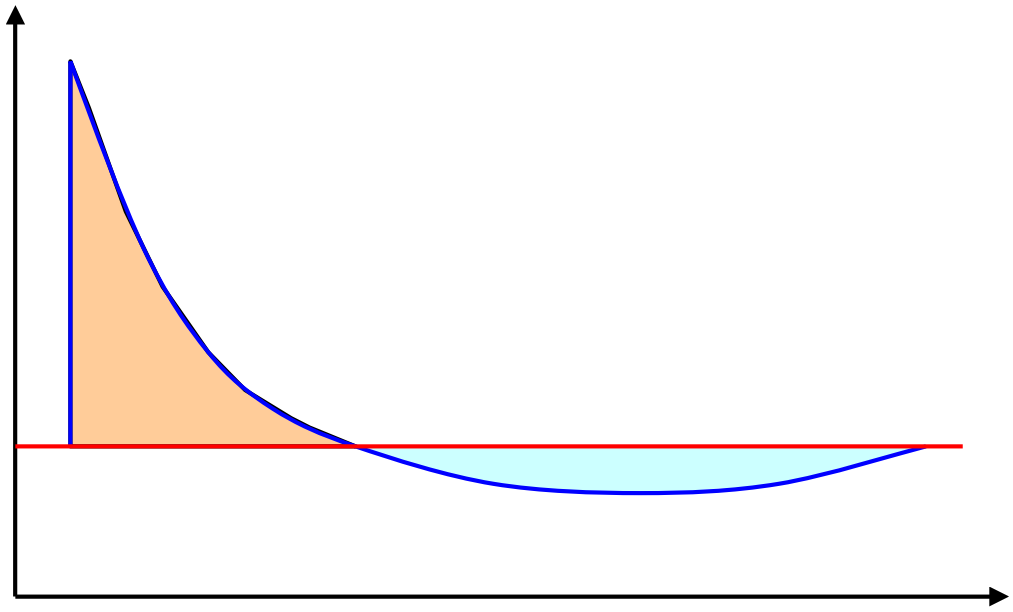
Myndigheten för samhällsskydd och beredskap

Bebyggelsens motståndsförmåga mot extrem dynamisk belastning

Del 1: Last av luftstötvåg



Bebyggelsens motståndsförmåga mot extrem dynamisk belastning
Del 1: Last av luftstötvåg

Författare: Morgan Johansson, Reinertsen Sverige AB och Leo Laine, LL Engineering

2012 MSB
Publikationsnummer: MSB449
ISBN: 978-91-7383-266-3

Innehållsförteckning

Förord

Projektsammanfattning

Project summary

Sammanfattning

Beteckningar

1 Inledning 1

1.1 Bakgrund 1

1.2 Syfte 2

1.3 Explosionsförloppet och dess effekter – orientering 4

1.4 Begränsningar 5

2 bebyggelsen 6

2.1 Begreppet bebyggelse 6

2.2 Hotbildsbeskrivning 6

2.2.1 Laster i samhället 6

2.2.2 Laster med avsikt att skada 7

2.2.2.1 Möjliga källor 7

2.2.2.2 Kriminalitet 7

2.2.2.3 Terrorism 7

2.3 Bebyggelsens motståndsförmåga 8

3 Explosioner 11

3.1 Kommentar om använda referenser 11

3.2 Explosion och stötvåg 11

3.2.1 Definition av explosion 11

3.2.2 Bildandet av en luftstötvåg 12

3.2.3 Hur uppfattas en luftstötvåg? 12

3.2.4 Stötvågsstorheter 13

3.3 Definition av explosionskällor 15

3.3.1 Mängd sprängämne 15

3.3.2 Typ av sprängämne 16

3.4 Luftstötvåg – övergripande beskrivning 17
3.4.1 Ideal luftstötvåg vid fri avlastning 17
3.4.2 Fördämningseffekter vid explosion i slutna utrymmen 19
3.4.3 Begrepp 21
3.4.3.1 Orientering 21
3.4.3.2 Reflexion 21
3.4.3.3 Spegling 23
3.4.3.4 Diffraktion 24
3.4.3.5 Skallagar 25
3.4.4 Empiriska samband 27
3.4.4.1 Orientering 27
3.4.4.2 Positiv fas 27
3.4.4.3 Negativ fas 32
3.5 Befintliga beräkningsverktyg 32
3.5.1 Orientering 32
3.5.2 ConWep 32
3.5.3 VEBE 33
3.5.4 MBEES 34
3.5.5 EBlast 34
3.5.6 VAPO 35
3.5.7 BEEM 36
3.5.8 EMI Streetblast 36
3.5.9 AT planner 37
4 Explosion i stadsmiljö 38
4.1 Orientering 38
4.2 Utförda studier 40
4.2.1 Studerade parametrar – orientering 40
4.2.2 Inverkan av gatukonfiguration 40
4.2.3 Last vid gata utan sidogator 42
4.2.3.1 Orientering 42
4.2.3.2 Inverkan av gatubredd 43
4.2.3.3 Inverkan av byggnadshöjd 44
4.2.3.4 Inverkan på negativ impuls 46
4.2.4 Inverkan av fasader med hål 47
4.2.5 Tunnlar 48
4.2.6 Sammanställning av aktuella referenser 49
5 Analyser i Autodyn 50
5.1 Orientering 50
5.2 Modellering i Autodyn 50
5.2.1 Modelleringsteknik 50
5.2.2 Fri sfärisk utbredning (3D) 51
5.2.3 Fri cylindrisk utbredning (2D) 52
5.2.4 Fri plan utbredning (1D) 53

5.3 Resultat – fri sfärisk utbredning 53
5.3.1 Orientering 53
5.3.2 Positiv fas 53
5.3.2.1 Tryck-tidssamband 53
5.3.2.2 Inverkan av elementnät 56
5.3.2.3 Inverkan av explosionsgaser från TNT 57
5.3.2.4 Jämförelse med ConWep 58
5.3.2.5 Kommentar om impulstäthet i ConWep 61
5.3.3 Negativ fas 63
5.3.4 Jämförelse mellan positiv och negativ fas 67
5.4 Stötvågens utbredning i rummet 69
5.5 Stötvågens volymberoende 71
5.5.1 Koncept 71
5.5.2 Omräkning av skalat avstånd 72
5.5.3 Jämförelse av övertryck 73
5.5.4 Jämförelse av ankomsttid 74
5.5.5 Jämförelse av impuls 74
6 Byggnaders tålighet för utvändig explosion 76
6.1 Orientering 76
6.2 Karakteristiska tryck och impulstätheter 76
7 Människors tålighet för utvändig explosion 80
7.1 Orientering 80
7.2 Direkta skador 80
7.3 Indirekta skador 83
7.3.1 Sekundära skador – splitter 83
7.3.2 Tertiära skador – kroppen slungas av stötvågen 85
7.4 Avslutande kommentar 85
8 Slutsatser 86
9 Referenser 87

Bilaga A Materialdata i Autodyn
Bilaga B Jämförelse av tryck-tidssamband från Autoyn och ConWep
Bilaga C Analys av hemisfärisk laddning på mark enligt Kingery (1966)
Bilaga D Tryck som funktion av avstånd

Förord, rapport 2007

Denna rapport är en första delrapport i det av Räddningsverket finansierade forskningsprojektet Bebyggelsens motståndsförmåga med extrem dynamisk belastning som pågår under perioden januari 2006 till december 2008. Rapporten behandlar stötvågslaster orsakade av explosioner med särskild inriktning mot vad som sker när detta inträffar i stadsmiljö.

Rapporten behandlar uppkomsten av stötvågor orsakade av explosion, dess utbredning samt med vilken kraft den påverkar sin omgivning. Arbetet som presenteras här har utförts under perioden januari 2006 till november 2007.

Arbetet har följts och stöttats av Björn Ekengren, Räddningsverket, och ett stort tack riktas till Björn för dennes inspirerande insatser, utan vilka detta projekt inte hade varit detsamma. Ett särskilt tack riktas även till Ola Pramm Larsen, Anker-Zemer Engineering A/S, som har utfört samtliga analyser i programmet Autodyn som presenteras i denna rapport.

Göteborg, november 2007

Morgan Johansson och Leo Laine

Förord, revidering 2012

Denna publikation är en nyutgåva av rapporten Bebyggelsens motståndsförmåga mot extrem dynamisk belastning. Delrapport 1 – Last av luftstötvåg, Rapport B54-232/07, utgiven av Räddningsverket 2007. I samband med en allmän uppdatering av publikationer som Räddningsverket gett ut har en översiktlig revidering gjorts under hösten 2012.

Räddningsverket upphörde den 31 december 2008 och dess funktion innehas sedan 1 januari 2009 av Myndigheten för samhällsskydd och beredskap (MSB). En första utgåva av rapporten utgavs av Räddningsverket i november 2007 och genomgick en första, lättare revidering i december 2008. Detta är den andra revideringen och ges ut i MSB:s regi – i rapporten hänvisas dock fortfarande till Räddningsverket. Utförda revideringar utgörs av att smärre felaktigheter rättats till. Vidare har projektsammanfattning, tidigare införd i Delrapport 3, inarbetats i denna publikation. I övrigt är sakinnehållet detsamma som i underliggande rapport och fokus har legat på att rätta till samt snygga upp valda delar av innehållet.

Göteborg, oktober 2012

Morgan Johansson och Leo Laine

Projektsammanfattning

I samhället finns en starkt varierad bebyggelse med olika byggnader som i varierande omfattning löper risk att utsättas för extrem dynamisk belastning. Denna last kan orsakas av naturliga fenomen eller härröra från olika typer av olyckor. En extremare variant kan även uppstå i aktioner vilka syftar till avsiktlig skada, såsom väpnat angrepp i samband med grov kriminalitet och/eller terrorism.

En viktig uppgift för Räddningsverket, numera Myndigheten för samhällskydd och beredskap (MSB), är att förebygga olyckor i den normala vardagen samt begränsa dess effekter när sådana ändå inträffar. I egenskap av expertmyndighet åligger det Räddningsverket att fortlöpande vårda och bygga ut den kunskapsbas som finns inom detta område och detta projekt – Bebyggelsens motståndsförmåga mot extrem dynamisk belastning – är ett led i detta arbete. Projektets huvudsakliga syfte är att öka kunskapen om bebyggelsens förmåga att absorbera och motstå de avsevärda påfrestningar den utsätts för vid extrema dynamiska belastningar. En förutsättning för detta är en djupare förståelse om både lastens uppförande och den drabbade konstruktionens strukturella respons när den utsätts för dylika extremlaster.

Projektets huvudmål kan delas in i två delar – laster i samhället samt bebyggelsens motstånds-förmåga – och arbetet har delats in i tre delar med inriktning enligt nedan:

- Del 1: Last av luftstötvåg
- Del 2: Explosion i gatukorsning
- Del 3: Kapacitet hos byggnader

I Del 1 identifieras de laster som kan tänkas uppstå i bebyggelsen samt ges en metodik för att bestämma aktuella laster utgående från en definierad hotbild. En genomgång görs av luftstötvågens utbredning i omgivningen med hänsyn till tid och avstånd samt inverkan av fenomen såsom reflexion, fördämning, och diffraktion. Publikationen innehåller också en övergripande genomgång av byggnaders samt människors tålighet mot explosionslast.

Del 2 utgör en fördjupning av Del 1 och behandlar mer ingående hur effekten av en explosionslast påverkas av omgivningen i en antagen stadsmiljö. Rapporten redovisar resultat från, samt jämförande finita volymanalyser med, en försöksserie utförd i anslutning till projektet.

Slutligen behandlar Del 3 bebyggelsens möjlighet att motstå de laster som uppstår vid en explosion och samband mellan impulslast och statisk last förklaras. En beräkningsmetodik för att bedöma en betongkonstruktions bärförmåga presenteras och ett illustrerande exempel – innehållande lastframtagning, resulterande dynamisk respons samt kapacitetskontroll av utsatt konstruktionsdel – ges.

Project summary

Today's society contains a highly varied housing settlement with structures that may be subjected to extreme dynamic loads. Such loads can be due to natural causes or to different sort of accidents. A more extreme variant may be caused by actions that intend to cause harm, such as armed attacks related to crime and/or terrorism.

An important task for the Swedish Rescue Services Agency, now MSB - Swedish Civil Contingencies Agency, is to prevent accidents in the normal everyday life, and to limit the effect when such things still happen. As a government authority, it is the responsibility of the Swedish Rescue Services Agency to continuously maintain and develop the existing knowledge within this field; and this project – Housing settlement capacity against extreme dynamic loading – is a part of this work. The main aim of the project is to increase the knowledge of the settlement's capacity to absorb and withstand the considerable strain it is exposed to when subjected to extreme dynamic loads. A prerequisite for this is a deeper understanding of both the load behaviour and of the affected structural behaviour of the buildings under such load conditions.

The aim of the project may be divided into two parts – loads in the community, and the housing settlement capacity – and the work have been divided into three parts with the following content:

- Part 1: Load of shock wave in air
- Part 2: Explosion at an urban intersection
- Part 3: Building capacity

In Part 1, the loads that are deemed possible to appear within the housing settlement are identified and a methodology to determine load magnitudes based on a defined threat level is given. A survey is given of the spreading of the shock wave into the surrounding regarding time, distance and due to the influence of phenomena such as reflexion, confinement and diffraction. The report also includes a brief review of how well buildings and humans withstand the effect of a blast load.

Part 2 constitute a continuation of the first report and treats more thoroughly how the blast load from an explosion is affected by its surrounding in a presumed urban environment. The report also includes the results from, and comparisons with belonging finite volume analyses of, a test series, carried out in conjunction with the project.

Finally, Part 3 deals with the possibility of the housing settlement to withstand the loads that appears at an explosion, and the relation between impulse and static loading is explained. A method to calculate the capacity of a concrete structure is presented and an illustrating example of how to determine the load, the resulting dynamic behaviour and capacity control of the exposed structure, is presented.

Sammanfattning

I samhället finns en starkt varierad bebyggelse med olika byggnader som i varierande omfattning löper risk att utsättas för extrem dynamisk belastning. Denna last kan orsakas av naturliga fenomen eller häröra från olika typer av olyckor. En extremare variant kan även uppstå i aktioner vilka syftar till avsiktlig skada, såsom väpnat angrepp i samband med grov kriminalitet och/eller terrorism.

En viktig uppgift för Räddningsverket är att förebygga olyckor i den normala vardagen samt begränsa dess effekter när sådana ändå inträffar. I egenskap av expertmyndighet inom detta område åligger det Räddningsverket att inneha, förvalta samt utveckla sådan kunskap. Häri presenterat material är en del i arbetet att uppfylla detta mål.

Denna publikation utgör den första delen i projektet Bebyggelsens motståndsförmåga mot extrem dynamisk belastning, vars huvudsakliga syfte är att öka kunskapen om bebyggelsens förmåga att absorbera och motstå de avsevärda påfrestningar den utsätts för vid en explosionsbelastning. I publikationen presenteras en definition på olika graderade hotbilder samt grundläggande riktvärden för vilka lastnivåer som byggnader och människor kan motstå.. Vidare ges en övergripande bild av de fenomen som uppstår i samband med en explosion och luftstötvågens egenskaper karakteriseras med hänsyn till laddningens storlek, tid och avstånd. En övergripande litteraturstudie påvisar de betydande effekter som kan fås vid explosion i bebyggelsen jämfört med i det öppna.

Betydande vikt läggs även på jämförelse av stötvågsparametrar framtagna med hjälp av det generella finita elementprogrammet Autodyn och det utifrån försök empiriskt sammanställda programmet ConWep. Utifrån detta ges en ökad förståelse om de positiva och negativa tryckfaserna, vilket resulterar i en lastbild som skiljer sig från den som vanligen presenteras i litteraturen.

Beteckningar

Romerska versaler

A	area
E	energi, energiintensitet, elasticitetsmodul
E_0	energiintensitet hos ostörd luft
I	impuls, inkommande stötvåg
K_P	reduktionsfaktor för tryck
K_I	reduktionsfaktor för impuls
M	Machtal
P	tryck
P_0	tryck hos ostörd luft
P_c	karakteristiskt tryck
P_r^+	reflekterat övertryck positiv fas
P_s^+	oreflekterat övertryck positiv fas
P_s^-	oreflekterat undertryck negativ fas
R	reflekterande stötvåg
T_0	temperatur för ostörd luft
U_s	stötvågshastighet, stötvågshastighet hos oreflekterad våg
U_r	stötvågshastighet hos reflekterad våg
U_p	partikelhastighet
V	volym
W	laddningsstorlek
Z	skalat avstånd

Romerska gemener

b	bredd
c_0	ljudhastighet hos ostörd luft
h	höjd
i	impulstäthet
i^+, i_s^+	impulstäthet positiv fas
i^-, i_s^-	impulstäthet negativ fas
i_k	karakteristisk impulstäthet
i_{s1}^-	impulstäthet negativ fas innan sekundär stötvåg mellan tidpunkt t_1 och t_2
i_{s2}^-	impulstäthet negativ fas efter sekundär stötvåg mellan tidpunkt t_3 och t_4
i_{s2}^+	impulstäthet positiv fas efter sekundär stötvåg mellan tidpunkt t_2 och t_3
l	sträcka
r	detonationsavstånd, reflekterande stötvåg
r_A, r_B	modifierat detonationsavstånd med hänsyn till mellanliggande hinder
t	tid, varaktighet
t^+	varaktighet positiv fas
t^-	varaktighet negativ fas
t_1	tid för övergång från positiv till negativ fas
t_1^-	varaktighet negativ fas innan sekundär stötvåg
t_2	tid för sekundär stötvåg
t_2^-	varaktighet negativ fas efter sekundär stötvåg
t_3	tid för övergång från positiv till negativ fas efter sekundär stötvåg
t_4	tid för avslutad negativ fas
t_a	ankomsttid
t_r	stigtid
t_Δ^+	varaktighet triangellast
w	bredd
w_h	vikt hos utsatt person

Grekiska tecken

α	avklingningsfaktor, konstant
β	infallsvinkel, konstant
γ	värmekapacitetskvot (≈ 1,4 för luft), konstant

Λ	reflexionskoefficient
ρ	densitet
ρ_0	densitet hos ostörd luft

Index

+	indikerar positiv fas
-	indikerar negativ fas
0	indikerar ostörd luft
r	indikerar reflekterad stötvåg
s	indikerar oreflekterad stötvåg
1D	plan utbredning i en dimension
2D	cylindrisk utbredning i två dimensioner
3D	sfärisk utbredning i tre dimensioner

Enhetsomvandling

fps	feet per second, 1 fps = 0,3048 m/s
psi	pounds per square foot, 1 psi = 6,895 kPa

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Klockan 11.45 i går förmiddag detonerade ett bombliknande föremål på Storgatan, mitt i hjärtat av Göteborg. Det satt under en bil som, enligt GP erfar, är registrerad på en företagare i krogbranschen. Detta fordon, och ytterligare fyra, demolerades mycket svårt. Dessutom krossades ett par fönsterrutor i intilliggande hus.

Ovanstående utdrag kunde läsas i Göteborgs-Posten (2006), 21 september 2006. I denna incident var skadorna begränsade och resulterade tursamt nog enbart i tre skadade personer, fem förstörda bilar samt några krossade fönsterrutor, se Figur 1.1. Det inträffade belyser dock en sårbarhet i vårt samhälle samt väcker frågan vad effekten hade blivit om sprängladdningen varit betydligt kraftfullare?

Figur 1.1 Foto från Storgatan i Göteborg där en explosion inträffade mitt på dagen 21 september 2006. Från SVT (2006).

Dylika incidenter är ovanliga i Sverige och skiljer sig betydligt mot den hotbild om en tänkbar terroristattack i stadsmiljö som målas upp i bland annat USA, Storbritannien och andra mer utsatta länder. Det inträffade speglar dock väl den förändring av möjliga hotbilder som det svenska samhället ständigt genomgår och ger även en påminnelse om att Sverige inte kan förväntas vara helt besparat från att drabbas av den här typen av extrema händelser.

I samhället finns en starkt varierad bebyggelse med en mängd byggnader och installationer som via den aktivitet som pågår däri, eller i dess omgivning, löper risk att utsättas för dynamiska laster orsakade av olyckor och/eller attentat. Sådana laster kan orsakas av naturliga fenomen såsom kraftiga vindar eller jordbävningar. Andra källor till extrema lastsituationer kan vara olika typer av olyckor. Dessa kan härröra från fasta installationer inom industrin eller som rörliga dito i form av trafikolyckor. En extremare variant kan även, såsom belyses i inledningen, uppstå i aktioner vilka syftar till avsiktlig skada, såsom väpnat angrepp i samband med grov kriminalitet och/eller terrorism, se Figur 1.2.

Figur 1.2 Schematisk illustration av möjliga källor för extrem dynamisk belastning i bebyggelsen.

En viktig uppgift för Räddningsverket är att förebygga olyckor i den normala vardagen samt begränsa dess effekter när sådana trots allt inträffar. Oavsett lastkälla ligger det således i samhällets intresse att besitta kunskap om hur denna typ av händelser ska handskas med när de inträffar. I egenskap av expertmyndighet inom detta område åligger det således Räddningsverket att inneha, förvalta samt utveckla denna kunskap. Detta projekt är en del i arbetet att uppfylla detta mål.

1.2 Syfte

Denna publikation utgör den första delen i projektet Bebyggelsens motståndsförmåga mot extrem dynamisk belastning. Projektets huvudsakliga syfte är att öka kunskapen om bebyggelsens förmåga att absorbera och motstå de avsevärda påfrestningar den utsätts för vid extrema dynamiska belastningar.

Projektets huvudmål kan delas in i två delar:

- Laster i samhället
- Bebyggelsens motståndsförmåga

I den första punkten ingår att identifiera de laster som kan tänkas uppstå i bebyggelsen samt beskriva en metodik för att bestämma aktuella laster från en definierad hotbild. Detta innebär en studie av luftstötvågens utbredning i stadsmiljö där luftstötvågens egenskaper med hänsyn till tid och avstånd samt fenomen såsom reflexion, fördämning, och diffraktion kommer få en avgörande betydelse för vilken last som är att förvänta i ett givet läge på ett givet avstånd från en angiven

explosionskälla. I den andra punkten behandlas bebyggelsens möjlighet att motstå de laster som uppstår vid en explosion i bebyggelsen. I detta ingår även förståelse för vilka parametrar som är av vikt för att förse bebyggelsen med tillräckligt god motståndskraft samt en kunskap om hur den återstående kapaciteten hos en skadad byggnad kan bedömas.

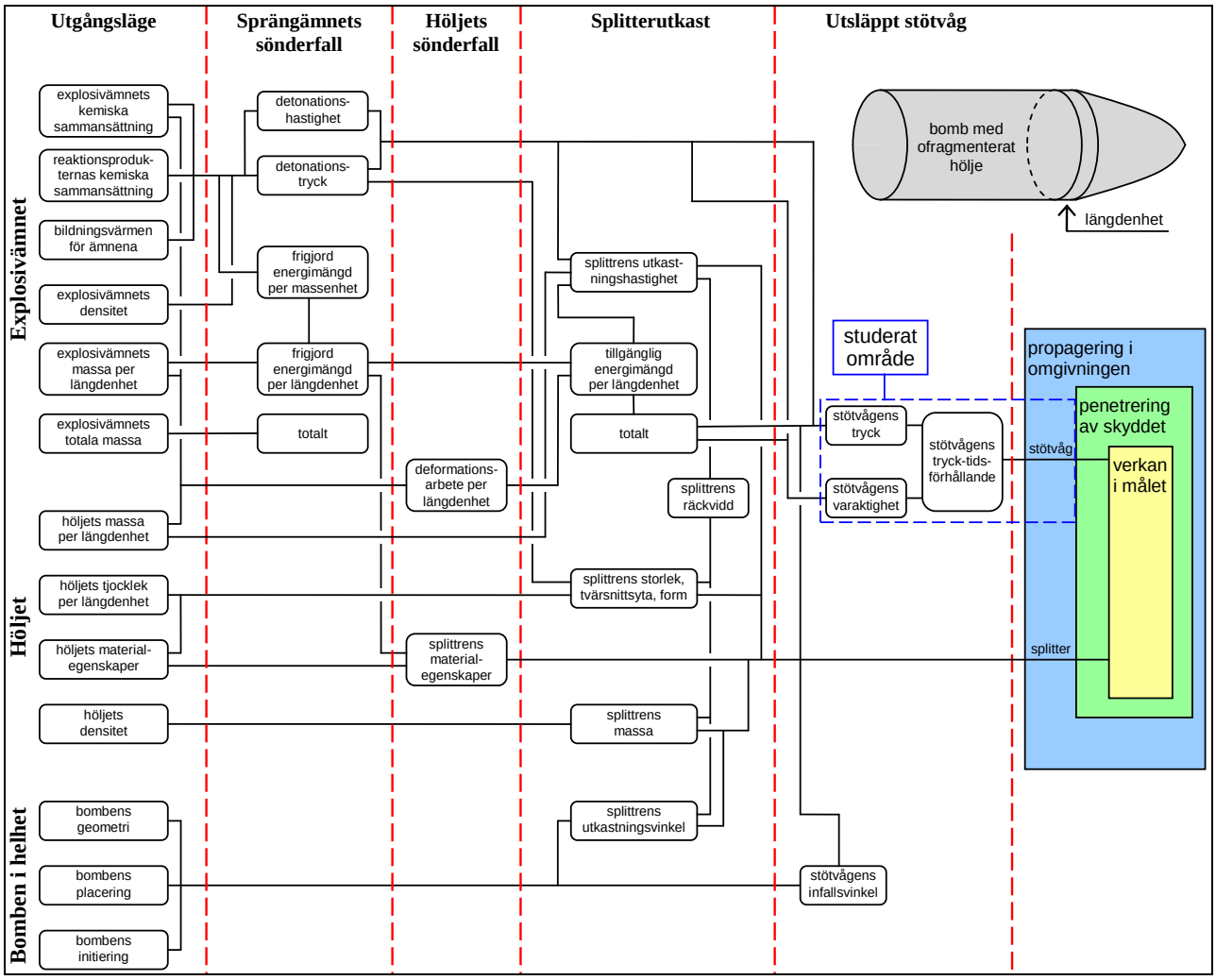
Syftet med denna pubikation är att ge en grundläggande stomme, främst med avseende på laster i samhället, att gå vidare från i det fortsatta arbetet. I detta ingår:

- att ge en övergripande bild av de fenomen som kan förväntas i samband med en explosion,
- karakterisera luftstötvågens egenskaper med hänsyn till tid och avstånd samt ge en grundläggande förståelse för de parametrar, samt dess betydelse, som inverkar på styrkan hos en explosionslast,
- presentera en definition/kategorisering av olika hotbilder för explosionslaster,
- ge grundläggande riktvärden för vilka lastnivåer som utgör ett hot mot byggnader och människor i bebyggelsen,
- presentera en övergripande genomgång av befintliga beräkningsprogram lämpliga för här studerade problem.

Publikationen belyser, utgående från en litteraturstudie, även de övergripande fenomen som uppstår vid explosion i en komplex omgivning såsom stadsmiljön. Vidare belyses likheter och avvikelser mellan avancerade generella beräkningsprogram, finita elementprogram i form av såkallade hydrokoder, och konventionella, empiriskt baserade, beräkningshjälpmedel.

1.3 Explosionsförloppet och dess effekter – orientering

I detta arbete behandlas laster från explosioner. En explosion och de effekter den ger upphov till är ett komplext fenomen som kräver beaktande av många olika delar för att ge en fullständig bild av vad som sker. I Figur 1.3 illustreras schematiskt vad som inträffar vid en explosion – från antändning och detonation av sprängämnet till dess att en utsatt byggnad utsetts för en kombination av stötvåg och splitter som explosionen ger upphov till. Som framgår av figuren finns det ett stort antal olika delar att behärska för att ha fullständig förståelse för hela förloppet. De delar som är av särskilt intresse i denna publikation är också markerade.



Figur 1.3 Schematisk illustration av vad som händer vid detonation av en bomb. Det område som har studerats i denna publikation har markerats i figuren.

1.4 Begränsningar

Som framgår av avsnitt 1.1 finns det flera olika typer av dynamisk belastning som kan verka i bebyggelsen. Detta arbete begränsas dock till att enbart behandla de hot som extrema laster i form av explosionslaster utgör mot bebyggelsen. I detta beaktas enbart inverkan av luftstötvåg eftersom splitter och markstötvåg framförallt hör samman med militära vapen som inte avses tas upp. För information om splitter och markstötvåg hänvisas istället till Leppänen (2012) respektive Laine (2012).

I denna publikation begränsas arbetet till att ge en grundläggande bild av de laster som uppstår vid en explosion. I detta ingår en beskrivning av de effekter som fås vid explosion i stadsmiljö. För att göra detta introduceras begrepp nödvändiga vid behandlandet av last från luftstötvåg. För en mer grundläggande genomgång av detta samt stötvågens bakomliggande fysik hänvisas till Johansson (2012). En övergripande litteraturgenomgång görs av vad som sker vid explosion i stadsmiljö.

Information om bebyggelsens motståndsförmåga begränsas även den till en övergripande introduktion med gränsvärden för schablonbyggnader samt de lastnivåer som bedöms vara skadiga för människan. Denna del är främst medtagen för att ge läsaren en uppfattning om vilka lastnivåer som kan vara skadliga, något som är nödvändigt att ha i åtanke för den fortsatta resultatredovisningen och diskussionen i denna publikation.

2 bebyggelsen

2.1 Begreppet bebyggelse

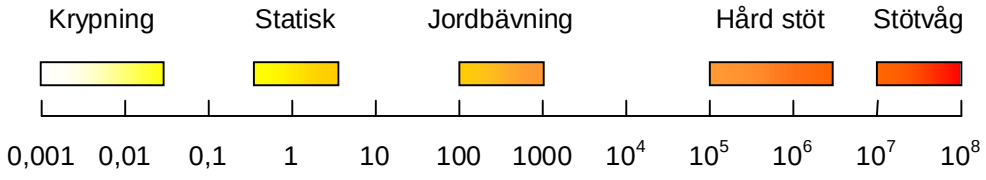
Med bebyggelsen syftas här framförallt på de byggnader som tillsammans utgör densamma men även på de människor som vistas i den. Det skiljs således på termen bebyggelse och byggnad. Förenklat uttryckt kan sägas att bebyggelsen består av byggnader med mellanrum där människor vistas.

2.2 Hotbildsbeskrivning

2.2.1 Laster i samhället

I dagens samhälle finns det ett stort antal tänkbara källor för dynamiska laster i den civila vardagen. Såsom introducerats i avsnitt 1.1 kan dessa grovt delas in i någon av följande tre typer – naturlaster, olyckslaster samt laster vars syfte är att orsaka avsiktlig skada. Med naturlaster syftas här på exempelvis starka vindlaster såsom orsakades av stormen Gudrun i Sverige, januari 2005 eller jordbävningslaster som bland annat landets kärnkraftverk dimensioneras för. Olyckslaster kan delas upp i fasta och rörliga, där de fasta exempelvis kan härröra från explosioner inom petrokemisk industri medan de rörliga kan vara en lastbil som kör in i en bropelare. En mer extrem variant är de lastkällor som kan uppstå vid avsiktlig skada, vilket är aktuellt i samband med kriminalitet och/eller terrorism samt, i sin mest extrema tillämpning, krig.

Graden av dynamisk belastning kan skilja sig påtagligt mellan olika laster. Detta illustreras i Figur 2.1 där olika lasttypers dynamiska innehåll jämförs med en statisk last. Av dessa lasttyper är det de som orsakas av explosion eller stötlast vid påkörning av fordon som skiljer sig mest mot ”normala” statiska belastningsfall. Det som utmärker dessa såkallade impulslaster är en extremt hög belastningsnivå som verkar under en mycket kort tidsperiod. Detta resulterar i en strukturell respons, hos utsatt byggnad, som i regel skiljer sig betänkligt mot vad som fås vid belastning av en motsvarande statisk last. Denna skillnad innebär också att tillvägagångssättet vid dimensionering av en utsatt byggnad blir annorlunda. I detta arbete kommer belastning av explosioner studeras vilket innebär att belastningshastigheter motsvarande de för *Hård stöt* samt *Stötvåg* kommer att behandlas. Dessa laster bedöms då komma från lastkällor vars avsikt är att orsaka skada.



Figur 2.1 Principiell skillnad i belastningshastighet hos byggnad utsatt för olika lasttyper. Angivna värden anger storleksordningen i förhållande till en statisk last. Baserad på Bischoff och Perry (1991).

2.2.2 Laster med avsikt att skada

2.2.2.1 Möjliga källor

I denna kategori ingår de laster som kan uppstå som är kopplade mot tung kriminalitet, terrorism och krig. Den sistnämnda berörs inte vidare här eftersom de hot som därmed blir möjliga kan vara av en sådan extrem beskaffenhet att de till stor del förlorar sitt intresse för vad som händer med den civila bebyggelsen. Vid händelse av krig kommer bebyggelsen vara otillräckligt rustad i vilket fall som helst och brukandet av skyddsrum utgöra det enda realistiska skyddet för människor i stadsmiljö. Kriminalitet och terrorism och de hot dessa utgör i dagens Sverige behandlas dock mycket övergripande i avsnitt 2.2.2.2 och 2.2.2.3.

Syftet med denna genomgång är inte att söka ge någon heltäckande sammanställning av de hot som existerar utan snarare att ge en grov genomgång och belysa enskilda händelser som bedöms vara av särskild vikt eller särskilt aktuella.

2.2.2.2 Kriminalitet

Det fysiska hotet ifråga om yttre last mot bebyggelsen från organiserad kriminalitet har tilltagit under 2000-talet, något som det inledande exemplet i avsnitt 1.1 är ett talande exempel för. Det hot mot bebyggelsen som kriminaliteten utgör kan ha sin grund i interna uppgörelser i den undre världen eller vara en effekt av rån med tunga vapen mot banker och/eller värdetransporter. Exempelvis konstateras det i Dagens Nyheter (2006) att det bara i Göteborg var fjärde gången på fyra år som en bilexplosion, kopplad till kriminella nätverk, inträffade. Till detta kan läggas det ökande antalet rån- och rånförsök av värdetransporter som eskalerat under framförallt 2006. Även om dessa i sig i regel inte resulterat i någon form av explosion i stadsmiljö är de ändå en god indikation på den ökande frekvens på den typ av kriminalitet där tunga vapen med explosiva laddningar ingår.

Det hot som kriminaliteten utgör synes dock vara annorlunda än vad ett eventuellt terristhot skulle kunna utgöra eftersom det primära syftet med det förra inte är att skada den allmänna omgivningen utan snarare ett specifikt mål. Den skada som omgivningen därmed utsätts för kan därför snarare ses som en olycklig bieffekt.

2.2.2.3 Terrorism

I och med terroristattentaten som utfördes mot World Trade Center i New York och Pentagon i Washington 11 september 2001 har hotbilden mot Väst, dvs. Västeuropa, USA och Kanada, lyfts fram och påpekats från flera håll. De därpå efterföljande händelserna med den USA-ledda invasionen av Afghanistan 2001 och av Irak 2003 har ytterligare gett upphov till ökat hot mot inblandade länder. Detta har bland annat tagit form i bombsprängningar i Madrid 11 mars 2004 samt i Londons tunnelbana 7 juli 2005, båda med hänvisning till respektive nations deltagande i Irakkriget. Hot har även förekommit om att andra länder med koppling till kriget i Irak, exempelvis Danmark, kan komma att utsättas för liknande terroristdåd. För Danmarks del ökade denna hotbild ytterligare i samband med den ilska som väcktes i delar av den muslimska världen efter det att

Jyllands-Posten, september 2005, publicerat teckningar föreställande profeten Muhammed. Som en följd av detta höjdes även förvirrade röster från bland annat al-Aqsamartyrernas brigad om att även Sverige skulle straffas, SVT (2006b). Även om detta till dags datum inte resulterat i några konkreta attentat i Sverige belyser det ändå en del av den hotbild som det Svenska samhället riskerar att utsättas för.

Något riktat hot mot Sverige föreligger dock inte i dagsläget, även om det finns en förhöjd risk för attentat riktade mot andra länders intressen i Sverige, KBM (2006). Hotbilden mot Sverige är således låg varför det i dagsläget inte finns någon egentlig anledning att tro att det här kommer utföras terroristattentat liknande de som inträffat i exempelvis USA, Spanien eller Storbritannien. Enligt Säkerhetspolisen (2007) baseras den svenska hotbilden av det lokala och det globala skeendet vilket innebär att bilden av Sverige snabbt kan ändras utgående från dess politiska ställningstagande till internationella konflikter. Sveriges militära engagemang i norra Afghanistan samt omläggningen av det Svenska försvaret från försvar till insatsstyrka, med en ökning av liknande internationella insatser via den såkallade Nordic Battle Group, se Försvarsmakten (2007), kan således leda till att hotbilden ökar.

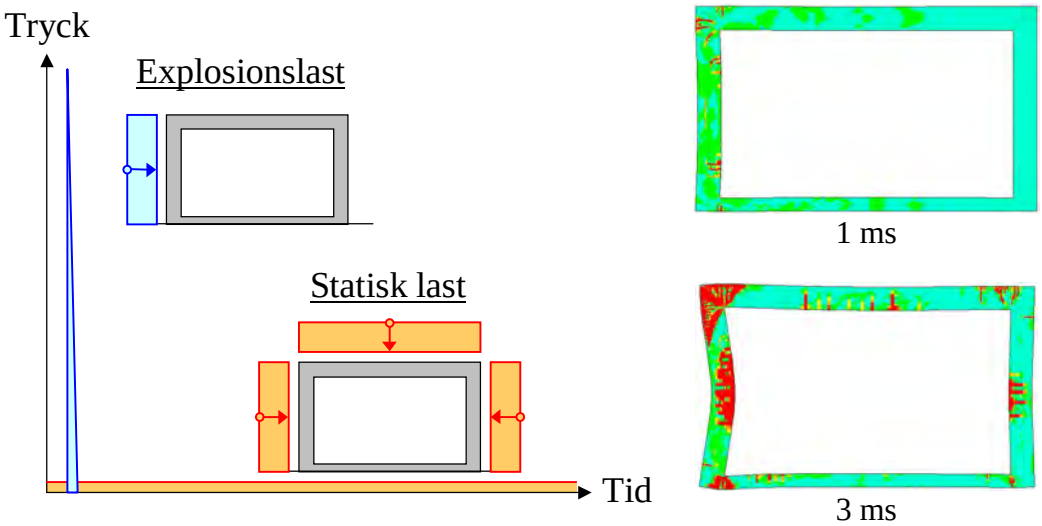
Terrorism är annars inte på något sätt ett nytt fenomen som enbart är kopplat till ovan nämnda händelser. I och med attentaten i framförallt New York har medvetenheten för dylika hot dock ökat påtagligt vilket medfört att hotet tas på större allvar. Detta har bland annat resulterat i att Sveriges kärnkraftverk beslutat uppgradera sitt fysiska skydd för att motverka eventuella sabotage mot känsliga anläggningar, SKI (2001), samt att Samverkansrådet mot terrorism skapades i februari 2005, Säkerhetspolisen (2005).

2.3 Bebyggelsens motståndsförmåga

Vid dimensionering av olika byggnadstyper såsom broar, tunnlar, bostadshus och industribyggnader beaktas i olika grad inverkan av dynamiska lasttyper motsvarande dem som introduceras i avsnitt 1.1. Normalt beaktas dock inte själva dynamiken vid dimensionering mot dessa laster. Istället används förenklade statiska belastningsfall, vilka grundar sig på beräkningsmodeller som på olika sätt beaktar det dynamiska skeendet. För det stora flertalet tillämpningar fungerar detta också bra. I de situationer där, de i förenklingarna antagna, förutsättningar ej uppfylls, eller om det finns en önskan att betrakta belastningssituationen på ett mer nyanserat sätt, kan dock problem uppstå. Detta gäller särskilt vid en sådan komplex lastsituation som en explosion utgör.

För att översiktligt påvisa skillnaderna mellan de olika belastningsfallen illustreras i Figur 2.2 en schematisk jämförelse mellan den kortvariga dynamiska last som fås på ett skyddsrum och den ekvivalenta statiska last som används vid dimensionering av densamma. Den statiska lasten antas angripa från alla håll samtidigt med ett konstant tryck. Som jämförelse visas lastsituationen för ett skyddsrum utsatt för en impulslast med trycket från en explosion av 125 kg TNT på ett avstånd av 5 m. Den maximala lasten är mycket hög, cirka 100 gånger större än trycket för den ekvivalenta statiska lasten. Explosionslastens varaktighet är dock mycket kort och varar i det här fallet endast omkring 3 ms. Resultatet av denna korta men intensiva belastning är ett strukturellt beteende som märkbart skiljer sig från vad vi är vana vid av en statisk last.

Till höger i Figur 2.2 visas uppkomna sprickor (markerade med rött) i skyddsrummet efter 1 respektive 3 ms. Det kan noteras att det efter 1 ms uppstått ett mindre antal sprickor i den främre väggen men att det i skyddsrummets bakre vägg inte uppstått några skador alls. Detta beror på att information om lasten på skyddsrummets främre vägg efter 1 ms ännu inte hunnit nå den bakre väggen. Detta innebär att det är möjligt för vissa konstruktionsdelar i en explosionsbelastad byggnad att nå brott innan andra delar ens fått några påkänningar av samma last. Efter 3 ms har trycket från explosionslasten sjunkit till nära noll och en sprickbild motsvarande den för en statisk belastning kan skönjas i den främre väggen. Störst påkänning erhålls här efter cirka 5 ms, dvs. omkring 2 ms efter det att explosionslasten helt försvunnit. Dvs. för en dynamiskt belastad konstruktion finns det inte nödvändigtvis ett direkt samband mellan maximal lastnivå och maximal påkänning i den utsatta strukturen, något som också skiljer sig från en statiskt belastad konstruktion.



Figur 2.2 Principiell skillnad i nivå och varaktighet hos belastning på skyddsrum när denna betraktas som en explosionslast respektive ekvivalent statisk last. Bilderna till höger illustrerar sprickbildning (rött) hos skyddsrum 1 respektive 3 ms efter lastens anslag.

I dagens regelverk saknas det genomgående klara anvisningar på hur ovanstående dynamiska laster skall beaktas mer detaljerat. Vidare är dokumentationen av de förutsättningar och antaganden, som använts vid framtagning av idag accepterade statiska dimensioneringsmetoder i regel bristfällig och oklar. Detta innebär att det kan vara svårt att göra en pålitlig bedömning av vilka konsekvenser en förändring av bebyggelsen får. I en sådan situation är det därför viktigt att kunna tränga djupare in i den aktuella problemställningen. En förutsättning för detta är dock en djupare kunskap om den drabbade konstruktionens strukturella respons när den utsätts för den här typen av dynamiska extremlaster.

Den befintliga bebyggelsen är en tillgång som genomgår en ständig förändring i form av nybyggnation och/eller kompletterande funktionsändringar. Inom byggandet pågår en ständig utveckling av material, byggteknik och konstruktionslösningar. Detta innebär att det finns skillnader i metodik och byggnadsmaterial idag jämfört med för exempelvis 20 år sedan. Det är därvid också möjligt att förutsättningarna för bebyggelsen kan förändras i sådan grad att de dimensioneringsmetoder som idag används för att beakta dynamiska påfrestningar blir otillräckliga. Detta belyser faran med att vara nöjd med de förenklade dimensioneringsverktyg som till stor del används idag eftersom den bakomliggande fysiken lätt kommer i skymundan eller, i värsta fall, faller i glömska. Vidare finns

det också en risk i att okritiskt nyttja befintliga tumregler och förenklingar vid dimensionering med tanke på den förändring som ingående material och konstruktionslösningar genomgått sedan dessa ursprungligen togs fram. Ändrade förutsättningar kan således medföra att dagens beräknings-anvisningar inte längre är representativa för det som önskas kontrolleras, något som gör att det finns en ökad risk att ödesdigra misstag begås.

I denna publikation gås inte närmare in på de skillnader som råder vid statisk respektive dynamisk respons hos en belastad byggnad. Detta behandlas istället närmare i Johansson och Laine (2012b) och varför det här enbart konstateras att skillnaden kan vara stor, något som är särskilt sant vid en snabb pålastning såsom normalt är fallet vid en explosionslast.

3 Explosioner

3.1 Kommentar om använda referenser

Ett flertal olika källor har använts vid framtagandet av denna publikation. Dock kan det poängteras att ett antal verk haft en större betydelse än andra. En stor del av det material som presenteras i detta avsnitt har hämtats från Johansson (2012) samt Ekengren *et al.* (2005). Dessa delar är i sin tur till stor del ursprungligen baserade på material från Baker (1973) samt Kinney och Graham (1985). Avslutningsvis bör även ConWep (1992) nämnas, eftersom detta fungerat som ett referensverk som representerar den stora mängd försöksdata som tagits fram för olika typer av explosionsbelastning. För ytterligare information om i detta kapitel redovisat material hänvisas till Johansson (2012) om inget annat anges.

3.2 Explosion och stötvåg

3.2.1 Definition av explosion

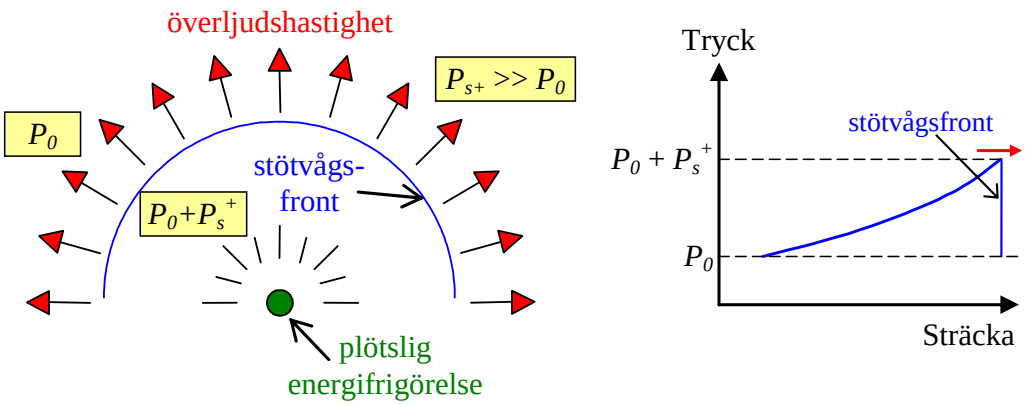
En explosion karakteriseras av en plötslig expansion av materia till en mycket större volym än den ursprungliga. En explosion innebär en fysikalisk eller kemisk tillståndsförändring hos ett material, vilket ger upphov till en plötslig omvandling av potentiell energi till mekaniskt arbete. Detta kan exempelvis utgöras av de gaser som bildas då ett sprängämne detonerar, en så kallad kemisk explosion eller av en starkt komprimerad gas i ett tryckkärl som brister, såkallad fysisk explosion. På grund av den betydande tryckskillnaden önskar gasen sprida sig över en större volym, vilket ger upphov till ett mekaniskt arbete då den omkringliggande luften tvingas undan.

Det skiljs på två typer av kemiska explosioner – deflagration och detonation. Deflagration innebär att omgivande medium antänds av den temperaturökning som erhålls då närliggande material förbränns. En sådan spridning genom det exploderande materialet sker i underljudshastighet och resulterar i en lågexplosiv explosion. Den andra antändningsmöjligheten, detonation, karakteriseras av att spridningen sker i överljudshastighet, vilket resulterar i ett mycket snabbt förlopp och en högexplosiv explosion. I allmänhet kan tidsskalan för en detonation räknas i mikrosekunder medan den i en deflagration kan variera mellan millisekunder upp till sekunder. Antändningen av ett fritt gasmoln är ett exempel på deflagration medan antändning av ett militärt sprängmedel såsom TNT är ett exempel på en detonation. Om inget annat anges syftar benämningen explosion i detta kapitel på en detonerande explosion.

Magnituden hos en explosion anges i den energimängd som släpps fri men beror även på sådana faktorer som antändningshastighet och densitet hos sprängämnet, jämför Figur 1.3. Frigjord energimängd mäts i enheten Joule men av praktiska skäl kan det vara mer informativt att uttrycka explosionens styrka på ett en mer tillämpbart sätt. En allmänt accepterad måttreferens på explosioner av sprängämnen är den effekt som erhålls vid en detonation av 1 kg TNT, vilket motsvarar en energimängd på cirka 4,6 MJ.

3.2.2 Bildandet av en luftstötvåg

En explosion i luft ger upphov till en kompakt gas med stort energiinnehåll som under högt tryck tvingar tillbaka den omgivande atmosfären. Denna plötsliga expansion ger upphov till en stötvåg som i överljudshastighet rör sig ut från explosionens centrum, se Figur 3.1. Omedelbart bakom stötvågsfronten finns en region där tryck, temperatur, densitet samt luftpartiklarnas hastighet kan vara markant högre än i den ostörda luften framför stötvågsfronten. Allteftersom stötvågen avlägsnar sig från explosionens källa, avtar dock energiintensiteten i den påverkade volymen, vilket leder till att ovanstående parametrar snabbt återgår till sitt ursprungliga läge. Undantaget är temperaturen som erhåller en viss höjning på grund av den ökande entropin där stötvågen dragit fram.

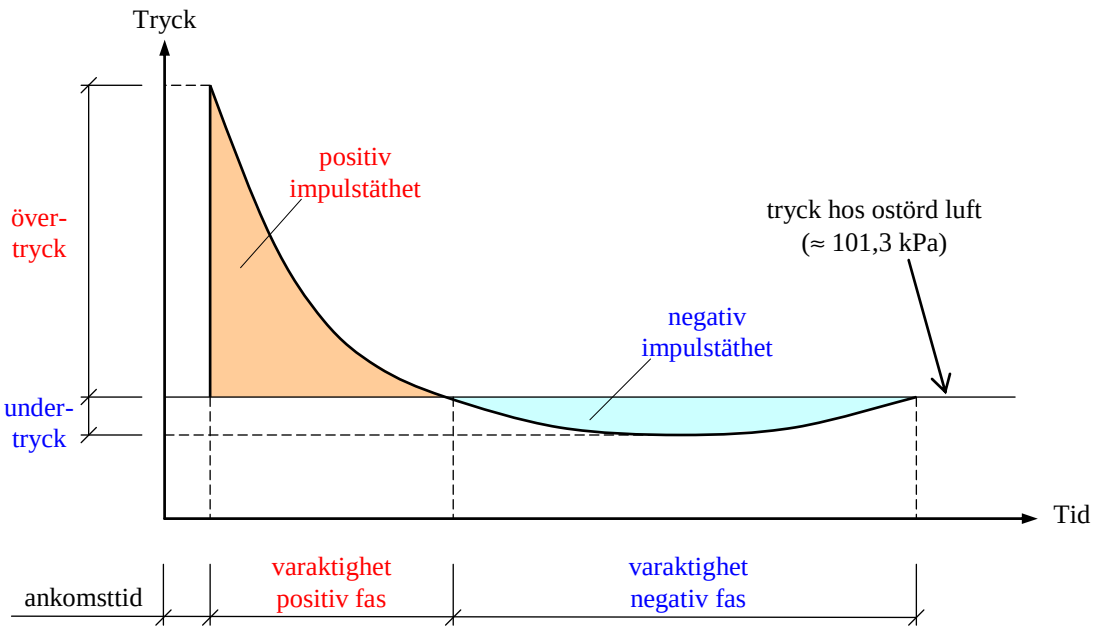


Figur 3.1 Principiell bild av en explosion och den efterföljande stötvågsutbredningen som sker i överljudshastighet.

3.2.3 Hur uppfattas en luftstötvåg?

En stötvågs påverkan på omgivningen beror framförallt på det utlösande energiinnehållet samt av avståndet från explosionens källa. Vid dimensionering av en konstruktion önskas dock detaljerad information om den last som kommer att verka på den, varför storheter såsom övertyck, undertryck, varaktighet samt impulstäthet används. Figur 3.2 visar en principiell tryck-tidkurva hos en ideal stötvåg där dessa storheter presenteras. En mer genomgående beskrivning av dessa ges i avsnitt 3.4.1, men allmänt kan konstateras att en ökande energimängd i explosionen leder till högre tryck och större impulstäthet. Dessa båda parametrar minskar dock med ökande avstånd från explosionskällan medan belastningens varaktighet ökar med ökande avstånd.

En kortfattad förklaring av olika stötvågsstorheter ges i avsnitt 3.2.4.Sambandet mellan sprängstyrka och avstånd samt nämnda stötvågsstorheter är besvärligt att beskriva analytiskt. Därför används normalt empiriska samband och/eller numeriska metoder för att bestämma aktuella stötvågsstorheter. I avsnitt 3.4.1 och avsnitt 3.4.4 ges grundläggande ekvationer för formen hos den ideala stötvågen samt empiriska samband för att bestämma stötvågsparametrar såsom tryck, impulstäthet och varaktighet.



Figur 3.2 Principiell bild av ett typiskt tryck-tidssamband för en luftstötvåg vid fri avlastning.

3.2.4 Stötvågsstorheter

Vid diskussion om egenskaper hos en explosion och dess resulterande stötvåg används olika stötvågsparametrar och i detta avsnitt görs en mycket kort introduktion/definition av dessa. Utgående från lagarna om konservering av massa, rörelsemängd samt energi är det möjligt att tillsammans med luftens tillståndsekvation teckna analytiska samband mellan flera av dessa storheter. Dessa samband beskrivs utförligt i Johansson (2012) och berörs inte närmare här. Nedan anges värden för ett antal stötvågsstorheter i ostörd luft, vilket här syftar på en lufttemperatur T = 15ºC.

- **Tryck, P [Pa]:** Anger det totala lufttrycket, inbegripande normalt lufttryck P_0. För ostörd luft uppgår det normala lufttrycket till omkring P_0 = 101,3 kPa.
- **Stötvågshastighet, U_s [m/s]:** Den hastighet med vilken stötvågsfronten rör sig. Stötvågen rör sig per definition i överljudsfart. För ostörd luft uppgår ljudhastigheten till c_0 = 340,2 m/s.
- **Partikelhastighet, U_p [m/s]:** Den hastighet med vilken luftpartiklarna slungas framåt i en explosion. Partikelhastigheten är alltid lägre än stötvågshastigheten.
- **Densitet, ρ [kg/m^3]:** Beskriver hur tätt sammanpackade luftpartiklarna är. Densiteten för ostörd luft vid uppgår till omkring ρ_0 = 1,226 kg/m^3.
- **Energiintensitet, E [J/kg]:** Ofta betraktas luften som en ideal gas med en gaskonstant R = 287 J/kg·K och värmekapacitetskvot γ = 1,4, vilket är väl fungerande approximation när trycket inte överstiger omkring 1 000 kPa. Tillsammans ger detta att luftens energiintensitet för ostörd luft uppgår till cirka E_0 = 206,6 kJ/kg.

Förutom dessa stötvågsstorheter används det i samband med explosionsbelastningar även andra storheter för att enklare beskriva den genererade lastens egenskaper, se även avsnitt 3.4.1.

- **Positiv fas:** Definierar den del av stötvågen som uppvisar ett tryck som är större än det normala lufttrycket, dvs. $P > P_0$. Den positiva fasen utgör normalt den dimensionerande lastdelen i en stötvåg och är det som normalt beaktas vid kontroll av effekt av explosion. Indexet + används för att beteckna en stötvågsstorhet som hörande till den positiva fasen.
- **Negativ fas:** Definierar den del av stötvågen som uppvisar ett tryck som är lägre än det normala lufttrycket, dvs. $P < P_0$. Det är inte ovanligt att inverkan av den negativa fasen försummas vid kontroll av effekt av explosion. Indexet - används för att beteckna en stötvågsstorhet som hörande till den negativa fasen
- **Ankomsttid, t_a [s]:** Ankomsttiden t_a är den tid det tar för stötvågen att nå fram från en explosionskälla till studerad punkt.
- **Stigtid, t_r [s]:** Stigtiden benämns den tid det tar för övertrycket att öka från noll till sin fulla amplitud. För en luftstötvåg sker detta så snabbt att den uppfattas som fullständigt momentan, dvs. stigtiden kan sägas ha utbredningen noll sekunder.
- **Övertryck, P^+ [Pa]:** Övertrycket anger storleken på det tryck som överstiger det normala lufttrycket P_0, dvs. $P^+ = P - P_0$, där $P > P_0$. I en stötvåg är övertrycket som störst i stötvågsfronten för att sedan snabbt sjunka ner till normalt tryck för ostörd luft. I en explosion finns ingen faktisk begränsning på hur stort övertryck som kan uppstå.
- **Undertryck, P^- [Pa]:** Undertryck anger storleken på det tryck som understiger det normala lufttrycket P_0, dvs. $P^- = P_0 - P$, där $P < P_0$. Detta är ett fenomen som uppstår efter det att stötvågen från en explosion har passerat studerad punkt. Den kraftfulla energifrigörelsen gör att luftpartiklarna i det passerade området slungats iväg så att trycket därmed understiger det normala lufttrycket. Ett undertryck kan sägas motsvara ett partiellt vakuum och dess storlek är därmed begränsat i sin storlek till frånvaron av det normala lufttrycket. För ostörd luft uppgår det normala lufttrycket till omkring P_0 = 101,3 kPa vilket innebär att maximalt undertryck i ett sådant fall begränsas till 101,3 kPa.
- **Varaktighet, t [s]:** För en explosion skiljs det på positiv och negativ varaktighet. Positiv varaktighet syftar på den tid som övertrycket är över noll och den negativa varaktigheten på den tid som ett undertryck råder. Allmänt gäller att varaktigheten i den negativa fasen är betydligt längre än i den positiva.
- **Impulstäthet, i [Pa s]:** Tidsintegralen av en explosionslasts tryck-tidssamband ger upphov till en impulstäthet. Vid kortvariga belastningsförlopp är det denna, snarare än trycket, som beskriver den verkande lastens egenskaper. Allmänt gäller att impulstätheten i den negativa fasen är något större än i den positiva.
- **Impuls, I [Ns]:** När impulstätheten verkar på en yta ger detta upphov till en impulslast. I dagligt tal används ibland, lite slarvigt, benämningen impuls när det egentligen är impulstäthet som det syftas på.
- **Reflekterat/oreflekterat:** Det skiljs på egenskaperna hos en oreflekterad och reflekterad stötvåg vilket behandlas mer ingående i avsnitt 3.4.3.2. Indexen s och r används för att beteckna stötvågsstorhet tillhörande oreflekterad respektive reflekterad stötvåg, dvs. P_s^+ anger oreflekterat övertryck medan P_r^+ anger reflekterat övertryck.
- **Machtal, M [-]:** Machtalet är ett dimensionslöst tal vilket definieras som kvoten mellan strömningshastigheten u i ett medium och ljudhastigheten c i samma medium, dvs. $M = u / c$. För ostörd luft uppgår ljudhastigheten till omkring 340 m/s.

3.3 Definition av explosionskällor

3.3.1 Mängd sprängämne

För att ha en möjlighet att på ett strukturerat sätt kunna bedöma olika hotbilder avseende explosioner är det nödvändigt att identifiera olika typer av möjliga hot. I denna publikation används därför en i litteraturen vanlig definition som bygger på en gradering av BATF (1999) och NCTC (2005) där olika typer av ”behållare” använts för att definiera upp mängden sprängämne, se Tabell 3.1. Angivna mängder är baserade på vad som bedömts rymmas i en behållare eller bagage-utrymmet på ett fordon och anges ursprungligen i enheten Pound men är här omräknat till kg. Av tabellen framgår även erforderligt säkerhetsavstånd för respektive typ av fordon. Vad dessa är baserade på framgår inte klart av BATF (1999) eller NCTC (2006) men enligt Elfving (2005) synes gränserna vara satta efter gräns för trumhinneskada, belastning som orsakar smärre skador på vanliga småhus samt gräns för fönsterskador. Elfvings slutsats om att BATF:s kategori ”Lethal air blast range” motsvarar gräns för skador i trumhinnan baseras på FortH 2 (1991) där det anges att en oskyddad människa troligen kan anses vara stridsduglig även efter att denne utsatts för ett övertryck på 45 kPa.

Tabell 3.1 Definition av sprängämnesmängder för olika typer av behållare där mängden anges i ekvivalent mängd TNT. Explosionskälla, vikter samt avstånd baserat på BATF (1999) och NCTC (2006). Tryck och impulser baserat på Elfving (2005).

Explosionskälla		Mängd TNT [kg]	Gräns för skador i trumhinnan [1)]	Smärre skador på vanliga bostadshus [2)]	Gräns för fönster-skador [3)]
Rörbomb		2,3 kg	-	21 m (8 kPa, 26 Pas)	259 m (0,3 kPa, 2 Pas)
Väskbomb		23 kg	-	46 m (8 kPa, 56 Pas)	564 m (0,2 kPa, 4 Pas)
Liten personbil		227 kg	30 m (44 kPa, 370 Pas)	98 (8 kPa, 120 Pas)	457 m (1 kPa, 25 Pas)
Stor personbil		455 kg	38 m (44 kPa, 460 Pas)	122 (8 kPa, 150 Pas)	534 m (1 kPa, 34 Pas)
Skåpbil/ minibuss		1 818 kg	61 m (43 kPa, 720 Pas)	195 (8 kPa, 240 Pas)	838 m (1 kPa, 54 Pas)
Liten lastbil		4 545 kg	91 m (37 kPa, 900 Pas)	263 (8 kPa, 330 Pas)	1143 m (1 kPa, 73 Pas)
Lastbil utan släp		13 636 kg	137 m (34 kPa, 1250 Pas)	375 (8 kPa, 480 Pas)	1982 m (1 kPa, 87 Pas)
Lastbil med släp		27 273 kg	183 m (31 kPa, 1490 Pas)	475 (8 kPa, 600 Pas)	2134 m (1 kPa, 130 Pas)

1 Lethal air blast range, BATF (1999), se avsnitt 7.4 för kommentar.
2 Building evacuation distance, NCTC (2006).
3 Outdoor evacuation distance, NCTC (2006).

3.3.2 Typ av sprängämne

Olika sprängämnen uppvisar olika egenskaper och är därmed också olika effektiva i sin förmåga att generera ett tryck och en impulstäthet mot omgivningen. Det har dock konstaterats att de generella egenskaperna hos den stötvåg som skapas vid en explosion är likvärdiga, oberoende av vilken typ av sprängämne som används. Härvid är det möjligt att förenkla nyttjandet av olika sprängämnestyper genom att relatera dess stötvågsparametrar till ekvivalenta vikter.

Den ekvivalenta vikten för ett givet sprängämne är den vikt av ett standardiserat sprängämne (normalt TNT) som krävs för att åstadkomma en stötvågsparameter av samma magnitud som det orsakat av en enhetsvikt av det aktuella sprängämnet. Beroende på vilken stötvågsparameter som jämförs kan ett sprängämne dock ha olika ekvivalenta vikter. Dvs., för att åstadkomma samma övertryck P_s^+ som 1 kg TNT kan den ekvivalenta vikten skilja sig för att orsaka samma impulstäthet i_s^+. Ekvivalenta vikter anges för övertryck samt impulstäthet. Dessa värden kan även användas som approximation för att bestämma ankomsttid och varaktighet – den ekvivalenta vikten härrörande från övertrycket kan användas för att bestämma ankomsttid och motsvarande ekvivalenta vikt tillhörande impulsen nyttjas för att bestämma stötvågens varaktighet.

I Tabell 3.2 redovisas ekvivalenta vikter för olika typer av sprängämnen då hänsyn tagits till maximalt övertryck samt impulstätheten i den positiva fasen. Av denna framgår att den ekvivalenta vikten för Pentolite är 1,42 och 1,00 för övertryck respektive impuls. Detta innebär att 1 kg Pentolite ger upphov till samma övertryck som 1,42 kg TNT men att det enbart behövs 1 kg TNT för att generera samma impuls.

Tabell 3.2 Ekvivalent vikt för olika typer av sprängämnen där TNT används som referens. Notera att olika ekvivalenta vikter erhålls för övertryck och impuls. Från ConWep (1992).

Sprängämne	Ekvivalent vikt	
	Övertryck	Impulstäthet
ANFO [1)]	0,82	0,82
Composite A-3	1,09	1,07
Composite B	1,11	0,98
Composite C-4	1,37	1,19
H-6	1,38	1.15
HBX-1	1,17	1,16
Pentolite	1,42	1,00
RDX	1,14	1,09
TNT	*1,00*	*1,00*
Tritonal	1,07	0,96

[1)] En blandning av diesel och konstgödsel.

3.4 Luftstötvåg – övergripande beskrivning

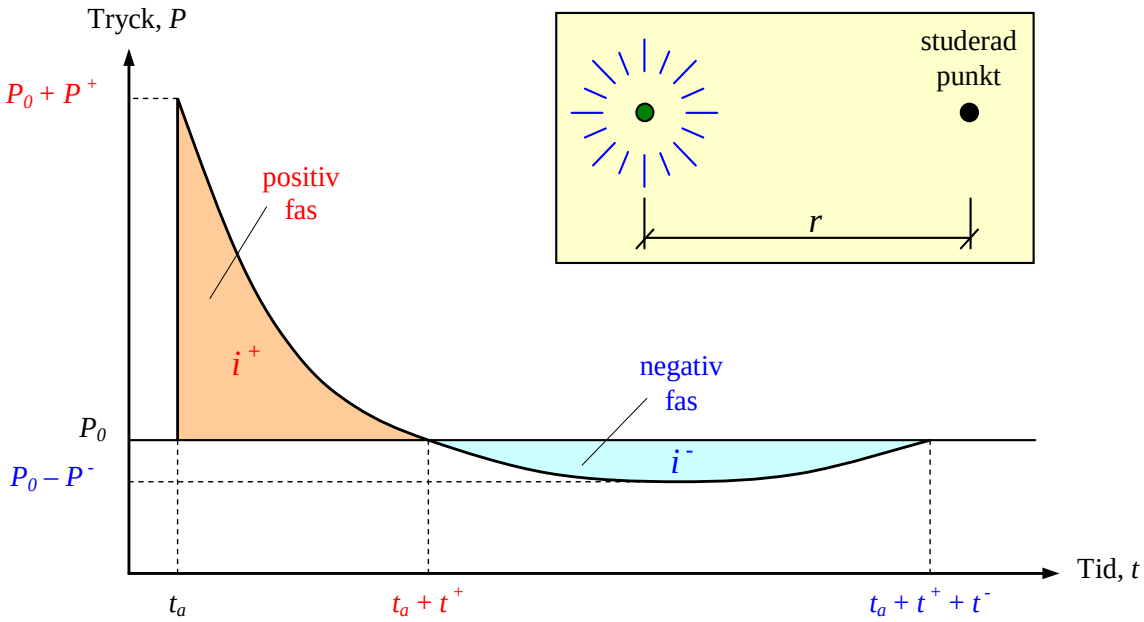
3.4.1 Ideal luftstötvåg vid fri avlastning

I avsnitt 3:21 behandlas de grundläggande storheter som används för att beskriva en stötvågs bakomliggande fysik. Vid en bedömning av huruvida en given byggnad kommer att kunna motstå effekten av en explosion är det dock inte längre praktiskt tillämpbart att diskutera i termer av stötvågshastighet och luftdensitet.

Vid karaktärisering av lasten från en explosionslast används istället begrepp såsom tryck, impulstäthet samt varaktighet. Storleken på dessa parametrar beror på flera saker av vilka de viktigaste kan sägas vara:

- explosionens energiinnehåll samt detonationshastighet
- avstånd och läge till studerad punkt
- inverkan av reflexion, fördämning och diffraktion.

Ju större energiinnehåll i explosionen, desto högre värden fås på stötvågens tryck och impulstäthet. Detta representeras av att olika sprängämnen har olika effektivitet, se avsnitt 3.3.2. Avståndet mellan explosionscentrum och betraktat mål är en annan mycket viktig faktor. Tryckamplituden och impulstätheten minskar med ökande avstånd medan varaktigheten ökar med ökande avstånd – detta är särskilt framträdande på mycket korta avstånd. Förutom avståndet så blir även laddningens relativa läge i förhållande till målet samt målets geometriska utformning av stor vikt eftersom detta avgör vilken inverkan som reflexion, fördämning samt diffraktion har på den stötvåg som slutligen drabbar målet. För en explosion där den fria utbredningen hindras, exempelvis av byggnader, kan lastens egenskaper påverkas mycket. Denna sista aspekt berörs mer ingående i kapitel 4.



Figur 3.3 Typiskt tryck-tidssamband för ideal luftstötvåg.

Figur 3.3 visar en typisk tryck-tidsrelation för en ideal stötvåg i en fix punkt. Med ideal våg syftas här på en stötvåg som uppkommer vid fri avlastning i luften utan några störande reflexioner. Explosionen detonerar vid tiden $t = 0$ och efter tiden t_a har stötvågen nått fram till den studerade punkten. Trycket vid vågfronten ökar då från det omgivande trycket P_0 (i ostörd luft är $P_0 \approx 101{,}3$ kPa) till $P_0 + P^+$ under mycket kort tid. Trycket avtar därefter till dess att det vid tiden $t_a + t^+$ åter når bakgrundstrycket P_0 och därigenom avslutar tryckvågens positiva fas. En negativ fas med amplitud $P_0 - P^-$ tar därefter vid när flöden av luft strömmar mot explosionens centrum och därigenom skapar ett partiellt vakuum. Så småningom återgår trycket till P_0 vid tiden $t_a + t^+ + t^-$. Den impuls som överförs i de båda faserna beskrivs av impulstätheterna i^+ och i^-, vilka också är viktiga parametrar i beskrivningen av styrkan hos en luftstötvåg. Dessa kan definieras som

$$i^+ = \int_{t_a}^{t_a+t^+} \left(P(t) - P_0\right) dt \tag{3.1}$$

$$i^- = \int_{t_a+t^+}^{t_a+t^++t^-} \left(P_0 - P(t)\right) dt \tag{3.2}$$

där $P(t)$ beskriver tryckets variation med tiden t. Den positiva impulstätheten i^+ är tillsammans med övertycket P^+ samt varaktigheten t^+ viktiga parametrar vid beskrivandet av en stötvågs styrka och utseende. Ett vanligt nyttjat uttryck för tryck-tidssambandet, och som bland annat används i programmet ConWep (1992), är

$$P(t) = P_0 + P^+\left(1 - \frac{t}{t^+}\right)e^{-\alpha t/T^+} \tag{3.3}$$

Här markerar t tiden efter stötvågens ankomst (dvs. mätt utgående från ankomsttiden t_a) och α en faktor med vilken övertryckets avklingning kan styras. Kombinering av ekvation (3.1) och (3.3) ger

$$i^+ = P^+ t^+ \left[\frac{1}{\alpha} - \frac{1}{\alpha^2}\left(1 - e^{-\alpha}\right)\right] \tag{3.4}$$

från vilken faktorn α kan lösas ut då P^+, i^+ samt t^+ är kända.

En alternativ lastbeskrivning som är en vanligt förekommande förenkling är att beskriva lasten med en triangulär lasthistoria, dvs. linjärt avtagande tryck, utgående från aktuellt övertryck och impulstäthet. Dvs. en fiktiv varaktighet t_Δ^+ beräknas som

$$t_\Delta^+ = \frac{2i^+}{P^+} \tag{3.5}$$

Framtagningen av ett motsvarande uttryck för den negativa fasen har i litteraturen till stor del bortsetts från. En anledning till detta är att den negativa fasen allmänt har betraktats som relativt oviktig i jämförelse med sin positiva motsvarighet och/eller att stora svårigheter har påträffats vid mätning eller beräkning av den. Brode (1955) presenterar dock ett uttryck där den negativa fasen kan beskrivas som

$$P(t) = P_0 - P^- \frac{t}{t^-}\left(1 - \frac{t}{t^-}\right)e^{-4t/t^-} \tag{3.6}$$

Uttryck för den negativa fasen behandlas också mer ingående i Johansson och Laine (2012a).

Ovan presenterade samband gäller för både oreflekterad och reflekterad stötvåg där värden på tryck P^+, impulstäthet i^+ samt varaktighet t^+ fås ur empiriska samband, se avsnitt 3.4.4.

3.4.2 Fördämningseffekter vid explosion i slutna utrymmen

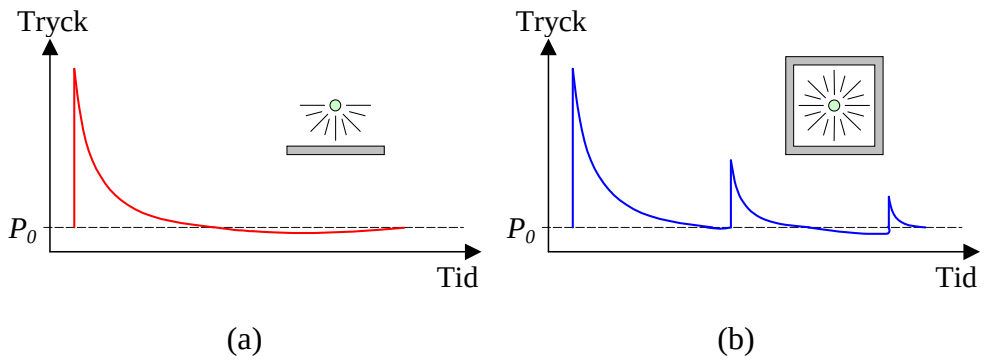
Explosioner i slutna utrymmen kan påtagligt skilja sig mot explosioner i det fria. Den begränsade volymen på vilken explosionsgaserna kan breda ut sig gör att en belastning värre än det idealiserade fallet erhålls och det pratas i sådana sammanhang om såkallade fördämningseffekter. Förutom ökat övertryck, orsakat av de många reflexioner som uppstår, så ökar även tryckets varaktighet betydligt. Övertryckets varaktighet blir därmed en funktion av hur snabbt trycket kan utjämnas, dvs. hur snabbt det kan sippra ut ur ventiler och andra öppningar från det inneslutna utrymmet. En begränsning av den fria avlastningen resulterar således i att explosionens styrka kan bibehållas längre, vilket i sin tur leder till ökad belastning mot omgivningen.

I princip går det att skilja på tre olika fall, vilka samtliga kan ge betydliga bidrag till den totala lastpåverkan på omgivningen:

- utlöst energi koncentreras till förflyttning i en given riktning,
- ökat antal reflexioner,
- kvarhållna spränggaser.

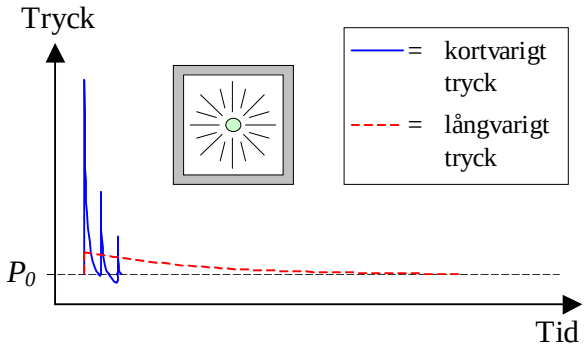
Den förstnämnda punkten syftar på den effekt som fås vid explosion i exempelvis en tunnel eller på en gata mellan två byggnader. Gatans utformning, med två öppna ändar samt fri avlastning i vertikalled, möjliggör avlastning men i princip enbart i två riktningar. Därmed kommer aktuell energiintensitet på en given sträcka från explosionscentrum också bli högre än vad fallet för fri avlastning, med möjlighet till ostörd sfärisk utbredning, ger upphov till. Detta leder i sin tur till ökat tryck men framförallt ökad varaktighet hos den resulterande belastningen. Vidare resulterar en dylik fördämning i att explosionslasten kan bibehålla en betydande storlek även på långa avstånd från explosionscentrum, något som är av intresse vid exempelvis explosion i stadsmiljö.

Den andra punkten syftar på att andelen reflexioner ofrånkomligt ökar i ett slutet utrymme. Beroende på utrymmets beskaffenhet ger detta upphov till en komplicerad serie av sekundära reflexioner så som schematiskt illustreras i Figur 3.4. Här kan noteras att den första reflexionen i det slutna utrymmet är identisk med motsvarande reflexion för explosion med fri avlastning. Skillnaden består i att det i det slutna utrymmet även uppstår en serie av efterföljande reflexioner. Tidsskillnaden mellan dessa reflexionstoppar beror på studerad punkt, utrymmets geometri samt explosionens styrka, varför det är fullt möjligt med överlappande trycktoppar.



Figur 3.4. Schematiskt tryck-tidssamband vid vägg för (a) explosion i det fria med en reflekterande yta, och (b) explosion i slutet utrymme med flera reflekterande ytor.

Den tredje punkten härrör från en begränsning av stötvågens möjlighet att utvidgas. Detta medför att de spränggaser som frigörs i samband med en explosion inte kan ventileras bort i tillräcklig omfattning och därför ger upphov till ett långvarigt tryck. Detta tryck är betydligt lägre än det maximala tryck som fås vid den första kortvariga reflexion som illustreras i Figur 3.4 men dess varaktighet ökar också markant. Detta resulterar normalt i en impulsbelastning som vida överstiger den impuls som fås av de inledande reflexionerna, se Figur 3.5.



Figur 3.5 Schematisk jämförelse av kortvarigt och långvarigt tryck som erhålls vid explosion i slutet utrymme.

För mer utförlig information om inneslutna explosioner hänvisas till Ekengren *et al.* (2005).

3.4.3 Begrepp

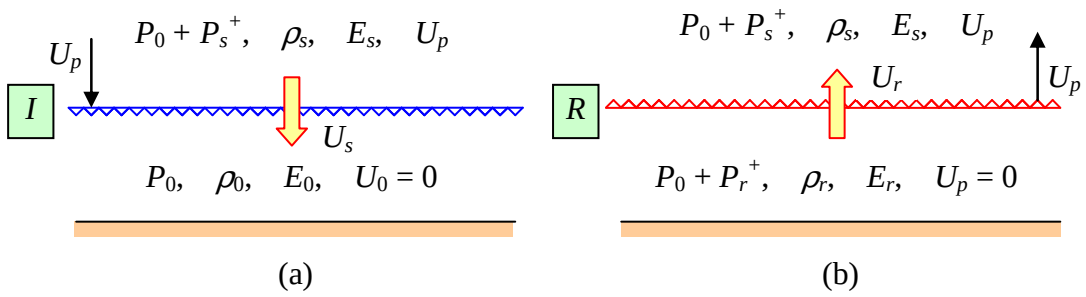
3.4.3.1 Orientering

I detta avsnitt ges en kort översyn av de grundläggande begrepp och fenomen som uppstår i samband med en explosion. Syftet med detta är inte att ge en fullständig genomgång av samtliga begrepp utan att fungera som en kort introduktion så att läsaren åtminstone är vagt bekant med dem. För utförligare information om dessa hänvisas till exempelvis Johansson (2012).

3.4.3.2 Reflexion

När en stötvåg träffar ett fastare medium kommer dess egenskaper förändras dramatiskt. För att förstå den belastning som en utsatt struktur utsätts för är det därför nödvändigt att vara medveten om vad som sker när en stötvåg reflekteras mot en yta. Reflexionen av en stötvåg kan delas upp i två principiellt olika typer: reguljär reflexion och Machreflexion där den förra i sin tur delas upp i normalreflexion samt sned reflexion. Machreflexionen utgör en speciell typ av sned reflexion som uppstår då den infallande vågen träffar en reflekterande yta i en tillräckligt sned vinkel och därmed ger upphov till ett speciellt fenomen – den så kallade Machvågen. Här behandlas framförallt normalreflexion medan sned reflexion och Machreflexion enbart berörs mycket övergripande.

Den enklaste formen av reflexion är normalreflexion och innebär att stötvågen träffar en reflekterande yta i rät vinkel. Figur 3.6 illustrerar ett sådant fall där den infallande vågen *I* närmar sig en vägg med hastigheten U_s. Tillståndet framför vågen är ostört och motsvarar det för stillastående luft, medan tillståndet i själva vågen motsvarar det för en fritt utbredande våg. Omedelbart efter reflexionen rör sig den reflekterande vågen bort från väggen med en hastighet U_r. Tryck, temperatur samt densitet intill väggen ökar till ett värde högre än i den infallande vågen medan partikelhastigheten U_p minskar till noll i stötvågsfronten. Övertrycket P_r^+ benämns som det reflekterade övertrycket och kan vara flera gånger högre än den infallande vågens övertryck P_s^+.



Figur 3.6 Schematisk bild av normalreflexion av en plan stötvåg: (a) före reflexion, (b) efter reflexion.

Det möjligt att teckna en reflexionskoefficient, Λ, som beskriver kvoten mellan reflekterat och inkommande övertryck enligt

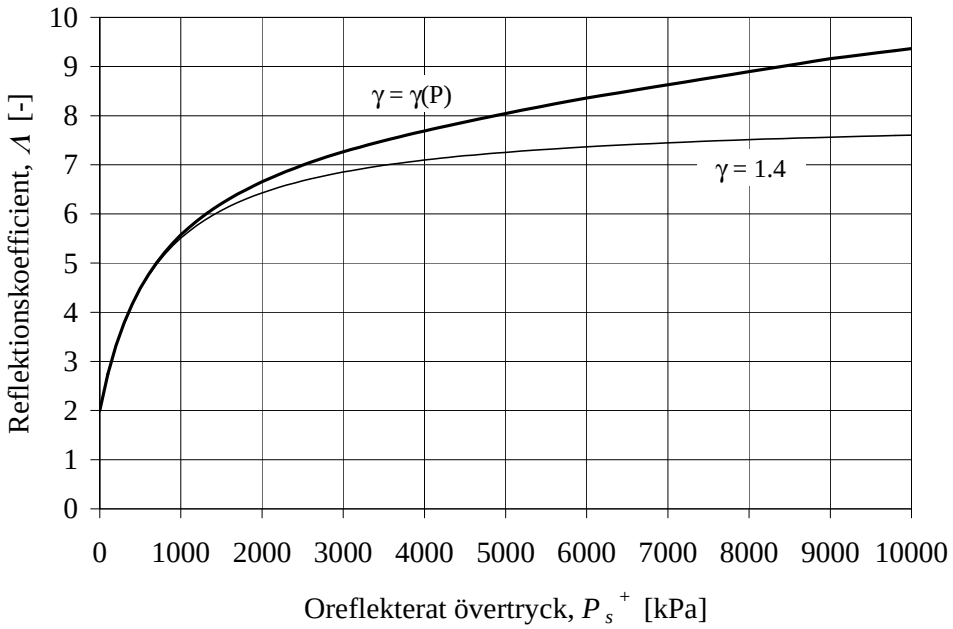
$$\Lambda = \frac{(3\gamma - 1)P_s^+ + 4\gamma P_0}{(\gamma - 1)P_s^+ + 2\gamma P_0} \tag{3.7}$$

där värmekapacitetskvoten γ är en variabel som varierar med trycket. För tryck lägre än omkring 1 000 kPa kan denna dock med god noggrannhet sättas till γ = 1,4, varvid fås

$$\Lambda = [\gamma = 1{,}4] = \frac{8P_s^+ + 14P_0}{P_s^+ + 7P_0} \tag{3.8}$$

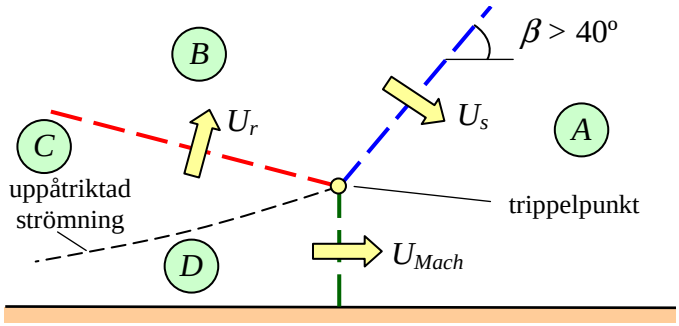
För svaga stötvågor, $P_s^+ \approx< P_0$, fås en reflexionskoefficient Λ = 2 vilket överensstämmer med linjär vågteori. För starkare stötvågor ökar den här kvoten dock flerfaldigt. När γ approximeras till 1,4 resulterar ekvation (3.7) i att $\Lambda \rightarrow 8$ när $P_s^+ \rightarrow \infty$. I och med att värmekapacitetskvoten γ minskar

med ökande tryck kan dock kvoten mellan reflekterande och infallande övertryck öka till närmare 20. I Figur 3.7 jämförs effekten på reflexionskoefficienten Λ när värmekapacitetskvoten är konstant, γ= 1,4, respektive när den varierar med trycket, $\gamma = \gamma(P)$.



Figur 3.7 Förhållande mellan reflexionskoefficient Λ och oreflekterat övertryck P_s^+. För γ= 1,4 utgör Λ = 8 en asymptot när $P_s^+ \rightarrow \infty$, se ekvation (3.7).

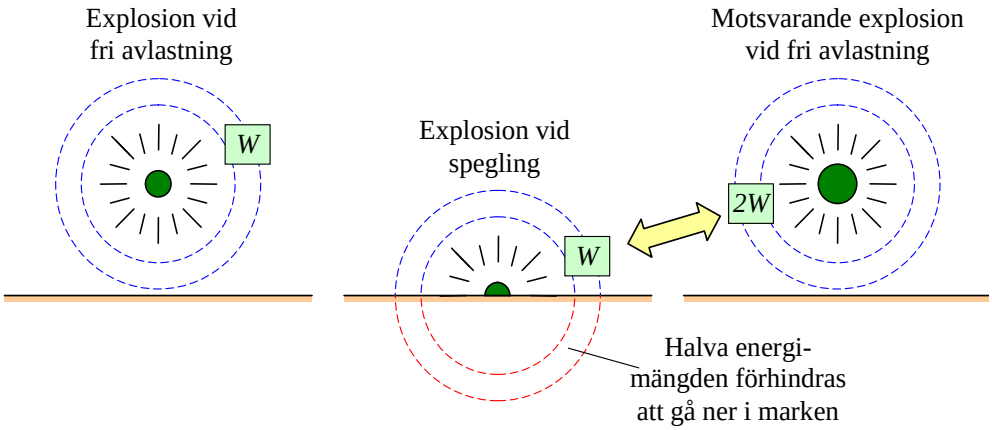
Normalreflexion utgör ett specialfall av en sned reflexion där infallsvinkeln β = 0°. Det allmänna fallet utgörs dock av någon typ av sned reflexion. Speciellt för en sned reflekterande stötvåg är att den reflekterande vinkeln alltid är mindre än anslagsvinkeln. Vid en infallsvinkel $\beta \approx 40^o$ uppstår även ett speciellt reflexionsfenomen, benämnt Machreflexion, där den inkommande stötvågen inte längre genererar någon ren reflexion. Istället ”kanar” denna längs med underlaget vilket resulterar i att en ny stötvåg, den så kallade Machvågen, tar form vinkelrätt mot ytan, se Figur 3.8. Samtidigt sker en uppåtriktad strömning som gör att den såkallade trippelpunkten, den punkt där den infallande och reflekterande vågen samt Machvågen möts, distanserar sig från den reflekterande ytan. Fenomenet Machvåg innebär att det på ett givet avstånd alltid kommer att skapas en vertikal vågfront som rusar fram parallellt med det reflekterande underlaget.



Figur 3.8 *Uppbyggnad av en Machstötvåg. Fyra regioner kan urskiljas: ostörd luft i region A, fri tryckavlastning i region B, reflekterat tryck i region C samt område med Mach-reflexion i region D.*

3.4.3.3 Spegling

När en laddning detonerar nära en reflekterande yta, en såkallad hemisfärisk laddning, kommer detta påverka stötvågens styrka och utbredning. Stötvågens egenskaper är en funktion av explosionens energiintensitet, vilket innebär att de även är beroende av den volym i vilken utbredningen sker. En jämförelse av en explosion långt från eventuella störande reflexioner där fri avlastning är möjligt görs här med vad som händer om explosionen istället sker i kontakt med en reflekterande yta. Den volym som stötvågen kan breda ut sig över blir hälften så stor i fallet med explosion med möjlighet till fri utbredning. I ett idealiserat fall, med antagandet av att ingen energi försvinner ner i den reflekterande ytan, innebär detta att den stötvåg som genereras vid ett sådant fall för en given laddning *W* har samma egenskaper som den stötvåg som orsakas av en dubbelt så stor laddning (*2W*) som har fri tryckavlastning, se Figur 3.9. Detta är dock ett konservativt antagande på säker sida eftersom en del av energin kommer gå förlorad när marken sätts i rörelse. Hur mycket energi som försvinner ner i marken beror på underlagets egenskaper och laddningens storlek. Exempelvis resulterar en stålplatta under laddningen i en högre speglingsfaktor än om laddningen låg direkt på sand. Vidare resulterar en kraftigare explosion i att mer energi går ner i marken vilket också resulterar i en lägre speglingsfaktor. Ett ungefärligt värde på 1,8 istället för en dubbling av laddningsvikten är därför mer rimligt och används också i litteraturen.



Figur 3.9 *Schematisk bild som illustrerar ideal spegling. En del av explosionens frigjorda energi går dock i realiteten alltid ner i marken varför speglingskvoten i verkligheten alltid blir < 2.*

3.4.3.4 Diffraktion

När en stötvåg når fram till ett solitt objekt, såsom en byggnad, inträffar ett komplicerat förlopp som benämns diffraktion. I detta begrepp innefattas vad som händer när stötvågen sprider sig bakom och förbi den utsatta byggnaden och är således en förutsättning för att söka förstå hur den totala lastbilden från en explosion i stadsmiljö kommer att se ut. Diffraktion kan således ha stor betydelse för hur en utsatt byggnad påverkas av en stötvåg. Detta gäller framförallt stötvågor med lång varaktighet, även om principen är densamma för mer kortvariga laster.

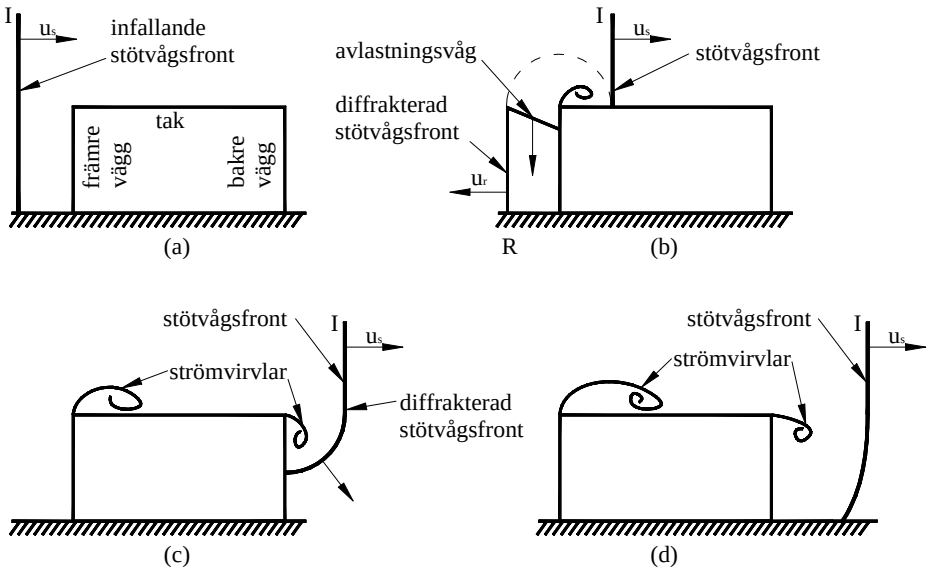
I Figur 3.10 ges en principiell bild av vad som händer i ett tvådimensionellt fall när en plan stötvåg passerar en byggnad:

(a) En plan stötvåg *I* rusar med hög hastighet fram mot byggnaden. Vid byggnaden råder fortfarande helt ostörda förhållanden.

(b) När den infallande vågen *I* når den främsta väggen uppstår en reflexionsvåg *R* i motsatt riktning. Detta ger upphov till ett reflekterat tryck vid den främre väggen där trycket ögonblickligen ökar från $P_0 + P_s^+$ till $P_0 + P_r^+$. Ovanför väggen fortsätter stötvågen sin färd framåt över taket och belastar detta med ett oreflekterat tryck $P_0 + P_s^+$. Framför stötvågen råder fortfarande ostörda förhållanden. Eftersom trycket är lägre på taket än vid väggen uppstår en avlastningsvåg som sprider sig nedåt längs den främre väggen. Denna avlastningsvåg kan även ge upphov till förstärkta undertryck som därmed ökar suget på byggnadens framsida. Vid hörnen bildas luftvirvlar som ytterligare minskar trycket i området.

(c) När stötvågen når byggnadens baksida diffrakterar den ned bakom hörnet varvid en andra luftvirvel skapas och trycket på byggnadens baksida blir något lägre än det oreflekterade trycket på taket. Hela byggnaden har nu påverkats medan luften framför den framrusande stötvågen fortfarande är helt ostörd

(d) Stötvågen *I* har nu helt passerat byggnaden och lämnat efter sig strömvirvlar vid mötena mellan vägg och tak.



Figur 3.10 Diffraktion av stötvåg för en tvådimensionell byggnad. Baserad på Baker (1973).

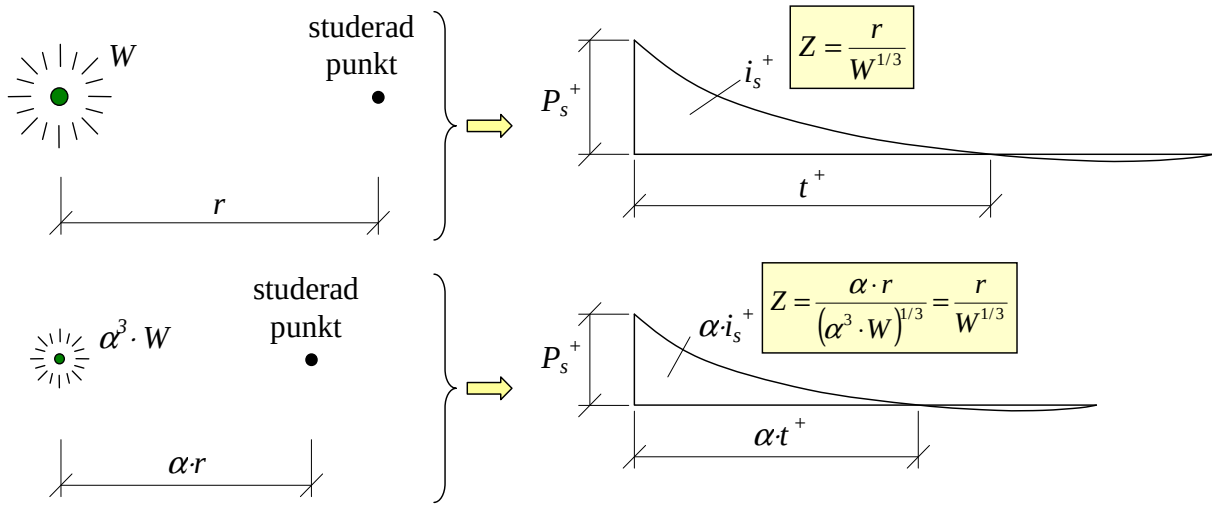
Stötvågens beteende vid diffraktion beror även på geometriska betingelser hos byggnaden. Om byggnadens längd är lång är det exempelvis möjligt att avlastningsvågen negligerar inverkan av reflexionen på byggnadens framsida innan stötvågen når byggnadens baksida osv. Här beskrivs endast ett tvådimensionellt fall men beteendet är detsamma även för en tredimensionell struktur. I ett sådant fall kan stötvågen även diffraktera runt byggnadens sidor.

3.4.3.5 Skallagar

Det gäller allmänt för en stötvåg orsakad av en explosion att dess egenskaper dels beror på explosionens energiinnehåll och dels på hur långt från explosionskällan stötvågen har färdats. Utgående från experimentella observationer och teoretiska studier har skallagar tagits fram vilka gör det möjligt att jämföra effekten av olika sprängladdningar på olika avstånd. Den vanligast förekommande av dessa är Hopkinsons skallag, vilken säger att två explosioner kan förväntas ge upphov till likvärdiga stötvågor på avstånd proportionella mot kubikroten av energifrigörelsen hos respektive explosion. Detta illustreras grafiskt i Figur 3.11 och kan matematiskt uttryckas som

$$Z = \frac{r}{W^{1/3}} \tag{3.9}$$

där r är det verkliga avståndet och Z vanligen benämns som det skalade avståndet. W i nämnaren symboliserar explosionens energimängd uttryckt i mängd sprängämne (vanligen i kg TNT, se avsnitt 3.2.1).



Figur 3.11 Grafisk illustration av Hopkinsons skallag.

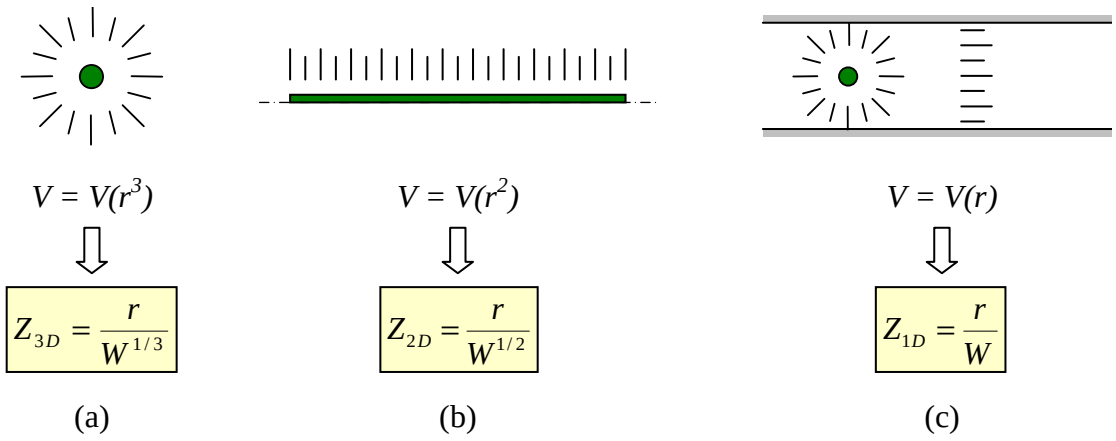
Av Figur 3.11 framgår att övertrycket P_s^+ förblir detsamma då det skalade avståndet Z är givet. Detta är dock inte fallet för impulstätheten i_s^+ eller varaktigheten T^+, vilka även beror på faktorn α. Detta innebär att övertrycket kan tecknas som en funktion av det skalade avståndet men att impulstätheten och varaktigheten även måste modifieras med avseende på α. Detta sker genom att dessa även kopplas till den frigjorda energimängden, varvid nedanstående samband erhålls

$$P_s^+ = P_s^+(Z) \tag{3.10}$$

$$i_s^+ = i_s^+(Z) \cdot W^{1/3} \tag{3.11}$$

$$t^+ = t^+(Z) \cdot W^{1/3} \tag{3.12}$$

Styrkan hos en luftstötvåg beror på den energiintensitet som erhålls vid en explosion. Ovan givna uttryck förutsätter att explosionen sker i en omgivning där utbredning åt alla håll är möjlig varvid den avgivna energimängden sprider sig inom en sfärisk volym. I Figur 3.12 visas den principiella utbredningen för en explosion som breder ut sig i en, två eller tre riktningar i rummet. Vid fri sfärisk utbredning är den volym som innesluts av stötvågsfronten således proportionell mot utbredningen r i kubik, dvs. volymen $V = V(r^3)$. Motsvarande volymförhållanden blir för en linjeladdning, med cylindrisk spridning, $V = V(r^2)$ medan den inneslutna volymen i ett endimensionellt fall, exempelvis en tunnel, ökar proportionellt mot enbart r, dvs. $V = V(r)$. På lite större avstånd innebär detta en avsevärd skillnad i explosionens energiintensitet. Således kommer stötvågen orsakad av en explosion i en tunnel klinga av mycket långsammare än vad motsvarande stötvåg i fria luften gör. Den långsammare avklingningen resulterar följaktligen i att en sådan explosion till större del behåller sin styrka även på långa avstånd varför den också kan sägas vara betydligt farligare för sin omgivning än en motsvarande explosion i det fria. Av detta framgår att det krävs olika skalnings-regler beroende på hur omgivningen kring explosionen ser ut. Förenklat kan sägas att det skalade avståndet för en explosion i en tunnel kan skrivas som $Z = r / W$ istället för $Z = r / W^{1/3}$ som är fallet vid fri utbredning.



Figur 3.12 Skalat avstånd för olika geometriska fall: (a) explosion i det fria från punktkälla med sfärisk utbredning, (b) explosion i det fria från linjekälla med cylindrisk utbredning, (c) explosion i tunnel med plan utbredning.

Det skalade avståndet Z används då effekten av en given sprängladdning på ett godtyckligt avstånd från explosionscentrum skall bestämmas. Översättningen till reella stötvågsstorheter görs med hjälp av empiriska uttryck såsom behandlas i avsnitt 3.4.4.

3.4.4 Empiriska samband

3.4.4.1 Orientering

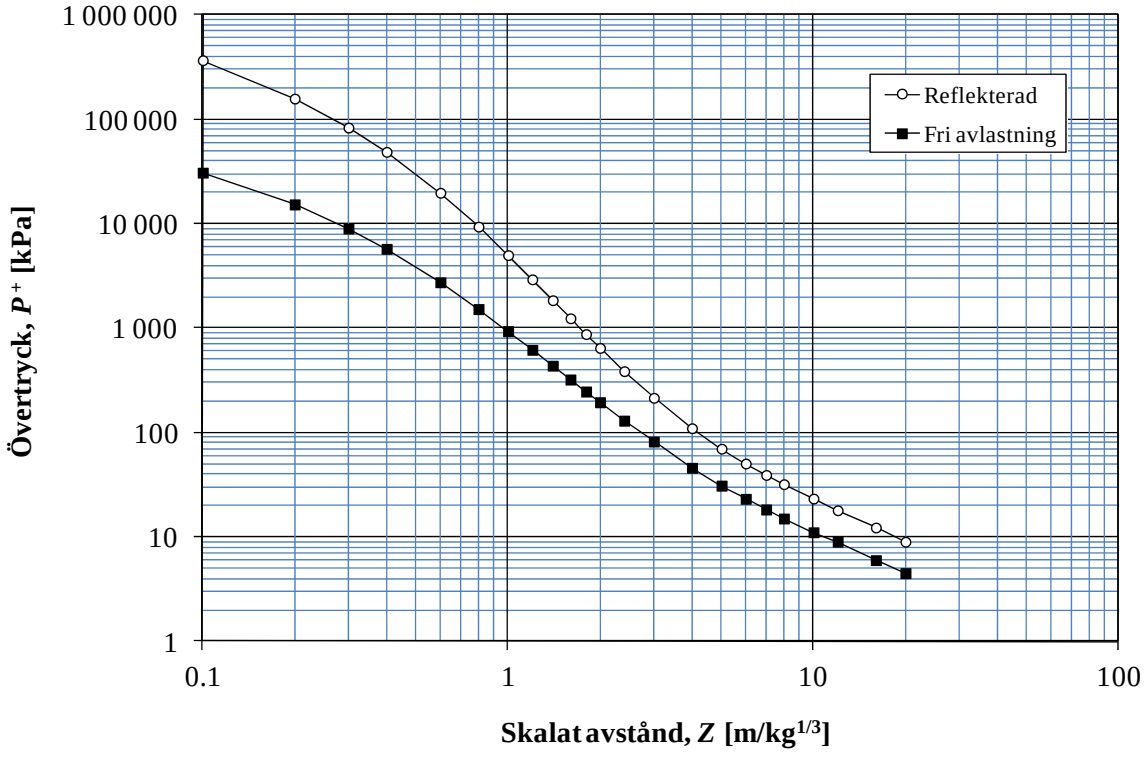
För att bestämma sådana storheter som övertryck, impulstäthet och varaktighet för en given sprängladdning på ett godtyckligt avstånd har ett antal empiriska uttryck, som beskriver sambanden mellan dessa parametrar, tagits fram. Dessa uttryck är baserade på ett stort antal försök och är begränsade till att beskriva vilka storheter som erhålls vid en fri avlastning eller då explosionen sker i kontakt med en yta, en såkallad hemisfärisk explosion.

Samtliga empiriska samband som redovisas i detta avsnitt använder sig av det skalade avstånd Z som beskrivs i avsnitt 3.4.3.5 och baserar sig på antagandet att explosionen sker på ett sådant sätt att en sfärisk utbredning är möjlig, varför det skalade avstånd Z definieras i enlighet med ekvation (3.9). Vidare nyttjas vikt TNT uttryckt i massa kg som standardenhet för att uttrycka laddningens storlek, se avsnitt 3.2.1. Om tryck och impulstätheter etc. söks för ett annat typ av sprängämne än TNT skall laddningsstorleken först modifieras så som beskrivs i avsnitt 3.3.2.

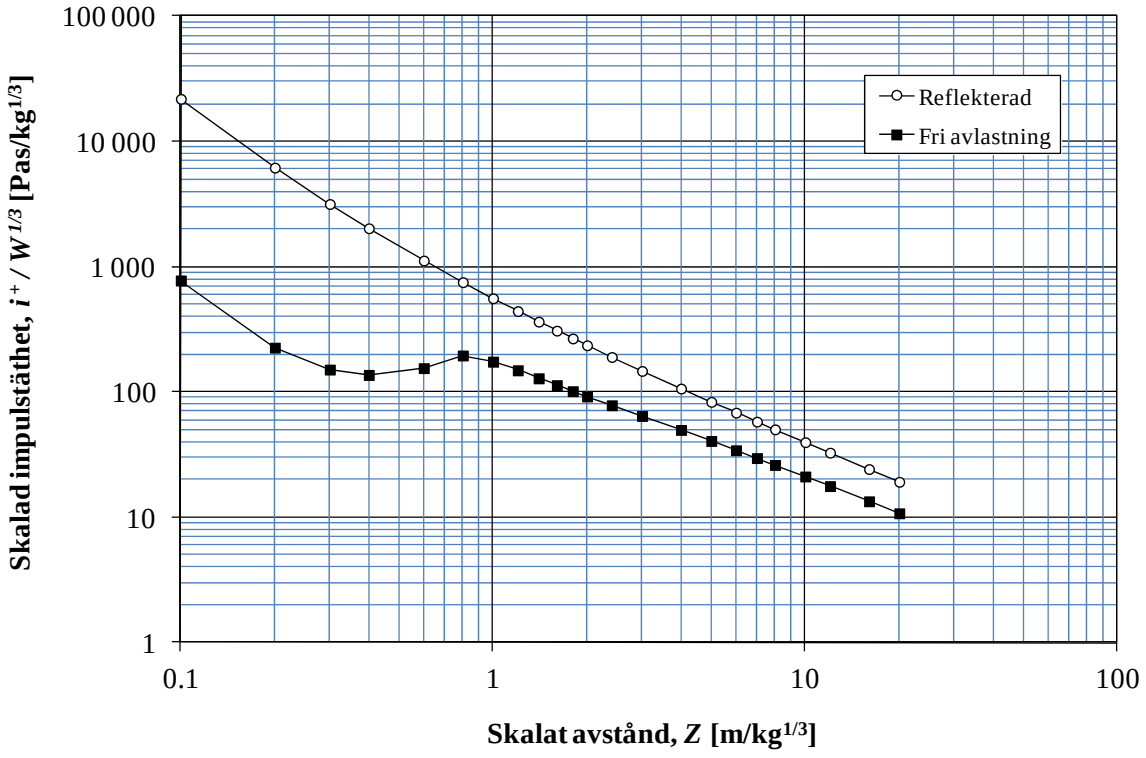
3.4.4.2 Positiv fas

I Figur 3.13 till Figur 3.16 redovisas tryck, impulstäthet, ankomsttid och varaktighet samt stötvågshastighet och partikelhastighet för en explosion med möjlighet till fri, sfärisk, avlastning. För tryck och impulstäthet ges samband för både oreflekterad och reflekterad (normalreflexion) stötvåg. Det ska även noteras att impulstäthet, ankomsttid samt varaktighet har skalats med hänsyn till laddningens storlek $W^{1/3}$ i enlighet med Hopkinsons skallag, se avsnitt 3.4.3.5.

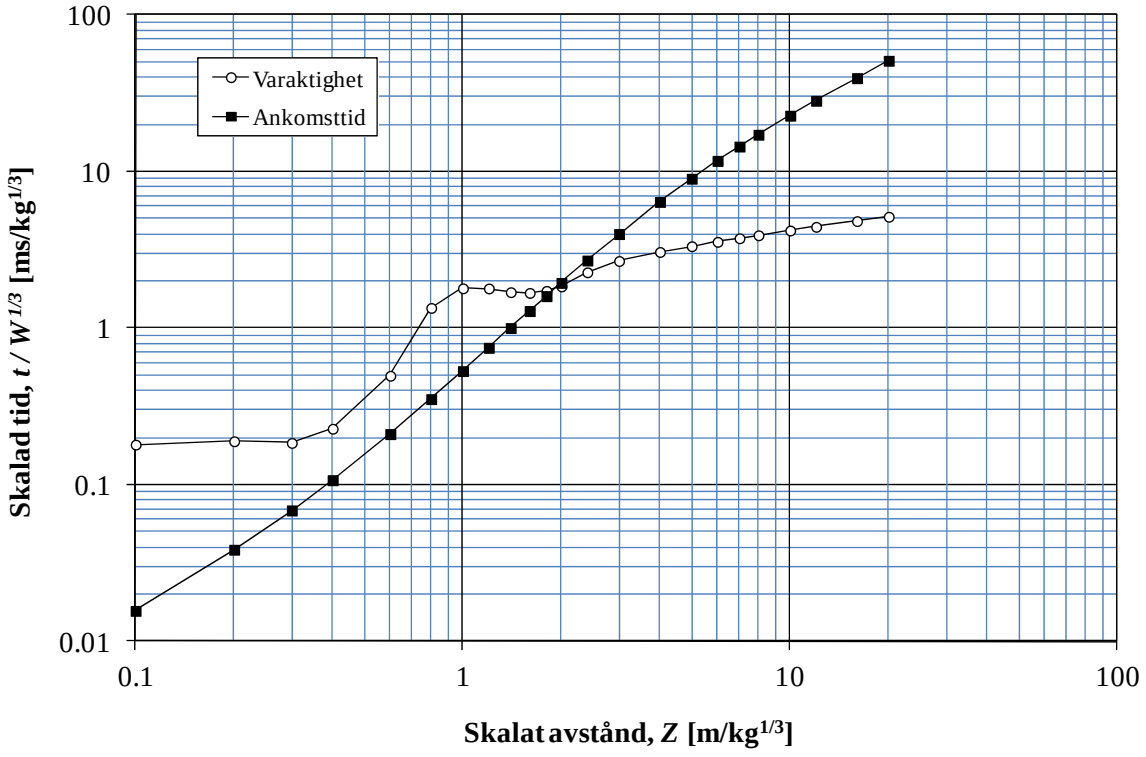
Samtliga samband är baserade på ConWep (1992), vilket behandlas närmare i avsnitt 3.5.1. Tabellereade värden presenteras i bilaga B.



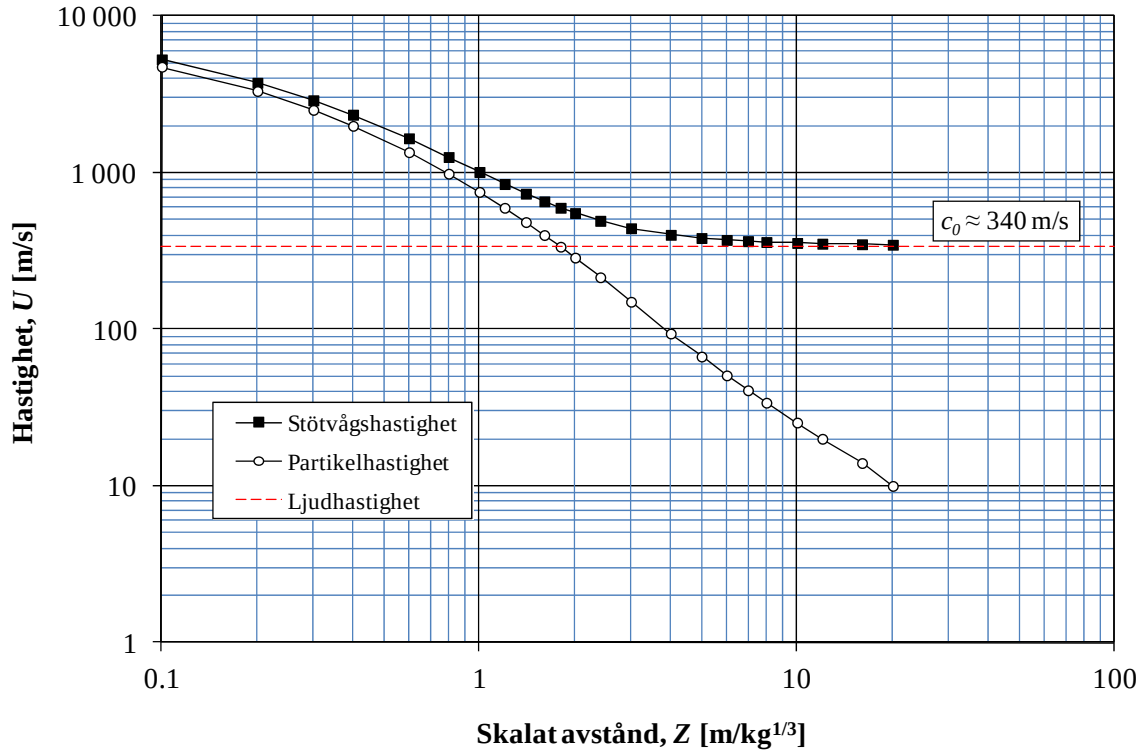
Figur 3.13 Reflekterat och oreflekterat övertryck som funktion av det skalade avståndet Z. Baserat på ConWep (1992).



Figur 3.14 Reflekterad och oreflekterad impulstäthet som funktion av det skalade avståndet Z. Baserat på ConWep (1992).



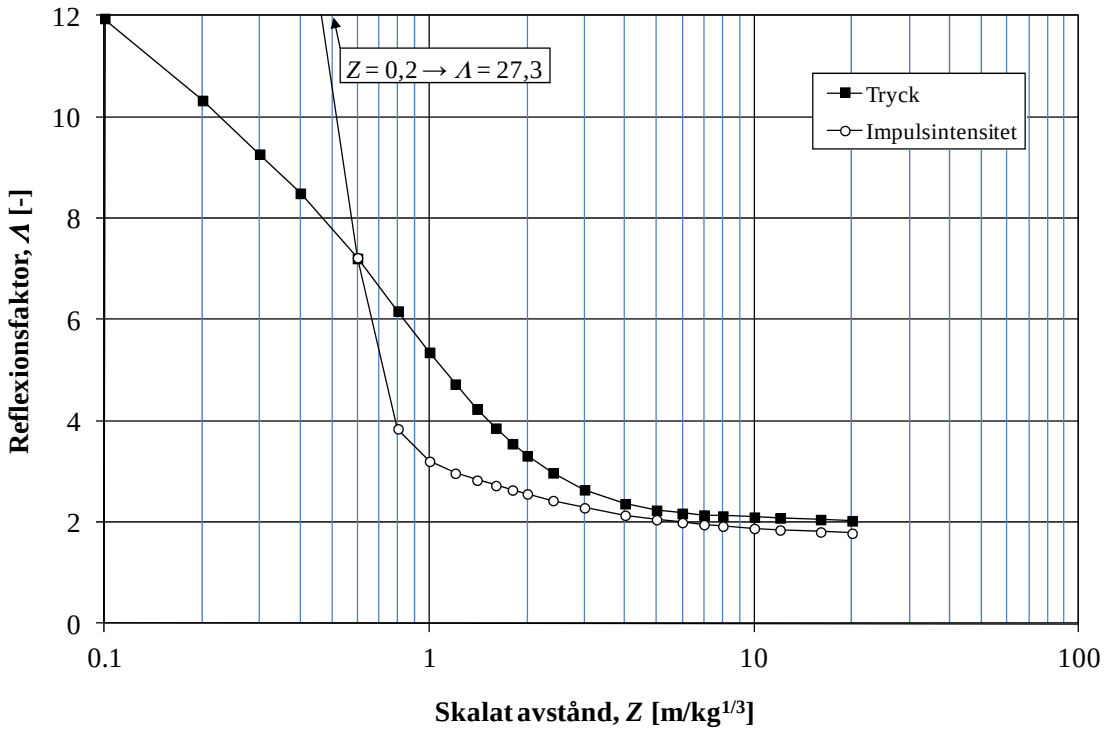
Figur 3.15 Ankomsttid och varaktighet som funktion av det skalade avståndet Z. Baserat på ConWep (1992).



Figur 3.16 Stötvågshastighet och partikelhastighet som funktion av det skalade avståndet Z. Ljudhastigheten i luft vid 15ºC visas som jämförelse. Baserat på ConWep (1992).

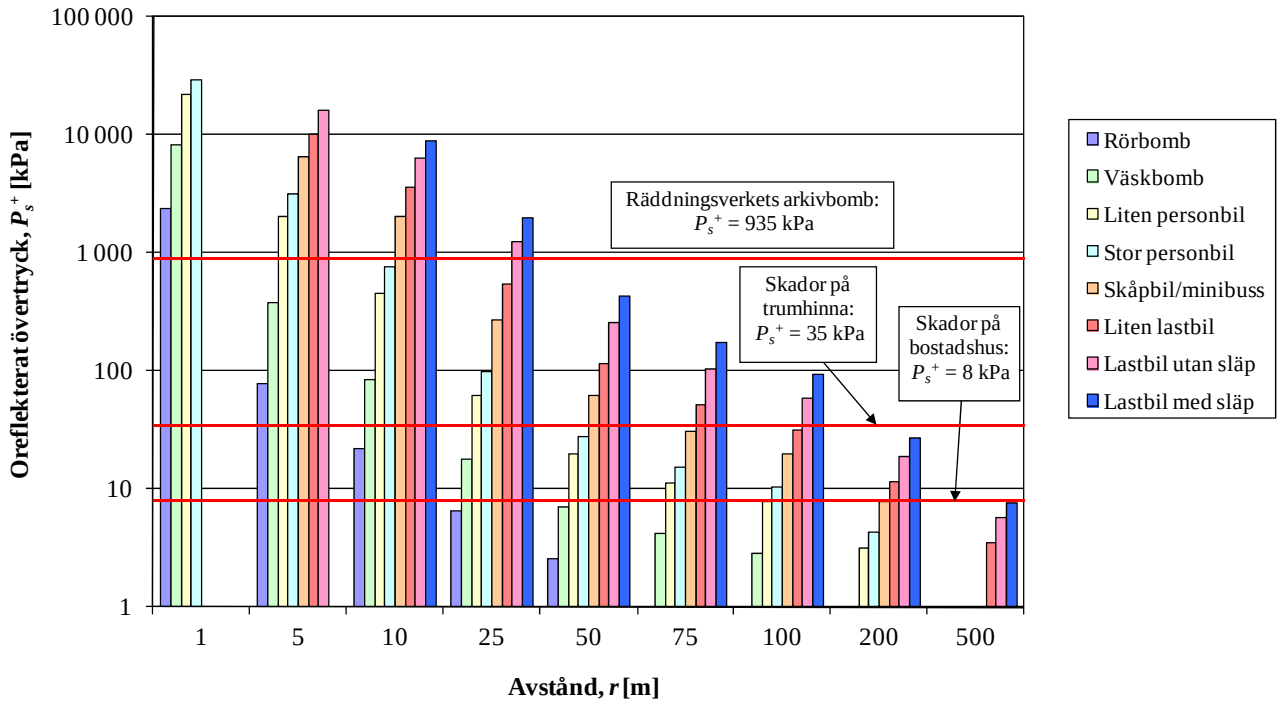
Förhållandet mellan reflekterat och oreflekterat tryck behandlas i avsnitt 3.4.3.2. Ett motsvarande analytiskt samband som presenteras där är dock inte möjligt att ange för impulstätheten. För att ge en övergripande bild av effekten av reflekterad impulstätheten redovisas därför istället reflexionsfaktorn Λ för tryck och impulstäthet i Figur 3.17 som en funktion av det skalade avståndet Z.

Baserat på de i Figur 3.13 och Figur 3.14 redovisade sambanden har oreflekterat tryck och impulstäthet tagits fram på varierande avstånd för de i Tabell 3.1 definierade laddningarna. Dessa resultat redovisas i Figur 3.18 respektive Figur 3.19. Det är värt att notera att trycket minskar snabbt med ökande avstånd medan impulstäthetens minskning inte är lika tydlig. Tryck och impulstäthet redovisas för ett urval av aktuella laddningar – för små avstånd blir effekten av en stor laddning så stor att den inte är av intresse i det här arbetet och på samma sätt resulterar en kombinationen av stora avstånd och små laddningar i att effekten blir försumbar. Som jämförelse till resultaten har lastnivån från Räddningsverkets såkallade arkivbomb[1] lagts in. I Figur 3.18 har även schabloniserad trycknivå för skador på trumhinnan samt bostadshus medtagen som referens, jämför Tabell 3.1.

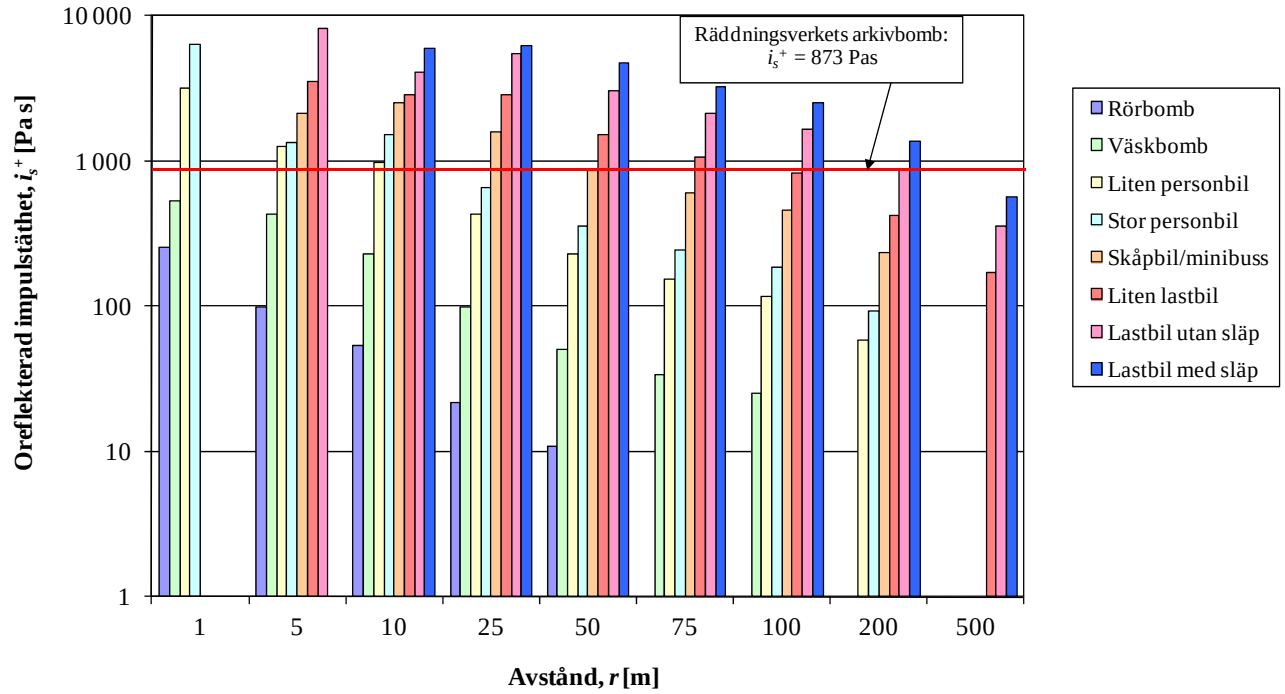


Figur 3.17 Reflexionsfaktor för tryck och impulstäthet som funktion av det skalade avståndet Z. Baserat på samband redovisade i Figur 3.13 och Figur 3.14.

[1] Räddningsverkets såkallade arkivbomb betecknar den last som uppstår av en laddning på 125 kg TNT som detonerar på ett avstånd om 5 m med möjlighet till fri avlastning. Detta motsvarar det kortvariga tryck som ett skyddsrum ska kunna utsättas, se Räddningsverket (2006).



Figur 3.18 *Oreflekterat övertryck för varierande explosionskällor enligt Tabell 3.1 vid olika avstånd r. Som referens anges det oreflekterade tryck som fås för en explosion motsvarande den som ett svenskt skyddsrum dimensioneras att klara av.*



Figur 3.19 *Oreflekterad impulstäthet för varierande explosionskällor enligt Tabell 3.1 vid olika avstånd R. Som referens anges den oreflekterade impulstäthet som fås för en explosion motsvarande den som ett svenskt skyddsrum dimensioneras att klara av.*

3.4.4.3 Negativ fas

Empiriska samband motsvarande de som ges för positiv fas i avsnitt 3.4.4.2 är för den negativa fasen betydligt mer sparsamma i litteraturen. I TM 5-1300 (1990) återges visserligen sådana i diagramform men eftersom dessa är uttryckta i amerikanska enheter samt av dålig kvalitet återges de inte här. Det står dock klart att undertrycket P^- normalt är betydligt lägre än övertrycket P^+ eftersom undertryckets storlek begränsas av atmosfärstrycket ($P^- \leq P_0 \approx 101{,}3$ kPa) medan det saknas en övre gräns för övertrycket. Vidare konstaterar Kinney och Graham (1985) att storleken på den positiva och den negativa impulstätheten är av ungefär samma storleksordning.

På grund av bristande information om tryck och impulstäthet i den negativa fasen har numeriska beräkningar utförts i programmet Autodyn med syfte att komplettera detta, se avsnitt 5.3.3. Mer information om den negativa fasen behandlas även i Johansson och Laine (2012a).

3.5 Befintliga beräkningsverktyg

3.5.1 Orientering

Det finns en stor mängd olika verktyg att använda för att bestämma vilka verkningar som erhålls från en explosion. Dessa kan grovt delas upp i tre typer:

- beräkning av lasteffekt, dvs. resulterande tryck, impulstäthet och varaktighet av explosion,
- strukturell respons hos konstruktion utsatt för explosionslast,
- ett sammanslaget verktyg som kombinerar ovan givna egenskaper.

Komplexiteten hos dessa verktyg kan variera stort, allt från enklare empiriska samband för lastberäkning till fullständiga finita elementprogram i vilka skeendet från detonationsögonblicket i sprängladdningen, via stötvågens spridning i en varierande omgivning, till den strukturella responsen hos utsatt byggnad kan följas. Att beröra samtliga befintliga program avsedda för explosionsberäkningar är dock en alltför betungande uppgift för denna publikation. Denna genomgång syftar endast till att ge en övergripande beskrivning av exempel på olika typer av program som finns inom detta område. Flera av nedan beskrivna program är inte heller möjliga att få tag på för den godtyckliga användaren. Exempelvis gäller för flertalet av de amerikanska programmen att dessa är begränsade i sin användning till företag som arbetar gentemot den amerikanska försvarsmakten. För en kompletterande genomgång av befintliga programvaror att använda för explosionsberäkningar hänvisas till EESWG (2007) samt USACE (2007).

3.5.2 ConWep

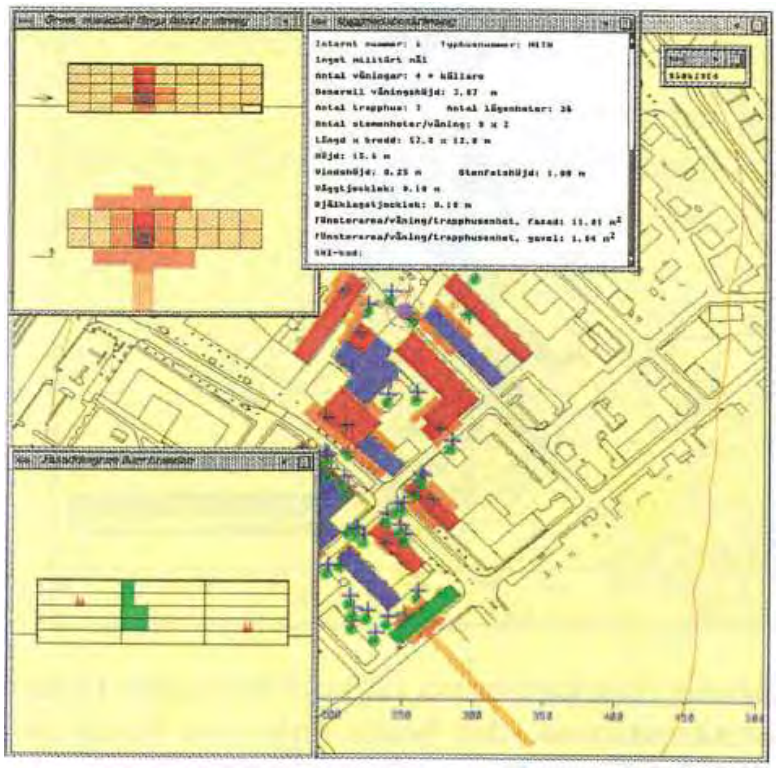
ConWep (1992) är ett amerikanskt program som samlar de empiriska samband som framtagits utgående från framförallt amerikanska försök. I ConWep redovisas bland annat resultat från luftstötvåg vid fri utbredning, utbredning i tunnlar och innesluten explosion. Vidare återfinns i ConWep även resultatdata för bland annat markstötvåg och splitter. Resultat från ConWep för luftstötvåg vid fri avlastning redovisas i avsnitt 3.4.4 och i kapitel 5 används detta som representant för utförda försök vid jämförelse med beräkningar i programmet Autodyn.

I ConWep finns möjlighet att välja bland ett stort antal olika sprängämnen, se tabell 3.2, för en ren sprängladdning eller befintliga vapen. Programmet kan användas för att utgående från en given laddning och avstånd bestämma aktuell styrka hos stötvågen. Alternativt kan avstånd respektive laddningsmängd tas fram utgående från givet tryck eller imulstäthet.

3.5.3 VEBE

VEBE är en omfattande svensk vapenverkansmodell framtagen för konventionell vapenverkan i bebyggelse. Programmet utvecklades av Försvarets Forskningsanstalt (FOA), numera Försvarets Forskningsinstitut (FOI), under åren 1988-1996 men har aldrig slutförts helt och hållet. Framtaget material behandlas dock i bland annat Lindqvist *et al.* (1989), Lindqvist *et al.* (1994) och Holm *et al.* (1995). Vidare har en begränsad variant av VEBE, riktad mot Räddningsverket framtagits, se Holm (1997).

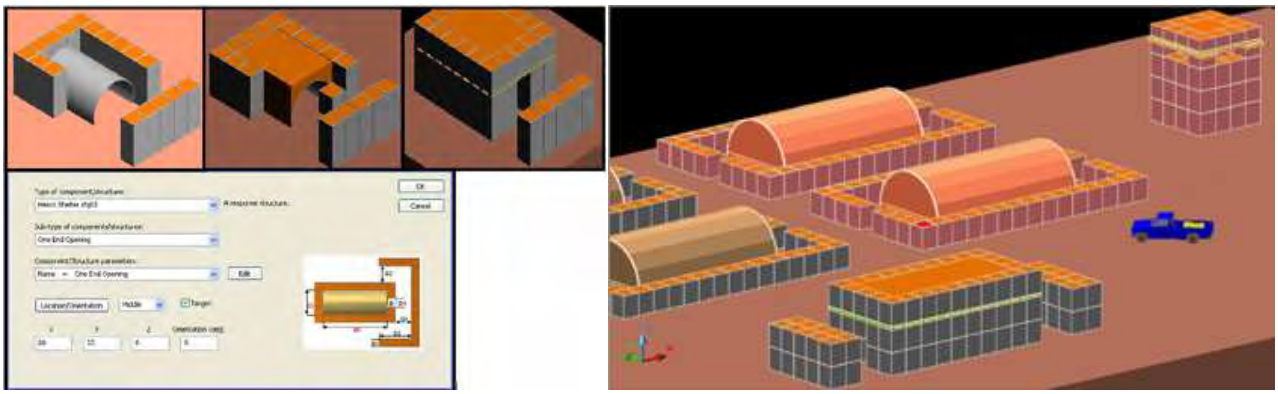
I VEBE har data samlats för att möjliggöra en helhetsbild för både lastverkan samt förmåga hos utsatta mål att motstå dessa laster. Nyttjad lastdata tas fram på ett motsvarande sätt som i ConWep, se avsnitt 3.5.2, men med tillägget att kontroll av utsatta mål är inbyggt i programmet. Det är således möjligt att i VEBE både ta fram aktuella lastintensiteter samt kontrollera vilken skada som en given laddning ger upphov till mot byggnader och människor i sin omgivning, se Figur 3.20. Vidare behandlas i VEBE även brand och gasers spridning och brännbarhet.



Figur 3.20 Bild från VEBE illustrerande skadade områden i stadsdel utsatt för flygbombning. Från Holm et al. (1995).

3.5.4 MBEES

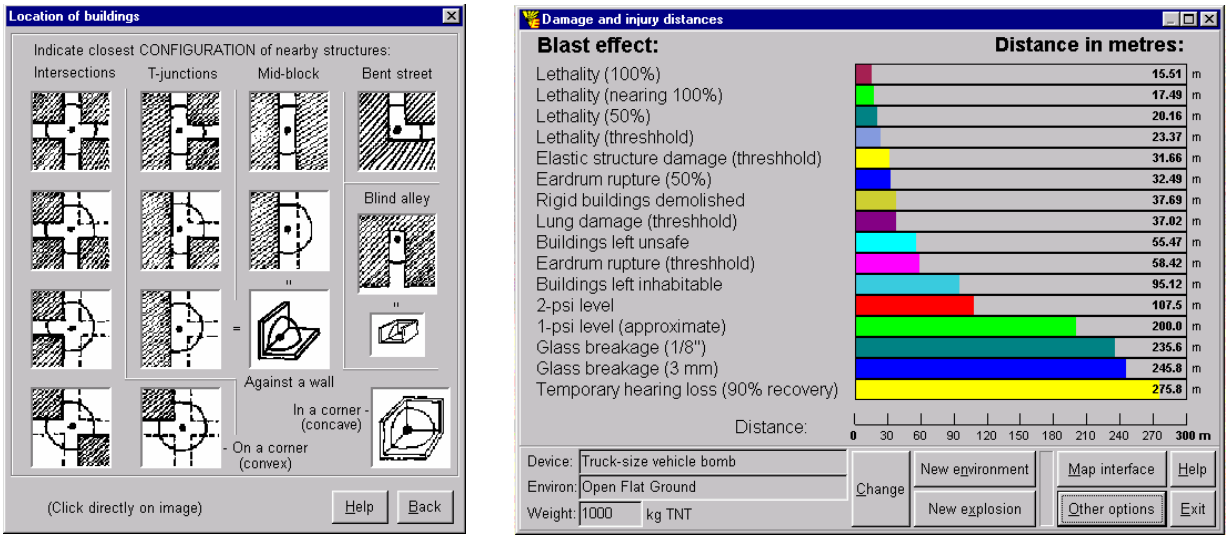
MBEES (2007) (Military Blast Effects Expert System) är ett kanadensiskt program som syftar till att kunna användas både vid dimensionering av militära anläggningar som i operativt läge ute på fältet. Upplägget i MBEES motsvarar det som finns i VEBE, se avsnitt 3.5.3, dvs. det är möjligt att bedöma både den last som erhålls i en komplex lastsituation som den skada som denna åsamkar omgivande byggnader och människor. Dock är MBEES modernare än VEBE i det mening att den i sin resultathantering bland annat nyttjar en omfattande databas med resultat baserade på ett stort antal finita elementanalyser av olika belastningssituationer. Vidare är programmet kopplat till en Cadmiljö som gör att användaren själv kan definiera eller modifiera olika geometriska belastningssituationer, se Figur 3.21.



Figur 3.21 Exempel på användargränssnitt i MBEES (2007).

3.5.5 EBlast

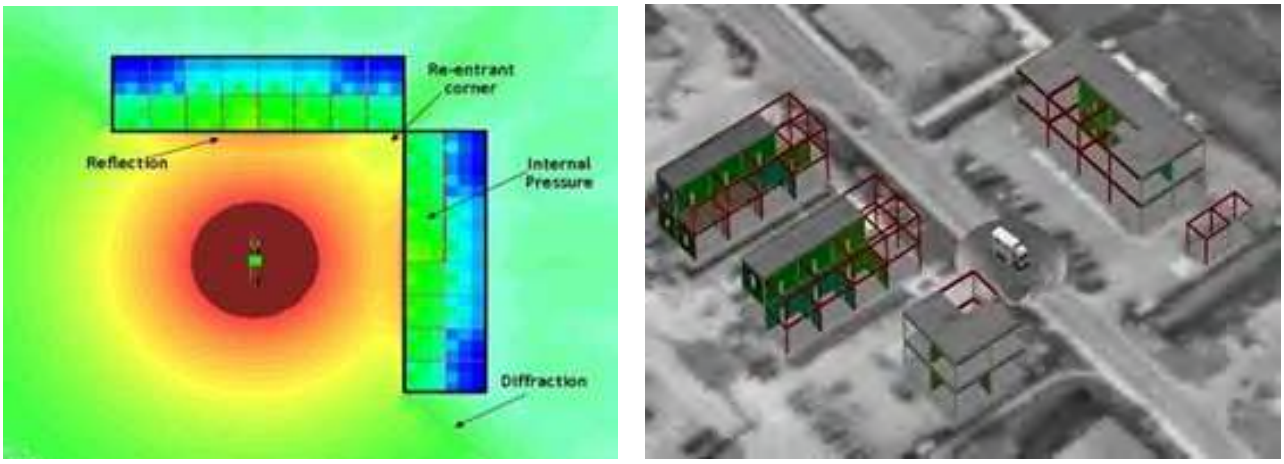
EBlast (Emergeny Blast Expert System), Dewey och McMillin (1997), är ett kanadensiskt program avsett för fältarbete när det är av vikt att göra snabba bedömningar om vilka säkerhetsavstånd som är nödvändiga i samband med explosionshot. Som indata är det möjligt att ange laddningstyp samt läge i förhållande till omgivande byggnader. Resultat fås dock inte som tryck och impulstätheter utan som kritiska säkerhetsavstånd för olika skadegrader på människor och byggnader. I Figur 3.22 ges exempel på indatamöjlighet samt resultatutdata. Bakgrunden till samband nyttjade i EBlast ges i Dewey och van Netten (2002).



Figur 3.22 Indata om laddningens läge gentemot omgivningen samt exempel på resultat i programmet EBlast. Från Dewey och McMillin (1997).

3.5.6 VAPO

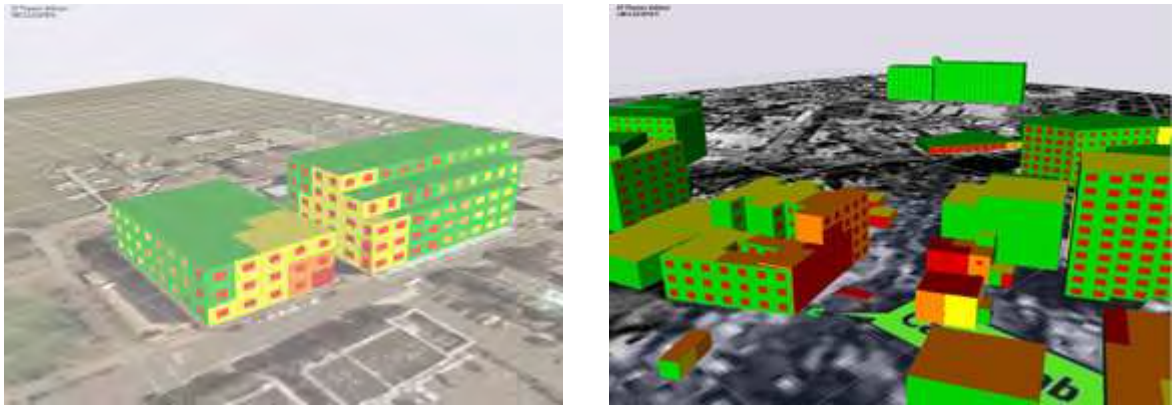
VAPO (Vulnerability Assessment and Protection Option) är ett amerikanskt program som används vid riskanalyser med avseende på explosioner orsakade av terrorister i stadsmiljö. Programmet ger möjlighet att beakta sådana fenomen som reflexioner, fördämning och diffraktion samt beaktar även fortskridande ras. Programmet är en amerikansk variant av VEBE och MBEES, beskrivna i avsnitt 3.5.3 respektive avsnitt 3.5.4, med motsvarande möjligheter som dessa program. Liksom MBEES är VAPO dock ett modernare program än VEBE, se Figur 3.23.



Figur 3.23 Bild av VAPO. Från pdc.usace.army.mil/software/vapo.

3.5.7 BEEM

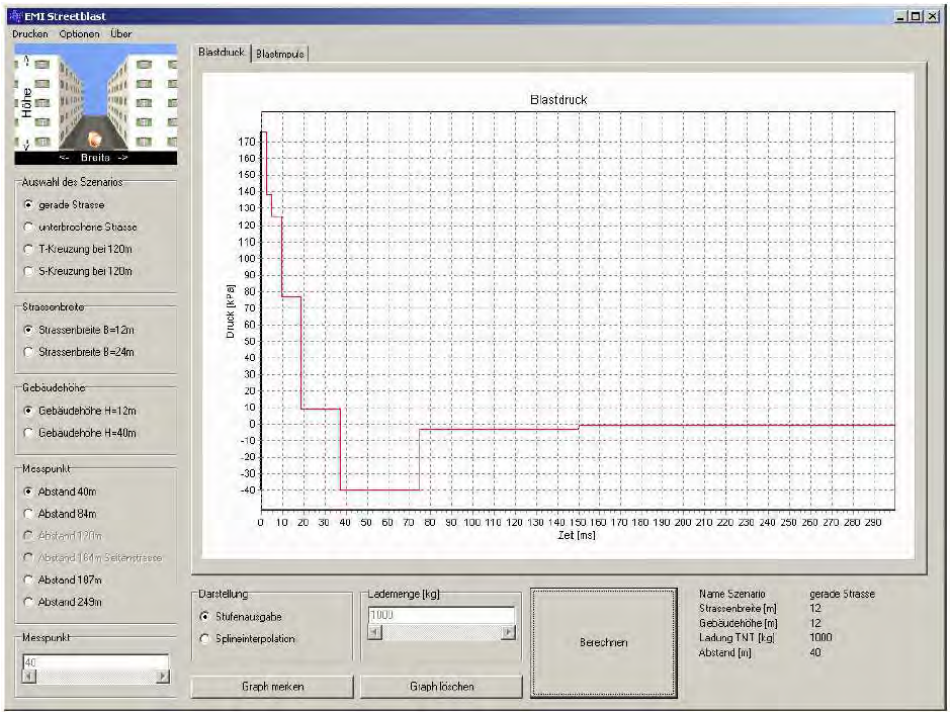
BEEM (Blast Effects Estimation Model) är ett amerikanskt program som tagits fram för att fungera som stöd för ingenjörer, tekniker samt säkerhetspersonal vid bedömning av erhållen skada av explosionsutsatt byggnad. Programmet beräknar explosionsbelastning och uppskattar skada på omgivande byggnader, se Figur 3.24, och är tänkt att användas både i fält och vid projektering av nya byggnader.



Figur 3.24 Skadeuppskattning av byggnader vid explosion i stadsmiljö. Olika färger markerar grad av skada. Från USACE (2007).

3.5.8 EMI Streetblast

EMI Streetblast, Dörr *et al.* (2004) är ett beräkningsprogram för explosionslaster i stadsmiljö som är framtaget av EMI (Ernst Mach Institute) i Tyskland. Programmet är uppbyggt utgående från sammanställda explosionsförsök i varierande gatukonfigurationer. Resultaten ges som förenklade lastbilder beroende på avstånd och vald konfiguration, se Figur 3.25



Figur 3.25 Grafiskt användargränssnitt i programmet EMI Streetblast. Från Dörr et al. (2004).

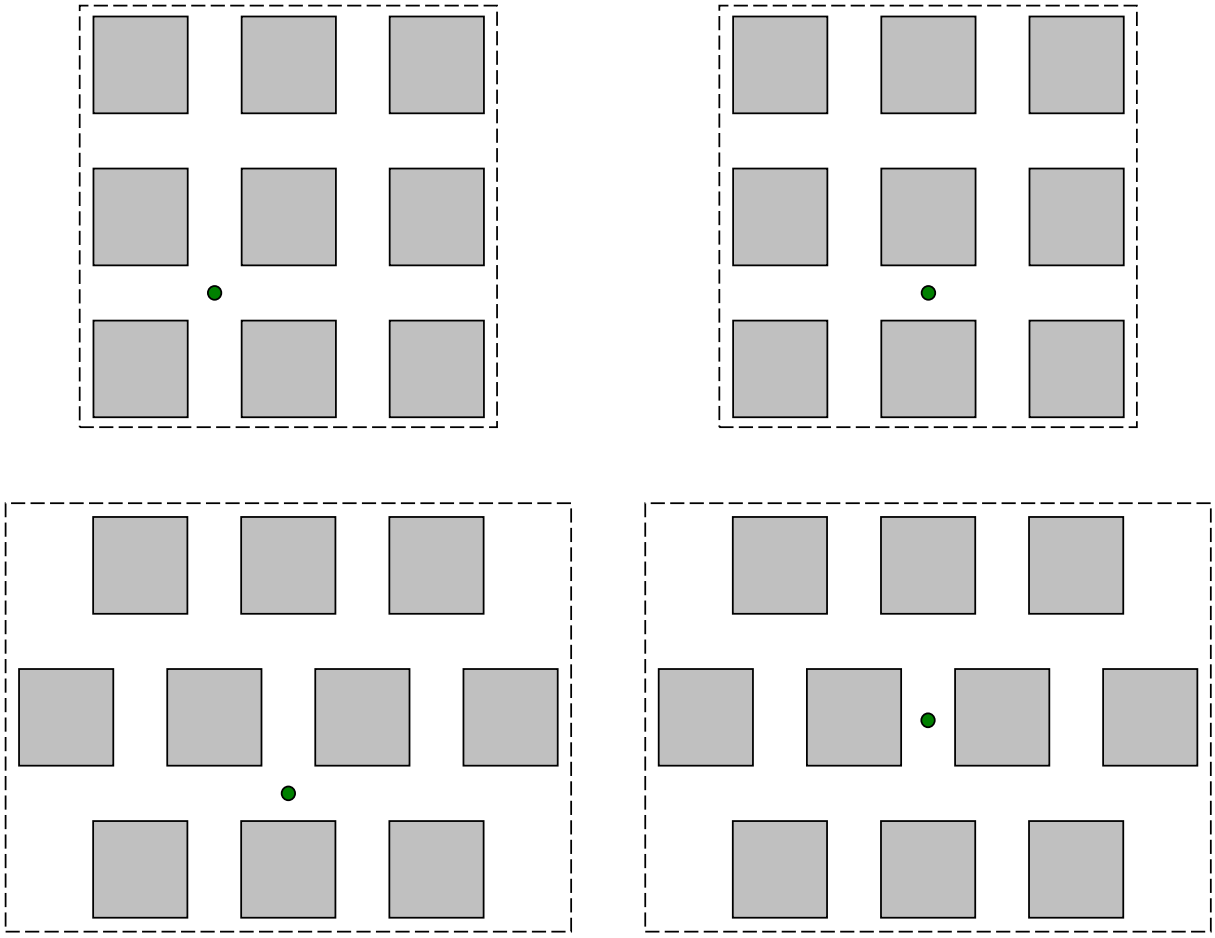
3.5.9 AT planner

AT planner (Antiterrorist planner) är ett programverktyg framtaget av amerikanska armén med syfte att användas för att snabbt utvärdera enskilda byggnaders och anläggningars säkerhet med hänsyn till potentiella terroristattacker. Programmet används bland annat vid planering av amerikanska armébaser men har även möjlighet att nyttjas till mer än detta. I AT planner är betoningen lagd på att bedöma motståndskraften hos byggnader, fönsterrutor och människor samt speciella konstruktioner såsom skyddande barriärer mot rammande fordon. Programmet är utvecklat för att vid behov kunna användas av stridande ingenjörer ute i fält.

4 Explosion i stadsmiljö

4.1 Orientering

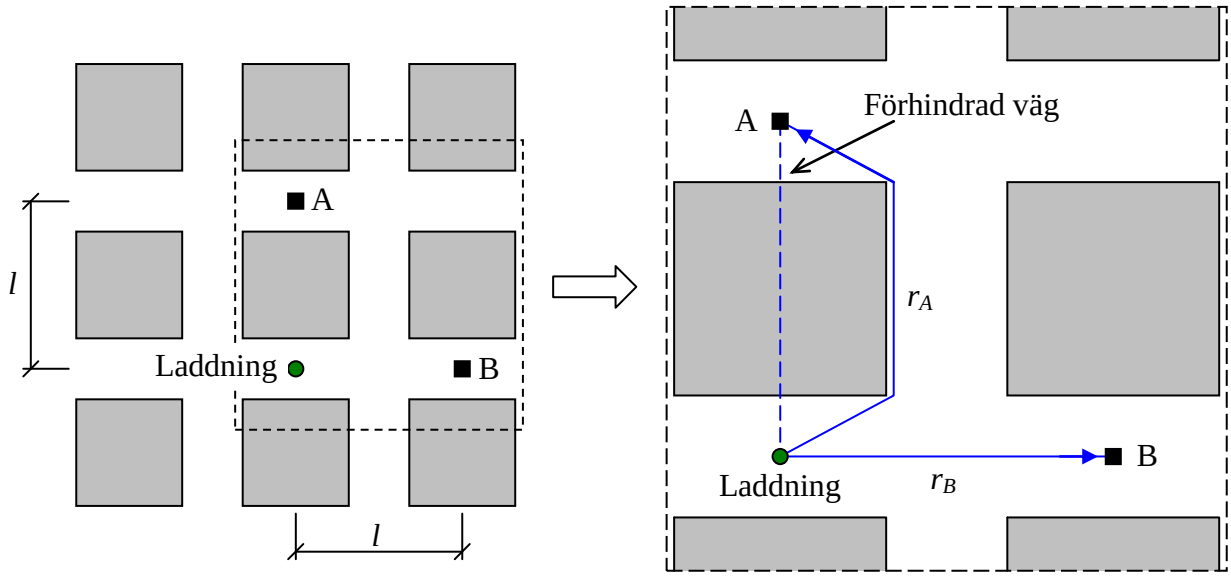
Laddningens läge i förhållande till omgivande bebyggelse är av stor vikt. På samma sätt har bebyggelsens utformning stor inverkan på vilka laster som kan uppstå i den. Figur 4.1 visar några schematiska exempel på olika geometriska utformningar och lägen på laddningen, vilket kommer resultera i olika lasteffekter på omgivningen.



Figur 4.1 Schematiskt exempel på olika stadsmiljöer och placering av laddning.

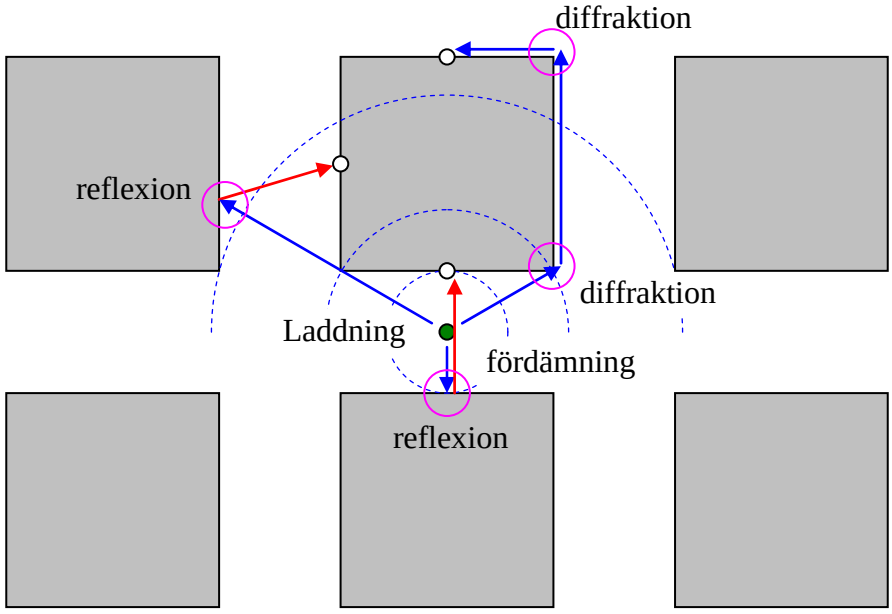
De i avsnitt 3.4.4 redovisade empiriska uttrycken gäller för explosionslast när den inte störs av sin omgivning. Vid explosion i en omgivning med mer komplexa geometriska förhållanden kommer dock fenomen såsom diffraktion, reflexion i olika vinklar, överlagring av flera stötvågor samt fördämning få betydande inverkan på resulterande lastbild. Vid explosion i stadsmiljö kommer explosionslasten därför variera beroende på hur dess utbredningsmöjligheter ser ut. För en godtycklig punkt på ett givet avstånd kan explosionslasten styrka, jämfört med ostörda förhållanden, både minska och öka beroende på det geometriska förhållandet. Figur 4.2 visar ett schematiskt exempel på detta för två punkter, punkt A och punkt B, som är placerade sträckan l bort från laddningen. Punkt A är placerad i lä bakom en byggnad och punkt B på samma gata som laddningen. Stötvågens väg fram till punkt A hindras dock av en byggnad, varför dess färdväg dels förlängs från sträckan l till r_A och dels tvingas gå runt hörn, något som via diffraktion ytterligare

minskar dess styrka. För punkt B får dock intilliggande byggnader motsatt effekt. Den sträcka r_B som stötvågen behöver färdas är visserligen densamma som det faktiska avståndet l mellan laddning och studerad punkt men eftersom byggnaderna här förhindrar stötvågens utbredning åt sidorna ökar explosionens energiintensitet i gatan. Detta resulterar därför också i högre tryck och impulstäthet i punkt B än vad som skulle varit fallet för samma avstånd vid fri avlastning.



Figur 4.2 Schematiskt exempel av hur stadsmiljön kan påverka stötvågens utbredning.

En mer detaljerad kontroll visar att det tryck som uppstår i en given punkt kommer vara resultatet av ett samspel mellan resulterande stötvåg och omgivande byggnader, se Figur 4.3. Av denna framgår att en explosion i stadsmiljö kommer ge upphov till en komplex kombination av reflexion, fördämning samt diffraktion. Hur stor inverkan som omgivande geometri har i varje enskilt fall är en mycket komplex fråga och är något som detta arbete avser belysa.



Figur 4.3 Tydliggörande av stötvågsfenomen som uppstår vid explosion i bebyggelse.

4.2 Utförda studier

4.2.1 Studerade parametrar – orientering

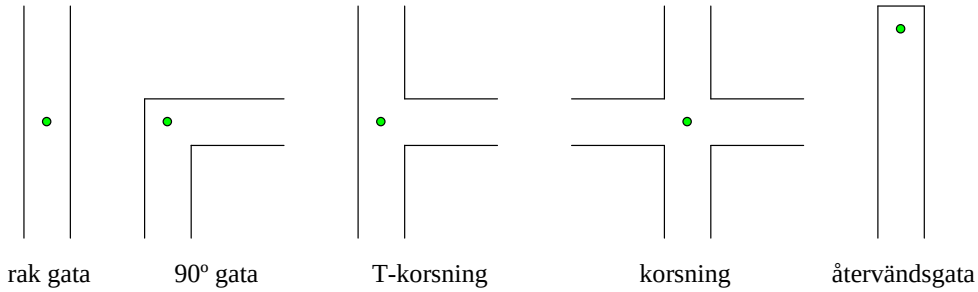
I litteraturen finns ett stort antal studier som inriktat sig på omgivningens inverkan på resulterande stötvågsparametrar och nedan ges en övergripande genomgång av dessa. För ytterligare information om detta hänvisas även till Johansson och Laine (2012a). Nedan listas huvudsakliga parametrar som inverkar på vilken slutlig last som fås vid explosion i stadsmiljö:

- gatukonfiguration (rak gata, 90º gata, T-korsning, korsning, återvändsgata etc.)
- gatans bredd
- byggnadshöjd
- öppningar i byggnadsfasad

I avsnitt 4.2.2 till 4.2.4 ges en övergripande genomgång av vilken inverkan olika parametrar har på explosionslasten i stadsmiljö. Presenterade resultat syftar inte till att ge en fullständig överblick utan ska snarast ses som en exemplifiering av de effekter som fås. Om inget annat anges syftar redovisade resultat på den positiva fasen. I avsnitt 4.2.6 sammanställs även aktuella referenser i vilka dessa parametrar studeras närmare.

4.2.2 Inverkan av gatukonfiguration

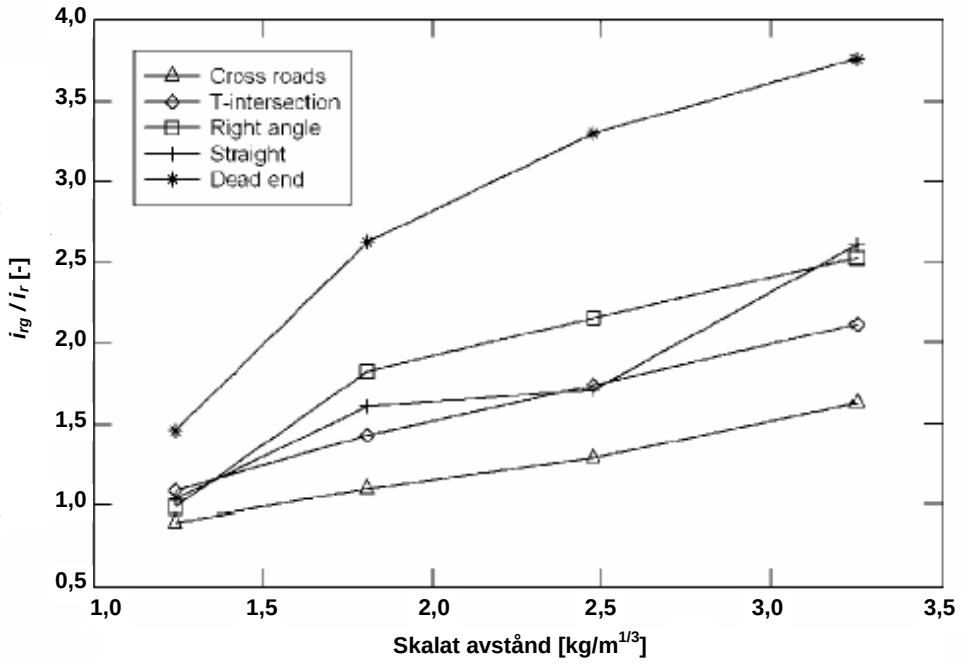
I Figur 4.4 visas exempel på typiska gatukonfigurationer. Bland annat Smith *et al.* (2001) har studerat gatukonfigurationens inverkan på impulstätheten med hjälp av skalförsök (skala 1:50) och analyser. Gatornas bredd och höjd var 0,3 m (motsvarar 15 m) respektive 1,0 m (50 m). Laddningen, motsvarande 12 g TNT (2000 kg), simulerade en bilbomb och placerades i gatans mitt så som illustreras i Figur 4.4 på en höjd om 25 mm (1,25 m). Tryckmätningar gjordes utmed ena väggen längs med gatan.



Figur 4.4 Exempel på olika gatukonfigurationer. Laddningens placering visas med cirkel. Baserad på Smith et al. (2001).

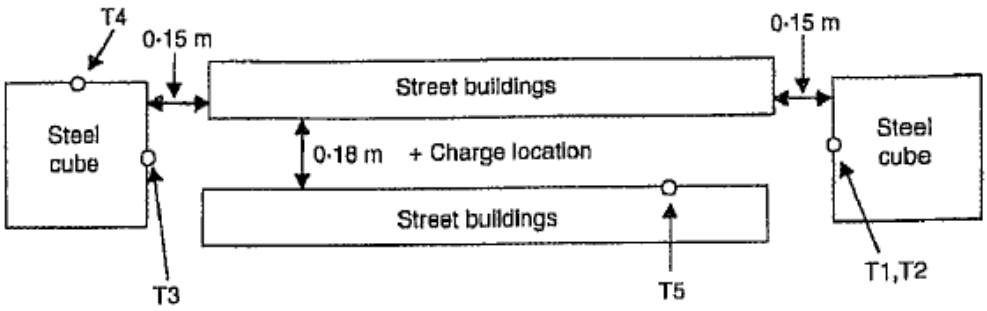
I Figur 4.5 visas en sammanställning från denna studie där kvoten mellan reflekterad impulstäthet i_{rg} längs gatans vägg jämförs med impulstätheten i_r från en ostörd hemisfärisk explosion. Av resultaten framgår tydligt den betydande inverkan som gatukonfigurationen har på resulterande lastnivåer. Korsningen, vilken ger störst möjlighet till avlastning, resulterar i lägst ökning medan en återvändsgata, med störst fördämning, ger störst ökning. Det ska också noteras att den relativa ökningen av impulstätheten ökar med ökat avstånd, dvs. fördämningseffekten får procentuellt sett

ökad effekt på större avstånd från sprängladdningen.

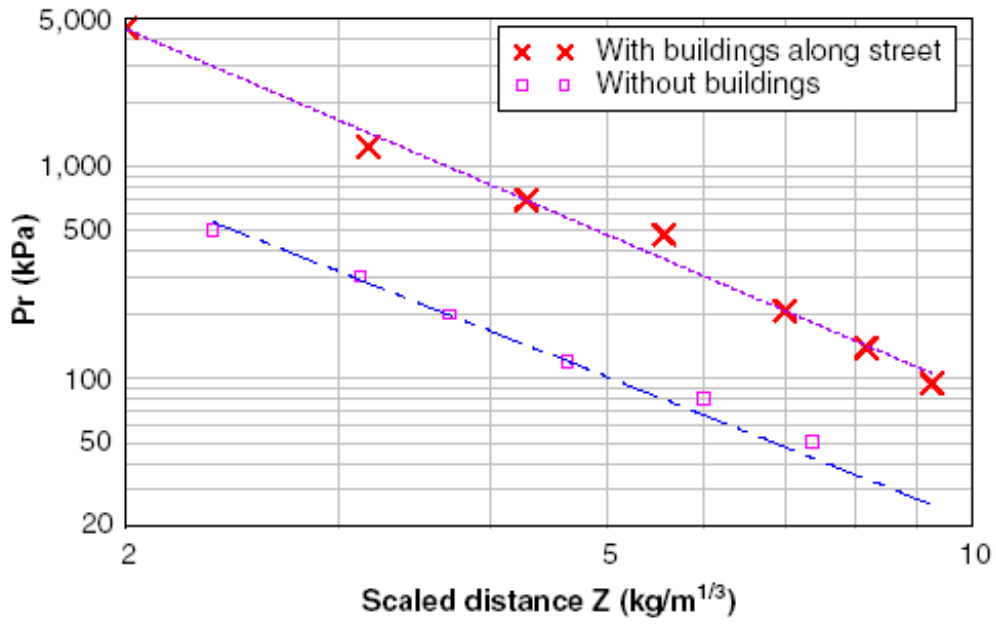


Figur 4.5 Inverkan på imulsintensiteten av varierande gatukonfiguration. Baserad på Smith et al. (2001).

Uppställningen för en annan studie (skala 1:50) som presenteras i Smith *et al.* (2001) visas i Figur 4.6. Två byggnader placerades i varsin ända av en lång gata och en laddning placerades i gatans mitt på omkring en tredjedel av avståndet mellan de båda byggnaderna. I Figur 4.7 visas det reflekterade övertrycket P_r både för fallet med den högra byggnaden samt fall utan fördämnings-effekt från intilliggande byggnader. Av detta framgår att den fördämningseffekt som uppstår när stötvågens utbredning hindras resulterar i en markant ökning av trycket.



Figur 4.6 Lastuppställning i skalförsök (1:50) för studie av gatukonfigurationens inverkan på explosionslastens styrka. Från Smith et al. (2001).

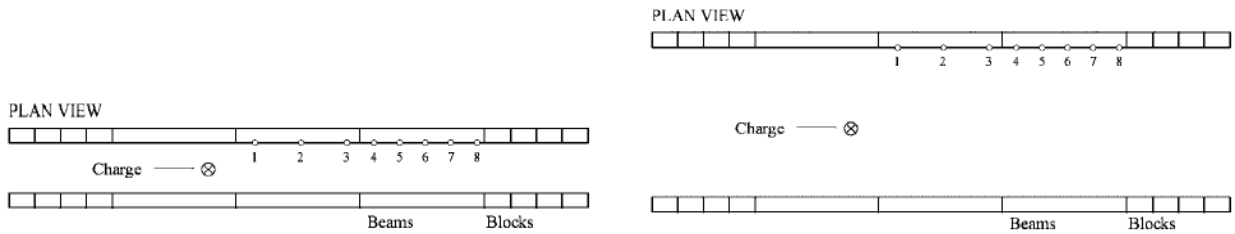


Figur 4.7 *Jämförelse av reflekterat övertryck P_r (punkt T1, T2 i Figur 4.6) när stötvågens utbredning påverkas av byggnader respektive har möjlighet till fri utbredning. Figur från Smith och Rose (2006).*

4.2.3 Last vid gata utan sidogator

4.2.3.1 Orientering

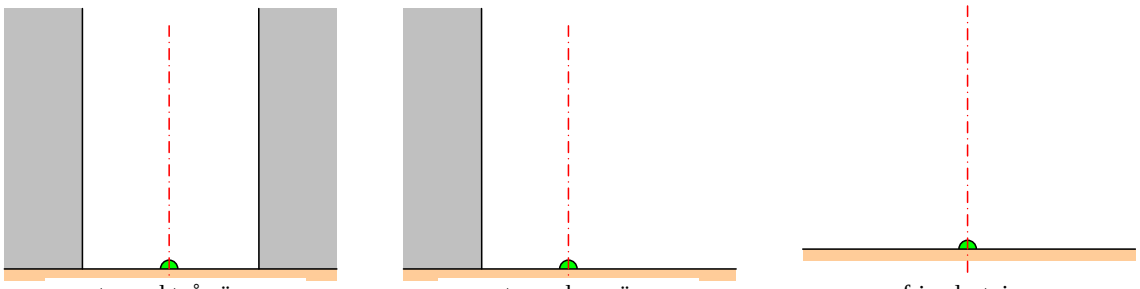
Redovisade resultat i avsnitt 4.2.2 visar att gatukonfigurationen kan ha stor betydelse för den resulterande lasteffekten. Inverkan av gatans bredd samt höjd hos intilliggande hus påverkar dock fördämningens omfattning. Rose och Smith (2002a) har utfört en omfattande parameterstudie baserad på skalförsök och kompletterande beräkningar i finita elementprogrammet Air3D i vilken inverkan av dessa båda parametrar undersöktes. Figur 4.8 visar principiell uppställning med laddningens läge på marken i gatans mitt. Samtliga avstånd relaterades till laddningen med nyttjande av samma princip som för skalat avstånd *Z*, se avsnitt 3.4.3.5. Gatubredden varierades mellan 1,6-4,8 m/kg$^{1/3}$ och byggnadshöjden varierades mellan 1,0-4,0 kg/m$^{1/3}$, alternativt sattes till oändligt hög. Resultat studerades längs en linje i marknivå i gatans mitt och redovisas i form av skalad impulstäthet $i_s / W^{1/3}$ i avsnitt 4.2.3.2 respektive avsnitt 4.2.3.3.



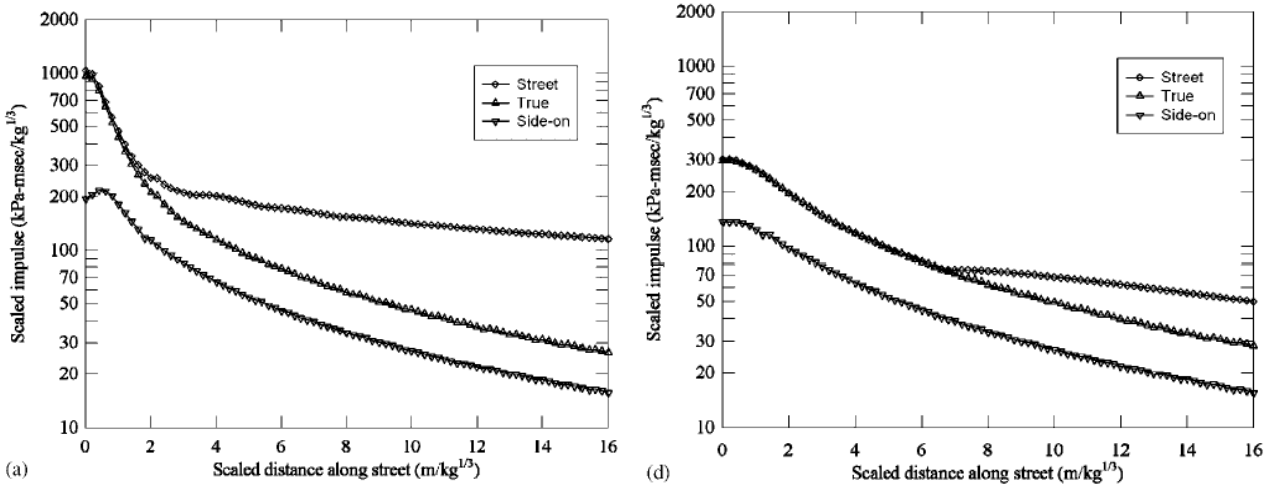
Figur 4.8 *Lastuppställning för studie på last vid gata utan sidogator, gatubredd: 400 mm respektive 1200 mm. Från Rose och Smith (2002a).*

4.2.3.2 Inverkan av gatubredd

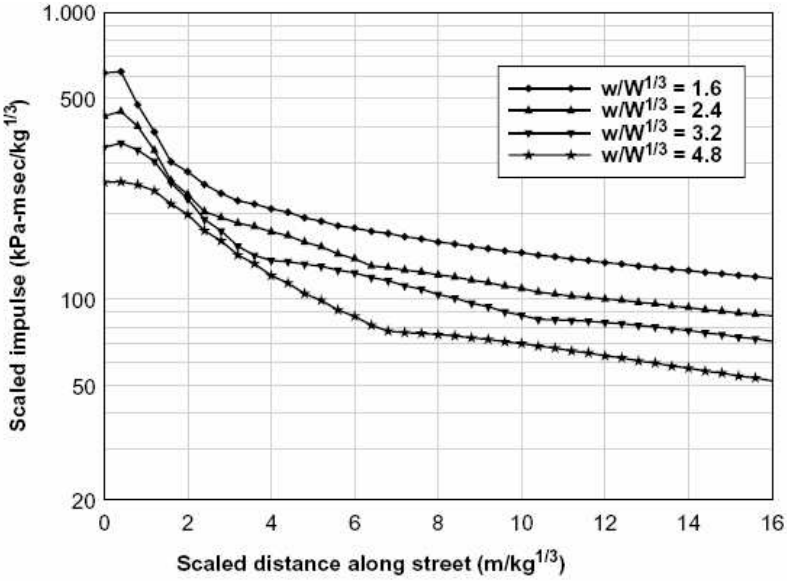
För att tydliggöra den inverkan som fördämningen får när stötvågens utbredning hindras av en vägg jämförde Rose och Smith (2002a) lastnivåer för belastningsfallen som illustreras i Figur 4.9. Detta innebär en laddning placerad på marken i gatans mitt med två, en eller ingen vägg (med oändlig höjd) som förhindrar stötvågens utbredning. Skalade impulstätheter från denna jämförelse visas i Figur 4.10 varav framgår att gata med en eller två väggar inledningsvis ger samma resultat. Avvikelse i resultat inträder också senare för en bred gata eftersom det tar längre tid för en reflekterad stötvåg att påverka resultaten i gatumitt för ett sådant fall. För gata med två väggar återges i Figur 4.11 hur impulstätheten varierar med gatubredden i fallet med oändligt höga byggnader.



Figur 4.9 Studerade gatukonfigurationer för lastuppställning enligt Figur 4.8. Gatans sidor motsvarar oändligt höga väggar.



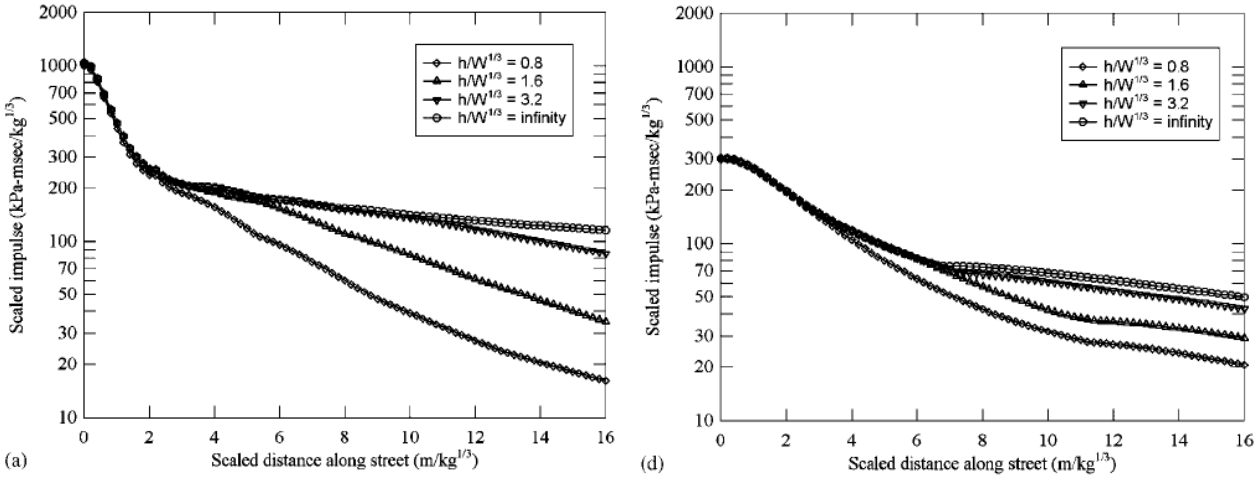
Figur 4.10 Skalad positiv impulstäthet i gatumitt för studie enligt Figur 4.8 och Figur 4.9. Skalad gatubredd uppgår till (a) 1,6 och (d) 4,8 m/kg$^{1/3}$. Från Rose och Smith (2002a).



Figur 4.11 Skalad positiv impulstäthet i gatumitt för gata kantad av två oändligt höga väggar. Från Rose och Smith (2002a).

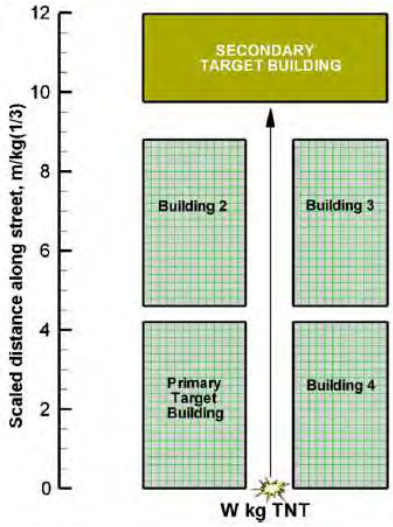
4.2.3.3 Inverkan av byggnadshöjd

Inverkan av höjd hos intilliggande byggnader visas i Figur 4.12. Av jämförelsen framgår att skillnad i byggnadshöjd får större inverkan på en smal än en bred gata. Vidare konstaterar Rose och Smith (2002a) att skillnaden i impulstäthet är liten, när byggnadshöjden uppgår till $h / W^{1/3}$ = 3,2 m/kg$^{1/3}$ respektive är oändligt hög. Av detta drar Rose och Smith slutsatsen att denna gräns i praktiken kan användas som mått för när maximal effekt uppnås.

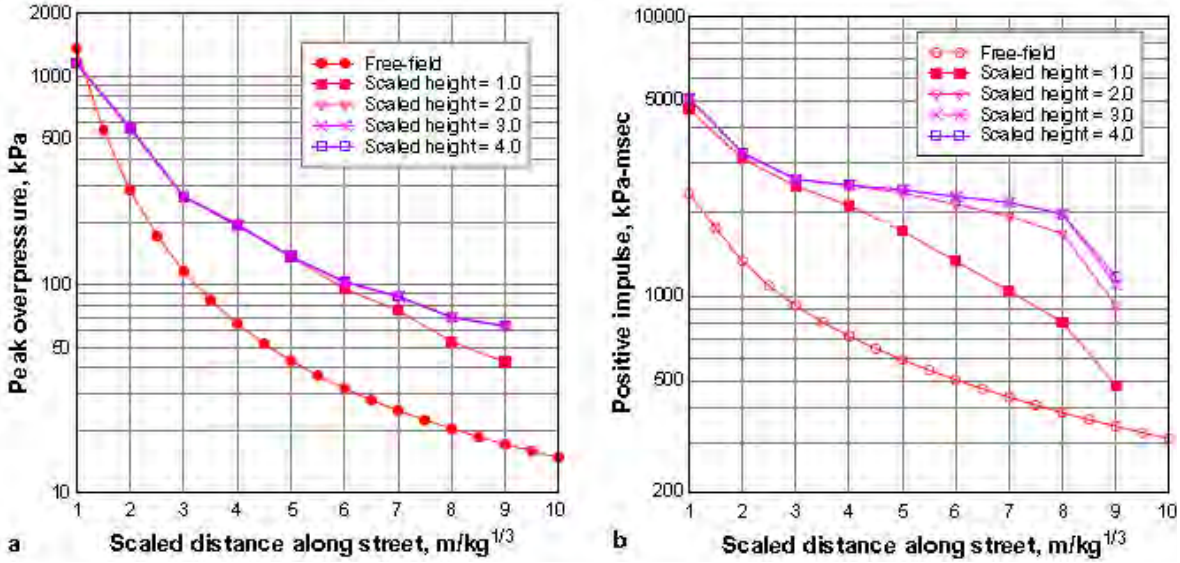


Figur 4.12 Skalad positiv impulstäthet i gatumitt för studie enligt Figur 4.8. Skalad gatubredd uppgår till (a) 1,6 och (d) 4,8 m/kg$^{1/3}$. medan höjden varierar mellan 0,8-3,2 m/kg$^{1/3}$ samt oändligt hög. Från Rose och Smith (2002a).

Remenikov och Rose (2005) har presenterat en liknande studie som Rose och Smith (2002a) över inverkan på lasten längs en gata med byggnader på båda sidor. Med hjälp av programmet Air3D har de studerat hur det oreflekterade trycket och impulstätheten varierar längs med en gata med bredden 1,0 kg/m$^{1/3}$. Laddningen placerades på marknivå i mitten av gatan på det skalade avståndet 0,5 kg/m$^{1/3}$ från respektive gatuvägg och höjden hos intilliggande byggnader varierades mellan 1,0-4,0 kg/m$^{1/3}$, se Figur 4.13. Presenterade resultat återges i Figur 4.14 där jämförelse görs med motsvarande tryck och impulstätheter från en hemisfärisk laddning med möjlighet till fri avlastning. Av detta framgår att de intilliggande husens fördämningseffekten får stor inverkan på resulterande laster. Det kan också noteras att en varierande byggnadshöjd har relativt liten inverkan på trycket samt för impulstätheten när den skalade höjden är ≥ 2,0 m/kg$^{1/3}$.



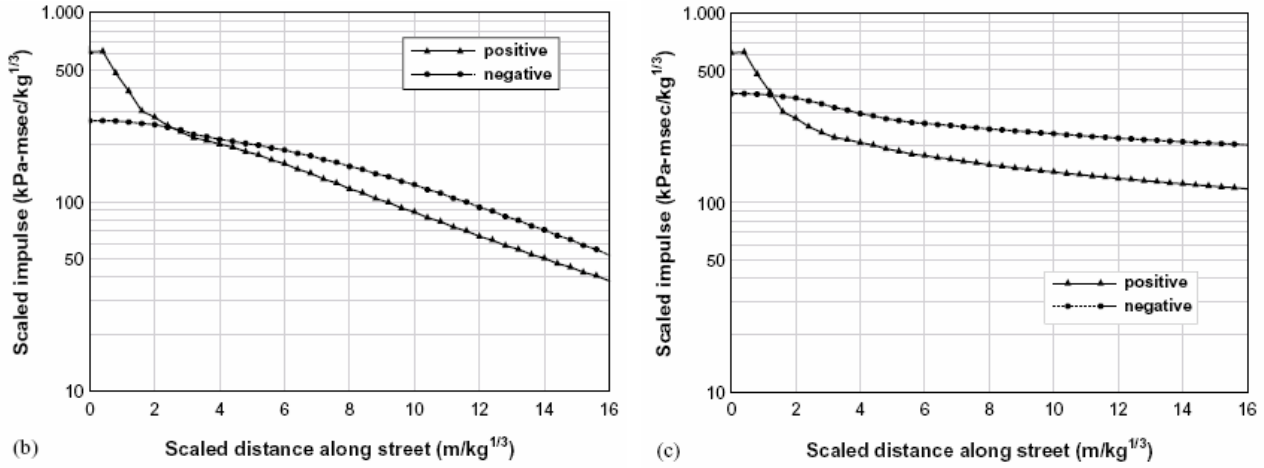
Figur 4.13 Lastuppställning för numerisk parameterstudie utförd av Remennikov och Rose (2005). Byggnadshöjder varierades mellan 1,0-4,0 kg/m$^{1/3}$.



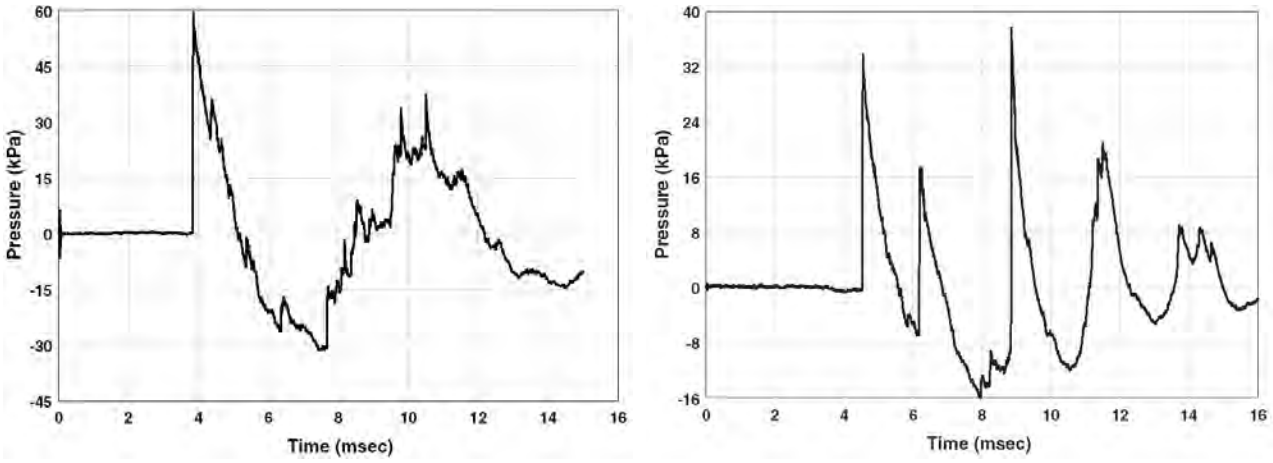
Figur 4.14 Jämförelse av oreflekterat tryck och impulstäthet för studie med lastuppställning enligt Figur 4.13. Från Remennikov och Rose (2005).

4.2.3.4 Inverkan på negativ impuls

Smith och Rose (2002) visar att den negativa impulstätheten blir större än den positiva för de flesta kombinationer av gatubredd och höjd. Undantaget här är gator med låg höjd (0,8 m/kg$^{1/3}$) eller med oändlig höjd. I Figur 4.15 jämförs storleken på den positiva och negativa impulstätheten för ett fall med konstant gatubredd 1,6 m/kg$^{1/3}$ samt hushöjd 1,6 m/kg$^{1/3}$ respektive 6,4 m/kg$^{1/3}$. Av detta kan noteras att för ett skalat avstånd Z större än omkring 2 m/kg$^{1/3}$ överstiger den negativa impulstätheten den positiva. Smith och Rose (2002) konstaterar också att gatans bredd har betydande inverkan på den negativa impulstätheten, där en smal gata genererar större värde än en motsvarande bred gata, se Figur 4.16.



Figur 4.15 Skalad impulstäthet i gatumitt där där skalad gatubredd uppgår till 1,6 m/kg$^{1/3}$ med höjden (b) 1,6 m/kg$^{1/3}$ och (c) 6,4 m/kg$^{1/3}$. Från Rose och Smith (2002a).



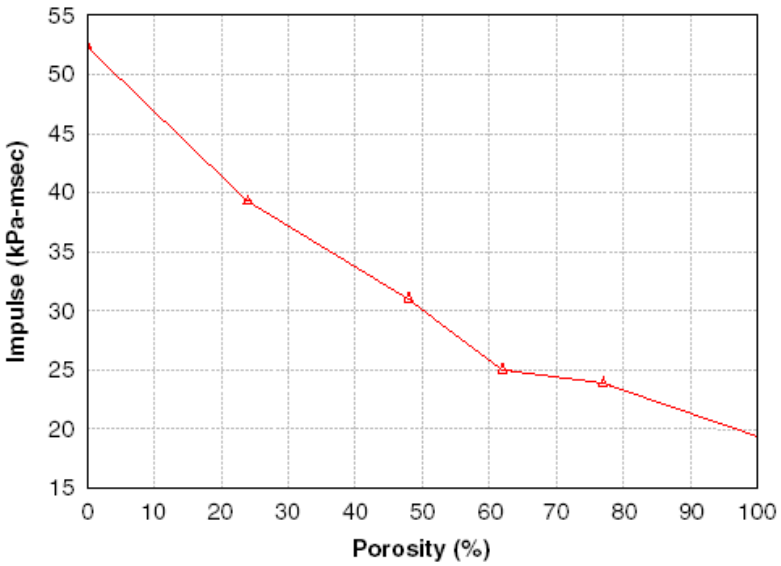
Figur 4.16 Tryck-tidssamband för explosion i smal (vänster) respektive bred (höger) gata med byggnader på båda sidor. Från Smith och Rose (2002).

Observationen att den negativa impulstätheten ofta överstiger den positiva har betydelse för att förklara att det i explosionssituationer i stadsmiljö ofta förekommer att fönsterrutor fallit ut ur och inte in i byggnaden. Utökad information om beteenden hos den negativa fasen är därför av betydande intresse för att kunna bedöma faran med en explosion i bebyggelsen.

4.2.4 Inverkan av fasader med hål

I de i avsnitt 4.2.2 och 4.2.3 refererade studier har byggnader approximerats som släta block utan öppningar. I en riktig byggnad är så dock inte fallet eftersom det i en sådan finns olika typer av öppningar såsom dörrar och fönster. Bland annat Smith *et al.* (2003) har utfört studier om vilken inverkan dessa öppningar har på stötvågens utbredning längs en gata. De introducerar begreppet porositet för att benämna den procentuella andelen öppningar i byggnadens fasad, se Figur 4.17. I Figur 4.18 presenteras hur impulstätheten för en given lastsituation varierar med hänsyn till olika porositet och av detta inses att öppningar i fasaden kommer ha betydande inverkan på explosionslastens storlek.

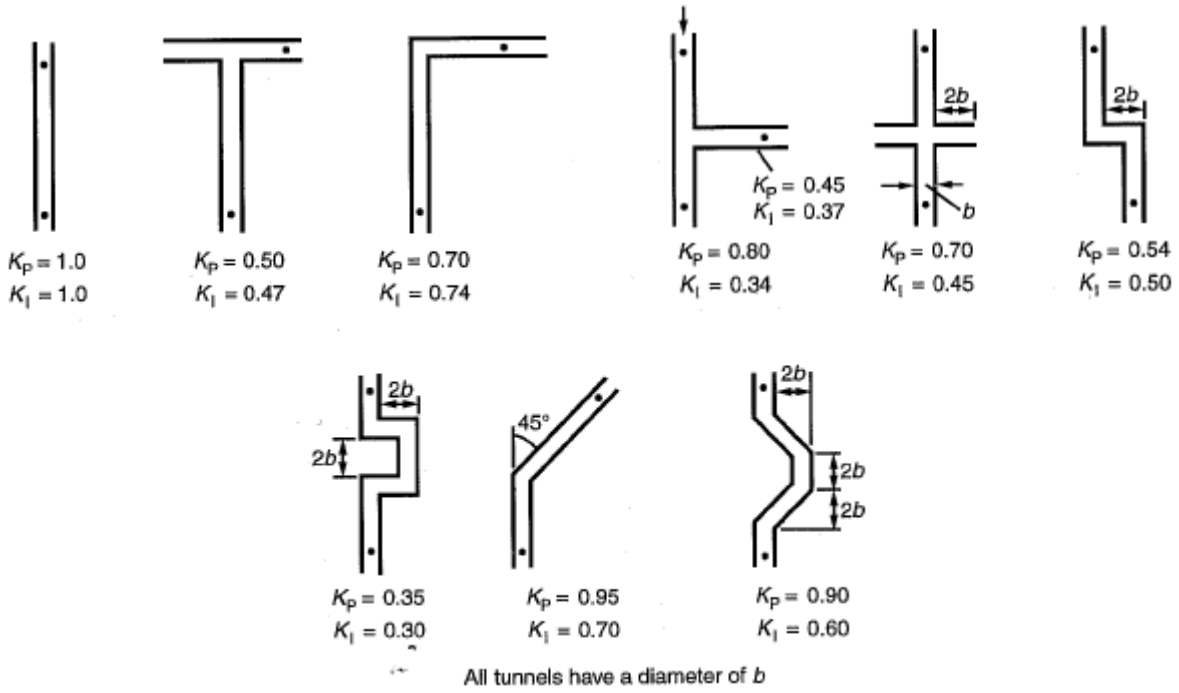
Figur 4.17 Modellbyggnad med porositet 48 % där porositeten definieras som area öppningar / total fasadarea. Från Smith et al. (2003a).



Figur 4.18 Modellbyggnad med porositet 48 %, där porositeten definieras som area öppningar / total fasadarea. Från Smith et al. (2003a).

4.2.5 Tunnlar

I litteraturen finns en hel del arbete rapporterat om vad som sker med explosionslasten i tunnlars förgreningar. I Figur 4.19 ges exempel på reduktionsfaktorer för tryck (K_P) och impulstäthet (K_I) för olika typer av förgreningar som enligt Bulson (1997) rapporterats av Christopherson (1946). Även om stötvågens utbredning i ett tunnelsystem skiljer sig från den som fås i ett gatunät i stadsmiljö så är ändå likheterna sådana att en jämförelse dem emellan kan ge användbar information. Någon närmare jämförelse eller diskussion av detta görs dock inte i denna publikation utan syftar främst till att väcka frågan om att en sådan möjlighet finns.



Figur 4.19 Reduktionsfaktorer i tunnlar enligt Christopherson (1946). Punkterna i figurerna anger laddningens respektive mätpunktens läge. K_P och K_I anger reduktionsfaktor för tryck respektive impulstäthet. Figur baserad på Bulson (1997).

4.2.6 Sammanställning av aktuella referenser

I Tabell 4.1 ges en sammanställning av referenser som behandlar hur explosionslasten påverkas när denne sker i stadsmiljö och/eller i närheten av en enskild byggnad. En del av dessa referenser berörs även kort i avsnitt 4.2.2 till avsnitt 4.2.5.

Tabell 4.1 Sammanställning av referenser för explosion i stadsmiljö.

Referens	Titel
Dewey och van Netten (2002)	Calculating Blast-Effects Distances in Urban Environments
Dörr *et al.* (2004)	Blast behind street junctions originating from vehicle bombs
Heilig (1995)	Oblique reflexion of decaying pressure waves
Remenikov (2005)	Evaluation of blast loads on buildings in an urban environment
Remennikov och Rose (2005)	Modelling blast loads on buildings in complex city geometries
Rice *et al.* (2000)	Experimental and numerical investigation of shock diffraction about blastwalls
Rose och Smith (2000)	An approach to the problem of blast wave clearing on finite structures using empirical procedures based on numerical simulations
Rose och Smith (2002a)	Influence of the principal geometrical parameters of straight city streets on positive and negative phase blast wave impulses
Rose och Smith (2002b)	An investigation of the effects of shielding of blast in an urban environment
Rose och Smith (2003a)	The influence of street junctions on blast wave impulses produced by vehicle bombs
Rose och Smith (2003b)	A rule-based approach for channelling and shielding
Rose och Smith (2004)	Oblique clearing: Blast loads on building at non-zero angles of incidence
von Rosen *et al.* (2004)	A preliminary investigation into the interaction of shock waves behind a simple rectangular structure
Sakula (1997)	The design of building facades for blast resistance. Proceedings of the International Conference on Building Envelope Systems and Technologies
Smith *et al.* (2001)	Blast loading on buildings from explosions in city streets
Smith och Rose (2002)	Blast loading and building robustness
Smith *et al.* (2003a)	Facade failure effects on blast propagation along city streets and into buildings
Smith *et al.* (2003b)	The effect of arrays of suburban buildings in providing shielding from blast
Smith *et al.* (2004)	The influence of areal density on the shielding and channelling of blast by buildings
Smith och Rose (2006)	Blast wave propagation in city streets – an overview

5 Analyser i Autodyn

5.1 Orientering

I avsnitt 3.4.4 presenteras empiriska samband för parametrar såsom tryck, impulstäthet och varaktighet för explosionslaster av varierande storlek och avstånd. I många fall är denna information tillräcklig för att ge en bild av vilken belastning som fås av en given explosion i ett givet läge. En begränsning i dessa samband är dock att de förutsätter helt (sfärisk) eller delvis (hemisfärisk) möjlighet till fri avlastning i luften samt att reflexion mot exponerad yta motsvarar en normalreflexion. För mer komplicerade belastningssituationer där laddningens placering och/eller omgivande geometri inte är så renodlad kan nyttan av dylika samband minska betydligt. Detta är fallet för explosion i bebyggelsen såsom beskrivs i kapitel 4, varför det för sådana situationer även behövs alternativa verktyg.

För att närmare studera denna typ av komplicerade belastningssituationer används avancerade finita elementprogram, baserade på konserverandet av massa, rörelsemängd och energi samt beaktande av ingående materials tillståndsekvation. I detta arbete har det generella finita elementprogrammet Autodyn, Century Dynamics (2004) använts för att simulera explosioner i luft med TNT-laddningar. Vid användande av denna typ av avancerade beräkningsprogram är det av stor vikt att inte glömma av att de resultat som erhålls aldrig är bättre än vad modelleringen tillåter. En kontinuerlig återkoppling till verkliga observationer, försöksresultat, av studerade fenomen är därför nödvändigt för att säkerställa riktigheten i programmets resultat. För att undvika att program-verktyget förvandlas till en ”svart låda” är det vidare viktigt att i steg söka förstå de fenomen som observeras i erhållna resultat för en gradvis ökande komplexitet hos belastningssituationen. Med anledning av detta begränsas användandet av Autodyn i den här publikationen till att simulera en fri utbredning i luften i olika dimensioner (sfärisk, cylindrisk och plan utbredning) med syfte att verifiera dess pålitlighet som beräkningsverktyg för fortsatta studier i projektet. Där så är möjligt jämförs erhållna resultat med ConWep (1992), se avsnitt 3.4.4 och 3.5.2, där ConWep får representera en samlad kunskap av det stora antal experiment som ligger till grund för detta program.

5.2 Modellering i Autodyn

5.2.1 Modelleringsteknik

Autodyn, Century Dynamics (2004) är en såkallad hydrokod vilket innebär att den kombinerar tekniker inom finita differens, finita element samt finita volym. Detta ger möjlighet att simulera materialrörelse på flera olika sätt och i här utförda analyser har en såkallad Eulerteknik använts. Enkelt uttryckt innebär detta att den studerade geometrin byggs upp av ett fast nät som materialet flödar genom. Dvs. i Eulerteknik deformeras aldrig nätet utan varje element bibehåller hela tiden sin volym medan materialet flödar mellan olika element baserat på en jämvikt av massa, rörelsemängd och energi.

I detta arbete har analyser av stötvågens utbredning i luften utförts. Detta görs genom simulering av detonation av sprängämnet varvid stötvågor breder ut sig i den omgivande luften på grund av den plötsliga energifrigörelsen. För att generera detta i Autodyn används en fluid bestående av en mix av två material: sprängämne (TNT) och luft.

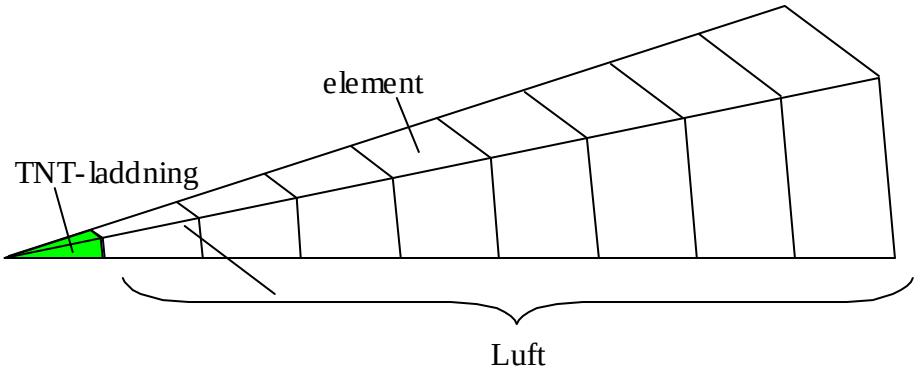
I utförda analyser har fri utbredning av stötvågen studerats. Detta har främst gjorts för tredimensionell (3D) sfärisk utbredning men som komplement även för tvådimensionell (2D) cylindrisk samt endimensionell (1D) plan utbredning. I samtliga dessa fall har en förenklad modelleringsteknik använts, vilken närmare beskrivs i avsnitt 5.2.2 till 5.2.4. Vidare har en analys av en sprängladdning placerad på mark utförts i vilken även markens egenskaper beaktats, se bilaga C.

I utförda analyser används genomgående en laddning bestående av TNT. Energifrigörelsen vid detonation av denna simuleras i analysen via tillståndsekvationen Jones-Wilkinson-Lee (JWL). Luftens egenskaper har modellerats som en ideal gas med en konstant värmekapacitetskvot $\gamma = 1{,}4$, temperatur $T_0 = 15$ºC och densitet $\rho_0 = 1{,}226$ kg/m^3. För ytterligare information om materialindata som använts i simuleringarna, se bilaga A. En utförlig beskrivning innehållande bland annat använd modelleringsteknik, val av modellernas elementstorlek samt ytterligare resultatjämförelser ges i simuleringsrapporten Larsen (2006).

I avsnitt 5.2.2 till 5.2.4 beskrivs de modeller som använts för att simulera fri utbredning i tre, två respektive en dimension. Storleken på ingående element har varierats men har varit konstant inom respektive modell. För resultatregistrering nära laddning har element med liten storlek använts medan det vid registrering på större avstånd har använts modeller med större element.

5.2.2 Fri sfärisk utbredning (3D)

Vid fri sfärisk utbredning (utbredning i tre dimensioner) är det möjligt att förenkla modellen så att utbredningen, via symmetrirandvillkor, kan simuleras i ett endimensionellt elementnät. Detta görs genom användandet av ett kilformat elementnät där storleken på respektive element växer med avståndet från explosionskällan, se Figur 5.1. Som kontroll gjordes för några fall även jämförelser med axialsymmetriskt (2D) elementnät och fullt tredimensionellt nät, vilket gav god överensstämmelse, se Larsen (2006). I analyserna kontrollerades även den skallag som presenteras i avsnitt 3.4.3.5 genom att låta explosionen utgöras av en laddning på 1,0 kg respektive 125 kg TNT. Erhållna resultat bekräftade skallagen och redovisas inte närmare här. För här redovisade analyser har en laddning på 125 kg TNT använts. Storleken på ingående element har varierats mellan 0,25 mm och 12 mm men har varit konstant inom respektive modell. Utförligare information om elementstorlekens inverkan ges i avsnitt 5.3.2.2.



Figur 5.1 Modellering av explosion från TNT-laddning vid fri sfärisk utbredning (3D), nyttjande ett endimensionellt kilformat elementnät i Autodyn.

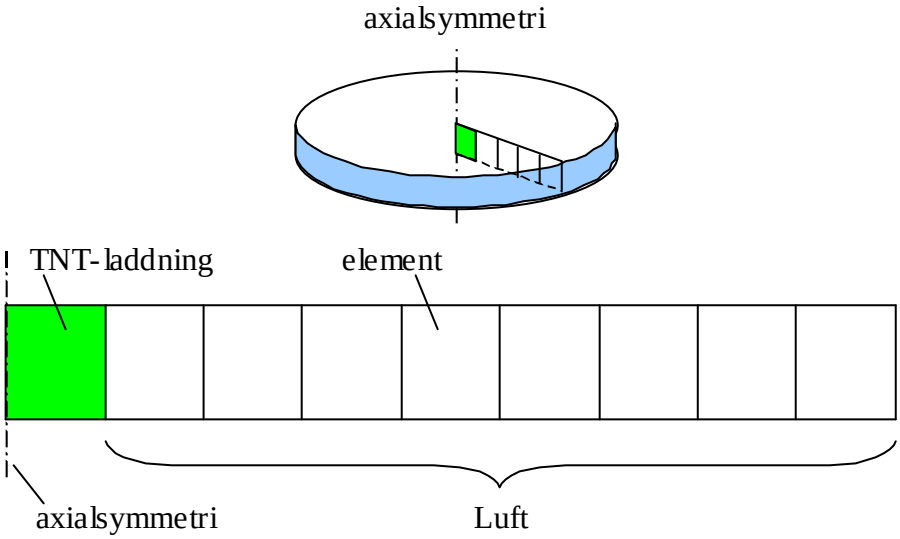
Tabell 5.1 Översättning av avstånd r till skalat avstånd Z vid användandet av en sprängladdning på 125 kg TNT.

r [m]	0,5	1	1,5	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Z [m/kg$^{1/3}$]	0,1	0,2	0,3	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0

r [m]	12	15	20	25	30	35	40	50	60	80	100
Z [m/kg$^{1/3}$]	2,4	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	10	12	16	20

5.2.3 Fri cylindrisk utbredning (2D)

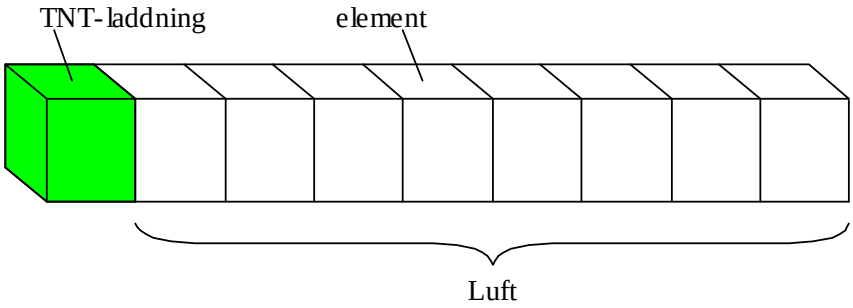
Vid fri cylindrisk utbredning (utbredning i två dimensioner) har ett endimensionellt nät i en axialsymmetrisk modell använts, se Figur 5.2. Detta symboliserar en sprängladdning formad som en rak linje från vilken stötvågen breder ut sig, jämför Figur 3.12b.



Figur 5.2 Modellering av explosion från TNT-laddning vid fri cylindrisk utbredning (2D), nyttjande ett endimensionellt elementnät i en axialsymmetrisk modell i Autodyn.

5.2.4 Fri plan utbredning (1D)

Vid fri plan utbredning (utbredning i en dimension) har ett endimensionellt nät använts, se Figur 5.3. Detta symboliserar en sprängladdning formad som ett plan från vilken stötvågen breder ut sig, jämför Figur 3.12c. Därmed simuleras en strimla av en korridor i vilken stötvågen breder ut sig.



Figur 5.3 Modellering av explosion från TNT-laddning vid fri plan utbredning (1D), nyttjande ett endimensionellt elementnät i Autodyn.

5.3 Resultat – fri sfärisk utbredning

5.3.1 Orientering

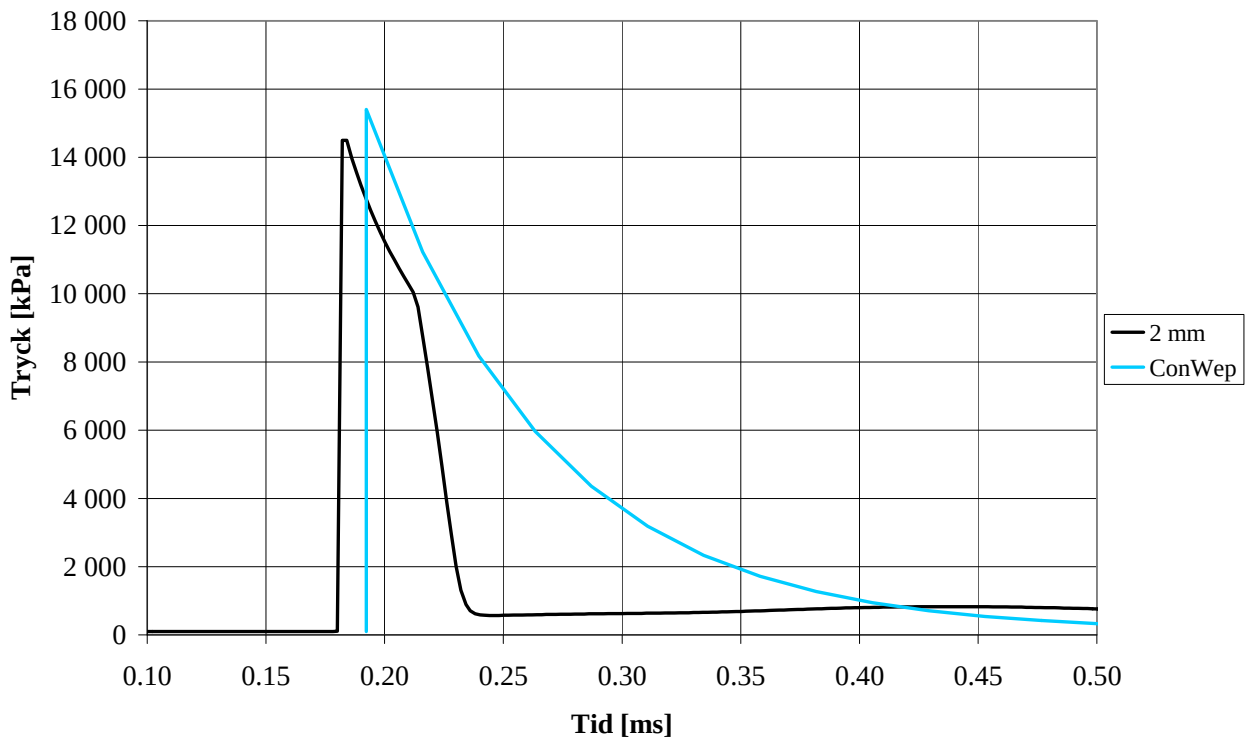
Stötvågsparametrar har tagits fram i Autodyn för skalade avstånd $0{,}1 \leq Z \leq 20$ m/kg$^{1/3}$ och jämförts med motsvarande resultat från ConWep. Generellt gäller att överensstämmelsen är god mellan de båda, även om det framgått några principiella skillnader som behandlas mer ingående nedan.

5.3.2 Positiv fas

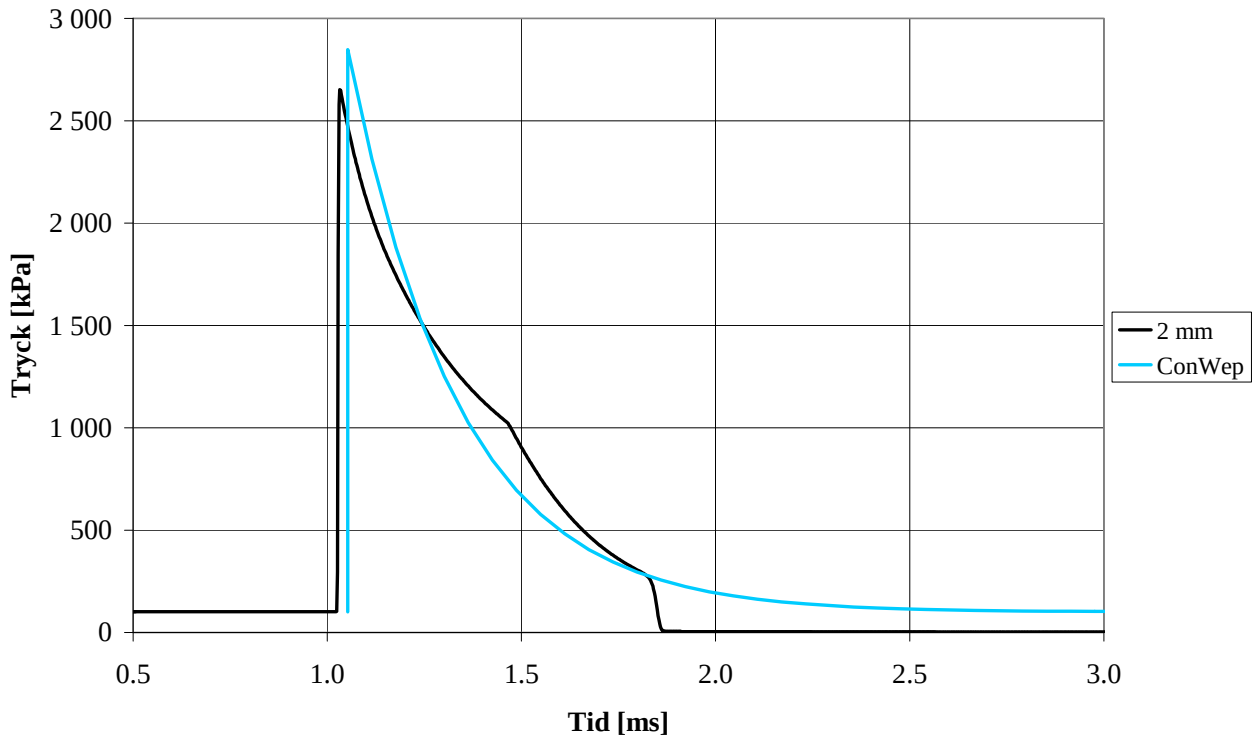
5.3.2.1 Tryck-tidssamband

I Figur 5.4 jämförs erhållet tryck-tidssamband från Autodyn och ConWep för ett skalat avstånd på $Z = 0{,}2$ m/kg$^{1/3}$ (siffran 2 mm anger att element av storleken 2 mm använts i analysen). Av detta framgår att ankomsttid och tryck är likvärdiga mellan de båda. Dock kan det observeras att formen på tryck-tidskurvan skiljer sig betänkligt. I ConWep används genomgående en exponentiellt avtagande form på tryckkurvan, se ekvation (3.3), medan detta inte blir fallet i Autodyn för ett så lågt värde på Z. I Autodyn sker istället en drastisk tryckminskning omkring 0,03 ms efter det att stötvågen nått fram. Denna plötsliga tryckminskning har observerats för samtliga laddningar med $Z \leq 0{,}6$ m/kg$^{1/3}$, där minskningen i tryckfall minskar med ökande värde på Z. För $Z = 0{,}6$ m/kg$^{1/3}$ blir tryckändringen relativt begränsad och överensstämmelsen med ConWep blir bättre, se Figur 5.5. För större värden, $Z \geq 0{,}8$ m/kg$^{1/3}$ fås inte längre denna knyck på tryckkurvan och överensstämmelsen med den i ConWep använda tryckkurvan ökar ytterligare, se Figur 5.6 och Figur 5.7. Orsaken till uppkomsten av dessa tryckändringar behandlas vidare i avsnitt 5.3.2.3.

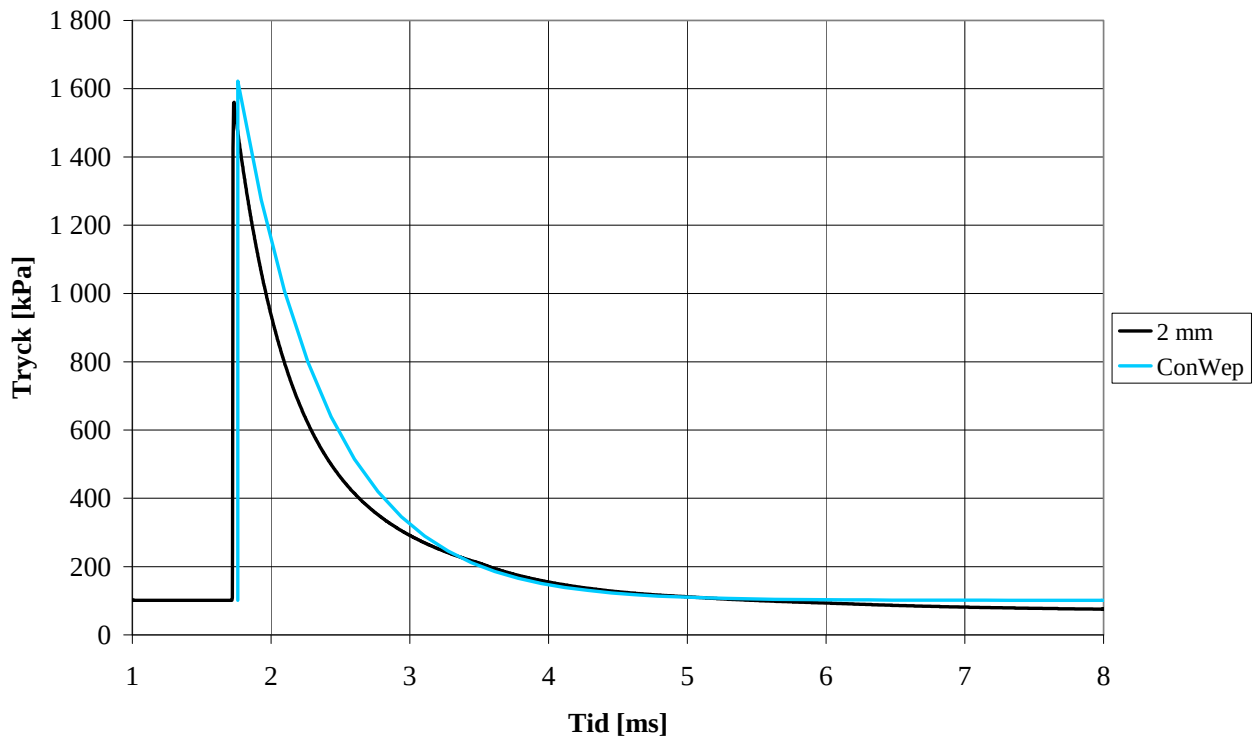
En fullständig jämförelse av tryck-tidssambanden för värden på det skalade avståndet $0{,}1 \leq Z \leq 20$ ges i bilaga B.



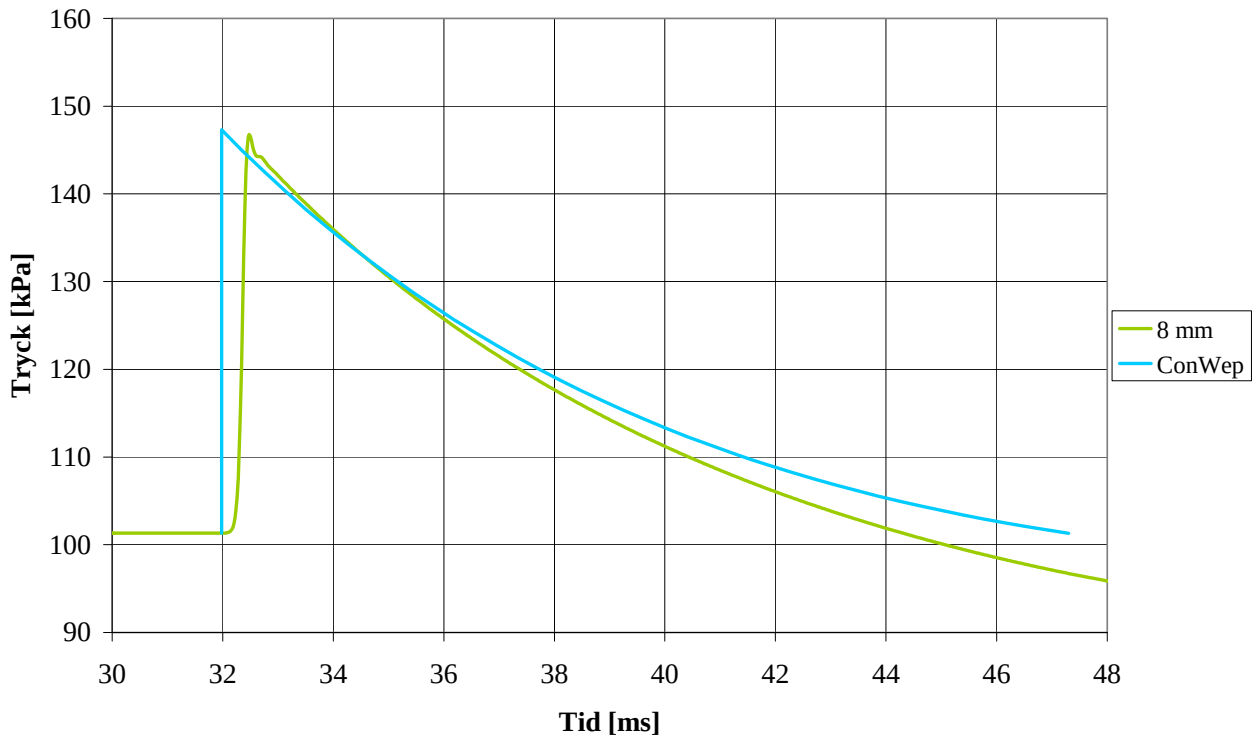
Figur 5.4 *Jämförelse av tryck-tidssamband från Autodyn och ConWep för en laddning på 125 kg TNT och skalat avstånd Z = 0,2m/kg$^{1/3}$. Siffra anger elementstorlek i Autodyn.*



Figur 5.5 *Jämförelse av tryck-tidssamband från Autodyn och ConWep för en laddning på 125 kg TNT och skalat avstånd Z = 0,6 m/kg$^{1/3}$.*



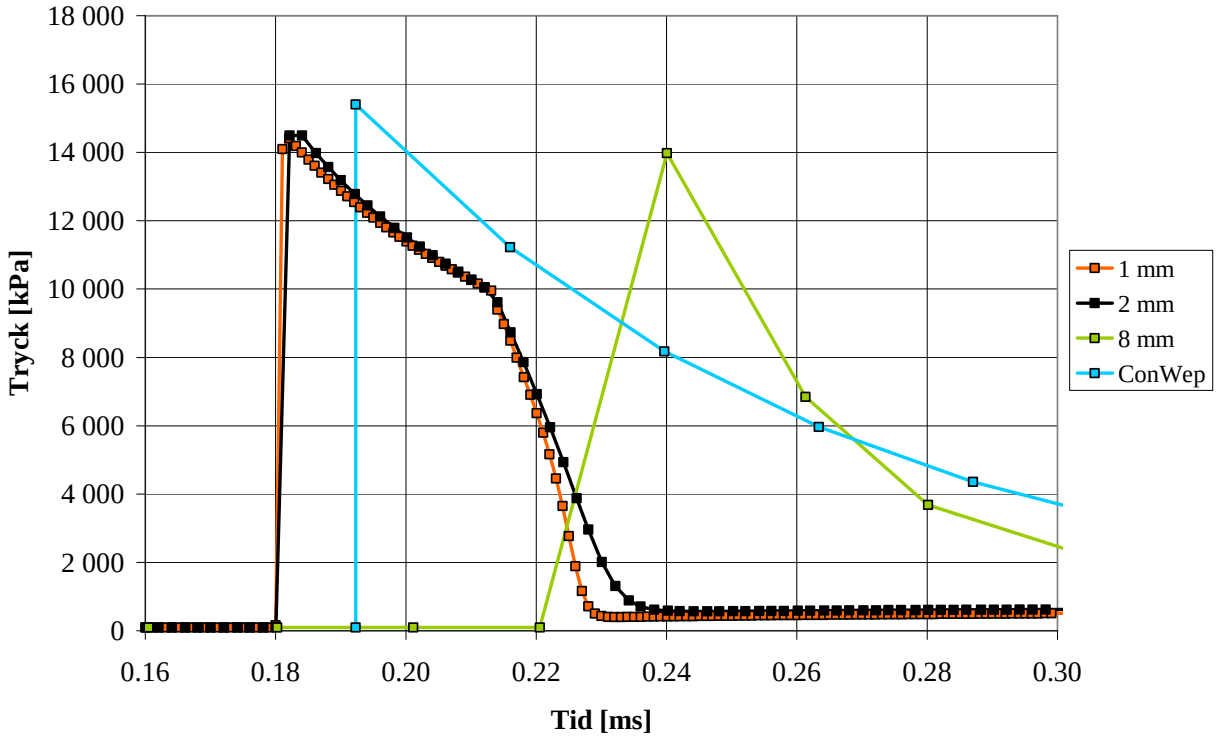
Figur 5.6 *Jämförelse av tryck-tidssamband från Autodyn och ConWep för en laddning på 125 kg TNT och skalat avstånd Z = 0,8 m/kg$^{1/3}$.*



Figur 5.7 *Jämförelse av tryck-tidssamband från Autodyn och ConWep för en laddning på 125 kg TNT och skalat avstånd Z = 4,0 m/kg$^{1/3}$.*

5.3.2.2 Inverkan av elementnät

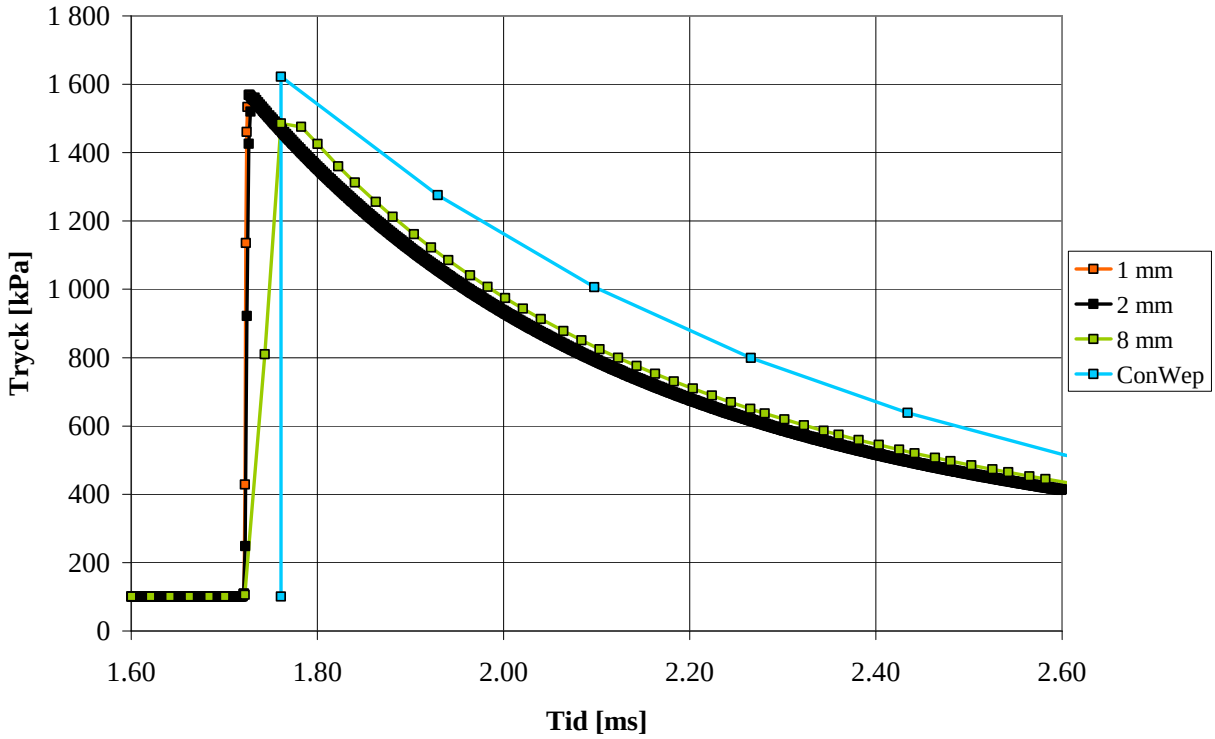
Elementnätets storlek inverkar på de resultat som fås i Autodyn. Detta gäller framförallt för resultat uttagna nära den detonerade laddningen där stötvågshastigheten är mycket hög. En hög stötvågshastighet kräver små elementstorlekar för att klara av simuleringen av den momentana tryckstegring som fås vid en explosionslast.



Figur 5.8 Jämförelse av tryck-tidssamband från Autodyn och ConWep för en laddning på 125 kg TNT och skalat avstånd Z = 0,2 m/kg$^{1/3}$.

I Figur 5.8 jämförs tryck-tidssambandet för stötvågen när Z = 0,2 m/kg$^{1/3}$ vid användandet av olika elementnät. Av jämförelsen framgår att resultaten är likvärdiga vid användande av elementnät av storleken 1 mm eller 2 mm. För större elementnät, här 8 mm, fås dock ett avvikande beteende. Skillnaden är särskilt tydlig i det ögonblick när stötvågen når fram till den studerade punkten. För de två fallen med finare elementnät fås en mer eller mindre ögonblicklig tryckökning medan den för fallen med större elementlängd blir betydligt mer utdragen i tiden. En anledning till detta är att resultatregistrering sker mer sällan för fall med större elementnät. En större elementstorlek innebär också att stötvågen beskrivs med färre beräkningspunkter vilket resulterar i att stötvågen blir mer utsmetad, något som bidrar till att den inledande stötvågsfronten inte fångas lika bra. Vidare kan det noteras att trycknivån skiljer sig något mellan de olika fallen. För fallen med 1 mm respektive 2 mm stora element framgår att trycktoppen inte prickats in perfekt utan att denna befinner sig någonstans emellan två resultatpunkter. För de större elementnäten går detta inte säkert att uttala sig om även om fallet rimligen är detsamma där – de maximala tryckvärden som registrerats utgör sannolikt också en del av den verkliga tryckkurvans avtagande del.

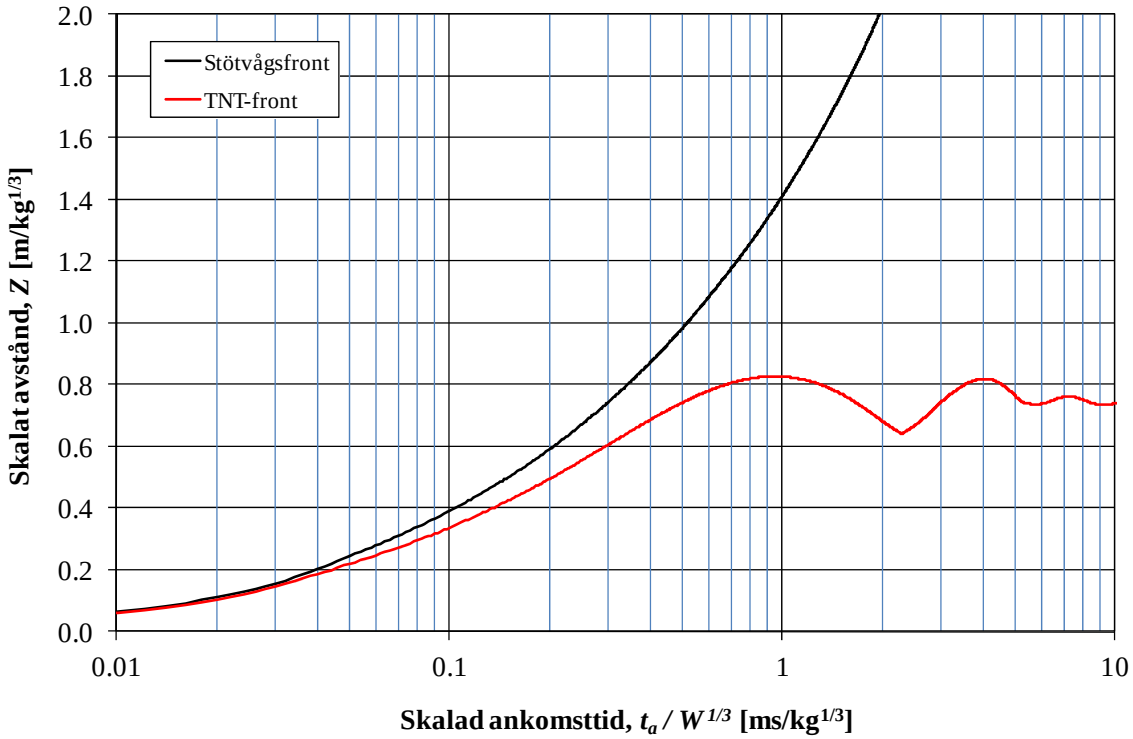
Ovanstående visar på vikten med tillräckligt fint elementnät samt täta resultatregistreringar när en punkt nära laddningen (lågt värde på *Z*) studeras. På större avstånd från laddningen erhålls dock en bättre överensstämmelse mellan analyser med varierande elementnät. I Figur 5.9 görs en jämförelse av tryckkurvan i sitt inledande skede för ett skalat avstånd av $Z = 0{,}8$ m/kg$^{1/3}$ och av detta framgår att skillnaderna är små. Förutom viss skillnad i lutningen hos tryckökningen när stötvågen når studerad punkt fås mer eller mindre samma beteende. Detta innebär att elementnätets storlek också minskar i betydelse vid studie av punkter som befinner sig lite längre ifrån detonerad laddning. I de tryck-tidssamband som ges i bilaga A har därför genomgående analyser baserade på element-storlekar av 2 mm eller 8 mm använts.



Figur 5.9 Jämförelse av tryck-tidssamband från Autodyn och ConWep för en laddning på 125 kg TNT och skalat avstånd Z = 0,8 m/kg$^{1/3}$.

5.3.2.3 Inverkan av explosionsgaser från TNT

De hopp i tryckkurvan som kan observeras i Figur 5.4 och Figur 5.5 härrör från inverkan av det eldklot som uppstår vid detonation av en explosionsladdning. I Autodyn simuleras detta genom att TNT kastas ut från laddningen och beblandar sig med luften. När TNT-fronten når fram till studerad punkt påverkas trycket på ett sådant sätt att det minskar enligt ovan, en tryckminskning som även observerats i försök, Ritzel (2006). Någon närmare studie av detta fenomen ryms inte inom detta arbete och fenomenet begränsas här till att enbart lyfta fram dess förekomst i såväl verkligheten som ett resultat i Autodyn.



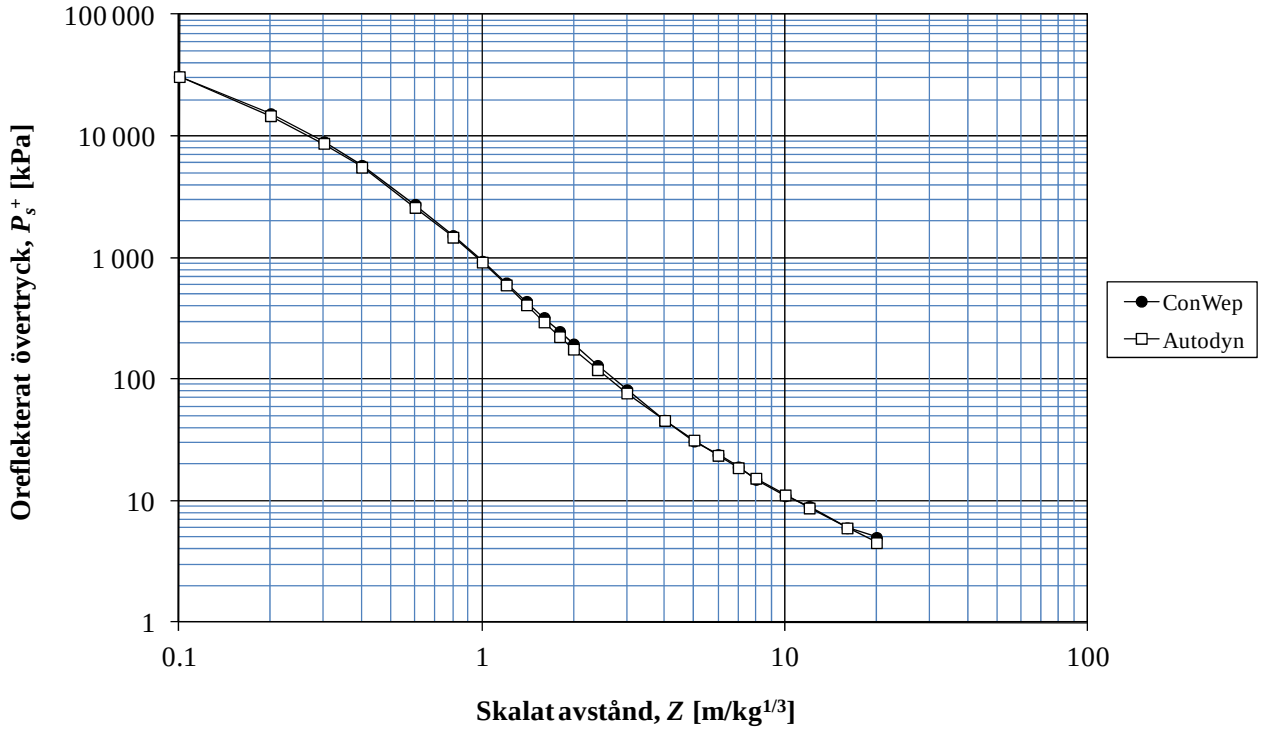
Figur 5.10 Skalad ankomsttid för stötvågs- och TNT-fronten i Autodyn uttryckt i det skalade avståndet Z som funktion av skalad tid.

I Figur 5.10 visas sambandet mellan skalad ankomsttid och skalat avstånd för stötvågs- och TNT-fronten vid simulering i Autodyn. Av figuren framgår att stötvågsfronten rör sig snabbare än TNT-fronten samt att den senares utbredning upphör vid ett skalat avstånd $Z \approx 0{,}8$ m/kg$^{1/3}$. Detta innebär att tryck-tidssambandet hos en punkt inom ett skalat avstånd $Z < 0{,}8$ m/kg$^{1/3}$ någon gång kommer påverkas av TNT-fronten, något som överensstämmer väl med de observationer som gjorts i avsnitt 5.3.2.1. För avstånd där $Z \geq 0{,}8$ m/kg$^{1/3}$ fås således ingen störning från TNT-fronten och erhållen tryck-tidskurvan får en form som är snarlik den som används i exempelvis ConWep.

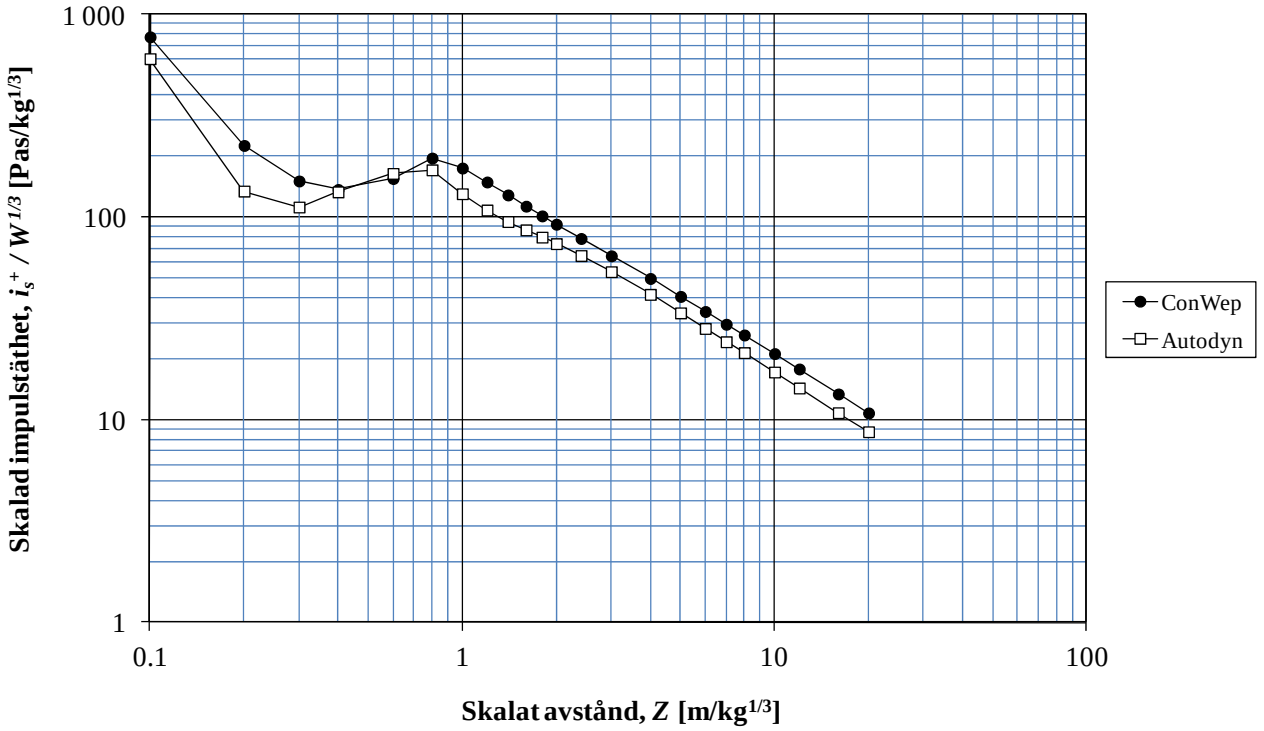
5.3.2.4 Jämförelse med ConWep

I Figur 5.11 till Figur 5.14 jämförs resultat från Autodyn och ConWep. Av detta framgår att tryck och ankomsttid samt stötvågshastighet och partikelhastighet stämmer bra överens medan den är sämre för impulstäthet och varaktighet, se Figur 5.15. Avvikelsen för impulstätheten uppgår för $Z \geq 2$ m/kg$^{1/3}$ till omkring 20 % men tros bero på felaktig utvärdering av de försöksdata som ligger till grund för nyttjat samband i ConWep, se avsnitt 5.3.2.5.

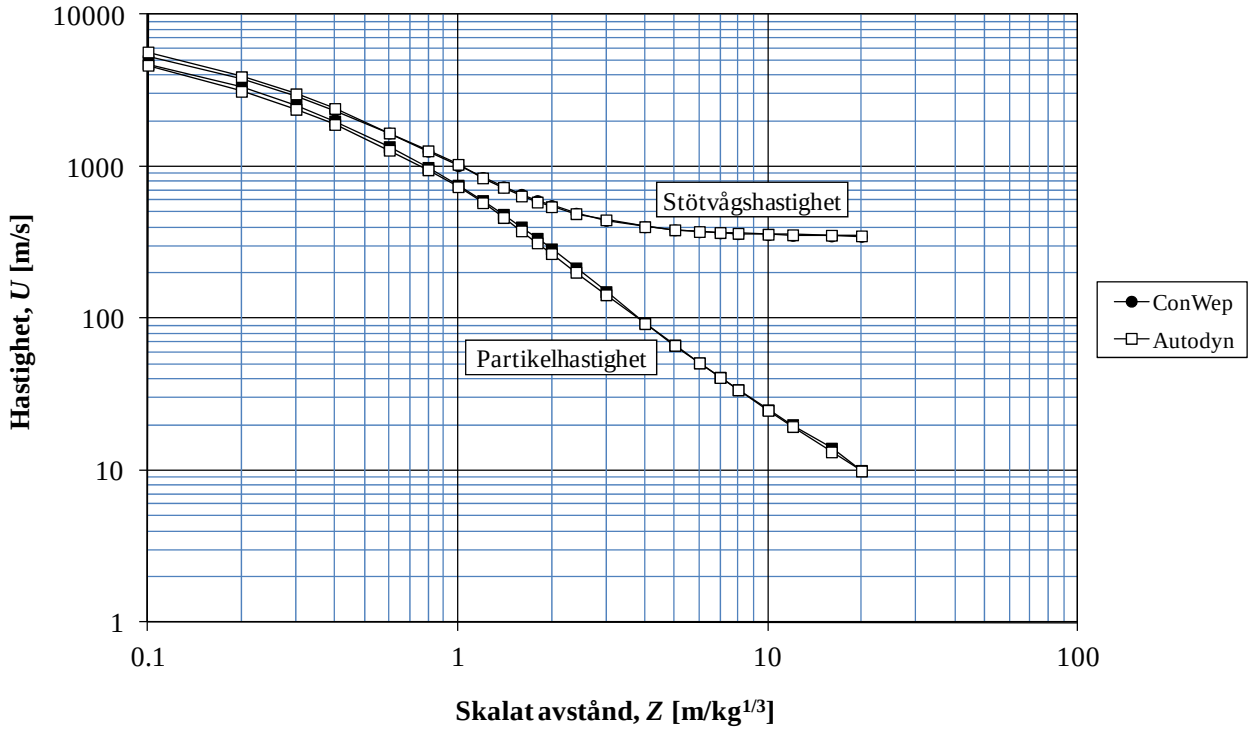
För $Z < 0{,}8$ m/kg$^{1/3}$ är skillnaden i varaktighet mellan Autodyn och ConWep mycket stor, något som sannolikt delvis beror på den störning i trycket som uppstår när TNT-fronten når fram till studerad punkt, se avsnitt 5.3.2.3. Det kan även konstateras att det från försöksdata kan vara svårt att exakt bedöma varaktigheten för övertrycket och att osäkerheten i detta ökar nära laddningen. Eftersom det, för detta arbetet, intressanta skalade avståndet dock uppgår till $1 \leq Z < 10$ m/kg$^{1/3}$ och varaktigheten inom intervallet $2 \leq Z < 10$ m/kg$^{1/3}$ endast avviker med omkring 20 % görs ingen ytterligare fördjupning av observerade varaktighetsskillnader i resultat mellan Autodyn och ConWep.



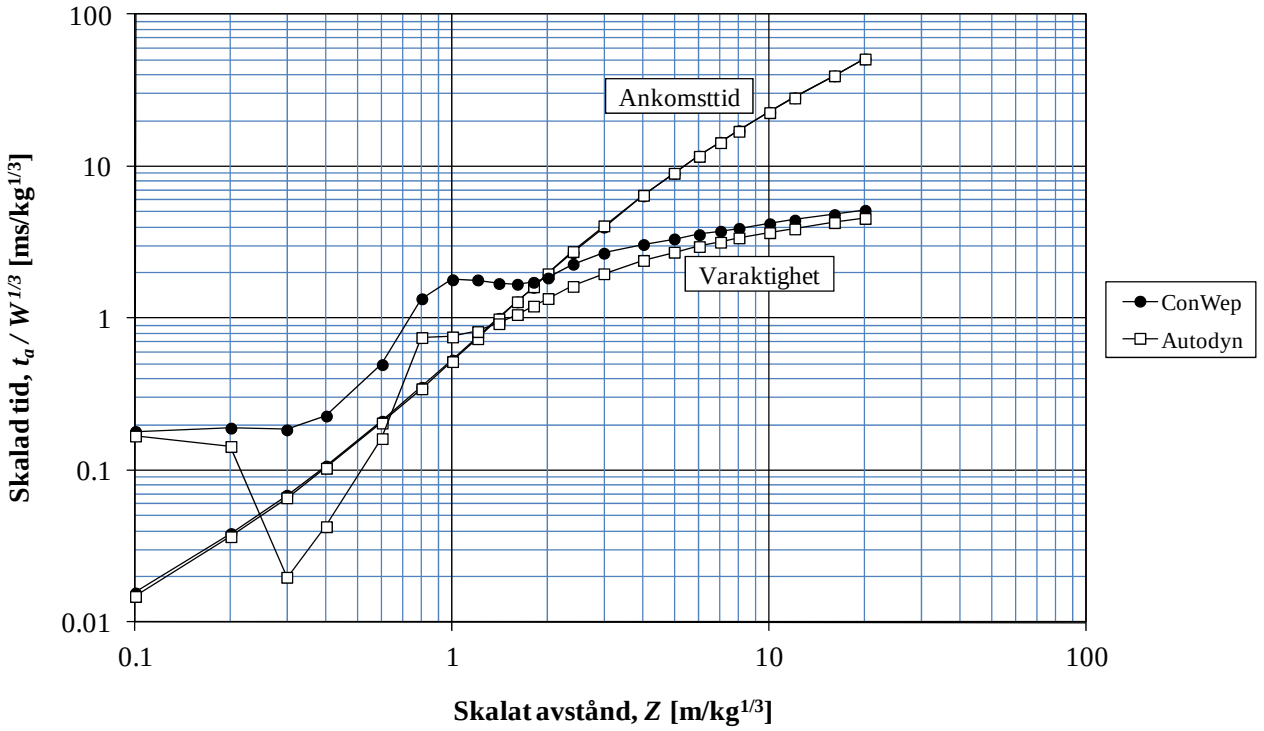
Figur 5.11 Jämförelse av oreflekterat övertryck i Autodyn och ConWep.



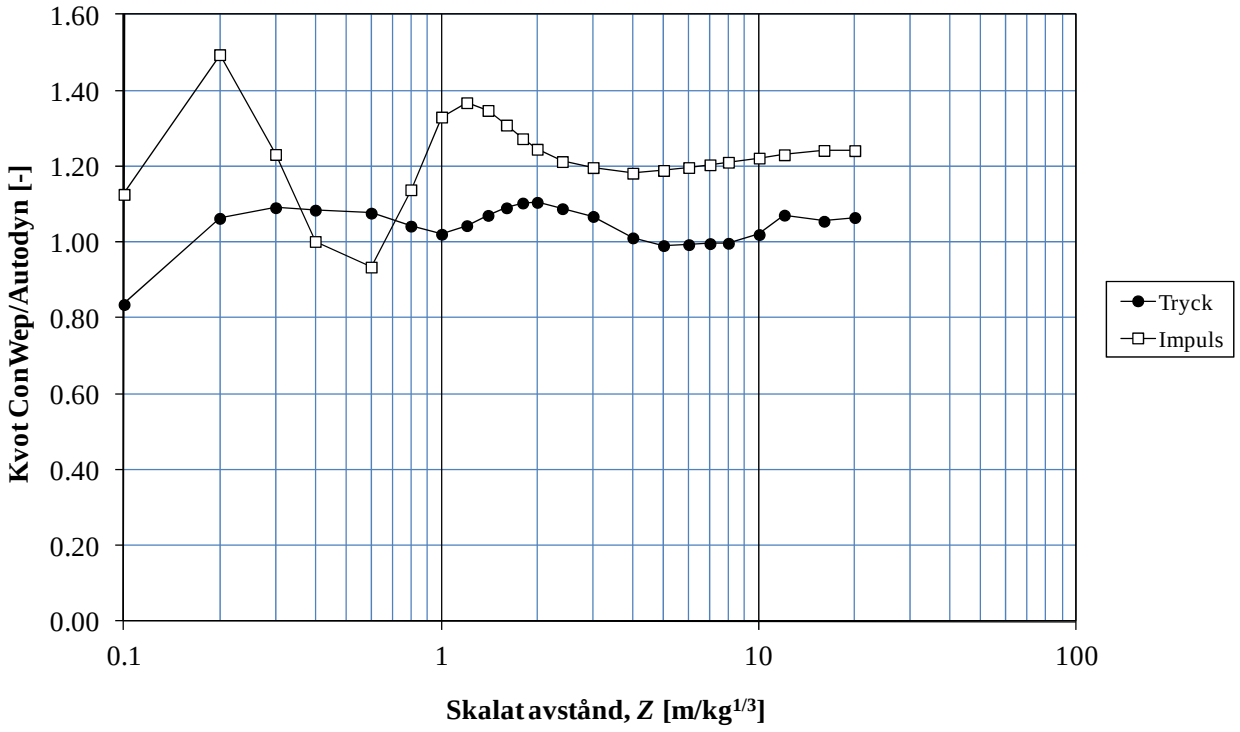
Figur 5.12 Jämförelse av skalad impulstäthet ankomsttid i Autodyn och ConWep.



Figur 5.13 Jämförelse av stötvågshastighet och partikelhastighet i Autodyn och ConWep.



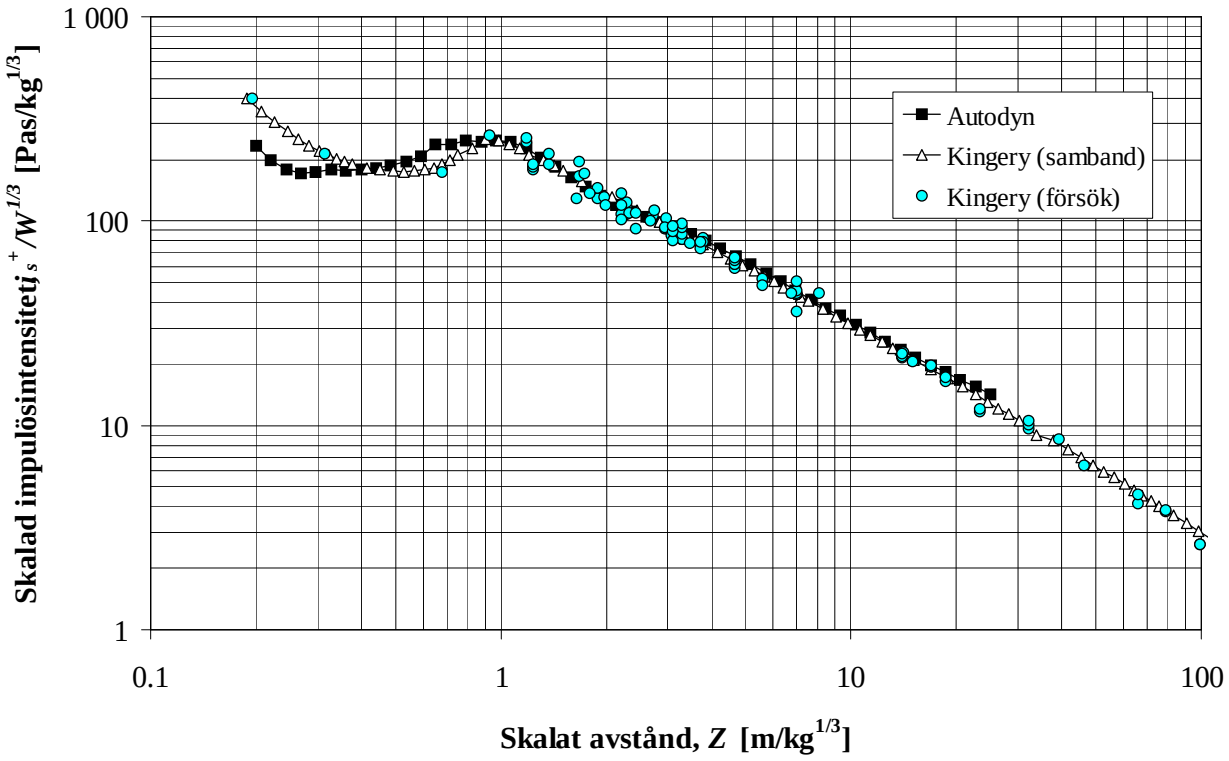
Figur 5.14 Jämförelse av skalad ankomsttid och skalad varaktighet i Autodyn och ConWep.



Figur 5.15 Kvot i tryck och impulstäthet för resultat erhållna från ConWep och Autodyn.

5.3.2.5 Kommentar om impulstäthet i ConWep

Av Figur 5.12 och Figur 5.15 framgår att erhållen impulstäthet från Autodyn understiger den från ConWep. En anledning till detta tros vara brister i den utvärdering som gjorts av de ursprungliga försöken. Med anledning av detta har därför en analys av aktuell försöksuppställning gjorts i Autodyn, se bilaga C. Resultat från denna analys visas i Figur 5.16, av vilken det framgår att överensstämmelsen mellan försök och analys är mycket god. Att så är fallet innebär dock att avvikelsen i Figur 5.12 inte beror på fel i explosionsmodellen utan att den ursprungliga försöks-utvärderingen, vilken sedan används i bland annat ConWep, varit bristfällig och överskattat aktuell impulstäthet. Anledningen till denna överskattning är att energibortfallet som fås i marken av en sådan stor laddning som varit aktuell här (hemisfärisk laddning på 5-100 ton TNT) inte beaktats på rätt sätt. Istället har schablonmässigt en speglingsfaktor på 1,8 använts, vilket resulterat i felaktiga värden.

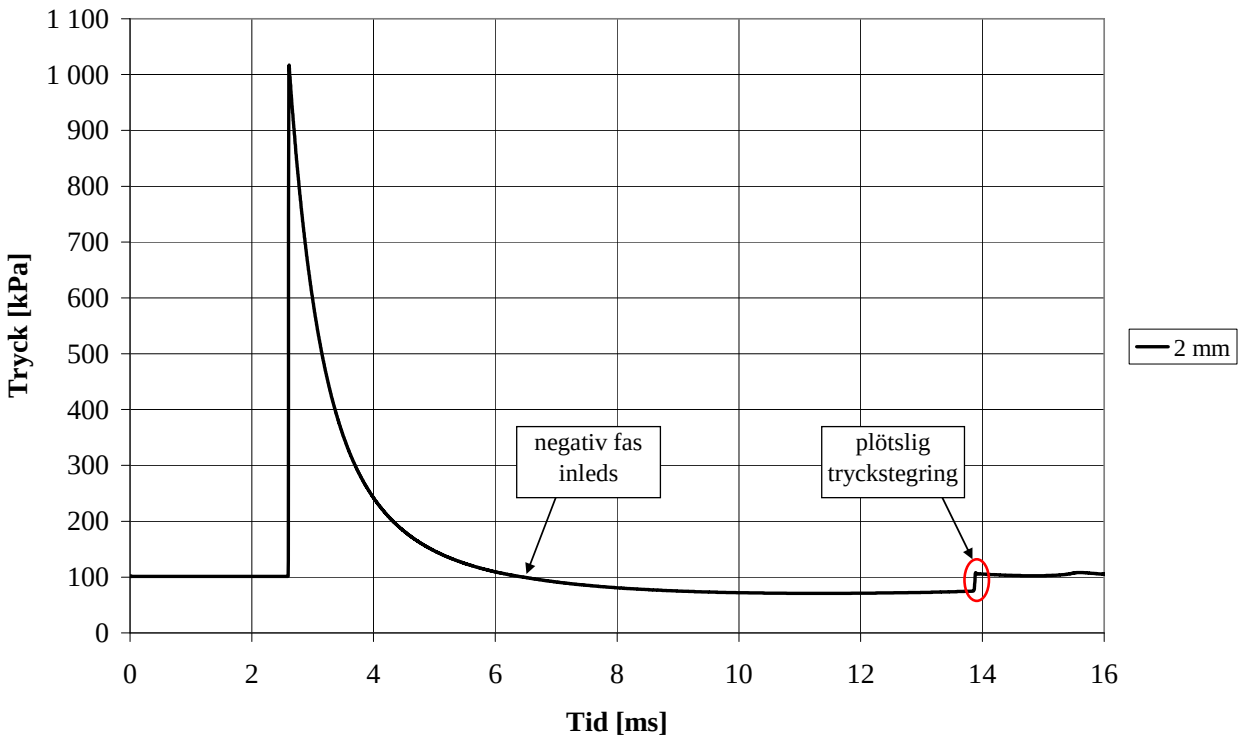


Figur 5.16 Jämförelse av impulstäthet från försök, Kingery (1966), och motsvarande analyser i Autodyn, se bilaga C.

5.3.3 Negativ fas

En begränsning i ConWep är att enbart den positiva fasen berörs, en begränsning som är ofta förekommande i den litteratur som behandlar explosionslaster. Så som berörs i avsnitt 3.4.1 beror detta på att den negativa fasen allmänt betraktats som mindre viktig än den positiva fasen och/eller att den är svår att mäta i experimentella försök. För att ge en övergripande bild av vilka storheter i tryck och impulstäthet som gäller för den negativa fasen har därför även en sammanställning gjorts utgående från resultat erhållna med analyser i Autodyn. Här presenterade resultat och föreslagna samband är således strikt baserade på numeriska beräkningar i Autodyn och bör därför användas med viss försiktighet. Dock visar gjorda jämförelser mellan Autodyn och ConWep i avsnitt 5.3.2.4 att överensstämmelsen är god för positiv fas varför det synes rimligt att även förlita sig på motsvarande resultat framtagna med Autodyn för den negativa fasen.

I Figur 5.17 visas tryck-tidskurvan för en punkt 5 m från en sprängladdning på 125 kg TNT (Z = 1,0 m/kg$^{1/3}$). Av figuren framgår att den negativa fasen inleds efter omkring 6,4 ms när trycket från stötvågen understiger den ostörda luftens tryck på P_0 = 101,3 kPa. Formen på den negativa fasen är snarlik den som ges av den idealiska tryck-tidskurva som visas i Figur 3.2. Vid tiden 13,9 ms inträffar dock en plötslig stegring av trycket till ett värde strax över P_0.

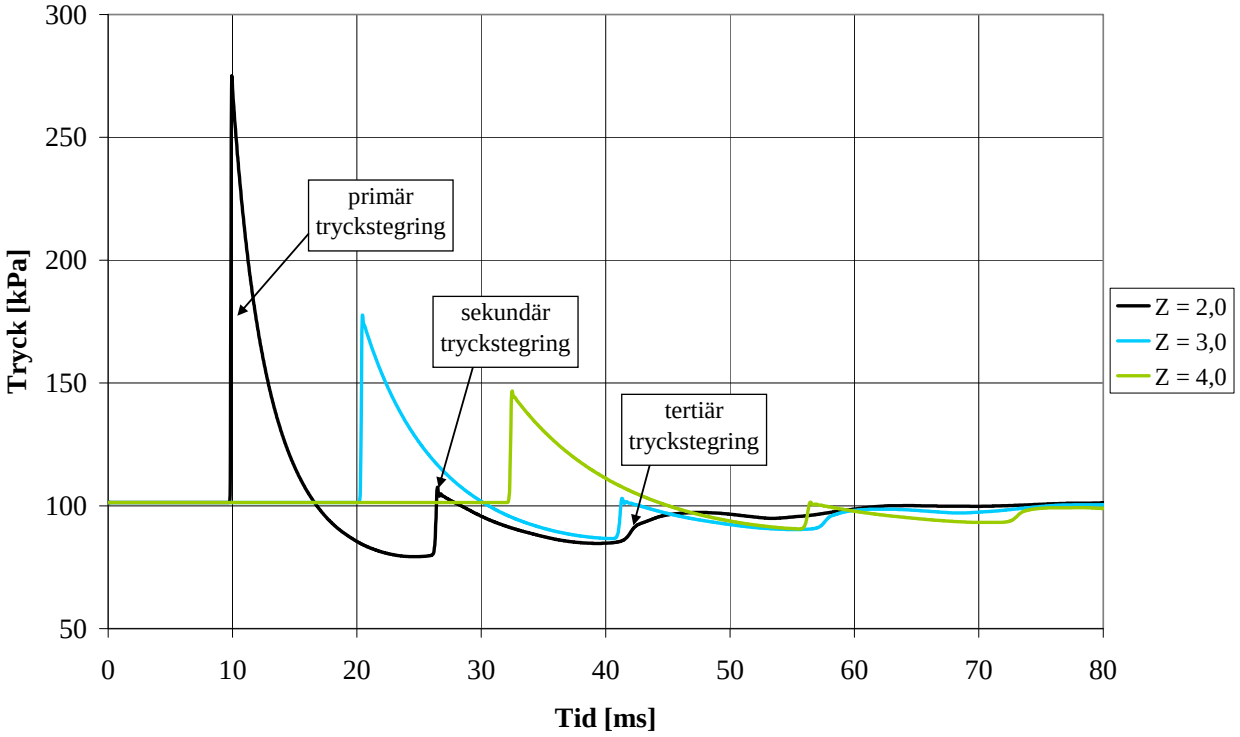


Figur 5.17 Tryck-tidssamband från Autodyn för en laddning på 125 kg TNT och avståndet 5 m (skalat avstånd Z = 1,0 m/kg$^{1/3}$) vilket motsvarar Räddningsverkets såkallade arkivbomb, se fotnot på sida 30.

Detta fenomen med en sekundär tryckstegring återkommer i samtliga Autodynanalyser och i Figur 5.18 återges detta för samma sprängladdning för de skalade avstånden $2{,}0 \leq Z \leq 4{,}0$ m/kg$^{1/3}$. I denna framgår motsvarande sekundära tryckstegring efter omkring 26 ms, 41 ms och 56 ms för skalat avstånd 2, 3 respektive 4 m/kg$^{1/3}$. Kort därefter sjunker dock trycket igen och en andra del av

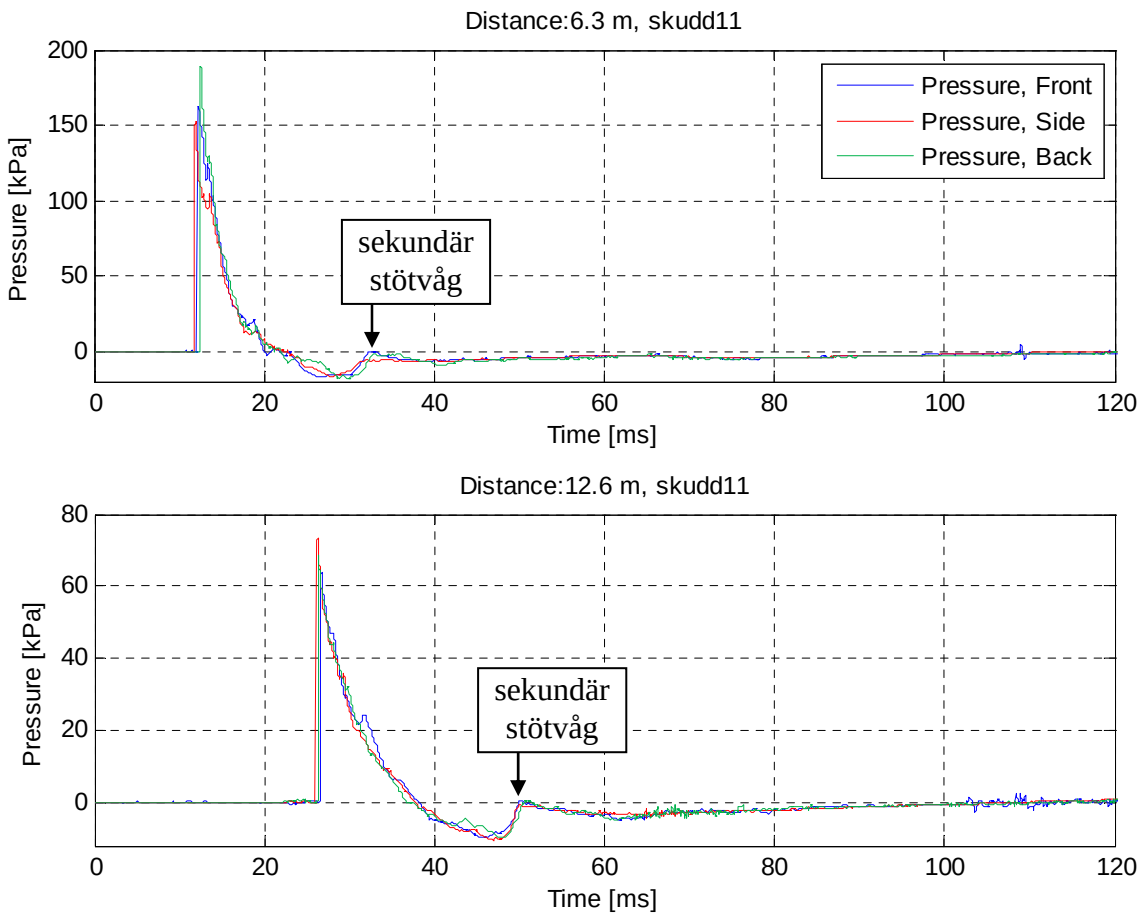
den negativa fasen inleds. I Figur 5.18 kan skönjas ytterligare en tryckstegring, mindre brant än den första, vid tiden 42 ms, 58 ms och 73 ms för skalat avstånd 2, 3 respektive 4 m/kg$^{1/3}$. I Figur 5.18 framgår även att trycket efter den första tryckstegringen minskar med det skalade avståndet Z och för skalade avstånd $Z > 4{,}0$ m/kg$^{1/3}$ resulterar den sekundära tryckstegringen inte i att trycket överstiger P_0 varvid den inte heller medför någon sekundär positiv fas. Beteendet, med en sekundär och tertiär tryckstegring, är dock fortfarande detsamma men med den skillnaden att trycket inte återgår till P_0 förrän den negativa fasen avslutas vid tiden t_4, se Figur 5.20.

För en studerad punkt nära sprängladdningen fås ett annorlunda beteende hos tryck-tidssambandet, se bilaga B, vilket förmodligen är kopplat till den störning som uppstår när TNT-fronten når studerad punkt, se avsnitt 5.3.2.3. I detta arbete är belastningen i sprängladdningens närområde dock inte av primärt intresse varför denna del inte berörs närmare. Här begränsas presenterade samband för den negativa fasen till ett skalat avstånd $0{,}8 \geq Z \geq 20$ m/kg$^{1/3}$.



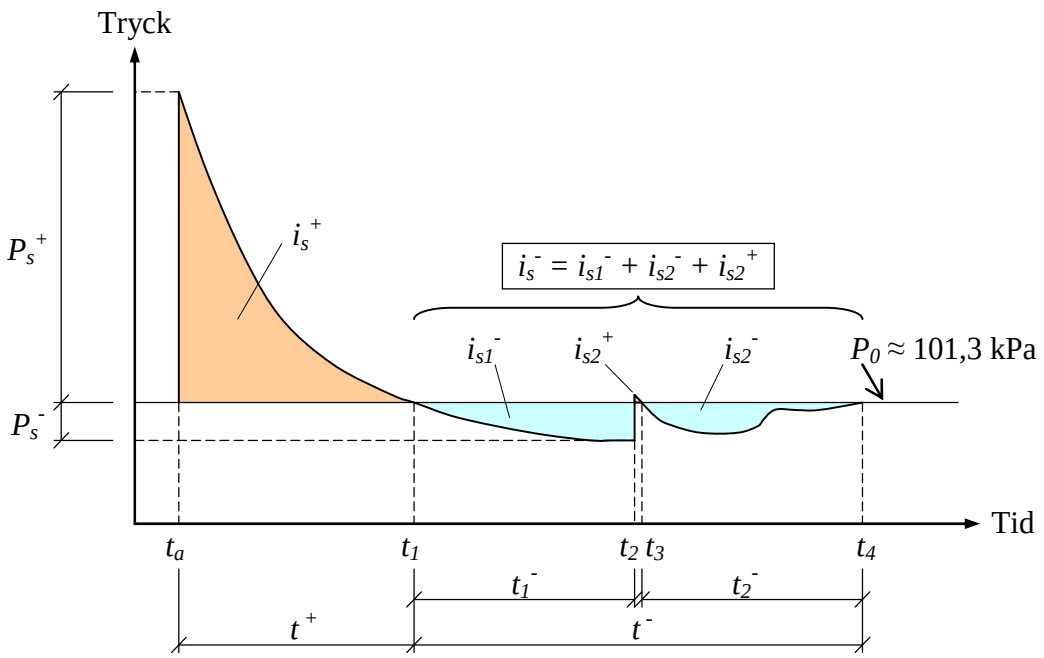
Figur 5.18 Tryck-tidssamband från Autodyn för en laddning på 125 kg TNT och avståndet 10-20 m (skalat avstånd Z = 2,0-4,0 m/kg$^{1/3}$).

Det observerade tryck-tidssambandet som presenteras i Figur 5.18 skiljer sig mot den idealiska bild som ges i Figur 3.2 för en ostörd stötvåg, något som kan ge sken av att Autodyn uppvisar en felaktig beskrivning av stötvågens framfart. Detta fenomen kan dock även observeras i försök vilket illustreras i Figur 5.19. Dessa tryck-tidssamband, från Langberg *et al.* (2004), erhölls för en laddning om 50 kg sprängdeg (motsvarande en ekvivalent TNT-laddning på omkring 50 kg) som stod på golvet inne i en sluten betonglåda. Laddningens betydande storlek i förhållande till betonglådans begränsade inneslutande förmåga gör att belastningssituationen kan jämföras med den för en hemisfärisk laddning med möjlighet till fri avlastning.



Figur 5.19 *Tryck-tidssamband från försök med hemisfärisk laddning (W_{ekv} = 50 kg TNT) där förekomsten av den sekundära stötvågen framgår. Med användning av en speglingsfaktor på 1,8 fås ett skalat avstånd på Z = 1,4 m/kg$^{1/3}$ (r = 6,3 m) respektive Z = 2,8 m/kg$^{1/3}$ (r = 12,6 m). Baserat på Langberg et al. (2004).*

Utgående från ovanstående observationer fås en något reviderad bild av en idealisk tryck-tidskurva. I Figur 5.20 visas en modifierad idealisk tryck-tidssamband för en stötvåg som är representativ för det skalade avståndet $0{,}8 \leq Z \leq 20$ m/kg$^{1/3}$. Utseendet hos den positiva fasen samt den första delen av den negativa fasen är identisk med den idealiska bild som tidigare presenterats i Figur 3.2. Vid tidpunkten t_2 når den sekundära tryckvågen studerad punkt vilket gör att trycket plötsligt ökar och kan nå ett värde större än P_0, varvid en sekundär positiv fas erhålls. Denna del är dock mycket kortvarig och dess impulsinnehåll försumbar för det här studerade skalade avstånden ($i_{s2}^{+} \approx 0$ för $Z \geq 0{,}8$ m/kg$^{1/3}$). När trycket, vid tiden t_3, åter sjunker under P_0 inleds en sekundär negativ fas som avslutas vid tiden t_4 när trycket åter når P_0. Även efter tiden t_4 kommer trycket att oscillera runt P_0 men lastbidraget blir i princip försumbart och berörs därför inte närmare här.



Figur 5.20 Modifierad bild av idealiskt tryck-tidssamband baserad på observationer av resultat från Autodyn. Aktuellt samband kan sägas gälla för skalat avstånd $Z \geq 0{,}8$ m/kg$^{1/3}$.

Av Figur 5.20 kan urskiljas tre områden inom den del som normalt (jämför Figur 3.2) betecknas som den negativa fasen: den första negativa fasen med impulstäthet i_{s1}^- och varaktighet t_1^-, den sekundära positiva fasen med impulstäthet i_{s2}^+ samt den andra negativa fasen med impulstäthet i_{s2}^- och varaktighet t_2^-. Eftersom varaktighet och impulsinnehåll i den sekundära positiva impulsen är så liten är det rimligt att betrakta samtliga dessa delar som en del av den negativa fasen. Dvs. den negativa fasen definieras här som att den påbörjas vid tiden t_1 och avslutas vid tiden t_4 ,dvs.

$$t^- = t_4 - t_1 \tag{5.1}$$

och med en impulstäthet i_s^- som kan tecknas som

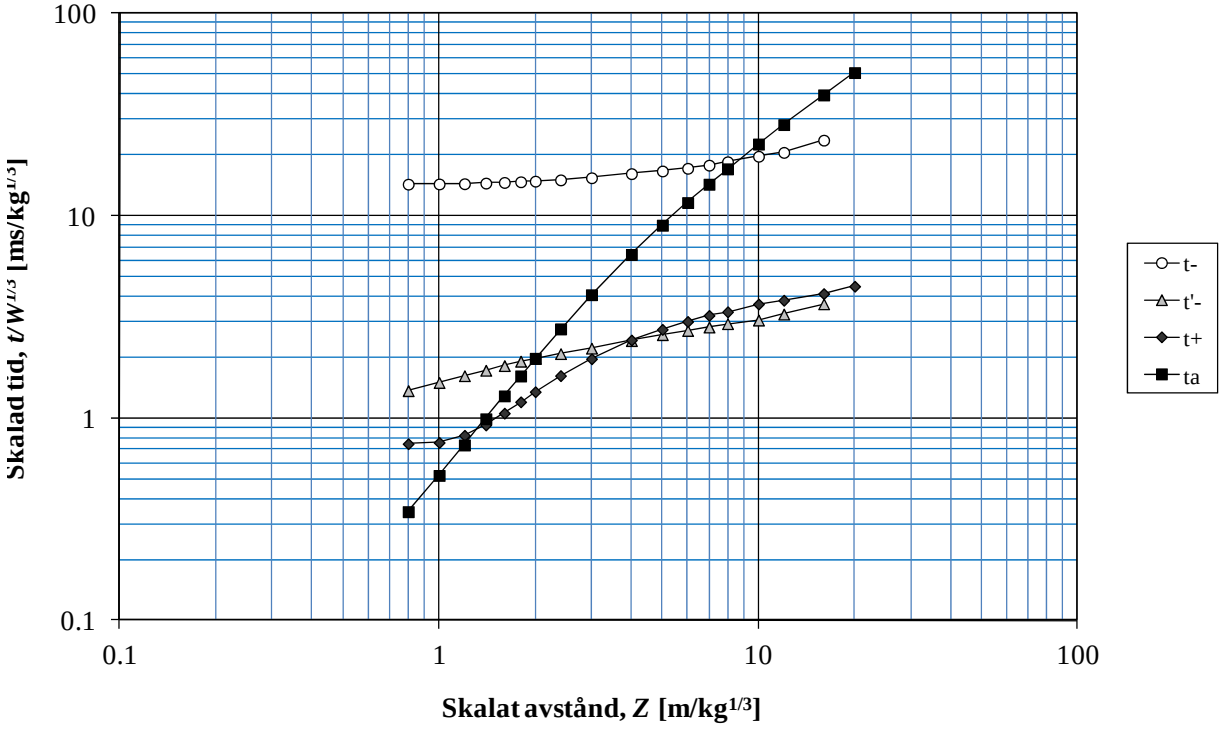
$$i_s^- = i_{s1}^- + i_{s2}^- + i_{s2}^+ \tag{5.2}$$

Storleksförhållandet mellan i_{s1}^- och i_{s2}^- varierar med det skalade avståndet men generellt gäller att i_{s1}^- dominerar för låga värden på Z medan i_{s2}^- dominerar för stora värden på Z. Se även bilaga B för en utförlig sammanställning av respektive dels bidrag till den totala negativa impulstätheten.

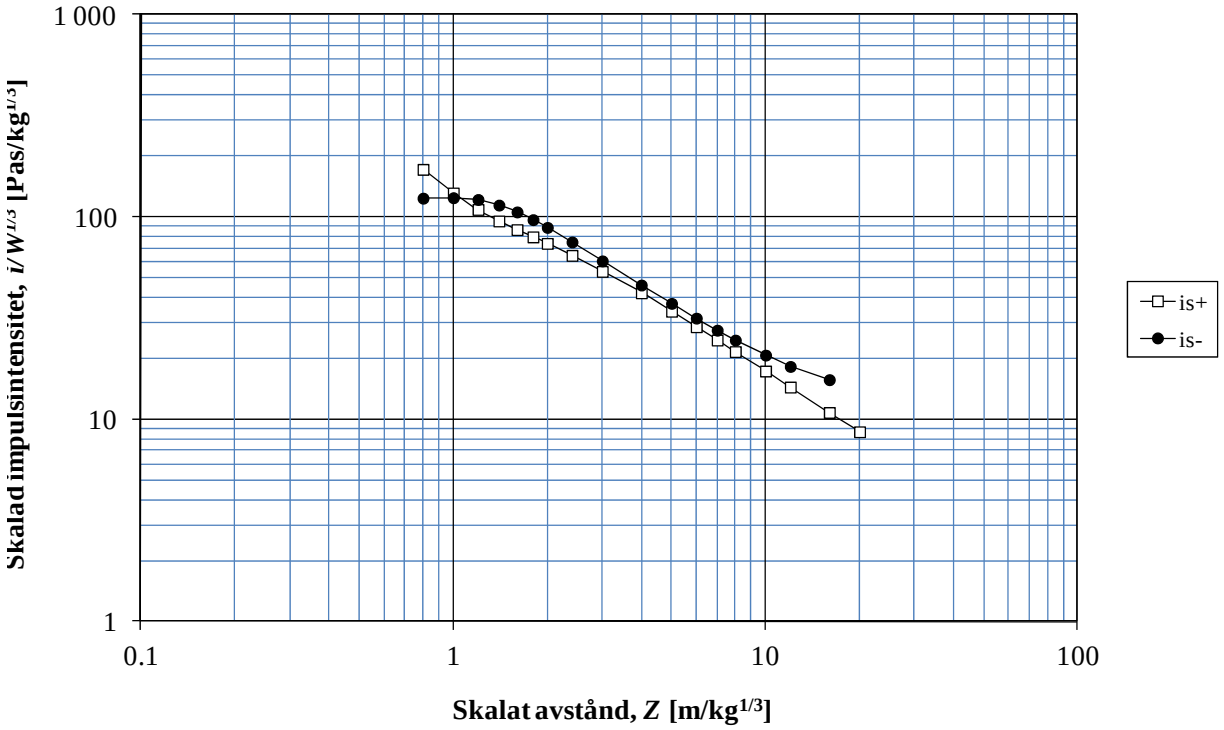
5.3.4 Jämförelse mellan positiv och negativ fas

En jämförelse av skalade varaktigheter samt skalade impulstätheter för positiv och negativ fas görs i Figur 5.21 respektive Figur 5.22. Av detta framgår att varaktigheten för den negativa fasen genomgående är betydligt större än vad den är för den positiva fasen. För den negativa fasen kan poängteras att den andra delen av den negativa fasen, med varaktighet t_2^-, är betydligt längre än den första delen med varaktighet t_1^-. En avgörande anledning till detta är att den avslutande tryckstegringen är mycket långsam omkring tiden t_4. Bidraget till den negativa impulstätheten är i denna avslutande del av den negativa fasen också försumbar.

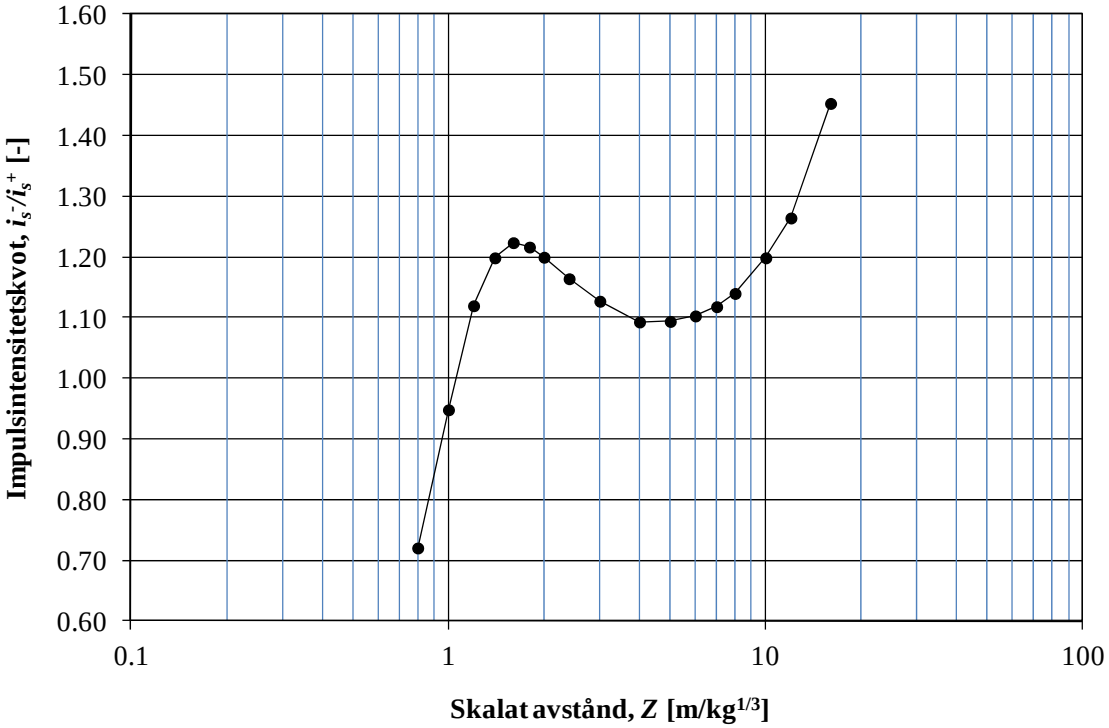
Av Figur 5.22 framgår att den positiva och negativa impulstätheten är av ungefär samma storleksordning för ett skalat avstånd $0{,}8 \leq Z \leq 20$ m/kg$^{1/3}$. I Figur 5.23 ges kvoten mellan negativ impulstäthet i_s^- och positiv impulstäthet i_s^+ varav det framgår att denna varierar mellan omkring 0,8 och 1,5 för hela det studerade området samt att variationen är omkring 1,1-1,2 för $1{,}2 \leq Z \leq 10$ m/kg$^{1/3}$. Dvs. som en tumregel kan sägas att den negativa impulstätheten överstiger den positiva med omkring 10-20 % för stora delar av det här intressanta skalade avståndsområdet. I Figur 5.24 redovisas storleken på undertrycket, varvid framgår att detta sjunker från ett tryck på omkring 30 kPa för Z = 1,0 m/kg$^{1/3}$ till ett tryck på 4 kPa för Z = 10 m/kg$^{1/3}$.



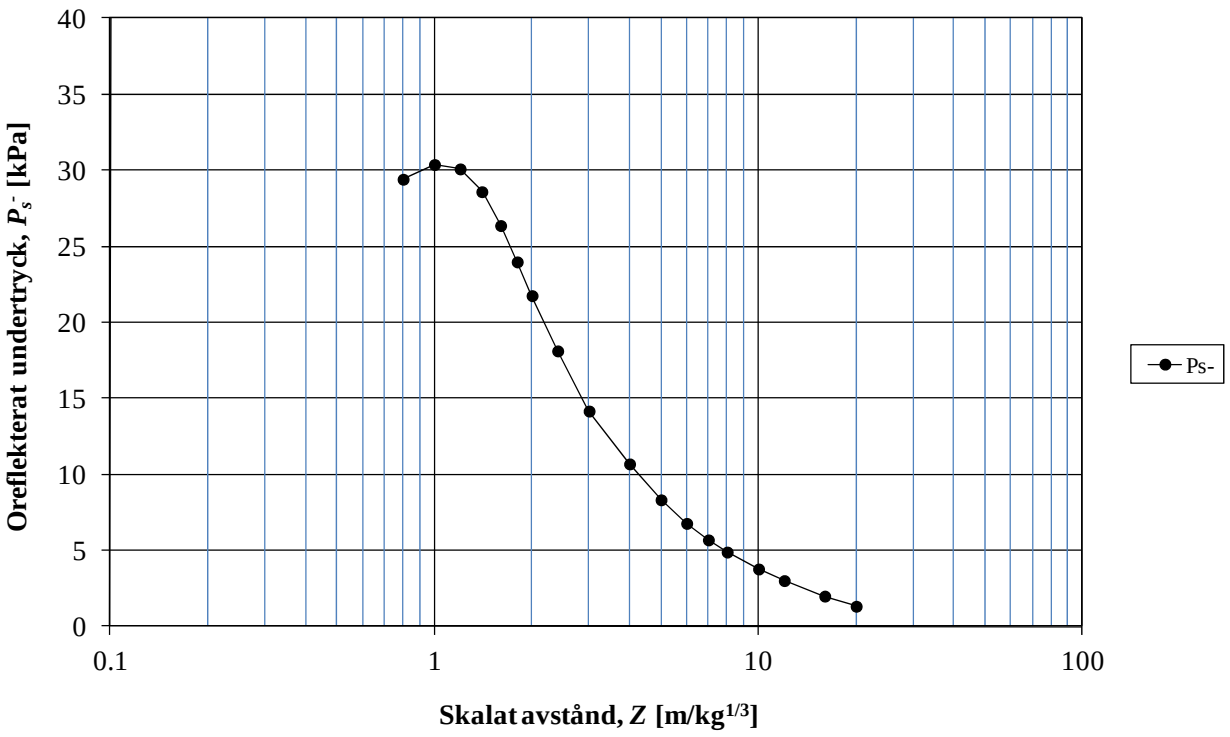
Figur 5.21 Jämförelse av skalad varaktighet t och ankomsttid t_a för resultat från Autodyn och skalat avstånd $0{,}8 \leq Z \leq 20$ m/kg$^{1/3}$. T1- anger varaktigheten hos den första negativa fasen från tidpunkt t_1 till t_2 enligt Figur 5.20.



Figur 5.22 *Jämförelse av skalad impulstäthet för positiv och negativ fas för resultat från Autodyn och skalat avstånd $0{,}8 \leq Z \leq 20$ m/kg$^{1/3}$.*



Figur 5.23 *Kvot mellan negativ och positiv impulstäthet baserad på resultat presenterade i Figur 5.22.*



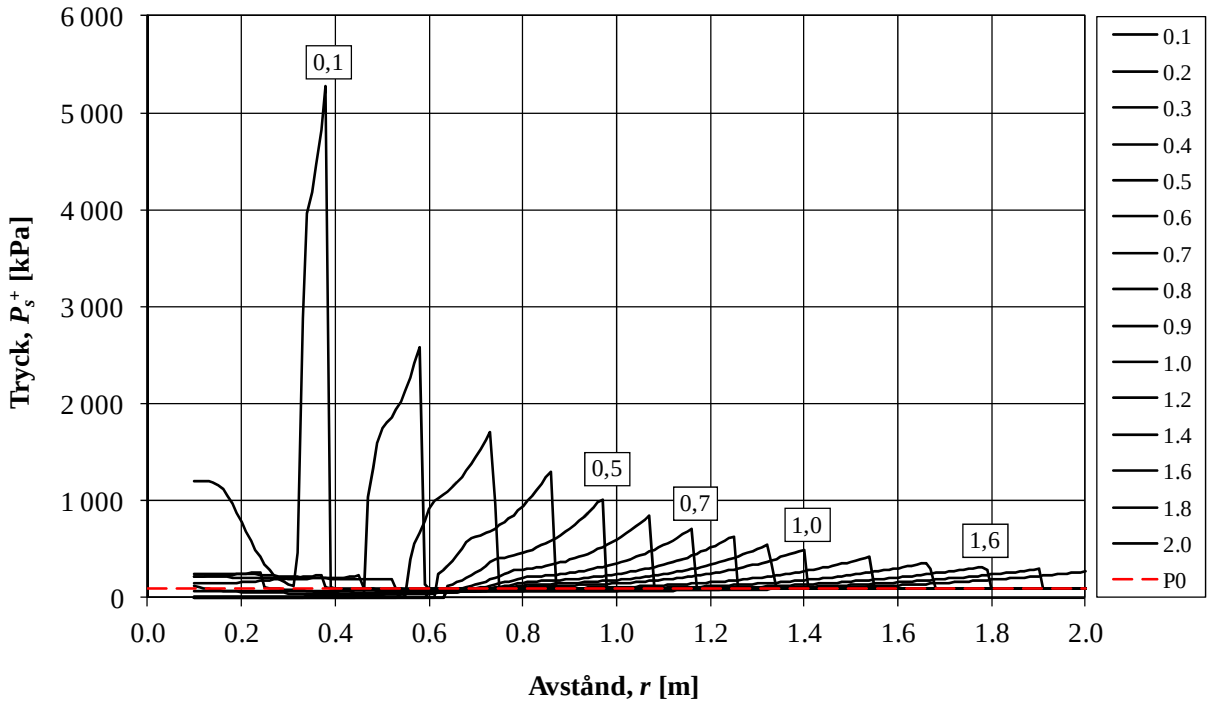
Figur 5.24 Oreflekterat undertryck för negativ fas för resultat från Autodyn och skalat avstånd $0{,}8 \leq Z \leq 20$ m/kg$^{1/3}$.

En detaljerad sammanställning av ovanstående resultat ges i tabellform i bilaga B. I Johansson och Laine (2012a) jämförs här presenterade värden för negativ fas med vad som anges i litteraturen.

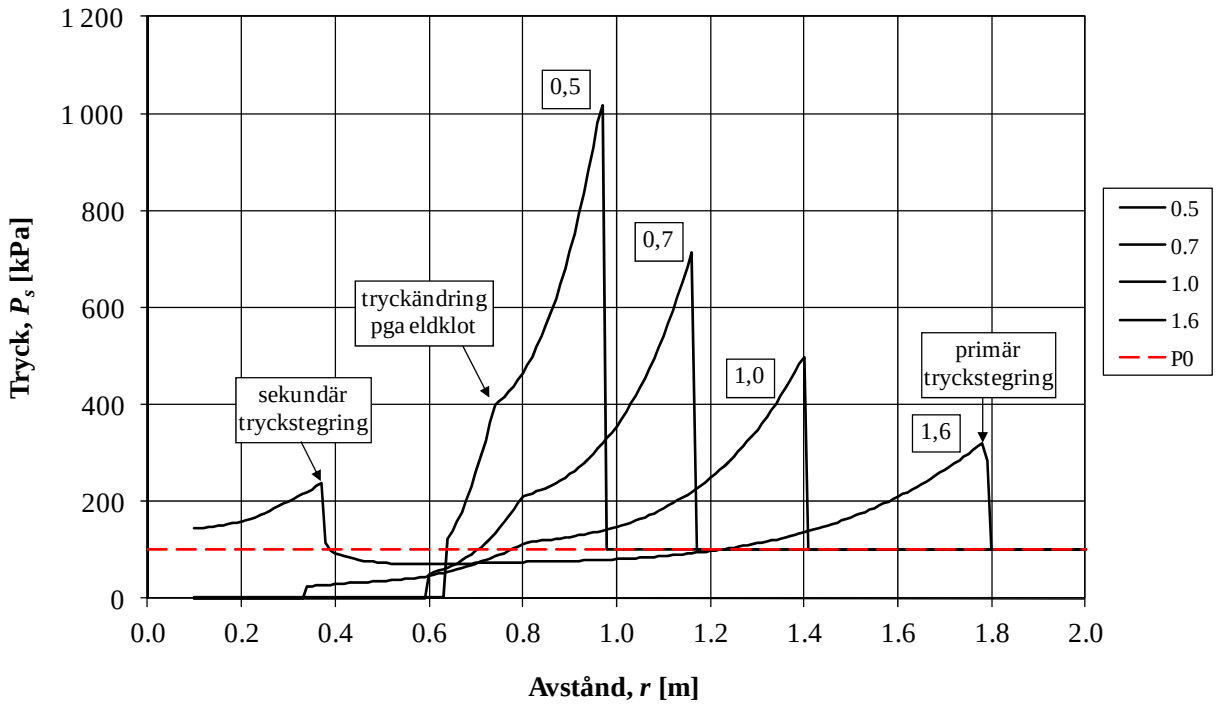
5.4 Stötvågens utbredning i rummet

I avsnitt 5.3.2 och 5.3.3 behandlas den positiva och negativa fasen. Gemensamt för dessa båda är att trycket här ges som en funktion av tiden. För att illustrera hur stötvågens principiella utseende varierar med avståndet från laddningen har tryckutbredningen vid fri sfärisk avlastning studerats med hjälp av Autodyn inom ett avstånd av 2 m från en laddning om 1 kg TNT. Den resulterande stötvågens tryck har registrerats på en sträcka av 0,1-2,0 m från laddningen och illustreras i Figur 5.25 för tider mellan 0,1 och 2,0 ms efter detonation. Av detta framgår att övertrycket snabbt minskar med tiden samt att tryckkurvan blir mer och mer utdragen ju längre ifrån laddningen den kommer. I Figur 5.26 visas en uppförstorad variant av Figur 5.25 för utvalda tider mellan 0,5 och 1,6 ms. Av denna framgår också mer i detalj hur tryckminskningen sker på ökande avstånd samt den inverkan som eldklotets utbredning med ett maximum på omkring 0,8 m har ($Z \approx 0{,}8$ m/kg$^{1/3}$, se avsnitt 5.3.2.3). Vid tidpunkten 1,6 ms kan även noteras att en sekundär tryckstegring uppstått på ett avstånd av knappt 0,4 m från laddningen.

I bilaga D visas en mer utförlig sammanställning av tryckets variation inom avståndet 2 m för tidpunkterna 0,1-1,8 ms.



Figur 5.25 Övertryckets variation på olika avstånd från en detonerande laddning om 1 kg TNT med möjlighet till fri sfärisk utbredning i tidsintervallet 0,1 – 2,0 ms. Resultat från analys utförd i Autodyn.

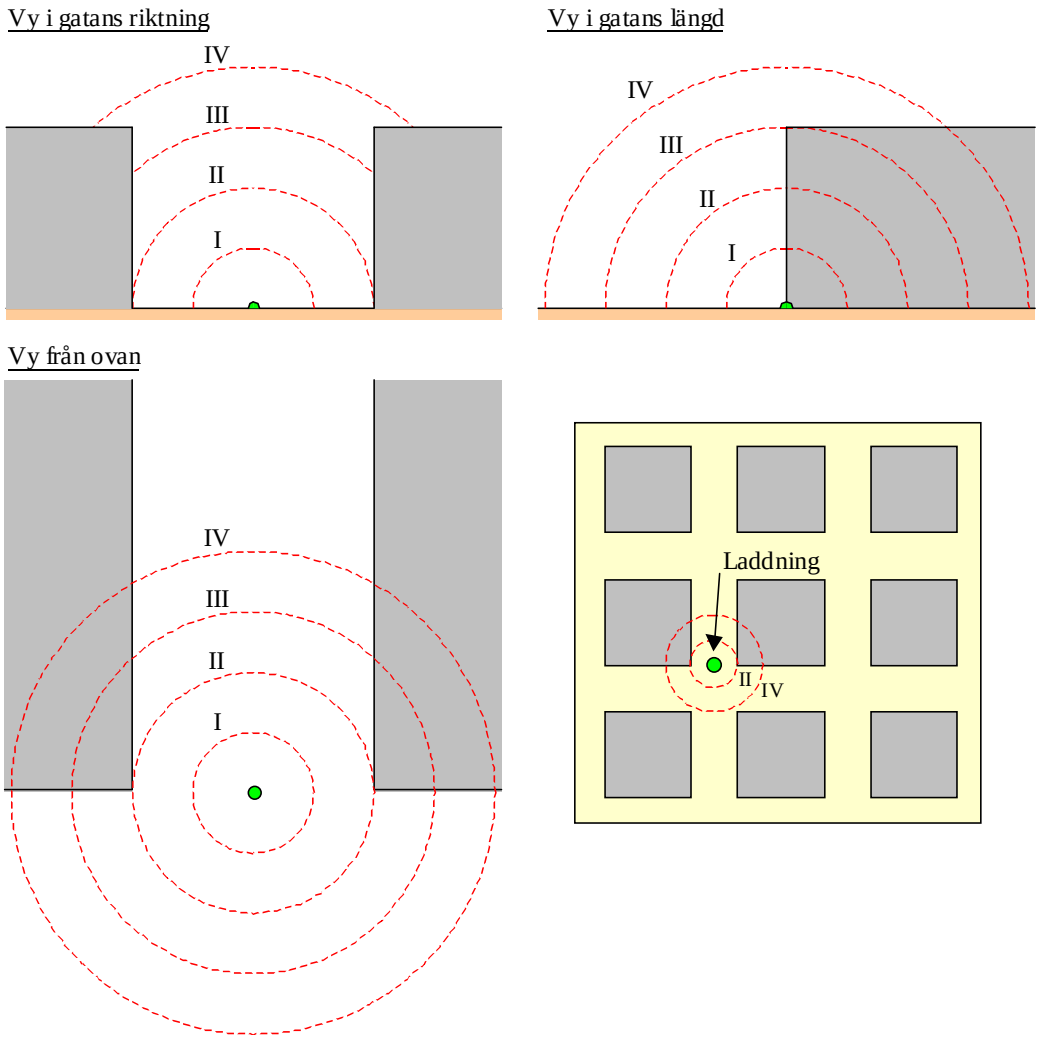


Figur 5.26 Uppförstoring av figur 5.23 illustrerande tryckets utbredning vid tiderna 0,5-1,5 ms. Den streckade kurvan markerar trycknivån P_0 = 101,3 kPa för ostörd luft.

5.5 Stötvågens volymberoende

5.5.1 Koncept

I avsnitt 3.4.3.3 behandlas begreppet spegling och det synsätt som används vid hemisfärisk laddning. Grundkonceptet i det för spegling använda tankegången är att stötvågens styrka är beroende av den utsmetade energiintensitet som råder i den totala volym som stötvågen innesluter. Vid ideala förhållanden innebär detta också att en godtycklig laddning som detonerar med möjlighet till fri sfärisk utbredning ger samma tryck- och impulsdata som en hälften så stor laddning, vilken detonerar mot marken och utbreder sig i en halvsfär som volymetriskt är hälften så stor. Detta koncept kan dock möjligen även kunna användas i andra, mer komplicerade sammanhang. Det är exempelvis av stort intresse om ett dylikt tankesätt är möjligt att använda för en laddning som detonerar i stadsmiljö där den fria utbredningen är förhindrad på ett mer komplext sätt än vad som är fallet för normal spegling. I Figur 5.27 illustreras ett sådant fall där en sprängladdning detonerar på marken vid mynningen av en gata. I figuren har stötvågfrontens framfart markerats (betecknat I till IV) vid olika tidsintervall.



Figur 5.27 Schematisk figur på stötvågsutbredning i stadsmiljö. Markeringarna I till IV betecknar stötvågsfrontens läge vid olika tidpunkter.

5.5.2 Omräkning av skalat avstånd

I avsnitt 3.4.3.5 introduceras det skalade avståndet Z för sfärisk (3D), cylindrisk (2D) respektive plan (1D) utbredning och definieras där som

$$Z_{3D} = \frac{r_{3D}}{W_{3D}^{1/3}} \tag{5.3}$$

$$Z_{2D} = \frac{r_{2D}}{W_{2D}^{1/2}} \tag{5.4}$$

$$Z_{1D} = \frac{r_{1D}}{W_{1D}} \tag{5.5}$$

Här söks ett samband mellan dessa skalade avstånd som kan användas för att jämföra framtagna tryck och impulser mellan de olika fallen. Den av stötvågen inneslutna volymen kan för en sfär (3D), cylinder (2D) respektive ett prisma (1D) beräknas som

$$V_{3D} = \frac{4\pi}{3} \cdot r_{3D}^{\ 3} = \alpha_{3D} \cdot r_{3D}^{\ 3} \tag{5.6}$$

$$V_{2D} = \pi h \cdot r_{2D}^{\ 2} = \alpha_{2D} \cdot r_{2D}^{\ 2} \tag{5.7}$$

$$V_{1D} = bh \cdot r_{1D} = \alpha_{1D} \cdot r_{1D} \tag{5.8}$$

där $r_{\#D}$ (# =3, 2 eller 1) är stötvågens utbredning i ett 3D, 2D respektive ett 1D-fall. Av detta och frisläppt energimängd $W_{\#D}$ kan energiintensiteten $E_{\#D}$ i den inneslutna volymen tecknas som

$$E_{3D} = \frac{W_{3D}}{V_{3D}} = \frac{W_{3D}}{\alpha_{3D} \cdot r_{3D}^{\ 3}} \tag{5.9}$$

$$E_{2D} = \frac{W_{2D}}{V_{2D}} = \frac{W_{2D}}{\alpha_{2D} \cdot r_{2D}^{\ 2}} \tag{5.10}$$

$$E_{1D} = \frac{W_{1D}}{V_{1D}} = \frac{W_{1D}}{\alpha_{1D} \cdot r_{1D}} \tag{5.11}$$

Genom att låta energiintensiteten vara samma i samtliga fall, dvs. $E_{3D} = E_{2D} = E_{1D}$, kan en koppling mellan det skalade avståndet $Z = Z_{3D}$ och Z_{2D} samt Z_{1D} tecknas som

$$Z_{3D} = \left(\frac{\alpha_{2D}}{\alpha_{3D}} \cdot \frac{r_{2D}^{\ 2}}{W_{2D}} \right)^{1/3} = \beta_{2D} \cdot Z_{2D}^{\ 2/3} \tag{5.12}$$

$$Z_{3D} = \left(\frac{\alpha_{1D}}{\alpha_{3D}} \cdot \frac{r_{1D}}{W_{1D}} \right)^{1/3} = \beta_{1D} \cdot Z_{1D}^{\ 1/3} \tag{5.13}$$

där

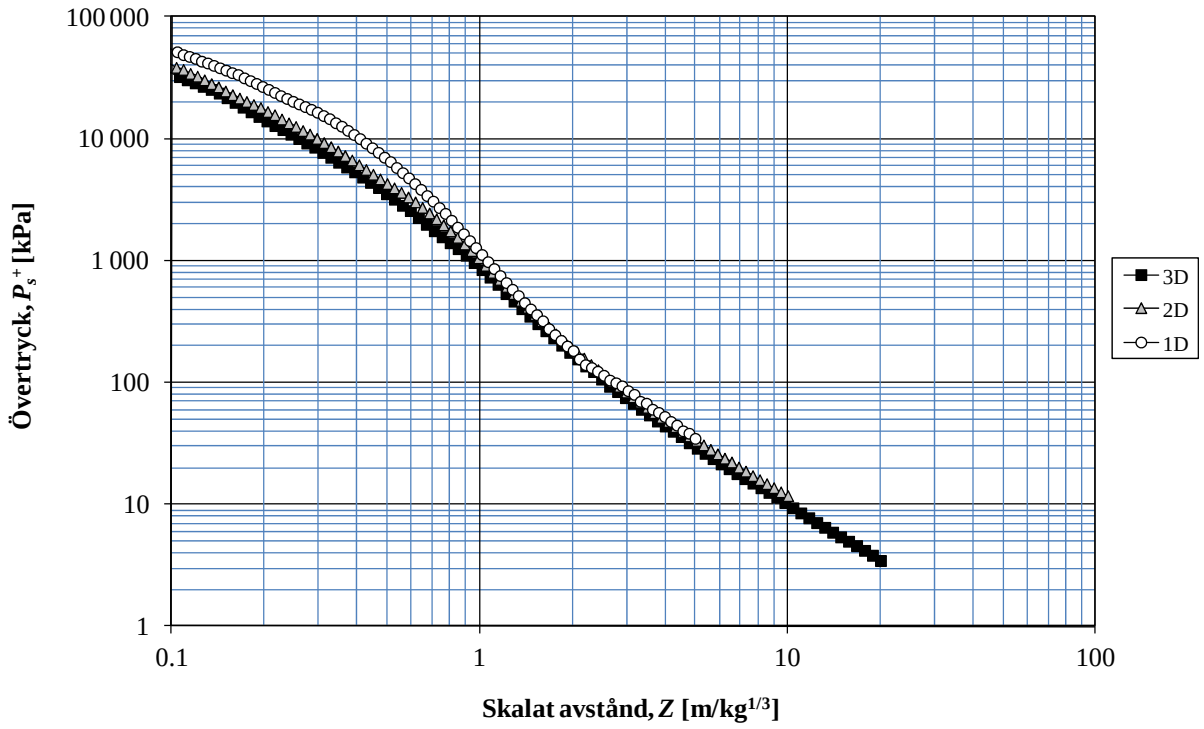
$$\beta_{2D} = \left(\frac{\pi h}{4\pi / 3} \right)^{1/3} = \left(\frac{3h}{4} \right)^{1/3} = [h = 1{,}0] = 0{,}909 \tag{5.14}$$

$$\beta_{1D} = \left(\frac{bh}{4\pi / 3} \right)^{1/3} = \left(\frac{3bh}{4\pi} \right)^{1/3} = [b = h = 1{,}0] = 0{,}620 \tag{5.15}$$

Dessa samband mellan de skalade avstånden Z_{3D}, Z_{2D} och Z_{1D} kan sedan användas för att jämföra tryck och impulstäthet mellan fri sfärisk, cylindrisk respektive plan utbredning. Fortsättningsvis räknas samtliga skalade avstånd $Z_{\#D}$ om till ett ekvivalent skalat avstånd för fri cylindrisk utbredning, dvs. $Z = Z_{3D}$.

5.5.3 Jämförelse av övertryck

I Figur 5.28 jämförs det oreflekterade övertryck som fås i Autodyn vid en sfärisk (3D), cylindrisk (2D) och plan (1D) stötvågsutbredning när avståndet uttrycks i form av det skalade avståndet Z för en fri sfärisk utbredning via ekvation (5.12) och (5.13).



Figur 5.28 Jämförelse av övertryck för fri utbredning i olika dimensioner när det skalade avståndet Z har räknats om i enlighet med ekvation (5.12) och (5.13).

Härigenom jämförs erhållet tryck för tre olika typer av utbredningar men där skalning har utförts så att energiintensiteten i innesluten volym blir densamma. Av redovisade resultat framgår att den maximala trycknivå som erhålls i stötvågen är jämförbar vid motsvarande värde på omvandlat skalat avstånd *Z*. För $Z < 1$ kan en märkbar skillnad noteras, omkring 20 % högre tryck för 2D och mellan 50-100 % för stort tryck för 1D. För de skalade avstånd som kommer vara intressanta i detta arbete, dvs. $1 \leq Z \leq 10$, fås dock en god överensstämmelse. med omkring 10 % för högt tryck för både 1D och 2D jämfört med motsvarande tryck i 3D. Detta väcker således en förhoppning om att det är möjligt att överslagsmässigt använda sig av ett samband baserat på energi/volymenhet vid bestämning av styrkan hos en stötvåg som breder ut sig i en komplex geometri.

5.5.4 Jämförelse av ankomsttid

Det är inte möjligt att jämföra ankomsttider eftersom likställning av innesluten volym medför att avstånden till studerad punkt skiljer sig så mycket mellan de olika fallen. Någon jämförelse görs därför inte.

5.5.5 Jämförelse av impuls

Enligt Eriksson (1990) är det möjligt att jämföra impulstätheten för utbredning i 1D, 2D respektive 3D via impulsen *I* skalat med laddningsvikten. Impulsen *I* bestäms av impulstätheten *i* och den total arean *A* som stötvågsfronten bildar på ett givet avstånd *r* från laddningen, dvs.

$$I = i \cdot A \tag{5.16}$$

Detta kan för de olika utbredningsfallen då skrivas som

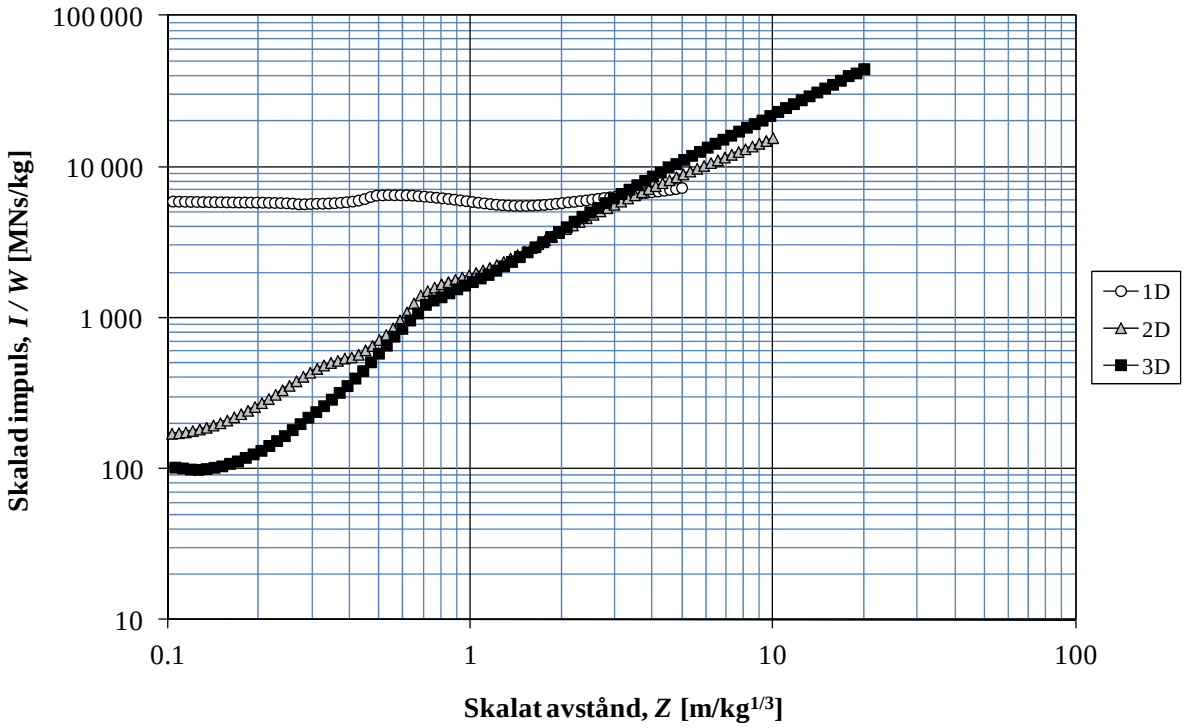
$$\frac{I_{3D}}{W_{3D}} = \frac{i_{3D} \cdot A_{3D}}{W_{3D}} = \frac{i_{3D} \cdot \left(\gamma_{3D} \cdot r_{3D}{}^{2}\right)}{W_{3D}} \quad \text{där} \quad \gamma_{3D} = 4\pi \tag{5.17}$$

$$\frac{I_{2D}}{W_{2D}} = \frac{i_{2D} \cdot A_{2D}}{W_{2D}} = \frac{i_{2D} \cdot \left(\gamma_{2D} \cdot r_{2D}{}^{2}\right)}{W_{2D}} \quad \text{där} \quad \gamma_{2D} = 2\pi h = [h = 1{,}0] = 2\pi \tag{5.18}$$

$$\frac{I_{1D}}{W_{1D}} = \frac{i_{1D} \cdot A_{1D}}{W_{1D}} = \frac{i_{1D} \cdot \left(\gamma_{1D} \cdot r_{1D}{}^{2}\right)}{W_{1D}} \quad \text{där} \quad \gamma_{1D} = bh = [b = h = 1{,}0] = 1{,}0 \tag{5.19}$$

där A_{3D}, A_{2D} och A_{1D} utgör stötvågfrontens yta på en sfär, cylinder respektive ett prisma.

Av denna jämförelse framgår att den omräknade impulsen uppnår en förhållandevis god överensstämmelse för $0{,}4 \leq Z \leq 10$ m/kg$^{1/3}$ för sfärisk (3D) och cylindrisk (2D) utbredning. Impulsen för plan utbredning (1D) är dock närmast konstant över hela det studerade intervallet och skiljer sig också betänkligt mot de andra två. Orsaken till detta är i nuläget oklar men ämnas undersökas närmare i det fortsatta arbetet. Likheten mellan sfärisk och cylindrisk utbredning är dock uppmuntrande och antyder att det kan vara möjligt att nyttja ett dylikt koncept med likställande av innesluten volym för att uppskatta lastnivån längs exempelvis en trång gata.



Figur 5.29 *Jämförelse av genererad impuls för fri utbredning i olika dimensioner när det skalade avståndet har räknats om i enlighet med ekvation (5.12) och (5.13) och den skalade impulsen enligt ekvation (5.17) till (5.19).*

6 Byggnaders tålighet för utvändig explosion

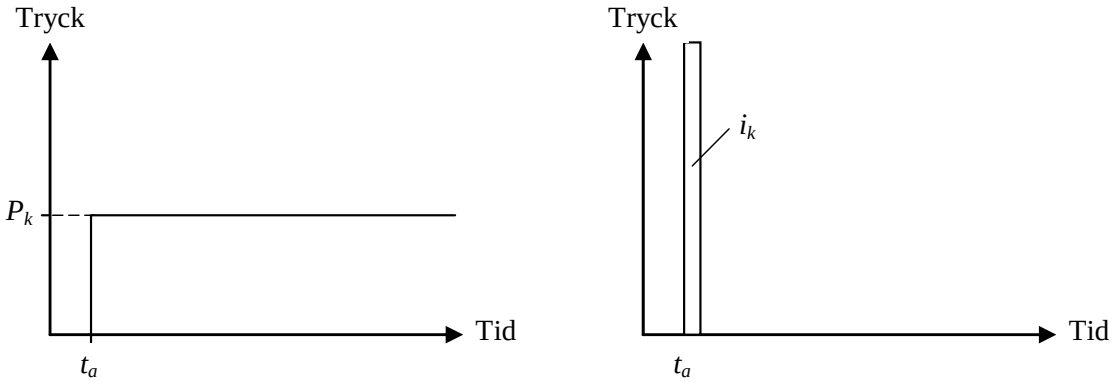
6.1 Orientering

Byggnaders tålighet för utvändig explosion är en viktig del i förståelsen för hur allvarlig effekten blir av en specifik explosion i en bebyggelse vari olika typer av byggnadskonstruktioner återfinns. Detta kapitel försöker inte återge en komplett bild av hur tåligheten är hos olika typhus utan ska betraktas som ett första steg att ge en anvisning för vilka tryck och impulsnivåer som krävs för att en vägg allvarligt ska skadas eller rasa samman. I Johansson och Laine (2012b) ges en mer komplett bild på hur bärförmåga och resthållfasthet kan beräknas för olika byggnadskonstruktioner som återfinns i bebyggelsen.

Materialet som återges i detta kapitel är hämtat från simuleringsverktyget VEBE, se avsnitt 3.5.3, vilket beskrivs närmare i exempelvis Lindqvist *et al.* (1989) och Lindqvist *et al.* (1994).

6.2 Karakteristiska tryck och impulstätheter

Beräkningsmetoden för väggras i VEBE baserar sig på en metod som hanterar explosioner som har ett övertryck med lång eller kort varaktighet. Exempel på det förra är gasexplosioner som har en lång varaktighet jämfört med utsvängningstiden hos belastad byggnadsdel, exempelvis en vägg, men som också uppvisar ett förhållandevis lågt tryck. En explosion med kort varaktighet fås till exempel vid detonation av konventionella sprängmedel, vilka uppvisar höga tryck men en varaktighet som ofta är betydligt kortare än utsvängningstiden hos belastad byggnadsdel. Ytterlighetsfallen av dessa båda belastningsfall illustreras i Figur 6.1, där P_k anger det karakteristiska trycket för en oändligt lång stötvåg och i_c anger den karakteristiska impulstätheten för en belastning med en ideal impulsbelastning (oändligt högt tryck och oändligt kort varaktighet). Vid lång och kort varaktighet är det karakteristiska trycket respektive den karakteristiska impulstätheten som är dimensionerande för utsatt byggnadsdel.



Figur 6.1 Illustration av karakteristiskt tryck P_k och karakteristisk impulstäthet i_k.

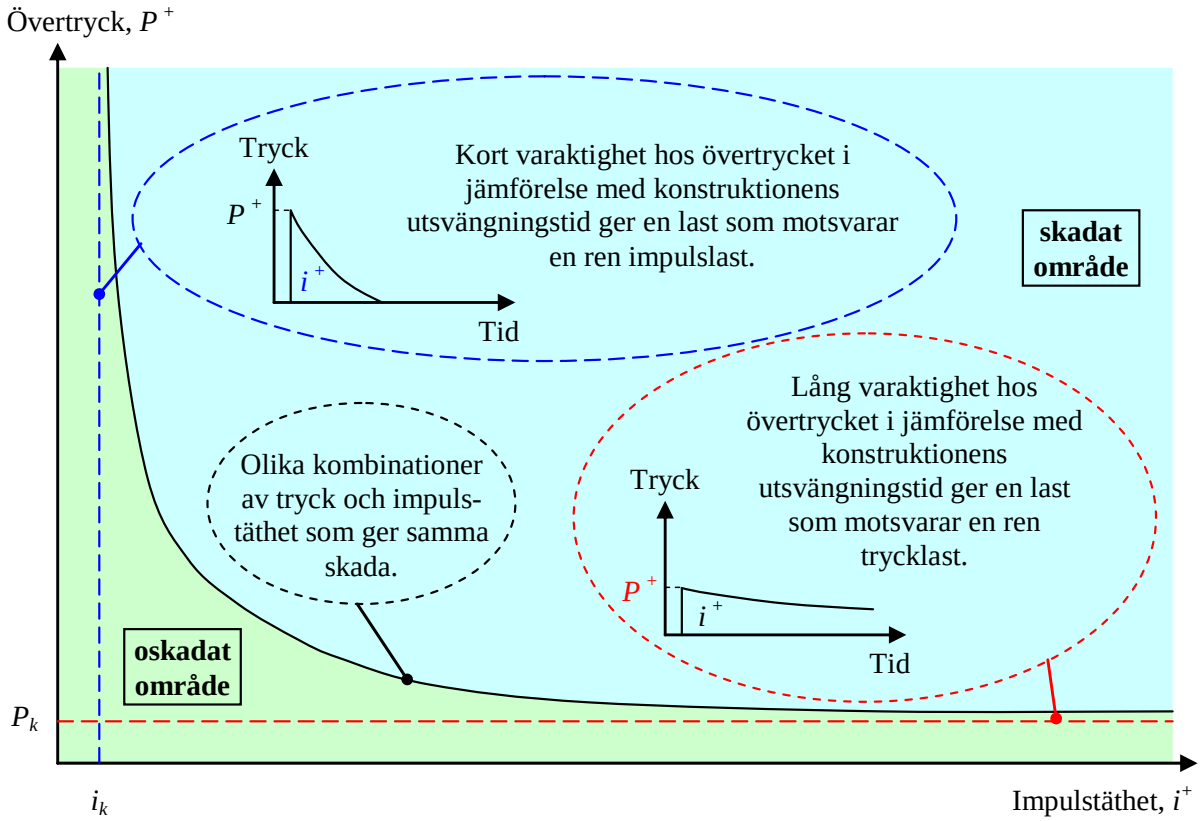
För att vikta verkan både från karakteristiskt tryck p_c och impulstäthet i_k används ofta tryck och impulstäthetsdiagram, såkallade skadekurvor – se till exempel Balazs (1997) eller Nyström (2006) – där P_k och i_k utgör asymptoter, se Figur 6.2. Med vetskap om en byggnadsdels specifika skadekurva är det möjligt att från aktuell belastning avgöra om byggnadsdelen har fått bestående skada.

Alternativt kan ett approximativt uttryck enligt Granström (1958) användas:

$$\frac{i_k}{i^+} + \frac{P_k}{P^+} \leq 1 \tag{6.1}$$

där en summa mindre än 1 hos vänsterledet innebär bestående skada hos konstruktionen.

Karaktäristiskt tryck och impuls varierar med vilken typ av konstruktion som studeras. Lite förenklat kan sägas att en lättare konstruktion, exempelvis en trävägg, är känslig för höga tryck och låga impulser medan en tyngre konstruktion, till exempel en betongvägg, tål högre tryck och impulsnivåer. I Lindqvist *et al.* (1994) ges en sammanfattande tabell över vilka karakteristiska last-nivåer som kan tillåtas för olika typer av konstruktioner, se Tabell 6.1 och Tabell 6.2. Samma tabell återfinns även i Forsén (1998) där det även nämns att det saknas data på spridning på angivna värden och att värdena därför får anses vara 50 %-iga skadenivåer, dvs. hälften av byggnaderna av respektive typ kollapsar vid angiven lastnivå. Dessa lastvärden kan även jämföras med de tryck och impulstätheter som redovisas i Tabell 3.1 över acceptabla säkerhetsavstånd för olika typer av sprängladdningar.



Figur 6.2 *Illustration av hur en skadekurva för byggnadsdel kan se ut i ett tryck-impuls-täthetsdiagram. Där P_k och i_k utgör asymptoter där minst båda måste överskridas för att skada på byggnadsdelen ska uppstå. Baserad på Forsén (1998).*

Tabell 6.1 Karakteristiska tryck P_k och impulstätheter i_k för kollaps av byggnader med betongstomme samt murade sommar. Baserat på Lindqvist et al. (1994) och Forsén (1998).

Typ av konstruktion	Beteckning enligt typhus-katalog [1)]	Våningshöjd [m]	Karakteristiskt tryck, P_k [kPa]	Karakteristiskt impulstäthet, i_k [kPas]
Byggnader med stomme i platsgjuten betong:				
Bärande ytterväggar av 20 cm betong (och invändiga pelare)	B1TN	3,5	200	2,5
Lätta utfackningsväggar (plåtkassetter) i pelarhus	B2LN	3,5	5	0,5
Medeltunga utfackningsväggar (regelstomme och fasadtegelskal) i pelarhus	B2MN	3,5	5	1,0
Bärande tvärväggar och utfackade längsgående ytterväggar:	B3MN	2,5		
Gavel med 16 cm betong			200	2,5 / 5 [2)]
Långsida (regelstomme och fasadtegelskal)			10	1,0
Cellhus med bärande ytterväggar av 15 cm betong	B4TN	2,5	200	2,5 / 5 [2)]
Byggnader med stomme i monterad betong:				
Hallbyggnad med ytterväggar av 25 cm lättbetongelement (spännvidd 6 m)	P1MH	6,0	5	0,5
Hallbyggnad med ytterväggar av sandwichelement (betongisolering-betong), (spännvidd 4 m)	P1TH	8,0	6	2,8
Pelar-balkstomme med ytterväggar av sandwichelement (betong-isolering-betong)	P1TN	3,5	200	3,1
Elementhus med ytterväggar av sandwichelement (betong-isolering-betong)	P2TN	2,5	200	3,1
Byggnader med murad stomme:				
Småhus med yttervägg av 250 mm lättbetong	M1LS	2,5	25	0,5
Flerfamiljshus med 1-stens bärande ytterväggar	M1TN	3,0	80	1,5
Äldre tegelbyggnad (1,5-stens yttervägg)	M2TN	3,0	200	1,8

[1)] Typhusklassningen återfinns i Dellgar *et al.* (1993a) och Dellgar *et al.* (1993b).
[2)] Det högre värde är angivet i Lindqvist *et al.* (1994).

Tabell 6.2 Karakteristiska tryck p_c och impulstätheter i_c för kollaps av byggnader med stål- och trästomme. Baserat på Lindqvist et al. (1994) och Forsén (1998).

Typ av konstruktion	Beteckning enligt typhus-katalog [1)]	Våningshöjd [m]	Karakteristiskt tryck, P_k [kPa]	Karakteristiskt impulstäthet, i_k [kPas]
Byggnader med stomme i stål:				
Hallbyggnad med lätta ytterväggar (profilerad plåt på stålreglar, spännvidd 6 m)	S1LH	7,5	5	0,5
Pelarhus med lätta utfackningsväggar (stålreglar med utvändig plåtbeklädnad)	S1LN	3,5	15	1,5
Pelarhus med medeltunga utfacknings-väggar (regelstomme och fasadtegelskal)	S1MN	3,5	15	1,0
Hallbyggnad med tunga ytterväggar (2 halvstens tegelmurar med mellan-liggande isolering)	S1TH	7,5	2,5	0,3
Byggnader med trästomme:				
Plank- och timmerhus	T1MN	3,0	20	0,6
Hallbyggnad med pelare/balkstomme (väggbeklädnad träpanel på träreglar, spännvidd 6 m)	T2LH	6,0	2	0,1
Hallbyggnad med regelstomme (väggbeklädnad träpanel)	T3LH	3,0	1	0,1
Större hus med regelstomme (väggbeklädnad träpanel)	T3LN	3,0	2	0,2
Småhus med regelstomme (yttervägg med 1/2-stens fasadtegelskal)	T3MS	2,5	10	0,8

[1)] Typhusklassningen återfinns i Dellgar *et al* (1993a) och Dellgar *et al* (1993b).

7 Människors tålighet för utvändig explosion

7.1 Orientering

Detta kapitel baseras på den sammanställning som återfinns i Forsén (1998) om människors tålighet mot utvändig explosion. Ursprungliga referenser, som via analyser och experiment har framtagit människors tålighet redovisas löpande i texten.

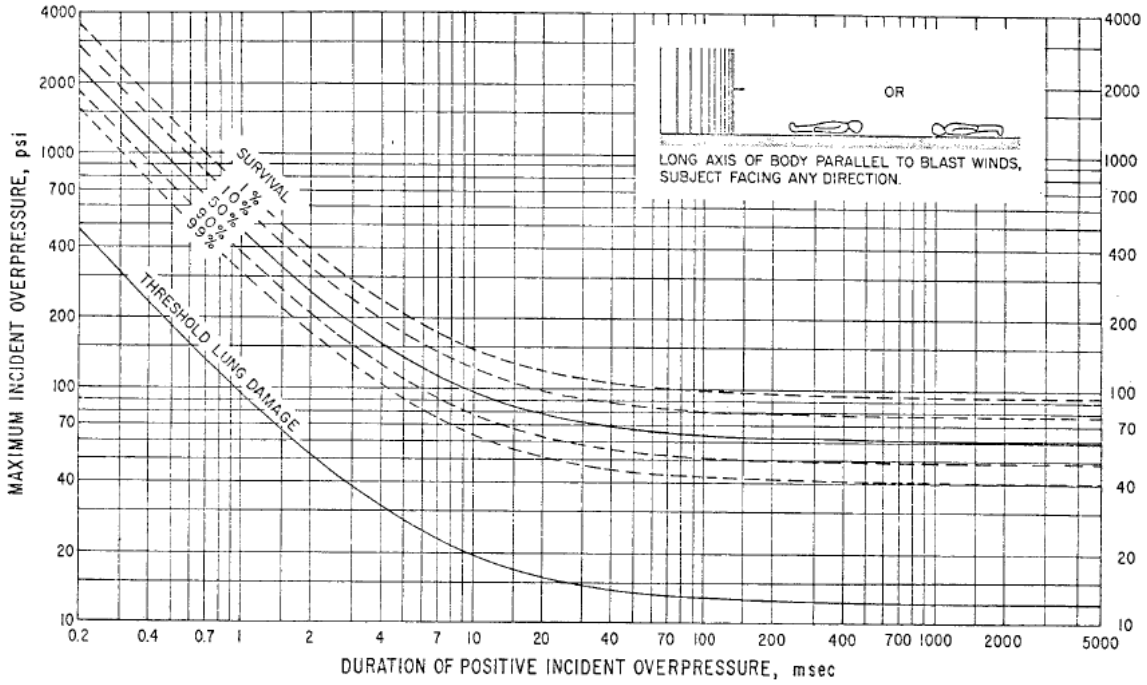
Människors tålighet mot utvändig explosion kan kategoriseras i direkta och indirekta skador från stötvågen. Dessutom kan indirekta skador delas in i sekundära samt tertiära skador. De sekundära skadorna uppstår från splitter medan de tertiära skadorna uppstår när en en människa som slungats iväg bromsas upp av stillastående föremål. Vidare tillkommer ras av byggnadsdelar som en ytterligare kategori.

7.2 Direkta skador

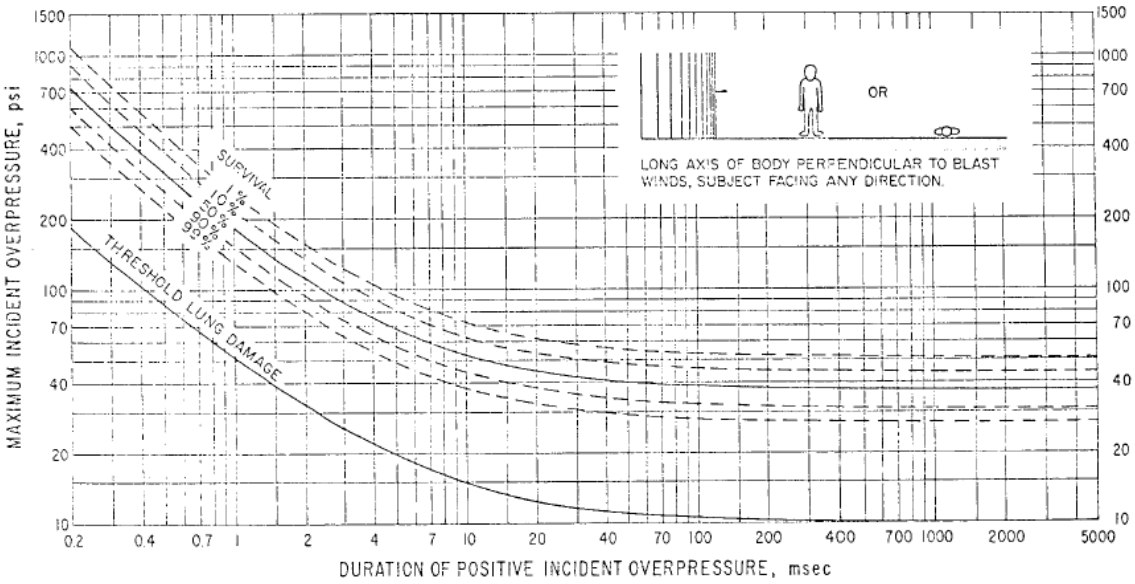
Direkta skador på människor från explosioner uppstår primärt i trumhinnorna, vilket är det tryckkänsligaste organet, därefter är det lungorna som blir skadade. Experiment och observationer visar på stora variationer för vilka värden trumhinnerupturer uppstår vid luftstötvåg, se Richmond *et al.* (1966). I denna nämns 5 psi[2] (35 kPa) som ett tröskelvärde när trumhinnerupturer kan uppstå vid luftstötvåg med snabb tryckstigning och en varaktighet på 3 ms. Denna trycknivå används också ofta som gränsvärde för när en människa kan råka ut för skada, jämför angivelse i Tabell 3.1. För 50 procentig risk att trumhinnerupturer inträffar nämns 15 psi (103 kPa) för samma kortvariga luftstötvåg. Dvs. vid denna belastning kommer 50 % av alla personer drabbas av skador i trumhinnan. Andra faktorer som påverkar känsligheten hos den direkta skadan är varaktigheten hos stötvågen och hur människan är orienterad med hänsyn till stötvågens utbredningsriktning.

Vid kortare varaktighet tål människan högre trycknivåer, se Figur 7.1 till Figur 7.3. Dessa figurer visar samma tendens, att om varaktigheten är kortare än 10 ms så ökar tåligheten markant för vilket tryck som skada i lungor och överlevnad kan estimeras. Vidare framgår att människans orientering med avseende på stötvågens utbredningsriktning också är viktig. Om människans längdaxel är parallellt orienterad med stötvågsutbredningens riktning uppgår tröskelvärdet för lungskada till 20 psi (138 kPa) vid 10 ms varaktighet, se Figur 7.1. Om däremot människans axel är vinkelrätt orienterad i jämförelse med stötvågens färdriktning sjunker tröskelvärdet till 15 psi (103 kPa) för samma varaktighet, se Figur 7.2. Den ändrade orienteringen ger således en sänkning av tröskelvärdet med 25 %. Om människans bröstkorg (thorax) är placerad nära en reflexionsyta för vinkelrätt anslag av stötvågen sjunker tröskelvärdet för lungskador till 8 psi (55 kPa) vid en varaktighet om 10 ms. Detta motsvarar en sänkning av tröskelvärdet med nästan 50 % i jämförelse med fallet där kroppen endast står vinkelrätt mot stötvågsutbredningen. I Figur 7.1 till Figur 7.3 anges värden för en person som väger 70 kg. Enligt TM 5-1300 (1990) påverkas skaderisken dock även på den utsatta personens vikt, se Figur 7.4. Dvs. en person med låg vikt är mer utsatt än en person med hög vikt.

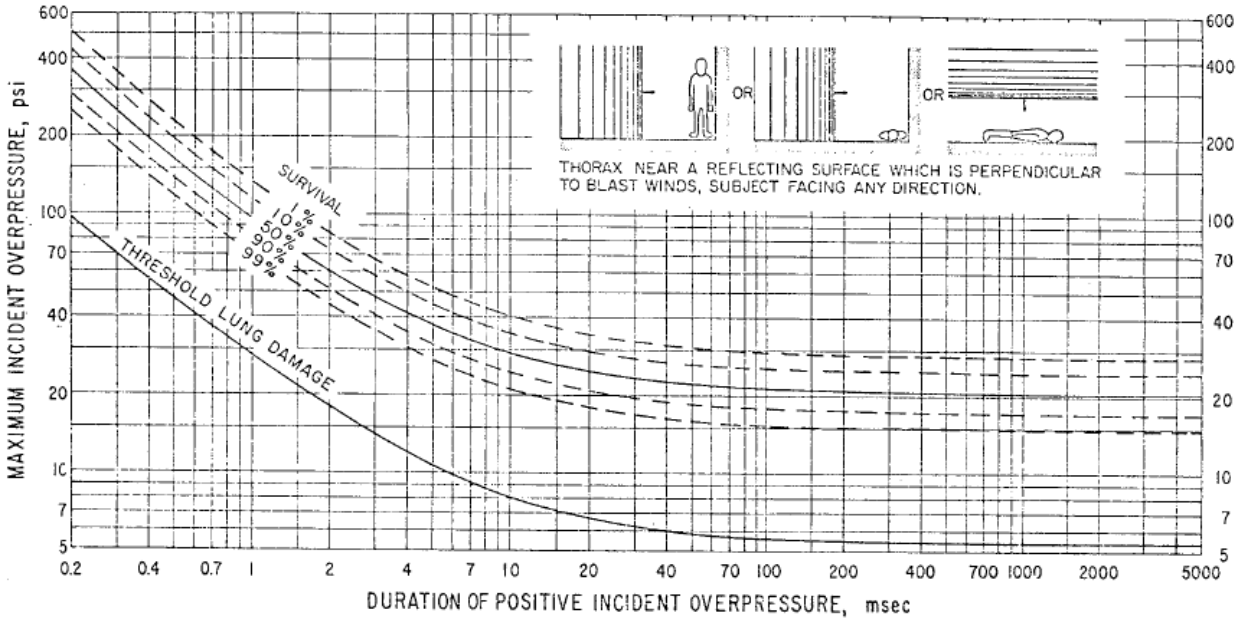
[2] psi = pounds per square inch, 1 psi = 6,895 kPa.



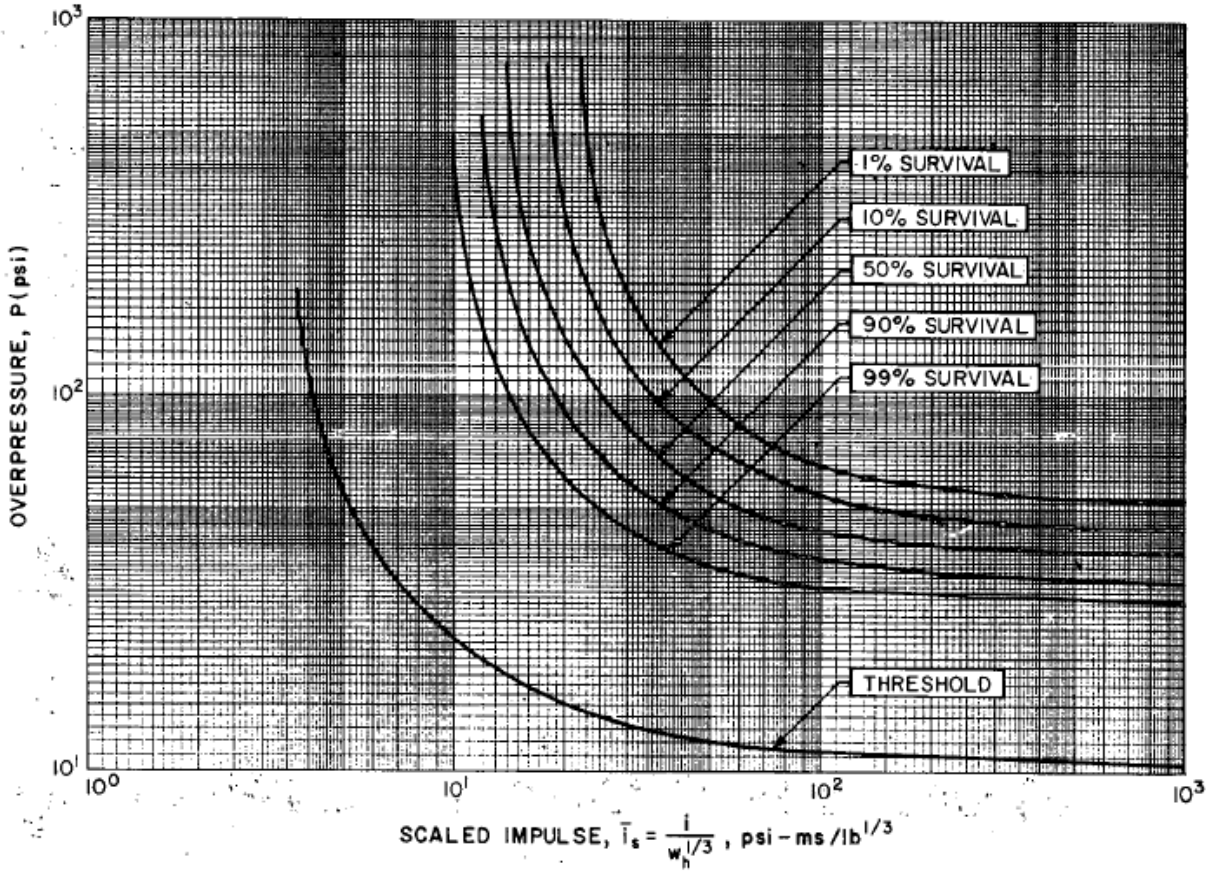
Figur 7.1 *Överlevnadskurvor som är predikterade för en människa med vikten 70 kg. Människans längsgående axel är placerad parallellt med stötvågens utbredningsriktning. Från White et al. (1971).*



Figur 7.2 *Överlevnadskurvor som är predikterade för en människa med vikten 70 kg. Människans längsgående axel är placerad vinkelrätt mot stötvågens utbredningsriktning. Från White et al. (1971).*



Figur 7.3 *Överlevnadskurvor som är predikterade för en människa med vikten 70 kg. Människans bröstkorg (thorax) är placerad nära en reflexionsyta för vinkelrätt anslag hos stötvågen. Från White et al. (1971).*



Figur 7.4 *Skaderisk med beaktande av vikt w_h hos utsatt person. Från TM 5-1300 (1990).*

I Tabell 7.1 redovisas oreflekterade tryckvärden, vilka leder till skada eller dödlighet för fallet där människan är orienterad vinkelrätt stötvågsutbredningen, som funktion av varaktighet. Tabellen visar tydligt hur människan tål mer tryck om varaktigheten sjunker. Om exempelvis risken för lungskador studeras så är tröskelvärdet 70 kPa vid varaktigheten 100 ms. Om varaktigheten sjunker till 10 ms ökar dock tröskelvärdet till 100 kPa, dvs. en tryckökning med 43 %. Om varaktigheten sjunker från 100 ms till 3 ms ökar tröskelvärdet till 170 kPa, vilket motsvarar en ökning på 143 procent. Detta kan jämföras med skadekurvor på strukturer vilka påvisar samma typ av beteende, se Figur 6.2.

Tabell 7.1 Skador på människa, vikt 70 kg, med längsgående axel orienterad vinkelrätt stötvågsutbredningen med avseende på oreflekterat tryck [kPa] och varaktighet hos luftstötvågen. Värden är hämtade från Figur 7.2 om inget annat anges.

Typ av skada	Varaktighet [ms]		
	3	10	100
Trumhinneruptur, tröskelvärde	35 [1)]	-	-
Trumhinneruptur, 50 %	103 [1)]	-	-
Lungskada, tröskelvärde	170	100	70
99 % överlevnad	410	240	180
90 % överlevnad	550	310	210
50 % överlevnad	620	340	260
10 % överlevnad	760	410	300
1 % överlevnad	970	480	350

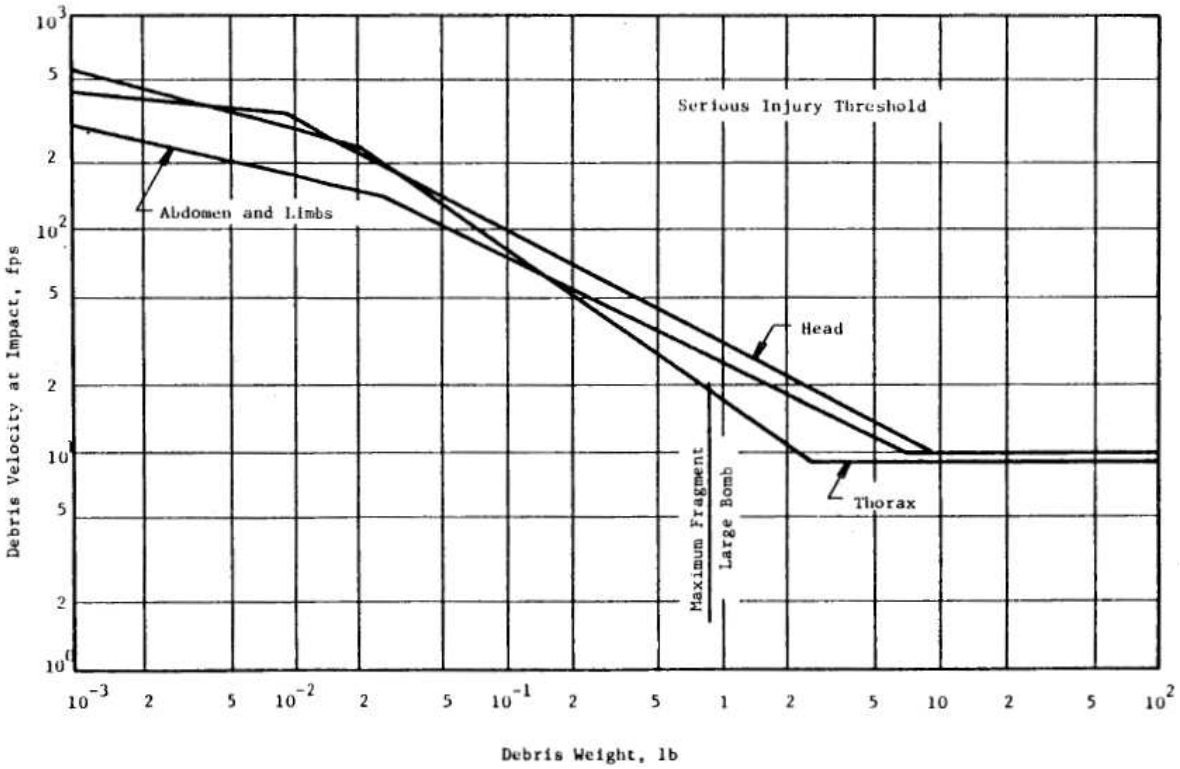
[1)] Från Richmond *et al* (1966).

7.3 Indirekta skador

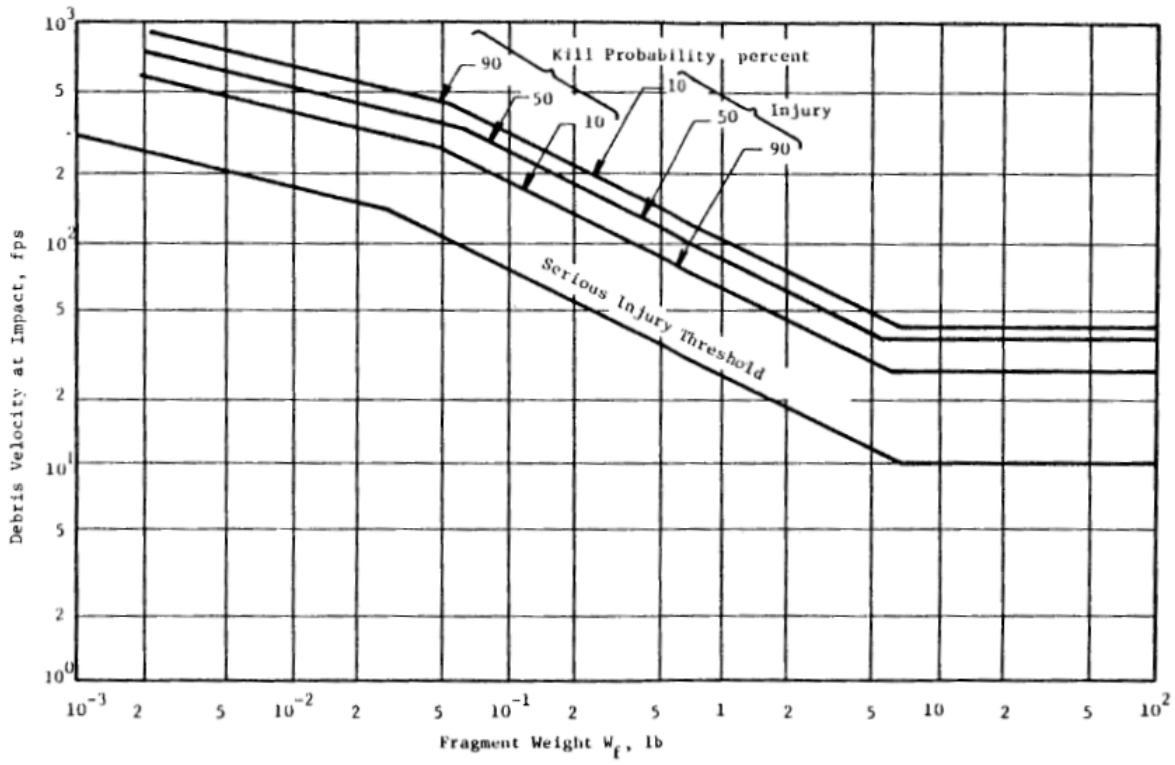
7.3.1 Sekundära skador – splitter

Splitter som accelereras direkt av laddningen är en stor källa till skada hos människor. Splittrets massa och hastighet påverkar hur stor skada som kan uppstå. I Figur 7.5 redovisas tröskelvärden för allvarliga skador hos buken, lemmar, thorax, och huvud som funktion av splittrets hastighet och massa. Figuren illustrerar hur ett splitter med lägre massa behöver högre hastighet för att uppnå allvarlig skada. Exempelvis är tröskelvärdet för allvarlig skada i huvudet 100 fps[3] (ca 30 m/s) för ett splitter som väger 0,1 lb (ca 45 g). Om splittret däremot väger 2 lb (ca 0,9 kg) behövs dock enbart en hastighet på 20 fps (ca 6 m/s) för att uppnå samma allvarliga skada i huvudet. Figur 7.6 redovisar vilka värden på splitterhastigheter och massa som leder till dödlig utgång med 90, 50, respektive 10 % sannolikhet.

[3] fps = feet per second, 1 fps = 0,3048 m/s.



Figur 7.5 Tröskelvärden för allvarlig skada från splitter i buk (abdomen), lemmar, huvud, thorax (bröstkorg). Från MBFLS (1980).



Figur 7.6 Tröskelvärden för allvarlig skada och dödlighet från splitter i buk(abdomen) och lemmar. Från MBFLS (1980).

7.3.2 Tertiära skador – kroppen slungas av stötvågen

Tertiära skador uppstår av att stötvågen accelererar kroppen så att den slungas iväg och när kroppen sedan bromsas upp av föremål, byggnader, eller marken så uppstår skador. I Tabell 7.2 redovisas huvudets anslagshastighet när skallfraktur uppstår samt dödlig anslagshastighet för kroppen.

Tabell 7.2 Skador på människa när människan slungas iväg av stötvågen. Anslagshastighet hos huvud och kropp redovisas. Från MBFLS (1980).

Typ av skada	
Skallfrakturer:	Anslagshastighet huvud [m/s]
Mestadels inga skador	3,0
Tröskelvärde	4,0
Nära 50 procent	5,5
Nära 100 procent	7,0
Andel döda:	Anslagshastighet kropp [m/s]
mestadels inga döda	3,0
Tröskelvärde	6,4
Nära 50 procent	16,5
Nära 100 procent	42,1

7.4 Avslutande kommentar

En jämförelse av tillåtna tryckvärden för byggnader och människor i avsnitt 6.2 respektive avsnitt 7.2 kan ge den missvisande bilden att människor är tåligare än byggnader vad gäller explosioner. Sett ur ett isolerat tryckperspektiv är detta visserligen sant men det förutsätter samtidigt att människokroppen är belägen på ett sådant sätt att den inte slungas iväg, jämför avsnitt 7.3.2, och träffar något hårt underlag. Sett ur ett sådant perspektiv sjunker också tillåtet tryck betänkligt och TM-5 1300 (1990) nämner ett tillåtet tryck på 2,3 psi (16 kPa) som ett värde för när man kastas omkull. Således är det inte de direkta skadorna av trycket som nödvändigtvis är farligt för människan utan snarare indirekta skador orsakade av flygande föremål och/eller att man slungas iväg.

8 Slutsatser

Denna publikation behandlar luftstötvågor orsakade av explosion och går igenom grundläggande stötvågsbegrepp samt fenomen såsom reflexion, spegling och diffraktion. En kategorisering av olika hotbilder för explosionslaster presenteras. Vidare behandlas den komplexa situation som uppstår vid explosion i stadsmiljö och publikationen ger en övergripande inblick i hur bebyggelsen, via reflexioner och fördämningseffekter, påverkar egenskaperna hos en explosionslast samt hur den påverkas av den resulterande lasten. Nedan ges en kort sammanställning av slutsatser dragna i publikationen.

Det har verifierats att finita elementprogrammet Autodyn med god överensstämmelse kan återskapa de explosionsegenskaper som observerats i försök. Analyser i Autodyn har därefter använts för att ta fram uppgifter som annars är svårtillgängligt att finna i litteraturen:

- Det vanligen använda tryck-tidssambandet för den positiva fasen är representativt först när det skalade avståndet $Z \geq 0{,}8$ m/kg$^{1/3}$. För lägre värden på Z inverkar spränggaser från laddningen på det erhållna tryck-tidssambandet, med drastisk inverkan nära laddning.

- I utförda analyser har det observerats att trycket oscillerar och ger upphov till sekundära tryck-toppar även vid fri avlastning. Med anledning av detta presenteras ett nytt tryck-tidssamband för en idealisk stötvåg där skillnaden gentemot det klassiska sambandet är introducerandet av en sekundär stötvåg som delar in den negativa fasen i två delar. Denna effekt blir mer markant ju närmare laddning som studerad punkt är placerad.

- Det påvisas att sambandet för oreflekterad impulstäthet, som används i bland annat programmet ConWep, är omkring 20 % för högt. Orsaken till detta är nyttjandet av en för stor speglings-faktor i den försöksutvärdering som ligger till grund för samband nyttjat i ConWep.

- Samband för tryck, impulstäthet och varaktighet har tagits fram för den negativa fasen.

- Stötvågens utbredning som funktion av avståndet till laddningen presenteras.

En inledande litteraturstudie har visat på den omfattande komplexitet som en explosion i stadsmiljö innebär och slutsatser från denna är:

- Aktuell gatukonfigiration har stor inverkan på explosionens resulterande lastintensitet.

- En minskad gatubredd och/eller ökad byggnadshöjd resulterar i större lastintensitet. Det kan dock påvisas att det finns en gräns på $h/W^{1/3} = 3{,}2$ m/kg$^{1/3}$ för när byggnadshöjdens betydelse kan försummas. Med undantag av gator med låg höjd ($h/W^{1/3} = 0{,}8$ m/kg$^{1/3}$) blir den negativa impulstätheten större än den positiva för de flesta kombinationer av gatubredd och höjd. Detta kan förklara observerade fenomen med att fönsterrutor fallit ut ur och inte in i byggnaden vid explosionssituationer i stadsmiljö.

Dylika belastningssituationer kräver därför mer avancerade verktyg för att kunna förutsäga hur den resulterande belastningssituationen blir. Ett inledande arbete om detta, baserat på stötvågens inneslutna volym, presenteras och det konkluderas att resultaten är av sådan art att det är meningsfullt med fortsatta studier i denna riktning. Metoden synes lämpa sig väl för att uppskatta aktuellt övertryck samt indikerar att så även är fallet för impulstätheten.

9 Referenser

Baker W.E. (1973): Explosions in Air. University of Texas Press, Austin, USA.

Balazs P. (1997): Beräkningsmetoder vid stötvågsbelastade konstruktioner. Försvarets forskningsanstalt, Avdelningen för vapen och skydd, FOA-R—97-00473-311—SE, Stockholm.

BATF (1999): Vehicle bomb explosion hazard and evacuation distance tables. Bureau of Alcohol, Tobacco and Firearms (BATF), Department of the Treausury, ATF Publication I 5400 1, USA.

Bischoff P.H. and Perry S.H. (1991): Compressive behaviour of concrete at high strain rates. Materials and Structures, 1991, 24, sid 425-450.

Brode H.L. (1955): Numerical Solutions of Spherical Blast Waves. Journal of Applied Physics, Vo. 26, No. 6, sid 766-775.

Bulson P.S. (1997): Explosive Loading of Engineering Structures. E & FN Spon, Chapman & Hall, London, Storbritannien.

Century Dynamics (2004): AUTODYN Revision 5.0, San Ramon, Kalifornien, USA.

Christopherson D.G. (1946): Structural Defence (1945). UK Ministry of Home Security, Civil Defence Research Committee paper RC 450.

ConWep (1992): ConWep – Collection of conventional weapons effects calculations based on TM 5-855-1, Fundamentals of Protective Design for Conventional Weapons, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, USA.

Dellgar U., och Liljegren K. (1993): Typhus – Delrapport avseende arbetsbebyggelsens byggnadstyper och förekomst samt förslag till ny typhusindelning. FOA Rapport C 20925-2.6, Sundbyberg.

Dellgar U., Evang A., Wänglund C. (1993): Typhus Arbetsplatsbebyggelse - Byggnadstyp, indelning och förekomst. FOA Rapport C 20947-2.6, Sundbyberg.

EESWG (2007): Explosion Effects Software Working Group. Department of Defense, Explosives Safety Board, www.ddesb.pentagon.mil/documents.html.

Dewey J.M. och McMillin D.J. (1997) Proceedings of 15th Symposium on the Military Aspects of Blast and Shock, Banff, Alberta, Kanada.

Dewey J.M. och van Netten A. (2002): Calculating Blast-Effects Distances in Urban Environments. Proceedings of 17th Symposium on the Military Aspects of Blast and Shock, Las Vegas, Nevada, USA.

Dörr A., Brombacher B., Gürke G. (2004): Blast behind street junctions originating from vehicle bombs. Proceedings of 18th Symposium on the Military Aspects of Blast and Shock, Bad Reichenhall, Tyskland.

Ekengren B., Johansson M., Laine L., Leppänen J. (2005): Dynamisk lastpåverkan - Referensbok. Räddningsverket, Karlstad.

Eriksson S. (1990): Stötvågens volymberoende. Forskningsbyrån, Fortifikationsförvaltningen, Rapport C2:90, Stockholm.

Elfving C. (1989): Tvådimensionell luftstötvågsutbredning. Forskningsbyrån, Fortifikationsförvaltningen, Rapport A1:89, Stockholm.

Fischer S., Forsén R., Hertzberg O., Jacobsson A., Koch B., Runn P., Thaning L., Winter S. (1998): Vådautsläpp av Brandfarliga och Giftiga Gaser och Vätskor, Metoder för bedömning av risker, Andra reviderade och utökade upplagan. Avdelningen för NBC-skydd och Avdelningen för Vapen och Skydd, Försvarets Forskningsanstalt, FOA-R--97-00490-990—SE, Sverige.

Forsén R. (1998): Tryck vid explosioner. Kapitel 10 i Fischer et al. (1998), sid 279-312.

FortH 2 (1991): Fortifikationshandbok del 2, Kapitel 4-6. Försvarets Läromedelscentral, Stockholm.

Försvarsmakten (2007): Nordic Battlegroup - svenskledd styrka till EU:s snabbinsatsförmåga. Försvarsmakten, www.mil.se/article.php?id=12793, 2007-07-04.

Granström S. (1958): Beräkningsmetoder för stötvågsbelastade konstruktioner. Kungliga Fortifikationsförvaltningen, Forskningssektionen, Rapport nr. 103:18, Stockholm.

Göteborgs-Posten (2006): En person anhållen för sprängdåden - Husrannsakan hos Bandidos sent i går kväll. Göteborgs-Posten, www.gp.se, 2006-09-21.

Heilig W. (1995): Oblique reflexion of decaying pressure waves. Proceedings of 14th Symposium on the Military Aspects of Blast and Shock, Las Cruces, New Mexico, USA.

Holm G., Forsén R., Hägglund B., Lindqvist S. (1995): VEBE – En modell för skadesimulering i tätorter. Försvarets forskningsanstalt, Avlningen för styrning, material och undervattenssensorer, FOA-R—95-00152-2.6(2.7)--SE, Stockholm.

Holm G. (1997): Skadesimulering. Räddningsverket, Publikation B54-202/97, Karlstad.

Johansson M. (2012): Luftstötvåg. Myndigheten för samhällsskydd och beredskap. Publ.nr MSB448, Karlstad.

Johansson M. och Laine L. (2012a): Bebyggelsens motståndsförmåga mot extrem dynamisk belastning, Del 1: Last av luftstötvåg. Myndigheten för samhällsskydd och beredskap. Publ.nr MSB449, Karlstad.

Johansson M. och Laine L. (2012b): Bebyggelsens motståndsförmåga mot extrem dynamisk belastning, Del 2: Explosion i gatukorsning. Myndigheten för samhällsskydd och beredskap. Publ.nr MSB450, Karlstad.

Johansson M. och Laine L. (2012b): Bebyggelsens motståndsförmåga mot extrem dynamisk belastning, Del 3: Kapacitet hos byggnader. Myndigheten för samhällsskydd och beredskap, Publ.nr MSB 0142-10, Karlstad.

KBM (2006): CBRN – Ämnen och hotbilder. Krisberedsskapsmyndigheten, Dnr 1174/2006, 2006-06-26, Stockholm.

Kingery C.N. (1966): Air Blast Parameters versus Distance for Hemisperical TNT Surface Bursts. Terminal Ballistics Laboratory, Aberdeen Proving Ground, Report No. 1344, Maryland, USA.

Kinney G.F. och Graham K.J. (1985): Explosive Shocks in Air. Springer-Verlag New-York Inc., New York, USA.

Laine L. (2012): Markstötvåg. Myndigheten för samhällsskydd och beredskap. Publ.nr MSB344, Karlstad.

Laine L. och Sandvik A. (2001): Derivation of Mechanical Properties for Sand. 4th Asian-Pacific Conference on Shock and Impact Loads on Structures, Singapore, November 2001, sid 353-360.

Langberg H., Christensen S.O., Skudal S. (2004): Test program with small concrete ”kasun” houses. Forsvarsbygg, FoU Rapport nr. 24/2004, Oslo, Norge.

Larsen O.P. (2006): A Numerical Study on Shock Waves in Air. Anker-Zemer Engineering A/S, 2006-11-27, Oslo, Norge.

Leppänen J. (2012): Splitterverkan. Myndigheten för samhällsskydd och beredskap. Publ.nr MSB345, Karlstad.

Lindqvist S., Forsén R., Holm G., Hägglund B. (1989): VEBE – Datoriserad dynamisk modell för konventionell vapenverkan i bebyggelse, Arbetslägesrapport 1988/1989. Försvarets forskningsanstalt, Huvudavdelning 2, FOA Rapport C 20772-2.5(2.6, 2.7), Stockholm.

Lindqvist S., Forsén R., Holm G., Hägglund B., Onnermark B. (1994): VEBE – Datoriserad dynamisk modell för konventionell vapenverkan i bebyggelse, Arbetslägesrapport 1992/1993. Försvarets forskningsanstalt, Huvudavdelningen för Vapensystem, verkan och skydd, FOA Rapport C 20971-2.5(2.6, 2.7), Sundbyberg.

MBEES (2007): Military Blast Effects Expert System. DRDC Suffield, http://www.dres.dnd.ca/ ResearchTech/Products/MilEng_Products/RD2006_05_MBEES/index_e.html

MBFLS (1980): Manual for the prediction of blast and fragment loadings on structures, Teknisk rapport nr DOE/TIC-11268, USDOE Albuquerque Operations Office, NM; Southwest Research Inst., San Antonio, Texas, USA.

NCTC (2006): Bomb Threat Stand-Off Distances Chart. National Counterterrorism Center, USA.

Nyström U. (2006): Design with regard to explosions. Avdelningen för Konstruktionsteknik, Betongbyggnad, Chalmers tekniska högskola, Examensarbete 06:14.

Remennikov A.M. (2004): Evaluation of blast loads on buildings in urban environment. Proceedings of 8th International Conference on Structures Under Shock and Impact, SUSI VIII, Kreta.

Remennikov A.M. och Rose T.A. (2005): Modelling blast loads on buildings in complex city geometries. Computers and Structures 83, sid 2197-2205.

Rice D., Giltrud M.E., Luo H., Mestreau E., Baum J.D. (2000): Experimental and numerical investigation of shock diffraction about blastwalls. Proceedings of 16th Symposium on the Military Aspects of Blast and Shock, Oxford, Storbritannien.

Richmond D.R., Damon E.G., Fletcher E.R, Bowen I.G., White C.S. (1966) The relationship between selected blast-wave parameters and the response of mammals exposed, Progress Report, DASA 1860, Lovelace Foundation for Medical Education and Research, USA.

Ritzel D. (2006): Personlig kommunikation. Explosionsexpert, Dyn-FX Consulting Ltd, Kanada.

Rose T.A. och Smith. P.D. (2000): An approach to the problem of blast wave clearing on finite structures using empirical procedures based on numerical simulations. Proceedings of 16th Symposium on the Military Aspects of Blast and Shock, Oxford, Storbritannien.

Rose T.A. och Smith. P.D. (2002a): Influence of the principal geometrical parameters of straight city streets on positive and negative phase blast wave impulses. International Journal of Impact Engineering 27, sid 359–376.

Rose T.A. och Smith. P.D. (2002b): An investigation of the effects of shielding of blast in an urban environment. Royal Military College of Science, Engineering Systems Department, Report No. RMCS/ESD/TAR/661, Swindon, Storbritannien.

Rose T.A. och Smith. P.D. (2003a): The influence of street junctions on blast wave impulses produced by vehicle bombs. Proceedings of the 11th International Symposium on Interaction of the Effects of Munitions with Structures, Mannheim, Tyskland.

Rose T.A. och Smith. P.D. (2003b): A rule-based approach for channelling and shielding. Royal Military College of Science, Engineering Systems Department, Report No. RMCS/ESD/TAR/763, Swindon, Storbritannien.

Rose T.A. och Smith. P.D. (2004): Oblique clearing: Blast loads on building at non-zero angles of incidence. Proceedings of 18th Symposium on the Military Aspects of Blast and Shock, Bad Reichenhall, Tyskland.

von Rosen B., Guilbeault E., Contesabile E. (2004): A preliminary investigation into the interaction of shock waves behind a simple rectangular structure. Proceedings of 18th Symposium on the Military Aspects of Blast and Shock, Bad Reichenhall, Tyskland.

Räddningsverket (2006): Skyddsrum SR 06. Räddningsverket, Publikation B54-141/06, Karlstad.

Sakula J. (1997): The design of building facades for blast resistance. Proceedings of the International Conference on Building Envelope Systems and Technologies, ICBEST'97, Bath, Storbritannien.

SKI (2001): Fysiskt skydd vid svenska kärntekniska anläggningar. Statens Kärnkraftinspektion, www.ski.se/extra/news/?module_instance=1&id=140, 2001-09-14.

Smith. P.D., Whalen G.P., Feng L.J., Rose T.A. (2001): Blast loading on buildings from explosions in city streets. Proceedings of the Institution of Civil Engineers Structures & Buildings 146, February 2001, sid 47-55.

Smith P.D. och Rose T.A. (2002): Blast loading and building robustness. Prog. Struct. Engng Mater. 4, sid 213-223.

Smith P.D. och Rose T.A., Krahe S.L., Franks M.A. (2003a): Facade failure effects on blast propagation along city streets and into buildings. Proceedings of the Institution of Civil Engineers Structures & Buildings 156, November 2003, sid 359-365.

Smith P.D. och Rose T.A., Green J.A. (2003b): The effect of arrays of suburban buildings in providing shielding from blast. Proceedings of the 11th Int. Symposium on Interaction of the Effects of Munitions with Structures, Mannheim, Tyskland.

Smith P.D., Rose T.A., Krahe S.L., Franks M.A. (2003a): Façade failure effects on blast propagation along city streets. Proceedings of the Institution of Civil Engineers Structures & Buildings Journal 156, November 2003, sid 359-365.

Smith P.D., Rose T.A., Hg S.H. (2004): The influence of areal density on the shielding and channelling of blast by buildings. 18th Symposium on the Military Aspects of Blast and Shock, Bad Reichenhall, Tyskland.

Smith P.D. och Rose T.A. (2006): Blast wave propagation in city streets – an overview. Prog. Struct. Engng Mater. 8, sid 16-28.

SVT (2006a): Sveriges Television AB, www.svt.se.

SVT (2006b): Hot mot skandinaver på Västbanken. Sveriges Television AB, http://svt.se/svt/jsp/Crosslink.jsp?d=22620&a=549427, 2006-03-01.

Säkerhetspolisen (2005): Säkerhetspolisen, pressmeddelande. http://www.sakerhetspolisen.se, 2005-02-17.

Säkerhetspolisen (2007): Säkerhetspolisen 2006. Säkerhetspolisen, www.sakerhetspolisen.se.

TM 5-1300 (1990): Structures to resist accidental explosions. Departments of the Army, the Navy and the Air force, TM 5-1300/NAVFAC P-397/,AFR 88-22, USA.

USACE (2007): Protective Design Center, U.S. Army Corps of Engineers, https://pdc.usace.army.mil/software.

VAPO (200?): Vulnerability Assessment and Protection Option. Applied Research Associates, Inc., www.ara.com/capabilities/VAPO.html.

White C.S., Jones R.K., Damon E.G., Fletcher E.R. and Richmond D. (1971): The Biodynamics of Airblast. Technical Report to Defence Nuclear Agency, DNA 2738T, Lovelace Foundation for Medical Education and Research, USA.

BILAGA A Materialdata i Autodyn

I Tabell A.1 till Tabell A.3 listas nyttjad indata för simulering av ostörd luft, TNT och Sjöbosand som använts i här presenterade Autodynanalyser.

Tabell A.1 Indatavärden för ostörd luft i Autodynanalyser.

Beskrivning	Indata	Beskrivning	Indata
Reference density	1.226E-03	Material Cutoffs	-
Gamma	1.400E+00 (none)	Maximum Expansion	1.000E-01 (none)
Adiabatic constant	0.000E+00 (none)	Minimum Density Factor (Euler)	1.000E-05 (none)
Pressure shift	0.000E+00 (kPa)	Minimum Density Factor (SPH)	2.000E-01 (none)
Reference Temperature	2.880E+02 (K)	Maximum Density Factor (SPH)	3.000E+00 (none)
Specific Heat	7.175E+02 (J/kgK)	Minimum Soundspeed	1.000E-06 (m/s)
Strength	None	Maximum Soundspeed	1.010E+20 (m/s)
Failure	None	Maximum Temperature	1.010E+20 (m/s)
Erosion	None	Reference:	-
Material Cutoffs	-		

Tabell A.2 Indatavärden för TNT i Autodynanalyser.

Beskrivning	Indata	Beskrivning	Indata
Equation of State	JWL	Auto-convert to Ideal Gas	No
Reference density	1.630	Strength	None
Parameter A	3.73770E+08 (kPa)	Failure	None
Parameter B	3.74710E+06 (kPa)	Erosion	None
Parameter R1	4.150	Material Cutoffs	-
Parameter R2	9.000E-01 (none)	Maximum Expansion	1.000E-01 (none)
Parameter W	3.500E-01 (none)	Minimum Density Factor (Euler)	1.000E-05 (none)
C-J Detonation velocity	6.930E+03 (m/s)	Minimum Density Factor (SPH)	2.000E-01 (none)
C-J Energy / unit volume	6.000E+06 (kJ/m3)	Maximum Density Factor (SPH)	3.000E+00 (none)
C-J Pressure	2.100E+07 (kPa)	Minimum Soundspeed	1.000E-06 (m/s)
Burn on compression fraction	0.000E+00 (none)	Maximum Soundspeed	1.010E+20 (m/s)
Pre-burn bulk modulus	0.000E+00 (kPa)	Maximum Temperature	1.010E+20 (m/s)
Adiabatic constant	0.000E+00 (none)	Reference:	-

Tabell A.3 Indatavärden för Sjöbosand i Autodynanalyser av hemisfärisk laddning, se bilaga C.

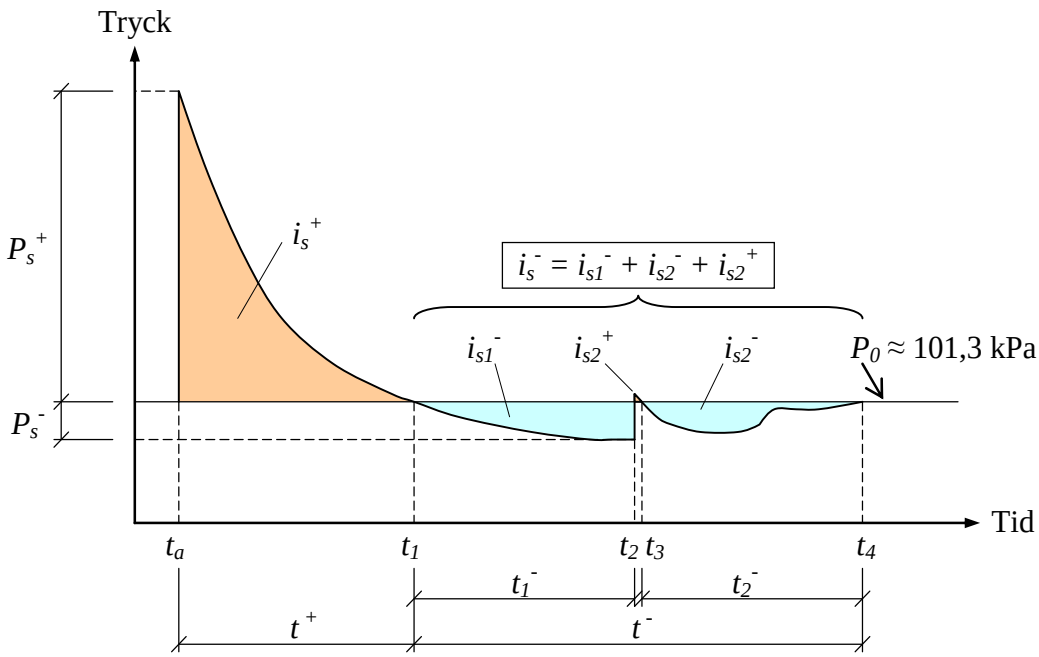
Beskrivning	Indata	Beskrivning	Indata	Beskrivning	Indata
Reference density	2.6410	Strength	MO Granular	Density #1	1.6740 (g/cm3)
Density #1	1.6740 (g/cm3)	Pressure #1	0.00000E+00 (kPa)	Density #2	1.7457 (g/cm3)
Density #2	1.7395 (g/cm3)	Pressure #2	3.40100E+03 (kPa)	Density #3	2.0863 (g/cm3)
Density #3	1.8738 (g/cm3)	Pressure #3	3.48980E+04 (kPa)	Density #4	2.1468 (g/cm3)
Density #4	1.9970 (g/cm3)	Pressure #4	1.01324E+05 (kPa)	Density #5	2.3000 (g/cm3)
Density #5	2.1438 (g/cm3)	Pressure #5	1.84650E+05 (kPa)	Density #6	2.5720 (g/cm3)
Density #6	2.2500 (g/cm3)	Pressure #6	5.00000E+05 (kPa)	Density #7	2.5980 (g/cm3)
Density #7	2.3800 (g/cm3)	Pressure #7	0.00000E+00 (kPa)	Density #8	2.6350 (g/cm3)
Density #8	2.4850 (g/cm3)	Pressure #8	0.00000E+00 (kPa)	Density #9	2.6410 (g/cm3)
Density #9	2.5850 (g/cm3)	Pressure #9	0.00000E+00 (kPa)	Density #10	2.8000 (g/cm3)
Density #10	2.6713 (g/cm3)	Pressure #10	0.00000E+00 (kPa)	Shear Modulus #1	7.6900E+04 (kPa)
Pressure #1	0.0000+00 (kPa)	Yield Stress (zero plastic strain)	0.00000E+00 (kPa)	Shear Modulus #2	8.6940E+05 (kPa)
Pressure #2	4.5770E+03 (kPa)	Yield Stress #2	4.23500E+03 (kPa)	Shear Modulus #3	4.0317E+06 (kPa)
Pressure #3	1.4980E+04 (kPa)	Yield Stress #3	4.46950E+04 (kPa)	Shear Modulus #4	4.9069E+06 (kPa)
Pressure #4	2.9151E+04 (kPa)	Yield Stress #4	1.24035E+05 (kPa)	Shear Modulus #5	7.7690E+06 (kPa)
Pressure #5	5.91750E+04 (kPa)	Yield Stress #5	2.26000E+05 (kPa)	Shear Modulus #6	1.4801E+07 (kPa)
Pressure #6	9.80980E+04 (kPa)	Yield Stress #6	2.26000E+05 (kPa)	Shear Modulus #7	1.6571E+07 (kPa)
Pressure #7	1.79443E+05 (kPa)	Yield Stress #7	0.00000E+00 (kPa)	Shear Modulus #8	3.6718E+07 (kPa)
Pressure #8	2.89443E+05 (kPa)	Yield Stress #8	0.00000E+00 (kPa)	Shear Modulus #9	3.7347E+07 (kPa)
Pressure #9	4.50198E+05 (kPa)	Yield Stress #9	0.00000E+00 (kPa)	Shear Modulus #10	3.7347E+07 (kPa)
Pressure #10	6.50660E+05 (kPa)	Yield Stress #10	0.00000E+00 (kPa)	Failure	Hydro (Pmin)
Density (Soundspeed) #1	1.6740 (g/cm3)	Density #1	1.6740 (g/cm3)	Hydro Tensile Limit	-1.000E+00 (kPa)
Density (Soundspeed) #2	1.7456 (g/cm3)	Density #2	1.7457 (g/cm3)	Reheal	Yes
Density (Soundspeed) #3	2.0863 (g/cm3)	Density #3	2.0863 (g/cm3)	Crack Softening	No
Density (Soundspeed) #4	2.1468 (g/cm3)	Density #4	2.1468 (g/cm3)	Stochastic failure	No
Density (Soundspeed) #5	2.3000 (g/cm3)	Density #5	2.3000 (g/cm3)	Erosion	None
Density (Soundspeed) #6	2.5720 (g/cm3)	Density #6	2.5720 (g/cm3)	Material Cutoffs	-
Density (Soundspeed) #7	2.5980 (g/cm3)	Density #7	2.5980 (g/cm3)	Maximum Expansion	1.000E-01 (none)
Density (Soundspeed) #8	2.6350 (g/cm3)	Density #8	2.6350 (g/cm3)	Minimum Density Factor (Euler)	1.000E-05 (none)
Density (Soundspeed) #9	2.6410 (g/cm3)	Density #9	2.6410 (g/cm3)	Minimum Density Factor (SPH)	2.000E-01 (none)
Density (Soundspeed) #10	2.8000 (g/cm3)	Density #10	2.8000 (g/cm3)	Maximum Density Factor (SPH)	3.000E+00 (none)
Soundspeed #1	2.6520E+02 (m/s)	Yield Stress (zero plastic strain)	0.000	Minimum Soundspeed	1.000E-06 (m/s)
Soundspeed #2	8.5210E+02 (m/s)	Yield Stress #2	0.000	Maximum Soundspeed	1.010E+20 (m/s)
Soundspeed #3	1.7217E+03 (m/s)	Yield Stress #3	0.000	Maximum Temperature	1.010E+20 (m/s)
Soundspeed #4	1.8755E+03 (m/s)	Yield Stress #4	0.000	Reference:	-
Soundspeed #5	2.2648E+03 (m/s)	Yield Stress #5	0.000		
Soundspeed #6	2.9561E+03 (m/s)	Yield Stress #6	0.000		
Soundspeed #7	3.1122E+03 (m/s)	Yield Stress #7	0.000		
Soundspeed #8	4.6000E+03 (m/s)	Yield Stress #8	0.000		
Soundspeed #9	4.6340E+03 (m/s)	Yield Stress #9	0.000		
Soundspeed #10	4.6340E+03 (m/s)	Yield Stress #10	0.000		

BILAGA B Jämförelse av tryck-tidssamband från Autoyn och ConWep

I Tabell B.1listas stötvågsparametrar för fri sfärisk avlastning enligt ConWep (1992). Motsvarande värden för de Autodynanalyser som presenteras i avsnitt 5.3.4 ges i Tabell B.2 och Tabell B.3. I Figur B.1 illustreras det modifierade idealiska tryck-tidssambandet som förklarar i Tabell B.2 och Tabell B.3 ingående parametrar.

Tabell B.1 Stötvågsparametrar från ConWep som i avsnitt 3.4.4.2 redovisas i grafisk form.

Z [m/kg$^{1/3}$]	P_s^+ [kPa]	P_r^+ [kPa]	$i_s^+ / W^{1/3}$ [Pas/kg$^{1/3}$]	$i_r^+ / W^{1/3}$ [Pas/kg$^{1/3}$]	U_s [m/s]	U_p [m/s]	$t_a / W^{1/3}$ [ms/kg$^{1/3}$]	$t^+ / W^{1/3}$ [ms/kg$^{1/3}$]	ρ [kg/m^3]
0,1	30 830	368 300	775	21 840	5 292	4 750	0,016	0,180	11,910
0,2	15 300	158 000	226	6 176	3 750	3 324	0,038	0,190	10,680
0,3	8 996	83 360	151	3 164	2 900	2 519	0,069	0,185	9,063
0,4	5 745	48 800	137	2 026	2 347	1 992	0,107	0,228	8,013
0,6	2 747	19 800	155	1 119	1 659	1 352	0,211	0,496	6,664
0,8	1 521	9 384	196	752	1 260	986	0,352	1,346	5,664
1	935	5 006	175	559	1 011	754	0,532	1,795	4,830
1,2	620	2 931	149	442	847	597	0,749	1,792	4,137
1,4	437	1 851	129	364	735	484	1,001	1,697	3,581
1,6	322	1 242	113	309	656	400	1,286	1,679	3,145
1,8	247	877	101	267	597	337	1,601	1,729	2,806
2	195	646	92	236	553	287	1,944	1,846	2,543
2,4	130	387	78	190	493	215	2,702	2,272	2,174
3	82	215	64	147	442	150	3,988	2,684	1,855
4	46	110	50	106	401	94	6,396	3,064	1,601
5	31	70	41	83	383	67	8,996	3,334	1,483
6	23	50	34	68	372	51	11,692	3,556	1,419
7	18	39	30	58	366	41	14,432	3,748	1,379
8	15	32	26	50	361	34	17,190	3,916	1,353
10	11	23	21	40	356	25	22,720	4,200	1,319
12	9	18	18	33	352	20	28,280	4,434	1,300
16	6	12	13	24	385	14	39,480	4,822	1,277
20	5	9	11	19	347	10	50,960	5,142	1,264



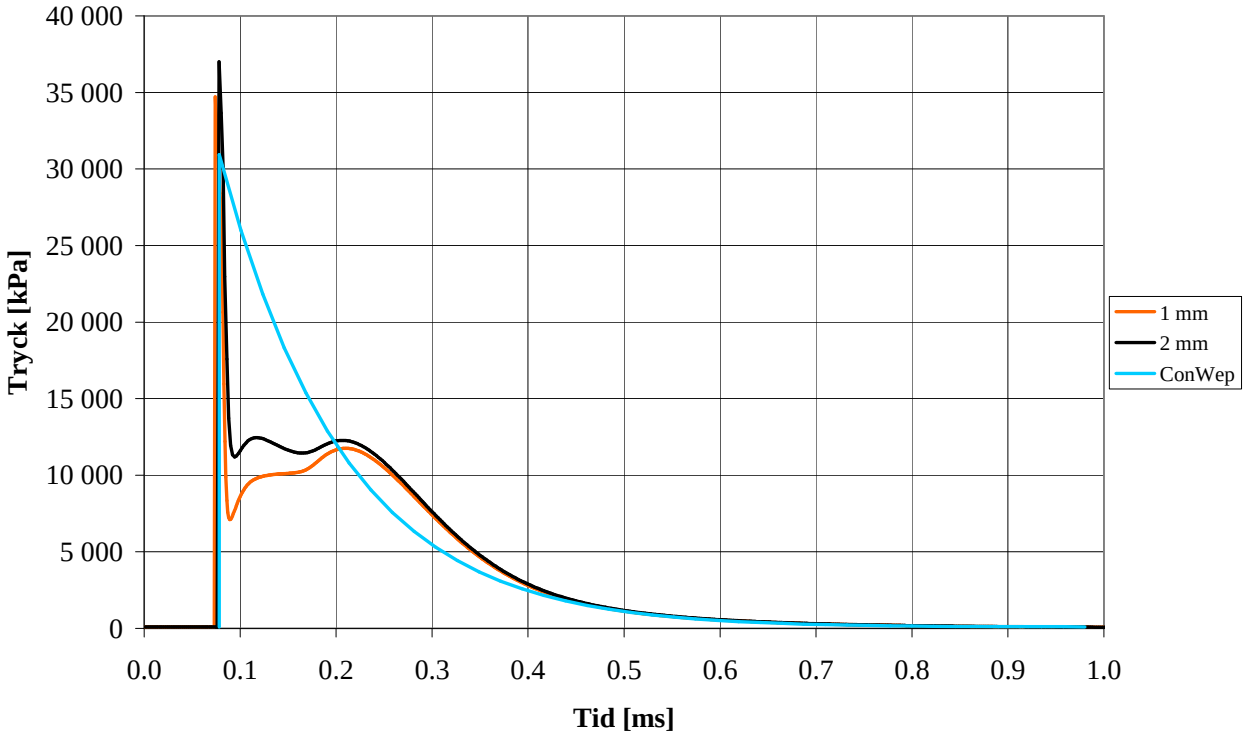
Figur B.1 *Modifierad bild av idealiskt tryck-tidssamband. Aktuellt samband kan sägas gälla för skalat avstånd $Z \geq 0{,}8$ m/kg$^{1/3}$.*

Tabell B.2 *Tryck och skalade impulstätheter från Autodyn jämfört med värden från ConWep (1992). Se Figur B.1 för förklaring av beteckningar.*

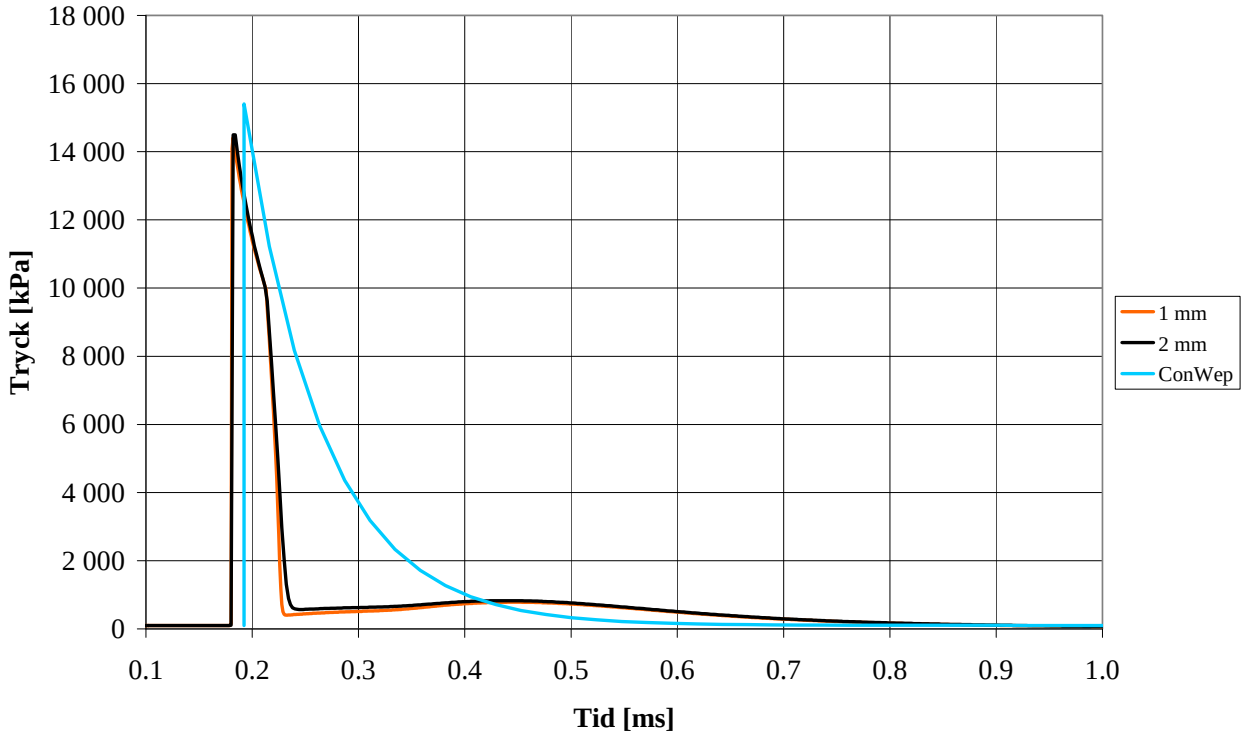
	Autodyn								ConWep	
	Positiv fas		Negativ fas					Kvot	Positiv fas	
Z [m/kg$^{1/3}$]	P_s^+ [kPa]	$i_s^+ / W^{1/3}$ [Pas/kg$^{1/3}$]	P_s^- [kPa]	$i_s^- / W^{1/3}$ [Pas/kg$^{1/3}$]	$i_{s.1}^- / W^{1/-}$ [Pas/kg$^{1/3}$]	$i_{s.2}^+ / W^{1/3}$ [Pas/kg$^{1/3}$]	$i_{s.2}^- / W^{1/}$ [Pas/kg$^{1/3}$]	i_s^-/i_s^+ [-]	P_s^+ [kPa]	$i_s^+ / W^{1/3}$ [Pas/kg$^{1/3}$]
0,1	36 892	689	101	11	-92	179	-76	0,02	30 830	775
0,2	14 395	151	101	27	-94	146	-78	0,18	15 300	226
0,3	8 246	123	101	48	-98	131	-80	0,39	8 996	151
0,4	5 297	137	101	81	-104	103	-80	0,60	5 745	137
0,6	2 551	166	101	87	-31	0	-56	0,53	2 747	155
0,8	1 459	172	29	124	-32	3	-95	0,72	1 521	196
1	916	131	30	124	-37	2	-89	0,95	935	175
1,2	594	109	30	122	-39	0	-83	1,12	620	149
1,4	408	95	29	114	-39	1	-76	1,20	437	129
1,6	295	87	26	106	-37	1	-69	1,22	322	113
1,8	224	80	24	97	-35	1	-63	1,22	247	101
2	176	74	22	89	-32	1	-57	1,20	195	92
2,4	119	65	18	75	-27	0	-48	1,16	130	78
3	77	54	14	61	-22	0	-39	1,13	82	64
4	45	42	11	46	-17	0	-29	1,09	46	50
5	31	34	8	37	-13	0	-24	1,09	31	41
6	23	29	7	32	-11	0	-20	1,10	23	34
7	18	25	6	28	-10	0	-18	1,12	18	30
8	15	22	5	25	-9	0	-16	1,14	15	26
10	11	17	4	21	-7	0	-14	1,20	11	21
12	8	14	3	18	-6	0	-12	1,26	9	18
16	6	11	2	16	-5	0	-11	1,45	6	13
20	4	9	1	-	-3	0	-	-	5	11

Tabell B.3 Skalad ankomsttid och varaktigheter från Autodyn jämfört med värden från ConWep (1992). Se Figur B.1 för förklaring av beteckningar.

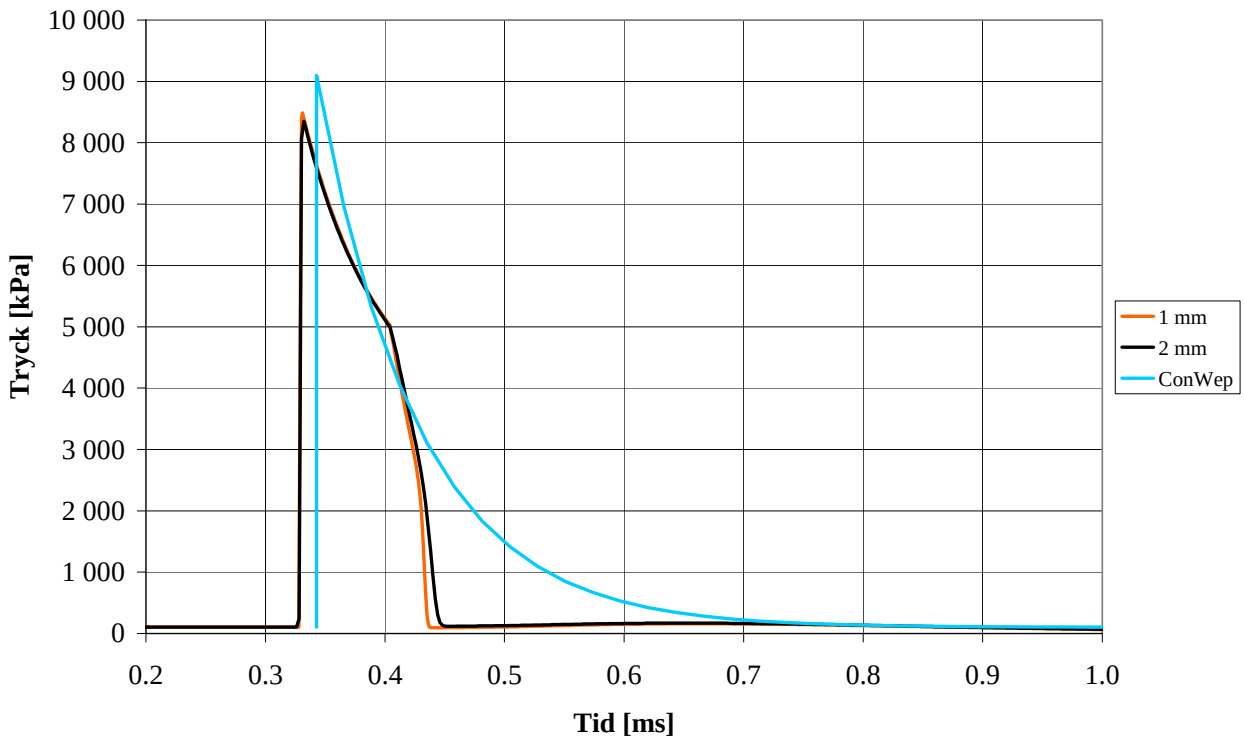
	Autodyn						ConWep	
Z [m/kg$^{1/3}$]	$t_a / W^{1/3}$ [ms/kg$^{1/3}$]	$t^+ / W^{1/3}$ [ms/kg$^{1/3}$]	$t^{r-} / W^{1/3}$ [ms/kg$^{1/3}$]	$t_2^+ / W^{1/3}$ [ms/kg$^{1/3}$]	$t_2^- / W^{1/3}$ [ms/kg$^{1/3}$]	$t^- / W^{1/3}$ [ms/kg$^{1/3}$]	$t_a / W^{1/3}$ [ms/kg$^{1/3}$]	$t^+ / W^{1/3}$ [ms/kg$^{1/3}$]
0,1	0,02	0,17	1,00	1,86	2,06	4,92	0,016	0,180
0,2	0,04	0,15	1,12	1,73	2,10	4,95	0,038	0,190
0,3	0,07	0,11	1,28	1,57	2,09	4,94	0,069	0,185
0,4	0,10	0,05	1,49	1,31	2,21	5,01	0,107	0,228
0,6	0,21	0,16	0,32	0,00	1,50	1,82	0,211	0,496
0,8	0,34	0,75	1,37	0,66	12,31	14,33	0,352	1,346
1	0,52	0,76	1,50	0,55	12,32	14,36	0,532	1,795
1,2	0,74	0,82	1,62	0,10	12,69	14,40	0,749	1,792
1,4	0,99	0,92	1,72	0,40	12,38	14,51	1,001	1,697
1,6	1,29	1,06	1,82	0,35	12,45	14,62	1,286	1,679
1,8	1,61	1,20	1,91	0,29	12,53	14,73	1,601	1,729
2	1,97	1,35	1,97	0,25	12,61	14,83	1,944	1,846
2,4	2,76	1,62	2,08	0,18	12,78	15,05	2,702	2,272
3	4,07	1,96	2,21	0,11	13,09	15,41	3,988	2,684
4	6,44	2,43	2,42	0,02	13,72	16,15	6,396	3,064
5	8,98	2,74	2,58	0,00	14,06	16,65	8,996	3,334
6	11,62	3,00	2,71	0,02	14,44	17,17	11,692	3,556
7	14,32	3,22	2,82	0,02	14,96	17,79	14,432	3,748
8	17,06	3,35	2,93	0,06	15,51	18,49	17,190	3,916
10	22,61	3,66	3,05	0,08	16,55	19,69	22,720	4,200
12	28,24	3,82	3,27	0,05	17,26	20,57	28,280	4,434
16	39,59	4,12	3,67	0,09	19,89	23,65	39,480	4,822
20	51,04	4,48	0,00	0,00	0,00	0,00	50,960	5,142



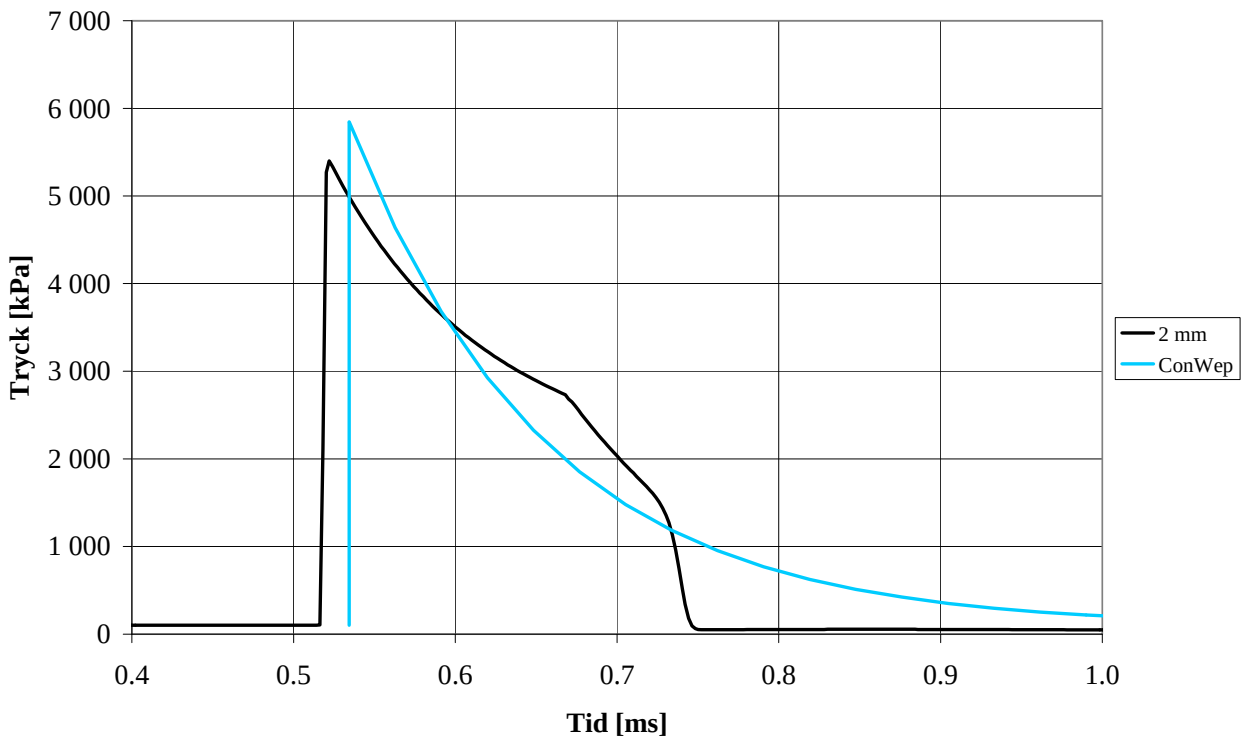
Figur B.2 Jämförelse av tryck-tidssamband från Autodyn och ConWep för en laddning på 125 kg TNT och skalat avstånd Z = 0,1 m/kg$^{1/3}$ (verkligt avstånd r = 0,5 m).



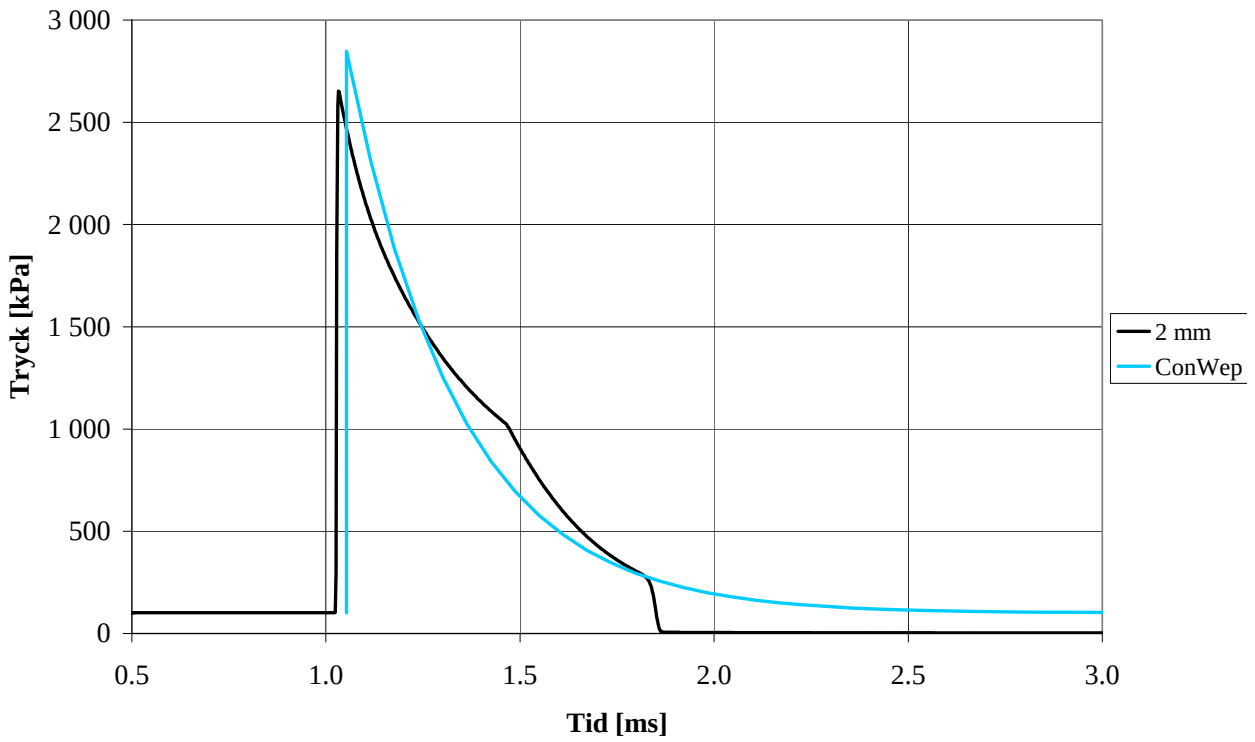
Figur B.3 Jämförelse av tryck-tidssamband från Autodyn och ConWep för en laddning på 125 kg TNT och skalat avstånd Z = 0,2 m/kg$^{1/3}$ (verkligt avstånd r = 1,0 m).



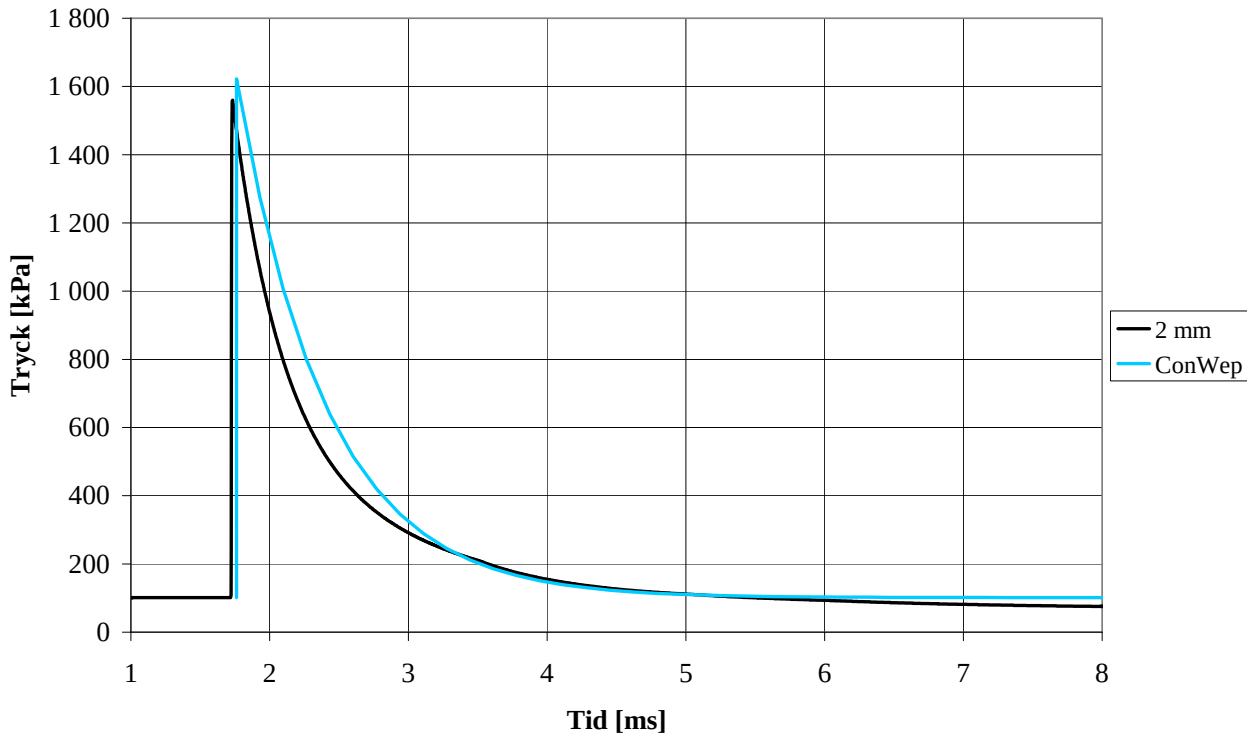
Figur B.4 Jämförelse av tryck-tidssamband från Autodyn och ConWep för en laddning på 125 kg TNT och skalat avstånd Z = 0,3 m/kg$^{1/3}$ (verkligt avstånd r = 1,5 m).



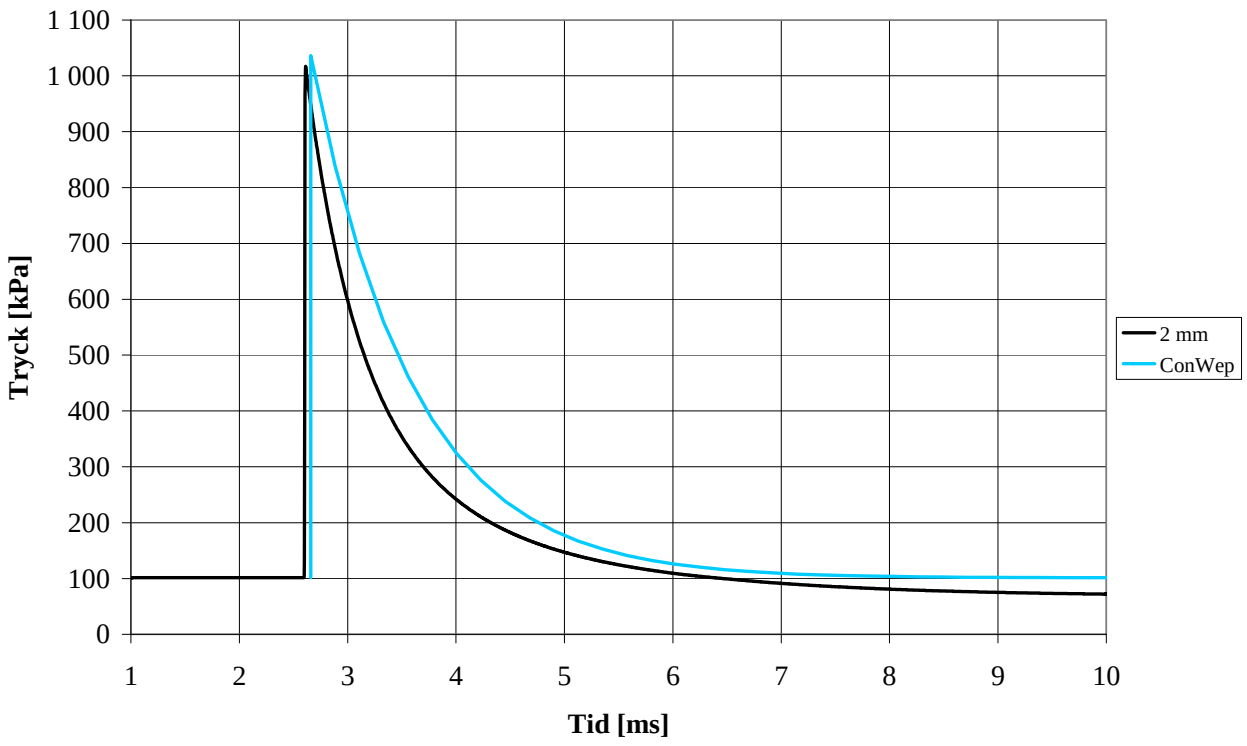
Figur B.5 Jämförelse av tryck-tidssamband från Autodyn och ConWep för en laddning på 125 kg TNT och skalat avstånd Z = 0,4 m/kg$^{1/3}$ (verkligt avstånd r = 2,0 m).



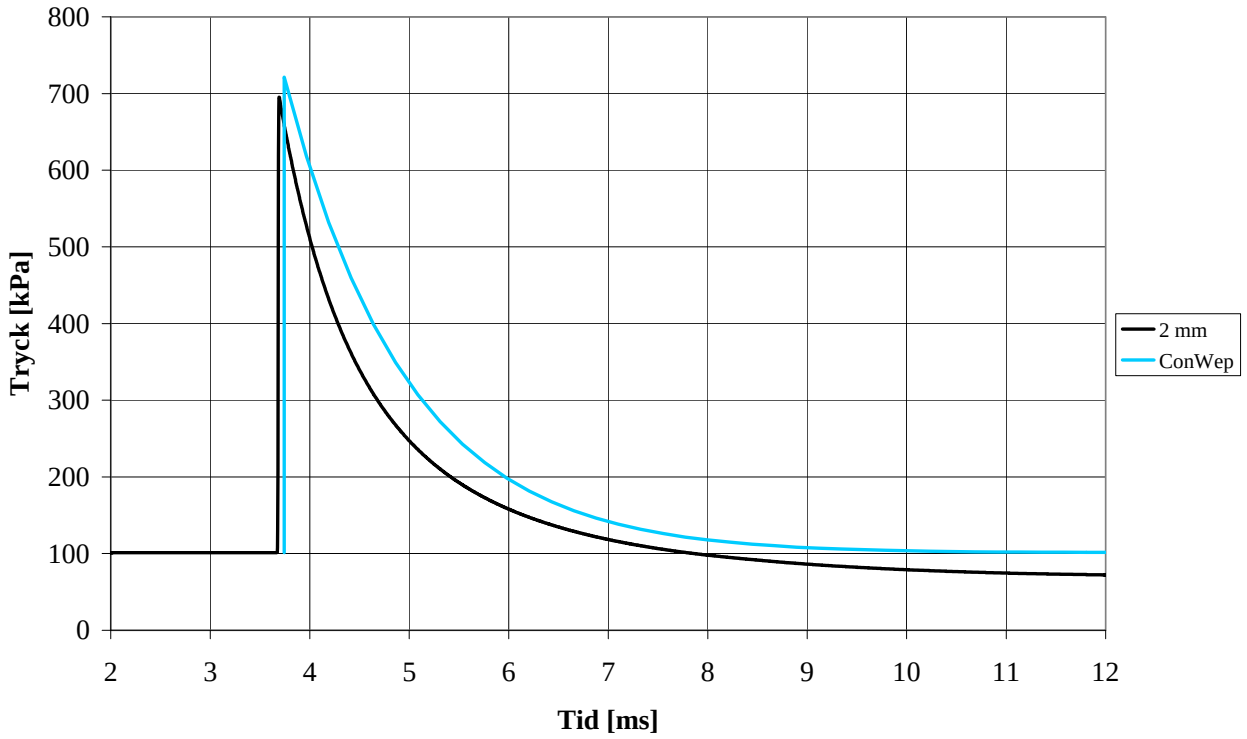
Figur B.6 *Jämförelse av tryck-tidssamband från Autodyn och ConWep för en laddning på 125 kg TNT och skalat avstånd Z = 0,6 m/kg$^{1/3}$ (verkligt avstånd r = 3,0 m).*



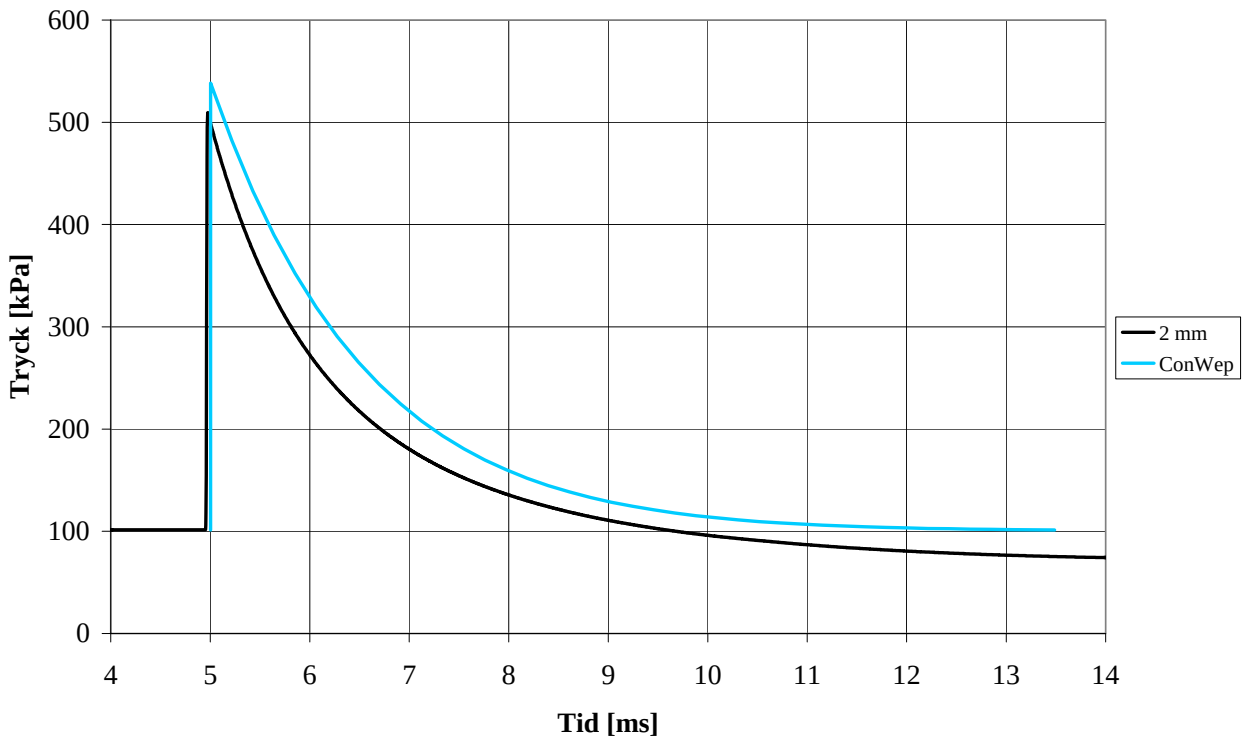
Figur B.7 *Jämförelse av tryck-tidssamband från Autodyn och ConWep för en laddning på 125 kg TNT och skalat avstånd Z = 0,8 m/kg$^{1/3}$ (verkligt avstånd r = 4,0 m).*



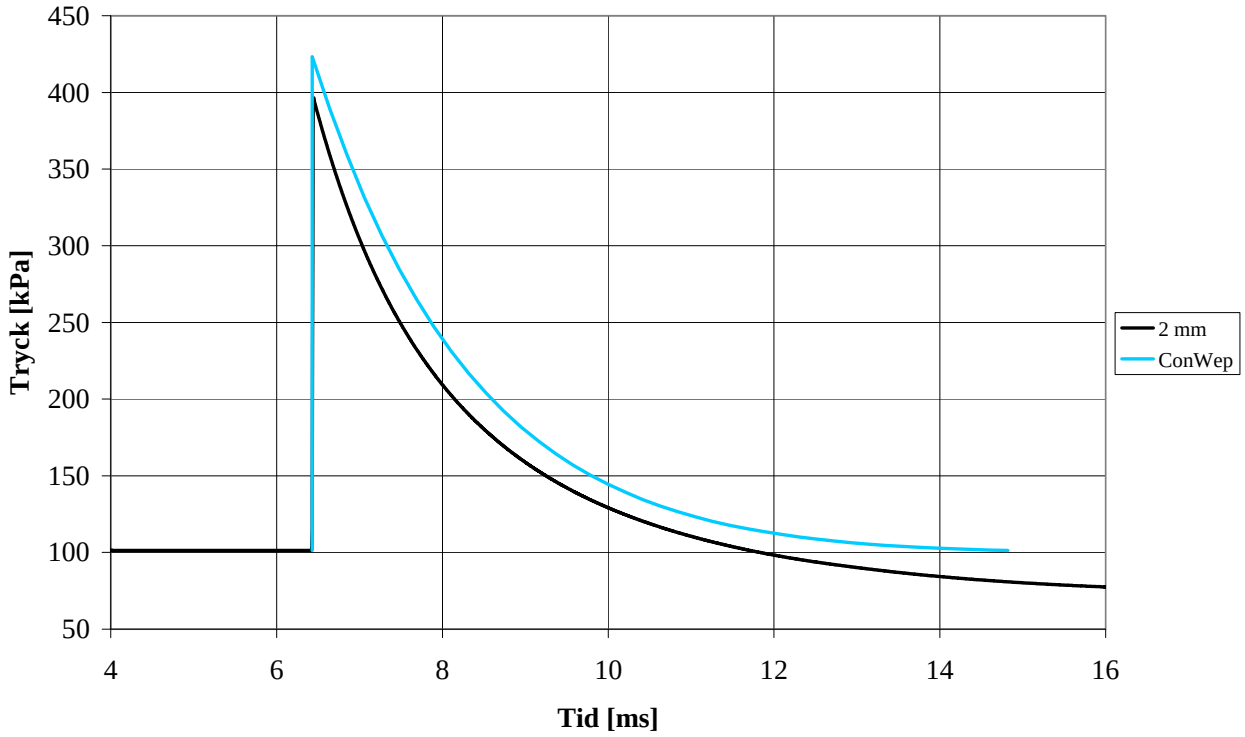
Figur B.8 *Jämförelse av tryck-tidssamband från Autodyn och ConWep för en laddning på 125 kg TNT och skalat avstånd Z = 1,0 m/kg$^{1/3}$ (verkligt avstånd r = 5,0 m).*



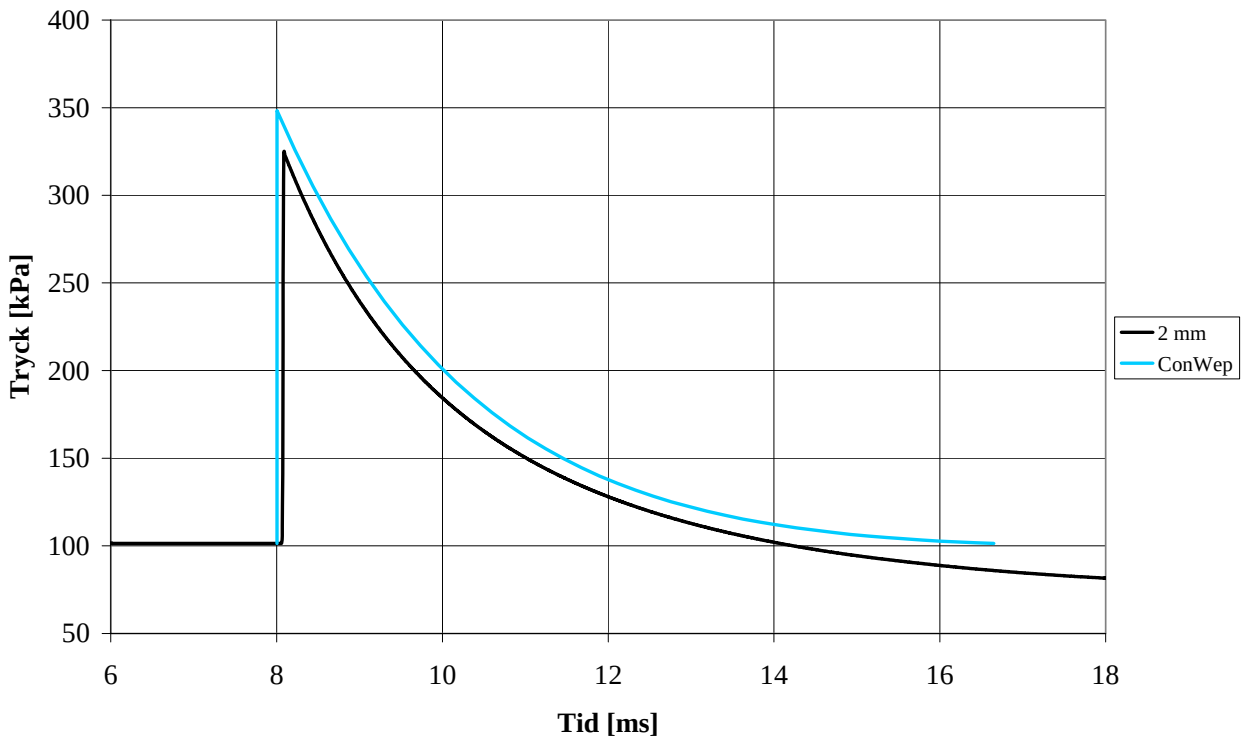
Figur B.9 *Jämförelse av tryck-tidssamband från Autodyn och ConWep för en laddning på 125 kg TNT och skalat avstånd Z = 1,2 m/kg$^{1/3}$ (verkligt avstånd r = 6,0 m).*



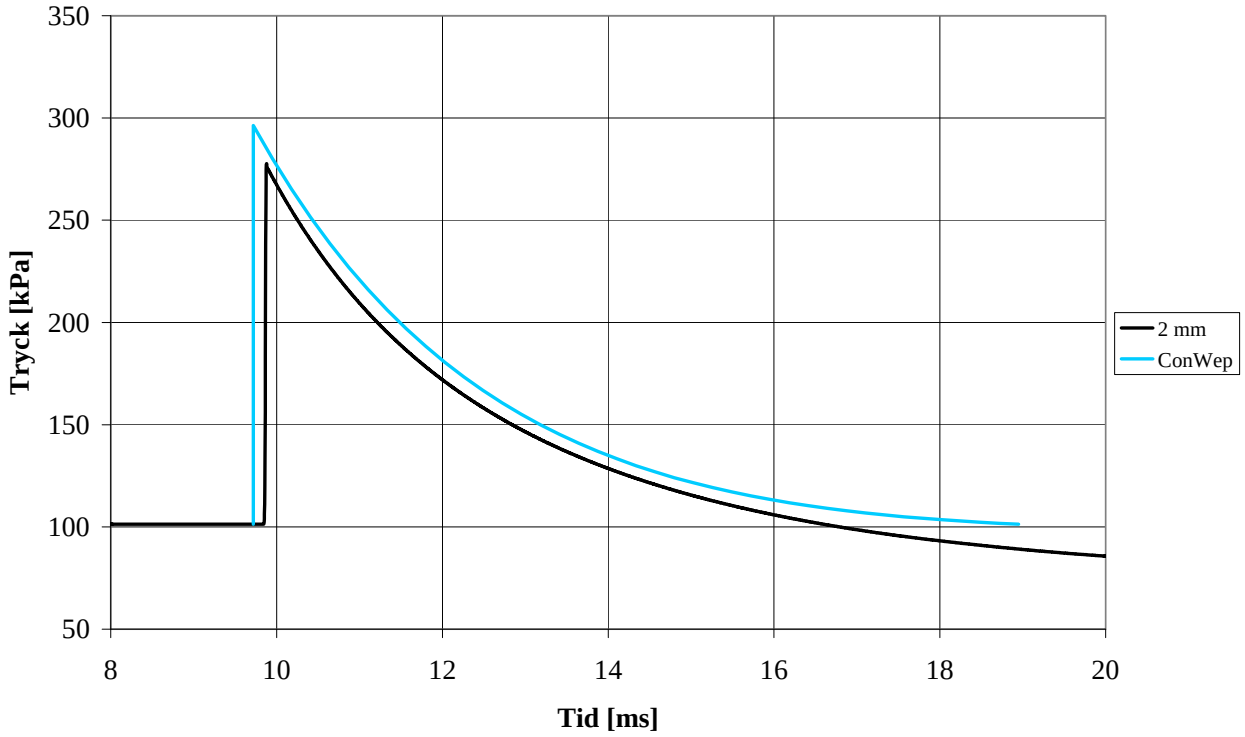
Figur B.10 Jämförelse av tryck-tidssamband från Autodyn och ConWep för en laddning på 125 kg TNT och skalat avstånd Z = 1,4 m/kg$^{1/3}$ (verkligt avstånd r = 7,0 m).



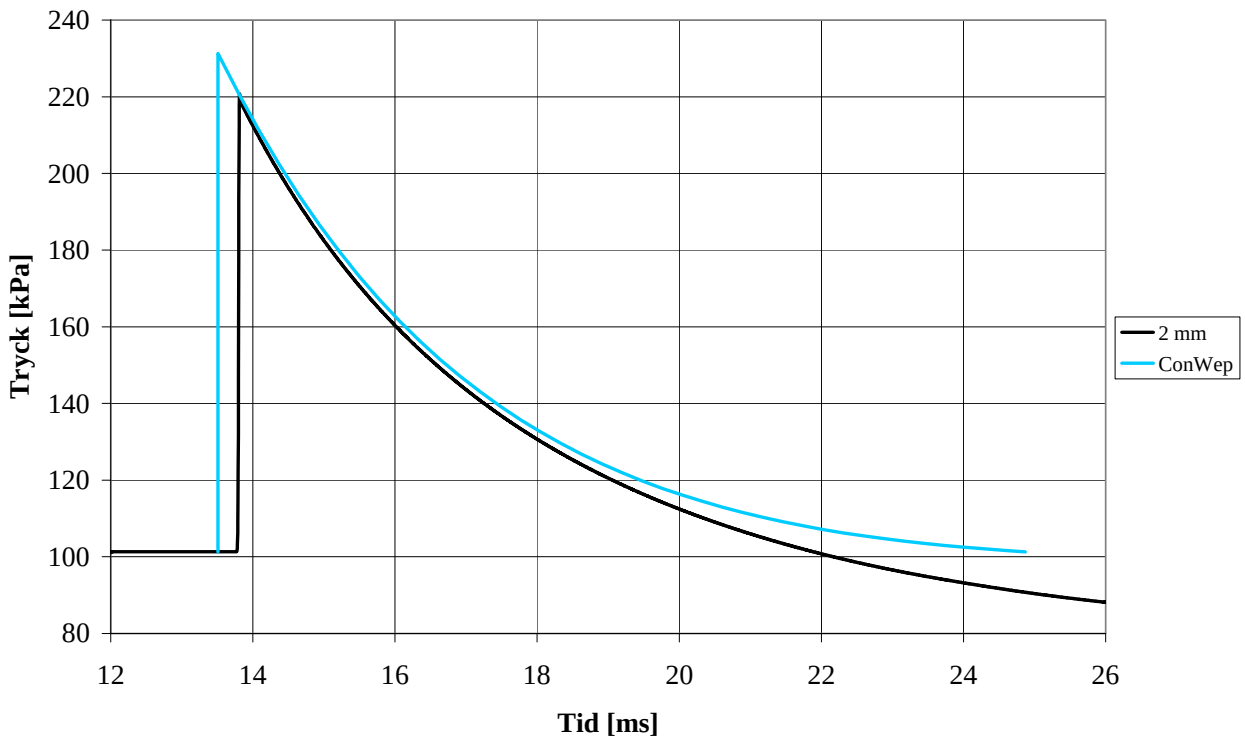
Figur B.11 Jämförelse av tryck-tidssamband från Autodyn och ConWep för en laddning på 125 kg TNT och skalat avstånd Z = 1,6 m/kg$^{1/3}$ (verkligt avstånd r = 8,0 m).



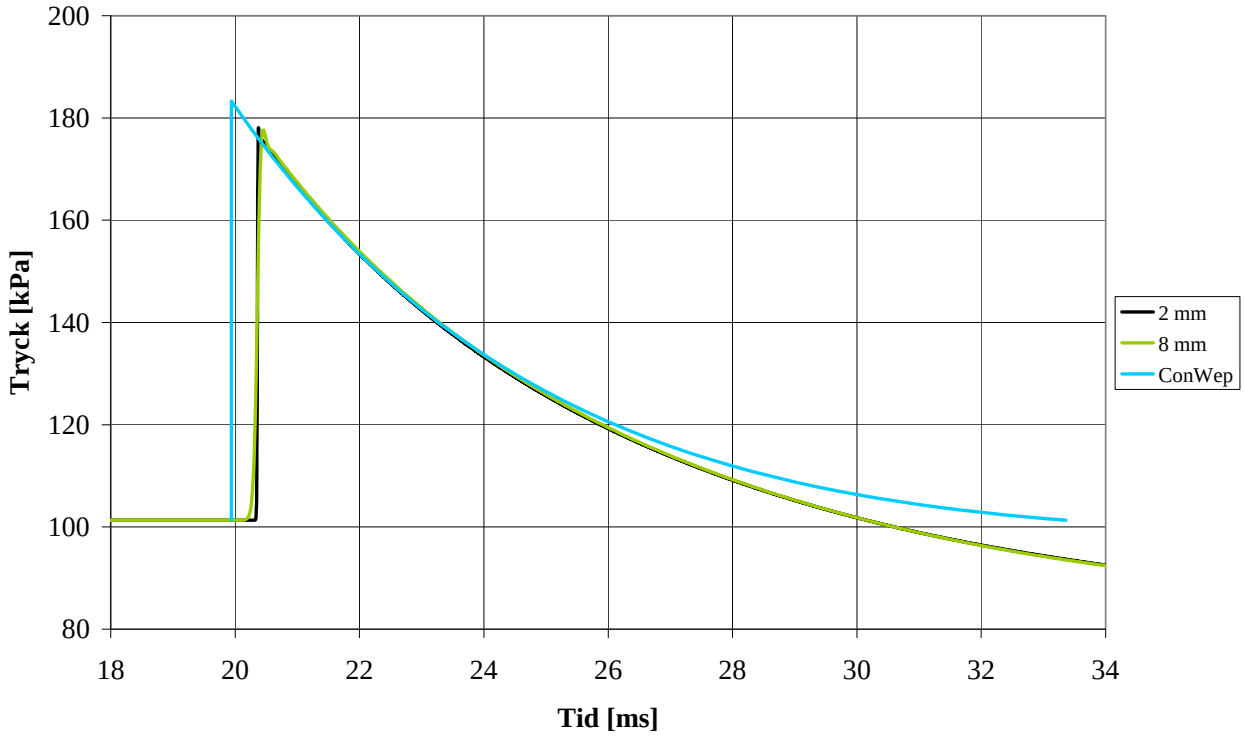
Figur B.12 Jämförelse av tryck-tidssamband från Autodyn och ConWep för en laddning på 125 kg TNT och skalat avstånd Z = 1,8 m/kg$^{1/3}$ (verkligt avstånd r = 9,0 m).



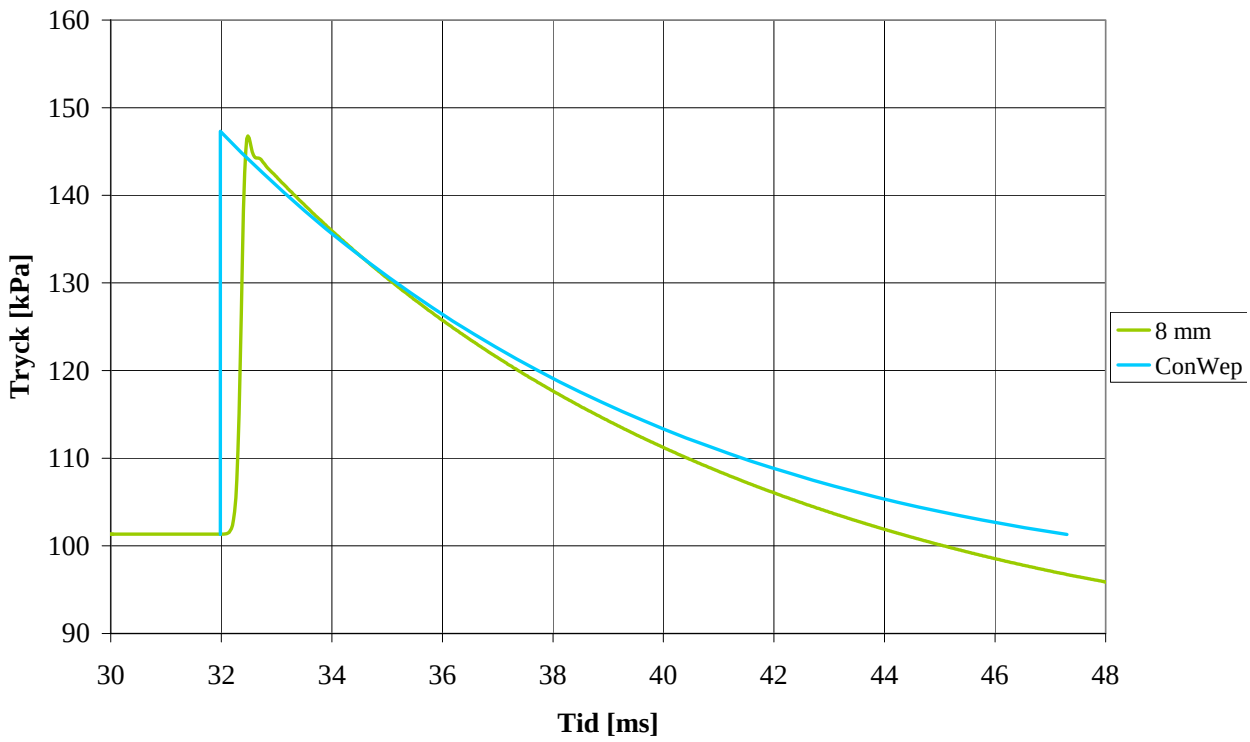
Figur B.13 Jämförelse av tryck-tidssamband från Autodyn och ConWep för en laddning på 125 kg TNT och skalat avstånd Z = 2,0 m/kg$^{1/3}$ (verkligt avstånd r = 10,0 m).



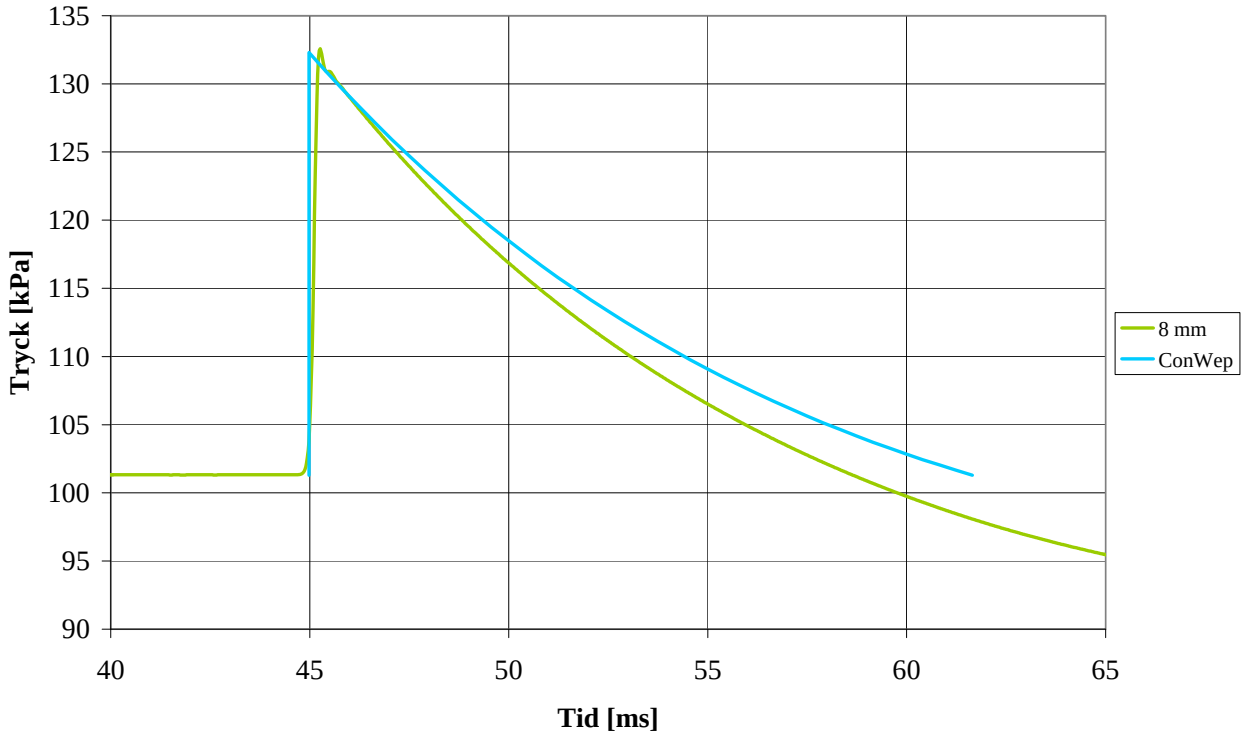
Figur B.14 Jämförelse av tryck-tidssamband från Autodyn och ConWep för en laddning på 125 kg TNT och skalat avstånd Z = 2,4 m/kg$^{1/3}$ (verkligt avstånd r = 12,0 m).



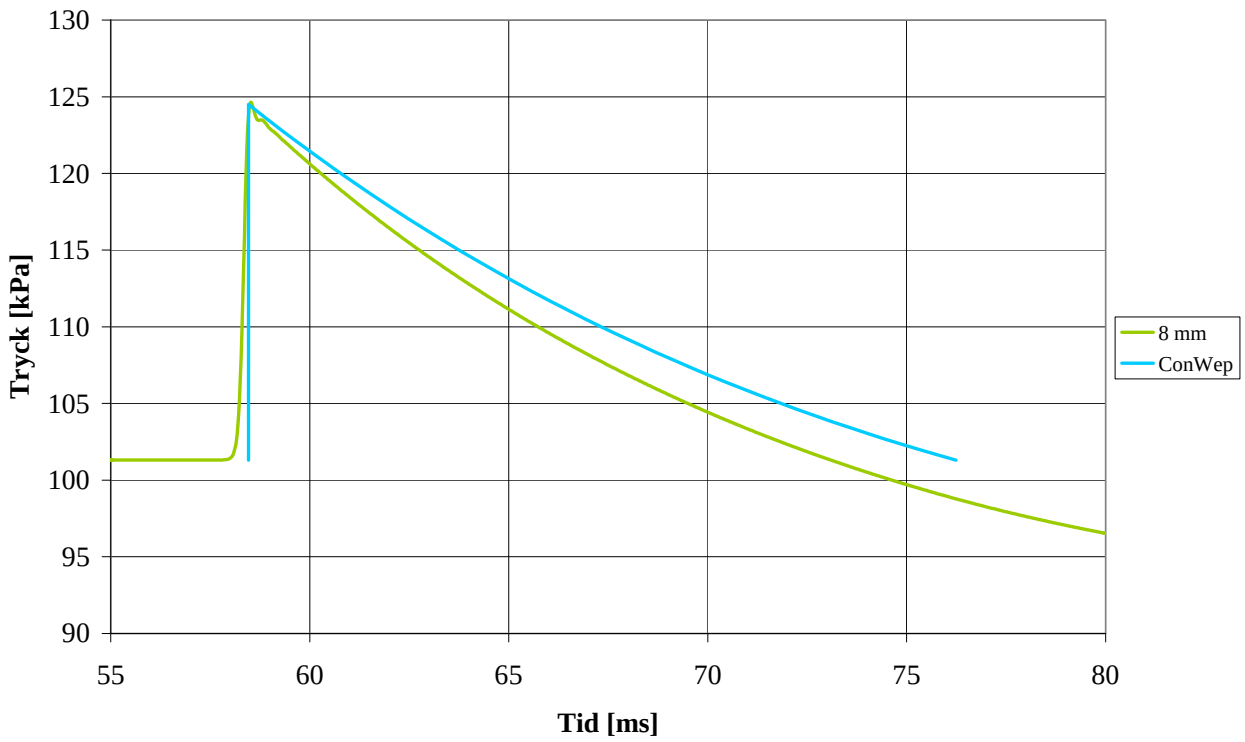
Figur B.15 Jämförelse av tryck-tidssamband från Autodyn och ConWep för en laddning på 125 kg TNT och skalat avstånd Z = 3,0 m/kg$^{1/3}$ (verkligt avstånd r = 15,0 m).



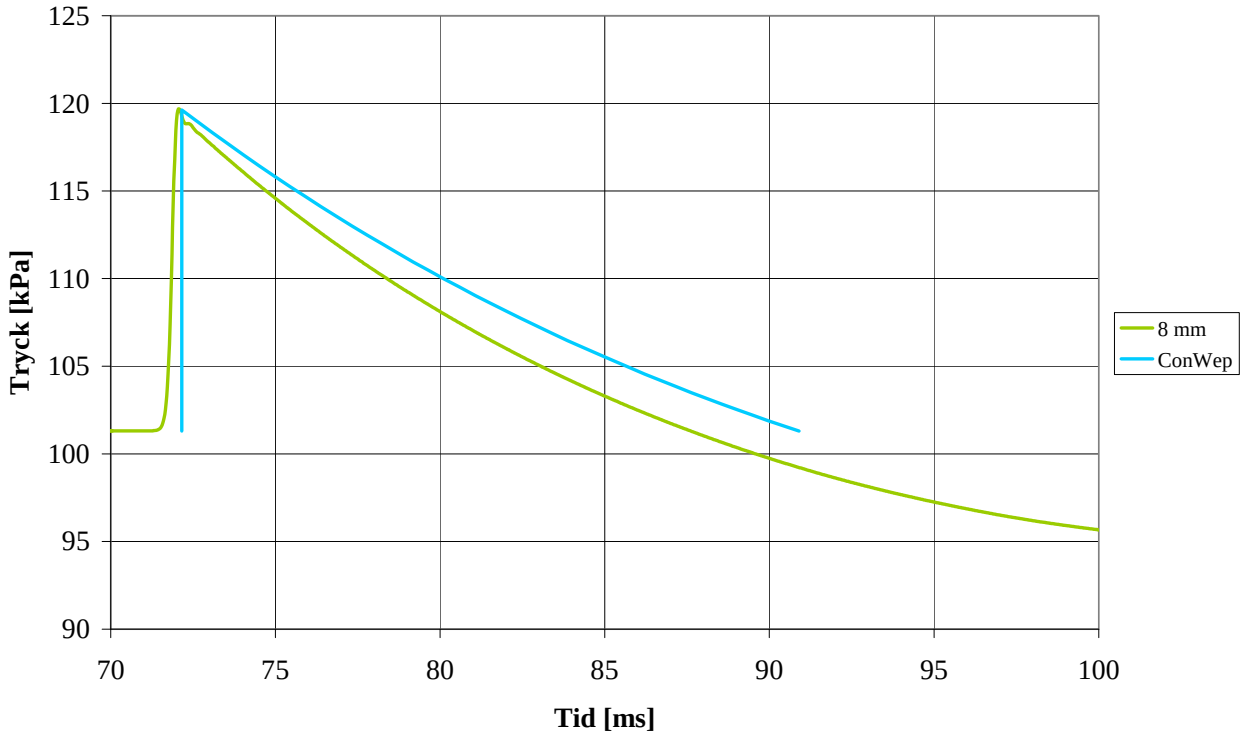
Figur B.16 Jämförelse av tryck-tidssamband från Autodyn och ConWep för en laddning på 125 kg TNT och skalat avstånd Z = 4,0 m/kg$^{1/3}$ (verkligt avstånd r = 20,0 m).



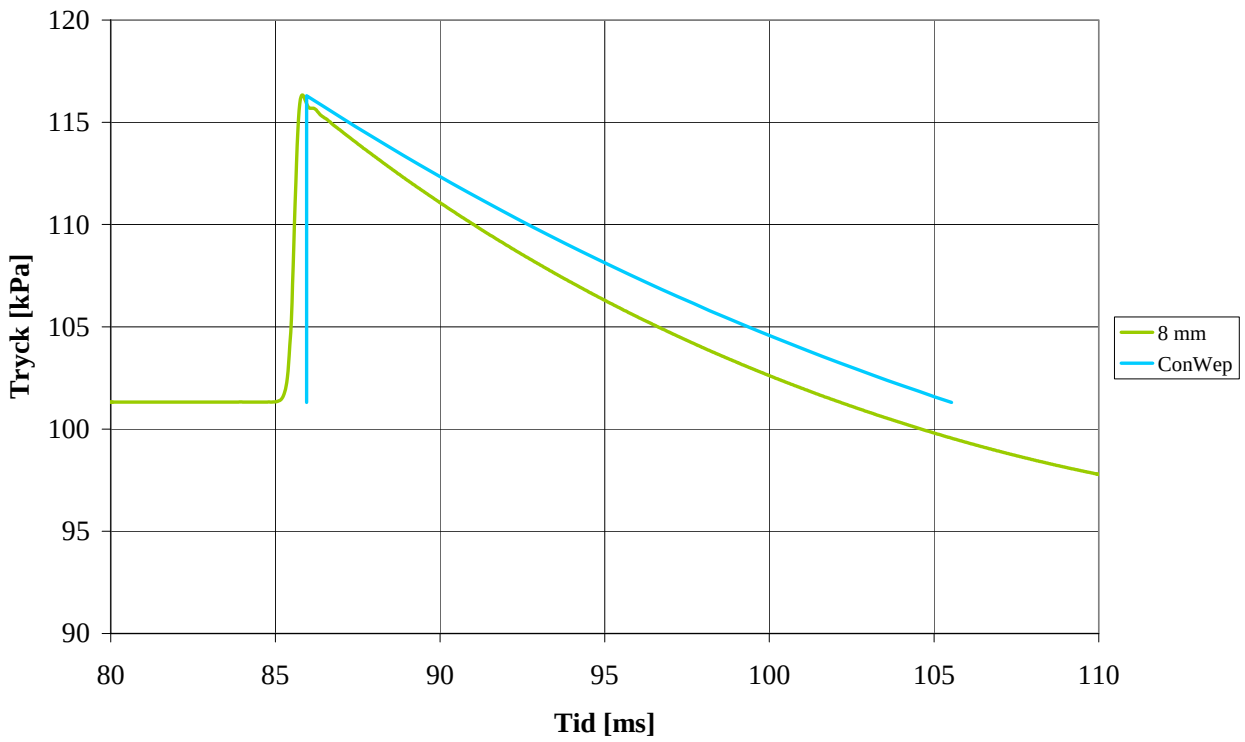
Figur B.17 Jämförelse av tryck-tidssamband från Autodyn och ConWep för en laddning på 125 kg TNT och skalat avstånd Z = 5,0 m/kg$^{1/3}$ (verkligt avstånd r = 25,0 m).



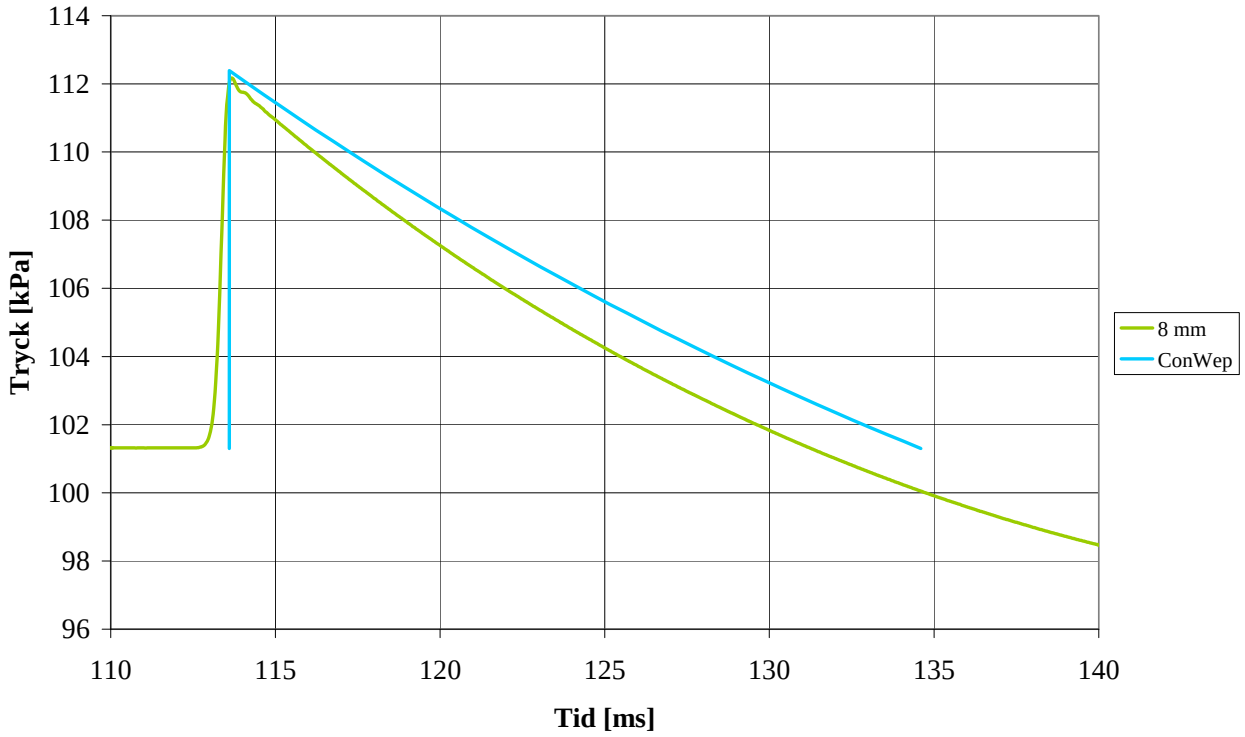
Figur B.18 Jämförelse av tryck-tidssamband från Autodyn och ConWep för en laddning på 125 kg TNT och skalat avstånd Z = 6,0 m/kg$^{1/3}$ (verkligt avstånd r = 30,0 m).



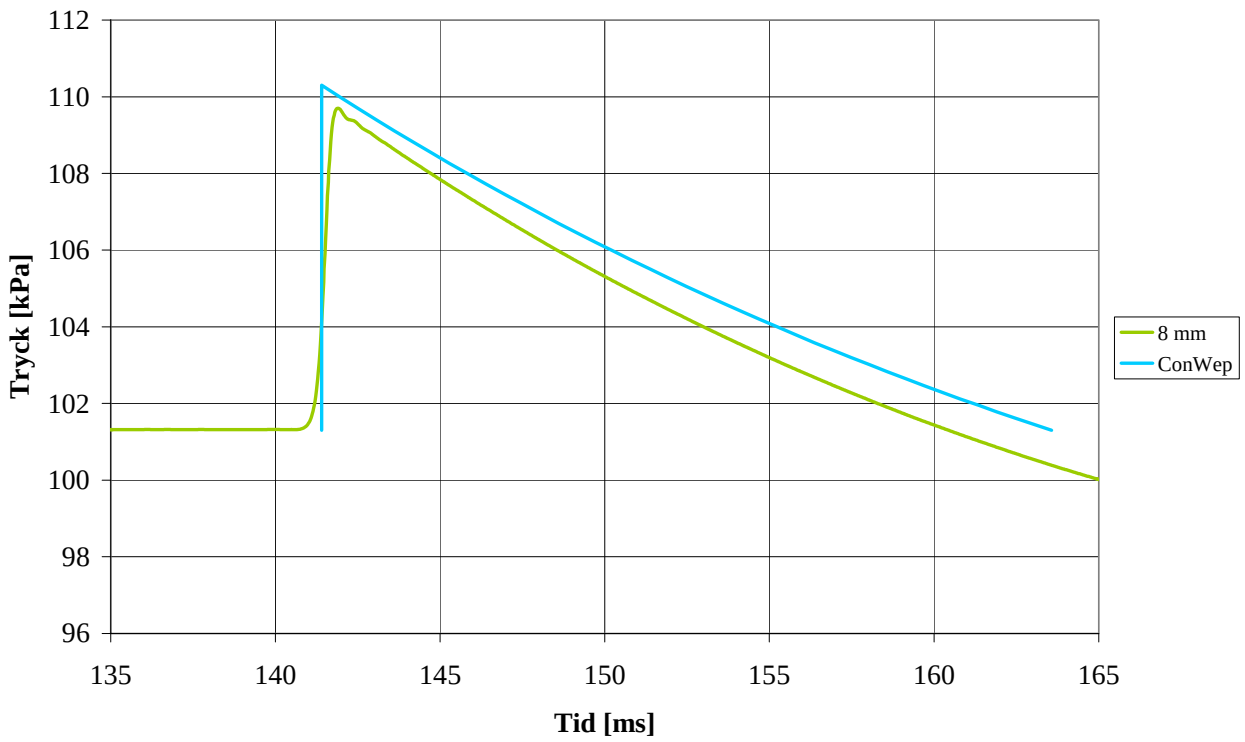
Figur B.19 Jämförelse av tryck-tidssamband från Autodyn och ConWep för en laddning på 125 kg TNT och skalat avstånd Z = 7,0 m/kg$^{1/3}$ (verkligt avstånd r = 35,0 m).



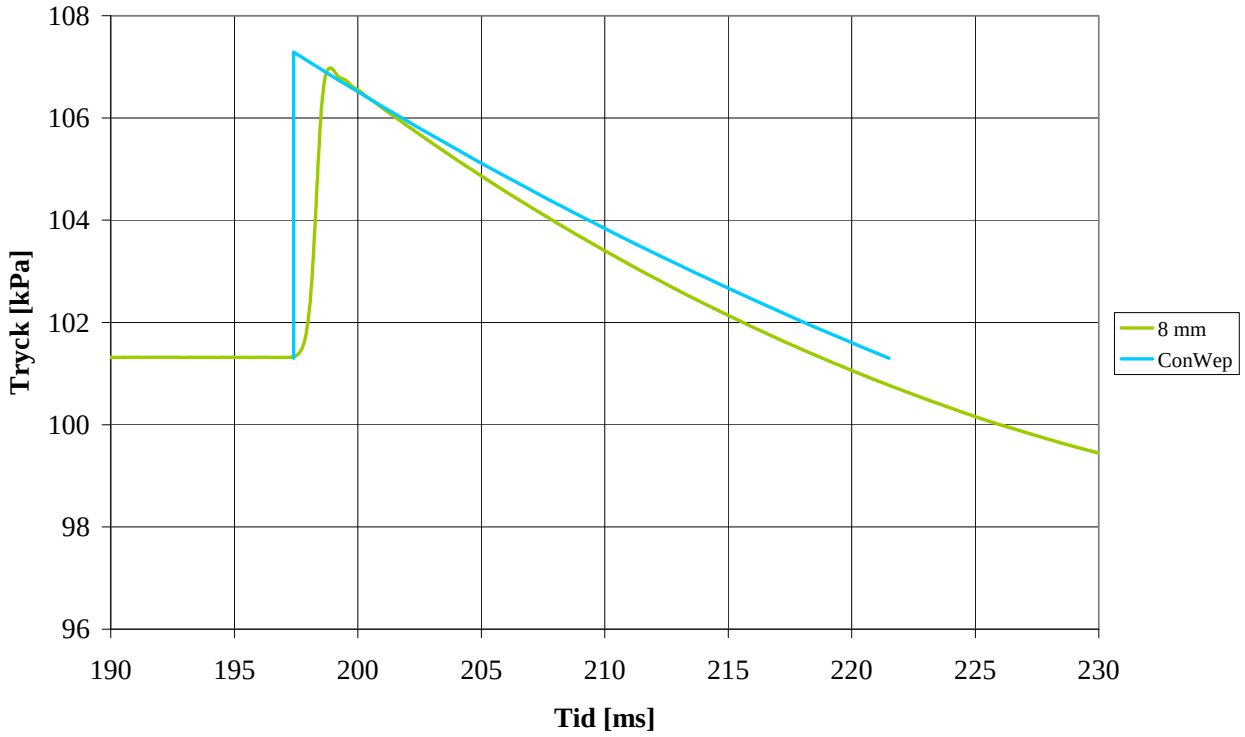
Figur B.20 Jämförelse av tryck-tidssamband från Autodyn och ConWep för en laddning på 125 kg TNT och skalat avstånd Z = 8,0 m/kg$^{1/3}$ (verkligt avstånd r = 40,0 m).



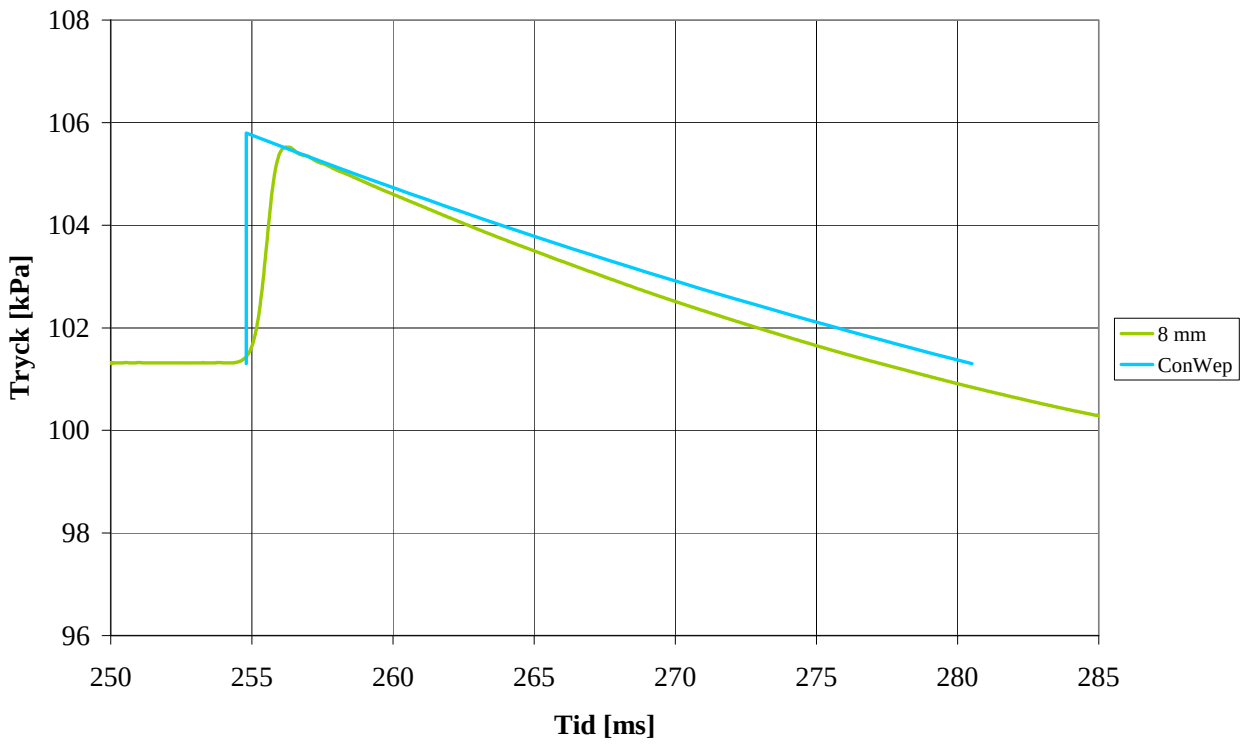
Figur B.21 Jämförelse av tryck-tidssamband från Autodyn och ConWep för en laddning på 125 kg TNT och skalat avstånd Z = 10,0 m/kg$^{1/3}$ (verkligt avstånd r = 50,0 m).



Figur B.22 Jämförelse av tryck-tidssamband från Autodyn och ConWep för en laddning på 125 kg TNT och skalat avstånd Z = 12,0 m/kg$^{1/3}$ (verkligt avstånd r = 60,0 m).



Figur B.23 Jämförelse av tryck-tidssamband från Autodyn och ConWep för en laddning på 125 kg TNT och skalat avstånd Z = 16,0 m/kg$^{1/3}$ (verkligt avstånd r = 80,0 m).

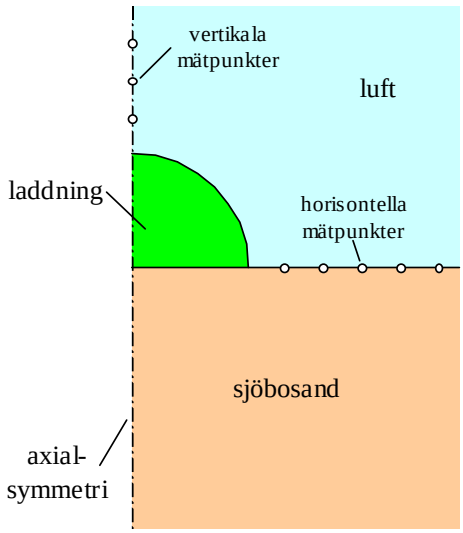


Figur B.24 Jämförelse av tryck-tidssamband från Autodyn och ConWep för en laddning på 125 kg TNT och skalat avstånd Z = 20,0 m/kg$^{1/3}$ (verkligt avstånd r = 100,0 m).

BILAGA C Analys av hemisfärisk laddning på mark enligt Kingery (1966)

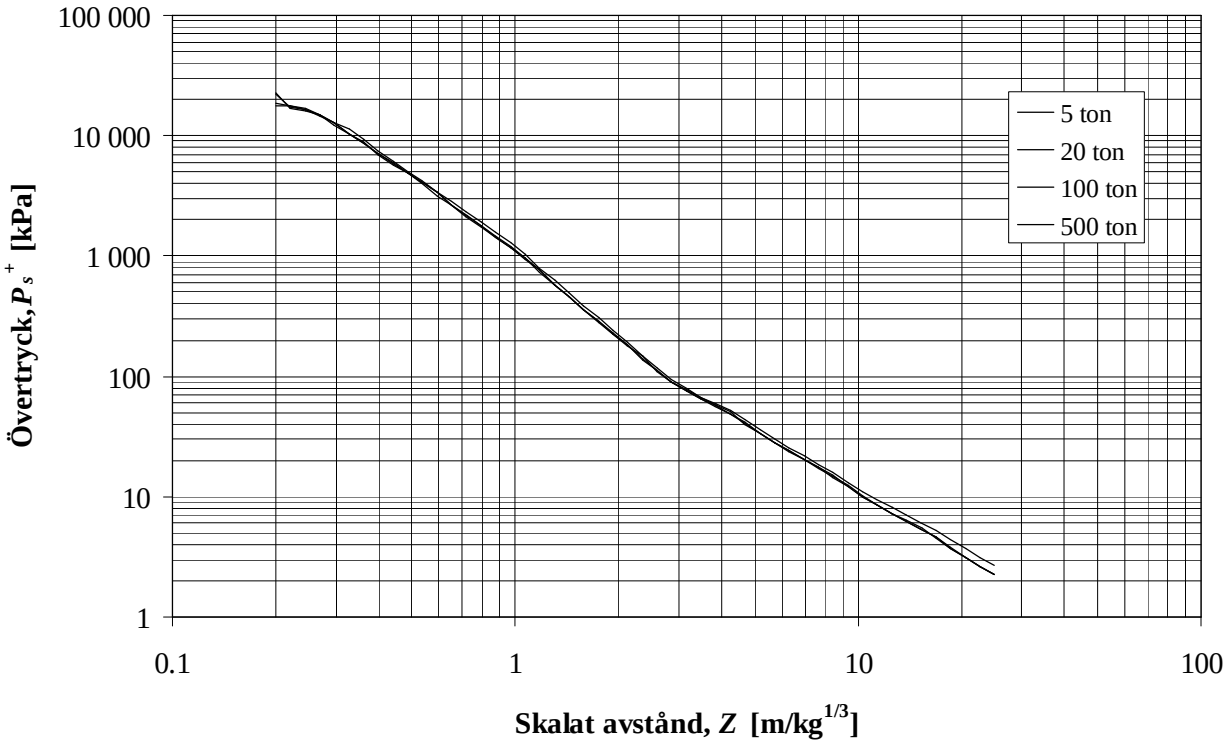
En hemisfärisk (halvsfärisk) laddning placerad på mark har studerats med syfte att närmare jämföra resultat från Autodyn med försöksresultat rapporterade av Kingery (1966), se avsnitt 5.3.2.5. Kingerys resultat ligger till grund för det samband mellan impulstäthet och skalat avstånd som ges i ConWep (1992) för oreflekterad stötvåg, se Johansson (2002). En jämförelse av resultat från Autodyn och ConWep visar att den senare generellt ger impulstätheter som är cirka 20 % större än vad som fås i Autodyn. En möjlig anledning till denna skillnad är hur Kingerys försöksresultat ursprungligen har utvärderats. I omvandlingen från en hemisfärisk till en sfärisk laddning har Kingery använt en speglingsfaktor på 1,8. Detta värde synes dock vara högt med tanke på den laddningsstorlek på 5-100 ton TNT som användes i försöken (stor laddning medför att mängden energi som går ner i marken ökar). Användandet av ett lägre värde på speglingskvoten skulle också resultera i bättre överensstämmelse mellan Autodyn och ConWep. I syfte att närmare undersöka detta gjordes analyser i Autodyn för att återskapa ett av de av Kingery rapporterade försöken.

En hemisfärisk laddning på 5, 20, 100 respektive 500 ton TNT placerad på mark och med möjlighet till sfärisk utbredning i luft och mark modellerades i Autodyn via ett tvådimensionellt elementnät i en axialsymmetrisk modell, se Figur C.1. Luftens egenskaper antogs i enlighet med avsnitt 5.2.1 medan marken antogs motsvara Sjöbosand enligt Laine och Sandvik (2001). Storleken på modellen valdes så att tryck och impulstäthet inom ett skalat avstånd $0{,}2 \geq Z \geq 25$ m/kg$^{1/3}$ kunde studeras utan störningar. Mätpunkter för detta placerades i modellen ut i horisontell och vertikal riktning, dvs. längs marken respektive i linje rakt ovanför laddningens centrum, längs med den vertikala symmetriaxeln. I de av Kingery utförda försöken placerades mätpunkter längs marken.

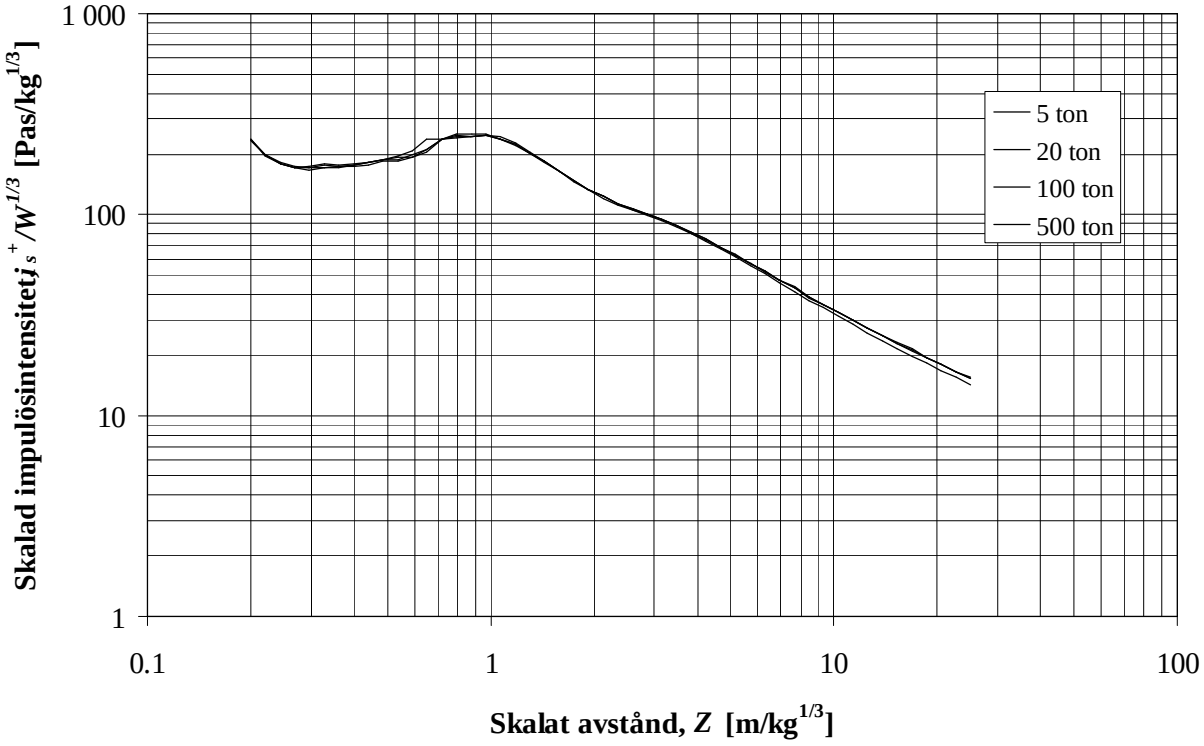


Figur C.1 Schematisk modell av hemisfärisk laddning (5 ton TNT) nyttjande ett två-dimensionellt axialsymmetriskt elementnät i Autodyn. Principiell placering av mätpunkter i horisontal- och vertikalled markeras.

Skalad impulstäthet blir för olika storlekar på laddningen, liksom i försöken, inte identisk i analyser utförda i Autodyn. I Figur C.2 och Figur C.3 jämförs erhållna tryck och skalade impulstätheter för olika laddningar och av detta framgår att skillnaden är liten mellan olika laddningsstorlekar. Med anledning av detta redovisas fortsättningsvis enbart värden för en hemisfärisk laddning om 5 ton.



Figur C.2 Jämförelse av övertryck för olika laddningar från analyser i Autodyn.

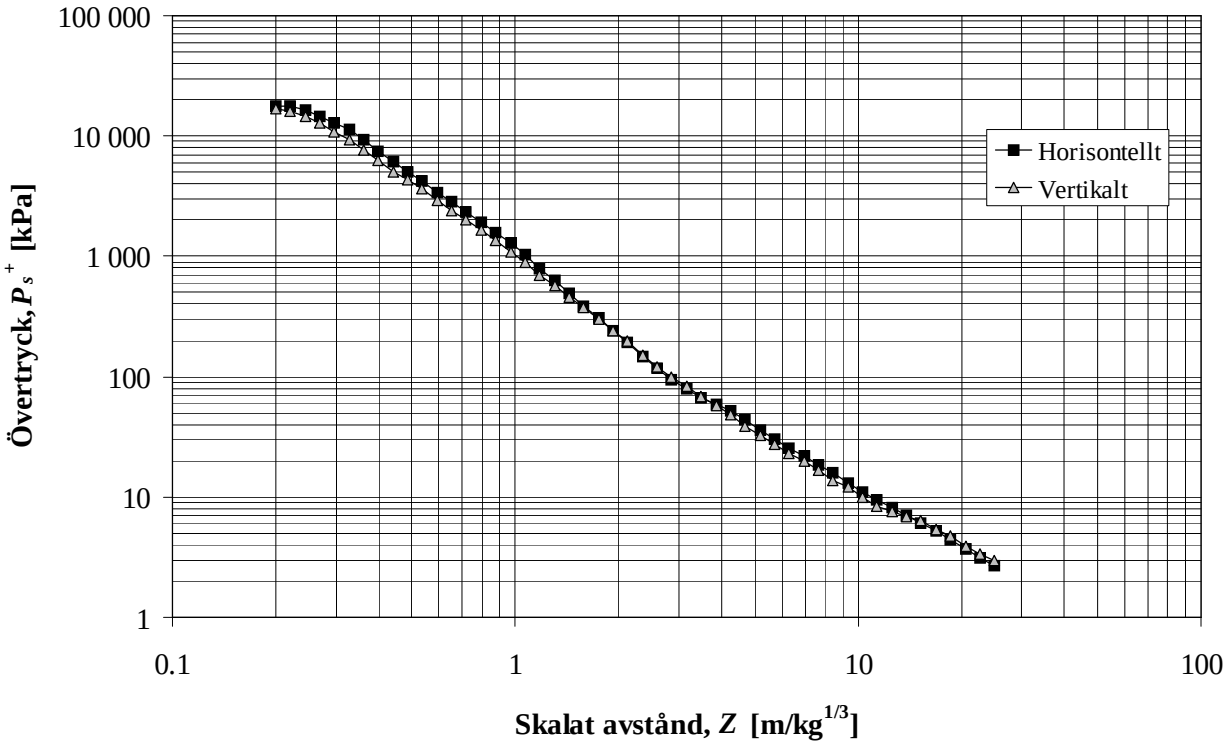


Figur C.3 Jämförelse av skalad impulstäthet för olika laddningar från analyser i Autodyn.

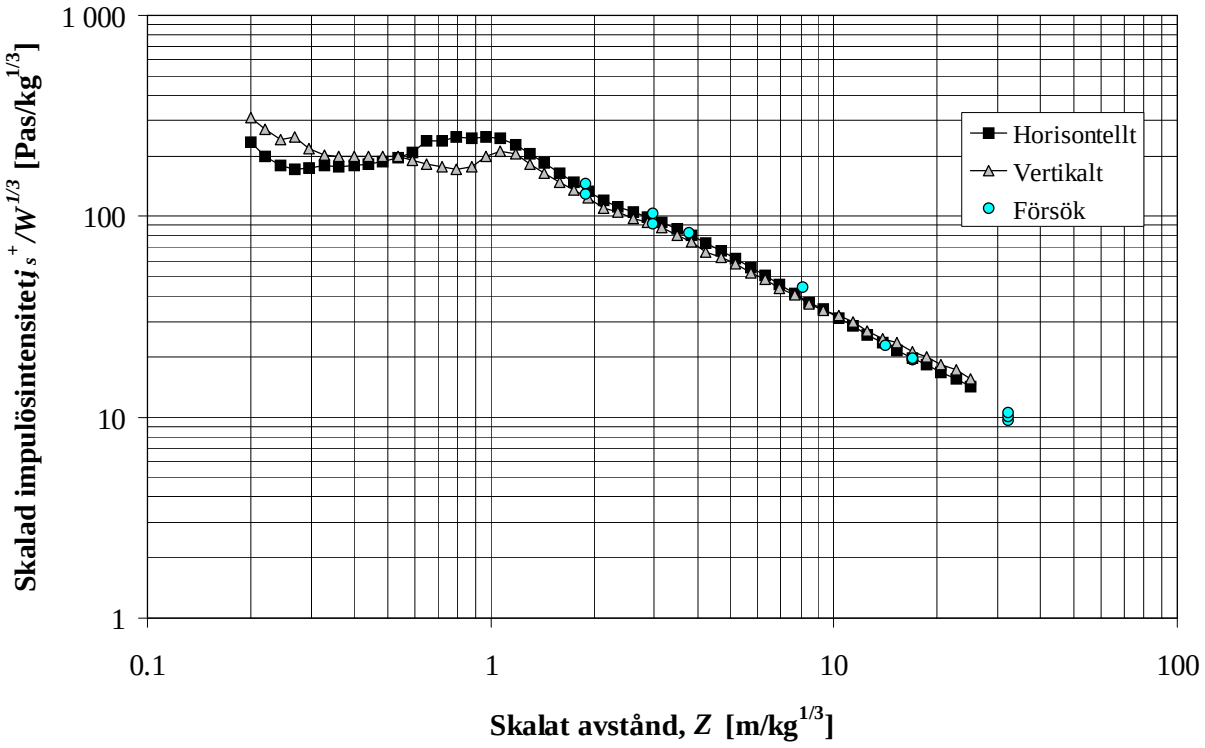
Tryck och impulstäthet för mätpunkter i horisontell och vertikal riktning jämförs i Figur C.4 och Figur C.5. För impulstätheten jämförs även med motsvarande försöksdata för 5 tons laddning från Kingery (1966). Av detta framgår att erhållna värden skiljer sig något sinsemellan. Skillnaden är

dock liten, framförallt för $Z \geq 1$ m/kg$^{1/3}$. I Figur C.6 görs även en jämförelse mellan resultat från Autodyn och Kingerys rådata, innan några redigeringar har gjorts i avsikt att beakta speglingens inverkan. Av detta framgår att överensstämmelsen mellan Autodyn och Kingery är mycket god för $Z \geq 0{,}8$ m/kg$^{1/3}$.

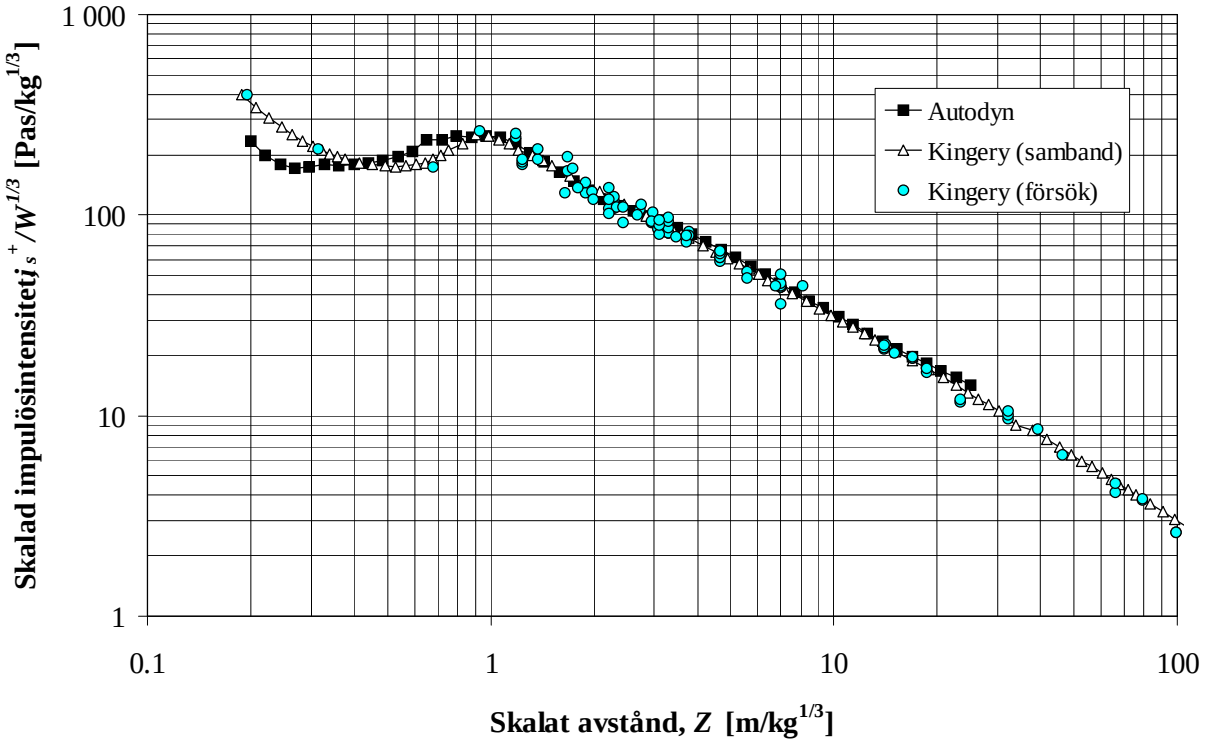
En direkt jämförelse mellan Autodyn och Kingerys försök antyder således starkt att den i försöksutvärderingen nyttjade speglingsfaktorn på 1,8 som använts i bland annat ConWep är för stor. Dvs. den avvikelse av impulstätheten på omkring 20 % som Autodyn uppvisar vid jämförelse med ConWep i avsnitt 5.3.2.4, beror inte på felaktigheter i Autodyn utan på att impulstätheten, på grund av felaktigt använd speglingsfaktor i utvärderingen, överskattas i ConWep.



Figur C.4 Jämförelse av övertryck för hemisfärisk laddning på 5 ton när mätpunkter placerats horisontellt och vertikalt enligt Figur C.1.



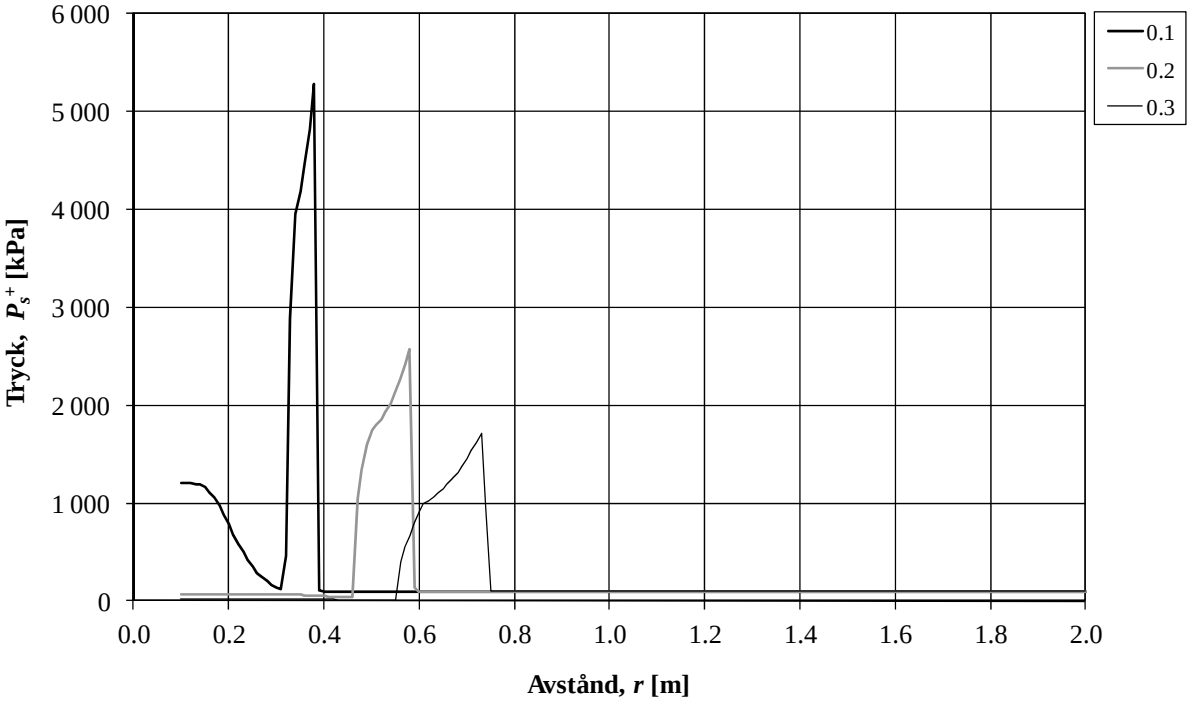
Figur C.5 Jämförelse av skalad impulstäthet för hemisfärisk laddning på 5 ton när mätpunkter placerats horisontellt och vertikalt enligt Figur C.1. Försöksresultat från Kingery (1966).



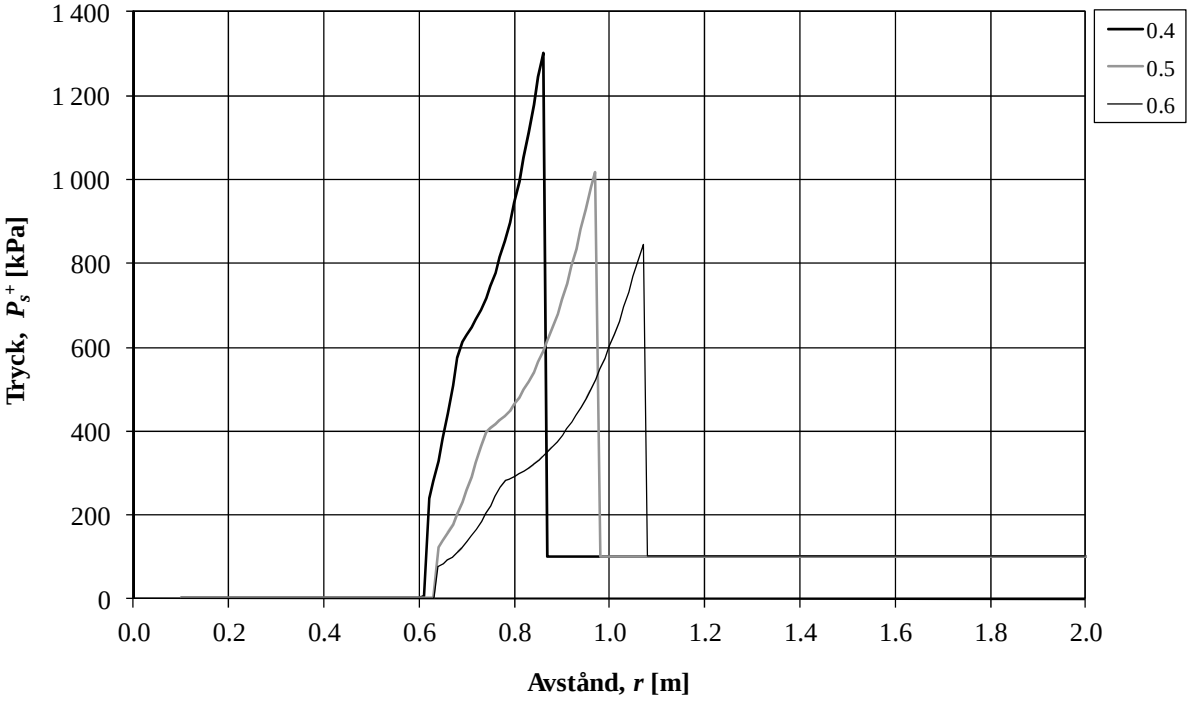
Figur C.6 Jämförelse av skalad impulstäthet från Autodyn och Kingery (1966).

BILAGA D Tryck som funktion av avstånd

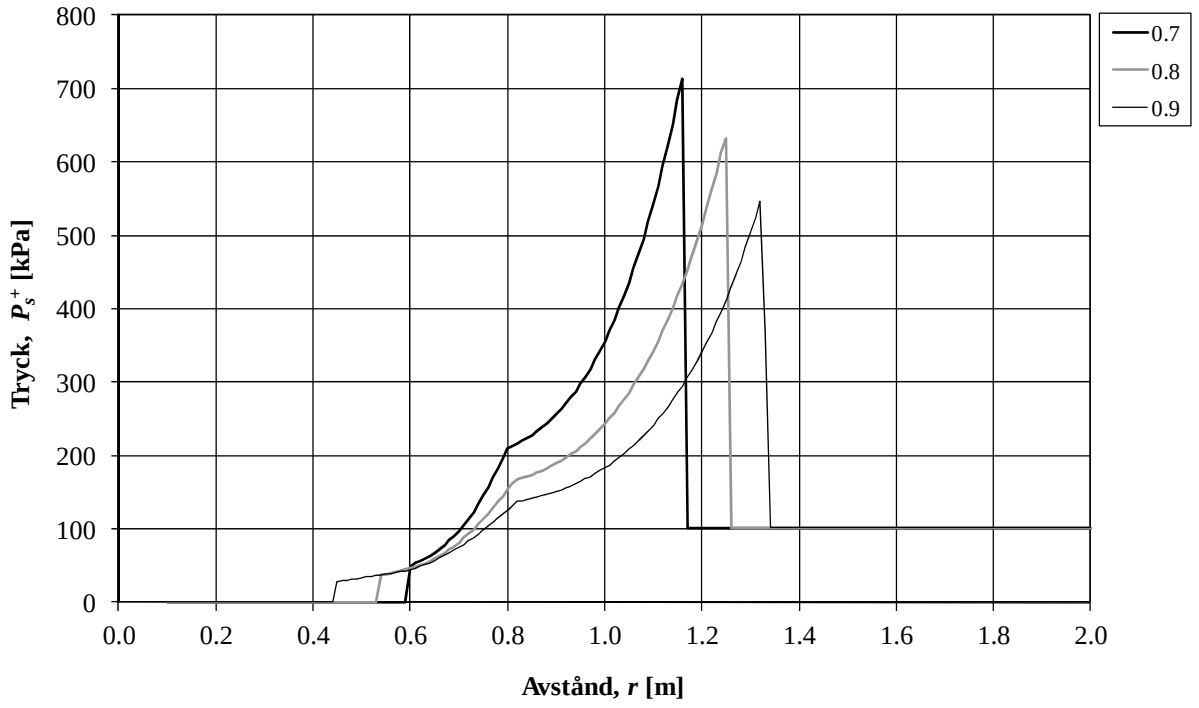
I Figur D.1 till Figur D.5 visas tryckets variation från en laddning på 1 kg TNT inom en sträcka på 0,1-2,0 m efter tiden 0,1-1,8 ms efter laddningens detonation.



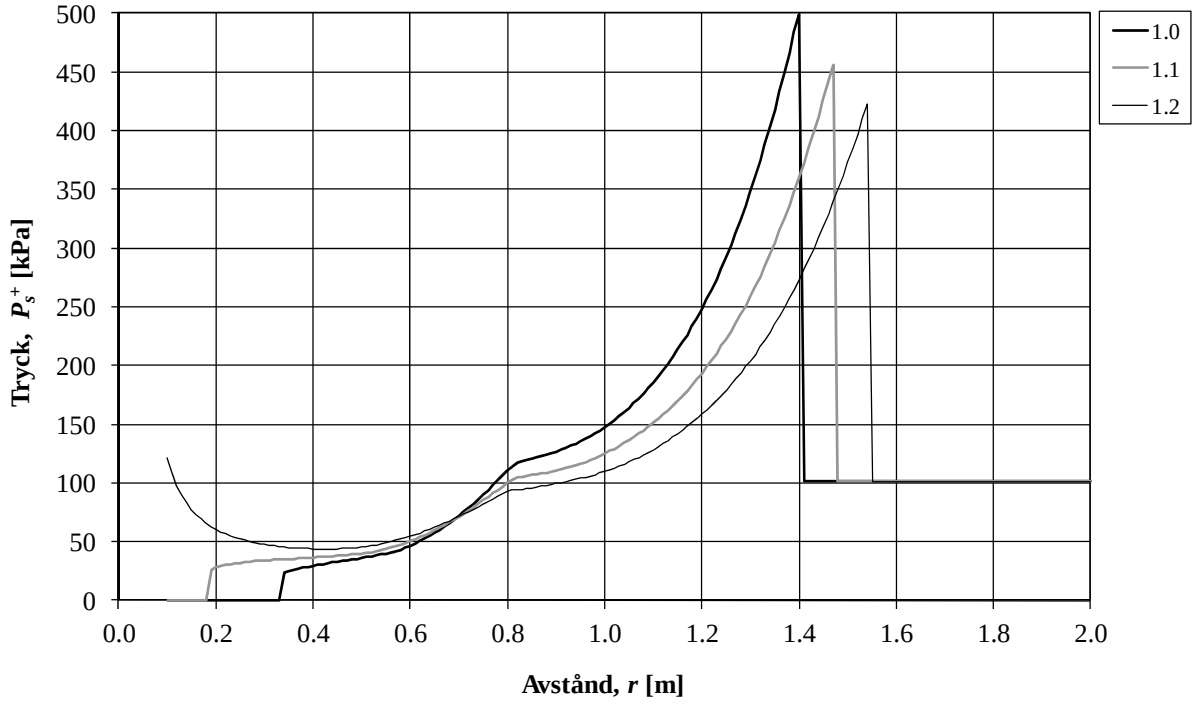
Figur D.1 Tryckvärden efter tiden 0,1-0,3 ms.



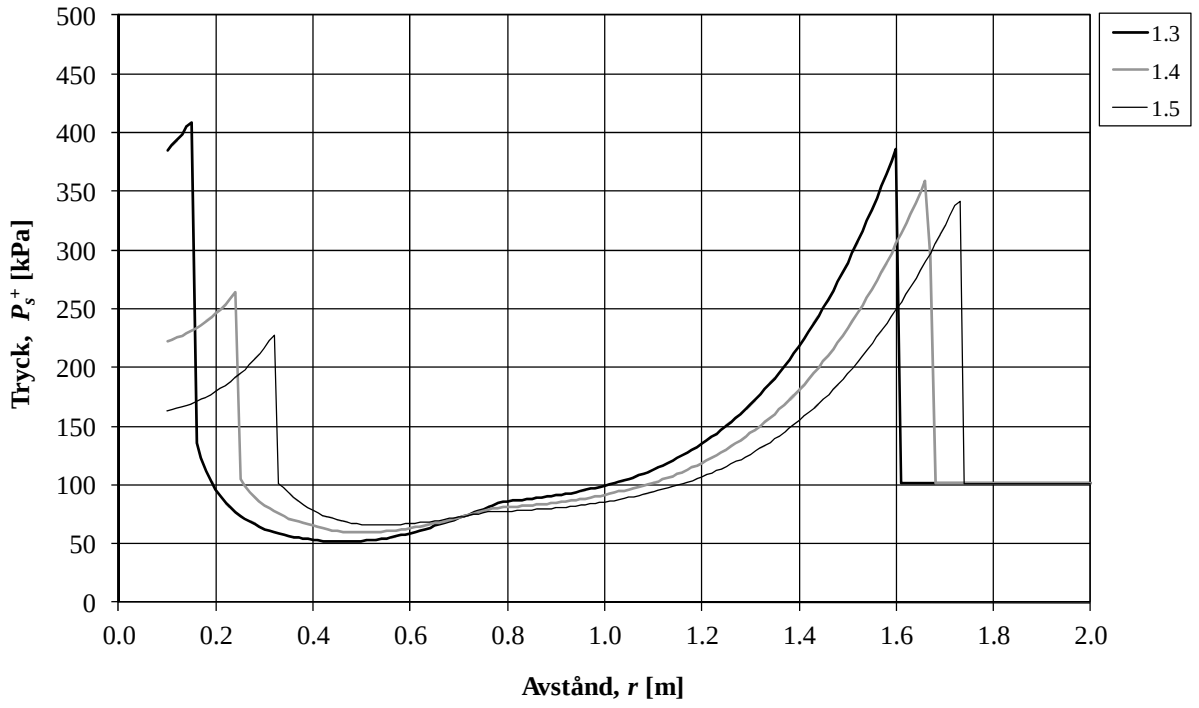
Figur D.2 Tryckvärden efter tiden 0,4-06 ms.



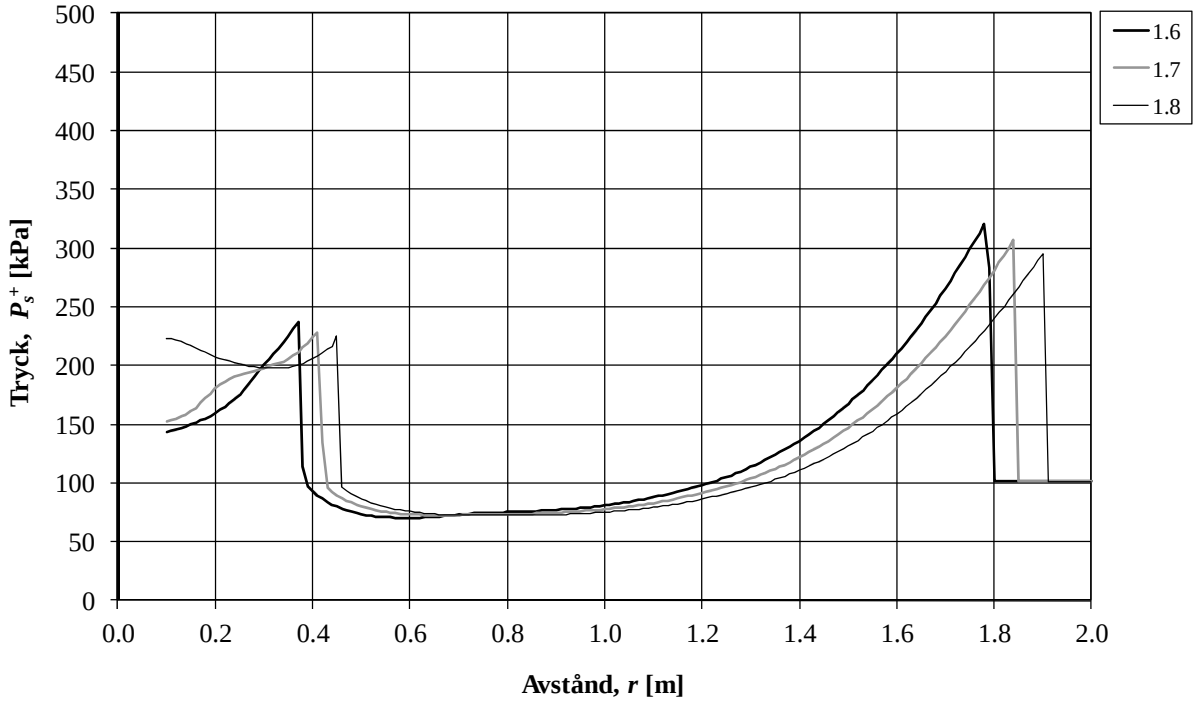
Figur D.3 Tryckvärden efter tiden 0,7-09 ms.



Figur D.4 Tryckvärden efter tiden 1,0-1,2 ms.



Tabell D.1 Tryckvärden efter tiden 1,3-1,53 ms.



Figur D.5 Tryckvärden efter tiden 1,6-1,8 ms.

MSB Myndigheten för samhällsskydd och beredskap
651 81 Karlstad www.msb.se