



Förstudie kring hälsoeffekter på hjärnan av repetitiv tryckbelastning från finkalibriga vapen

En litteraturstudie

JENS DANIELSSON, JOAKIM ERICSON,
MATTIAS K. SKÖLD (KI) OCH MATTIAS GÜNTHER (KI)

Jens Danielsson, Joakim Ericson, Mattias K.
Sköld (KI) och Mattias Günther (KI)

Förstudie kring hälsoeffekter på hjärnan av repetitiv tryckbelastning från finkalibriga vapen

En litteraturstudie

Titel	Förstudie kring hälsoeffekter på hjärnan av repetitiv tryckbelastning från finkalibriga vapen – En litteraturstudie
Title	Preliminary study on the effects on brain health of repetitive blast pressure from small arms- a review
Rapportnr/Report no	FOI-R--5718--SE
Månad/Month	December
Utgivningsår/Year	2024
Antal sidor/Pages	22
ISSN	1650-1942
Uppdragsgivare/Client	FMV
Forskningsområde	Vapen, skydd och säkerhet
FoT-område	Inget FoT-område
Projektnr/Project no	E21611
Godkänd av/Approved by	Pernilla Magnusson
Ansvarig avdelning	Vapen, skydd och säkerhet

Detta verk är skyddat enligt lagen (1960:729) om upphovsrätt till litterära och konstnärliga verk, vilket bl.a. innebär att citering är tillåten i enlighet med vad som anges i 22 § i nämnd lag. För att använda verket på ett sätt som inte medges direkt av svensk lag krävs särskild överenskommelse.

This work is protected by the Swedish Act on Copyright in Literary and Artistic Works (1960:729). Citation is permitted in accordance with article 22 in said act. Any form of use that goes beyond what is permitted by Swedish copyright law, requires the written permission of FOI.

Sammanfattning

FOI har av FMV fått uppdraget att genomlysa kunskapsläget kring eventuell personpåverkan avseende effekter av repetitiv tryckbelastning från finkalibrigt mynningstryck. Framför allt handlar det om hur hjärnhälsan påverkas av återkommande, repetitiv belastning. Vidare innefattar uppdraget att föreslå försöksuppställning för att kvantitativt och reproducerbart mäta dylik tryckbelastning i givna geometrier. Den föreliggande rapporten är en del av två parallellt utgivna rapporter, där denna innehåller en litteraturgenomgång av kunskapsläget kring stötvågsinducerad hjärnskada från låg tryckbelastning (Eng: Blast Induced NeuroTrauma, BINT). De vanligaste föreslagna mekanismerna för BINT presenteras kortfattat tillsammans med de symtom som de orsakar. Effekter av kumulativ belastning diskuteras. Vidare presenteras föreslagna riskavstånd och användningsbegränsningar för vanligt förekommande vapen som sammankopplats med BINT. Denna rapport ligger sedan till grund till ett förslag till försöksuppställning som ges ut separat.

Nyckelord: Repetitiv tryckbelastning; Finkalibriga vapen; Kumulativ tryckbelastning; Hjärnhälsa

Summary

FOI has been tasked by FMV to shed light on the state of knowledge regarding possible personal impact from lower pressure loads caused by the shock wave generated by a projectile leaving the muzzle of small firearms. Mainly, it is about how brain health is affected by recurring, repetitive low level blasts (LLB). Furthermore, the task includes proposing an experimental set-up to quantitatively measure such a pressure load in given geometries. The present report is part of two parallel published reports, where this contains a literature review of the state of knowledge regarding Blast Induced NeuroTrauma, BINT, from low pressure load. The most commonly proposed mechanisms of BINT are briefly reviewed, and the symptoms they cause. Effects of cumulative loading are discussed. Furthermore, proposed risk distances and use restrictions for commonly used small arms linked with BINT are presented. This report is then the basis for a proposal of a detailed experimental set-up, which is published separately.

Keywords: Low Level Blast; LLB; mild Traumatic Brain Injury; mTBI; Blast Induced NeuroTrauma; BINT

Innehållsförteckning

1	Inledning	7
1.1	Problemformulering	7
2	Litteraturgenomgång	8
2.1	Lindrig traumatisk hjärnskada.....	8
2.1.1	Skademekanism	8
2.1.1.1	Direkt kraniell transmission	8
2.1.1.2	Accelerationsmekanismer	9
2.1.1.3	Transthorakal/transvaskulär mekanism	9
2.1.2	Symtom och manifestation av BINT	9
2.1.3	Kumulativa effekter av upprepade BINT.....	10
2.2	Kort om tryck.....	10
2.2.1	Svepande och reflekterat tryck	11
2.2.2	Ljud.....	11
3	Standard för mätning och kvantifiering av stötvåg och impulsjud...12	12
3.1.1	Antal exponeringar per dag	12
3.1.2	Position, omgivning och repetitioner.....	12
3.1.3	Snabbt repetitiva system.....	12
3.1.4	Effekter av hjälm	12
3.2	Mätning av de medicinska effekterna av LLB på människa.....	13
4	Befintliga användarbegränsningar av utvalda vapensystem	14
4.1	Begränsningar för BOP i det generella fallet.....	14
4.2	Användningsbegränsningar Automatgevär 90	14
4.2.1	Bakgrund till befintlig användningsbegränsning av Ag 90...15	15
4.3	Användningsbegränsningar Tung kulspruta 88.....	15
4.3.1	Bakgrund till användningsbegränsnings av Ksp 88.....	17
4.4	Användningsbegränsningar granatgevär	17
4.4.1	Bakgrund till användningsbegränsning för Grg	17
5	Sammanfattande kommentarer	19
6	Referenser.....	20

1 Inledning

FOI har på uppdrag av FMV genomfört en förstudie avseende effekter av repetitiv tryckbelastning från finkalibrigt mynningstryck. Försvarsmaktens personal har vid specifik användning upplevt negativ fysiologisk påverkan. Symtomen har företrädesvis varit av relativt mild och diffus art såsom huvudvärk, koncentrationssvårigheter, sömnsvårigheter, illamående och kognitiv påverkan. Många av de uppkomna symtomen överensstämmer med lindrig traumatisk hjärnskada, hädanefter kallad mTBI¹. I de fall mTBI kan kopplas till tryckbelastning från explosioner kallas det Blast Induced NeuroTrauma, BINT. Den föreliggande rapporten sammanfattar forskningsläget kring BINT orsakat av tryckbelastning från vapen användning. Vidare presenteras befintliga användningsbegränsningar och bakgrunden därtill. Den detaljerade föreslagna försöksuppställningen presenteras parallellt i en separat rapport, FOI-RH--2769--SE [1].

1.1 Problemformulering

Försvarsmakten och FMV har, utifrån ovan beskrivna kontext, gett FOI i uppdrag att genomföra en förstudie kring personalpåverkan av tryck genererat av finkalibriga vapensystem. Förstudien innefattar:

- (i) En genomgång av litteraturen om BINT orsakat av finkalibriga vapentyper.
- (ii) En genomgång av befintliga rekommendationer, och bakgrunden därför, för personal i närheten av finkalibriga vapen.
- (iii) Om möjligt, och i tillägg till finkalibriga vapen, framtagande av bakgrunden till befintliga användnings-begränsningar av försvarsmaktens granatgevär (Grg) m/48, m/86 och m/18.
- (iv) Att i samverkan med enheten för experimentell traumatologi på Karolinska Institutet utforma, alternativt föreslå ett formulär för bedömning och värdering av symptom hos personal som använder vapensystemen. Detta skall också kunna användas för att studera effekter av åtgärder gjorda för att minska riskerna för BINT.

Utformandet av en försöksuppställning för reproducerbar tryckmätning i relevant geometri genomförs och presenteras i separat rapport, FOI-RH--2769--SE. Den framtagna försöksuppställningen skall kunna användas för framtida riskbedömningar efter eventuell modifiering av geometrin (gällande modifieringar både med syfte att minska risk för BINT och stridsrelaterade funktionella ändringar).

¹ Från det engelska begreppet "mild traumatic brain injury".

2 Litteraturgenomgång

I det här avsnittet presenteras resultatet från en genomgång gällande uppkomsten av, orsaken till och preventiva åtgärder emot BINT. Vidare presenteras även standard för mätning och kvantifiering av stötvåg och impuls ljud. Litteraturgenomgången utgår från öppen litteratur, standarder samt reglementen och gör inte anspråk på att vara komplett, utan avser att belysa relevanta aspekter av fältet. I övrigt hänvisas till refererade artiklar och rapporter, samt referenser däri. Särskilt gäller detta de patofysiologiska molekyllära mekanismerna bakom de uppkomna symtomen, här rekommenderas vidare läsning i referenserna [2, 3].

2.1 Lindrig traumatisk hjärnskada

Att tryckvåg från detonation kan orsaka övergående eller kroniska hjärnskador är känt sedan första världskriget, då kallat ”granatchock” (*shell shock*), och innebar tydliga neurologiska symtom utan synliga tecken på skada [4]. Redan 1917 kunde obduktioner påvisa mindre blödningar och andra histologiska förändringar i hjärnan hos drabbade [5]. Dessa förändringar liknade fynd från djurförsök, där försöksdjuren utsatts för tryckvåg från detonationer. De beskrivna symtomen och förändringarna relaterar dock till stora påfrestningar från kraftiga stötvågor.

De senaste årtiondena har alltmer fokus lagts på effekterna av luftstötsbelastning med lägre intensitet, och särskilt då återkommande exponering och dess ackumulerade effekt [6-8]. Jämfört med de kraftiga stötvågorna ger dessa mer subtila symtom som gradvis kan drabba den exponerade, exempelvis vid övning. Hädanefter kommer de lägre tryckbelastningarna att betecknas som LLB (Low Level Blast). Exempelvis kan dessa lägre tryckbelastningar orsakas av stötvågen genererad av en projektil som lämnar mynningen på ett finkalibrigt eldrörsvapen [9]. Stötvågen kan genereras av själva projektilens utlopp från eldröret, men också av expansion av drivgaser. Frågan har fått stort fokus inom, framför allt, USA:s försvarsmakt som har initierat breda program inom området hjärnhälsa för att bättre förstå att förebygga negativa effekter av LLB [10].

2.1.1 Skademekanism

Den exakta mekanistiska kopplingen mellan LLB och BINT är inte känd. Man skiljer på primär och sekundär mekanism, där primär mekanism beskriver hur stötvågen interagerar med hjärnvävnad, det vill säga skademekanismen. Sekundär är den biokemiska, inflammatoriska och ischemiska responsen på den primära skadan.

Även om den exakta primära mekanismen för BINT inte är utredd är det i nuläget framför allt tre primära mekanismer som förekommer i litteraturen: direkt kraniell transmission, accelerationsmekanismer samt transthorakal/transvaskulär mekanism. De tre beskrivna mekanismerna förefaller helt plausibla och har visats verkningsfulla i djurförsök [2, 11]. Det finns dock ingenting som säger att det är en enskild mekanism, utan det kan troligen variera och olika kombinationer av samverkande mekanismer är högst sannolikt. I nedanstående tre underavsnitt presenteras dessa mycket kort.

2.1.1.1 Direkt kraniell transmission

När en stötvåg träffar huvudet kommer en del av stötvågen att reflekteras, och en del absorberas. När den absorberade stötvågen propagerar genom huvudets vävnader uppkommer typiskt skjuvningsskador i övergången mellan olika vävnadstyper [11]. Vidare kan slitningsskador förekomma om det är stora densitetsgradienter, t.ex. mellan kärnvägg och hjärnparenkym. Under sådana förutsättningar kan material från högre densitet slitas loss in mot lägre vävnad med lägre densitet [11]. Även om de exakta skademekanismerna på vävnadsnivå vid direkt kraniell transmission av den primära stötvågen inte är helt klarlagda har man nu så pass stor förståelse för att den primära stötvågen per se kan ge

upphov till effekter på vävnads och organnivå i hjärnan att världshälsoorganisationen, WHO, under 2022 beslutade om att inrätta en specifik diagnoskod för skada på hjärnan orsakad av exponering för primär stötvåg: ICD10 S06.8A—Primary blast injury of brain, not elsewhere classified [12].

Direkt deformation av skallen kan också överföra stötvåg från luft till hjärnan. Denna typ av kompression/dekompression ger en propagering av stötvågen genom hjärnan, med samma direkta skademekanismer som ovan [13]. Denna mekanisk är dock mer sannolik vid högre tryckbelastning.

2.1.1.2 Accelerationsmekanismer

En stötvåg kan leda till en snabb rörelse av huvudet, som kan orsaka en accelerationsskada på hjärnan, motsvarande ett slag på huvudet [14]. Typiska, makroskopiska, skador är krosskador, slitskador och blödningar på hjärnans yttre delar, och dess hinnor. Detta sker genom att hjärnans mjukdelar trycks mot kranietets hårda delar. Själva rörelsen i hjärnans mjukdelar kan också leda till inre kompressions och slitningsskador, särskilt i gränser mellan olika vävnadstyper. Detta kan i sin tur leda till lokal celldöd och blödningar [11]. Acceleration av huvudet är dock mer förknippat med högre belastning, och inte nödvändigtvis en signifikant faktor vid LLB.

2.1.1.3 Transthorakal/transvaskulär mekanism

Överföring av stötvåg från luft till hjärna kan också ske med en mer indirekt mekanism. Den mest förekommande modellen är den transthorakala vägen, där snabb kompression av bröstkorget ger en hydrodynamisk stöt i kärlsystemet, och då särskilt i vensystemet (t.ex. v. *Jugularis*) [15-17]. Denna puls kan fortplanta sig tillbaka upp till hjärnan, passera blod-hjärnbarriären och orsaka ruptur av kapillärer och påföljande blödningar. Denna hypotes har dock ifrågasatts på senare tid [13], särskilt i relation till LLB.

2.1.2 Symtom och manifestation av BINT

Den traditionella symtombilden från tillståndet ”granatchock” var typiskt trötthet, förvirring, darrningar, mardrömmar, synrubbingar, balanssvårigheter och känselrubbingar [6]. Dessa symtom överlappar till en viss del med symtom beskrivna för repetitiva BINT. Typiska symtom som tillskrivs BINT är [11]:

- huvudvärk
- yrsel/balansrubbingar
- illamående
- ljus- och ljudkänslighet
- synrubbingar.

Till detta kommer, i varierande grad:

- trötthet
- sömnstörningar
- minnes- och koncentrationsstörningar
- depression
- oro/ångest
- irritabilitet.

Olika kombinationer, med olika stora bidrag, av dessa symtom har beskrivits. Individuella olikheter, precis skadelokalisation och magnitudskillnader ligger troligen bakom stora variationer av symtommanifestation. Överlappning med symtom typiska vid PTSD (posttraumatic stress disorder) är vidare en utmaning inom fältet BINT.

I tillägg till de subjektiva symtomen beskrivna ovan bedrivs det intensiv forskning på att hitta biomarkörer för BINT [18, 19]. Med biomarkörer avses i det här fallet biomolekyler,

metaboliter eller fragment som frisläpps vid lindrig traumatisk hjärnskada. Typiskt frisläpps samma biomarkörer vid hjärnskador av olika genes, men de relativa, inbördes koncentrationerna och tidsberoendena kan ge högst specifika signaler, som skulle kunna fungera som ett biokemiskt fingeravtryck för BINT. För information om specifika biomarkörer hänvisas till referenserna [18-20].

2.1.3 Kumulativa effekter av upprepade BINT

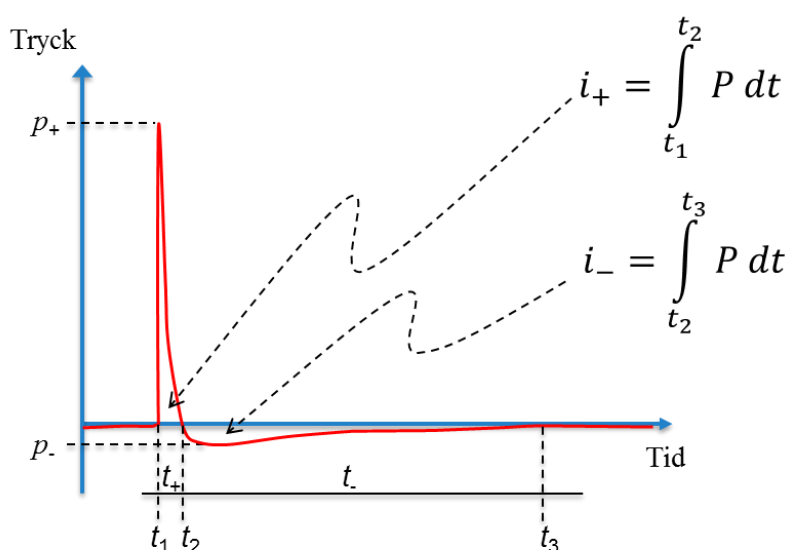
Symtomen från en enskild BINT avklingar i de allra flesta fallen av relativt snabbt, och symptomfrihet inom 7-10 dagar kan förväntas. Upprepade fall av BINT, däremot, synes ge en kumulativ effekt vilket kan ge kvarstående långtida problem. En studie på amerikanska instruktörer som utsattes för LLB (snitt 8,6 kPa i intervallet 7,0 – 36,7 kPa), men med kumulativt höga nivåer, visade symptom som kvarstående huvudvärk, hörselproblem, perifera domningar, stickningar, koncentrationsstörningar, minnesstörningar, nedsatt kognitiv förmåga och sömnsvårigheter [21]. Direkta fysiologiska reaktioner har också kunnat mätas [2], t.ex. ökade halter av amyloid β [19] (en peptid vars aggregering vanligen kopplas till Alzheimers sjukdom) och progressiv taupati, (det vill säga sjukdomar relaterat till aggregering och dysfunktion av proteinet Tau) [22, 23].

Vidare så föreligger det rapportering om att försvarsmaktsanställda löper en förhöjd risk att drabbas av motoneuronsjukdomen amyotrofisk lateral skleros (ALS) [24]. Det finns tidigare studier som visar att upprepade trauman mot huvud, ryggrad och under vissa omständigheter övriga kroppen, är förenat med ökad risk för ALS [25], även om orsakssambanden är ifrågasatta [26]. Mekanistiskt har detta kopplats ihop med att den hastighetsbegränsande tillväxsmekanismen för proteinaggregat av superoxid dismutas 1 (SOD1) är fragmentering, det vill säga att aggregaten bryts upp och exponerar tillväxtytor, vilket kan vara direkt relaterat till olika typer av våld mot huvudet [27, 28].

2.2 Kort om tryck

I detta underavsnitt ges en kort sammanfattning av tryck från en luftstöt våg som fysikaliskt fenomen. Detta görs som för att ge en introduktion till begrepp och resonemang senare i rapporten.

Tryckförloppet i frifält kan för en ostörd punkt på ett givet avstånd från en detonation karakteriseras i enlighet med Figur 1.



Figur 1. Idealiserat tryck-tid diagram i frifält för introduktion av begrepp.

I Tabell 1 ges en beskrivning av parametrarna i Figur 1.

Tabell 1. Parametrar för karakterisering av en stötvåg.

Beteckning	Betydelse	Enhet	Beskrivning
p_+	Maximalt övertryck*	Pa	Högsta tryck som erhålls från stötvågen
p_-	Maximalt undertryck*	Pa	Lägsta tryck som erhålls från stötvågen
t_1	Ankomsttid	s	Tiden det tar för stötvågen att nå den punkt som avses
t_2	Tid till undertryck erhålls	s	-
t_3	Tid till återgång atmosfärstryck	s	Tryckförloppet är att betrakta som avslutat
t_+	Varaktighet av övertrycksfas	s	Definieras av $t_+ = t_2 - t_1$
t_-	Varaktighet av undertrycksfas	s	Definieras av $t_- = t_3 - t_2$
i_+	Impulstäthet av övertrycksfasen	Pa s	Tryck-tid-integralen för övertrycksfasen.
i_-	Impulstäthet av undertrycksfasen	Pa s	Tryck-tid-integralen för undertrycksfasen.

*Trycken utgår från atmosfärstryck som referens (nolltryck).

Tryckbelastning från övertrycksfasen benämns som BOP².

2.2.1 Svepande och reflekterat tryck

En yta som ligger parallellt med luftstötvågens utbredningsriktning utsätts för det så kallade svepande trycket.

För en yta som är placerad i vinkel mot luftstötvågens utbredningsriktning fås ett tryck som kallas reflekterat tryck. Det maximala reflekterade övertrycket är högre än vad som erhålls på samma avstånd för det svepande trycket. Förstärkningen beror dels på stötvågens infallsvinkel men också på det svepande tryckets storlek.

2.2.2 Ljud

Tryck i akustiska sammanhang anges ofta med decibelskalan (dB). Ljudtrycksnivån L räknat i dB fås i enlighet med

$$L = 20 \log \left(\frac{p}{p_0} \right), \quad (1)$$

där p är uppmätt tryck och p_0 är ett referensvärde (ofta används $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Pa) [29].

² Från engelska begreppet "blast overpressure".

3 Standard för mätning och kvantifiering av stötvåg och impuls ljud

I detta avsnitt beskrivs definitioner och standarder för stötvågs- och impuls ljudsmätningar. Generellt skall alla impuls ljud med ett topptryck över 140 dB (0,2 kPa) bedömas som riskfyllda. Hela detta avsnitt bygger på MIL-STD-1474D [30].

3.1.1 Antal exponeringar per dag

Tillåtet antal exponeringar, med ett topptryck över 140 dB, per dag kan bestämmas från ett enkelt empiriskt samband:

$$N_1 = 10^x$$

$$x = \frac{1}{5} (177 - L + 6,64 \log \left(\frac{200}{T} \right)), \quad (2)$$

där N_1 är tillåtet antal skott per dygn givet hörselskyddspropp eller kåpa. För skyddsnivå propp och kåpa ansätts $N_2 = 20N_1$. L är topptrycket i dB, och T är B-duration i ms. B-duration definieras här som tiden för amplituderna i de positiva och negativa pulserna att understiga 10 % av magnituden på den positiva pulsen (Figur 1).

3.1.2 Position, omgivning och repetitioner

För att inhämta data till ekvation (2) behövs således mätningar som ger både topptryck och varaktighet. Alltså rekommenderas registrering av full tidsupplöst tryckvågform. På grund av att reflektion av tryckvågsutbredningen kommer att påverka belastningen är det avgörande att den specifika geometrin tas med i beräkningen.

3.1.3 Snabbt repetitiva system

En serie av successiva stötblastningar kan ha en kumulativ effekt som till slut överbelastar ett biologiskt tröskelvärde och påverkar centrala nervsystem [31]. Hur lång återhämtningstid som krävs emellan för att oberoendegöra två exponeringar är inte tydligt i litteraturen.

Snabbt repetitiva tryckvågskällor, där topptrycket understiger 140 dB, skall bedömas som konstant tryckbelastning. Som en exponering av stötvåg räknas antingen en enskild impuls (till exempel ett skott från granatgevär (Grg) eller Automatgevär 90 (Ag 90), se nedan), eller en salva från ett snabbt repeterande vapen, såsom tung kulspruta 88 (Ksp 88).

Som B-duration för ett snabbt repeterande system skall en effektiv B-duration, B_{eff} , bestämmas. Detta görs enligt:

$$B_{eff} = B_1 N_{0,2}, \quad (3)$$

Där B_1 är B-durationen för en enskild impuls, och $N_{0,2}$ är antalet impulser på 200 ms.

3.1.4 Effekter av hjälm

Hjälmarna är utvecklade för att skydda mot penetrerande projektiler och trubbigt våld. På senare tid har det uppstått en debatt om hjälmens utformning under vissa förutsättningar kan påverka en stötvåg, och möjligen amplifierar effekten. Experiment och beräkningsstudier har inte kunnat fastslå om det finns en generell effekt, eller om det är helt geometri- och riktningsberoende [32]. Ett fenomen som diskuteras i samband med

hjälmgeometrier är så kallad *underwash*, där hjälmen ”fångar in” luftstötstågen och koncentrerar den vid huvudet [33].

3.2 Mätning av de medicinska effekterna av LLB på människa

Det finns många exempel på försök att identifiera objektiva markörer på BINT. Typiskt handlar det om ökade eller minskade halter av olika proteiner, peptider eller metaboliter [18, 19, 23], eller effekter på genuttryck sekundärt till eventuell neurologisk skada [20]. Ännu finns dock inga standardmetoder för detta utan fältet arbetar för närvarande typiskt med självskattning av de drabbade, och kopplar detta till mätningar med kroppsburna tryckgivare [21, 34].

Ett standardformulär för självskattning som används flitigt är ett som utvecklats av Kathleen Kalmar och medarbetare 1995 [35]. Det betecknas Neurobehavioral Symptom Inventory (NSI) och består av självskattning av 22 vanligt förekommande symtom efter hjärnskakning, och BINT kan på många sätt likställas med en hjärnskakning av andra orsaker. Formuläret är enkelt att fylla i, tar inte lång tid och kvantifieringen är intuitiv (varje symtom värderas i allvarlighetsgrad från inga (0) till allvarlig (4)) [35]. Att formuläret är enkelt och inte tar lång tid ökar sannolikheten för god medverkandegrad.

4 Befintliga användarbegränsningar av utvalda vapensystem

I det här kapitlet beskrivs befintliga användningsbegränsningarna för finkalibriga vapen, och då särskilt Ag 90 och Ksp 88 samt bakgrunderna till dessa. Vidare beskrivs användningsbegränsningar för Grg. Riktlinjer och begränsningar som presenteras är från Försvarsmakten och motsvarande begränsningar bestämda för USA:s väpnade styrkor.

4.1 Begränsningar för BOP i det generella fallet

Generell ges i litteraturen en begränsningsnivå för BOP (Blast OverPressure) vid 27,5 kPa (4 psi) [36, 37]. Detta kriterium stammar från en satt gräns för trumhinneruptur [31, 38]. Kriteriet används av amerikanska armén medan motsvarande gräns i Kanada är satt till 20,7 kPa (3 psi) [39, 40]. Begränsningsnivån är alltså en gräns för att skydda trumhinnor och anses inte vara satt utifrån risk för neurotrauma. Emellertid är det ofta detta värde som anges för säkerhetsavstånd vid BOP. Vidare gäller begränsningsnivån för tryck i frifält och därmed tas inte hänsyn till de komplexa miljöer som kan förekomma vid användning av vapen i olika sammanhang. I linje med detta har symtom upplevts vid repetitivt BOP också under 27,5 kPa [21].

För varje vapentyp definieras i SÄKR G [41] säkerhetsområden som skydd mot hörselskadligt buller. Fyra nivåer av säkerhetsområden definieras: *Förbjudet område*, *Begränsningsområde*, *Inre riskområde* samt *Yttre riskområde*. Varje område definieras som en radiell utsträckning från mynningen på vapnet eller från centrum på eldröret för bakblåsare. I *förbjudet område* får ingen vistas, undantaget är skytt, laddare och instruktör för finkalibriga vapen. I *begränsningsområdet* får endast skytt, laddare och servis befinna sig, och för finkalibriga vapen överlappar således *förbjudet område* och *begränsningsområde* helt. I *inre riskområde* skall hörselskyddspropp och hörselskyddsskåpa användas, och i *yttre riskområde* ska hörselskyddspropp eller hörselskyddsskåpa användas [41].

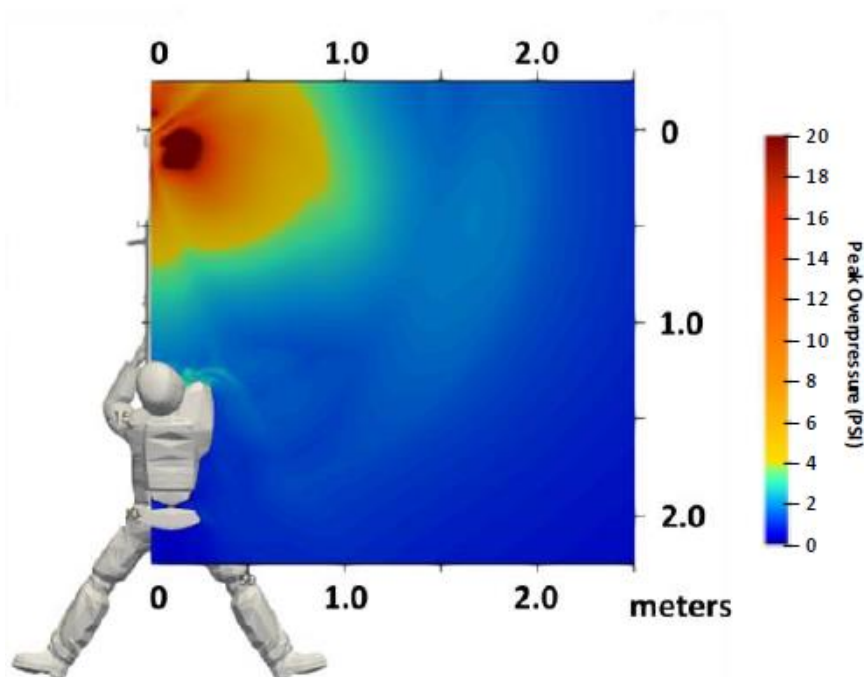
I ett memorandum från Amerikanska försvarsministeriet daterat 8:e augusti 2024, här betecknat Mem24 [42], pekas Ag 90 (där betecknat M107), Ksp 88 (M2A1) och Grg (MAWWS) ut som vanliga vapensystem som är förknippade med BINT [42]. I ett direkt relaterat projekt, CONQUER [43], har övertrycksprofiler i frifält bestämts för en rad vapentyper, och ligger till grund för de riskavstånd som listas i Mem24.

4.2 Användningsbegränsningar Automatgevär 90

I Försvarsmaktens riktlinjer och säkerhetsföreskrifter framgår det att, för Ag 90 utsträcker sig det förbjudna området 1 m i radie från mynningen. Det inre riskområdet definieras som intervallet $1\text{ m} < r < 2\text{ m}$. och det yttre riskområdet ($r = 2\text{--}50\text{ m}$) [41, 44].

Vidare får ingen som befinner sig inom inre riskområdet ($r < 2\text{ m}$) utsättas för mer än 300 skott/dygn (se avsnitt 3.3.1) [44].

I Mem24 sätts ett radiellt riskavstånd till 2,13 m (7 fot) för Ag 90, utifrån topptrycksgränsvärdet på 27,5 kPa (4 psi) [42]. Utbredningen av topptrycket från mynningen på Ag 90 har mätts upp, i CONQUER, där riskavstånden i Mem24 har bestämts. För Ag 90 visas tryckutbredningen i Figur 2. I figuren syns det att 4 psi-gränsen ligger kring 0,8-1,3 m, vilket tydliggör här att gränsvärdet är satt med marginal i Mem24, men överensstämmer bättre med Försvarsmaktens förbjudna område.



Figur 2. Topptrycket från mynningen på ett Automatgevär 90 som funktion av avstånd från mynningen. Vapnet är utrustat med mynningsbroms, ammunition: 0.50 Cal Ball M33/WC860. Trycket är bestämt på 32 cm höjd över markplan. Figur från [43]³.

4.2.1 Bakgrund till befintlig användningsbegränsning av Ag 90

Under andra halvan av 00-talet genomfördes tämligen omfattande studier av effekt på grishjärna från tryckbelastning av bland annat Ag 90 och Grg. Dessa studier genomfördes på uppdrag av Försvarsmakten av Göteborgs Universitet och Neurotrauma Research Sweden. Studierna gjordes på levande tamgris. Djuren var sövda, hade hörselskydd och placerades 0,5 m bakom mynningen, parallellt med pipan. De utsattes för 3 exponeringar med 5-10 minuters intervall. Topptrycket för huvudet på en gris positionerat motsvarande en skytts huvud ligger på 20-22 kPa (2,9-3,2 psi). Noterbart är att tryckets varaktighet ökade från 6 ms vid frifältsbelastning till 131 ms vid skott inomhus. I dessa studier fann man att grisar exponerade för mynningsstryck från Ag 90 i fritt fält uppvisade tydliga histologiska förändringar i hjärnan vilka kan kopplas till mikroskopiska blödningar [45].

Används ekvation (2) för att uppskatta tillåtet antal exponeringar i fritt fält per dag fås 304 skott/dygn om dubbla hörselskydd används. Inomhus, fås enbart 7 skott/dygn på grund av den långa B-durationen.

Ett flertal studier på människa har visat att användning av Ag 90, eller motsvarande, resulterat i BINT-symtom [46] och mätbara koncentrationsförändringar av potentiella biomarkörer såsom amyloid β -peptid och GFAP [19] (även om resultaten från referens [46] har varit föremål för diskussion). Dessa effekter uppkommer redan vid topptryck över 26 kPa (3,8 psi) och kumulativ impulstäthet över 133 Pa·s (19,3 psi·ms) per dag [19].

4.3 Användningsbegränsningar Tung kulspruta 88

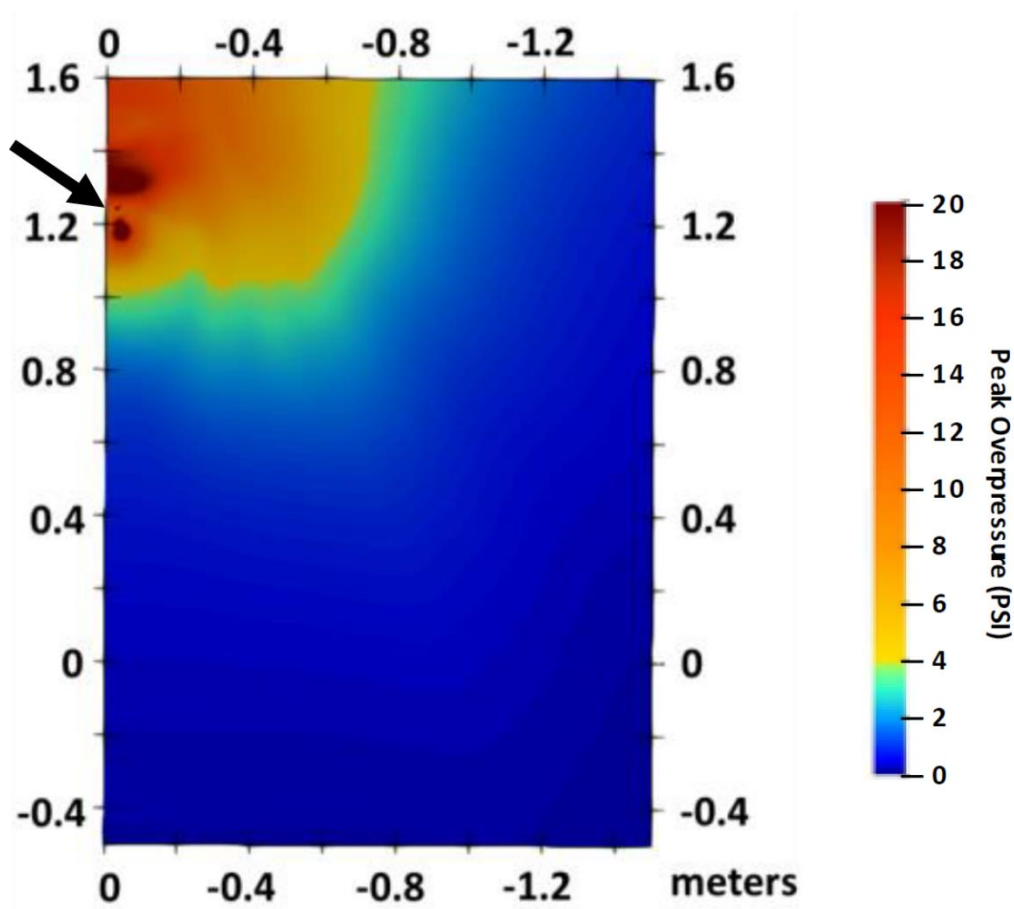
För Ksp 88 föreligger samma *förbjudet område*, *inre* och *yttre riskområde* som för Ag 90, beskrivna i SÄKR G [41]. Dock finns inga specifika begränsningar beskrivna i

³ Godkänd för publicering, se FOI-2024-951.

SÄKR EHV PV för Ksp 88 [44]. Detta kan synas anmärkningsvärt då det är samma kaliber som för Ag 90. Det beskrivs heller ingen begränsning i antal skott kopplat till hälsoeffekter för skytt eller annan personal. För fordonsmonterad Ksp 88 på ringlavett skall stående personal använda dubbla hörselskydd (propp och kåpa). Sittande personal skall använda propp eller kåpa [41].

I Mem24 listas också Ksp 88 (där kallad M2A1) som ett vapen som är förknippat med BOP och BINT.

Tryckmätningar från användning av Ksp 88 har genomförts inom ramen för CONQUER, och visas Figur 3. Man kan notera, att topptrycket kring mynningen på Ksp 88 avtar snabbare än för Ag 90, och 4 psi-gränsen återfinns vid cirka 70 cm, i jämförelse med cirka 1 m för Ag 90. I Mem24 har, för Ksp 88, minsta avstånd till mynningen satts till 7 fot, i storleksordningen lika med riskområdet (inklusive förbjudet område) stipulerat i SÄKR G 2023 [41]. Det noteras också att varaktigheten inte är bestämd för Ksp 88, och således kan inget begränsande exponeringsantal bestämmas.



Figur 3. Topptrycket från mynningen på Ksp 88 (M2A1) som funktion av avstånd. Origo är här satt till infästningspunkt i lavetten. Positionen för mynningen indikeras med svart pil. Mät punkt är satt ovanför vapnets horisontalplan. Ammunition är 0.50 cal M8 API, och data är insamlad för 4 salvor. Notera att Ksp 88 här saknar mynningsbroms, vilket antas påverka tryckfördelningen. Figur från [43]⁴.

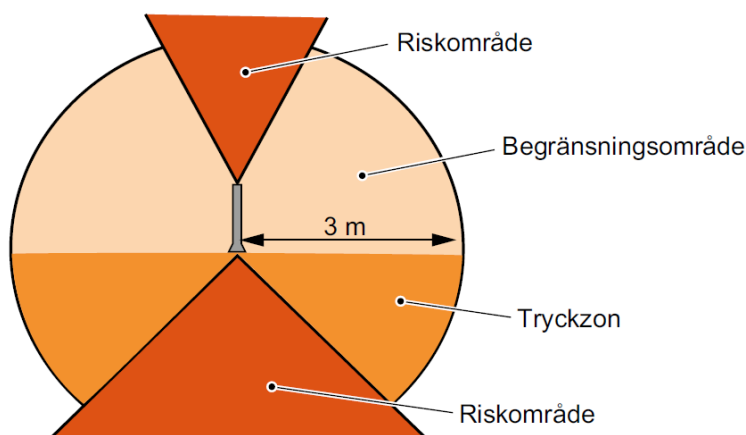
⁴ Godkänd för publicering, se FOI-2024-951.

4.3.1 Bakgrund till användningsbegränsnings av Ksp 88

Det noteras att det finns betydligt färre publicerade rapporter kring BINT relaterat till Ksp 88 jämfört med Ag 90. Ksp 88 ligger dock med på listan i Mem24 över vapentyper där skador från BOP är en reell risk.

4.4 Användningsbegränsningar granatgevär

För Grg definieras inte ett förbjudet område, men i SÄKR EHV PV [41] stipuleras att ingen, förutom skytt och laddare får befinna sig närmare än 10 m från vapnet, och då endast i höjd med vapnet och utanför bakre riskområde (Figur 4) [44]. Inre riskområdet är satt till 25 m och yttre riskområde 25-100 m. Endast skyttens och laddarens ben, men inte deras överkroppar, får befinna sig i tryckzonen (Figur 4) [44]. För Grg finns en begränsning för antal skott, och den är satt till 20 skott/ dygn för personal inom begränsningsområdet (Figur 4).



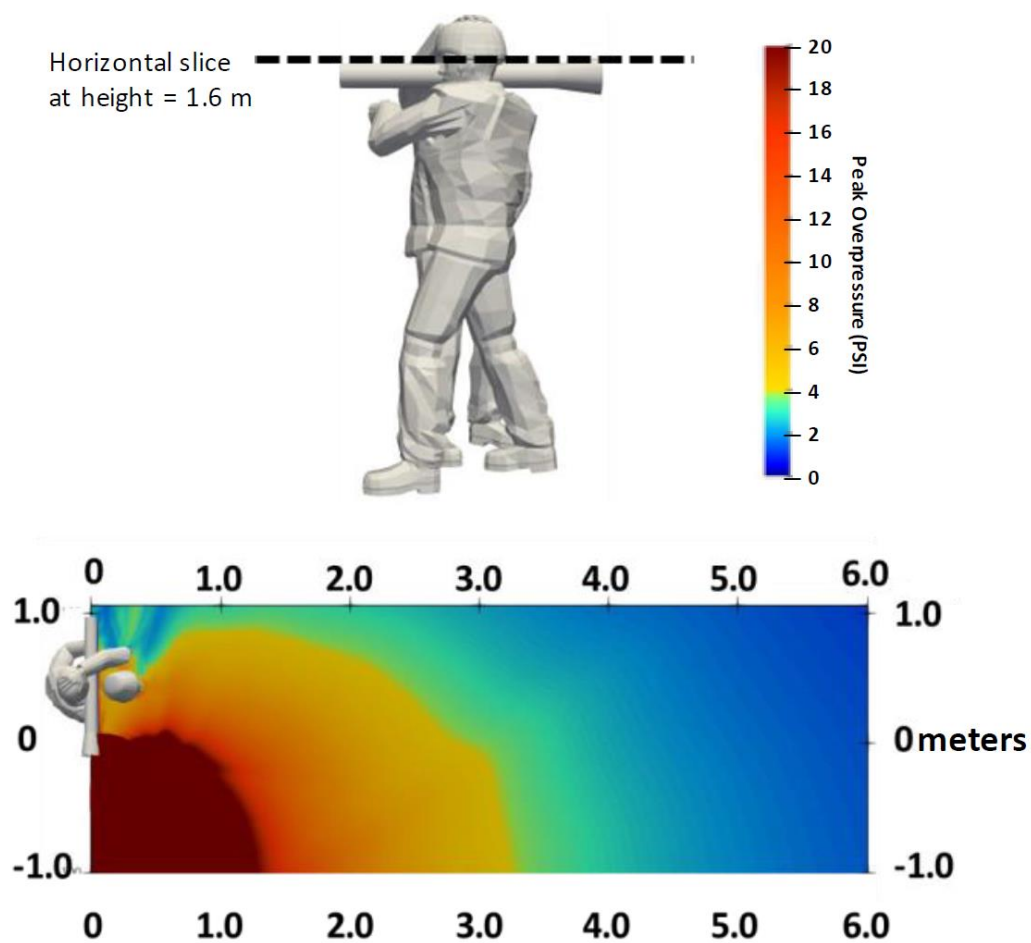
Figur 4. Riskområden, tryckzon och begränsningsområde för användning av Grg [44]⁵.

Inom ramen för CONQUER har tryckprofilen vid användande av Grg bestämts, och återges i Figur 5. Här ses att tryck högre än 4 psi uppnås för positionen av både skytt och laddares huvud. Det noteras att tryckzonen i Figur 5 inte helt överlappar med området med tryck > 4 psi. Tryckutbredningen är bestämd i Figur 5 är bestämd för stående person. För liggande position förväntas större effekter av markspeglning. I Mem24 bedöms 16 fot (ca 4,9 m) som rimligt säkerhetsavstånd för att understiga 4 psi [42]. Detta gäller förstås utanför riskområdena i Figur 4.

4.4.1 Bakgrund till användningsbegränsning för Grg

Redan 1961 utkom en FOI rapport som påvisade relativt stora tryckbelastningar inom riskområdena för Grg. Trycket kvantifierades inte, men man drog slutsatsen att hörselskydd skulle användas av användaren [47]. Det uppmätta trycket för skytt är betydligt större för Grg än för Ag 90 och Ksp 88, vilket också har resulterat i kraftigare användningsbegränsningar. Topptrycket för Grg i skyttens position är omkring 42 kPa (6,1 psi), och B-duration är cirka 10 ms, vilket är betydligt längre än motsvarande tid för Ag 90. Används dessa data i ekvation (2) fås $N_1 = 14$ skott/dygn. Ovanpå detta finns ett flertal studier där tryckpåverkan av Grg har studerats. I en serie försök fann man att grisar som placerats i position motsvarande skytt av Grg hade en signifikant ökad risk att drabbades av små blödningar i hjärnan (se sektion 4.3.1 ovan) [45].

⁵ Godkänd för publicering, se FOI-2024-951.



Figur 5. Tryckutbredning från Grg på 1,6 m höjd, i överkant av eldröret. Mätningen är utförd vid ett 84 mm HEAT TP 552 skott. Figuren är från [43]⁶.

⁶ Godkänd för publicering, se FOI-2024-951.

5 Sammanfattande kommentarer

Föreliggande rapport presenterar en genomgång gällande uppkomsten av, orsaken till och preventiva åtgärder emot BINT. Genomgången visar att den exakta mekanistiska kopplingen mellan LLB och BINT inte är känd. Vidare kan upprepade fall av BINT ge långtida problem. I litteraturen ges även en generell begränsningsnivå från tryckbelastning i frifält, vilket ofta används för att dimensionera säkerhetsavstånd. Begränsningsnivån är dock avsedd för att skydda trumhinnor och innefattar inte egentlig risk för BINT.

Den föreliggande rapporten skall läsas som bakgrund till rapport FOI-RH--2769--SE [1] och beskriver behovet av precisa, reproducerbara och kvantitativa mätningar av repetitiv tryckbelastning i specifika geometrier, relaterat till närhet till användning av finkalibriga vapen. Eftersom att personal som är i närhet dessa under användning, upplever symptom motsvarande mild traumatisk hjärnskada, föreslås också en medicinsk bedömning kopplad till tryckbelastningen.

Ett förslag till försöksuppställning presenteras i rapport FOI-RH--2769--SE [1]. Tillika föreslås där en strategi för medicinsk bedömning, där ett vedertaget självskattingsverktyg används.

6 Referenser

1. Danielsson, J. och J. Ericson, *Förstudie kring hälsoeffekter på hjärnan av repetitiv tryckbelastning från finkalibriga vapen - Förslag till standardiserad försöksuppställning för kvantifierbar och reproducerbar mätning* FOI, Totalförsvarets forskningsinstitut, 2024. FOI-RH--2769--SE.
2. Fehily, B. och M. Fitzgerald, *Repeated Mild Traumatic Brain Injury: Potential Mechanisms of Damage*. Cell Transplant, 2017. **26**(7): p. 1131-1155.
3. Veenith, T., S. Goon, och R.M. Burnstein, *Molecular mechanisms of traumatic brain injury: the missing link in management*. World J Emerg Surg, 2009. **4**: p. 7.
4. Mott, F., W., *Sections of Psychiatry and Neurology: Special discussion on shell shock without visible signs of injury*. Proc R Soc Med., 1916. **9**.
5. Mott, F.W., *The Microscopic Examination of the Brains of Two Men Dead of Commotio Cerebri (Shell Shock) without Visible External Injury*. Br Med J, 1917. **2**(2967): p. 612-5.
6. Robinson-Freeman, K.E., et al., *A Decade of mTBI Experience: What Have We Learned? A Summary of Proceedings From a NATO Lecture Series on Military mTBI*. Front Neurol, 2020. **11**: p. 836.
7. Ravula, A.R., et al., *Animal model of repeated low-level blast traumatic brain injury displays acute and chronic neurobehavioral and neuropathological changes*. Exp Neurol, 2022. **349**: p. 113938.
8. Leggieri, M.J., Jr., et al., *Environmental toxicology of blast exposures: injury metrics, modelling, methods and standards*. J R Army Med Corps, 2019. **165**(1): p. 7-9.
9. Belding, J.N., et al., *Getting on the Same Page: Consolidating Terminology to Facilitate Cross-Disciplinary Health-Related Blast Research*. Front Neurol, 2021. **12**: p. 695496.
10. Spencer, R.W., et al., *Fiscal Year 2018 National Defense Authorization Act, Section 734, Weapon Systems Line of Inquiry: Overview and Blast Overpressure Tool-A Module for Human Body Blast Wave Exposure for Safer Weapons Training*. Mil Med, 2023. **188**(Suppl 6): p. 536-544.
11. Bryden, D.W., J.I. Tilghman, och S.R. Hinds, 2nd, *Blast-Related Traumatic Brain Injury: Current Concepts and Research Considerations*. J Exp Neurosci, 2019. **13**: p. 1179069519872213.
12. CDC Center for Disease Control and Prevention. *National Center for Health Statistics - ICD-10-CM*. National Center for Health Statistics 2024 [cited 2024 Dec 10]; Available from: <https://icd10cmtool.cdc.gov/?fy=FY2024&query=S06.8>.
13. Saljo, A., et al., *Mechanisms and pathophysiology of the low-level blast brain injury in animal models*. Neuroimage, 2011. **54 Suppl 1**: p. S83-8.
14. Courtney, M.W. och A.C. Courtney, *Working toward exposure thresholds for blast-induced traumatic brain injury: thoracic and acceleration mechanisms*. Neuroimage, 2011. **54 Suppl 1**: p. S55-61.
15. Simard, J.M., et al., *Exposure of the thorax to a sublethal blast wave causes a hydrodynamic pulse that leads to perivenular inflammation in the brain*. J Neurotrauma, 2014. **31**(14): p. 1292-304.
16. Courtney, A. och M. Courtney, *Links between traumatic brain injury and ballistic pressure waves originating in the thoracic cavity and extremities*. Brain Inj, 2007. **21**(7): p. 657-62.
17. Courtney, A.C. och M.W. Courtney, *A thoracic mechanism of mild traumatic brain injury due to blast pressure waves*. Med Hypotheses, 2009. **72**(1): p. 76-83.
18. Boutte, A.M., et al., *Brain-related proteins as serum biomarkers of acute, subconcussive blast overpressure exposure: A cohort study of military personnel*. PLoS One, 2019. **14**(8): p. e0221036.
19. Thangavelu, B., et al., *Overpressure Exposure From .50-Caliber Rifle Training Is Associated With Increased Amyloid Beta Peptides in Serum*. Front Neurol, 2020. **11**: p. 620.
20. Gill, J., et al., *Moderate blast exposure alters gene expression and levels of amyloid precursor protein*. Neurol Genet, 2017. **3**(5): p. e186.

21. McEvoy, C., et al., *Cumulative Blast Impulse Is Predictive for Changes in Chronic Neurobehavioral Symptoms Following Low Level Blast Exposure during Military Training*. Mil Med, 2024. **189**(9-10): p. e2069-e2077.
22. Edwards, K.A., et al., *Neuronally-derived tau is increased in experienced breachers and is associated with neurobehavioral symptoms*. Sci Rep, 2021. **11**(1): p. 19527.
23. Edwards, G., 3rd, I. Moreno-Gonzalez, och C. Soto, *Amyloid-beta and tau pathology following repetitive mild traumatic brain injury*. Biochem Biophys Res Commun, 2017. **483**(4): p. 1137-1142.
24. Neovius Pousette, K., J. Söderling, och M. Neovius, *Amyotrofisk lateralskleros (ALS) bland svenska militära utlandsveterander*, Aux Analysis. 2020: Aux Analysis.
25. McKee, A.C., et al., *TDP-43 proteinopathy and motor neuron disease in chronic traumatic encephalopathy*. J Neuropathol Exp Neurol, 2010. **69**(9): p. 918-29.
26. Franz, C.K., et al., *Impact of traumatic brain injury on amyotrophic lateral sclerosis: from bedside to bench*. J Neurophysiol, 2019. **122**(3): p. 1174-1185.
27. Lang, L., et al., *SOD1 aggregation in ALS mice shows simplistic test tube behavior*. Proc Natl Acad Sci U S A, 2015. **112**(32): p. 9878-83.
28. Bergh, J., et al., *Structural and kinetic analysis of protein-aggregate strains in vivo using binary epitope mapping*. Proc Natl Acad Sci U S A, 2015. **112**(14): p. 4489-94.
29. Svensson, L., *Människans tålighet mot luftstöt vågor*. FOI, Totalförsvarets Forskningsinstitut, 2015. **FOI-R--3905--SE**.
30. Department of Defence, *Design Criteria Standard, Noise Limits, MIL-STD-1474D*. 1997.
31. Woodall, J.L.A., et al., *Repetitive Low-level Blast Exposure and Neurocognitive Effects in Army Ranger Mortarmen*. Mil Med, 2023. **188**(3-4): p. e771-e779.
32. Li, Y., et al., *Experimental and numerical study on the protective mechanism of the full helmet subjected to blast loadings*. Thin-Walled Structures, 2024. **198**.
33. Sarvghad-Moghaddam, H., et al., *Evaluation of brain tissue responses because of the underwash overpressure of helmet and faceshield under blast loading*. Int J Numer Method Biomed Eng, 2017. **33**(1).
34. Bailie, J.M., et al., *Cumulative Blast Exposure During a Military Career Negatively Impacts Recovery from Traumatic Brain Injury*. J Neurotrauma, 2024. **41**(5-6): p. 604-612.
35. Cicerone, K. och K. Kalmar, *Persistent postconcussion syndrome: The structure of subjective complaints after mild traumatic brain injury*. The Journal of Head Trauma Rehabilitation, 1995. **10**(3): p. 1-17.
36. Lenox, J. och M. Evans, *Interim Recommendation for Blast Overpressure Exposure Safety for Brain Health*. National Defense Authorization Act for Fiscal Year 2018 Section 734, 2018.
37. Sloley, S.S. och S.M. Turner, *Evaluating evidence supporting the relevancy of 4 psi as a blast overpressure value associated with brain health and performance outcomes following low-level blast overpressure exposure*. Shock Waves, 2024.
38. Simmons, M.M., et al., *Neurological Effects of Repeated Exposure to Military Occupational Levels of Blast*. RAND Corporation. 2020, Santa Monica, California: RAND Corporation.
39. Nakashima, A., et al., *Repeated Occupational Exposure to Low-level Blast in the Canadian Armed Forces: Effects on Hearing, Balance, and Ataxia*. Mil Med, 2022. **187**(1-2): p. e201-e208.
40. Ravula, A.R., et al., *An update on repeated blast traumatic brain injury*. Current Opinion in Biomedical Engineering, 2022. **24**.
41. Försvarmakten, *Reglemente Verksamhetssäkerhet Gemensam*, Arméchefens publikationer, 2023.
42. Department of Defense, *Requirements for Managing Brain Health Risks from Blast Overpressure*, D.o.D. 2024
43. Duckworth, J.L., *DoD Blast Overpressure Reference and Information Guide (D-BOP RIG), CONQUER*. 2024.
44. Försvarmakten, *Reglemente Verksamhetssäkerhet Ehv/Pv*, Arméchefens publikationer, 2023.
45. Säljö, A., et al., *Neuropathology and pressure in the pig brain resulting from low-impulse noise exposure*. J Neurotrauma, 2008. **25**(12): p. 1397-406.

46. Skotak, M., et al., *Occupational Blast Wave Exposure During Multiday 0.50 Caliber Rifle Course*. Front Neurol, 2019. **10**: p. 797.
47. Criborn, C.O., *Undersökning av skadeverkningarna bakom granatgevär genom värmeverkan, tryckverkan och splitterverkan*, FOA, Försvarets forskningsanstalt, FOA 1556-8370, 1961

