämfördes med en teoretisk modell baserad på reflektionsimpulsen enligt ovan, se diagram och principiell försöksuppställning i Figur 37. Levine gör en rad förenklingar där man bland annat helt bortser från den dynamiska belastningen och använder en stålplåt som substitut för människokroppen men får ändå ett resultat som inte alltför mycket avviker från försöken. En intressant notering var att genom att placera sprängladdningen i ett fordon reducerades den effektiva sprängämnesmassan med ca 50 %.

⁵⁹ J. Levine, J.P. Dionne, D. Bueley, M Ceh, A. Makris, Human travel distance due to an explosive, Med-Eng Systems Inc, Defence R&D Canada

I Figur 37 visas ett exempel för med laddningsvikt femtio kg, M= 100 kg (sannolikt inklusive EOD dräkt) och A= 0,95 m2. Avståndet till laddningen (standoff) varierar från två till åtta m.



Figur 37 ⁵⁹. Principiell försöksuppställning samt kastlängd som funktion av standoff från 50 kg TNT, modell och experimentella data.

I Figur 38ges utgångshastigheten (kasthastighet) som funktion av avstånd till sprängladdningen för 10,50 respektive 250 kg TNT beräknat enligt ekvation 31.



Figur 38 Utgångshastighet baserad på reflektionsimpulstätheten som funktion av avståndet från 10, 50 respektive 250 kg TNT

4.4.6.3 Dynamisk och statisk tryckbelastning (DS)

Genom att använda resonemanget om hur en kropp belastas av en stötvåg i kapitel 5.4.2 kan en metod som tar hänsyn både till statisk och till dynamisk belastning beskrivas. I "The Effects of Nuclear Weapons" ⁷ beräknas belastningen på olika delytor av ett rätblock som funktion av tid. Informationen sammanställs i ett diagram, se figur 41, där ytorna under de olika tryck tidkurvorna beskriver impulsen som verkar på belastad struktur.

Genom att approximera människokroppen med ett stelt rätblock med måtten HxBxL= 1,9x0,5x0,2 m, se Figur 39, med massan 100 kg kan en bedömning av utgångskasthastigheten göras.



Figur 39 Förenklad modell av stående människa utsatt för luftstötvåg.

Om stötvågens hastighetsvektor är vinkelrät mot blockets plan är det bara belastningen på två ytor som bidrar till en translationshastighet, nämligen de ytor vars normal är parallella med stötvågens hastighetsvektor (främre och bakre yta), se Figur 39. De ytor som är parallella med hastighetsvektorn (sidoytorna) bidrar med friktionslaster men från dem bortses här.

För att få tillräckliga indata används Conwep, halvsfärisk ytdetonation.

Som beskrevs i 5.4.2 belastas blocket inledningsvis av det reflekterade trycket P_r , se Figur 40. P_r avtar snabbt (linjärt) eftersom blocket har en begränsad utsträckning och trycket på den främre ytan övergår till det omgivande trycktillståndet, d.v.s. totaltrycket P_s vid tiden t_s efter vågfrontspassagen

$$\mathbf{P}_{\mathbf{s}} = \mathbf{P}(\mathbf{t}_{\mathbf{s}}) + \mathbf{Q}(\mathbf{t}_{\mathbf{s}}) \tag{32}$$

där P är det statiska övertrycket och $Q = C_d * q$ det genomsnittliga dynamiska trycket. C_d är motståndskoefficienten och sätts för ett rätblock till 1. t_s fås ur ekvation (23).

Här bortses från att C_d varierar med strömningshastigheten och kroppens storlek vilket inverkar speciellt vid korta detonationsavstånd då strömningshastigheterna kan vara mycket höga.

P(t) + Q(t) antas avta linjärt mot 0 vid varaktigheten t_p. Framförallt vid korta varaktigheter blir felet då impulsen beräknas från en triangelpuls för stor. Därför används en effektiv varaktighet t'_p vid beräkning;

$$I = \frac{1}{2}(P+Q) \cdot t_{p} = \int_{t_{i}}^{t_{p}} P(t) + Q(t)dt$$
(33)

Där P och Q är maxvärden och t_i är den tid då stötvågen når främre ytan. Det innebär att $t'_p \le t_p \cdot t_i$. Likaså försummas att det dynamiska tryckets varaktighet oftast överstiger det statiska tryckets varaktighet, se kapitel 2.3.

Ytan under A+B - (C+D+E) enligt Figur 40 representerar den impulstäthet som verkar på den främre sidan av blocket.

Friktionsbelastningen av sidoytorna försummas.

Efter tiden t_{b1} , ekvation (24), når stötvågen den bakre ytan. Den tid, t_{b2} , som det tar för övertrycket att uppnå ett maximalt värde på bakre ytan kan enligt kap 5.4.2 uttryckas

$$\mathbf{t_{b2}} = \mathbf{t_{b1}} + \mathbf{t_b} = \frac{\mathbf{L} + \mathbf{4S}}{\mathbf{W}}$$
 (34)

där t_b fås ur ekvation (25). Maximalt övertryck på den bakre ytan, P_b, sätts till

$$\mathbf{P}_{\mathbf{b}} = \mathbf{P}(\mathbf{t}_{\mathbf{b}}) + \mathbf{Q}(\mathbf{t}_{\mathbf{b}}) \tag{35}$$

d.v.s. totaltrycket efter tiden t_b efter stötvågspassagen av bakre ytan. P_b definieras riktad mot P_s . C_d för den bakre ytan sätts till -0,3 vilket innebär att de dynamiska lasterna är riktade motsatt dom statiska. Tryckets variation med tiden antas variera linjärt men varaktigheten t_{b3} justeras även här enligt (33). Ytan F, se Figur 40, är då den summerade impuls som verkar på den bakre ytan. För att erhålla kroppens utgångskasthastighet V summeras impulstätheterna för ytorna och multipliceras med projicerad yta samt divideras med kroppens massa m enligt

$$V = \frac{I \cdot A}{m} = \frac{0,95(A + B - (C + D + E + F))}{100}$$
(36)

Ingen hänsyn tas till kroppens hastighetsökning under belastningsförloppet.



Figur 40 Principiell figur för tryck-tid förloppen som används vid bestämmande av impuls och hastighet för en kropp som belastas av luftstötvåg.

Figur 41 visar kasthastighet som funktion av avstånd till laddningen för en stående människa med en massa på 100 kg för 10, 50 respektive 250 kg TNT. Nödvändiga detonationsparametrar är beräknade med Conwep.



Figur 41 Kasthastighet som funktion av avstånd till laddningen för en stående människa med en massa på 100 kg för 10, 50 respektive 250 kg TNT

4.4.7 Diskussion och slutsats

Både Levine och Bowen utesluter delar av belastningen i luftstötvågen. Bowen utesluter diffraktionsbelastningen vilket i sig är naturligt eftersom han betraktar effekterna av kärnvapenladdningar i storleksordningen kiloton [kt]. En människa som exponeras för 1 kt TNT som detonerar på ett avstånd av 300 m belastas av en impuls som till största delen är dynamisk, den statiska impulsen är ca 15 % av den totala impulsen enligt beräkningar gjorda enligt DS beskriven i 5.4.6.3.

Ι

Figur 42 ges hastighet strax efter stötvågspassage som funktion av avstånd till laddningen för en människa som väger 100 kg med en projicerad area av 0,95 m². Bowens metod som enbart tar hänsyn till dynamisk belastning ger lägre värden på utkasthastighet jämfört med Levine och DS metoderna. Osäkerheten är stor avseende Bowens metod eftersom den är framtagen för långa varaktigheter och relativt sett låga partikelhastigheter. Resultatet är inte heller framräknat med fördubblad sprängämnesmassa som Bowen föreslog. Vid korta avstånd överstiger partikelhastigheterna mångfaldigt ljudhastigheten vilket sannolikt påverkar ingående parametrar.

Levine som enbart tar hänsyn till reflektionsimpulsen ger högst utgångshastighet vilket möjligen kan förklaras av att man bortser från den motverkande diffraktionsbelastningen på "ryggsidan" och dessutom tar man ingen hänsyn till den avlastning som sker då den exponerade ytan är av begränsad utsträckning, d.v.s. varaktigheten och därmed impulsen för det reflekterade trycket överskattas i Levine.

I Figur 43visas hur stor andel av den totala kastimpulsen som fås från statisk belastning. Resultatet indikerar att hänsyn bör tas både till statisk belastning och till dynamisk belastning. Alla metoderna har svagheter men DS metoden, eller andra metoder som tar hänsyn till både diffraktions- och dynamisk belastning, rekommenderas för beräkning av utgångshastighet. Osäkerheterna är dock stora och vidare utredning rekommenderas.



Figur 42 Jämförelse av max kasthastighet för en stående människa med m=100 kg och projicerad area = 0.95 m^2 som funktion av avstånd till laddningen för Bowen, Levine och DS (kap 5.4.6.3) för 50 kg TNT.



Figur 43 Andel av den totala kastimpulsen som fås från statisk belastning vid beräkning gjord enligt DS (kap 5.4.6.3)

5 Losslitning och kast av fastsatta föremål

Som tidigare beskrivits i kapitel 3.5 så utsätts en struktur som exponeras för en luftstötvåg för en last orsakad såväl av statiskt övertryck och deformation av stötvågsfronten (diffraktionslast) som av ett dynamiskt tryck orsakad av den detonationsvind som sveper över strukturen. I tidigare kapitel har förutsatts att strukturen/ kroppen inte utsätts för andra yttre laster än de som orsakas av stötvågspassagen. Om strukturen däremot är fastspänd på något sätt eller hindras att flytta sig genom till exempel friktion mot underlaget tillkommer bromsande yttre laster. Själva strukturen förutsätts fortsättningsvis att bete sig som en stel kropp. En kraftbalans skulle till exempel i ett enkelt fall med en lådstruktur fastsatt på en vägg eller golv, se Figur 44, kunna skrivas

$$\mathbf{F}_{\text{stötvåg}} + \mathbf{F}_{\text{fästelement}} + \mathbf{F}_{\text{friktion}} + \mathbf{Ma} = \mathbf{0}$$
(37)

 $F_{stötvåg}$ är den yttre last som stötvågen orsakar och som är en kombination av statisk och dynamisk belastning enligt tidigare.

Ma är tröghetslast där M är strukturens massa och a dess acceleration.

 $F_{fästelement}$ beror på en mängd faktorer avseende bland annat utformning och material i fästelementet samt hur det belastas. Fästelement kan till exempel vara nit- eller skruvförband, svets- eller limfogar.

 F_{friktion} uppstår då strukturen pressas mot till exempel det underlag den står på och kan enligt klassisk teori skrivas $F_{friktion} = \mu N$ där μ är friktionskoefficienten och N den normalkraft med vilken lådan pressas mot underlaget. N kan vara resultat både av lådans egentyngd *mg* och/ eller det tryck som till exempel ett nit- eller skruvförband ger upphov till.



Figur 44 Lådstruktur monterad mot till exempel vägg eller golv via fästelement exponerad för luftstötvåg.

Hastighet hos ett losslitet föremål, metod 1. Genom att sätta upp kraftbalansen i y-led för ovanstående enligt

$$\mathbf{m} \cdot \mathbf{y}^{\prime\prime} + \mathbf{F}_{\text{fästelement}}(\mathbf{y}, \mathbf{y}^{\prime}) + \mathbf{F}_{\text{friktion}}(\mathbf{y}, \mathbf{y}^{\prime}) + \mathbf{F}_{\text{stötvåg}}(\mathbf{t}) = \mathbf{0}$$
(38)

där y = y(t) och y' = $\frac{dy(t)}{dt}$ erhålls en differentialekvation som kan lösas antingen numeriskt eller analytiskt (belastningen i andra riktningar än y-led försummas).

Författaren anar att formulerandet av en korrekt differentialekvation i sig kan vara svårt, till exempel kan en last förskjutningsfunktion för fästelement vara besvärligt att bestämma

utan försök eller numerisk analys. Sannolikt krävs numerisk analys för alla fall utom de allra enklaste.

Hastighet hos ett losslitet föremål, metod2.

Ytterligare en väg att bestämma strukturens hastighet är att använda totala (kinetiska) energi E_t som stötvågen överför till en stelkropp. Den kan, om inga övriga förluster förekommer, beräknas med hjälp av den stötvågsimpuls som verkar på strukturen enligt

$$\mathbf{E}_{\mathbf{t}} = \frac{\mathbf{M}\mathbf{v}^2}{2} = \frac{\mathbf{I}^2}{2\mathbf{M}} \tag{39}$$

Om man känner den energi som åtgår för att övervinna friktion och deformera fästelement etc. kan en "restenergi" E_r beräknas ur vilken föremålets hastighet kan bestämmas. Även här krävs, utom i de enklaste fallen, sannolikt en ganska komplex analys för att bestämma "losslitningsenergier".

5.1 Exempel: Fastbultad låda

Nedan följer ett exempel för att belysa ovanstående.

Metod 1

En låda enligt Figur 44 belastas med en stötvåg vars front är vinkelrät mot lådsidans normal. Lådan förutsätts bete sig som en stel kropp. Lådans format är 0,45x0,45x0,2 m och är fastsatt med fyra fästelement av stål. Fästelementet består av ett fästöra, se Figur 44 och Figur 45, fastbultade med M6 bult som är ingjutna i betong.



Figur 45 Daimaruiya⁶⁰ har genomfört försök med fästöron i olika stålmaterial. Fästörat som används i exemplet har e = 9 mm och t=1,2 mm. Materialet är av höghållfast stål, CR 440, med dragbrottspänning= 440 MPa. Längst upp till höger visas brottmoden, så kallat hålkantsbrott. Den huvudsakliga belastningen är sannolikt skjuvning av fästörat

Last-förskjutningsförloppet för fästörat approximeras med en konstant, grönt i diagram i Figur 45, last 5 kN per bult fram till y=6 mm. I exemplet bortses från eventuella friktionslaster.

Stötvågsbelastningen ges av en trotylladdning på tio kg som detonerar på marken på ett avstånd av tre meter. Belastningen approximeras till det reflekterade trycket mot lådans ena sida med ytan A. Det reflekterade trycket, P_r, antas avta linjärt med tiden enligt

$$\mathbf{P}(\mathbf{t}) = \mathbf{P}_{\mathrm{r}\,\mathrm{max}}\,\mathbf{A}\left(\mathbf{1} - \frac{\mathbf{t}}{\mathbf{t}_{1}}\right) \tag{40}$$

⁶⁰ M Daimaruya, H Fujiki, H Ambarita, H Kobayashi and H-S Shin, Shear fracture of jointed steel plates of bolted joints under impact load, Journal of physics: Conference Series 451, 2013, 012007

Där $P_{r max}$ och t_1 (stötvågens varaktighet) beräknat ur reflekterad impulstäthet I_r fås ur Conwep. En kraftbalans kan då skrivas

$$\boldsymbol{m} \cdot \frac{d^2 \boldsymbol{y}(t)}{dt^2} + \boldsymbol{F} = \boldsymbol{P}_{r \max} \boldsymbol{A} \left(\mathbf{1} - \frac{t}{t_1} \right)$$
⁽⁴¹⁾

omskrivet

$$\frac{\mathrm{d}^2 \mathbf{y}(\mathbf{t})}{\mathrm{d}\mathbf{t}^2} + \frac{\mathbf{F}}{\mathbf{m}} = \frac{\mathbf{P}_{\mathrm{r}\max} \mathbf{A}}{\mathbf{m}} \left(\mathbf{1} - \frac{\mathbf{t}}{\mathbf{t}_1}\right) \tag{42}$$

Indata ges i

Tabell 9.

Tabell 9 Indata för beräkning

F _{fästelement}	4 x 5000 N = 20000 N under 6 ms därefter 0.		
М	10 kg		
А	0,2x0,45 m2= 0,09 m2		
$P_{r max}$ {10 kg TNT @3m}	3,162 MPa		
l _r	1234 Pas		
t ₁	0,0008 s		
$\frac{P_{r \max} A}{M}$	28458 m/s ²		
$\frac{F}{M}$	2000 m/s ²		

(42) kan då skrivas

$$\frac{d^2 y(t)}{dt^2} + 2000 = 28458 - 35572500 t$$
⁽⁴³⁾

Lösning av (43) med hjälp av randvillkoren ger

$$\mathbf{y}(\mathbf{t}) = \mathbf{13229t}^2 - \mathbf{5928750t}^3 \tag{44}$$

Hastigheten hos lådan kan skrivas

$$\mathbf{v} = \frac{d\mathbf{y}(t)}{dt} = 26458 t - 17786250 t^2$$
⁽⁴⁵⁾

Vid en förskjutning av y= 6 mm så upphör den bromsande kraften från bultarna, d.v.s. fästet brister. Det inträffar detta vid t=0,85 ms. Hastigheten hos skåpet vid denna tidpunkt 9,6 m/s. Övertrycket har vid det laget sjunkit till 0 varför ingen hastighet adderas till skåpet efter att fästet brustit. Jämför man med om skåpet inte skulle varit fastspänt, d.v.s. F=0 i ekvation 42 erhålls en hastighet av 21,5 m/s, det vill säga ca dubbla hastigheten.

Metod 2

Anta att lådan inte är fastspänd. Om vi fortsatt antar att den accelererande lasten är det reflekterade trycket som verkar jämt över lådans ena sida kan den resulterande kinetiska energin E_k skrivas

$$E_k = \frac{(A \cdot I_r)^2}{2M} \tag{46}$$

Med indata från

Tabell 9 fås E_k= 616 J

Om lådan var fäst enligt beskrivningen i metod 1 ovan skulle arbetet $E_{\rm f}$ som krävs för att slita loss den motsvara

 $E_f = 4 \cdot F_{fästelement} \cdot y_{brott}$

Med insatta värden enligt ovan fås $E_f = 120$ J. Efter losslitning återstår E_k - E_f = 496 J vilket omräknat till hastighet ger v= 10,0 m/s vilket väl överensstämmer med resultatet i metod 1.

Slutsats

I exemplet ovan förenklas den yttre belastning och strukturens reaktion på belastningen så mycket att det kan ifrågasättas om det är meningsfullt att göra. Även om last-tid förlopp för fästelement är bestämt experimentellt är det osäkert hur väl det representerar det specifika fallet i exemplet. Sannolikt bör slutsatser avseende losslitning av föremål och deras hastighet baseras på numeriska beräkningar och/eller försök.

Det är möjligt att man kan göra förenklingar baserat på resultat för olika "elementarfall" och på så sätt kunna ta fram konstruktionsanvisningar för hur olika strukturer skall fästas för att motstå lasterna från en luftstötvåg.

6 Applikationsexempel

Nedan följer tre exempel avseende de gränsvärden för skada som diskuterats och beskrivits tidigare i dokumentet. Exemplen baserar sig på olika laddningsvikter som förutsätts befinna sig i närheten av marken. Detonationsdata är framräknade med Conwep avseende halvsfärisk TNT laddning placerad på mark.

Laddningsstorlekarna representerar en uppskattning för olika typer av "bärare" enligt Tabell 10. Innehållet är hämtad från U.S. Bureau of Alcohol, Tobacco, Firearms, and Explosives samt U.S. Technical Support Working Group (TSWG).

Tabell 10 Uppskattade laddningsstorlekar möjliga att dölja/transportera/placera med olika typer av bärare.

Bärare (plattform)	Typisk sprängämnesmängd
Mindre paket, brev	1Kg
Självmordsväst, Papperskorg	10 kg
Större paket	20 kg
Liten bil	250 kg
Stor bil /minivan	500 kg
Van, Pickup	2000 kg
Lastbil mindre	5000kg
Lastbil större	15000 kg

För exemplen på följande sidor, figur 46 - 48, har 10 kg (papperskorg eller självmordsväst), 250 kg (liten personbil) samt 5000 kg (mindre lastbil) valts som utgångspunkt för att illustrera skaderisken då en stående oskyddad människa exponeras för en luftstötvåg. Luftstötvågen är av Friedlandertyp och träffar kroppen utan föregående reflektion eller andra störningar.

I Tabell 11 beskrivs de skador och skaderisker som är inlagda i figur 46-48. Gränsvärdena finns beskrivna i kapitel 5.

Tabell 11 Skaderisker för primära och tertiära skador.

Skada	Sannolikhet för skada	Skadenivå	Kapitel
Sprucken trumhinna	1 %	AIS 1	3.3.1
Sprucken trumhinna	50 %	AIS 1	3.3.1
Lungskada (Bowen)	Tröskelvärde	N/A	3.3.2.1
Lungskada (Bowen)	99 %	AIS 6	3.3.2.1
Lungskada* (Axelsson)	NA	AIS 2-3	3.3.2.4.1
Hjärnskada HIC (Levine)**	10 %	AIS 2	3.3.3
Hjärnskada HIC (Levine)**	99 %	AIS 6	3.3.3
Hjärnskada (Courtney)***	NA	Begynnande hjärnskada	3.3.3
Kastskada helkropp****	50 %	AIS 6	3.4.3

* Enligt TNO (Horst) enpunktsmodell

**Stelkroppsacceleration av huvud till följd av stötvågen.

*** Avser en medelnivå i det som beskrivs av Courtney som "region of interest" och måste ses som mycket osäker.

****Kroppen kastas av stötvågen mot till exempel en vägg



Figur 46 Skaderisker som funktion av avstånd för oskyddad stående människa vid markdetonation av 10 kg trotyl.



Beg hjärnskada AIS 6

10 % 99 % NA 50%

Hjärnskada HIC (Levine) Hjärnskada HIC (Levine) Hjärnskada (Courtney)

Kastskada helkropp

AIS 2 AIS 6

Figur 47 Skaderisker som funktion av avstånd för oskyddad stående människa vid markdetonation av 250 kg trotyl.



Figur 48 Skaderisker som funktion av avstånd för oskyddad stående människa vid markdetonation av 5000 kg trotyl.

7 Förslag på fortsatt arbete

Som en direkt fortsättning på genomfört arbete föreslås följande:

Validera/ utveckla de kastmodeller och belastningsförlopp som beskrivs med försök. Möjligen kan stötrörsgenererad stötvåg vara lämpligt.

Vilken inverkan på skadeverkan på människan har olika personliga skydd, t.ex. EODdräkter, kroppsskydd, hjälmar etc

Inverkan på skadeverkan på människan då detonationen sker i slutna rum, tunnlar eller bakom väggar eller hörn.

Vidare utredning av tertiära skador och fall/kastförloppet samt skador (blunt trauma) från sekundärsplitter. När sker traumatisk amputation?

Inleda arbete med att en mer användarvänlig modell för bedömning av skada (Excel).

Inleda framtagning av handbok för bedömning av skador på människa (Datorbaserad)

Inleda arbete med att ta fram anvisningar för dimensionering av fästelement, baserat på "elementarfall.

FOI är en huvudsakligen uppdragsfinansierad myndighet under Försvarsdepartementet. Kärnverksamheten är forskning, metod- och teknikutveckling till nytta för försvar och säkerhet. Organisationen har cirka 1000 anställda varav ungefär 800 är forskare. Detta gör organisationen till Sveriges största forskningsinstitut. FOI ger kunderna tillgång till ledande expertis inom ett stort antal tillämpningsområden såsom säkerhetspolitiska studier och analyser inom försvar och säkerhet, bedömning av olika typer av hot, system för ledning och hantering av kriser, skydd mot och hantering av farliga ämnen, IT-säkerhet och nya sensorers möjligheter.



FOI Totalförsvarets forskningsinstitut 164 90 Stockholm

Tel: 08-55 50 30 00 Fax: 08-55 50 31 00 www.foi.se