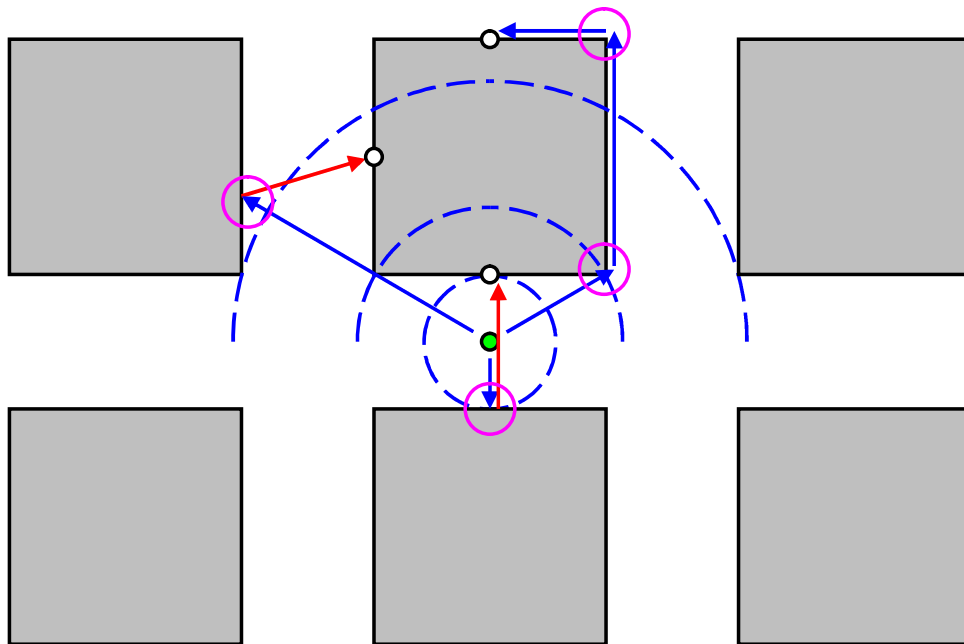


Bebyggelsens motståndsförmåga mot extrem dynamisk belastning

Del 2: Explosion i gatukorsning



Bebyggelsens motståndsförmåga mot extrem dynamisk belastning
Del 2: Explosion i gatukorsning

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

2012 MSB

Publikationsnummer: MSB450

ISBN: 978-91-7383-267-0

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	2
1.4	Begränsningar	3
2	Försök	4
2.1	Försöksuppställning	4
2.1.1	Geometri och laddningens läge	4
2.1.2	Tryckgivare	6
2.1.2.1	Typ av givare	6
2.1.2.2	Placering av givare	6
2.2	Sprängladdning	10
2.3	Resultat	11
2.3.1	Orientering	11
2.3.2	Frifältstryckgivare – jämförelse med ConWep och olika lägen	11
2.3.3	Tryckgivare på byggnader - jämförelse av olika lägen	14
3	Analyser i Autodyn	20
3.1	Modellering	20
3.1.1	Orientering	20
3.1.2	Laddning	20
3.1.2.1	PETN i Autodyn	20
3.1.2.2	Sprängämne i explosionsanalys	22
3.1.3	Modelleringsteknik	23
3.2	Resultat	25
3.2.1	Tryckresultat	25
3.2.2	Jämförelse med försök	27
3.2.2.1	Stötvågparametrar	27
3.2.2.2	Koherensmått <i>Coh</i>	28

4	Förenklad analys	31
4.1	Orientering	31
4.2	Beskrivning av metod	31
5	Slutsatser	34
6	Referenser	35
BILAGA A	Jämförelse av tryck-tidssamband mellan försök och analys i Autodyn	A.1
A.1	Skott #1 – 0,4 kg, läge 1	A.1
A.2	Skott #4 – 0,4 kg, läge 2	A.10
A.3	Skott #7 – 0,4 kg, läge 3	A.19
A.4	Skott #10 – 0,4 kg, läge 4	A.28
A.5	Skott #2 – 1,6 kg, läge 1	A.37
A.6	Skott #5 – 1,6 kg, läge 2	A.46
A.7	Skott #8 – 1,6 kg, läge 3	A.55
A.8	Skott #11 – 1,6 kg, läge 4	A.64
Bilaga B	Sammanställning av stötvågsparametrar i försök och analys i Autodyn	B.1
Bilaga C	Uttryck för stötvågsparametrar i positiv och negativ fas	C.1
C.1	Orientering	C.1
C.2	Ideal luftstötvåg vid fri avlastning	C.1
C.3	Positiv fas	C.3
C.4	Negativ fas	C.5
Bilaga D	Explosion at an intersection in an urban environment – experiments and analyses	D.1
Bilaga E	Experiments and analyses of explosion at an urban intersection	E.1

Förord, rapport 2008

Denna rapport är en andra delrapport i det av Räddningsverket finansierade forskningsprojektet Bebyggelsens motståndsförmåga med extrem dynamisk belastning som pågår under perioden januari 2006 till december 2008. Rapporten utgör en sammanställning av ett explosionsförsök i en simulerad bebyggelse utfört i maj 2007 samt tillhörande analyser i programmet Autodyn. Arbetet som presenteras här har utförts under perioden april 2007 till november 2008. Utförda försök har finansierats av Räddningsverket och norska Forsvarsbygg och utförts av Forsvarsbygg i samarbete med svenska Totalförsvarets forskningsinstitut, FOI, på sin anläggning i Grindsjön.

Arbetet har följts och stöttats av Björn Ekengren, Räddningsverket, och ett stort tack riktas till Björn för dennes inspirerande insatser. Utan honom hade detta projekt inte varit lika kul och givande att arbeta med. Särskilt tack riktas även till norska Forsvarsbygg, och då särskilt Svein Christensen och Ståle Skudal, för deras initiering, inbjudan till samt medfinansiering av de försök som presenteras i denna rapport. Vidare tackas svenska Totalförsvarets forskningsinstitut (FOI), representerade av Rickard Forsén, Anders Carlberg samt Roger Berglund, för deras del i det experimentella utförandet. Slutligen riktas ett särskilt tack även till Ola Pramm Larsen, Anker-Zemer Engineering A/S, som bistått med ovärderlig hjälp i utvecklandet av samt utförandet av samtliga analyser i programmet Autodyn som presenteras i denna rapport.

Göteborg, november 2008

Morgan Johansson och Leo Laine

Förord, revidering 2012

Denna publikation är en nyutgåva av rapporten Bebyggelsens motståndsförmåga mot extrem dynamisk belastning. Delrapport 2 – Explosion i gatukorsning, Rapport B54-240/08, utgiven av Räddningsverket 2008. 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 2008. Detta är den första 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 samhällsskydd 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 motståndsförmåga – och arbetet har delats in i tre delar med inriktning enligt nedan:

- Del 1: Last av luftstöt våg
- 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 luftstöt vågens 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

Att prediktera den resulterande trycklasten från en explosion som inträffar i en bebyggelse kan vara mycket komplicerat. Beroende på explosionskällans placering gentemot sin omgivning samt utformningen av denna kan en mycket stor mängd olika lastsituationer uppstå av vilka en betydande del utgörs av komplexa kombinationer av interagerande stötvågor.

Denna rapport utgör en andra delrapport 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 rapporten presenteras en försöksserie i skala 1:5 av en explosion i gatuhörn med syftet att närmare studera hur stötvågslasten påverkas när den verkar i en geometri motsvarande den i bebyggelsen där en komplex interaktion av sådana fenomen som reflexion, diffraktion samt fördämningseffekter fås.

Jämförande beräkningar görs med det generella finita elementprogrammet Autodyn för att närmare studera hur väl detta klarar av att fånga den resulterande lastbilden i en sådan geometri. Analyser i Autodyn gjordes utfördes försöken och kan därmed användas för att validera programmet. För att jämföra resultaten mellan simulering och beräkning introduceras ett koherensmått för få ett mått på hur väl erhållna tryckkurvor sammanfaller över tiden. Detta koherensmått ger en tydlig indikation på hur bra hela försöksserien simulerades och med stöd av detta konstateras att analys- och försöksresultat visar en mycket god överensstämmelse. Således dras slutsatsen att Autodyn utgör ett mycket kraftfullt verktyg för att förutspå vilken last som kan uppstå vid en explosion i bebyggelse.

Som komplement till Autodyn finns det även behov av enklare, mer ingenjörsmässiga, beräkningsverktyg som möjliggör grova och snabba men ändå tillräckligt tillförlitliga överslag av vilken last som fås i en given punkt. En metod för detta presenteras och dess resultat jämförs med befintliga försöksdata. Överensstämmelsen är fullt acceptabel varför metoden bedöms kunna användas för att ge tillförlitliga grova överslag av resulterande trycklast från explosionslast.

Beteckningar

Romerska versaler

C_{diff}	diffraktionskoefficient
P	tryck
P_0	tryck hos ostörd luft (cirka 101,3 kPa)
P^+	övertryck positiv fas
P_r^+	reflekerat övertryck positiv fas
P_s^+	oreflekerat övertryck positiv fas
P_s^-	undertryck negativ fas
P_{wi}	tryck för stötvåg W_i
V	volym
V_{mo}	volym hos mineralolja
V_p	volym hos pentyl
W	laddningsstorlek
Z	skalat avstånd

Romerska gemener

Coh	koherensmått
i	impulstäthet
i^+, i_s^+	impulstäthet positiv fas
i^-, i_s^-	impulstäthet negativ fas
m	antal hörn som diffraktion sker runt
m_p	massa hos pentyl
n	antal studerade stötvågor
r	detonationsavstånd, reflekterande stötvåg
t	tid
t^+	varaktighet positiv fas
t^-	varaktighet negativ fas
t_a	ankomsttid

Grekiska tecken

α	avklingningsfaktor, viktprocent pentyl
γ	värme kapacitetskvot för luft
η_{ConWep}	ekvivalent massa i ConWep
η_I	ekvivalent massa baserat på impuls
η_P	ekvivalent massa baserat på tryck
λ_{TNT}	omvandlingsfaktor till mängd TNT
ρ	densitet
ρ_0	densitet hos luft, densitet hos PETN
ρ_{mo}	densitet hos mineralolja
ρ_p	densitet hos pentyl
χ	procentmängd pentyl

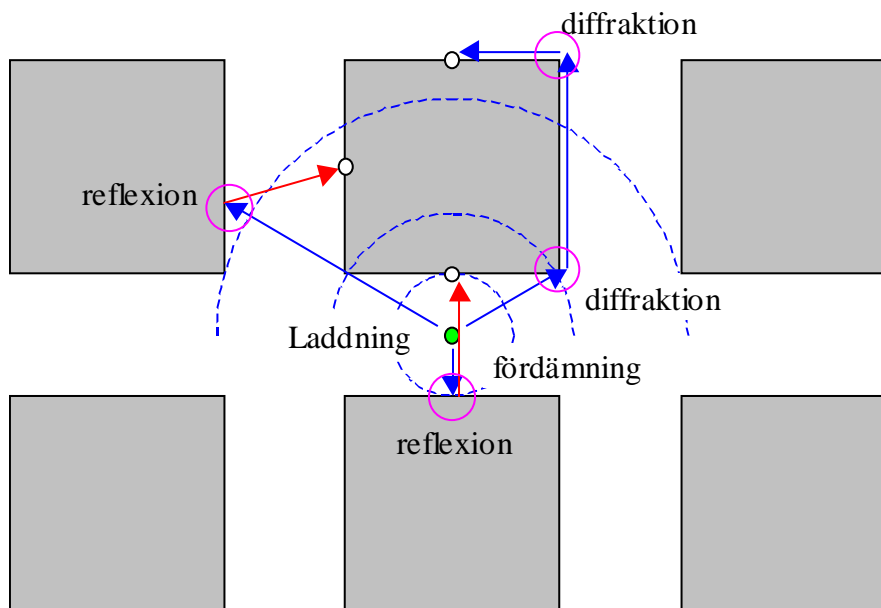
Index

+	indikerar positiv fas
-	indikerar negativ fas
0	indikerar ostörd luft
<i>Exp</i>	indikerar försöksresultat
<i>i</i>	indikerar våg nr <i>i</i>
<i>r</i>	indikerar reflekterad stötvåg
<i>s</i>	indikerar oreflekterad stötvåg

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Att prediktera den resulterande trycklasten från en explosion som inträffar i en bebyggelse kan vara mycket komplicerat, se Johansson och Laine (2012). Beroende på explosionskällans placering gentemot sin omgivning samt utformningen av denna kan detta resultera i en mycket stor variation av lastfall. Av dessa kan en betydande del utgöras av komplexa kombinationer av interagerande stötvågor såsom schematiskt sammanfattas i Figur 1.1.



Figur 1.1 Schematisk illustration av möjliga stötvågsfenomen som kan uppstå vid explosion i bebyggelse.

För enklare fall är det möjligt att använda analytiska eller semiempiriska samband särskilt framtagna när den resulterande explosionslasten ska bestämmas. När den omgivande geometrin blir mer komplex är det möjligt att denna typ av verktyg inte längre resulterar i godtagbara resultat. I sådana fall kan användandet av numeriska metoder, nyttjande fluiddynamik, aktuella delar av omgivningen modelleras och stötvågornas interaktion med denna simuleras på ett verklighetstroget sätt. Det är dock viktigt att poängtera att det fortfarande är av yttersta vikt att kontroll görs att de resultat som fås stämmer överens med de observerade i försök. Dvs. det finns ett behov av att verifiera denna typ av kraftfulla datorprogram mot experimentella resultat. När så väl är gjort, och det påvisats att det numeriska verktyget återspeglar verkligheten i tillräckligt hög grad, så kan detta med framgång användas istället för och/eller i kombination med experiment för att beskriva det förväntade verknings sättet av en sådan explosion.

I det här arbetet har programmet Autodyn, Century Dynamics (2004), använts. Det har tidigare visats i Johansson och Laine (2012) att Autodyn ger god överensstämmelse med experimentella data för explosion av sfäriska laddningar med möjlighet till fri utbredning i luften. Det är dock även önskvärt att veta om en motsvarande överensstämmelse fås i en mer komplex belastningssituation såsom en explosion i bebyggelse. En möjlighet till en sådan studie öppnade sig våren 2007 i ett samarbetsprojekt initierat av norska Forsvarsbygg där Räddningsverket bjöds in att medverka i en planerad försöksserie av explosion i gatukorsning som skulle utföras i samarbete med svenska FOI.

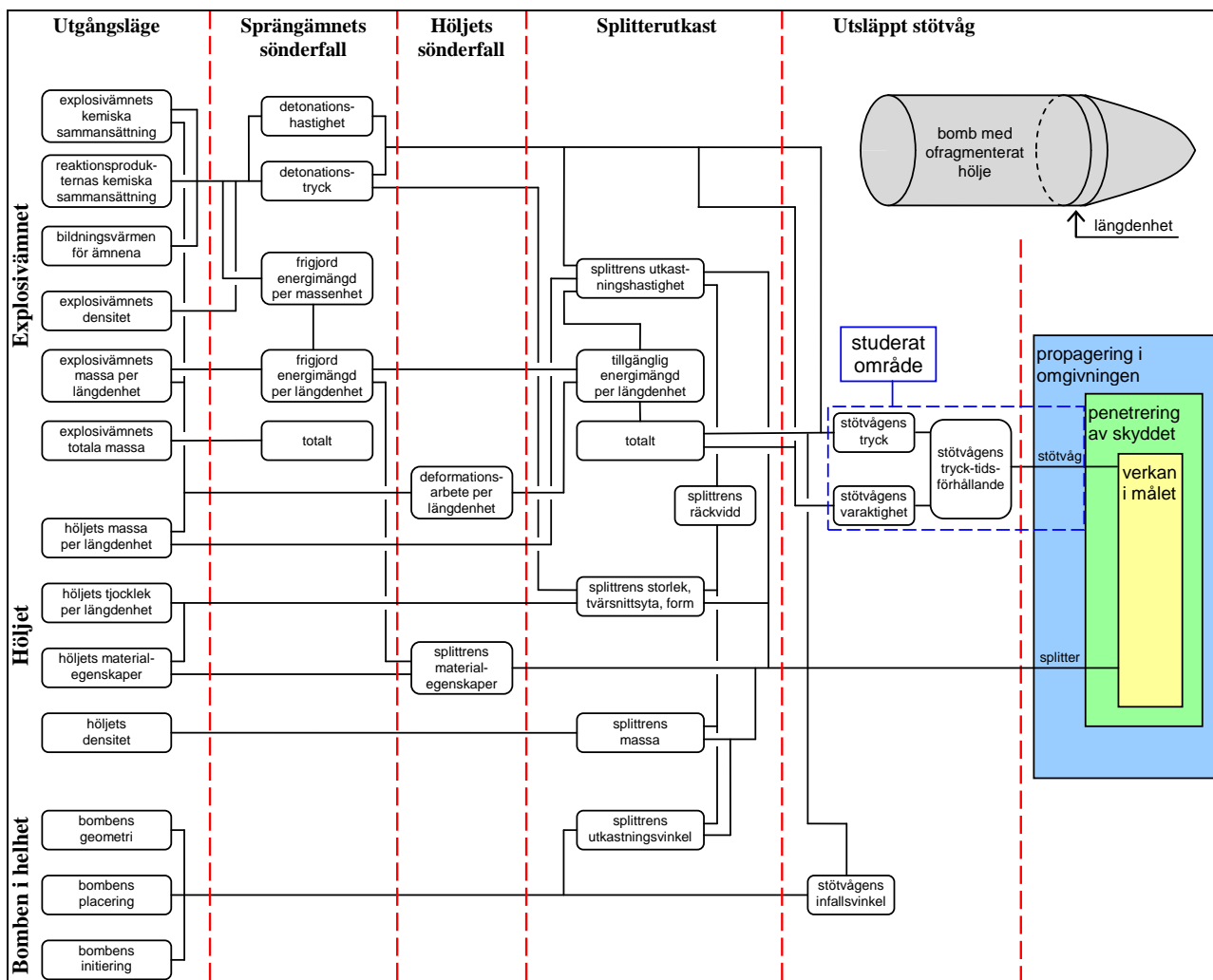
1.2 Syfte

Det övergripande syftet med detta arbete har varit att närmare studera vilken effekt som fås vid explosion i bebyggelse. Ett delmål i arbetet har varit att skaffa tillförlitliga mätdata att jämföra med det generella finita elementprogrammet Autodyn, Century Dynamics (2004), och ett annat att undersöka möjligheten att använda en förenklad ingenjörsmetod baserad på superposition och diffraktion, för att uppskatta de laster som kan förväntas uppstå i en sådan miljö.

Ett ytterligare syfte med försöksserien har även varit att vidareutveckla och understödja det givande, samarbete som på senare år byggts upp mellan Räddningsverket, norska Forsvarsbygg och FOI.

1.3 Explosionsförloppet och dess effekter – orientering

I detta arbete behandlas last från explosion i bebyggelse. 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 1.2 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 splinter som explosionen ger upphov till. Som framgår av figuren finns det ett stort antal olika delar att behärska för att fullständigt förstå hela förloppet. De delar som är av särskilt intresse i denna delrapport är också markerade. Det ska dock även poängteras att sprängämnets sönderfall med detonationshastighet, detonationstryck samt energifrigörelse också berörs i detta arbete via de explosionsanalyser som här utförs i programmet Autodyn.



Figur 1.2 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

Totalt utfördes 12 skott med tre olika typer av laddningar – två stycken med sprängämnet PETN (högexplosiv laddning, så kallad HE-laddning) och ett med sprängämnet TBX (termobarisk laddning). Den sistnämnda laddningstypens försöksresultat är dock sekretessbelagda och tas därför inte upp i denna rapport. För resterande två laddningstyper koncentreras redovisningen mot den mindre av de båda – 0,4 kg laddning placerad nära marken – eftersom denna bäst svarar mot den hotbild som önskas belysas i detta arbete. Som komplettering till detta redovisas dock även sammanfattande nyckeldata samt fullständiga tryck-tidssamband även för den större laddningen på 1,6 kg placerad en bit upp från marken. För att öka överskådligheten av framtagna resultat begränsas vidare redovisade tryck-tidsmätningar samt diskussion av dessa till tryckgivare placerade på samma nivå som den mindre av de två laddningarna.

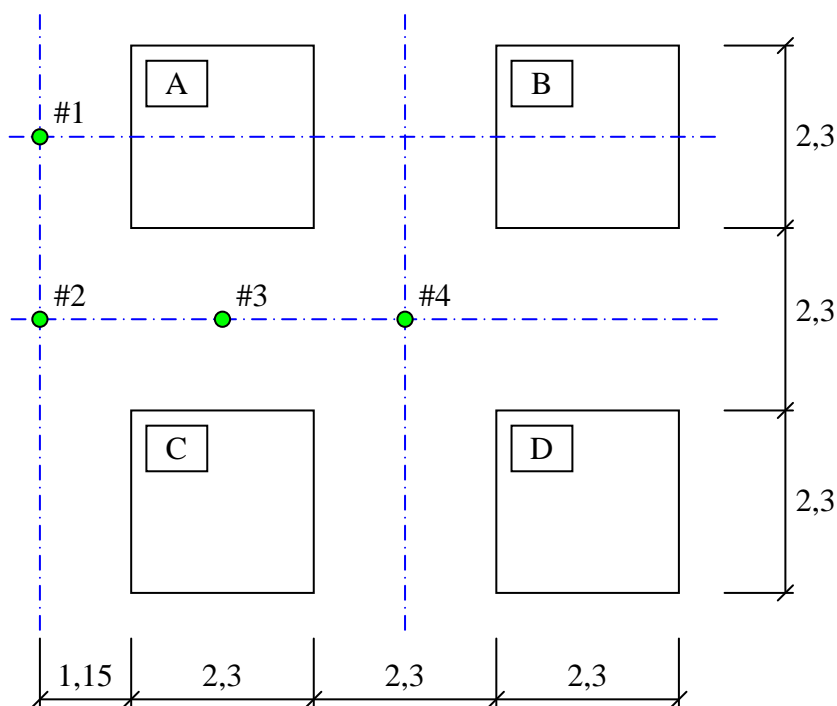
2 Försök

2.1 Försöksuppställning

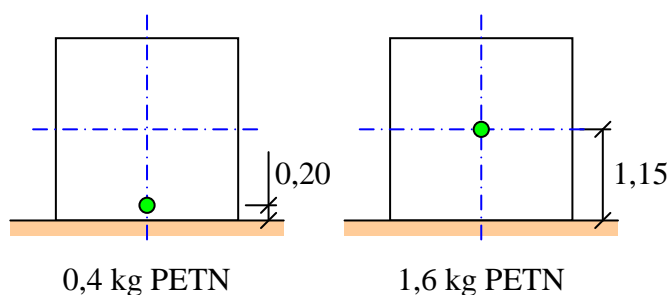
2.1.1 Geometri och laddningens läge

Försöksuppställningen bestod av fyra stycken betongkuber, med sidan 2,3 m, placerade på ett inbördes avstånd om 2,3 m, se Figur 2.1. I planet placerades enskilda laddningar i fyra olika positioner, #1 - #4. Två olika laddningsstorlekar användes, 0,4 kg samt 1,6 kg, och placerades på avståndet 0,20 m respektive 1,15 m från marken, se Figur 2.2. Foton av försöksuppställningen visas i Figur 2.3.

Avsikten med vald försöksuppställning var att approximativt simulera en explosion i bebyggelse. Försöken utfördes i skala 1:5, vilket innebär att betongkuberna ungefär motsvarar 4-våningshus med en höjd om 11,5 m samt att laddningarna motsvarar bomber på 50 kg och 200 kg på en höjdnivå om 1,0 m respektive 5,75 m.



Figur 2.1 Vy från ovan av försöksuppställning där omgivningens geometri samt laddningarnas placering framgår.



Figur 2.2 Vy från sidan som visar laddningens placering i vertikalled.



Figur 2.3 Foto på försöksuppställning. Övre fotot visar en laddning på 0,4 kg (orange sfär) placerad i läge #3 på höjden 0,20 m medan undre fotot visar en 1,6 kg laddning placerad i läge #4 på höjden 1,15m.

2.1.2 Tryckgivare

2.1.2.1 Typ av givare

Två typer av givare användes – dels för att mäta tryck mot betongkassunernas väggar och dels för att mäta trycket mot marken. Tryckgivarna i betongkassunerna var av märket Kulite (www.kulite.com) och monterades i ett genomgående hål med sladdar dragna ut genom dörröppning eller upptaget hål i vägen. Markgivarna (frifältsgivare) var av märket PCB (www.pcb.com) och placerades i en träplatta som skruvades fast i markunderlaget (asfalt eller betong), se Figur 2.4.

Kulitegivarna gick genom en (full) bryggförstärkare medan PCB-givarna hade inbyggda förstärkare och strömmatades genom PCB-förstärkare. Som inspelningsutrustning användes två stycken Nicolet Vision med 16-bitars upplösning och inställda på maximal samplingshastighet 100 kHz. Använda tryckgivare klarade de trycknivåer som förväntades uppstå varför samma givare kunde användas i samtliga skjutningar. Mätområdet på inspelnings- och förstärkningsutrustning anpassades dock till förväntade förhållanden för att få så goda mätdata som möjligt.



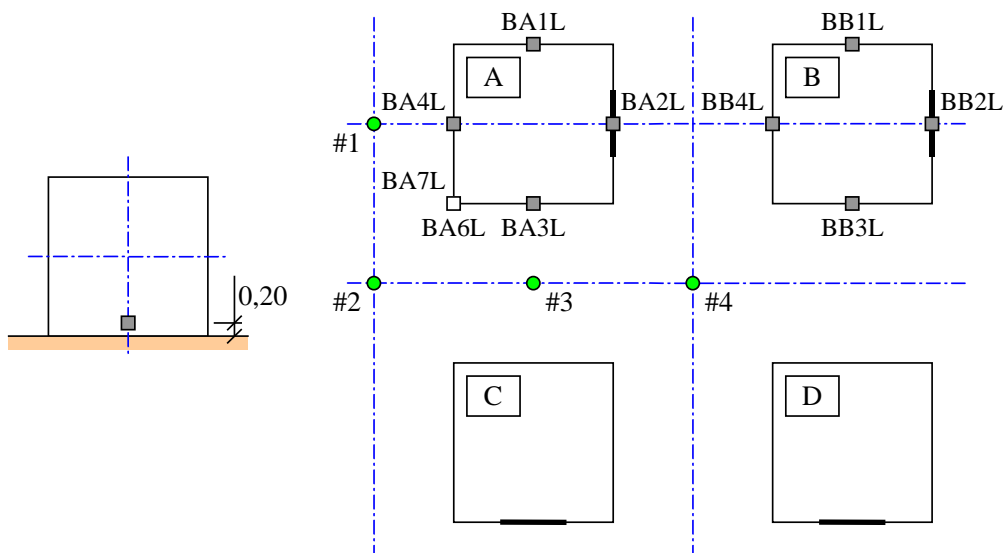
Figur 2.4 Tryckgivare på mark. Givaren fästes i en träskiva som skruvades fast i underlaget (asfalt eller betong) och omgavs med sand för att säkerställa en mjuk övergång från asfalten till skivans överkant.

2.1.2.2 Placering av givare

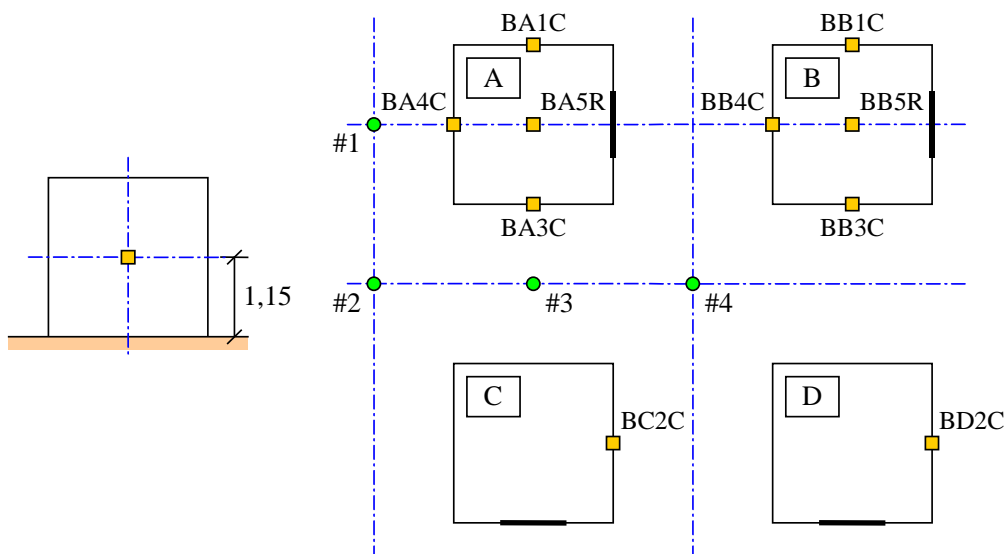
Totalt användes 25 tryckgivare för att registrera de tryck som uppstod vid detonation av laddningar. Tjugo av dessa - tio i nivå med laddningarna på 0,4 kg (0,2 m) och tio i nivå med laddningarna på 1,6 kg (1,15m), se Figur 2.5 respektive Figur 2.6 – placerades i betongkassunerna medan de återstående fem utgjordes av givare som placerades på marken i lägen som varierade beroende på laddningens läge, se Figur 2.9.

Betongkuberna, betecknade som byggnad A till D, utgjordes av betongkassuner med en ståldörr i ena sidan. Dessa dörrar hölls stängda under försöken men medförde ändå att byggnadernas yta inte blev helt jämn, något som befarades kunna störa mätningarna. För att minimera effekten av detta riktades respektive kassun på ett sådant sätt att dörren fick gynnsammast möjlig placering med avseende på de mätningar som utfördes. Vidare bedömdes det vara olämpligt att fästa tryckgivare i dörrarna (stål) på grund av de vibrationer som befarades kunna uppkomma i dessa.

Dörrarna hade en hög tröskel vilket innebar att tryckgivare placerade nära marken, se Figur 2.2, kunde fästas obehindrat i betongen. För givare placerade högre upp var detta dock inte möjligt. Istället placerades dessa givare på motsvarande position i intilliggande kassun, jämför placering av givare BC2C och BD2C i Figur 2.6.

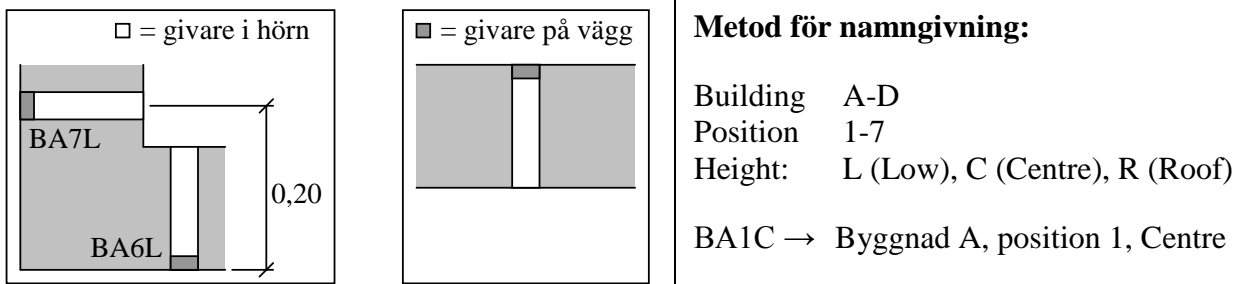


Figur 2.5 Placering av givare på 0,2 m höjd. Givarnas placering var desamma för samtliga laddningar. Laddningarnas lägen är markerade som #1 - #4.



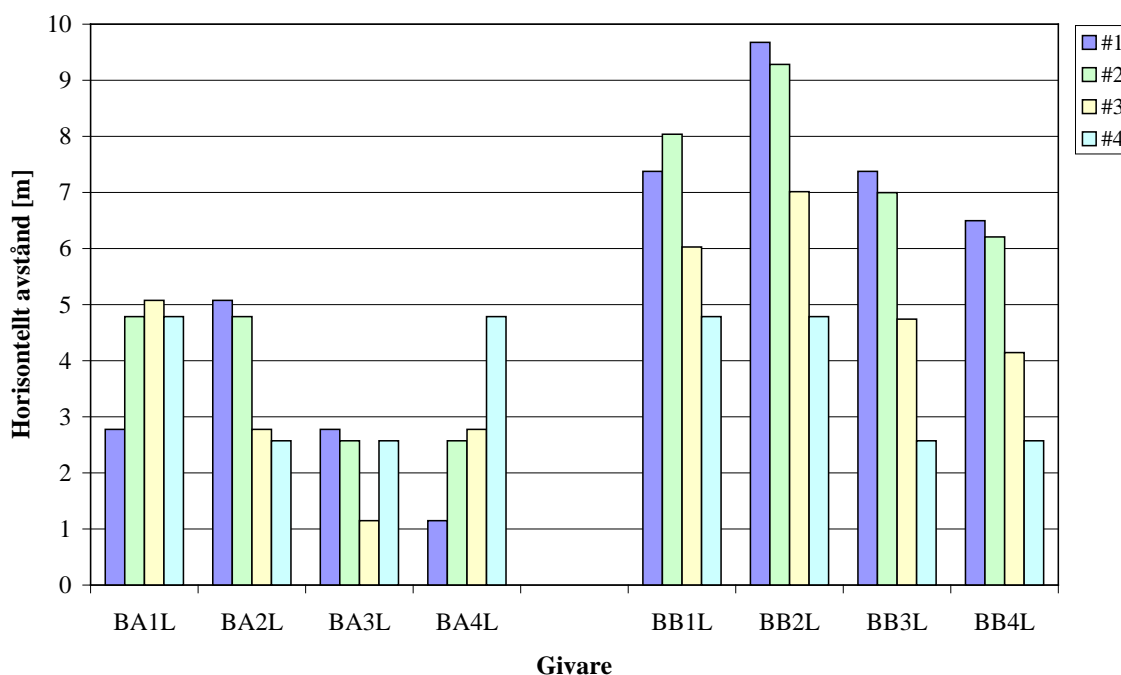
Figur 2.6 Placering av givare på 1,15 m höjd. Givarnas placering var desamma för samtliga laddningar. Valet av placering för givare BC2C och BD2C gjordes med hänsyn till dörrarnas lägen. Laddningarnas lägen är markerade som #1 - #4.

Syftet med tryckgivarna på betongkassunerna var att mäta trycket mot dessa i en nivå motsvarande laddningens läge medan tryckgivarna placerade på marken fungerade som referensmätningar. Givare i betongkassuner placerades i urborrat hål såsom schematiskt visas i Figur 2.7. I byggnad A placerades även två givare (BA6L och BA7L) nära ena hörnet, jämför Figur 2.5 med avsikt att översiktligt söka fånga den diffraktionseffekt som var att förvänta här. Av Figur 2.7 framgår även metod för namngivning av de olika givarna.



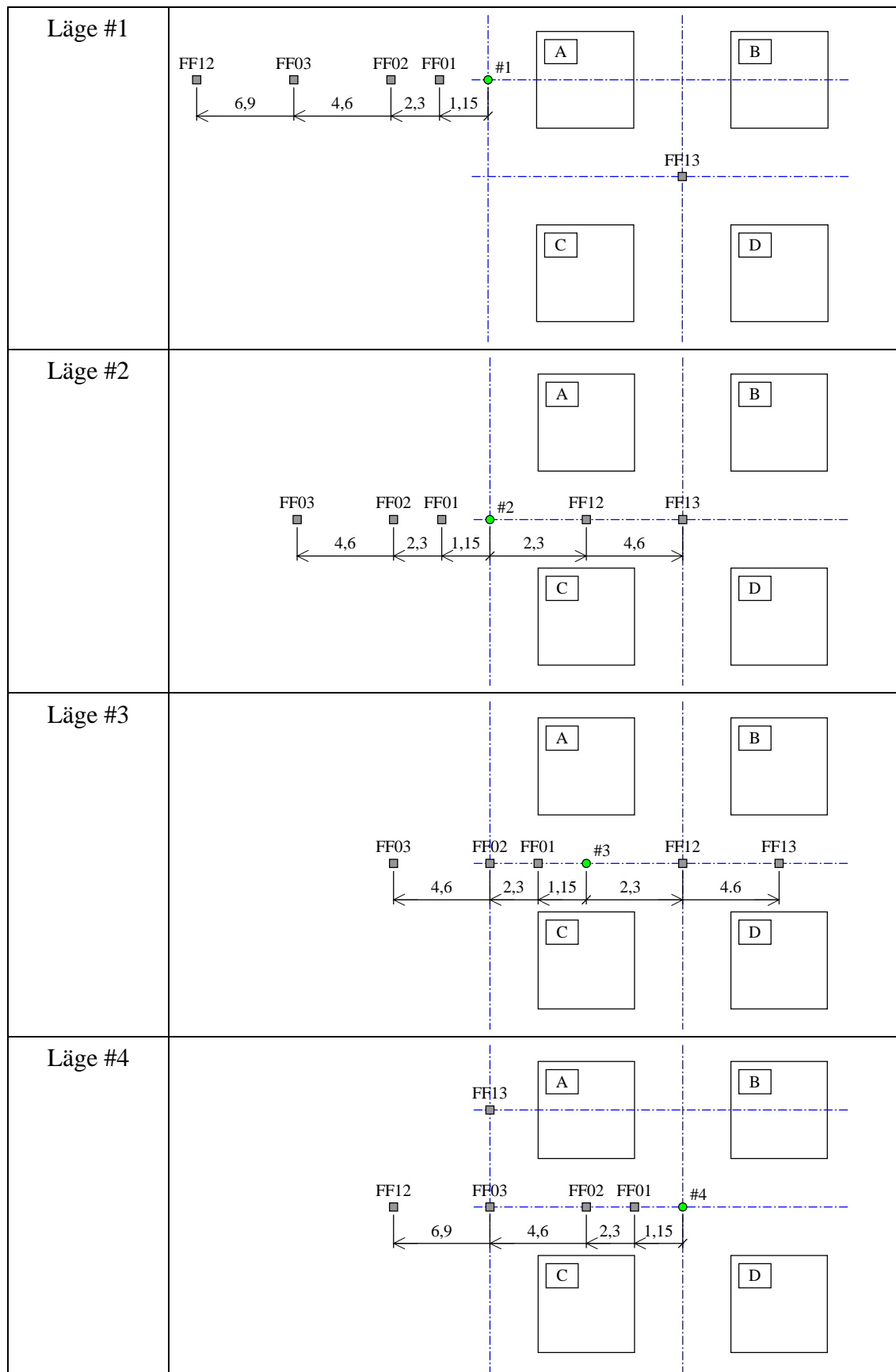
Figur 2.7 Schematisk placering av tryckgivare i betongkassun.

I Figur 2.8 presenteras en sammanställning av det horisontella avståndet, beaktande betongkassunernas position, mellan laddning och tryckgivare för byggnad A och B. För givare placerade bakom hörn har den kortaste vägen mellan laddning och givare beräknats.



Figur 2.8 Horisontellt avstånd från laddning till givare för byggnad A och B. Byggnadernas position har beaktats i framtagna sträcka.

Markgivarna placerades på olika sätt vid respektive laddning, se Figur 2.9. I stort sett bibehålls dock det relativa inbördes avståndet mellan givarna för de olika laddningarna för att underlätta jämförelse mellan de olika fallen.



Figur 2.9 Placering av frifältsgivare (FF = FriFält) på marken. Givarnas lägen varierade beroende på vilken laddning som detonerade.

2.2 Sprängladdning

Effekten av två olika typer av laddningar studerades i försöksserien – högexplosiv laddning PETN samt termobarisk laddning (TBX). I denna rapport behandlas dock enbart resultat från PETN och för information om försök med termobarisk laddning hänvisas till den rapport som ges ut av Forsvarsbygg.

Laddningarna bestod av 0,4 kg respektive 1,6 kg PETN av typen Sprängdeg m/46. Sprängdegen bestod av omkring 86 % pentyl uppblandat med cirka 14 % mineralolja och hade en densitet på omkring $1,50 \text{ kg/m}^3$. Laddningarna formades sfäriska genom att de placerades i glasbehållare av lämplig storlek. Glassfärens massa uppgick till 0,07 kg samt 0,30 kg för 0,4 kg respektive 1,6 kg laddningarna och hade, via sin låga hållfasthet, en försumbar effekt på den resulterande stötvågen. En översikt av detonerade laddningar ges i Tabell 2.1.

Tabell 2.1 Översikt av typ, storlek samt läge hos laddningar i försöksserien. I denna rapport behandlas dock endast resultat från PETN-laddningar och då främst de på 0,4 kg.

Skott	Laddningens läge	Laddning	Höjd över marken
1	#1	0,4 kg PETN	0,20 m
2	#1	1,6 kg PETN	1,15 m
3	#1	1,4 kg TBX	1,15 m
1	#2	0,4 kg PETN	0,20 m
2	#2	1,6 kg PETN	1,15 m
3	#2	1,4 kg TBX	1,15 m
1	#3	0,4 kg PETN	0,20 m
2	#3	1,6 kg PETN	1,15 m
3	#3	1,6 kg TBX	1,15 m
1	#4	0,4 kg PETN	0,20 m
2	#4	1,6 kg PETN	1,15 m
3	#4	1,4 kg TBX	1,15 m

I ConWep (1992) anges den ekvivalenta massan, se Johansson och Laine (2012), för pentyl (pentolite) som $\eta_P = 1,42$ för tryck samt $\eta_I = 1,00$ för impulstätheten. Vid framtagning av resulterande tryck och impulstätheter används i ConWep dock ett medelvärde av detta, dvs.

$$\eta_{ConWep} = \frac{\eta_P + \eta_I}{2} = \frac{1,42 + 1,00}{2} = 1,21 \quad (2.1)$$

Med beaktande av detta samt andelen PETN i sprängdegen fås en omräkningsfaktor λ till mängd TNT som

$$\lambda_{TNT} = \chi \cdot \eta_{ConWep} = 0,86 \cdot 1,21 = 1,041 \quad (2.2)$$

vilket innebär att 0,4 kg och 1,6 kg sprängdeg enligt ConWep motsvarar 0,416 kg respektive 1,665 kg TNT.

2.3 Resultat

2.3.1 Orientering

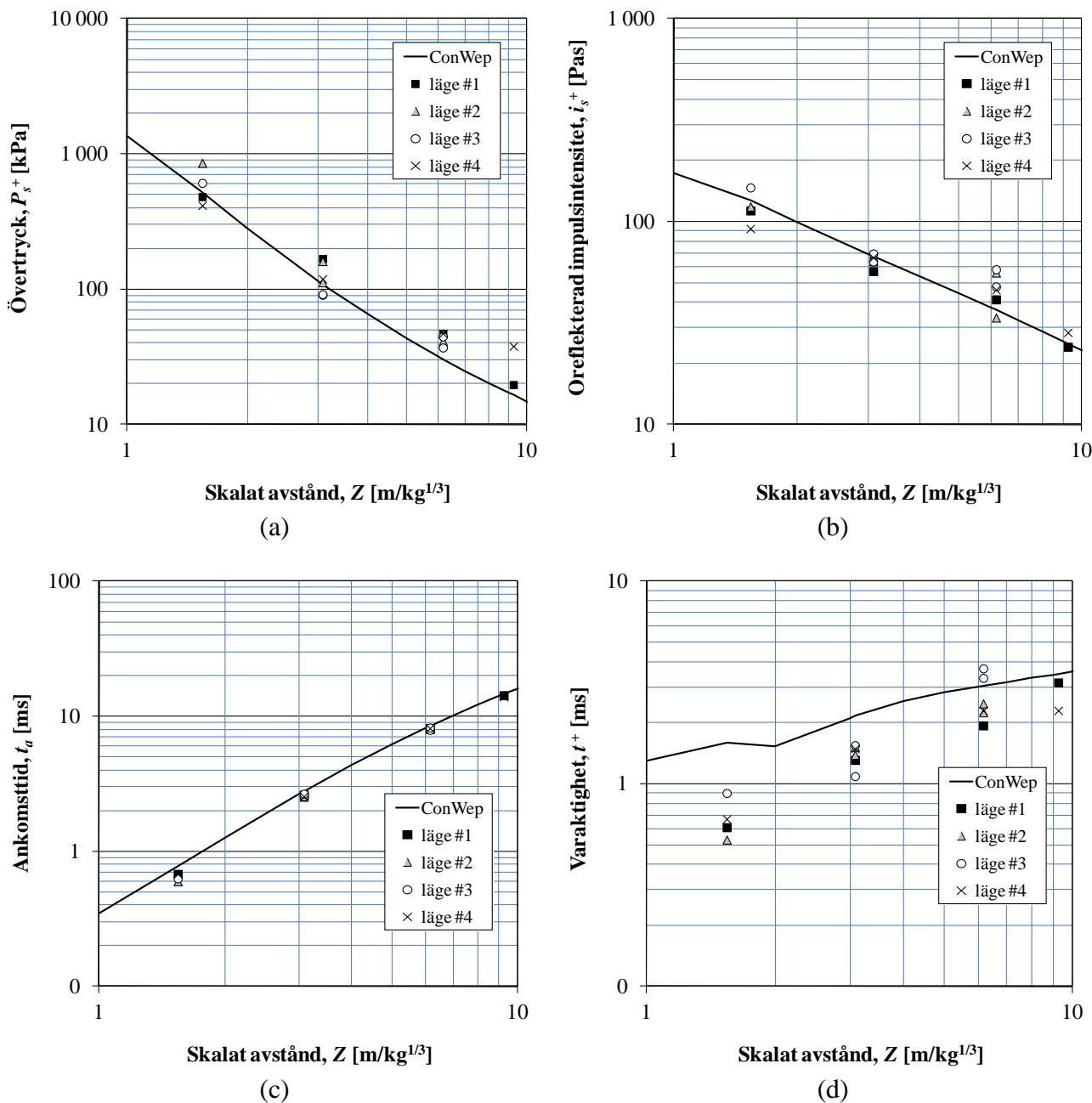
I detta avsnitt jämförs resulterande tryck-tidssamband för valda kombinationer av laddningsplacering och givarläge för laddning på 0,4 kg PETN. En fullständig presentation av samtliga försöksdata ges i diagram- och tabellform i bilaga A respektive B.

2.3.2 Frifältstryckgivare – jämförelse med ConWep och olika lägen

ConWep (1992) är ett amerikanskt program där empiriska samband som framtagits utgående från framförallt amerikanska försök samlats. I ConWep redovisas bland annat resultat från luftstövåg vid fri utbredning och detta används här som jämförelse med erhållna försöksdata. Som framgår av Figur 2.9 var de flesta frifältstryckgivarna (FF01 till FF13) placerade i en rak linje med fri sikt från laddningen, vilket möjliggör en jämförelse med ConWep under antagande av hemisfärisk (halvsfärisk) utbredning. En sammanställning av stötvågsp parametrar erhållna från försök och de som predikteras i ConWep ges i Tabell 2.2 och Figur 2.10.

Tabell 2.2 Jämförelse av stötvågsp parametrar från frifältsgivare (givare FF01 till FF13) i försök och ConWep för laddning på 0,4 kg PETN, se även sammanställning i Figur 2.10.

Källa	R [m]	Z [m/kg ^{1/3}]	P_s^+ [kPa]	i_s^+ [Pas]	t_a [ms]	T^+ [ms]
#1 -FF01	1,15	1,54	482	113	0,68	0,61
#2 -FF01	1,15	1,54	857	119	0,60	0,53
#3 -FF01	1,15	1,54	610	147	0,63	0,90
#4 -FF01	1,15	1,54	416	92	0,68	0,67
ConWep	1,15	1,54	518	128	0,78	1,60
#1 -FF02	2,3	3,08	168	57	2,62	1,31
#2 -FF02	2,3	3,08	161	69	2,53	1,52
#2 -FF12	2,3	3,08	112	64	2,64	1,39
#3 -FF02	2,3	3,08	91	70	2,57	1,09
#3 -FF12	2,3	3,08	92	63	2,67	1,55
#4 -FF02	2,3	3,08	119	67	2,55	1,49
ConWep	2,3	3,08	109	67	2,77	2,16
#1 -FF03	4,6	6,16	47	41	8,17	1,94
#2 -FF03	4,6	6,16	41	34	8,02	2,49
#2 -FF13	4,6	6,16	47	56	8,16	2,25
#3 -FF03	4,6	6,16	45	48	7,92	3,33
#3 -FF13	4,6	6,16	37	58	8,25	3,71
#4 -(FF03)	4,6	6,16	47	46	8,15	2,30
ConWep	4,6	6,16	30	37	8,40	3,05
#1 -FF12	6,9	9,24	20	24	14,30	3,16
#4 -(FF12)	6,9	9,24	38	28	13,95	2,30
ConWep	6,9	9,24	17	25	14,60	3,48

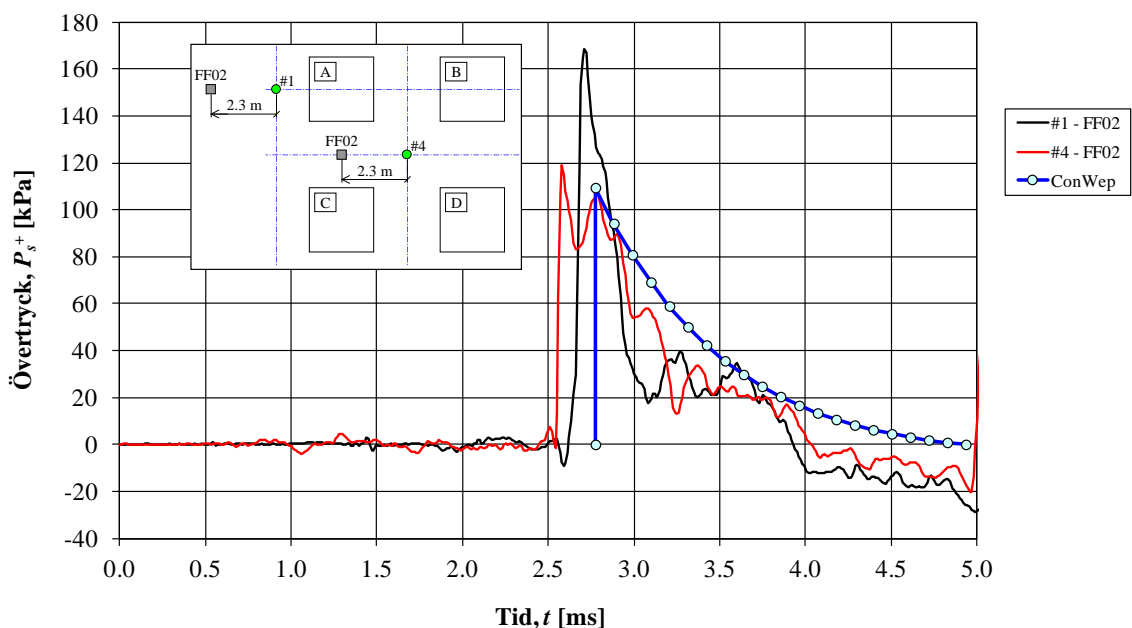


Figur 2.10 Jämförelse av försöksresultat och ConWep (1992) för (a) oreflekerat övertryck, (b) oreflekerad impulstättighet, (c) ankomsttid samt (d) varaktighet. Försöksresultat listas även i Tabell 2.2.

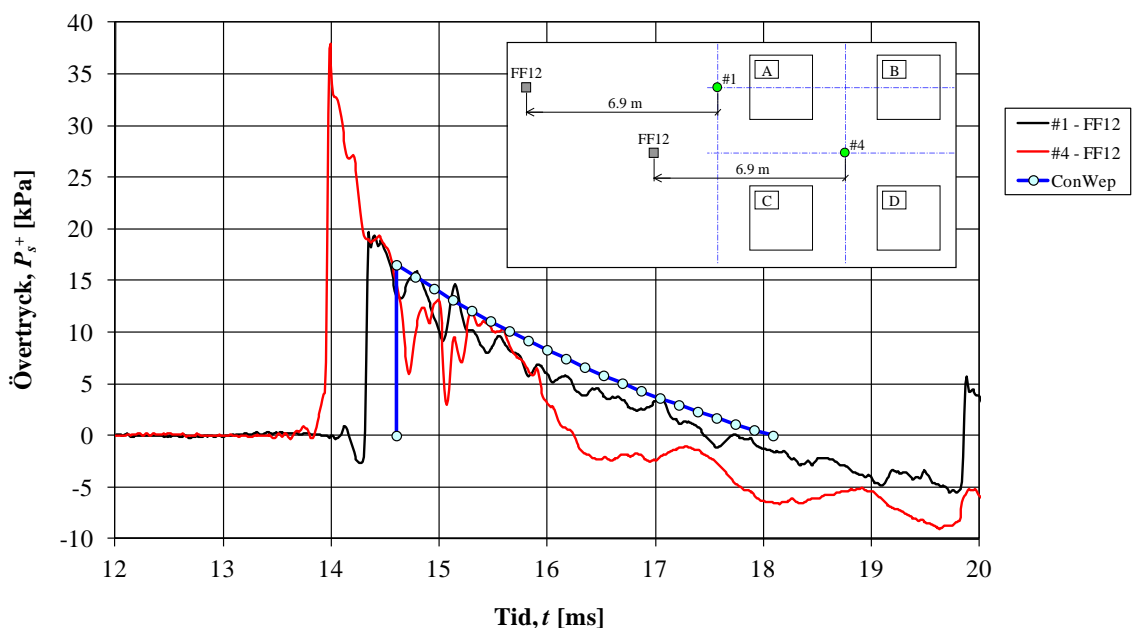
För övertrycket är överensstämmelsen förhållandevis god på korta avstånd av 1,15 m eller 2,3 m, medan den blir sämre för längre avstånd på 4,6 m och 6,9 m, se Figur 2.10a. En bidragande orsak till detta är inverkan av fördämning som fås av intilliggande betongkassuner men detta bedöms inte vara orsaken till hela skillnaden. Det ska dock poängteras att det i ett försök råder viss osäkerhet i erhållna tryckvärden eftersom det på grund av sin korta varaktighet kan vara svårt att fullständigt fånga initialtryckets storlek. En säkrare metod är därför att jämföra impulstättigheterna med varandra och av Figur 2.10b framgår att dessa stämmer relativt väl mellan försök och ConWep. Ankomsttiderna stämmer bra, framförallt för avstånd $\geq 2,3$ m, medan varaktigheten genomgående över-

skattas i ConWep jämfört med försöksresultat. Sammantaget kan dock konstateras att ConWep genererar en godtagbar prediktion av förväntade stötvågsparametrar i de aktuella fallen.

I Figur 2.11 och Figur 2.12 jämförs tryck-tidssamband från försök med ConWep för laddning 0,4 kg PETN i läge #1 och #4 för ett avstånd av 2,3 m respektive 6,9 m. Av detta framgår att tryck-tidssambanden från försök är betydligt ojämnare än vad som fås från ConWep. Vidare kan konstateras att inverkan av fördämningseffekter, dvs. förhindrad fri utbredning av stötvågen, gör sig tydligt märkbara för ett avstånd om 6,9 m.



Figur 2.11 Jämförelse av tryck-tidskurva från försök och ConWep (1992) för avståndet 2,3 m från laddning för laddning 0,4 kg PETN i läge #1 och #4.



Figur 2.12 Jämförelse av tryck-tidskurva från försök och ConWep (1992) för avståndet 6,9 m från laddning för laddning 0,4 kg PETN i läge #1 och #4.

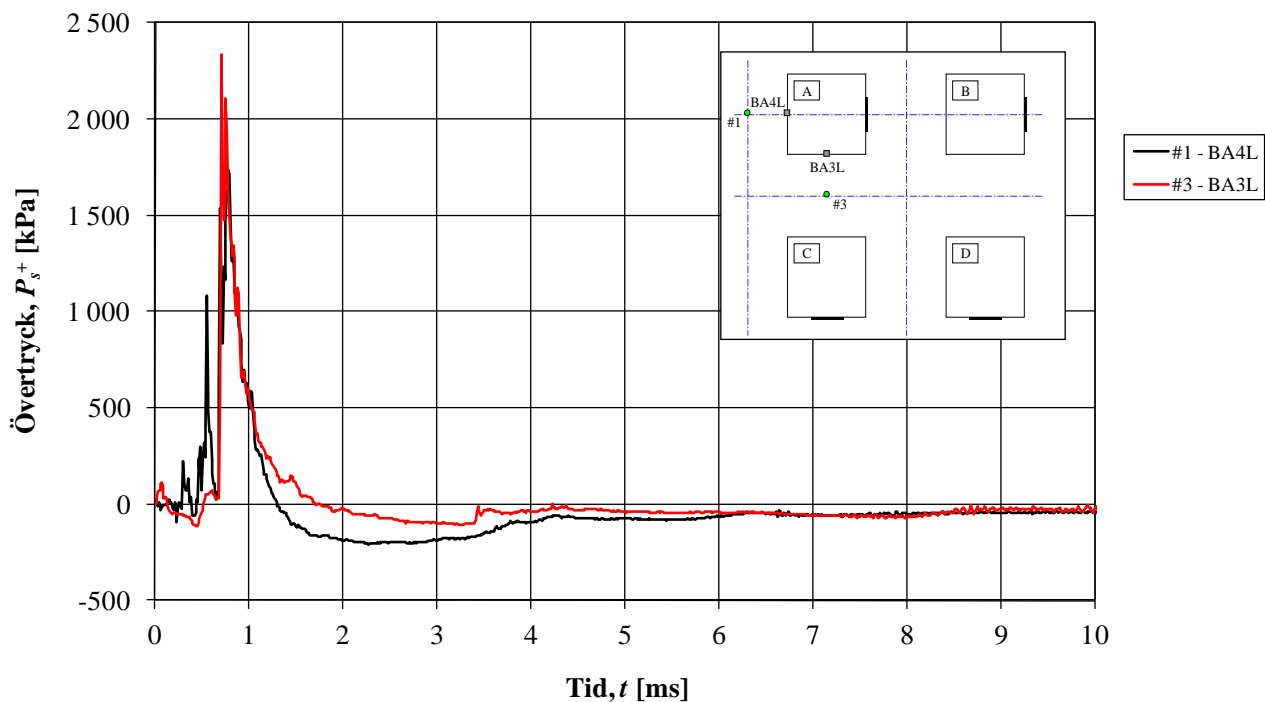
2.3.3 Tryckgivare på byggnader - jämförelse av olika lägen

Den valda placeringen av betongkuberna samt placering av laddningens och givarnas lägen gör det möjligt att jämföra resulterande tryck mellan olika laddningar. Laddning i läge #1 och #3 samt läge #2 och #4 är lämpliga att jämföras med varandra, se Figur 2.5. Studerade kombinationer (0,4 kg PETN och givare nära mark) sammanfattas i Tabell 2.3 och jämförs i Figur 2.13 till Figur 2.21. De tryckutslag som kan ses vid en tidpunkt nära noll är det brus som uppstod i försöken i samband med att laddningen detonerade. Dessa värden är således enbart fiktiva men har i här presenterat material inte rensats bort.

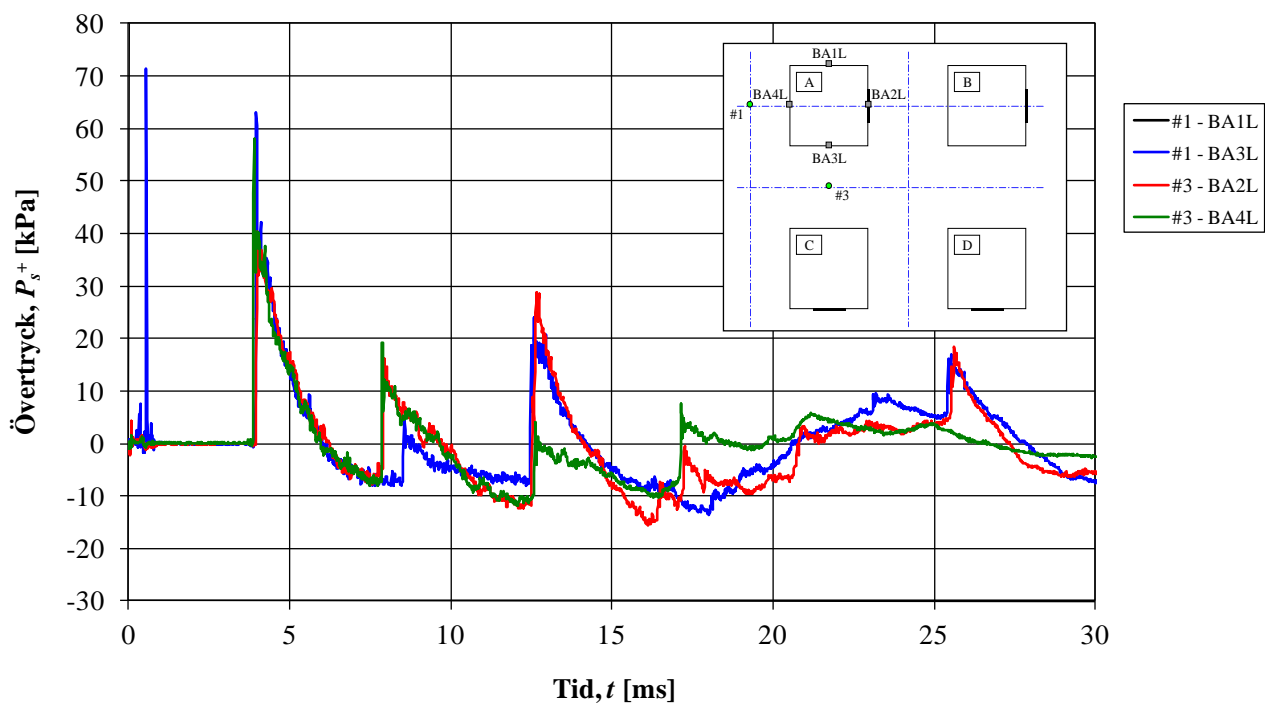
Generellt gäller att överensstämmelsen mellan olika skott är god. Detta visar på en repeterbarhet i försöken som är värdefull för den jämförelse med resultat från finita elementanalyser som görs i kapitel 3.

Tabell 2.3 Kombination av laddningens läge och givarplacering som jämförs med varandra.

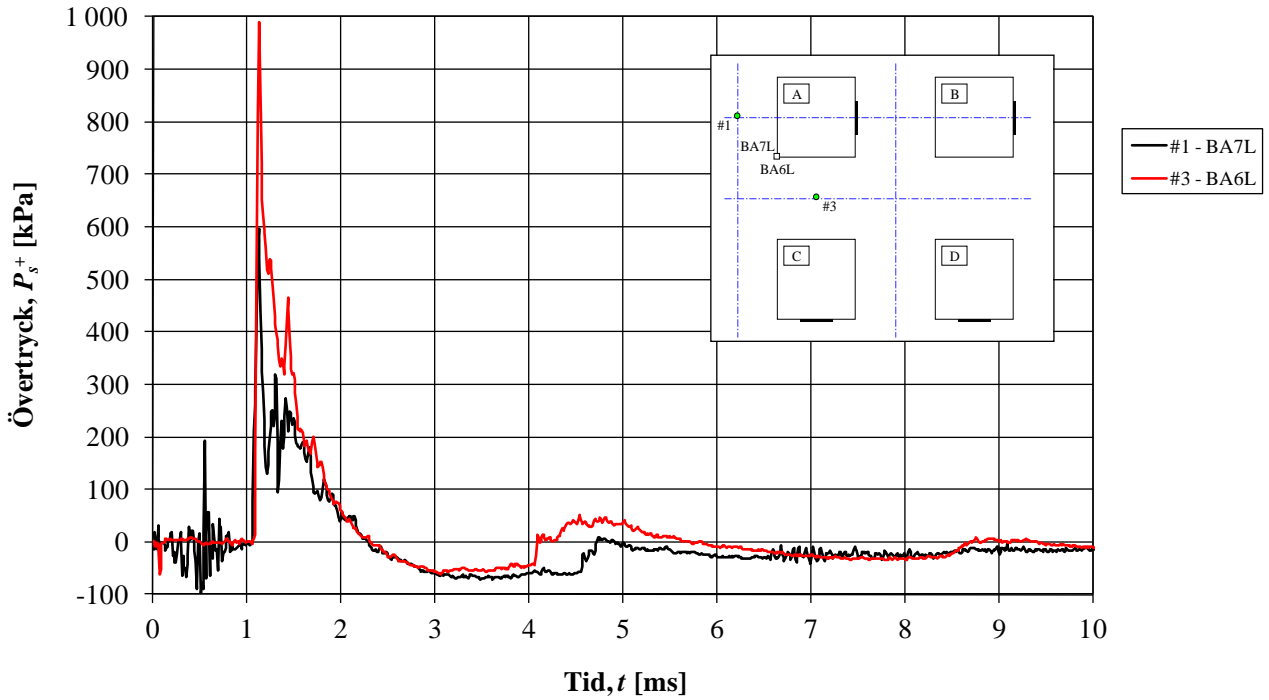
Kombination	Laddningens läge	Givare	Kombination	Laddningens läge	Givare
A1	#1	BA4L	B1	#2	BA6L
	#3	BA3L		#2	BA7L
A2	#1	BA1L	B2	#2	BA3L
	#1	BA3L		#2	BA4L
	#3	BA2L		#4	BA2L
	#3	BA4L		#4	BA3L
A3	#1	BA7L		#4	BB3L
	#3	BA6L		#4	BB4L
A4	#1	BA6L	B3	#2	BA1L
	#3	BA7L		#2	BA2L
A5	#1	BA2L		#4	BA1L
	#3	BA1L		#4	BA4L
A6	#1	BB1L	#4	BB1L	
	#1	BB3L	#4	BB2L	



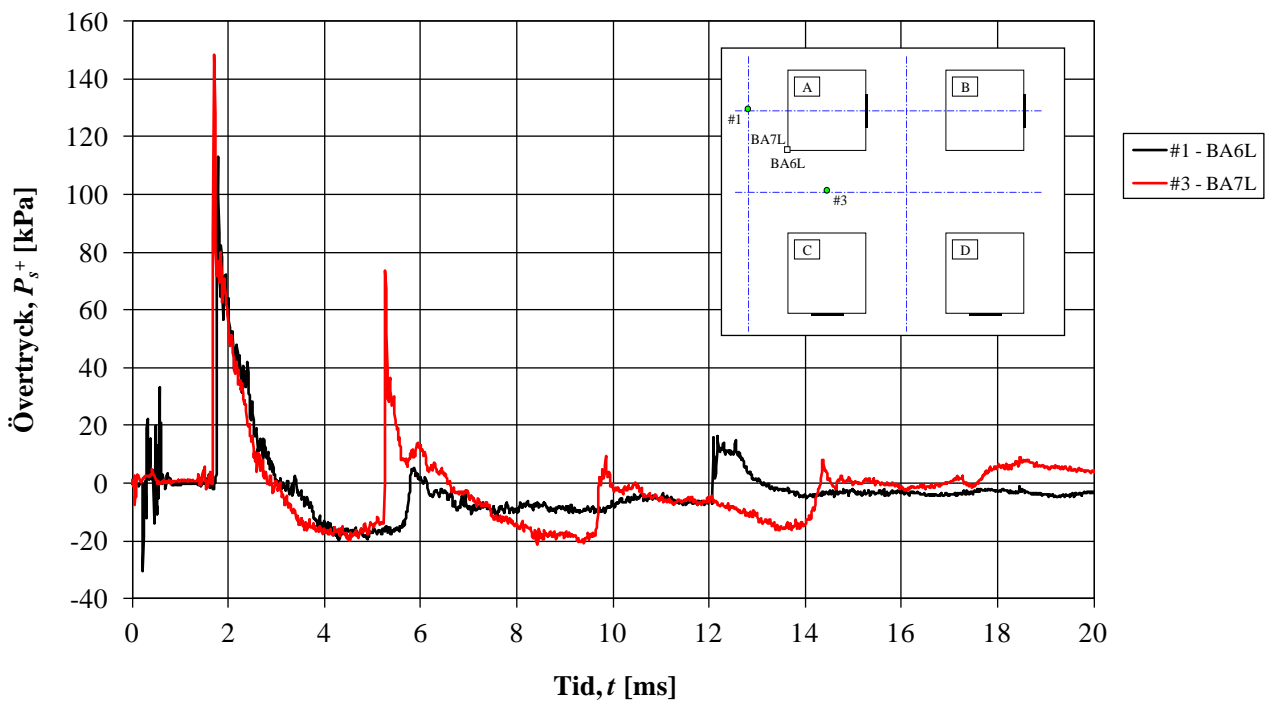
Figur 2.13 Tryck-tidssamband för givare enligt kombination A1 i Tabell 2.3.



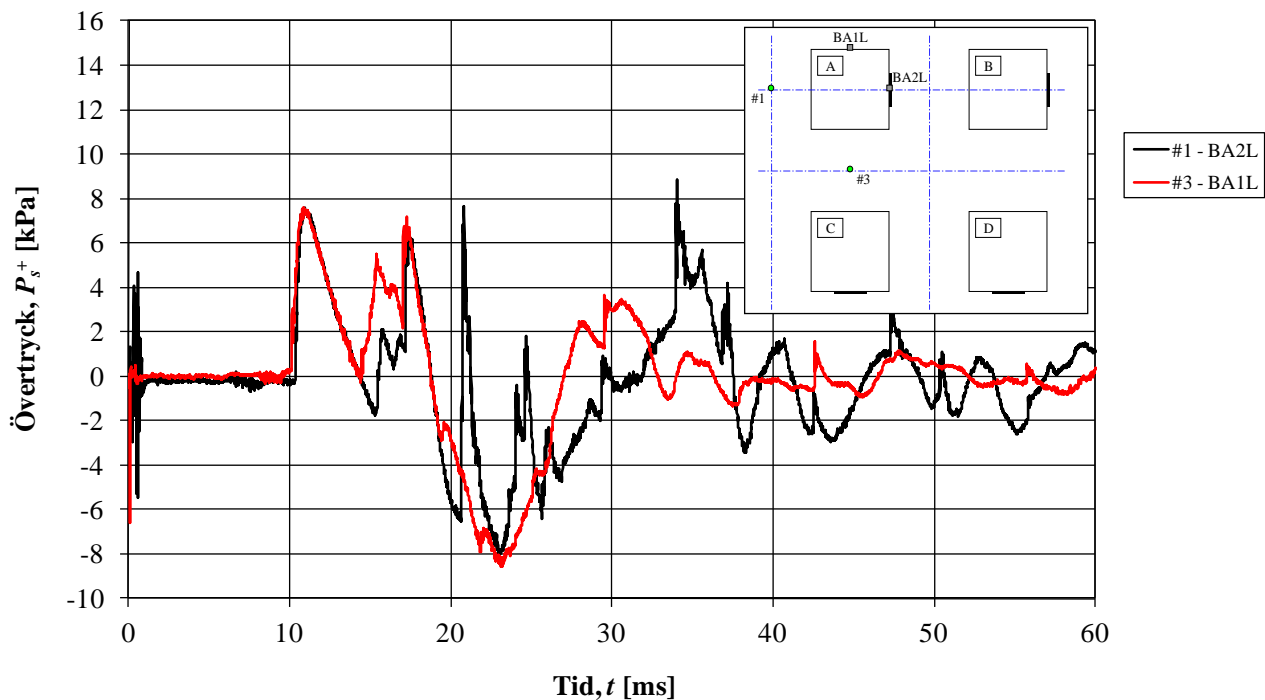
Figur 2.14 Tryck-tidssamband för givare enligt kombination A2 i Tabell 2.3. Givare #1 – BA1L fungerade inte.



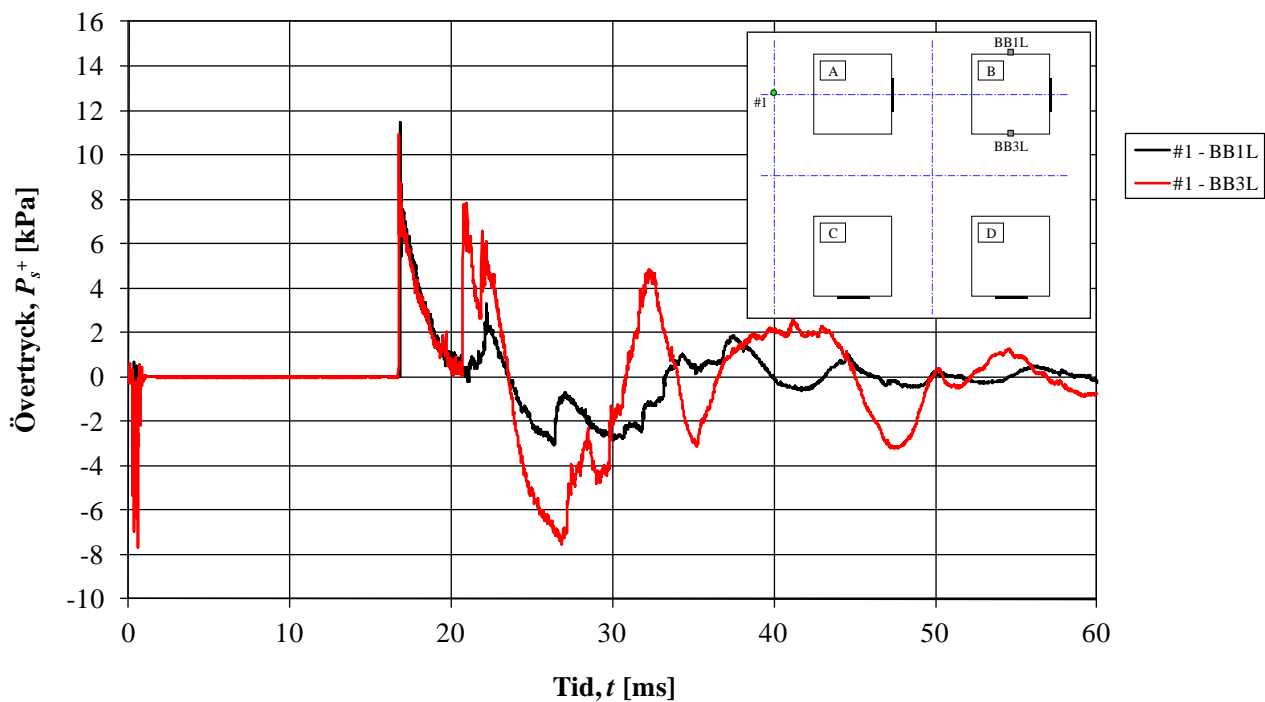
Figur 2.15 Tryck-tidssamband för givare enligt kombination A3 i Tabell 2.3.



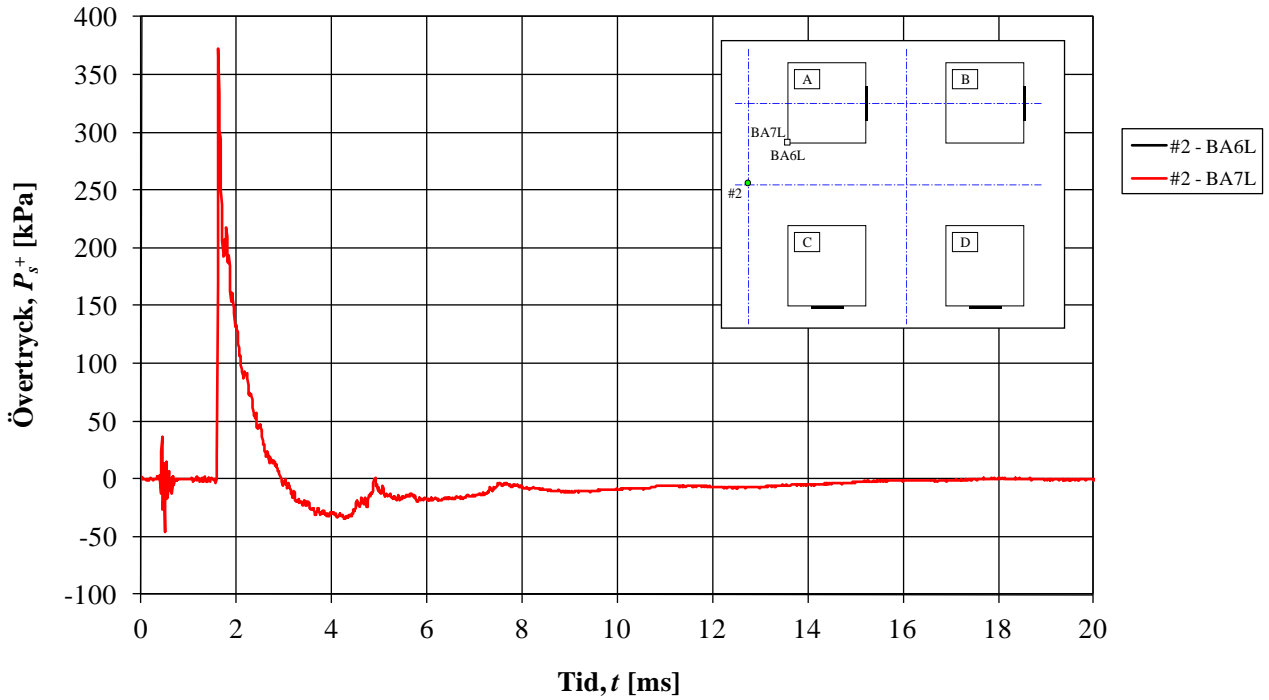
Figur 2.16 Tryck-tidssamband för givare enligt kombination A4 i Tabell 2.3.



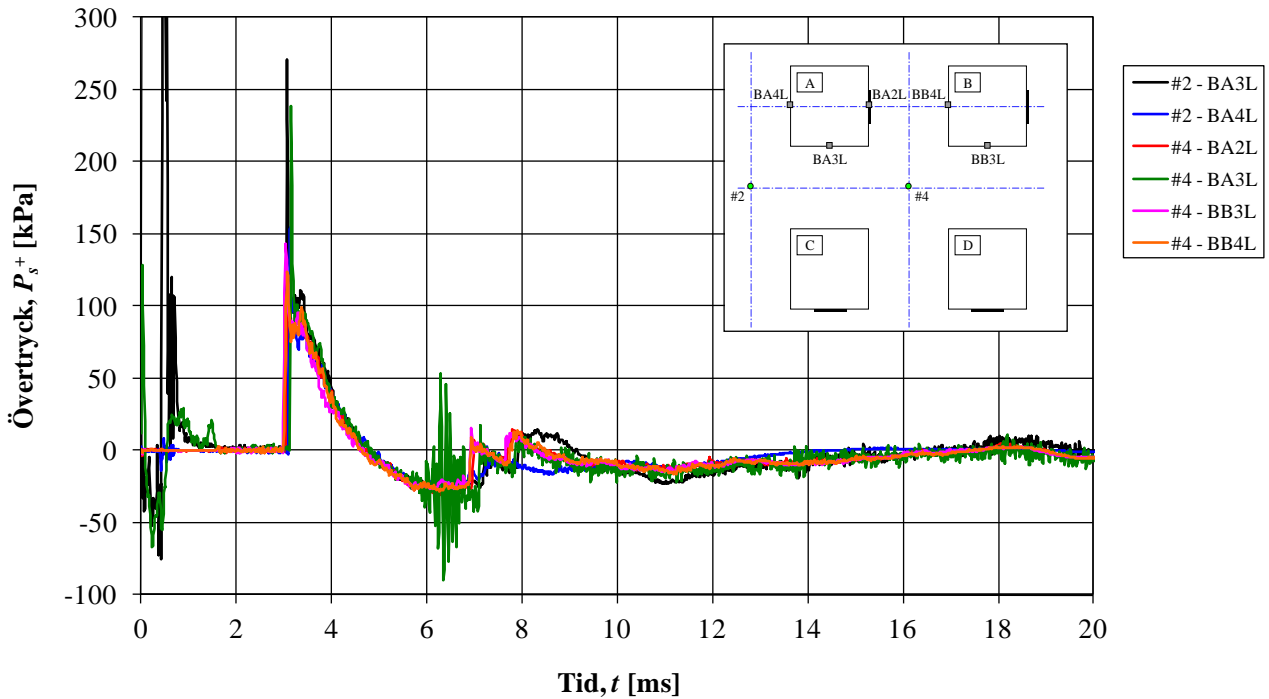
Figur 2.17 Tryck-tidssamband för givare enligt kombination A5 i Tabell 2.3.



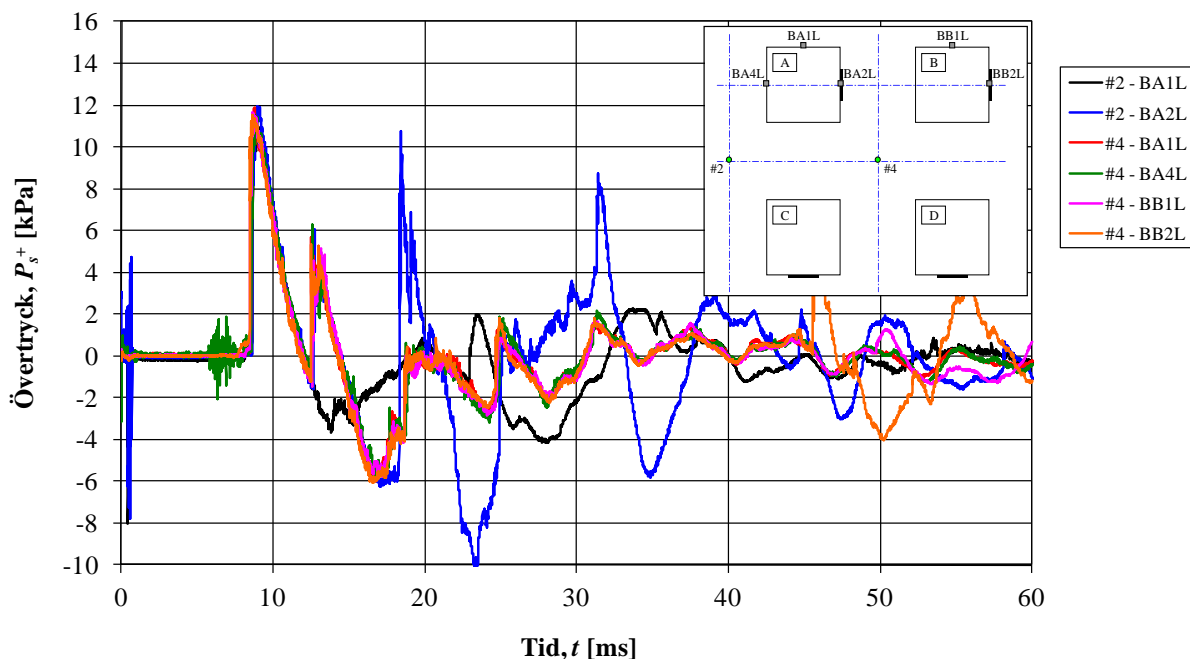
Figur 2.18 Tryck-tidssamband för givare enligt kombination A6 i Tabell 2.3.



Figur 2.19 Tryck-tidssamband för givare enligt kombination B1 i Tabell 2.3. Givare #2 – BA6L fungerade inte.



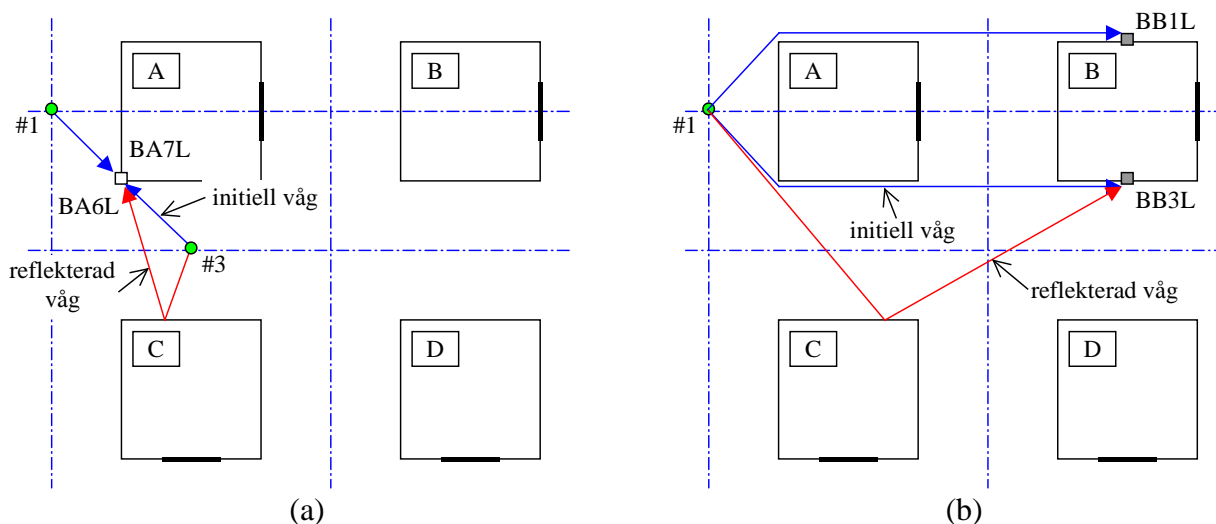
Figur 2.20 Tryck-tidssamband för givare enligt kombination B2 i Tabell 2.3.



Figur 2.21 Tryck-tidssamband för givare enligt kombination B3 i Tabell 2.3.

Vid jämförelse av tryckresultaten bör det noteras att omgivningens randvillkor för de jämförda kombinationerna inledningsvis är identiska och att det därmed är möjligt att inledningsvis göra en direkt jämförelse av tryck-tidssambanden. Efter en kort tid avviker dock tryckkurvorna från varandra, vilket kan förklaras med att den frisläppta energin reflekterats mot omgivningen och ger upphov till en komplicerad serie av interagerande stötvågor.

Ovanstående fenomen framgår tydligt av kombination A4 och A6 i Figur 2.16 respektive Figur 2.18. I bägge kombinationerna sammanfaller det initiala tryck-tidssambandet mycket väl med varandra för att vid omkring 8 ms (A4) respektive 21 ms avvika från varandra. I kombination A4 beror avvikelserna på att det för laddning i läge #3 inom kort uppstår en reflekterande stötvåg från byggnad C som ger ett nytt tryckutslag. För kombination A6 fås avvikelserna av motsvarande anledning när den reflekterande stötvågen från byggnad C når givare BB3L, se Figur 2.22.



Figur 2.22 Schematisk skiss av stötvågornas väg till studerade givare för (a) kombination A4 och (b) kombination A6, se Figur 2.16 respektive Figur 2.18.

3 Analyser i Autodyn

3.1 Modellering

3.1.1 Orientering

Här utförda explosionsanalyserna har gjorts i det generella finita elementprogrammet Autodyn, Century Dynamics (2004). Autodyn är en så kallad 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 så kallad 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 samt interaktion med stela ytor 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 (PETN) och luft.

Samtliga analyser genomfördes innan försöken utfördes vilket innebär att försöksresultaten kan användas för att validera hur väl Autodyn lyckas fånga stötvågens utbredning och magnitud i en komplex omgivning motsvarande den i en bebyggelse.

3.1.2 Laddning

3.1.2.1 PETN i Autodyn

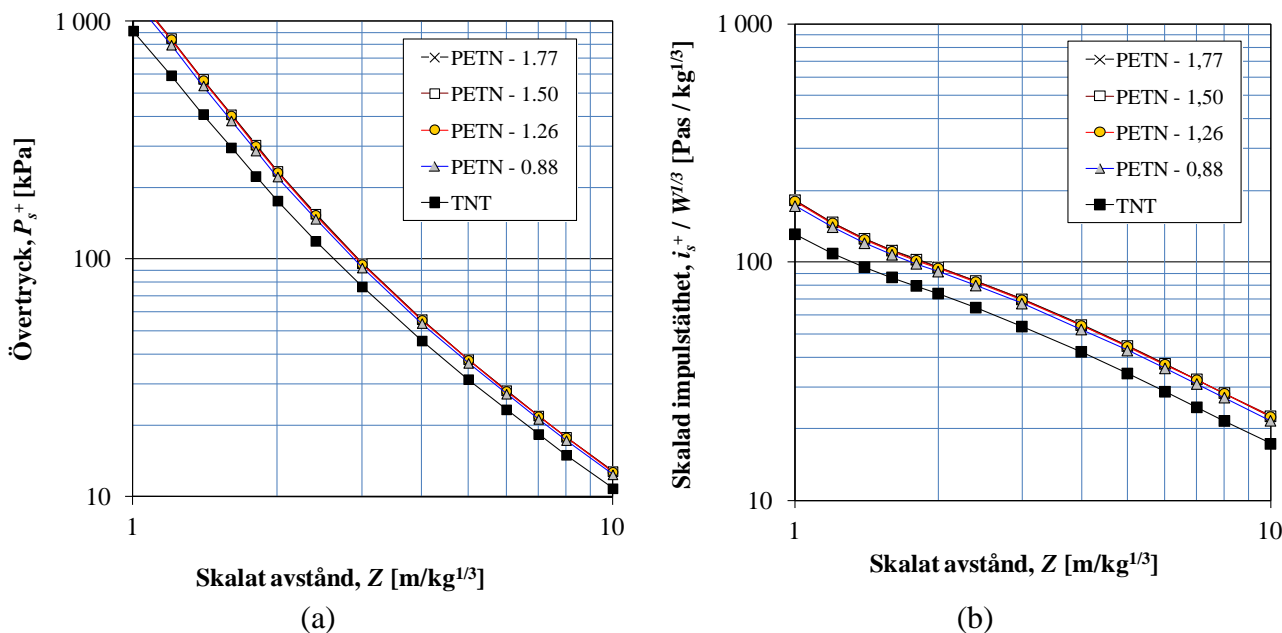
I Autodyn finns ett antal olika fördefinierade materialval för sprängämnet PETN. Det som skiljer sig mellan dessa är framförallt sprängämnets densitet, vilka anges som

- $\rho = 0,88 \text{ kg/m}^3$
- $\rho = 1,26 \text{ kg/m}^3$
- $\rho = 1,50 \text{ kg/m}^3$
- $\rho = 1,77 \text{ kg/m}^3$

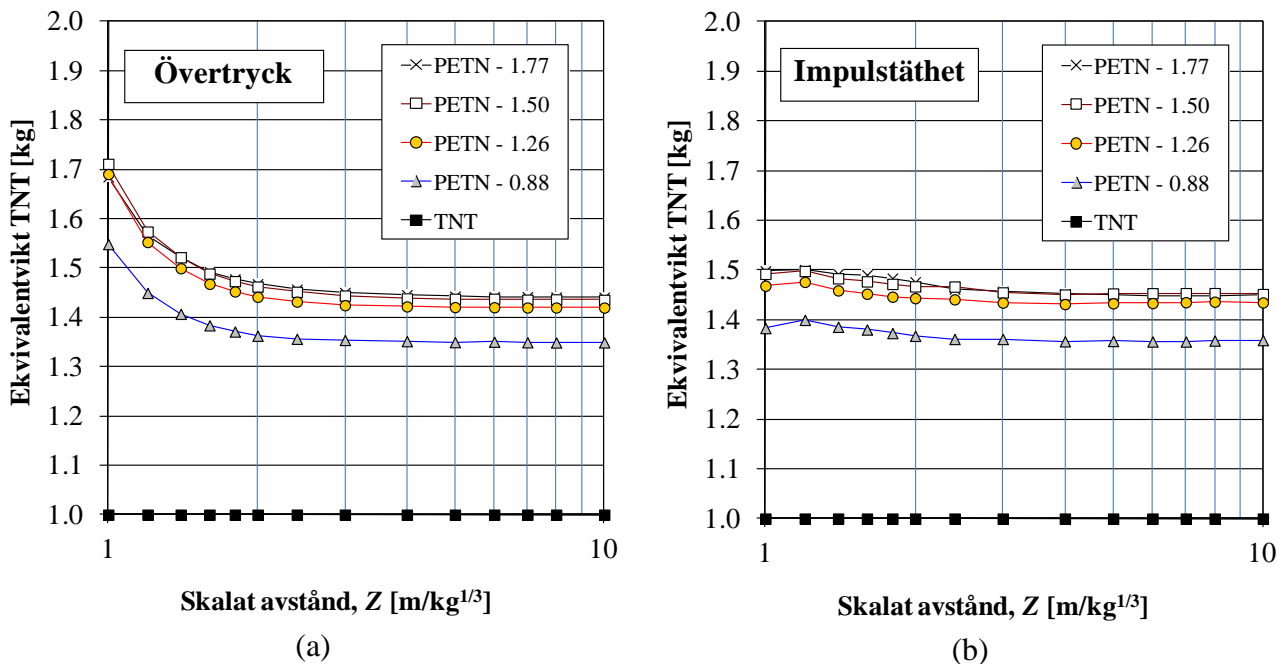
Vad detta innebär för resulterande tryck och impulstätheter var dock oklart när analyserna skulle genomföras varför kompletterande analyser, simulerande fri sfärisk avlastning vid detonerad PETN, utfördes. Tryck och skalad impulstäthet för dessa jämförs med de för TNT som funktion av skalat avstånd Z i Figur 3.1, där värdena för TNT är hämtade från Johansson och Laine (2012). Från detta samband kan sedan en ekvivalentvikt TNT tas fram för PETN, vilket redovisas i Figur 3.2.

Denna jämförelse visar att skillnaden i tryck och impulstäthet blir ungefär konstant för skalat avstånd $Z \geq 2 \text{ m/kg}^{1/3}$. Detta samt motsvarande ekvivalenta vikt listas i Tabell 3.1. Av detta framgår att PETN i Autodyn med densitet 1,50 eller 1,77 kg/m^3 nästan ger identiska resultat. Det kan även konstateras att den ekvivalenta vikten blir i princip densamma för tryck och impulstäthet, något som skiljer sig mot vad som anges i avsnitt 2.2 där $\eta_P = 1,42$ och $\eta_I = 1,00$. Den ekvivalenta vikten för

tryck stämmer således bra med vad som anges i ConWep men inte för impulstätheten. Anledningen till denna avvikelse är oklar och behandlas inte mer ingående här. Det kan dock påpekas att det i Johansson och Laine (2012) tidigare konstaterats att ConWep ger omkring 20 % högre impulstäthet än Autodyn för TNT samt att detta förmodligen beror på en felaktig utvärdering för värdena som används i ConWep. En del av skillnaden i η_I kan således eventuellt förklaras med att dessa felaktiga impulsvärden även legat till grund för $\eta_I = 1,00$ i ConWep.



Figur 3.1 Samband mellan (a) övertryck och (b) skalad impulstäthet och skalat avstånd Z i Autodyn vid fri sfärisk avlastning för olika typer av sprängämnet PETN samt TNT.



Figur 3.2 Ekvivalentvikt TNT för tryck och impuls som funktion av skalat avstånd Z i Autodyn vid fri sfärisk avlastning för olika typer av sprängämnet PETN samt TNT.

Tabell 3.1 Medelkvot av tryck och impulstäthet för sprängämnet PETN och TNT enligt Figur 3.1 och Figur 3.2 för $2 \leq Z \leq 10 \text{ m/kg}^{1/3}$.

PETN	Kvot PETN / TNT		Ekvivalent vikt	
	Tryck [-]	Impulstäthet [-]	Tryck [-]	Impulstäthet [-]
0,88	1,19	1,25	1,35	1,36
1,26	1,22	1,29	1,42	1,44
1,50	1,23	1,30	1,44	1,46
1,77	1,24	1,30	1,45	1,45

3.1.2.2 Sprängämne i explosionsanalys

För att avgöra vilken typ samt vilken mängd sprängämne som ska användas i Autodyn för att simulera försöken med explosion i gatukorsning behövs en omräkning enligt nedan.

Vi är intresserade av att beräkna densiteten ρ_p hos sprängämnet pentyl, vilket kan tecknas som

$$\rho_p = \frac{m_p}{V_p} \tag{3.1}$$

där m_p och V_p är pentylens massa respektive volym. Massan m_p kan skrivas som

$$m_p = \alpha \cdot M \tag{3.2}$$

där α är viktprocent pentyl i den totala massan M (här används $\alpha = 0,85$). Pentylens volym V_p är

$$V_p = V - V_{mo} \tag{3.3}$$

där V är den totala volymen och V_{mo} är mineraloljans volym. Den totala volymen kan även uttryckas som

$$V = \frac{M}{\rho} \tag{3.4}$$

där ρ är den totala sammansättningens (sprängdegens) densitet, och V_{mo} kan skrivas som

$$V_{mo} = \frac{M - m_p}{\rho_{mo}} \tag{3.5}$$

där ρ_{mo} är mineraloljans densitet.

Med uttrycken i (3.2) till (3.5) insatta i (3.1) kan denna slutligen skrivas om som

$$\rho_p = \frac{\alpha \cdot \rho \cdot \rho_{mo}}{\rho_{mo} - \rho(1 - \alpha)} \quad (3.6)$$

vilket således kan användas för att uppskatta vilken densitet pentyl har.

Enligt avsnitt 2.2 är densiteten ρ för sprängdeg ungefär $1,5 \text{ kg m}^{-3}$. Densitet för aktuell mineralolja är något oklar men borde vara mindre än för vatten. För rapsolja uppgår densiteten till omkring $0,9 \text{ kg/m}^3$ vilket approximativt används här för ρ_{mo} .

Dessa värden insatta i ekvation (3.6) ger slutligen att $\rho_p = 1,7 \text{ kg/m}^3$, vilket är nära det PETN i Autodyn som har $\rho = 1,77 \text{ kg/m}^3$. Det har i avsnitt 3.1.2.1 även konstaterats att skillnaden i tryck och impulstäthet är ungefär densamma oberoende av om PETN med $\rho = 1,50 \text{ kg/m}^3$ eller $\rho = 1,77 \text{ kg/m}^3$ används i Autodyn. Kombinerat ger dessa två observationer att det i simuleringarna av explosion i gatukorsning i Autodyn används sprängämne PETN med $\rho = 1,77 \text{ kg/m}^3$. Mängden sprängämne sattes i analyserna till $0,86 \cdot 0,4 = 0,344 \text{ kg}$ och $0,86 \cdot 1,6 = 1,376 \text{ kg}$ för liten respektive stor laddning (86 % pentyl).

I utförda analyser har luftens egenskaper modellerats som en ideal gas medan explosivämnet modellerats med användandet av tillståndsekvationen Jones-Wilkins-Lee (JWL), se Century Dynamics (2004), med en automatisk omvandling till en tillståndsekvation för ideal gas när explosivämnet har nått en kompression på $-0,95$. I steg 1 och 2, dvs. i de en- och tvådimensionella modellerna, användes en multimateriell eulerlösare (Multi-Material Euler Solver) där den initiella detonationsfasen simulerades med en blandning av explosivämne och luft. I samband med att analysen övergick till en tredimensionell modellering i steg 3 konverterades dock explosivämnet till luft för att möjliggöra användandet av en effektivare lösare via Autodyns "Ideal-Gas-EOS-Only Euler FCT solver". En sammanställning av nyttjade materialdata för luft och sprängämne ges i Tabell 3.2.

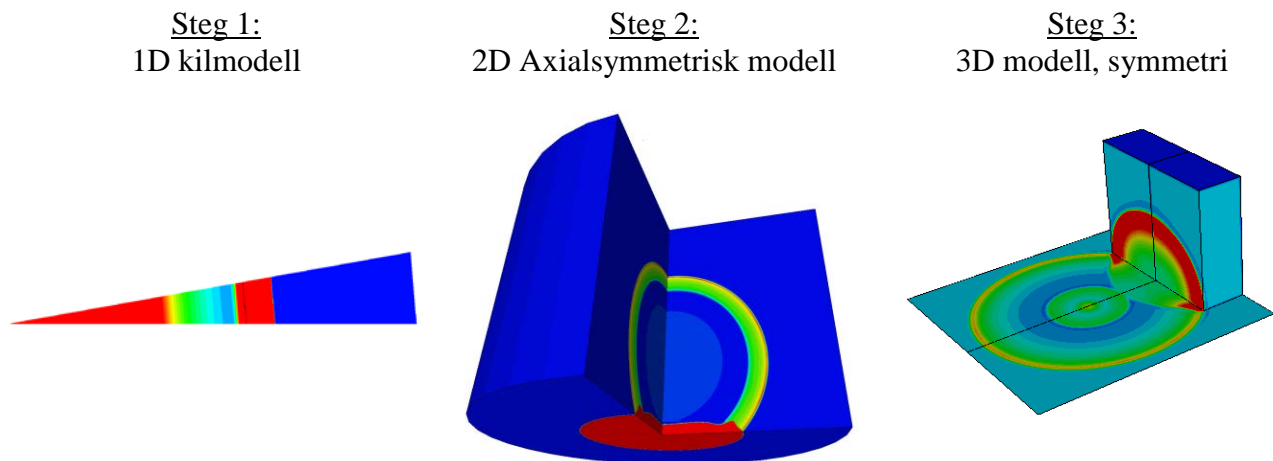
Tabell 3.2 Materialdata för luft och explosivämne PETN 1.77 i Autodyn.

Luft		PETN 1.77	
ρ_0	$1,226 \cdot 10^{-3} \text{ (g/cm}^3\text{)}$	ρ_0	$1,77 \text{ (g/cm}^3\text{)}$
γ	1,4	C-J Detonationshastighet	8 300 (m/s)
P_0	101,3 (kPa)	C-J Energiintensitet	$1,01 \cdot 10^7 \text{ (kJ/m}^3\text{)}$
		C-J Tryck	$3,35 \cdot 10^7 \text{ (kPa)}$

3.1.3 Modelleringsteknik

Varje analys utfördes i flera separata steg där vald modell anpassades att vara så enkel som möjligt via användandet av en kombination av analyser utförda i en- två- eller tre dimensioner, se Figur 3.3. Vidare användes, där så var möjligt, symmetrivillkor för att minska modellens storlek. Den inledande explosionsanalysen, steg 1, utfördes med användande av ett endimensionellt, kilformat

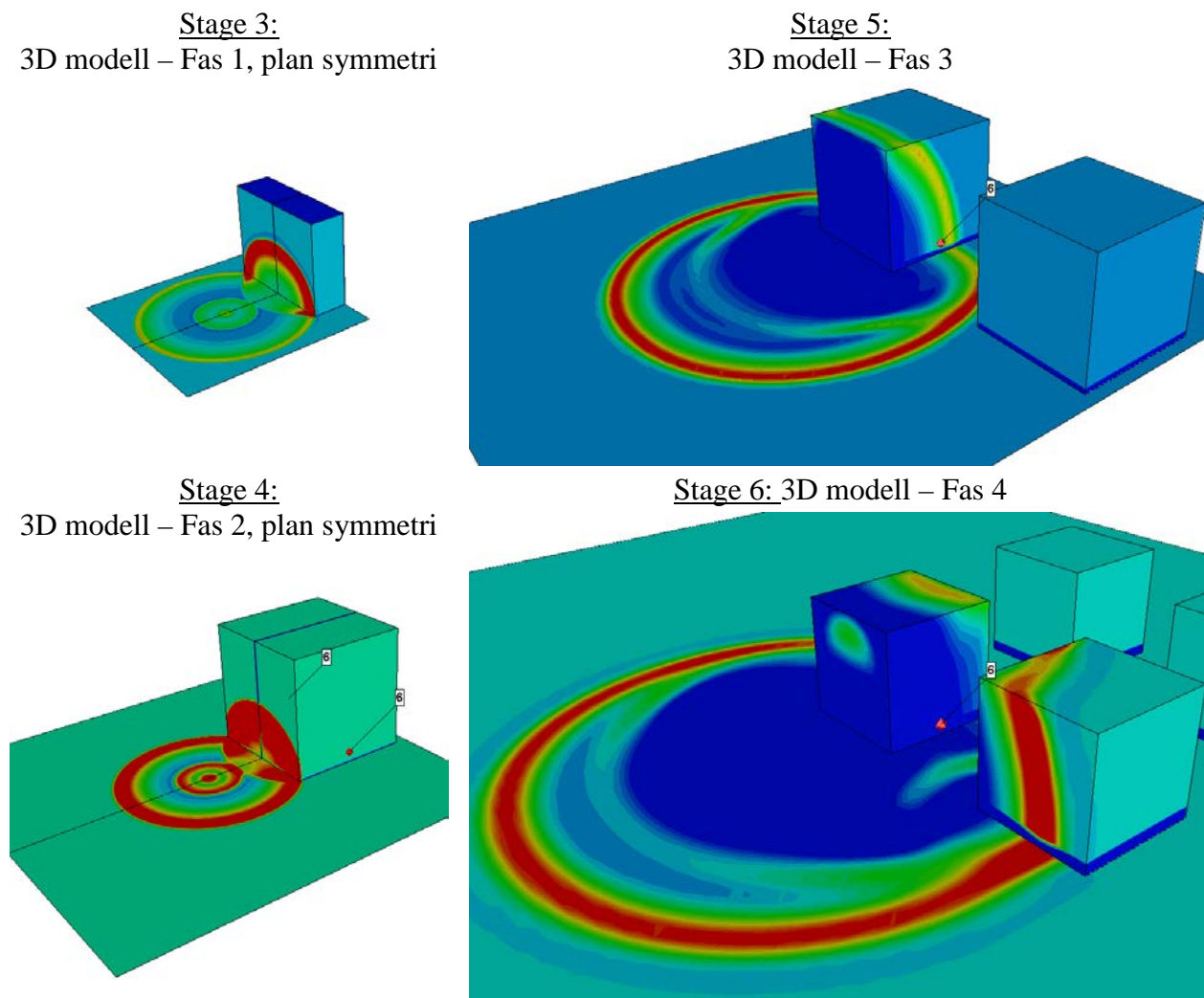
elementnät som simulerar stötvågens sfäriska utbredningen innan den når fram till någon reflekterande yta. Därefter görs en omvandling från endimensionell till tvådimensionell modell (engelska: *remapping*) där en axialsymmetrisk modell, steg 2, nyttjas och reflexionen mot ytor i ett plan kan beaktas. När stötvågens utbredning når så långt att axialsymmetri inte längre är tillräckligt för att beskriva beteendet görs en omvandling till en tredimensionell modell, steg 3.



Figur 3.3 Schematisk bild av uppdelning i olika steg för den numeriska modelleringen i Autodyn.

I den tredimensionella numeriska modellen representeras den fysiska domänen av rektangulära, tredimensionella lådvolymer vilka fylls med kubiska, linjära element. Storleken hos dessa lådvolymer varierar beroende på laddningens läge, möjligheten att använda symmetrirandvillkor samt hur långt stötvågen propagerat i analysen. När stötvågen propagerat till lådvolumens rand utökas volymen på ett sådant sätt att stötvågens utbredning hela tiden innesluts i den modellerade volymen. Aktuella trycknivåer i den befintliga lådvolumen räknas om till den nya, större volymen. En typisk serie i fyra delar av sådana lådvolymer skulle kunna ha en ungefärlig domänvolym på $(2\text{ m})^3$, $(4\text{ m})^3$, $(8\text{ m})^3$ and $(16\text{ m})^3$, se Figur 3.4. Storleken på valt elementnät beror framförallt på i vilket skede analysen befinner sig samt på antalet element som används i modellerat nät. I modelleringen söktes det maximalt tillåtna antalet element – omkring 4,5 miljoner stycken – användas vilket resulterade i en kubisk elementstorlek med en sida på omkring 10 mm i den första fasen (steg 3), jämför figur 3.4. Vid respektive omvandling från en volym till en annan dubblades elementens storlek i alla sina riktningar, dvs. kubiska element med en storlek på omkring 20 mm användes för den efterföljande lådvolumen i steg 4. Betongkassunerna och marken modellerads som stela ytor och i samtliga utan i det sista steget fanns inga behov av randvillkor hos domänens övriga ytor eftersom stötvågsfronten per definition ännu inte nått fram till dessa. I det avslutande steget, med maximal modellerad domänvolym, användes dock ett randvillkor vid de fria ytorna som möjliggjorde ett fritt utflöde av material och tryck.

Varje analys utgjordes av ett flertal steg enligt ovan där nyttjad modell ändrades var eftersom detta blev nödvändigt. Normalt utförs dessa omvandlingssteg manuellt av användaren men det visade sig snart vara en alltför tidsödande metodik och behovet av att automatiskt kunna känna av när en uppdatering av modellens storlek behövde göras blev uppenbar. Därför utvecklades en metodik där Autodyn-länkade Fortranrutiner möjliggjorde identifiering av stötvågfrontens läge. Därmed blev det också möjligt för Autodyn att känna av stötvågfrontens propagering så att en övergång till en utökad modell automatiskt kunde ske innan den nådde fram till en kritisk kant hos betongkassunerna eller domänens yttre randvillkor.

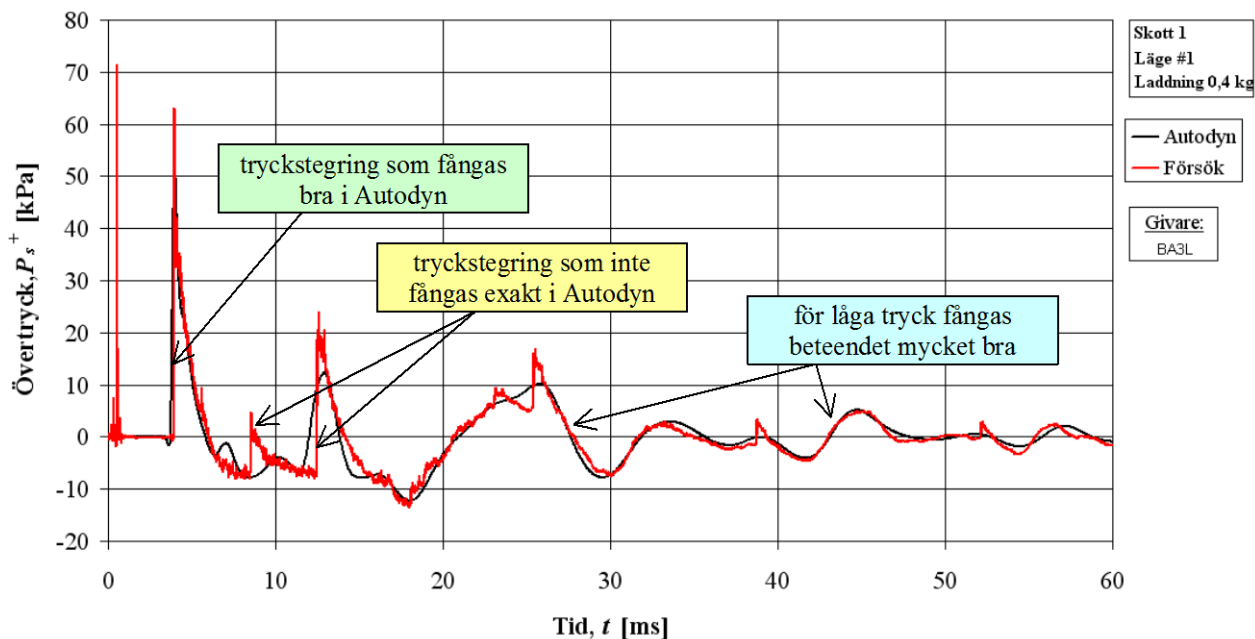


Figur 3.4 Uppdelning i olika steg för den numeriska modelleringen användande en tredimensionell domän i Autodyn. Steg 1 och 2 framgår av Figur 3.3.

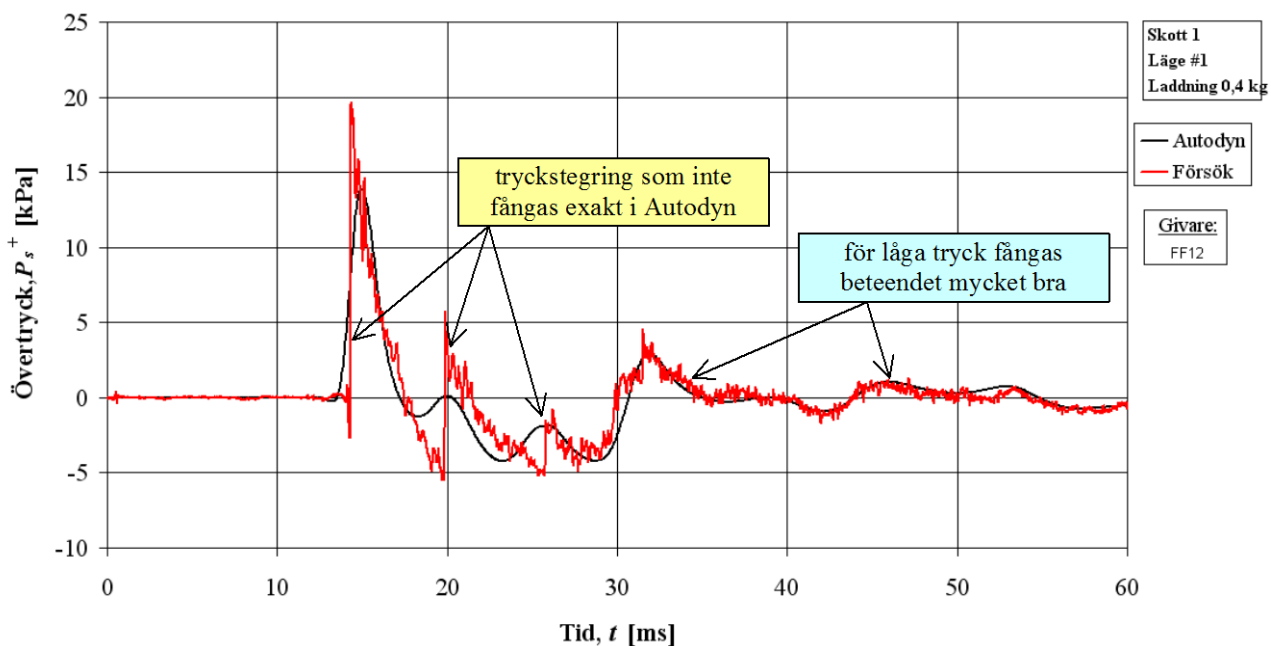
3.2 Resultat

3.2.1 Tryckresultat

I figur 3.5 och 3.6 ges två exempel på överensstämmelsen mellan försöksdata och resultat från Autodyn. Av dessa båda figurer kan det dels konstateras att resulterande tryck-tidssamband visar god överensstämmelse samt att resultaten från Autodyn som förväntat är ”mjukare” än motsvarande data från försöken. Vidare kan noteras att en plötslig tryckstegring fångas väl om den inträffar kort tid efter laddningen detonerat men att avsteg från detta sker ju längre bort i tiden som registreringen sker. En förklaring till detta beteende är att det i analyserna används flera modeller där data överförs mellan samt att nyttjad elementstorlek ökar med att modellen utökas. Detta medför att modellens diskretisering inte är tillräckligt noggrann för att helt korrekt fånga den plötsliga stegring som erhålls när en stötvåg når fram till studerad punkt. Det allmänna beteendet stämmer dock mycket väl varför denna avvikelser är acceptabel. Slutligen kan konstateras att Autodyns förmåga att återge korrekta resultat ökar vid låga tryck.



Figur 3.5 Jämförelse av tryck-tidssamband från försök och Autodyn för 0,4 kg PETN laddning i läge 1 och givare BA3L.



Figur 3.6 Jämförelse av tryck-tidssamband från försök och Autodyn för 0,4 kg PETN laddning i läge 1 och givare FF12.

3.2.2 Jämförelse med försök

3.2.2.1 Stötvågsp parametrar

Tabell 3.4 ger en sammanställning av stötvågsp parametrarna övertryck P^+ , ankomsttid t_a samt positiv och negativ impulstäthet i^+ and i^- erhållna i Autodyn och försök för 0,4 kg laddningar och givare placerade på eller nära marken. Impulstätheterna i^+ och i^- definieras enligt ekvation (3.7) och (3.8) där $t_{end} = 50$ ms. En fullständig sammanställning av alla givare och samtliga laddningar ges i tabellform i bilaga B.

Tabell 3.3 Sammanställning av stötvågsp parametrar P^+ , t_a , i^+ och i^- från Autodyn och försök för givare nära mark. Ett ”-” indikerar att försöksresultatet inte är tillförlitligt.

Givare	Laddning 0,4 kg – läge #1								Laddning 0,4 kg – läge #2							
	Autodyn				Försök				Autodyn				Försök			
	P^+ [kPa]	t_a [ms]	i^+ [Pas]	i^- [Pas]	P^+ [kPa]	t_a [ms]	i^+ [Pas]	i^- [Pas]	P^+ [kPa]	t_a [ms]	i^+ [Pas]	i^- [Pas]	P^+ [kPa]	t_a [ms]	i^+ [Pas]	i^- [Pas]
FF01	656	0.62	143	137	480	0.65	248	-	755	0.61	155	152	859	0.46	240	160
FF02	129	2.42	85	94	168	2.58	57	-	137	2.41	86	98	161	2.22	77	97
FF03	32	7.69	52	50	47	8.14	82	54	33	7.72	50	51	41	7.89	51	41
FF12	14	13.45	35	35	20	14.27	38	35	140	2.36	167	168	111	2.52	150	192
FF13	16	9.89	32	32	18	10.50	28	31	52	7.62	74	72	47	8.03	70	80
BA1L	51	3.71	61	67	-	-	-	-	12	7.94	35	37	11	8.00	33	35
BA2L	7	9.63	49	48	8	10.28	53	49	12	7.94	62	63	12	8.50	60	62
BA3L	51	3.71	113	115	63	3.89	112	110	233	2.82	165	159	271	2.90	190	176
BA4L	2 100	0.63	461	208	1 745	0.63	429	-	233	2.82	127	126	155	2.96	93	116
BA6L	94	1.56	76	148	114	1.68	104	107	470	1.43	206	173	-	-	-	-
BA7L	1 221	1.05	290	211	599	1.02	187	452	470	1.43	192	159	373	1.46	159	134
BB1L	6	15.34	20	22	11	16.76	22	19	4	16.59	21	22	6	17.72	21	21
BB2L	3	22.00	21	20	3	23.35	23	20	4	19.46	15	15	4	20.62	16	15
BB3L	6	15.34	42	44	11	16.63	45	44	24	13.31	59	60	30	14.17	60	61
BB4L	14	13.41	68	70	-	-	-	-	26	11.76	69	63	26	12.23	67	62
Givare	Laddning 0,4 kg – läge #3								Laddning 0,4 kg – läge #4							
	Autodyn				Försök				Autodyn				Försök			
	P^+ [kPa]	t_a [ms]	i^+ [Pas]	i^- [Pas]	P^+ [kPa]	t_a [ms]	i^+ [Pas]	i^- [Pas]	P^+ [kPa]	t_a [ms]	i^+ [Pas]	i^- [Pas]	P^+ [kPa]	t_a [ms]	i^+ [Pas]	i^- [Pas]
FF01	698	0.62	226	184	610	0.61	237	704	755	0.61	177	176	431	0.56	168	210
FF02	136	2.38	140	141	93	2.53	120	220	142	2.38	152	160	119	2.43	141	167
FF03	33	7.74	76	77	45	7.78	71	66	50	7.64	73	71	47	8.02	54	118
FF12	136	2.38	137	141	93	2.63	113	155	25	13.35	42	42	38	13.73	40	41
FF13	34	7.61	114	112	37	8.21	106	102	13	9.28	34	35	14	9.63	35	28
BA1L	8	9.71	52	51	8	9.81	49	47	13	7.99	35	35	12	8.39	32	31
BA2L	52	3.73	113	115	40	3.90	110	116	234	2.83	155	154	110	2.90	126	147
BA3L	2 258	0.63	505	235	2 369	0.47	763	328	234	2.83	154	153	238	3.00	131	191
BA4L	52	3.73	70	73	58	3.81	73	74	13	7.99	35	35	11	8.45	32	31
BA6L	1 272	1.05	325	233	991	1.03	345	238	113	4.66	126	125	113	4.81	118	130
BA7L	103	1.61	70	132	146	1.65	72	174	22	5.48	47	59	34	5.84	52	60
BB1L	8	11.55	34	31	8	12.34	32	27	13	7.99	35	35	12	8.12	33	31
BB2L	5	13.52	33	35	5	13.85	32	33	13	7.99	35	35	12	7.62	37	35
BB3L	51	7.93	115	112	54	8.39	99	98	234	2.83	154	153	143	2.87	124	144
BB4L	77	6.45	131	127	73	6.89	122	118	234	2.83	155	154	124	2.86	127	151

$$i^+ = \sum_{k=1}^n i_k^+ = \sum_{k=1}^n \int_{t_{a,k}}^{t_{end,k}} P^+(t) dt \tag{3.7}$$

$$i^- = \sum_{k=1}^n i_k^- = \sum_{k=1}^n \int_{t_{a,k}}^{t_{end,k}} P^-(t) dt \tag{3.8}$$

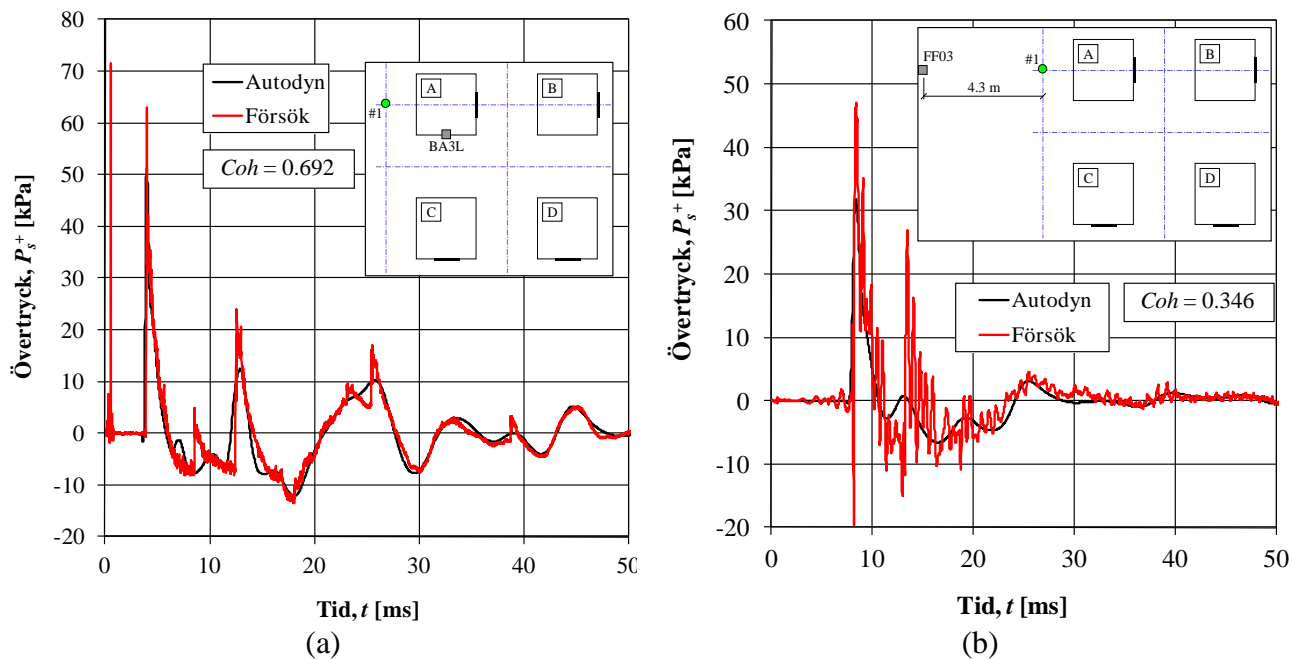
3.2.2.2 Koherensmått *Coh*

För att få en bättre överblick av hur väl resultat från försök och analyser överensstämmer introduceras här ett koherensmått *Coh* (engelska: *coherence*), vilket valts att definieras som

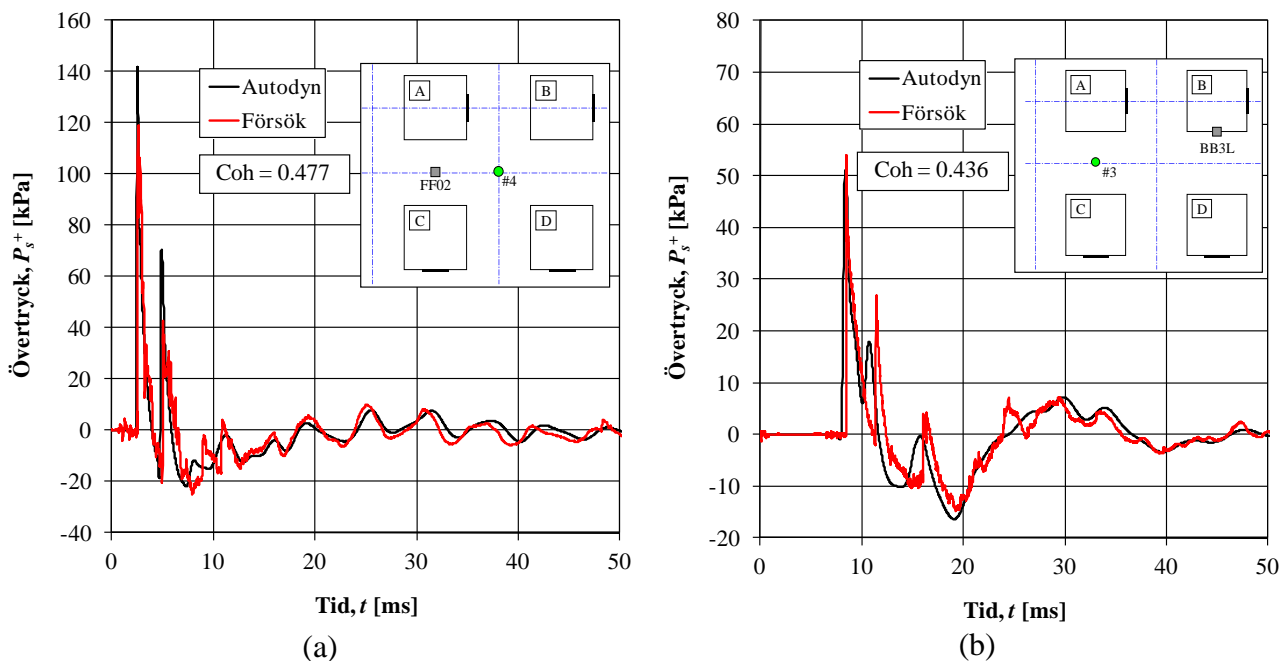
$$Coh = 1 - \frac{\int_0^{t_{end}} |P_{AD}(t) - P_{Exp}(t)| dt}{i_{Exp}^+ + i_{Exp}^-} \tag{3.9}$$

där $P_{AD}(t)$ and $P_{Exp}(t)$ är trycket som funktion av tiden från Autodyn respektive försök medan i_{Exp}^+ and i_{Exp}^- är den totala positiva och negativa impulstätheten enligt ekvation (3.7) respektive (3.8).

Med ett koherensmått enligt detta blir det möjligt att relativt direkt jämföra en stor mängd data från två skilda källor och få ett mått på hur väl de sammanfaller. Med definition enligt ekvation (3.7) innebär $Coh = 1.0$ en perfekt överensstämmelse men av jämförelse i Figur 3.7 och Figur 3.8 framgår att $Coh \geq 0.5$ fortfarande svarar mot en mycket bra överensstämmelse mellan försök och analyser.

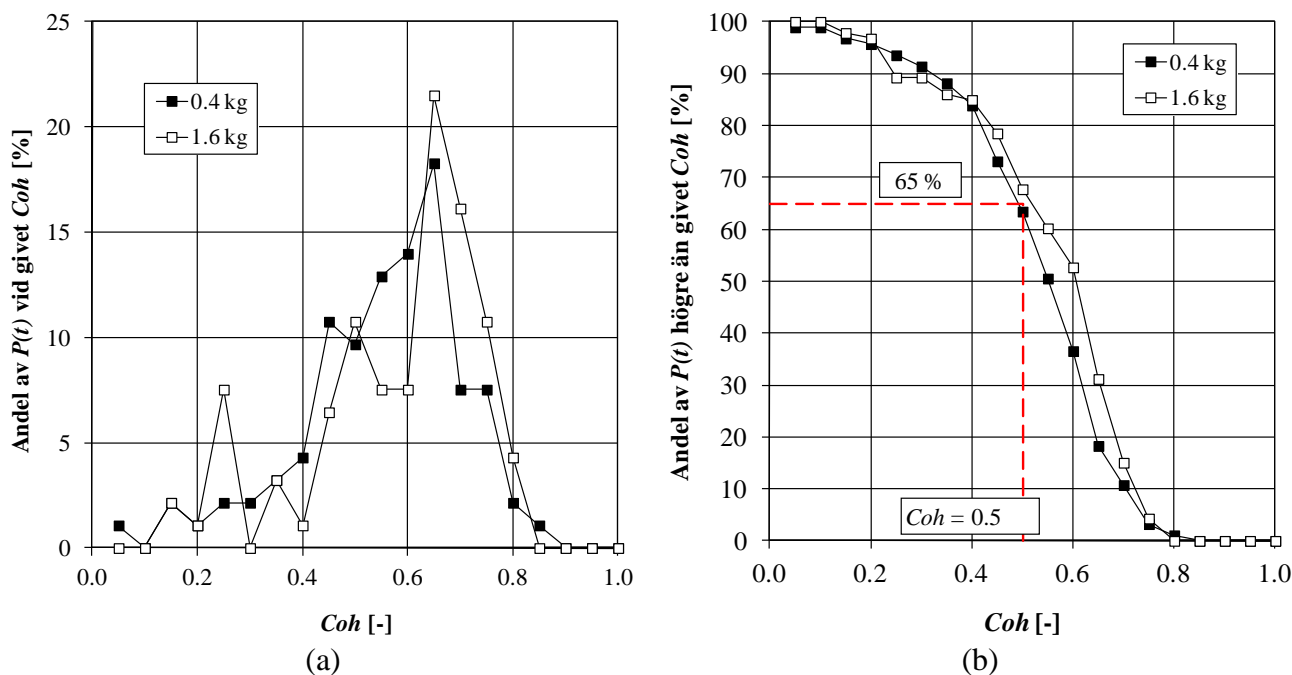


Figur 3.7 Överensstämmelse av resultat från försök och analyser i Autodyn när (a) $Coh \approx 0,70$ respektive (b) $Coh \approx 0,35$.



Figur 3.8 Överensstämmelse av resultat från försök och analyser i Autodyn när $Coh \approx 0,50$. Baserat på detta bedöms $Coh \geq 0,50$ svara mot en mycket god överensstämmelse.

Figur 3.9 sammanställer den procentuella andelen av jämförda resultatserier som uppvisar eller överstiger ett givet värde på Coh medan en fullständig listning för samtliga resultat ges i Tabell 3.3. Av Figur 3.9b framgår att 65 % av samtliga jämförda tryck-tidssamband (knappt 200) resulterar i $Coh \geq 0,05$, dvs. något som utgående från Figur 3.8 bedöms motsvara en mycket god överensstämmelse. Utgående från detta kan det konkluderas att Autodyn lyckas mycket väl med att återskapa de tryck-tidssamband som kan förväntas uppstå vid en explosion i bebyggelse.



Figur 3.9 Koherensmått Coh för 0,4 kg och 1,6 kg laddningar given som (a) andel av givet Coh och (b) andel högre än givet Coh . Tabell 3.4 Sammanställning av

koherensmått Coh för samtliga givare i de åtta skjutningarna. Ett ”-” indikerar att försöksresultatet inte är tillförlitligt.

Skott	#1	#2	#4	#5	#7	#8	#10	#11
Givare	Coh	Coh	Coh	Coh	Coh	Coh	Coh	Coh
FF01	0,006	-	-	0,134	0,142	0,239	0,273	0,245
FF02	0,152	0,120	0,525	0,239	0,207	0,248	0,477	0,614
FF03	0,346	0,515	0,455	0,438	0,545	0,479	0,350	0,425
FF12	0,519	0,649	0,512	0,543	0,118	0,406	0,525	0,609
FF13	0,458	0,515	0,552	0,469	0,556	0,684	0,510	0,647
BA1L	-	0,648	0,675	0,641	0,711	0,767	0,658	0,605
BA2L	0,640	0,651	0,613	0,604	0,571	0,563	0,428	0,529
BA3L	0,692	0,712	0,566	0,475	0,326	0,232	0,382	0,238
BA4L	0,262	0,163	0,398	0,483	0,577	0,464	0,574	0,599
BA6L	0,409	0,670	-	-	0,512	0,382	0,488	0,331
BA7L	0,235	0,244	0,477	0,504	0,412	0,466	0,512	0,567
BB1L	0,634	0,628	0,723	0,756	0,636	0,706	0,607	0,633
BB2L	0,824	0,802	0,696	0,739	0,686	0,723	0,588	0,530
BB3L	0,704	0,703	0,636	0,682	0,436	0,691	0,437	0,475
BB4L	-	0,674	0,586	0,647	0,452	0,543	0,462	0,442
BA1C	0,705	0,640	0,649	0,614	0,640	0,690	0,618	0,674
BA3C	0,642	0,675	0,510	0,327	-	-	-	-
BA4C	0,414	-	0,551	0,493	0,622	0,496	0,589	0,656
BA5R	0,704	0,588	0,572	0,646	0,395	0,468	0,563	0,653
BB1C	0,635	0,649	0,751	0,768	0,671	0,710	0,603	0,681
BB3C	-	0,688	0,517	0,611	0,392	0,710	0,414	0,349
BB4C	0,616	0,620	0,548	0,650	0,420	0,595	0,473	0,427
BB5R	0,642	0,663	0,686	0,692	0,605	0,728	0,519	0,640
BC2C	0,617	0,776	0,499	0,643	0,417	0,579	0,404	0,421
BD2C	0,771	0,795	0,720	0,726	0,719	0,745	0,554	0,571

4 Förenklad analys

4.1 Orientering

I kapitel 3 visas att Autodyn uppvisar mycket god överensstämmelse med utförda försök och därmed utgör ett kraftfullt verktyg för att prediktera resulterande laster från en explosion i bebyggelse. Med bakgrund av detta kan det synas onödigt att även efterfråga förenklade analysverktyg. En nackdel med program som Autodyn är dock att de dels är kostsamma och dels kräver stor kunskap av användaren, vilket medför att det inte alltid är möjligt, eller ens önskvärt, att använda.

Empiriska och semi-empiriska metoder är i regel mer lättanvända och förser även användaren med en basförståelse för olika lastsituationer. Detta ska inte underskattas eftersom det också medför en ökad förståelse för mer komplexa lastsituationer och därmed bidrar till en större förståelse för de fenomen som kan tänkas uppstå i en sådan situation. En sådan djupare förståelse är också nödvändig för att förhindra att avancerade beräkningsprogram som Autodyn inte utvecklas till att fungera som så kallade ”svarta lådor” där förståelsen av vad som händer däri går förlorad. Enklare beräkningsverktyg kan också i flera fall vara fullt tillräckliga för att ge en tillräckligt god bild av resulterande lastnivåer från en komplex explosionsanalys.

Baserat på detta beskrivs i detta kapitel en förenklad, ingenjörsmässig metodik för att bestämma lastbilden från en explosion som inträffar i en komplex geometrisk omgivning. Syftet med denna är främst att ge en övergripande men tillräckligt noggrann bild av det resulterande tryck-tidssamband i en given punkt.

4.2 Beskrivning av metod

Konceptet för här använd metod är att identifiera framfarten hos de stötvågor som kan tänkas påverka studerad punkt, modifiera dessa med hänsyn till diffraktion samt slutligen superponera dem för att få ett slutligt tryck-tidssamband. Konceptet i sig är inte nytt utan förekommer i litteraturen och här beskriven metod är en vidareutveckling av tankar presenterade i von Rosen (2004).

Tryck-tidssambandet $P(t)$ i en given punkt bestäms via en serie av beräkningar som beskrivs i punktform nedan samt illustreras schematiskt i Figur 4.1 och Figur 4.2.

1. Definiera samtliga stötvågsvägar W_i , där $1 \leq i \leq n$, som är av intresse för studerad punkt. Beräkna det totala avståndet R_i för varje väg från centrum laddning till studerad punkt.
2. Utgå från avståndet R_i och bestäm tillsammans med laddningskaraktäristika storleken på följande stötvågsparametrar: ankomsttid t_a , oreflekterat tryck P_s^+ , P_s^- , oreflekterad impulstäthet i_s^+ , i_s^- , varaktighet t^+ och t^- samt avklingningsfaktor α .
3. Beräkna tryck-tidshistorien P_{wi} för respektive stötvågsväg med användande av stötvågsparametrar framtagna i punkt 2 insatta i ekvation (4.1)¹.

¹ Felaktig ekvation har angetts för tryck i den negativa fasen i Johansson *et al.* (2007) i bilaga E, rätt ekvation anges här.

4. Bestäm aktuell diffraktionskoefficient $C_{diff,i}$ för respektive stötvåg W_i och summera produkterna enligt ekvation (4.2).

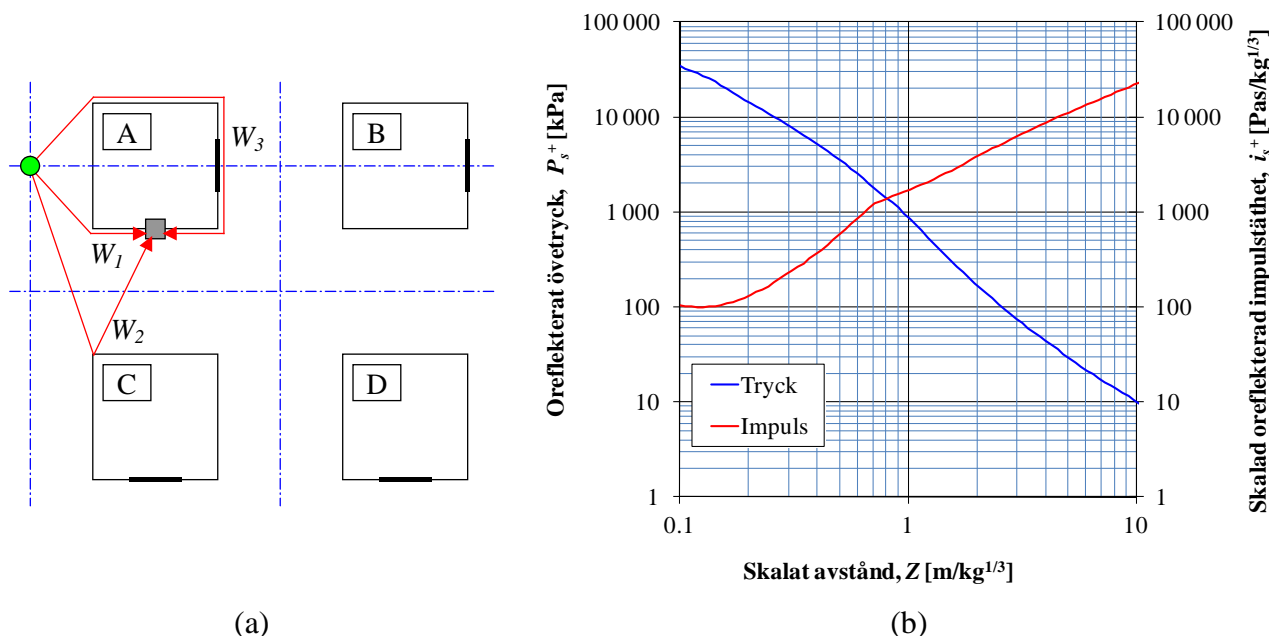
$$P_{w_i}(t) = \begin{cases} 0, & \text{om } t < t_a \\ P_s^+ \left(1 - \frac{t-t_a}{t^+} \right) e^{-\frac{\alpha(t-t_a)}{T^+}}, & \text{om } t_a \leq t < t_a + t^+ \\ -P_s^- \cdot 13.9 \cdot \frac{t-(t_a+t^+)}{t^-} \cdot \left(1 - \frac{t-(t_a+t^+)}{t^-} \right) e^{-\frac{4(t-(t_a+t^+))}{t^-}}, & \text{om } t_a + t^+ \leq t < t_a + t^+ + t^- \\ 0, & \text{om } t \geq t_a + t^+ + t^- \end{cases} \quad (4.1)$$

$$P(t) = \sum_{i=1}^n C_{diff,i} \cdot P_{w_i}(t) \quad (4.2)$$

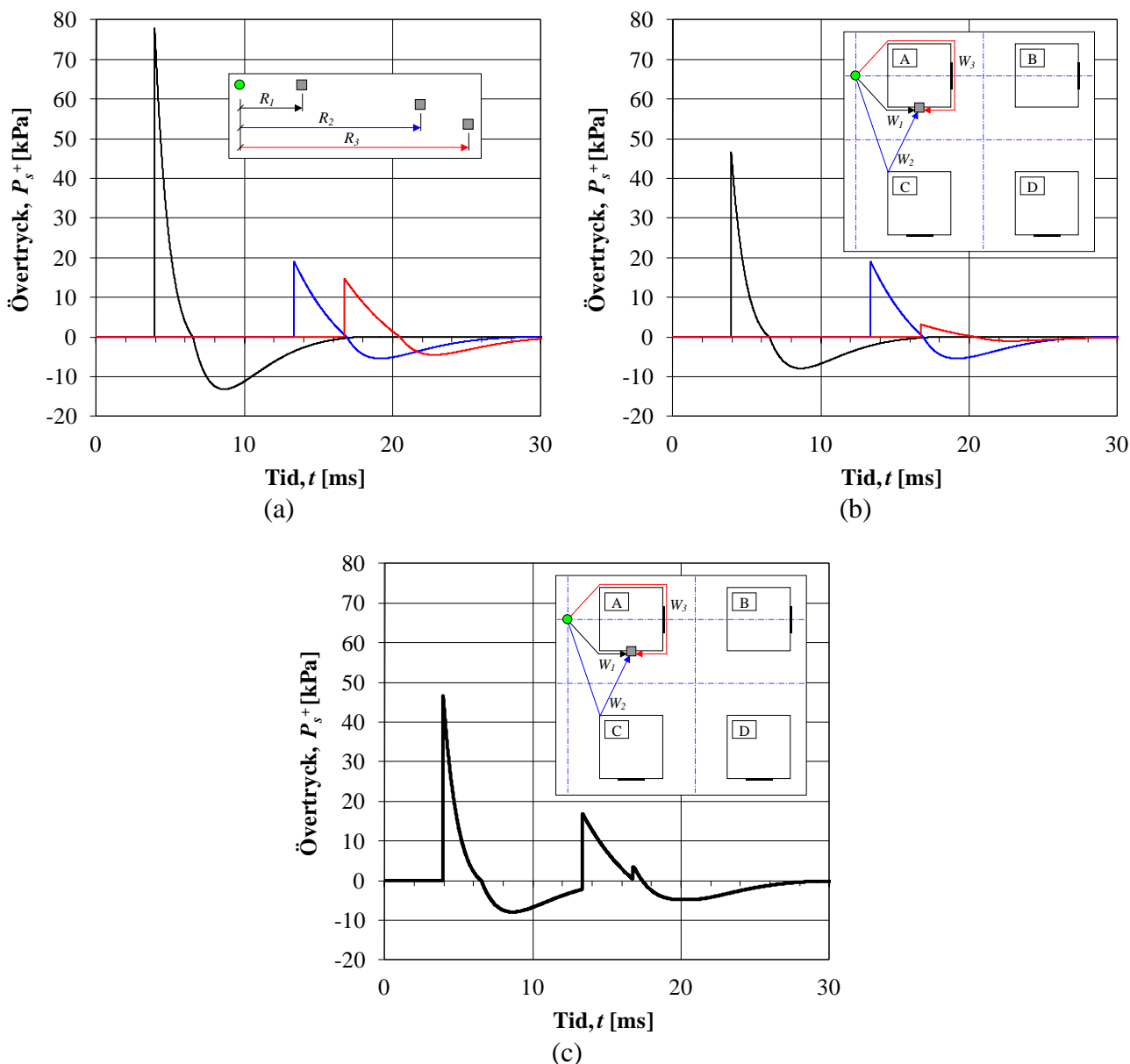
Stötvågsparmetrar i steg 2 kan bestämmas på olika sätt och berörs närmare i bilaga C. I steg 4 görs en reducering av trycket $P_i(t)$ med en diffraktionskoefficient $C_{diff,i}$ för samtliga stötvågor W_i . Vilket värde en sådan reduktionsfaktor ska ha är komplext att bestämma och i detta arbetet har en approximativ och övergripande metod, baserad på här framtagna försöksresultat, använts. Av detta har konstaterats att diffraktionskoefficienten approximativt kan skrivas som

$$C_{diff,i} = 0,6^m \quad (4.3)$$

där m är antal hörn som stötvågen W_i diffrakterar runt, se Johansson *et al.* (2008) i bilaga E.



Figur 4.1 Schematisk bild av metodik för att bestämma tryck-tidssamband för explosion i bebyggelse: (a) identifiera aktuella stötvågsvägar, (b) bestäm stötvågsparmetrar ur empiriska samband, se bilaga C.



Figur 4.2 Schematisk bild av metodik för att bestämma tryck-tidssamband för explosion i bebyggelse: (a) basvärden för tryck-tidssamband enligt ekvation (4.1), (b) tryck-tidssamband reducerade med hänsyn till diffraktion $C_{diff,i}$ och (c) summering av reducerade tryck-tidssamband enligt ekvation (4.2). Det ska poängteras att inverkan av reflekterat tryck och impulstäthet inte har beaktats i här beskriven metod, dvs. nyttjade stötvågskarakteristika har baserats på enbart oreflektade värden². Detta är ett medvetet val och syftar till att förenkla metoden så mycket som möjligt – dess främsta syfte är framförallt att presentera en övergripande lastbild snarare än en fullständigt riktig sådan. Jämförande beräkningar har också påvisat att denna approximation stämmer tämligen väl med observerade tryckvärden. För en närmare illustration och kommentarer av här given metodik hänvisas till Johansson *et al.* (2008) i bilaga E och det beräkningsexempel som visas där.

² I en punkt som utsätts för en direktverkande stötvåg, t.ex. givare BA4L för laddning i läge #1, ska reflexionen beaktas.

5 Slutsatser

I syfte att studera inverkan på explosionslasten i en komplex geometrisk omgivning har en försöksserie i skala 1:5 av explosion i gatukorsning utförts. Två olika laddningsvikter, 0,4 kg och 1,6 kg PETN, placerade i vardera fyra olika positioner användes för att generera stötvågor, vilka registrerades med 25 tryckgivare för varje skott.

Innan försöken genomfördes simulerades explosionerna i det generella finita elementprogrammet Autodyn. Avsikten med detta var att jämföra försöks- och analysresultat för att validera om Autodyn klarar av att tillfredsställande beskriva de tryckpåkänningar som uppstår vid explosion i bebyggelse. Analyser i Autodyn genomfördes med en stegvis utbyggd modell vilken ökade i omfång var eftersom det var nödvändigt med hänsyn till den av explosionen skapade stötvågens utbredning. För att underlätta denna process utvecklades en Fortranstyrd subrutin i Autodyn som kände av behovet av en volymökning i modellen, något som möjliggjorde en helt automatiserad analysgång.

I jämförelsen mellan försök och analyser introduceras ett koherensmått *Coh* med vilket det är möjligt att enkelt jämföra en stor mängd data från två källor. Baserat på detta visas det att överensstämmelsen mellan försök- och analysresultat är mycket god. Således konstateras det att Autodyn är ett kraftfullt verktyg som med framgång kan användas för att simulera vad som händer i en explosion i bebyggelse.

Slutligen beskrivs en förenklad beräkningsmetod med vilken det är möjligt att via beräkningar i Excel snabbt få en grov men ändå acceptabel uppfattning om vilken trycklast som verkar i en given punkt vid en explosion i en komplex geometrisk omgivning. Observerade lastvärden skiljer sig med omkring 20 % mot vad som observerats i försök vilket betraktas vara en tillräckligt god noggrannhet i sammanhanget.

6 Referenser

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

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

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.

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

Johansson M., Larsen O.P., Laine L. (2007): Explosion at an intersection in an Urban Environment – Experiments and analyses. Proceedings of the 78th Shock and Vibration Symposium, Philadelphia, PA, USA.

Johansson M., Larsen O.P., Laine L. (2008): Experiments and Analyses of Explosion at an Intersection. Proceedings of 20th Symposium on the Military Aspects of Blast and Shock, Oslo, Norge.

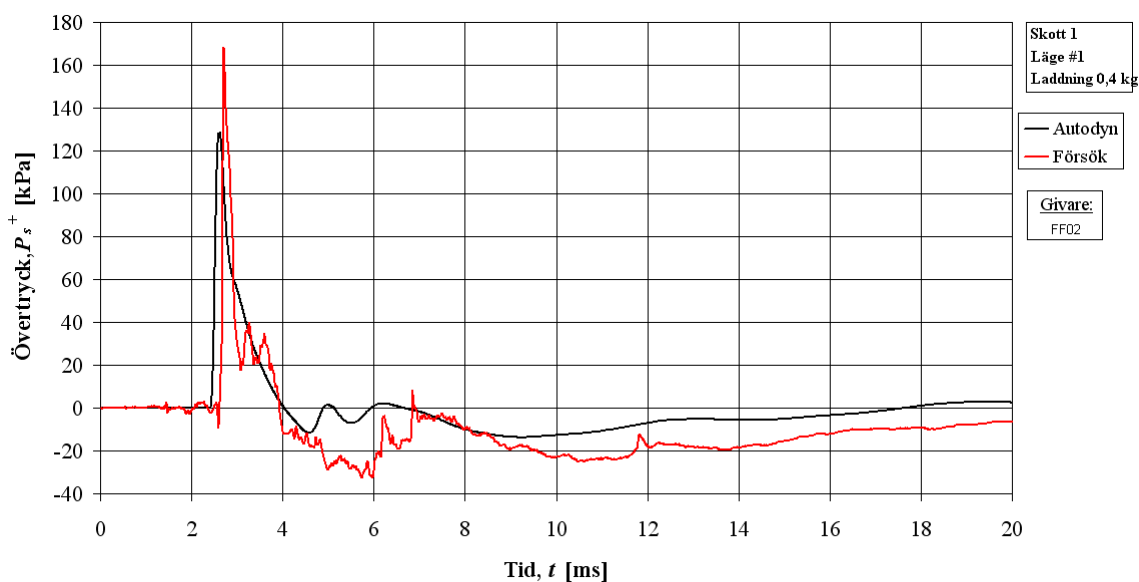
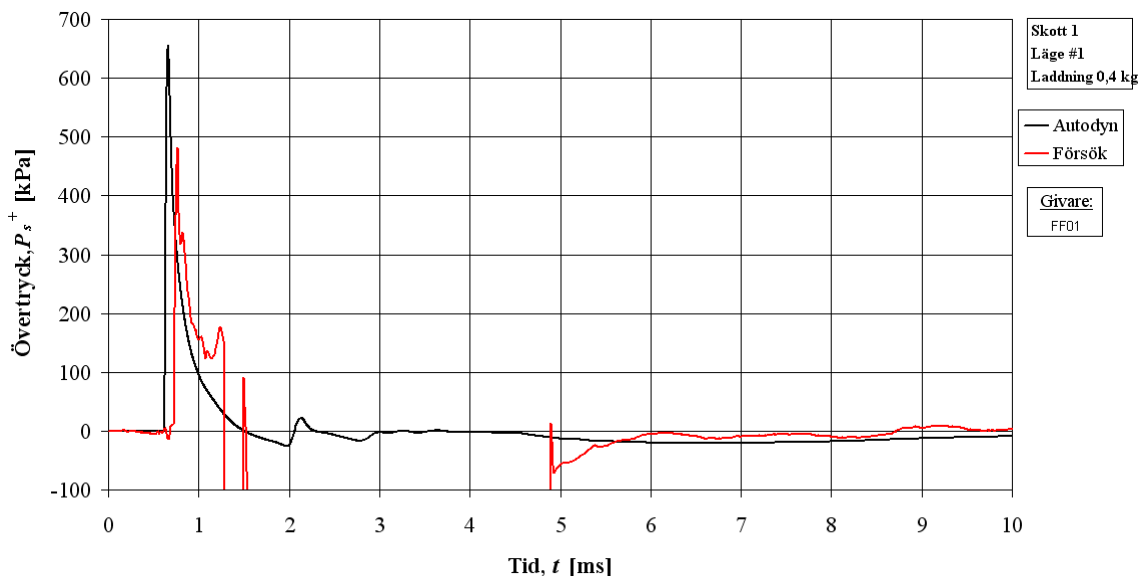
von Rosen B., Guilbeault E., Contesabile E. (2004): A preliminary investigation into the interaction of shock waves behind a simple rectangular structure. Proceedings of 18th Symposium on the Military Aspects of Blast and Shock, Bad Reichenhall, Tyskland.

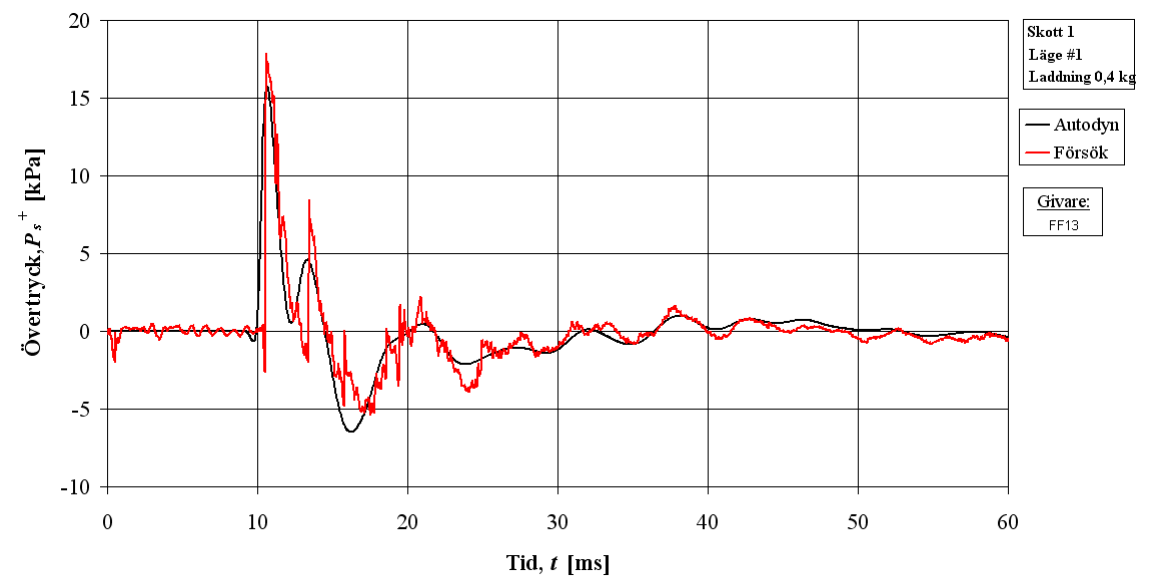
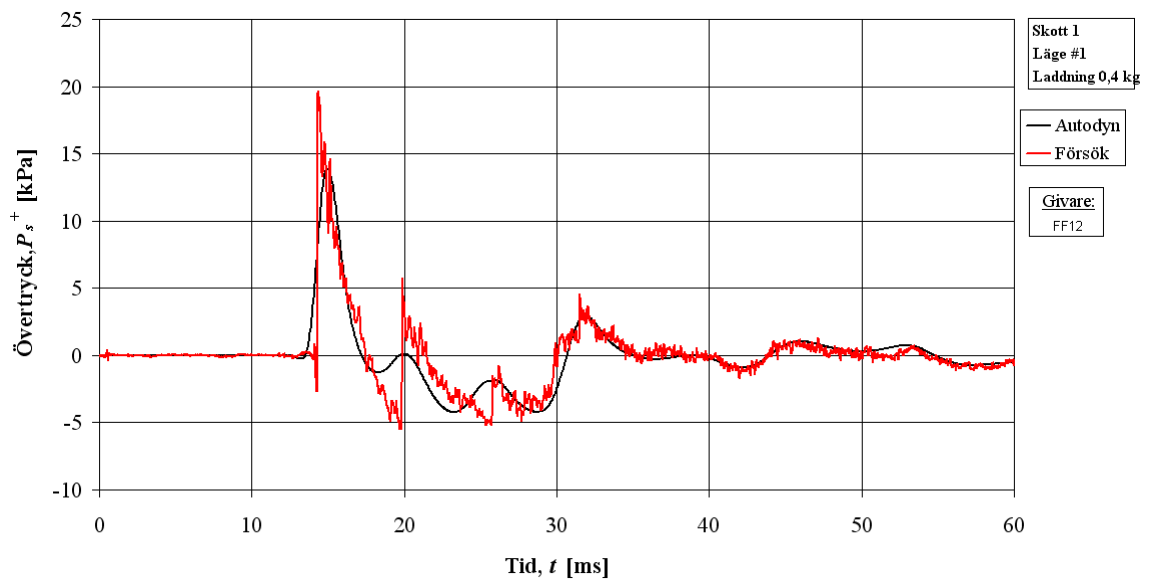
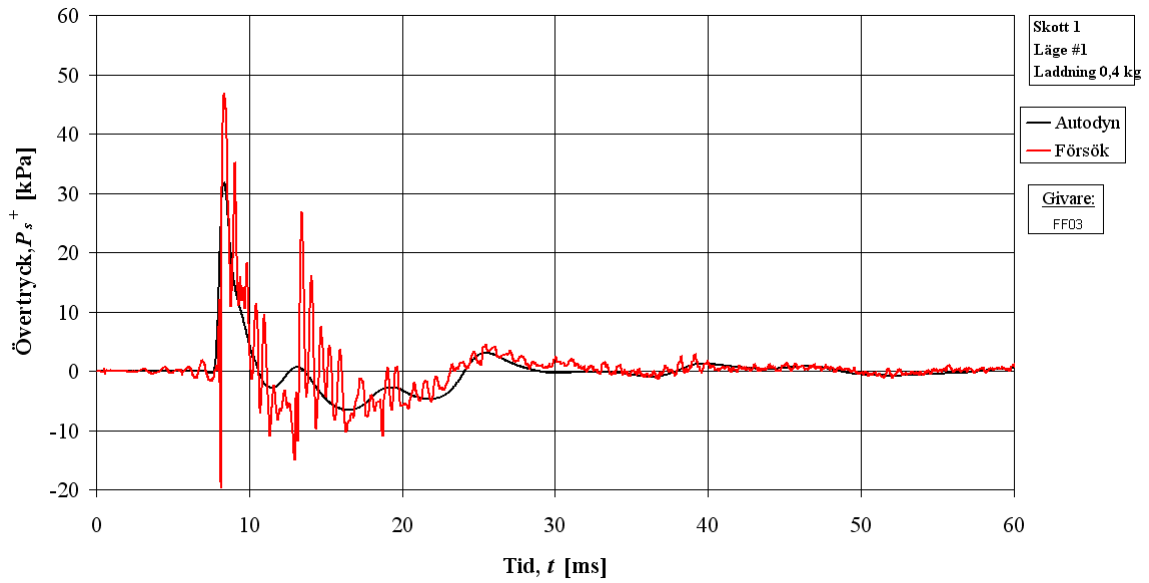
PSADs (1998): Protective Structures Automated Design System (PSADs), Version 1.0, ATTN: CEMP-ET 20, Departments of Special Weapons Agency (DSWA), Army, Navy, and Air Force, U.S. Army Corps of Engineers, USA.

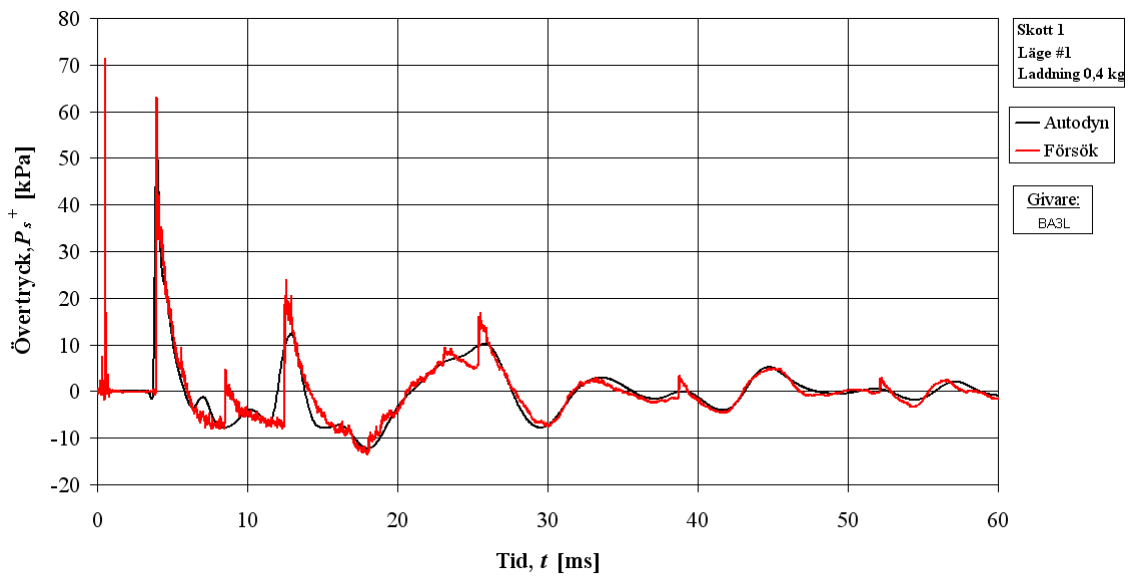
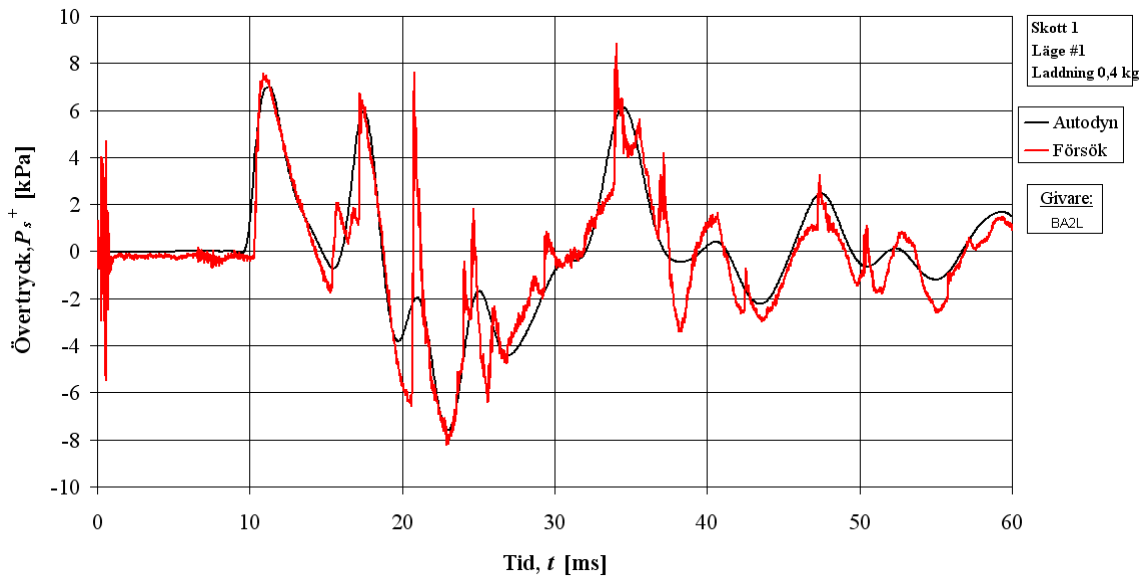
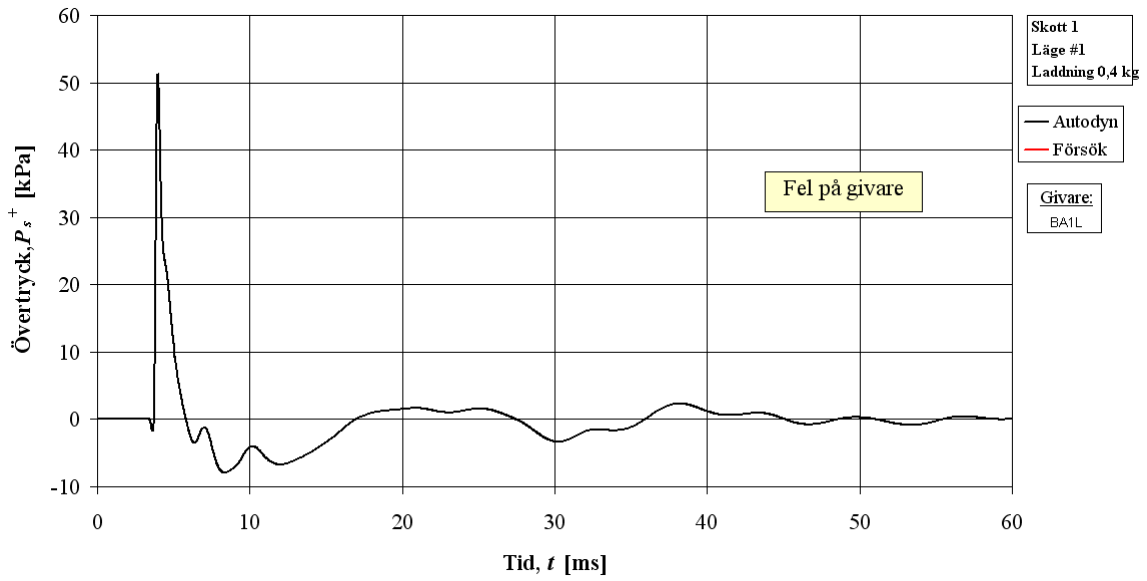
Bilaga A Jämförelse av tryck-tidssamband mellan försök och analys i Autodyn

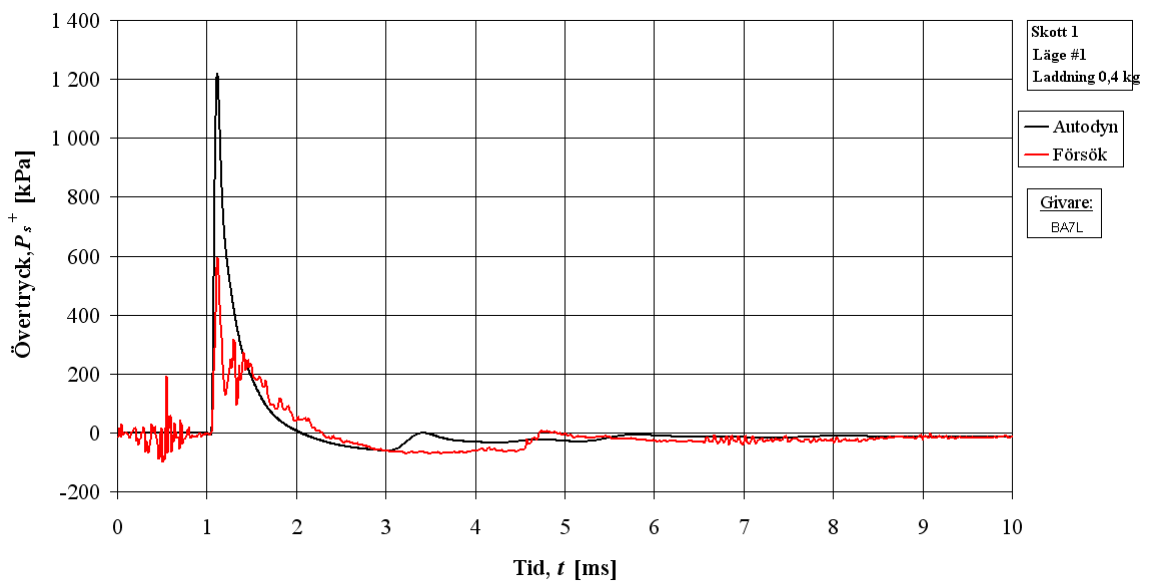
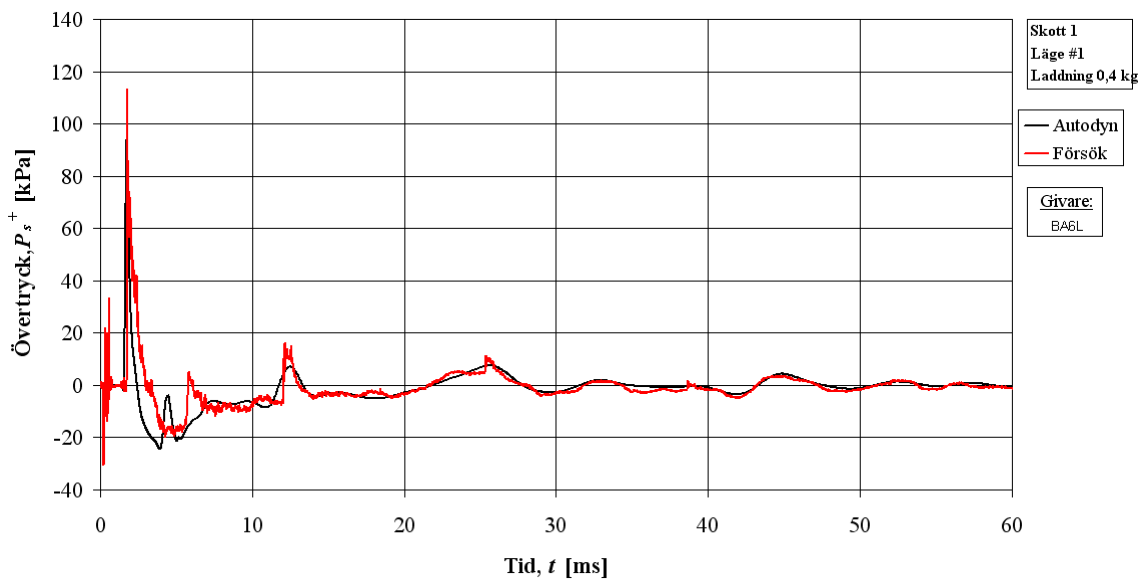
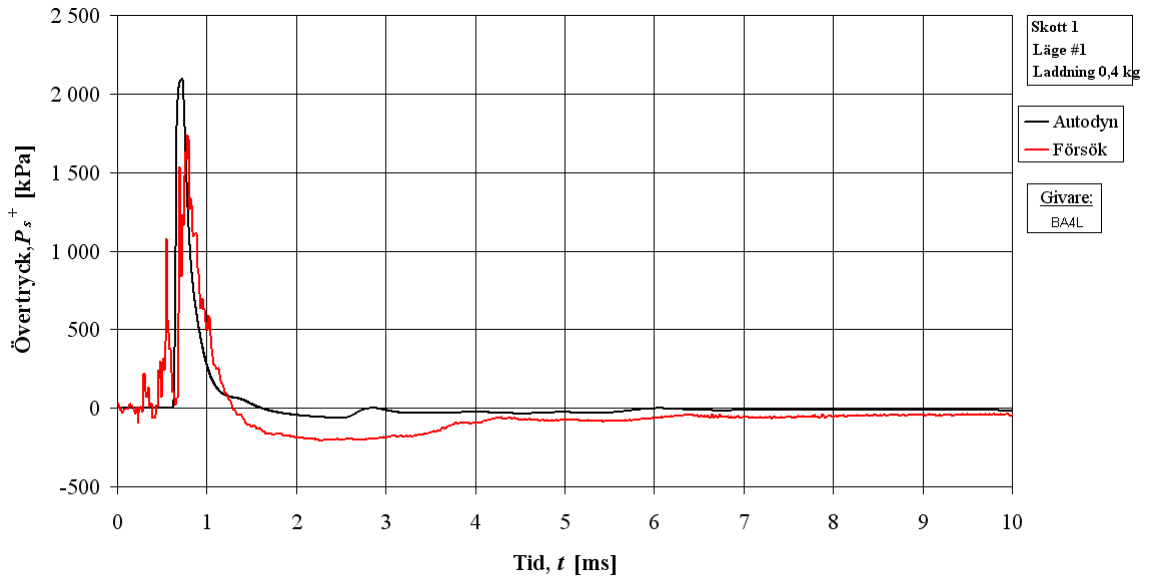
A.1 Skott #1 – 0,4 kg, läge 1

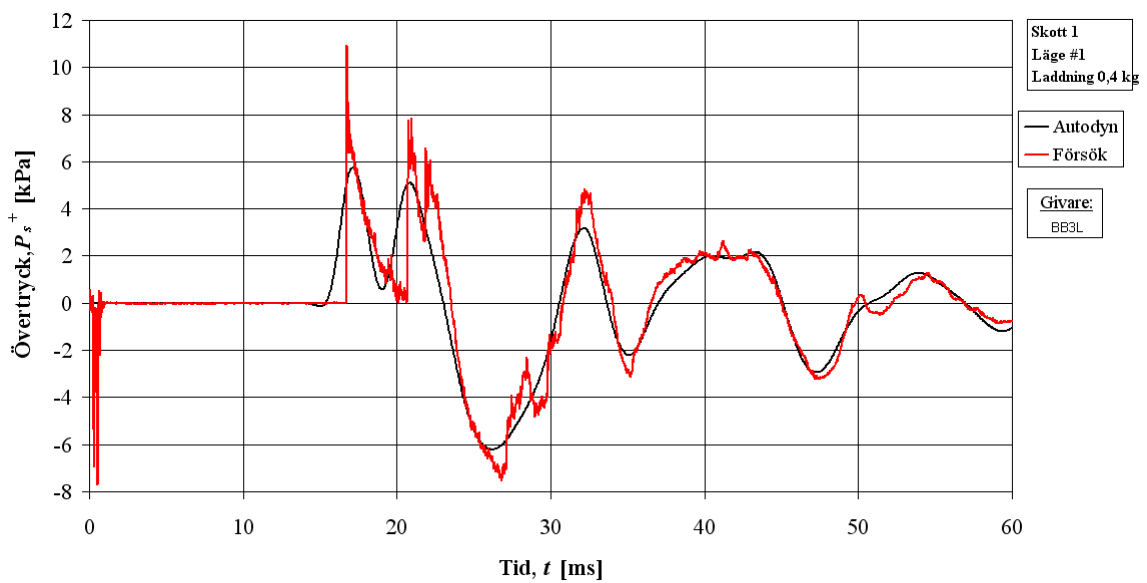
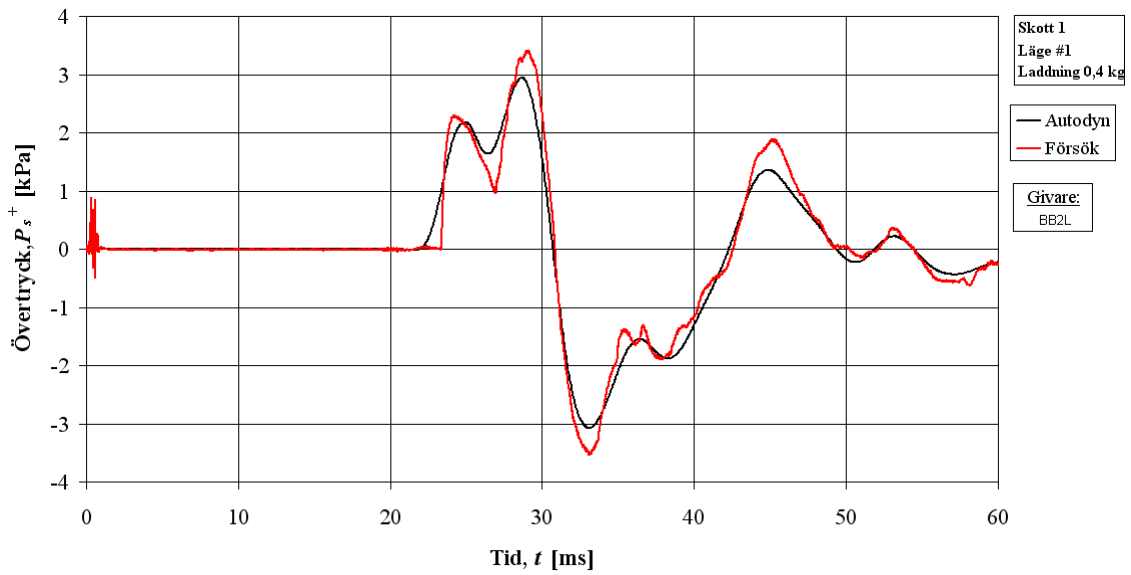
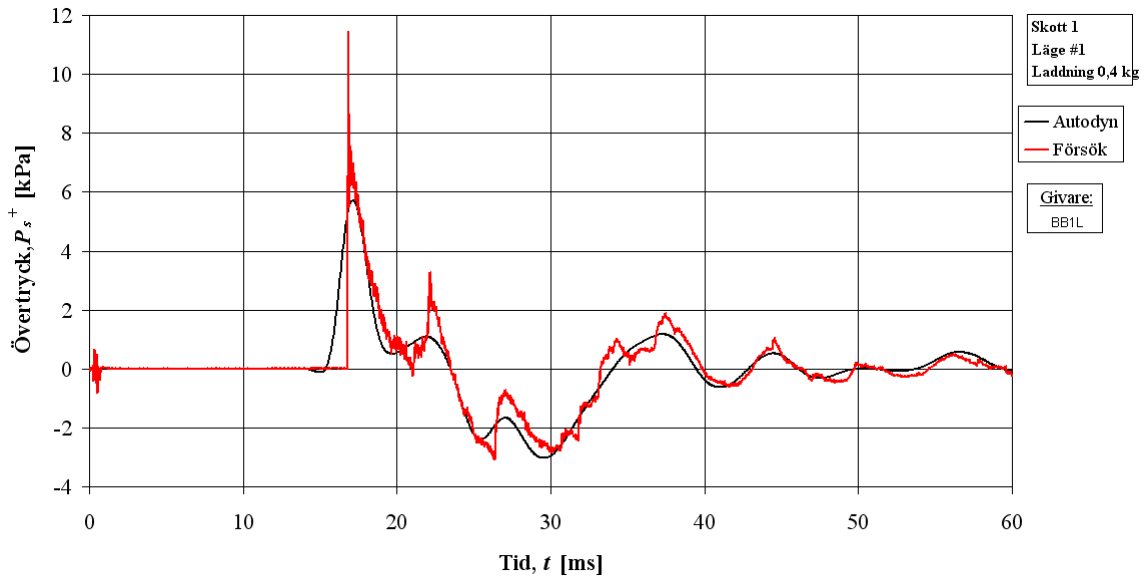
I nedanstående figurer visas tryck-tidskurvor från försök samt motsvarande analys i Autodyn för skott #1 – 0,4 kg PETN i läge 1. För laddningens samt givarnas position se kapitel 2. I vissa fall har tryckgivaren i försöket inte fungerat tillfredsställande och detta markeras då i aktuell figur.

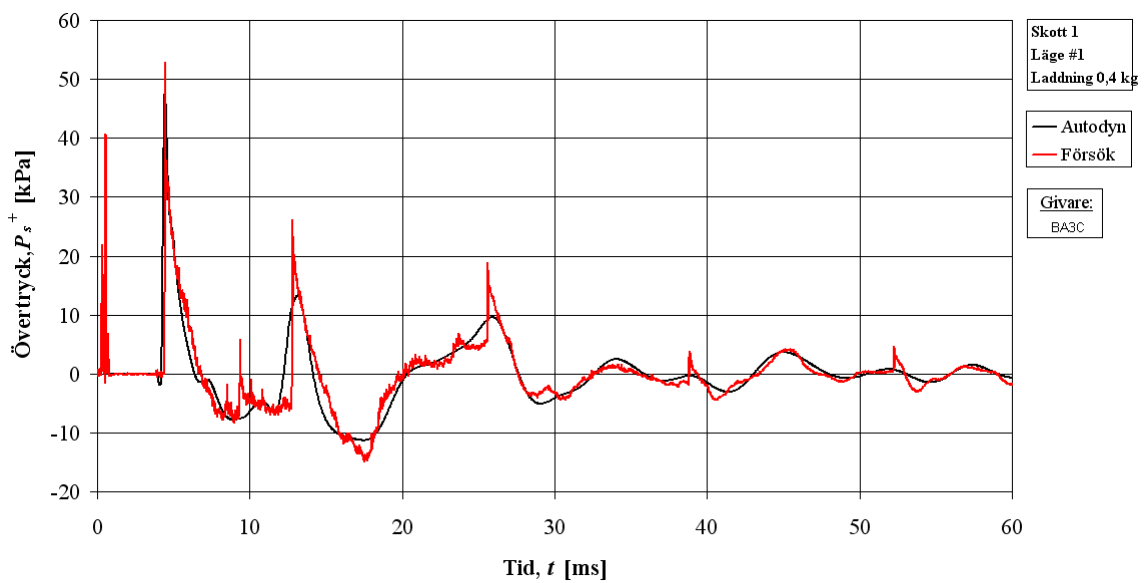
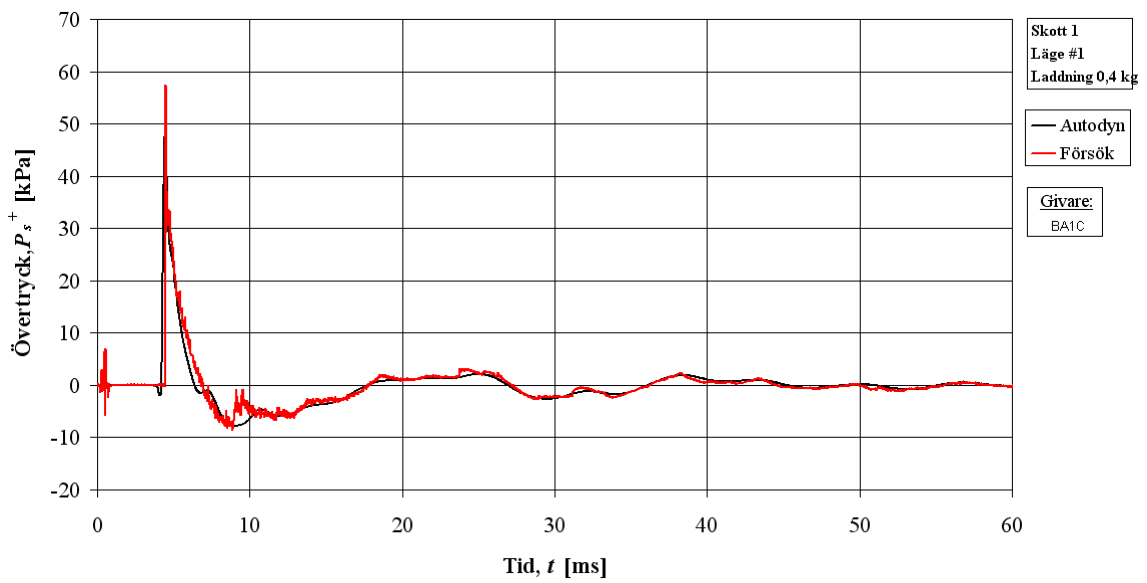
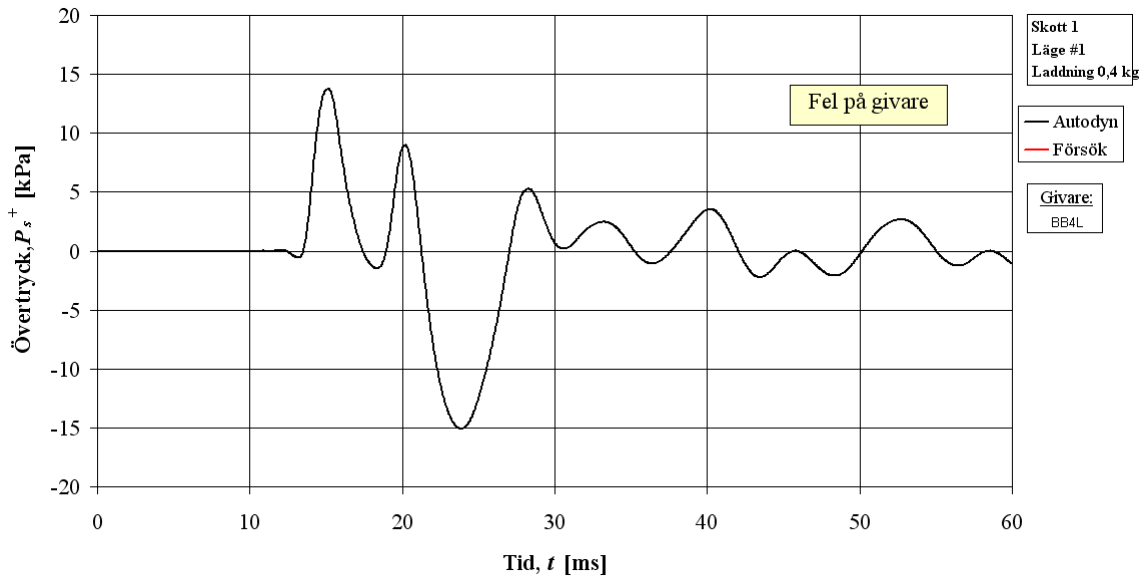


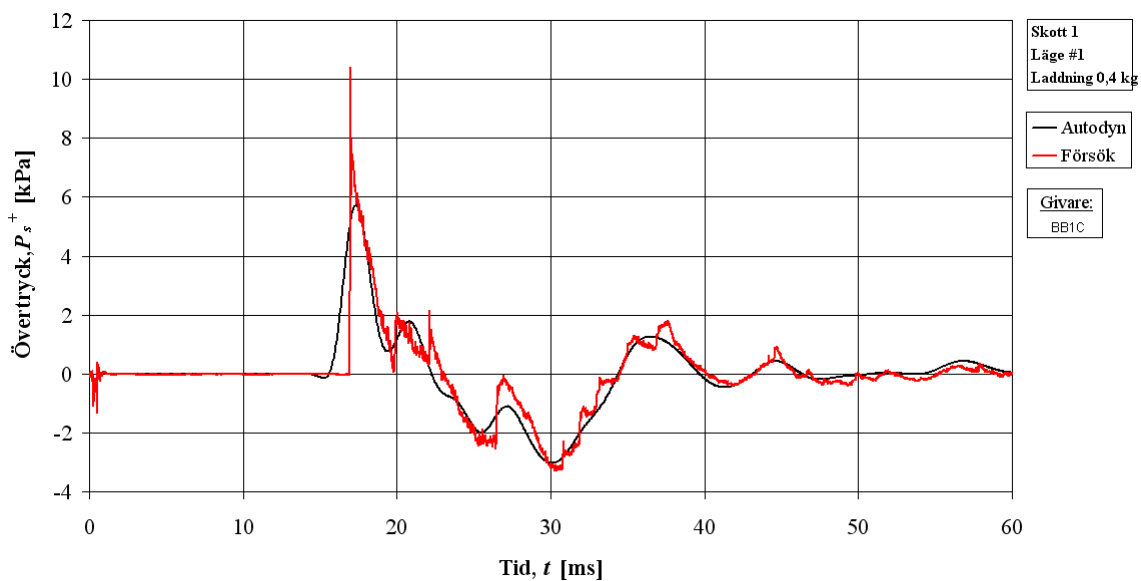
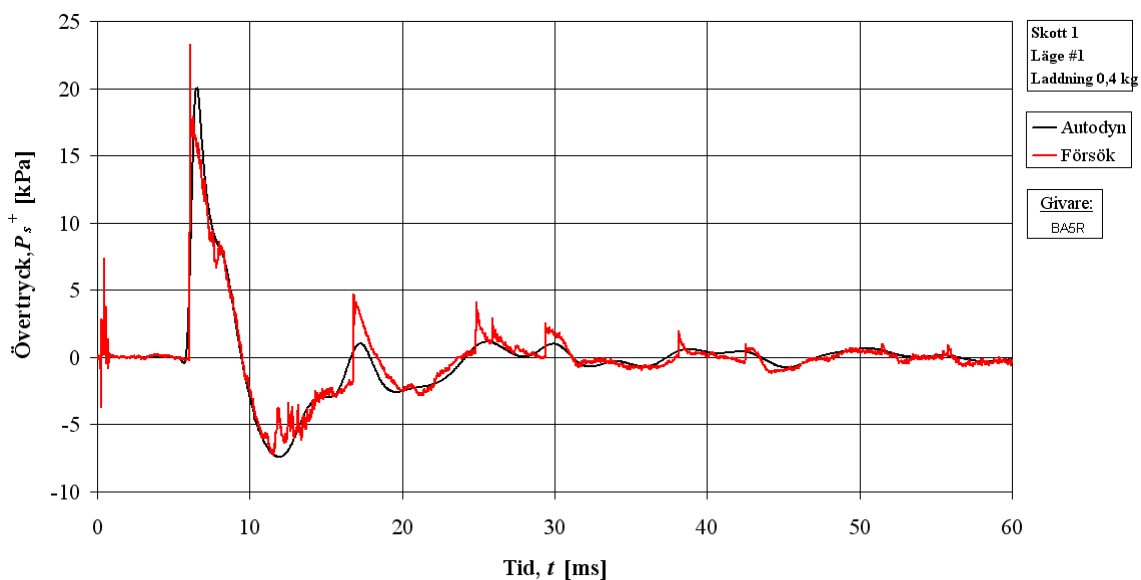
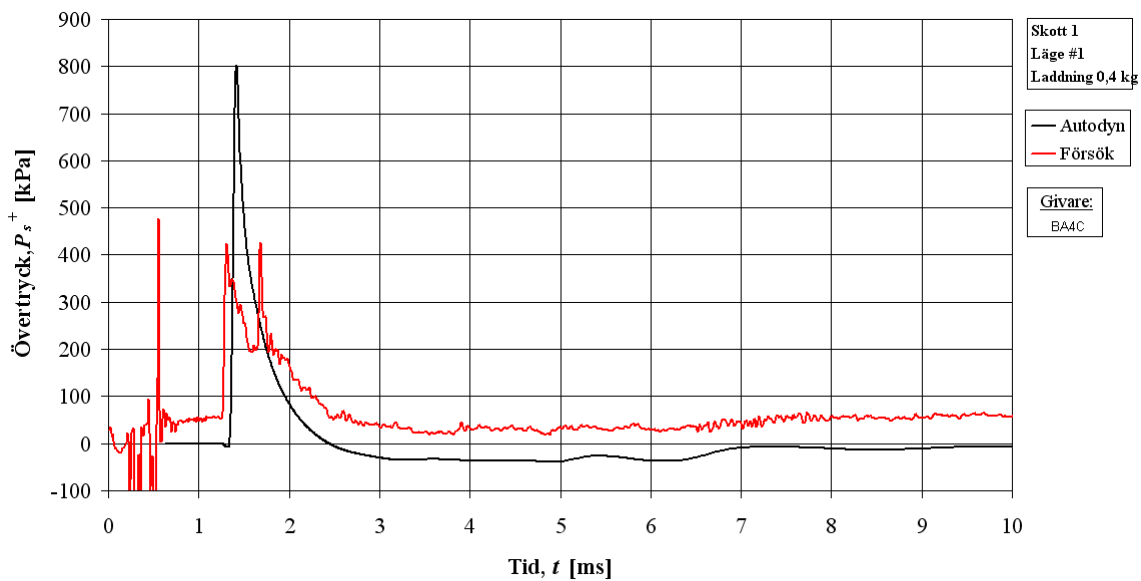


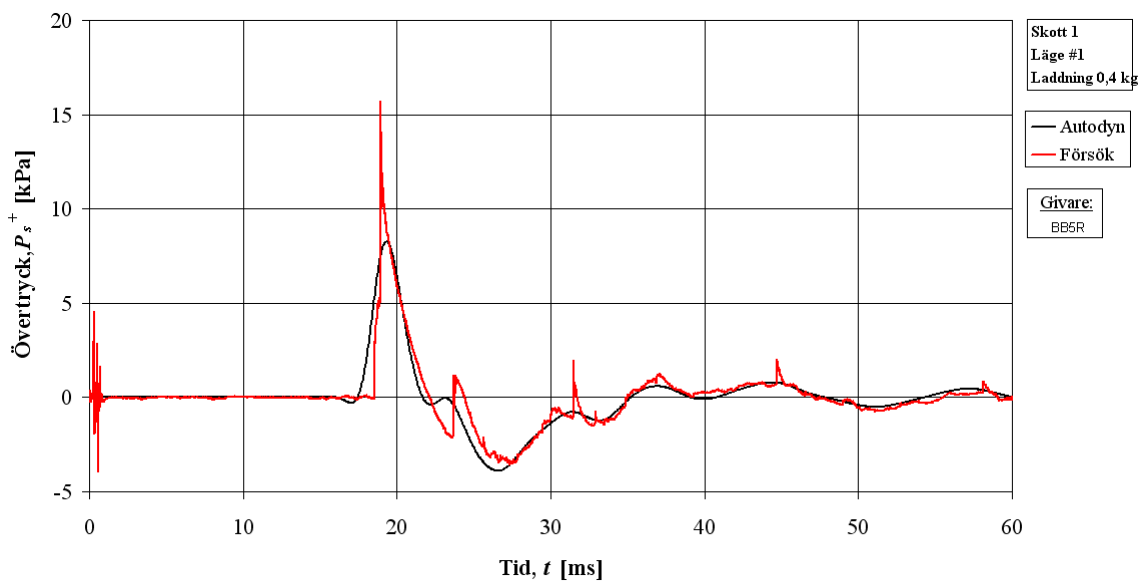
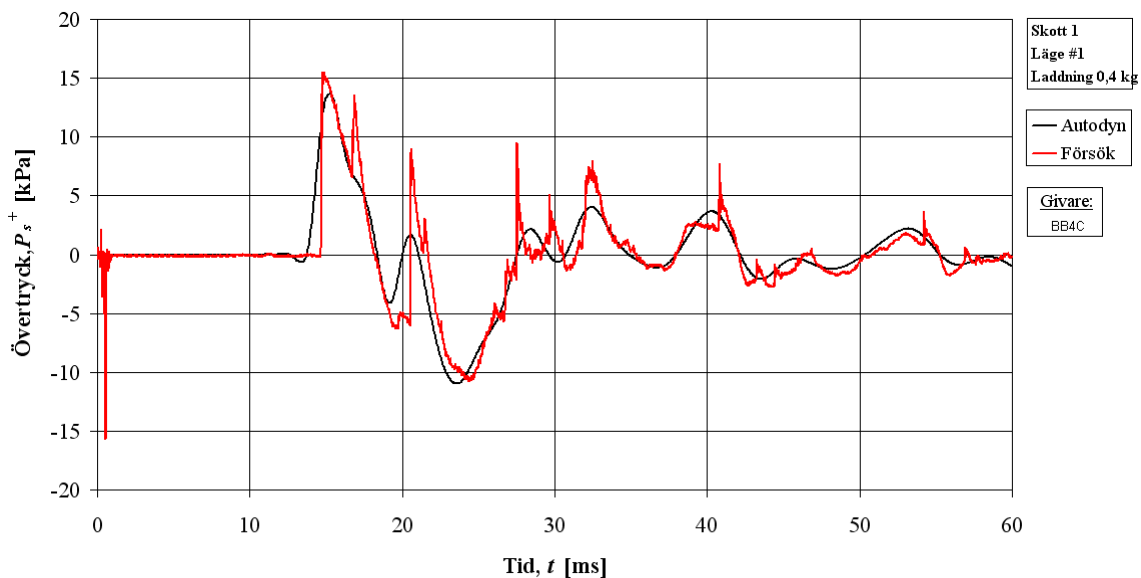
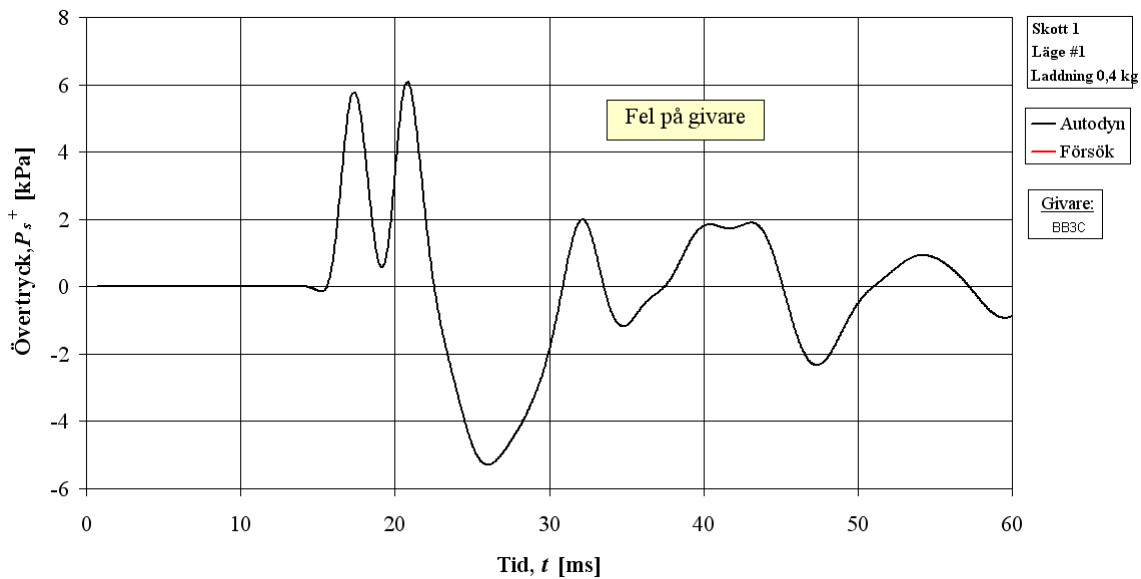


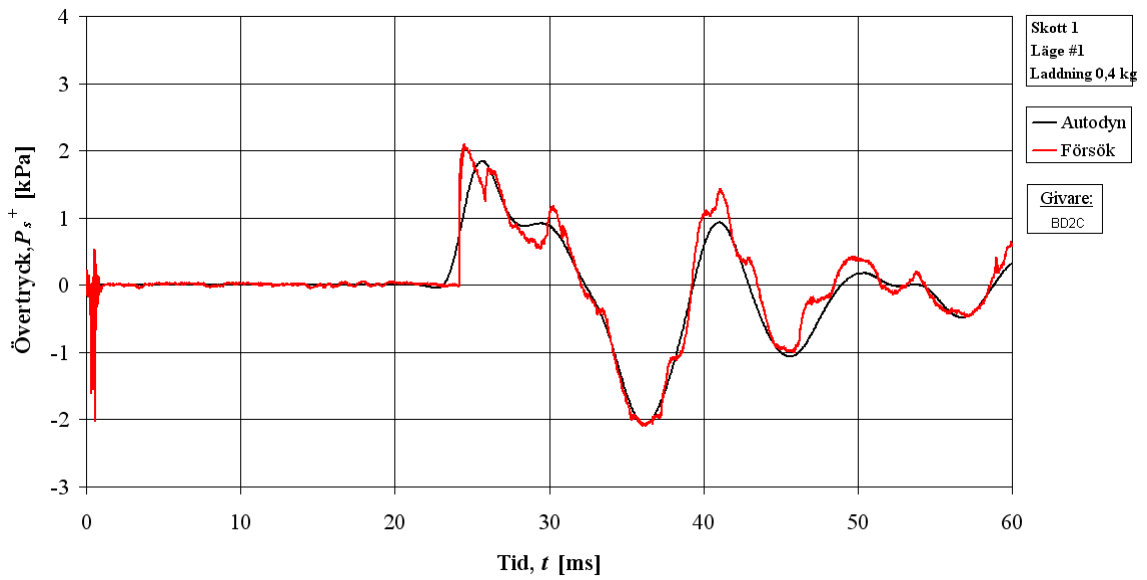
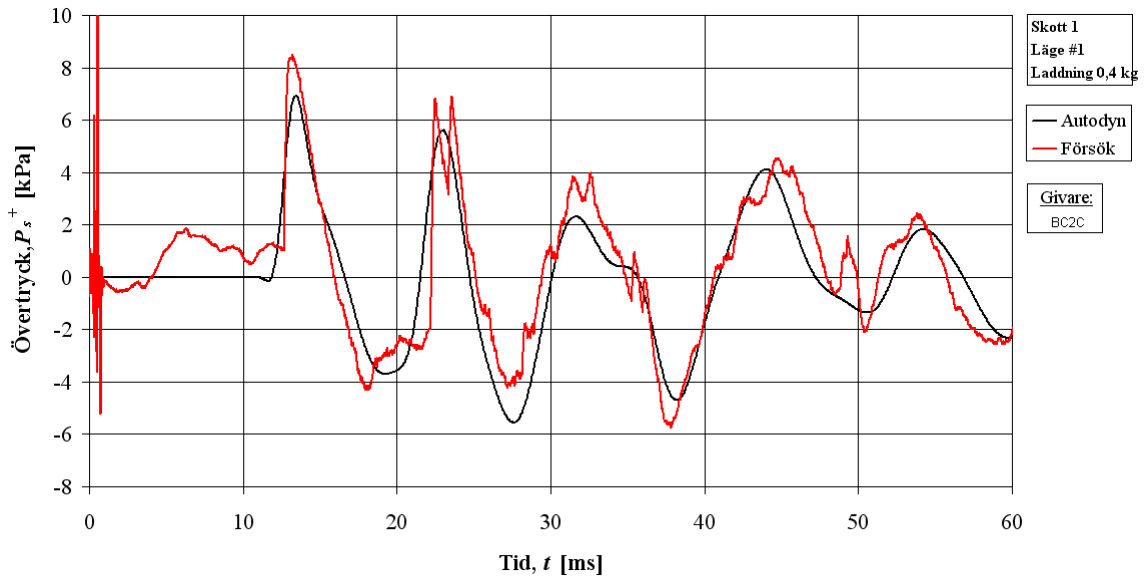






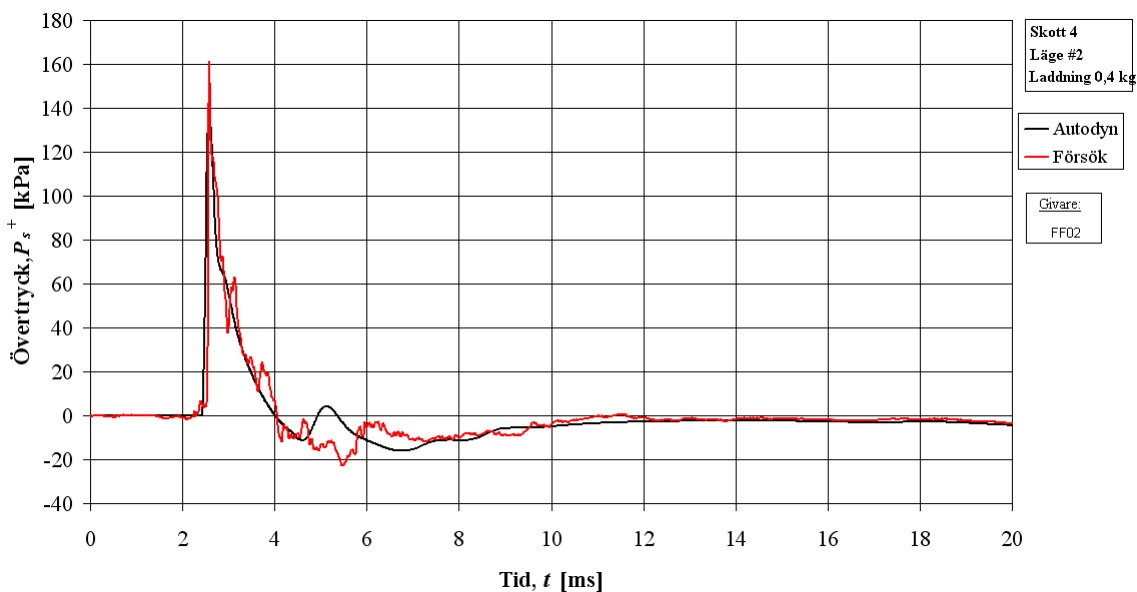
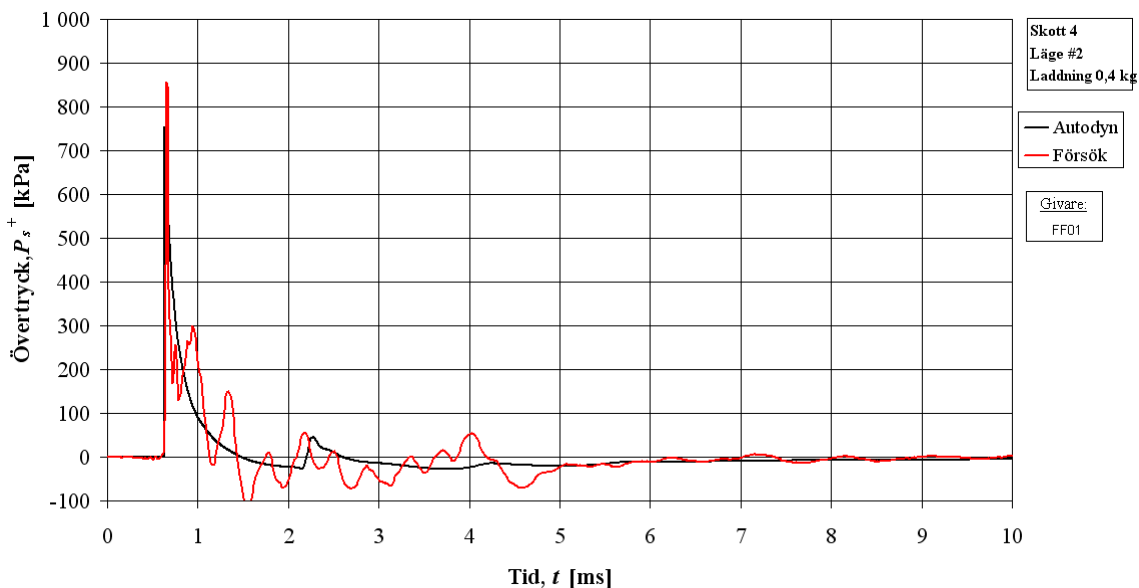


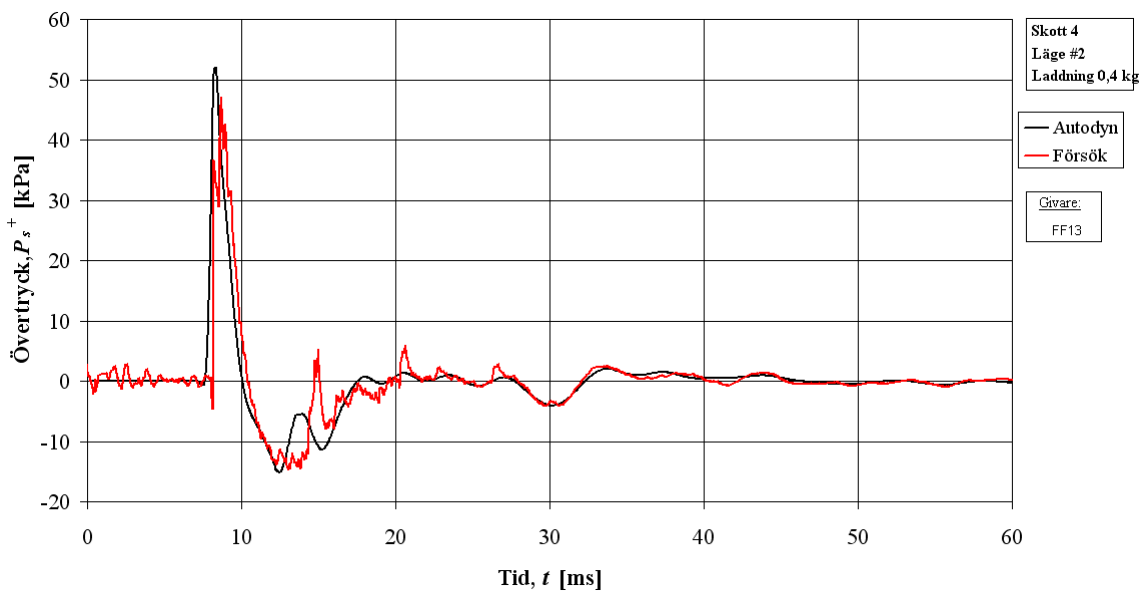
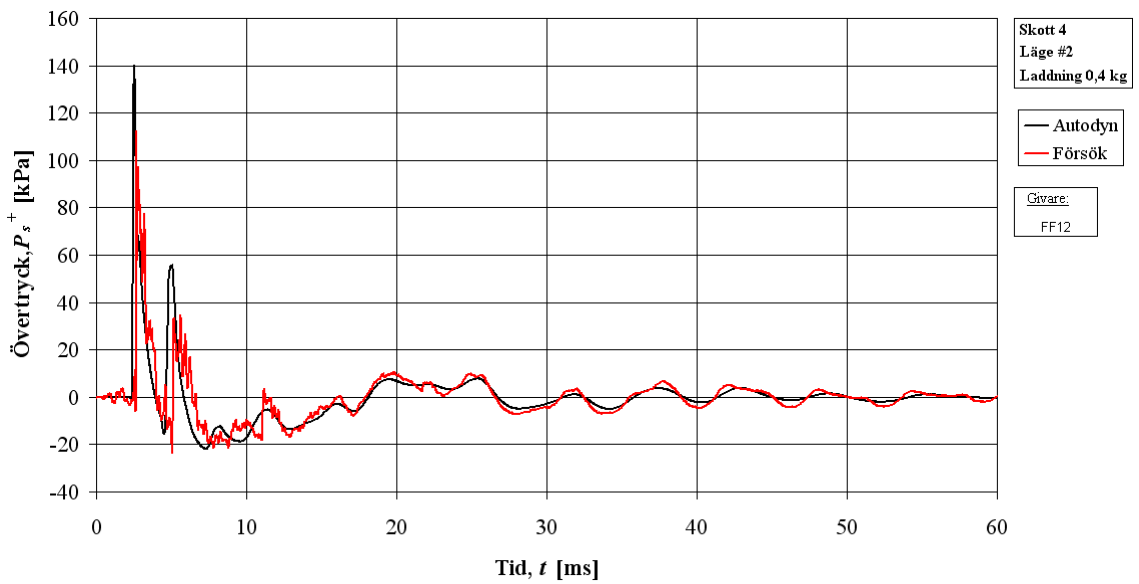
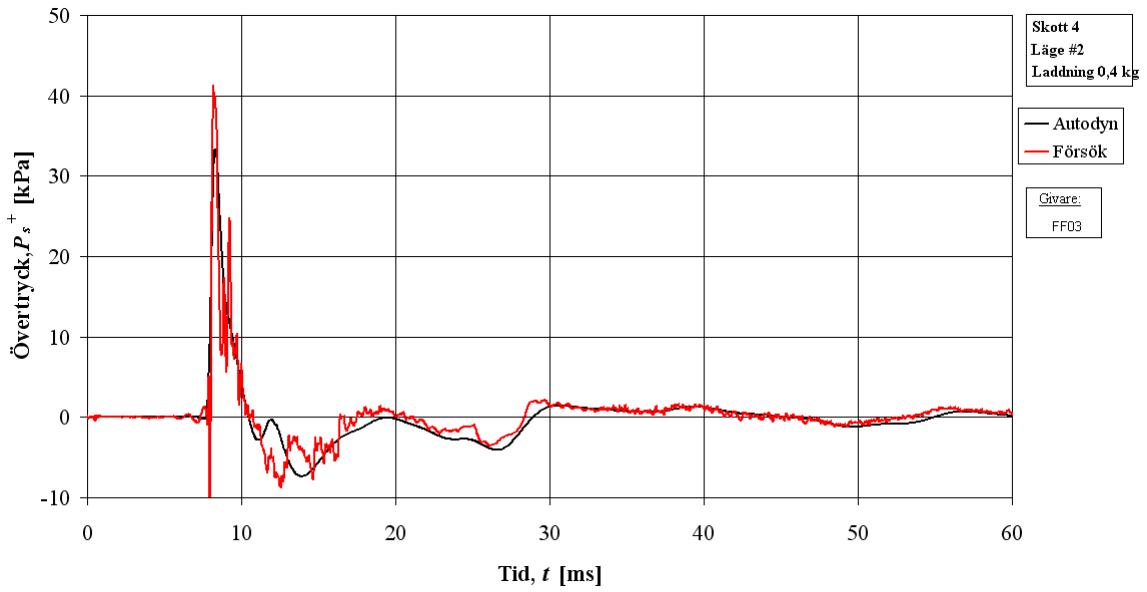


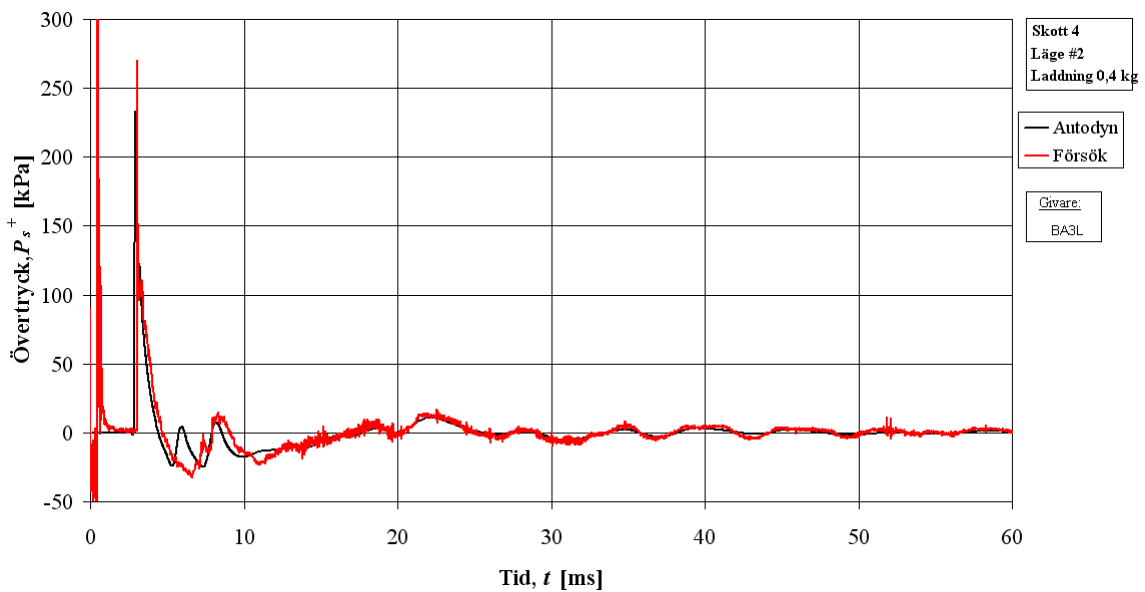
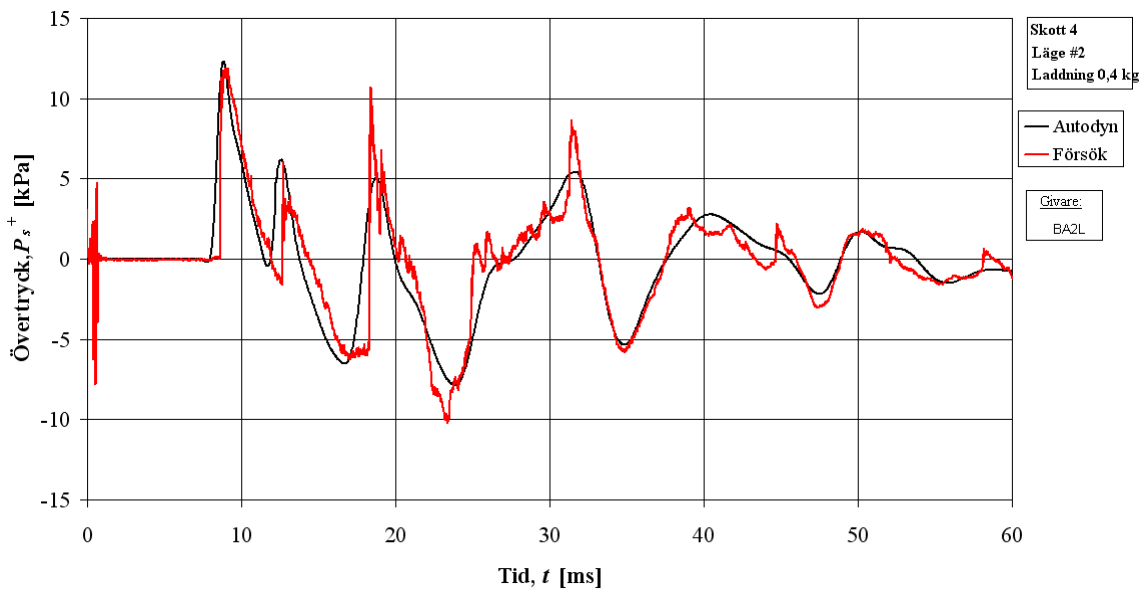
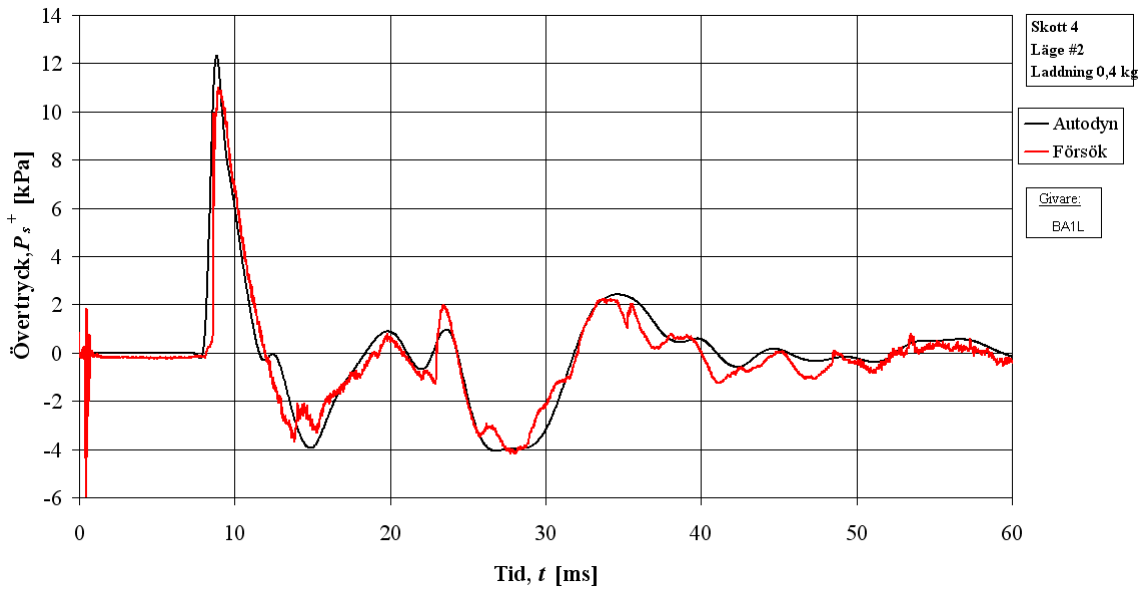


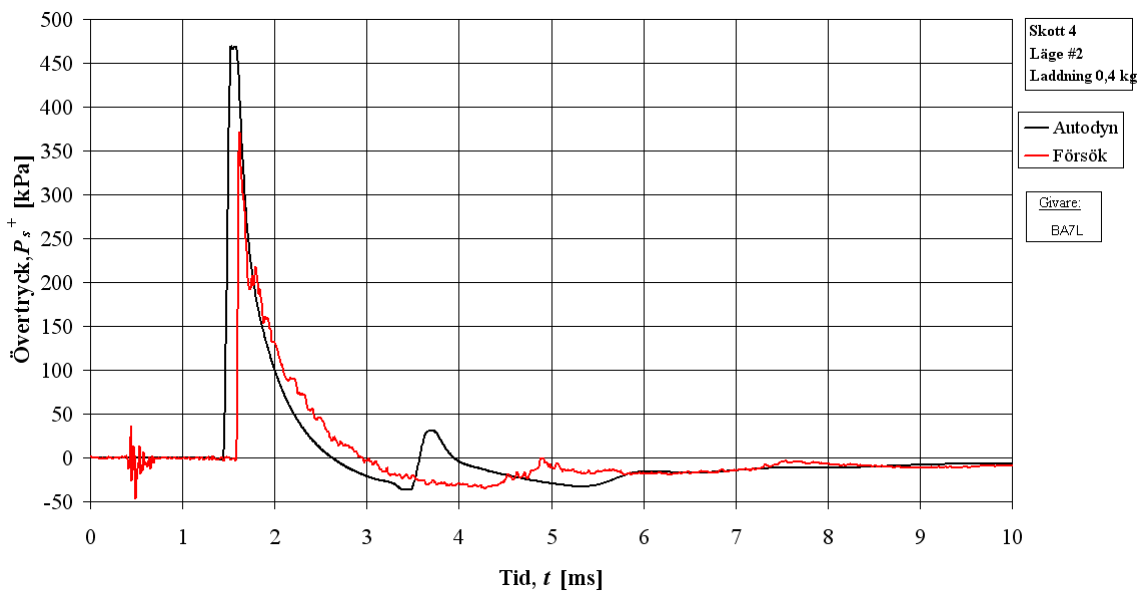
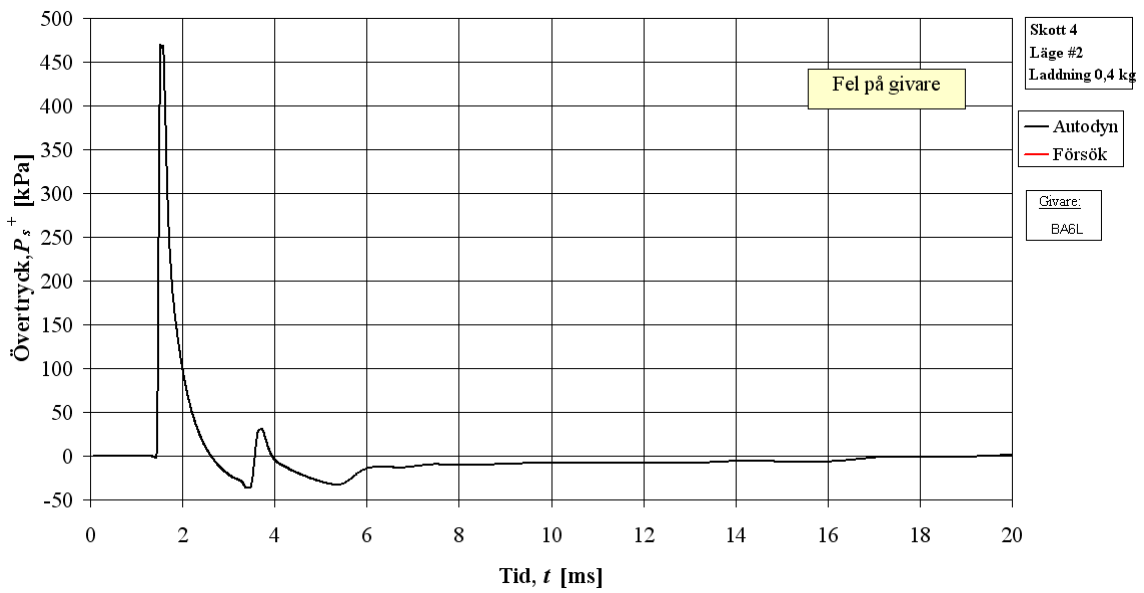
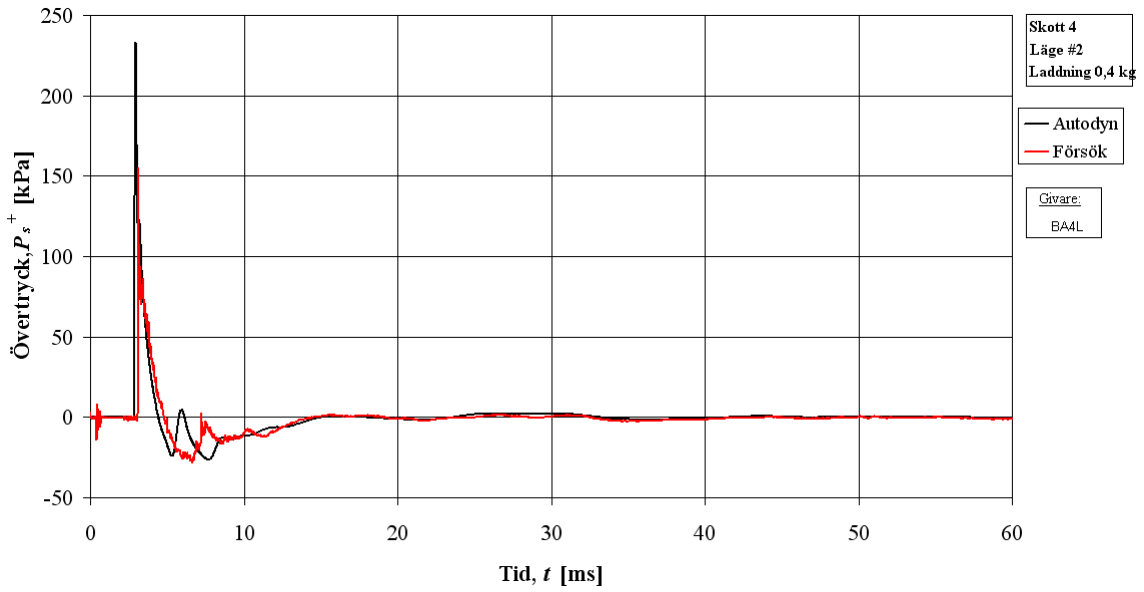
A.2 Skott #4 – 0,4 kg, läge 2

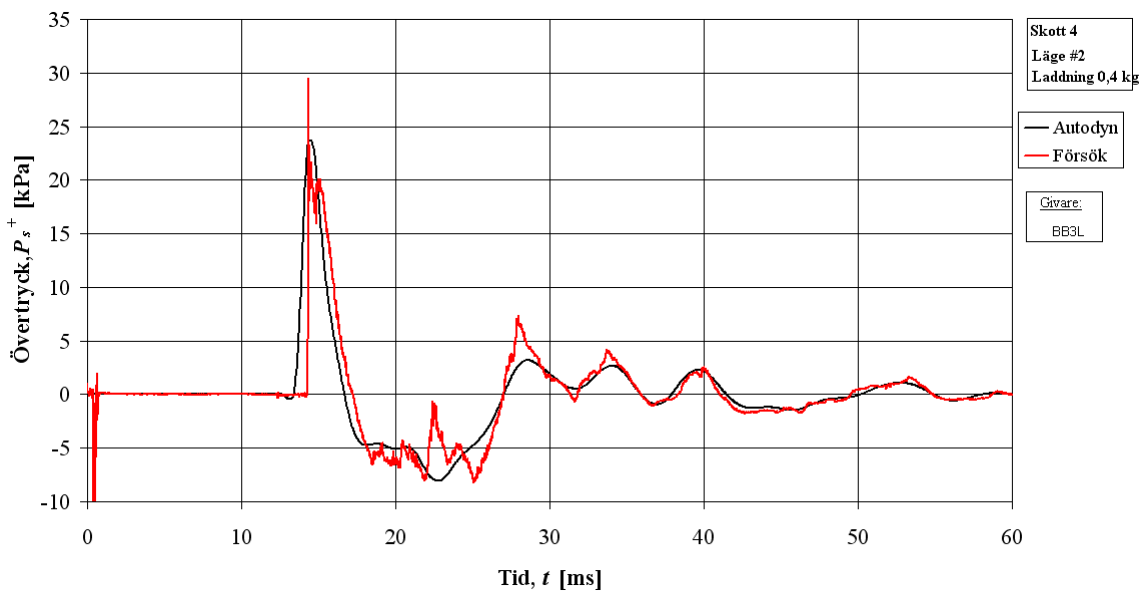
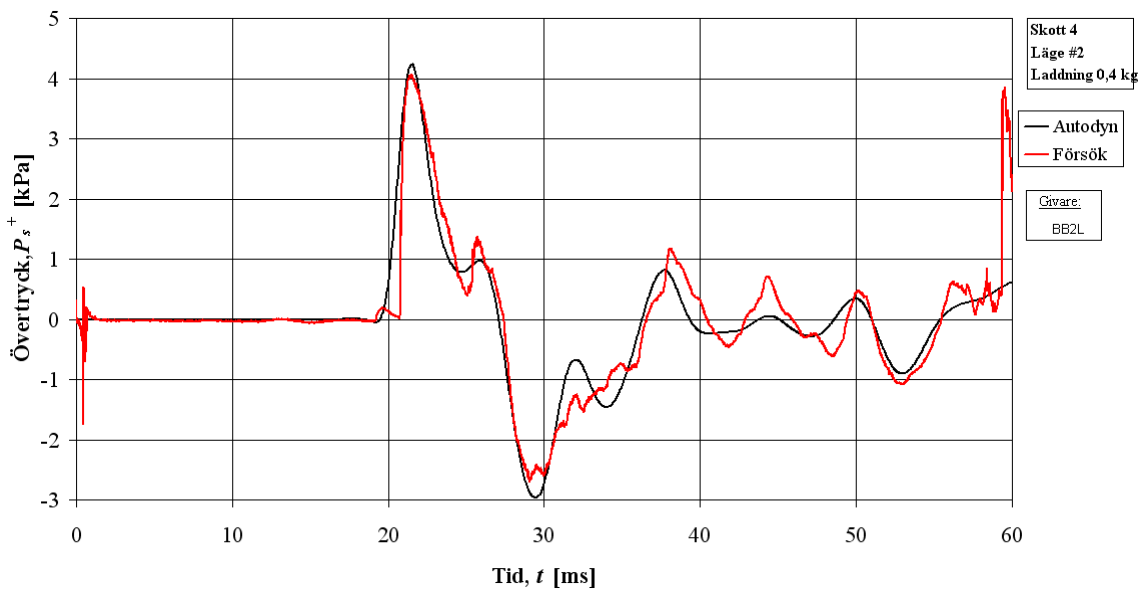
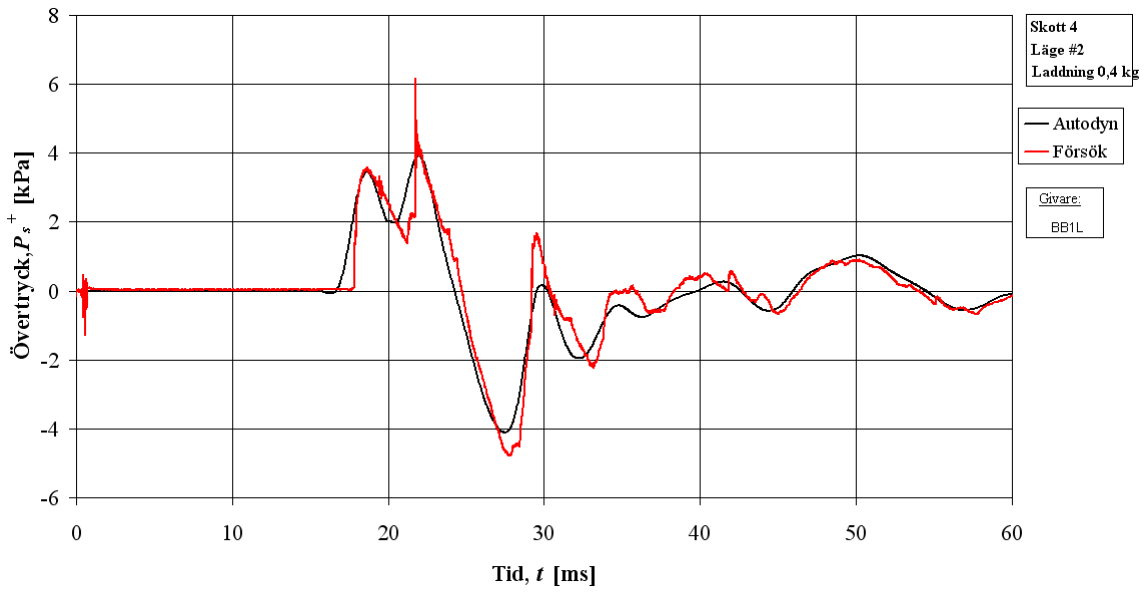
I nedanstående figurer visas tryck-tidskurvor från försök samt motsvarande analyse i Autodyn för skott #4 – 0,4 kg PETN i läge 2. För laddningens samt givarnas position se kapitel 2. I vissa fall har tryckgivaren i försöket inte fungerat tillfredsställande och detta markeras då i aktuell figur.

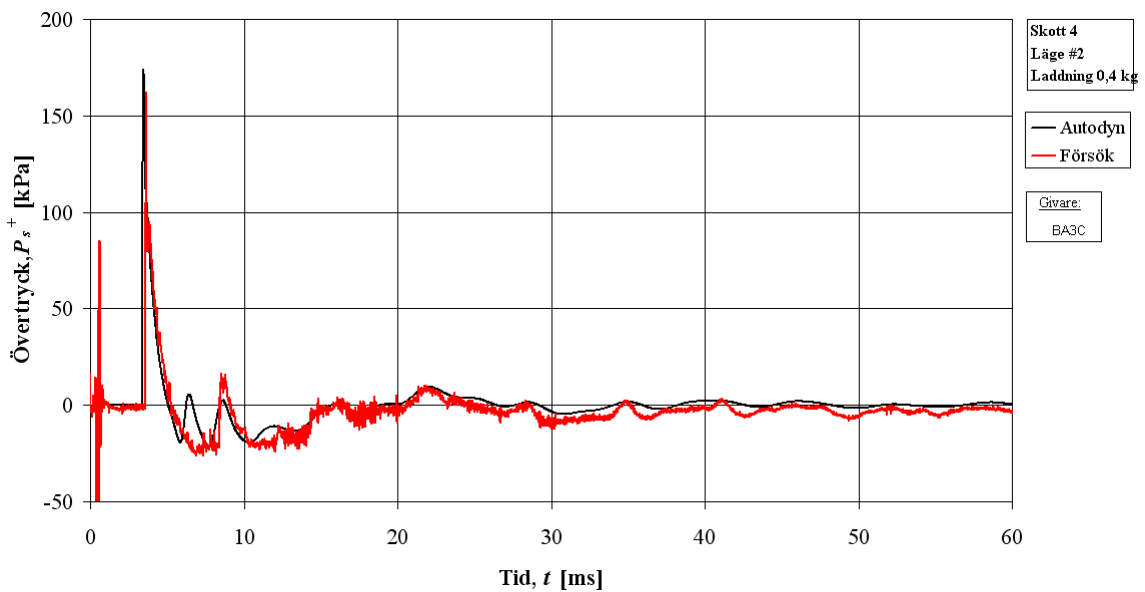
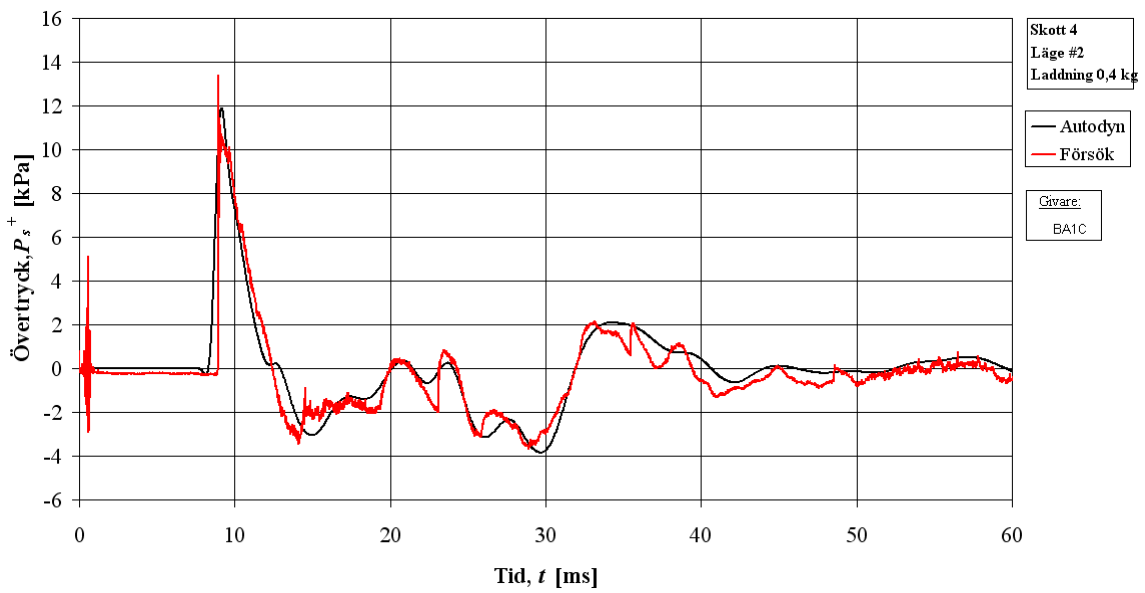
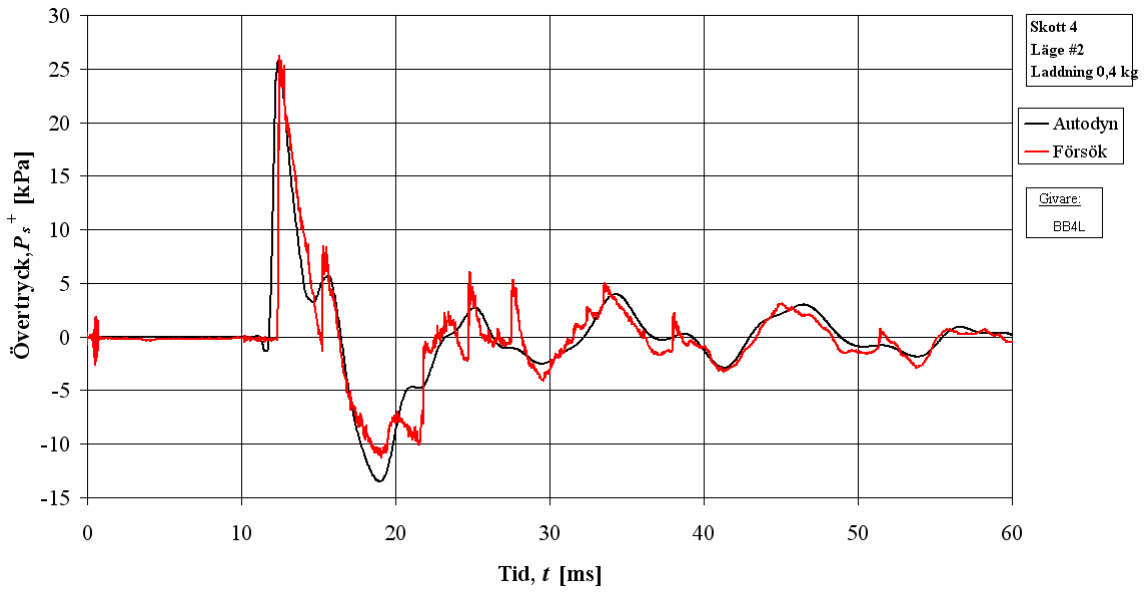


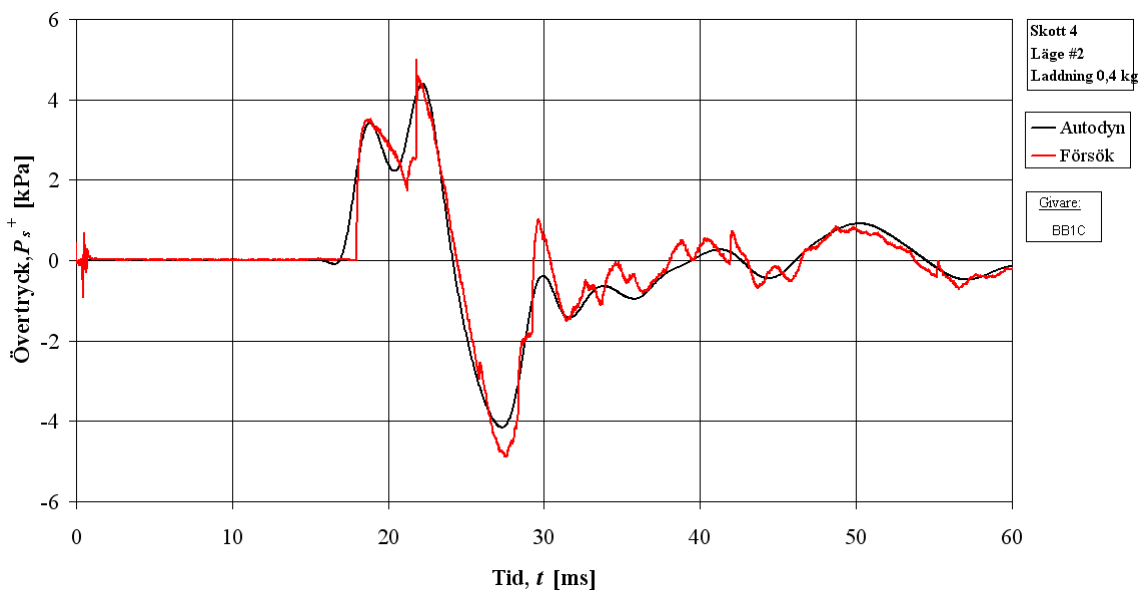
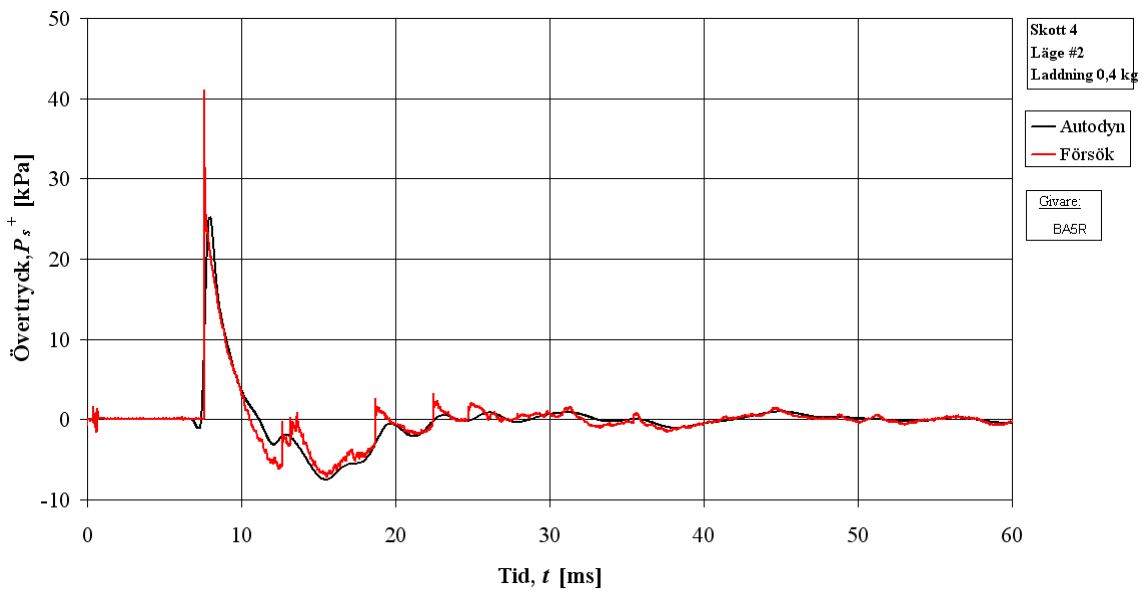
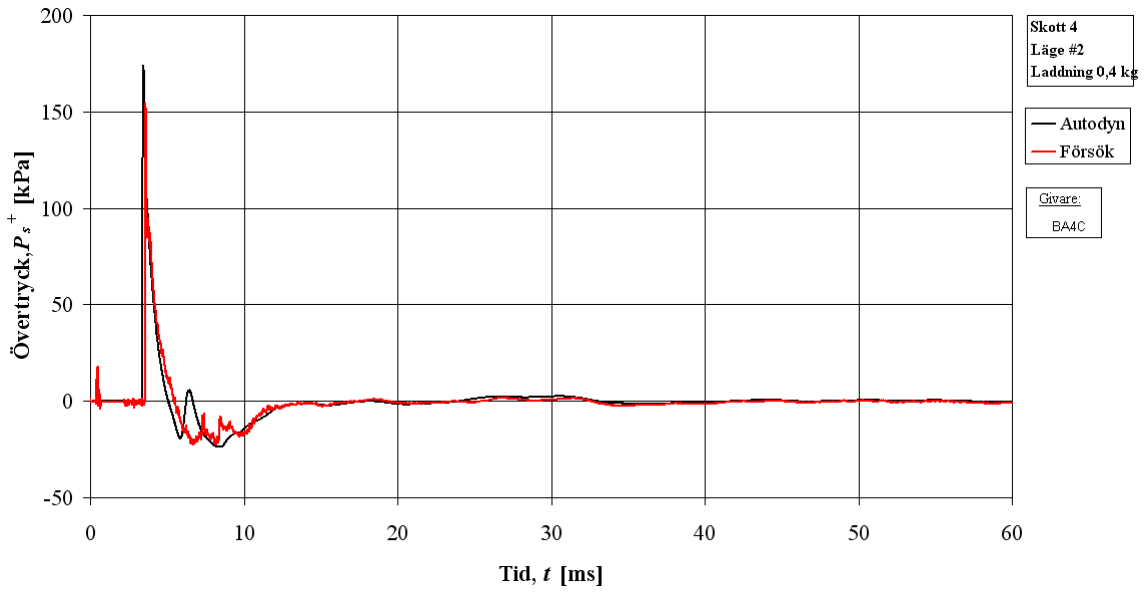


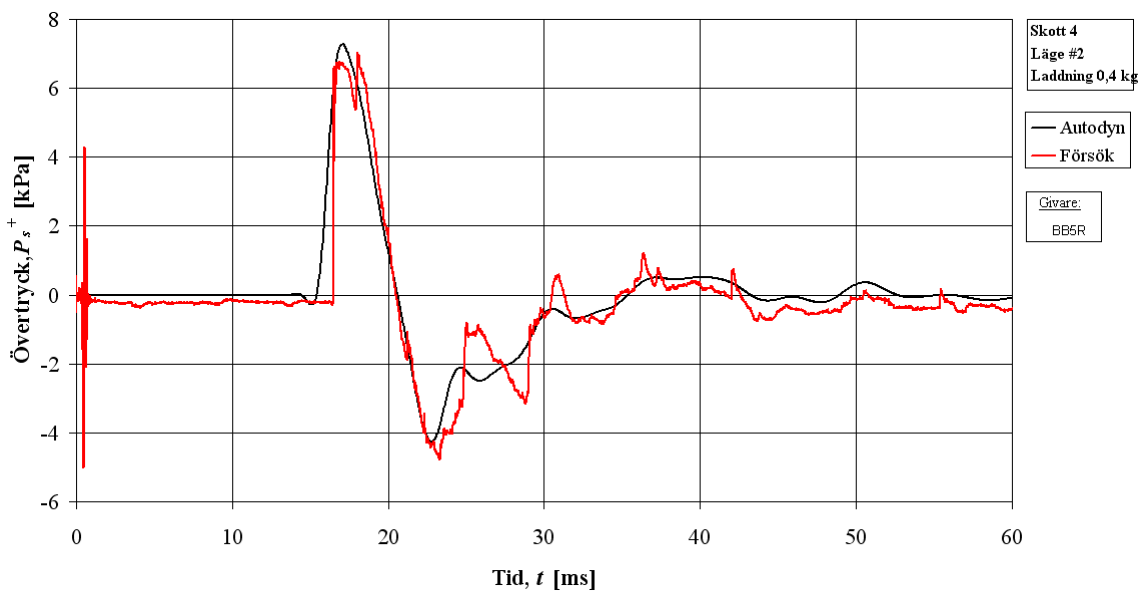
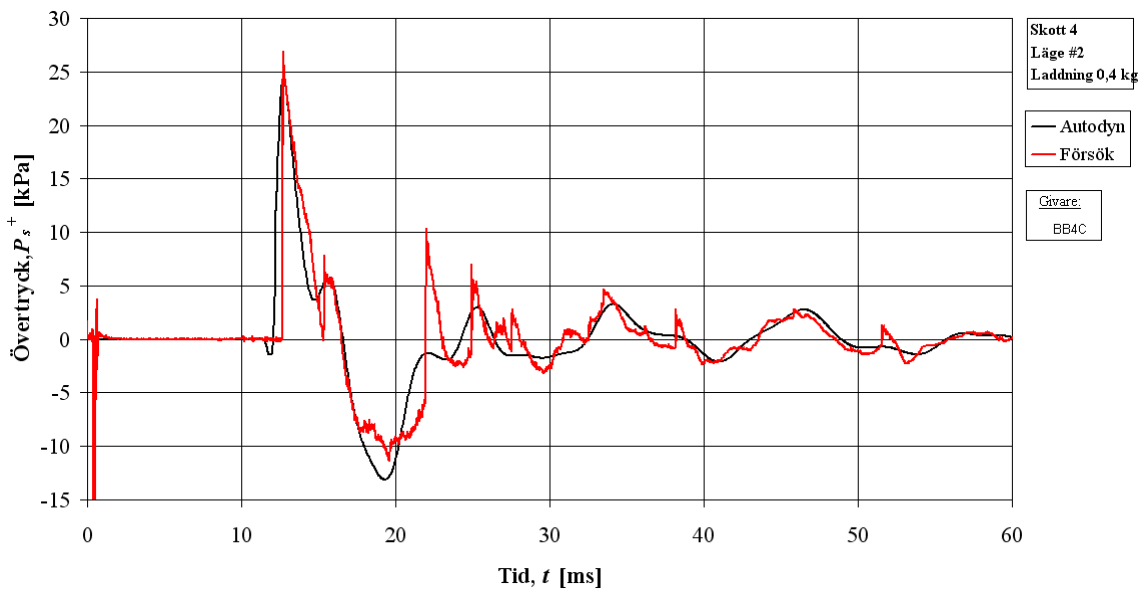
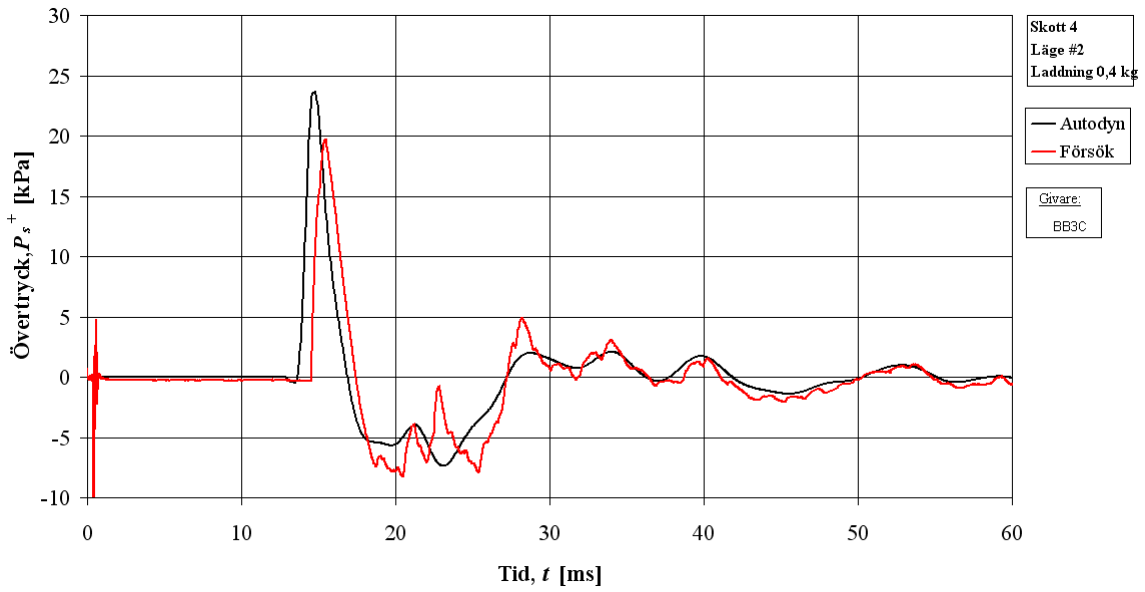


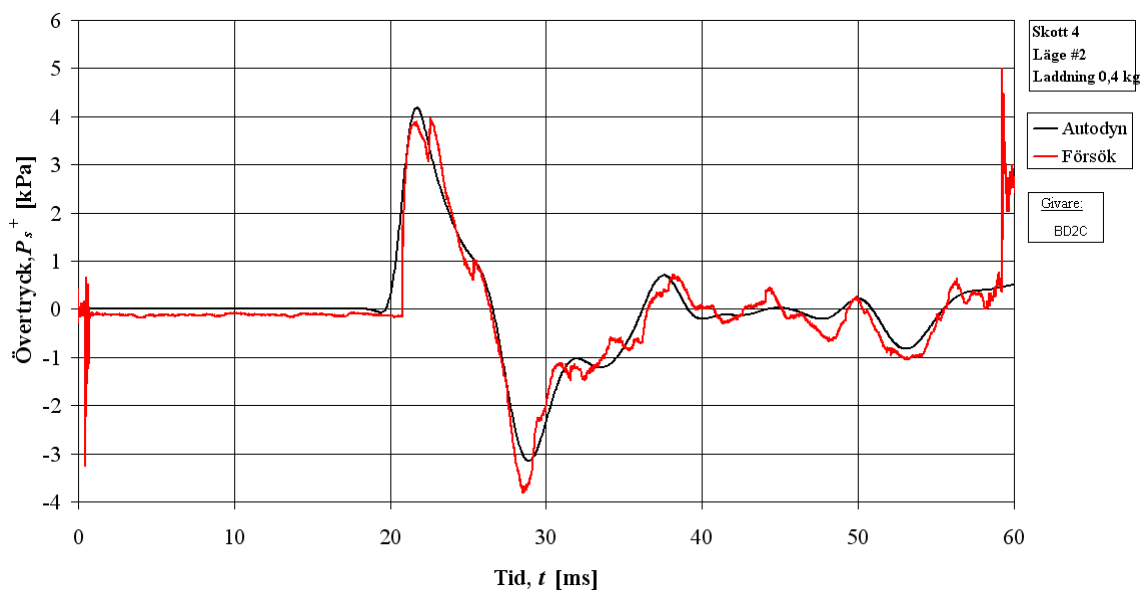
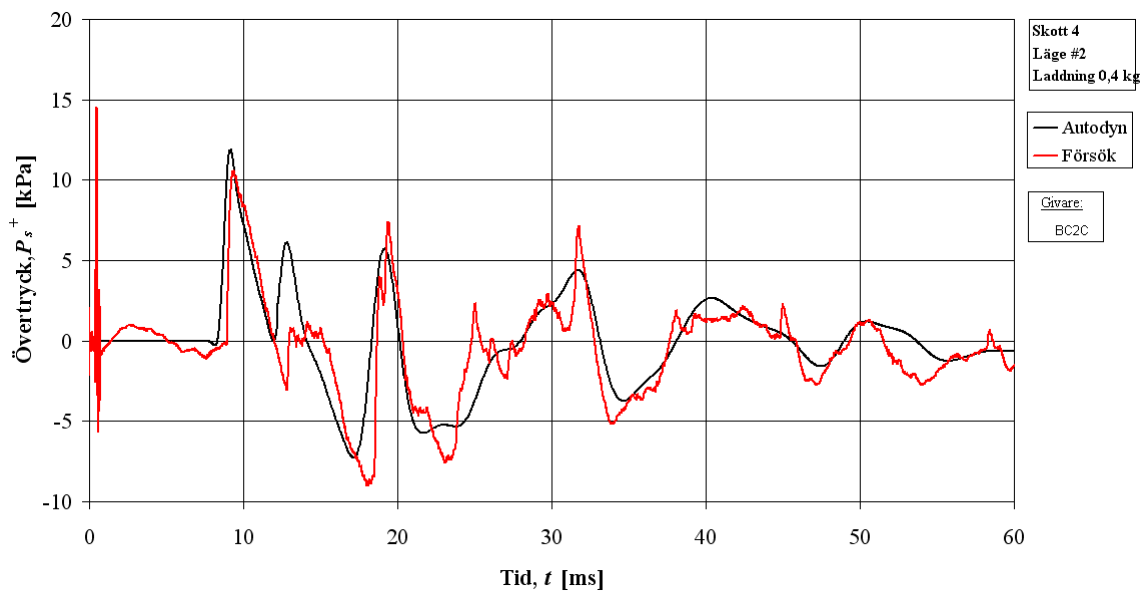






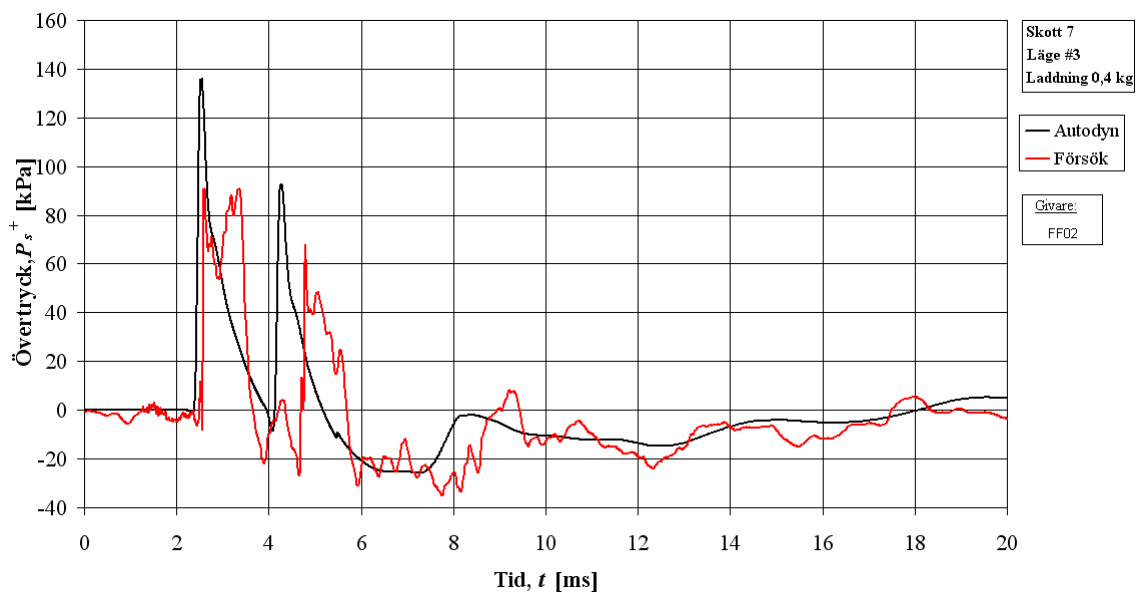
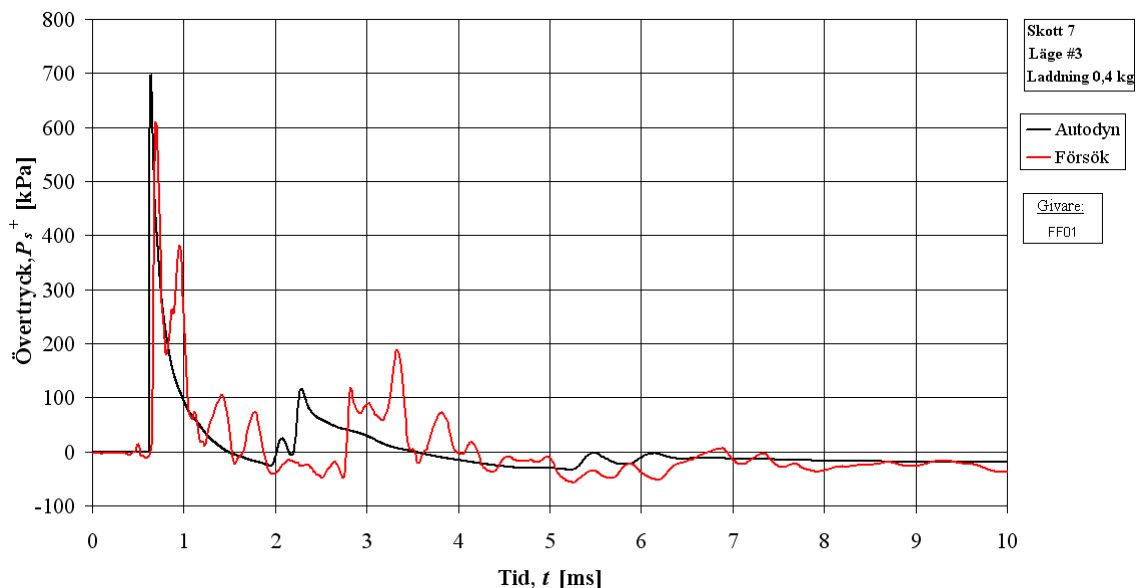


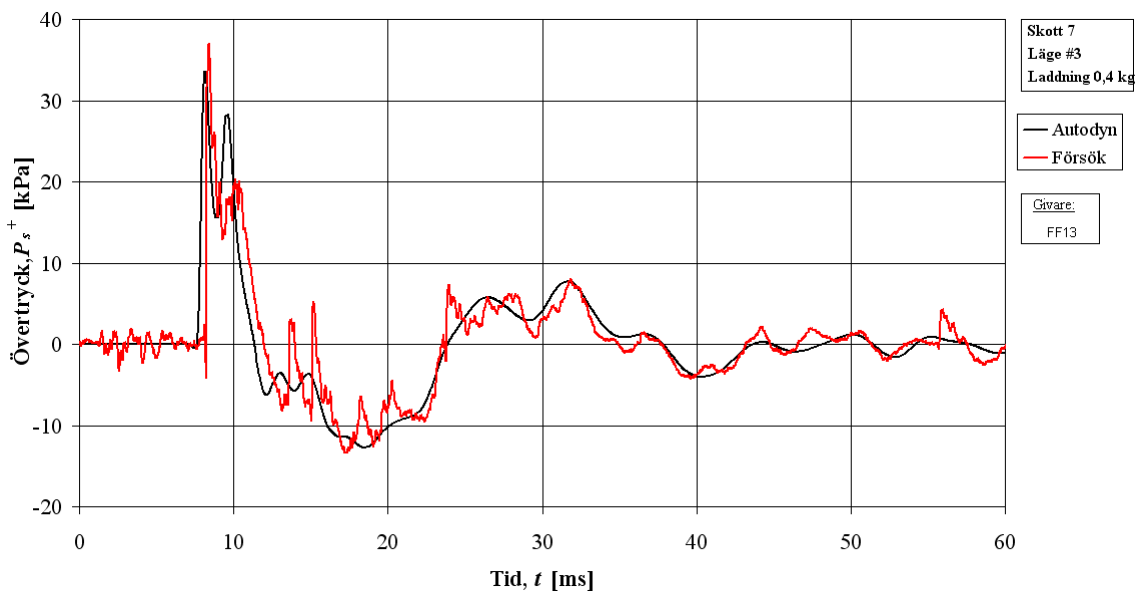
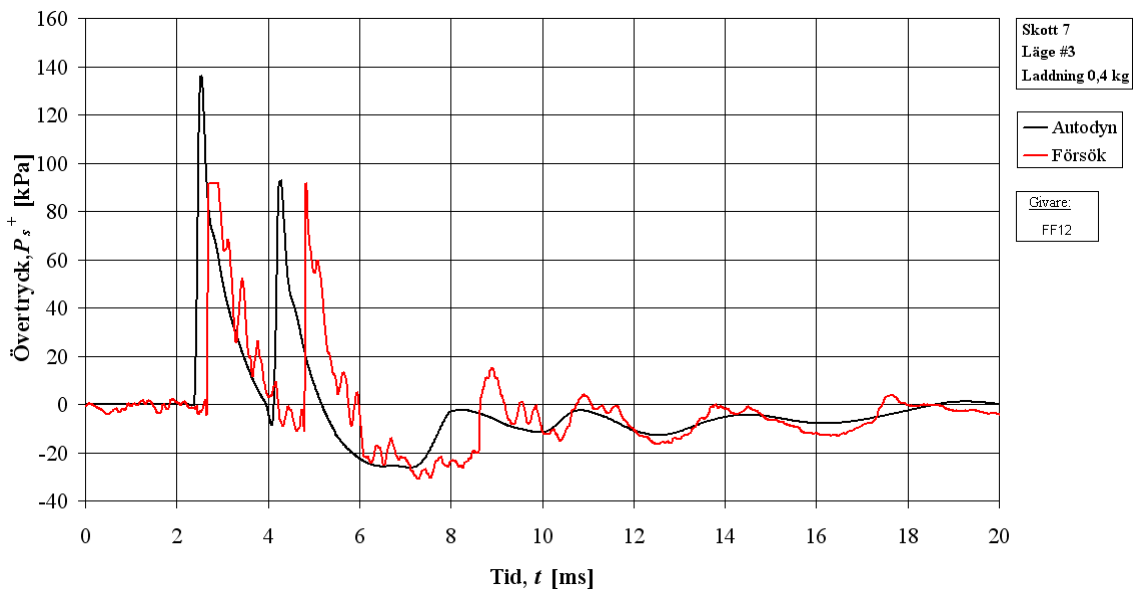
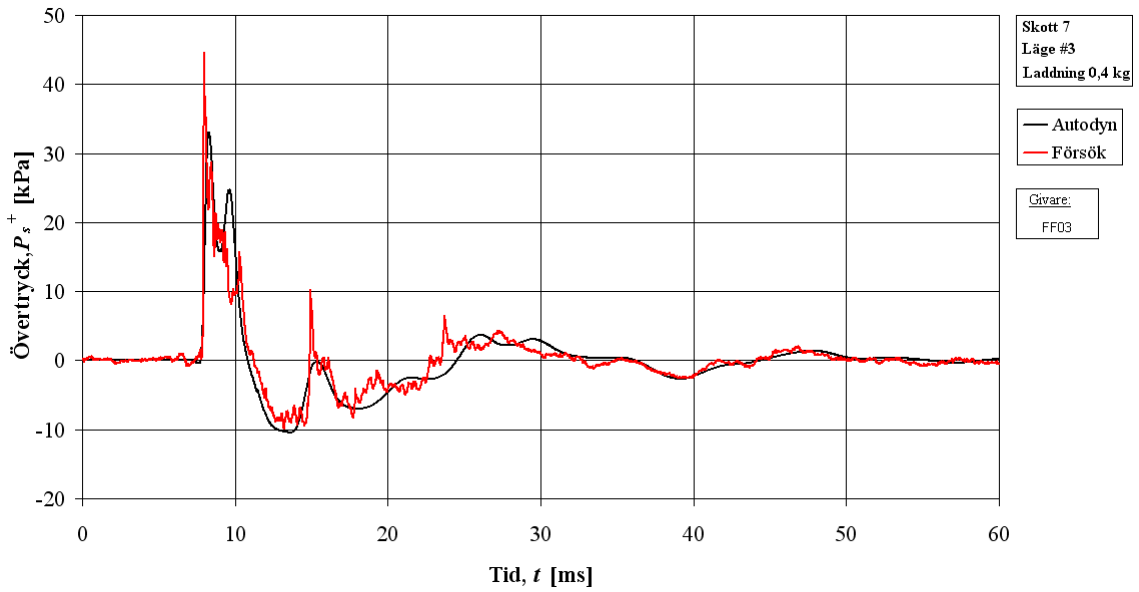


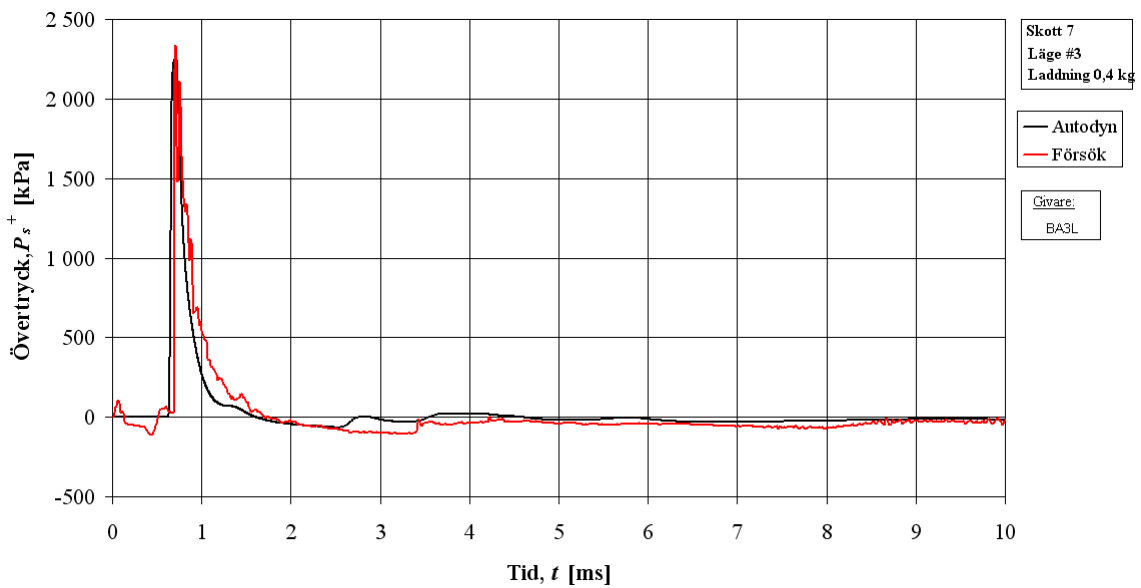
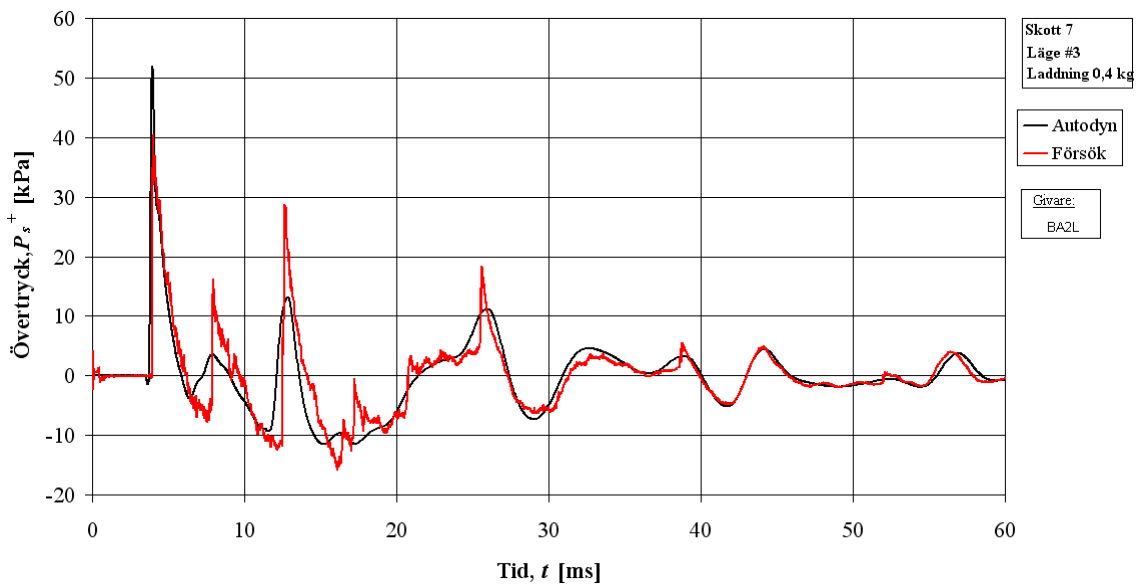
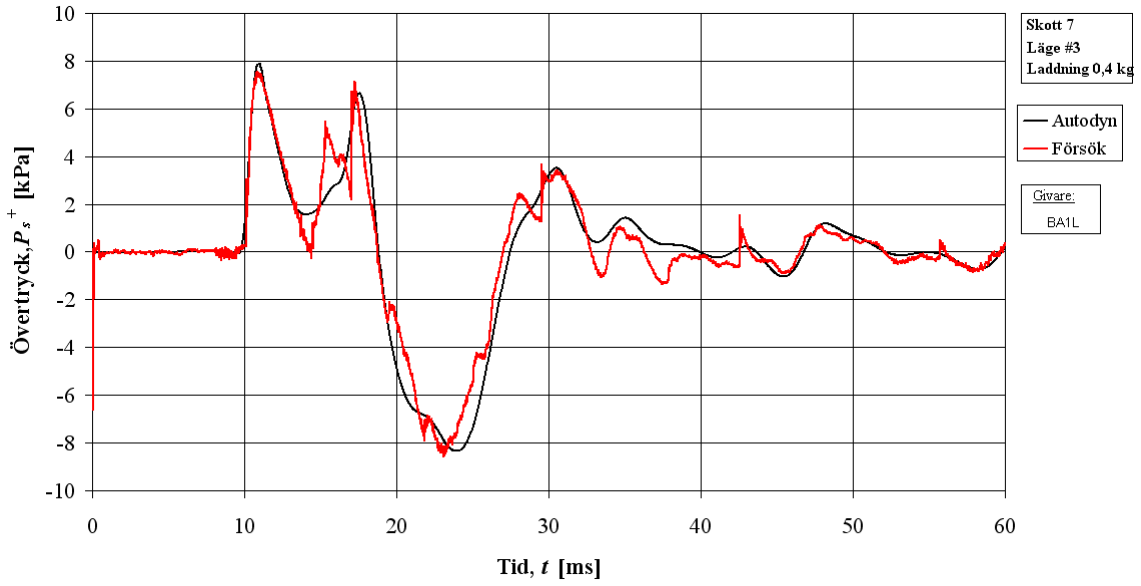


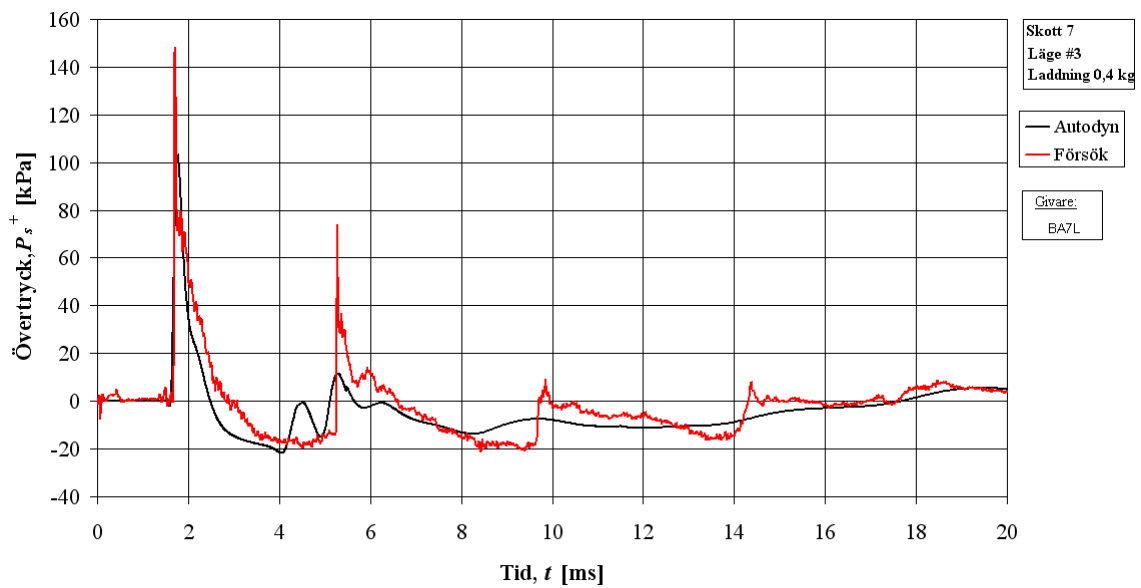
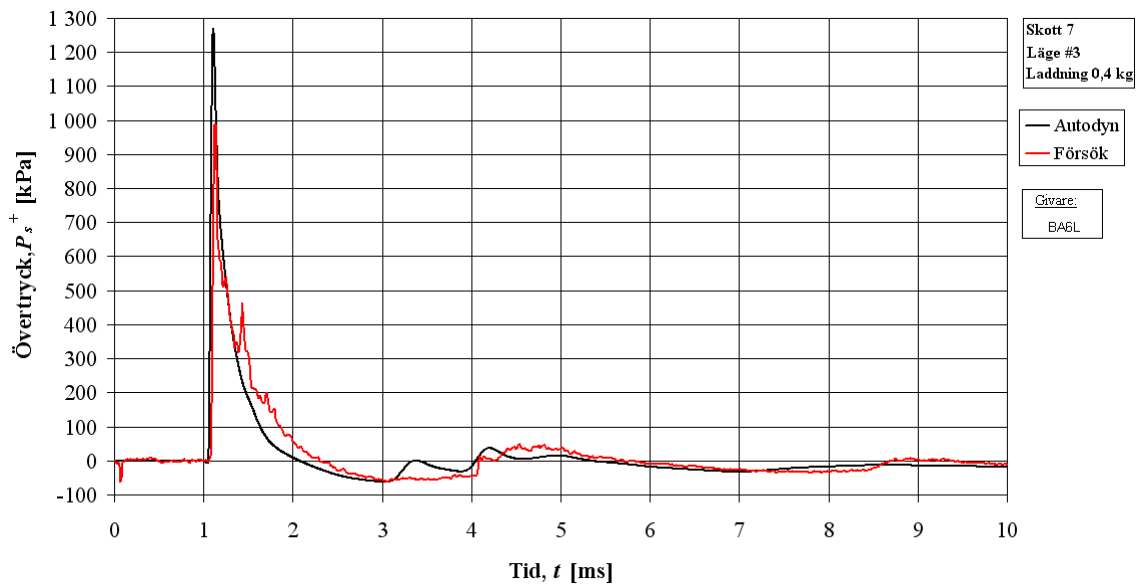
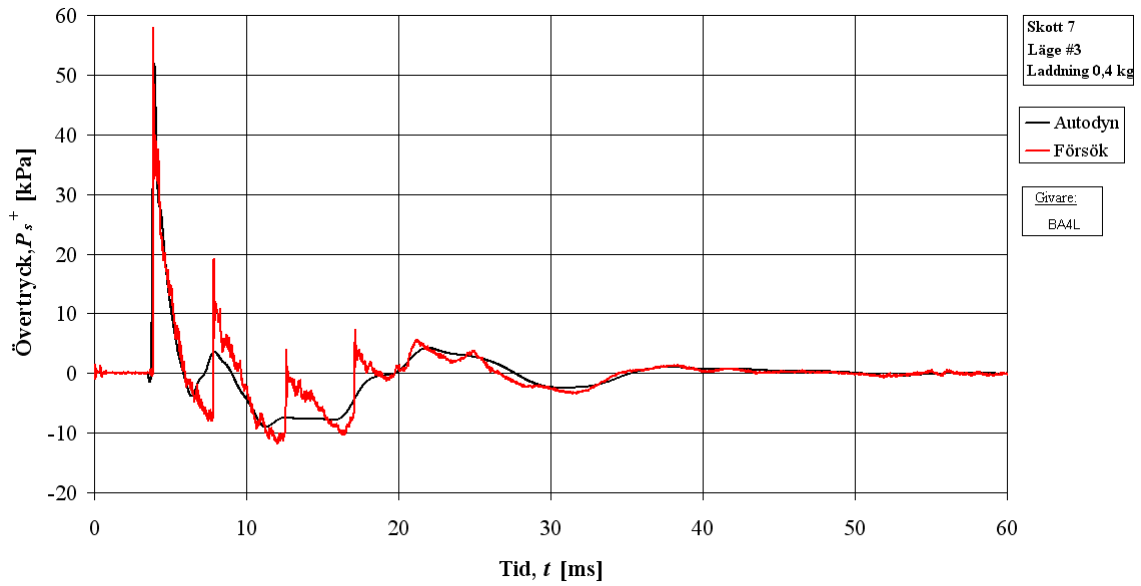
A.3 Skott #7 – 0,4 kg, läge 3

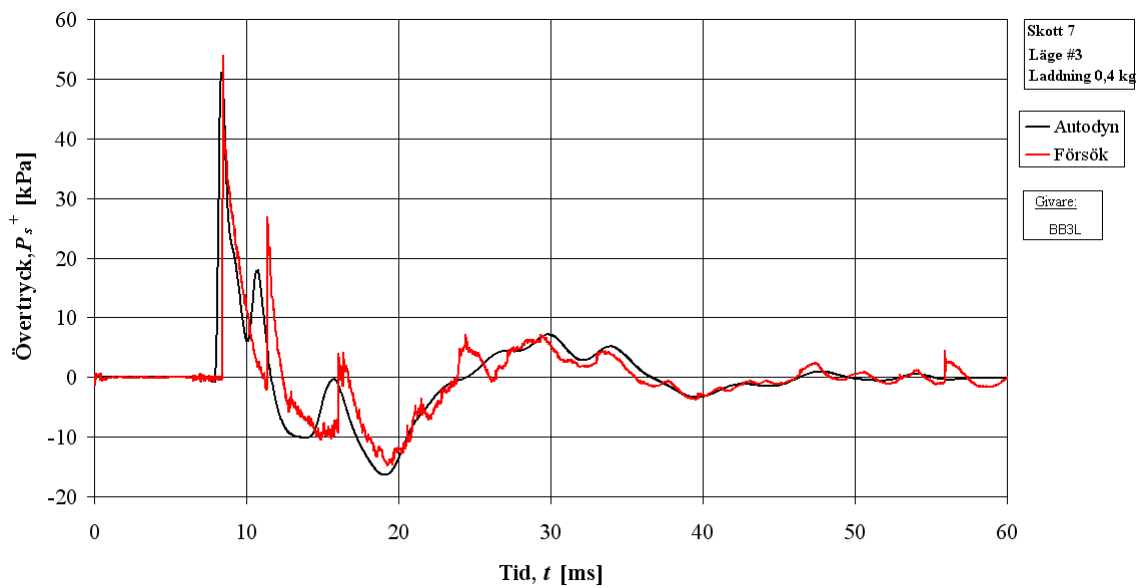
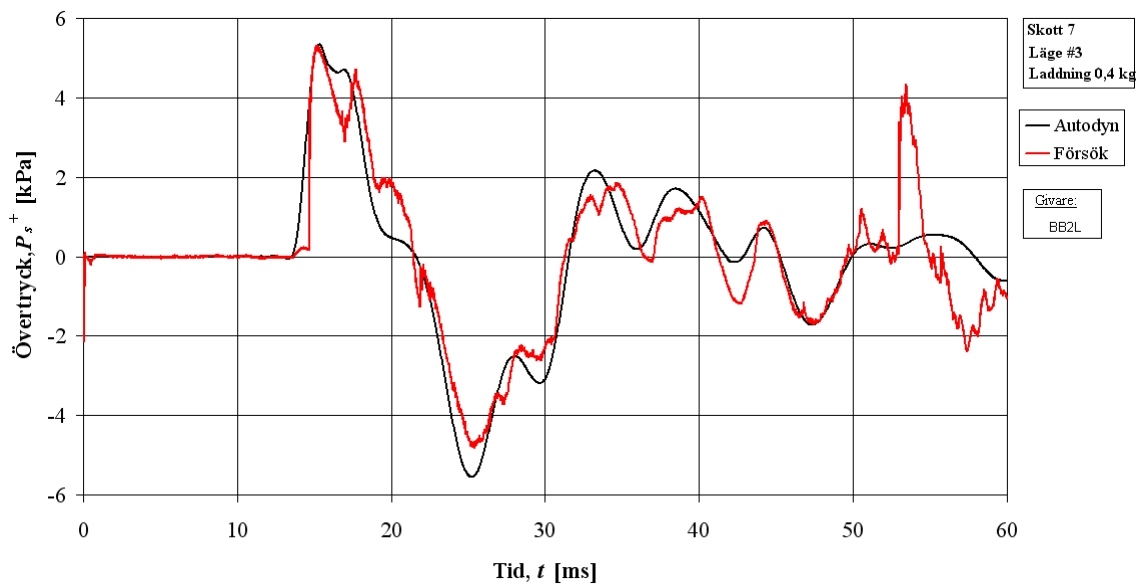
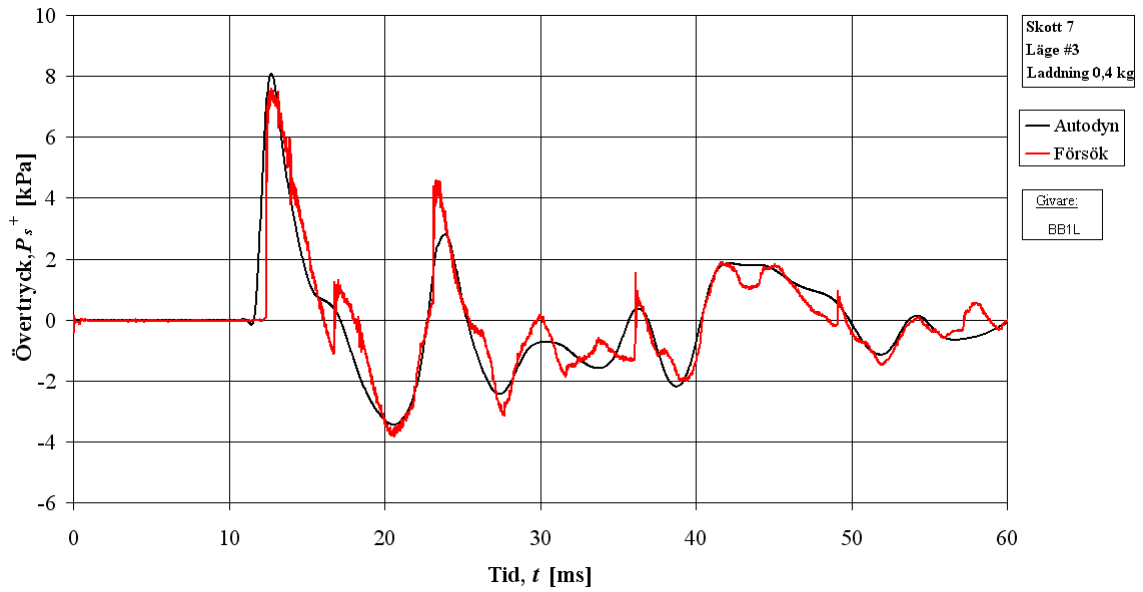
I nedanstående figurer visas tryck-tidskurvor från försök samt motsvarande analyse i Autodyn för skott #7 – 0,4 kg PETN i läge 3. För laddningens samt givarnas position se kapitel 2. I vissa fall har tryckgivaren i försöket inte fungerat tillfredsställande och detta markeras då i aktuell figur.

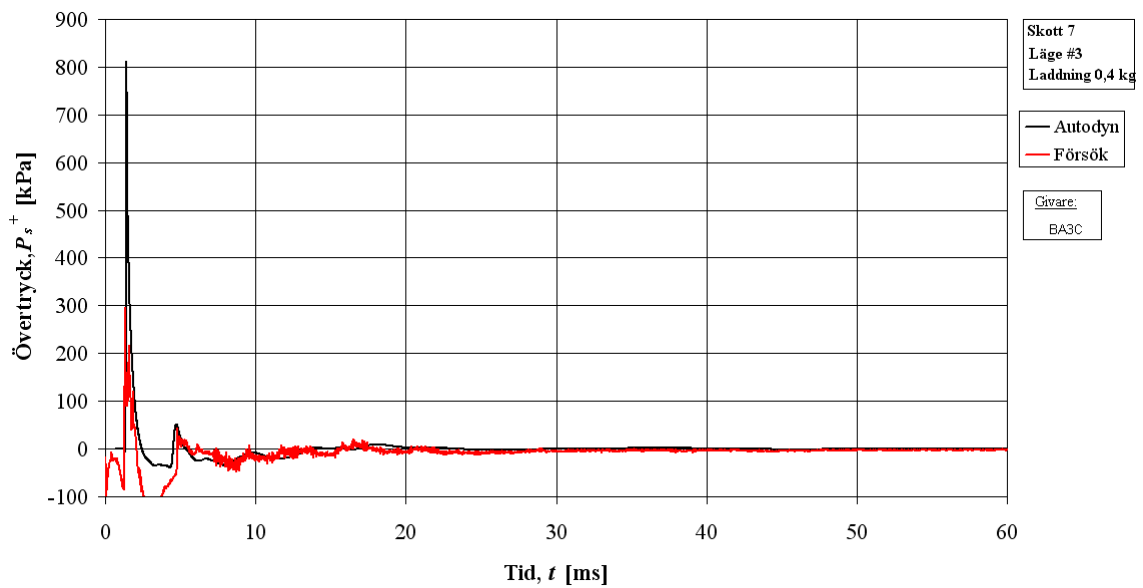
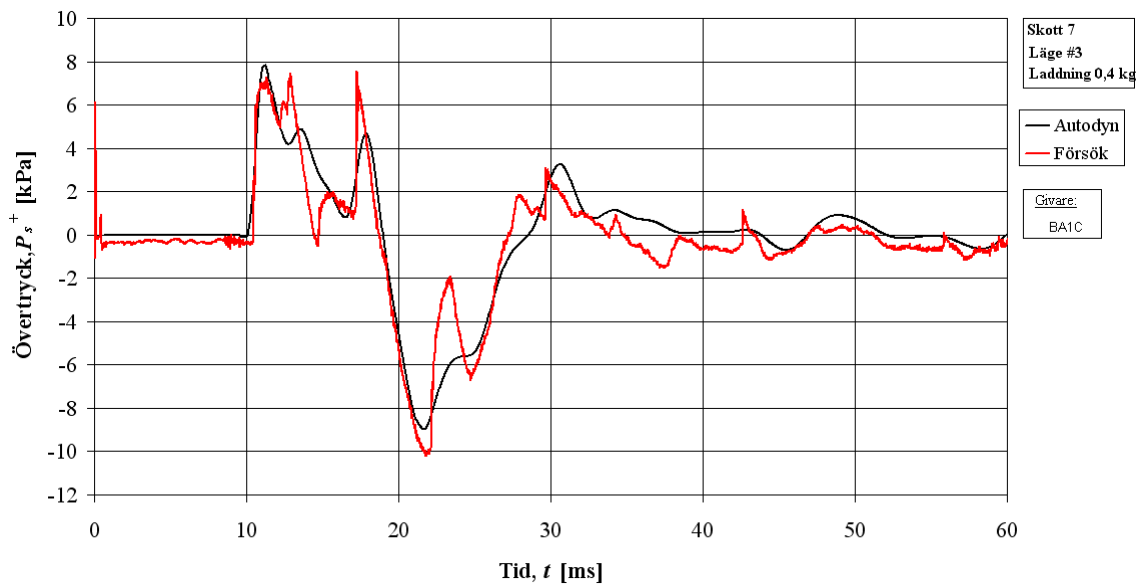
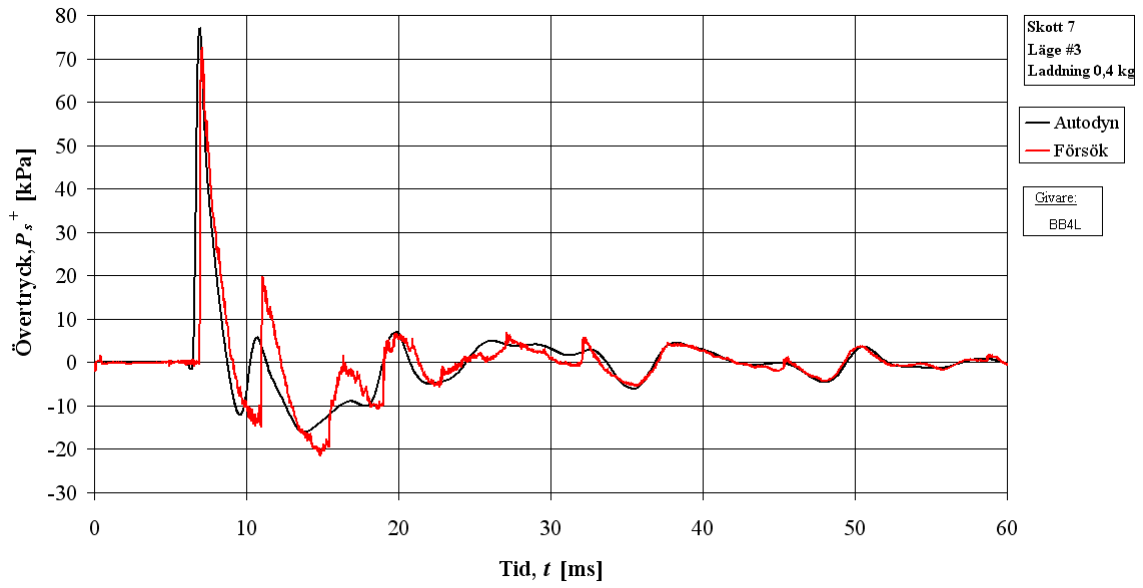


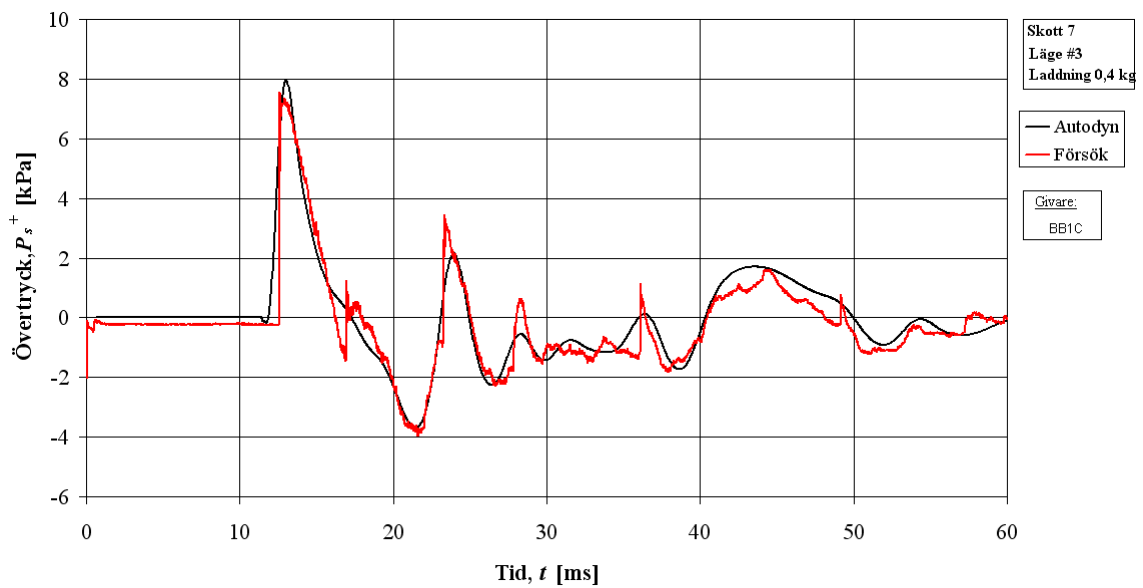
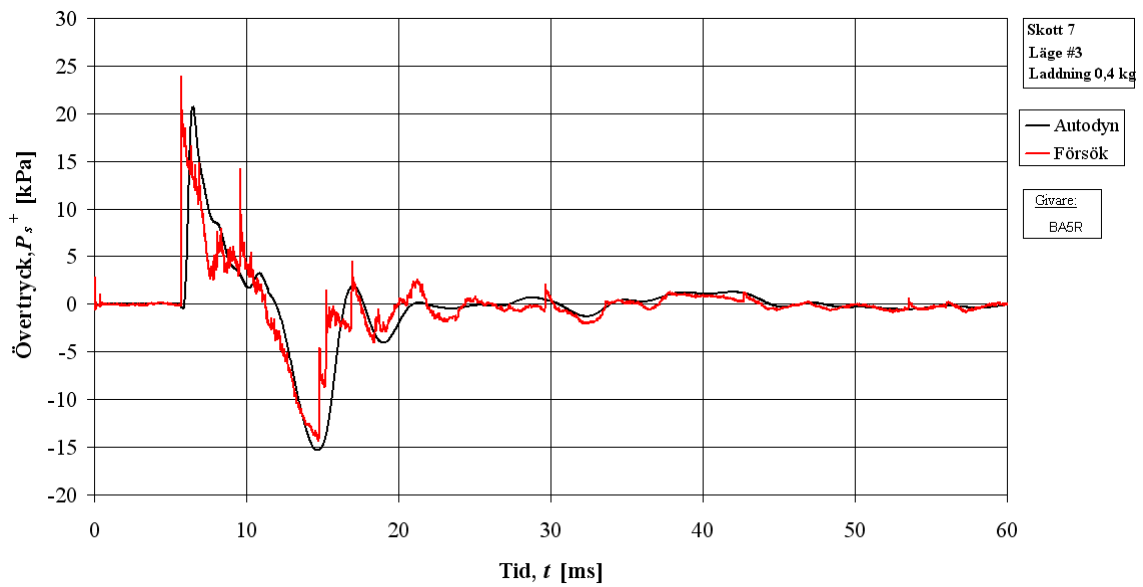
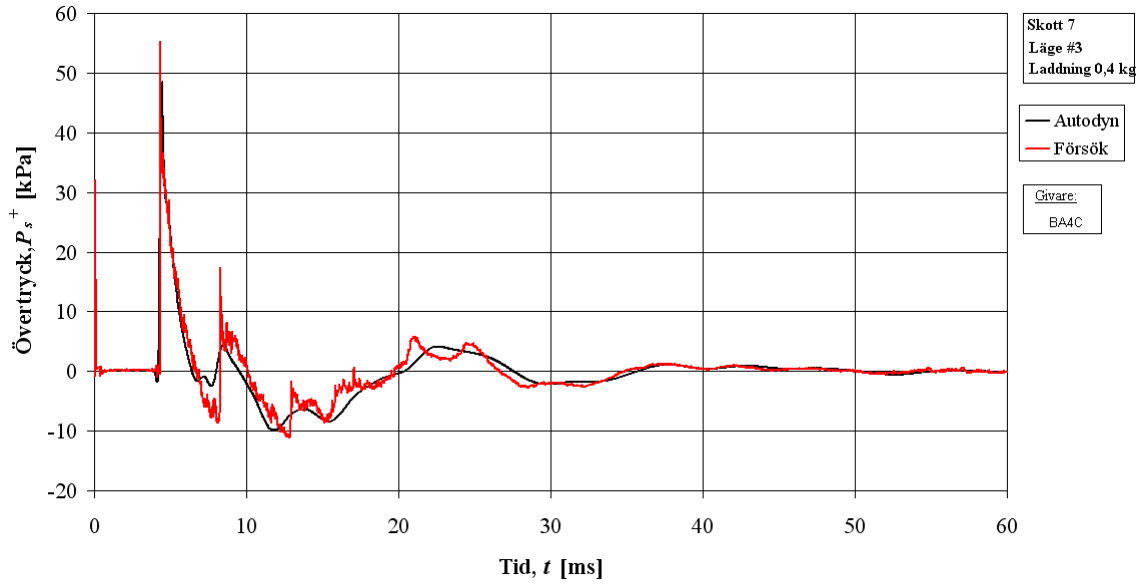


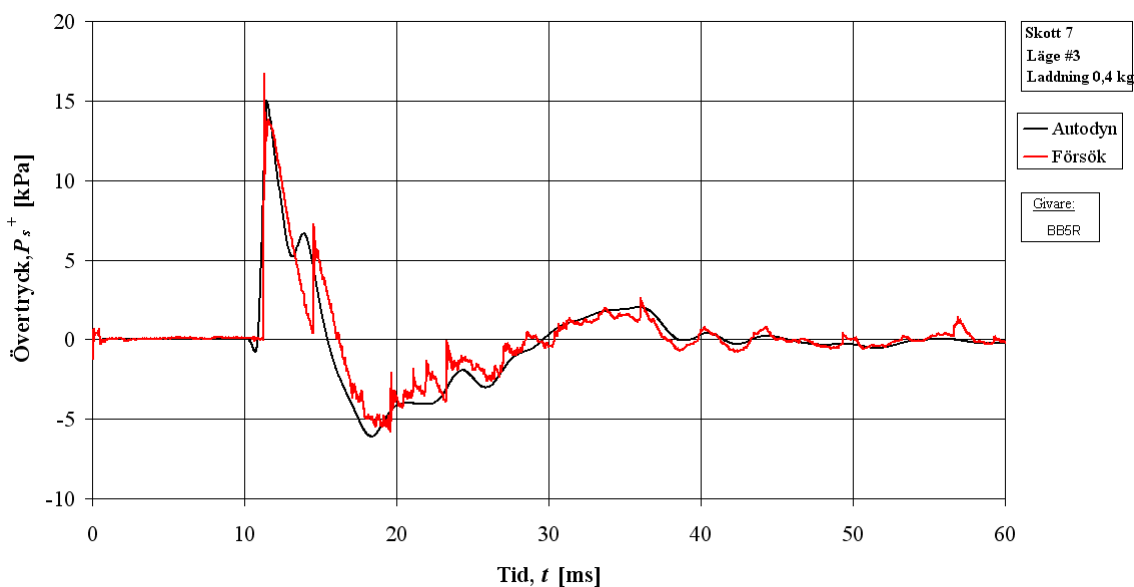
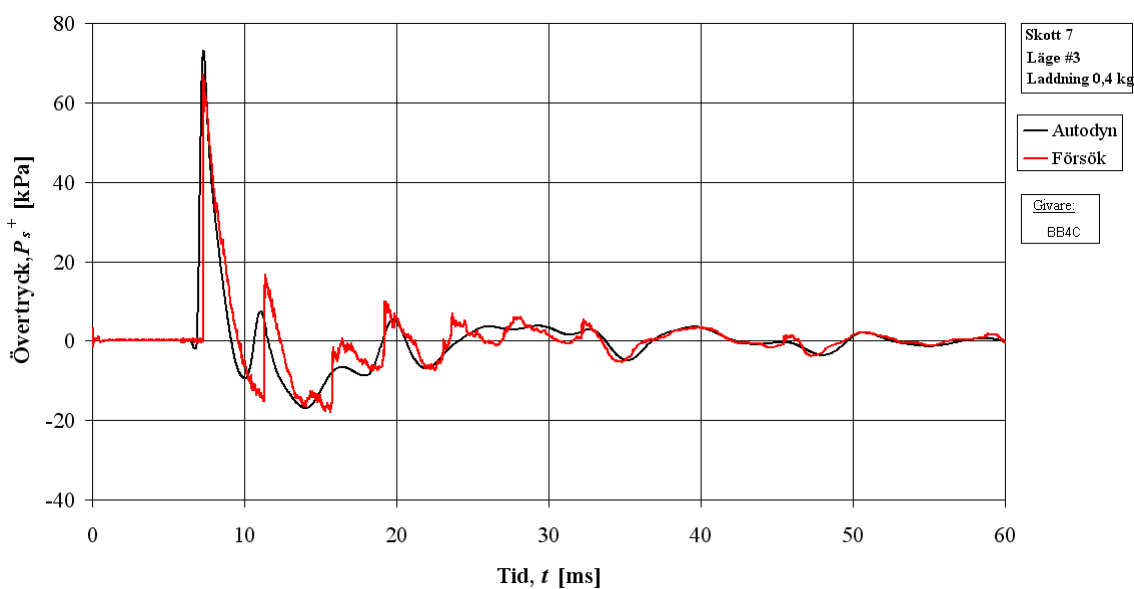
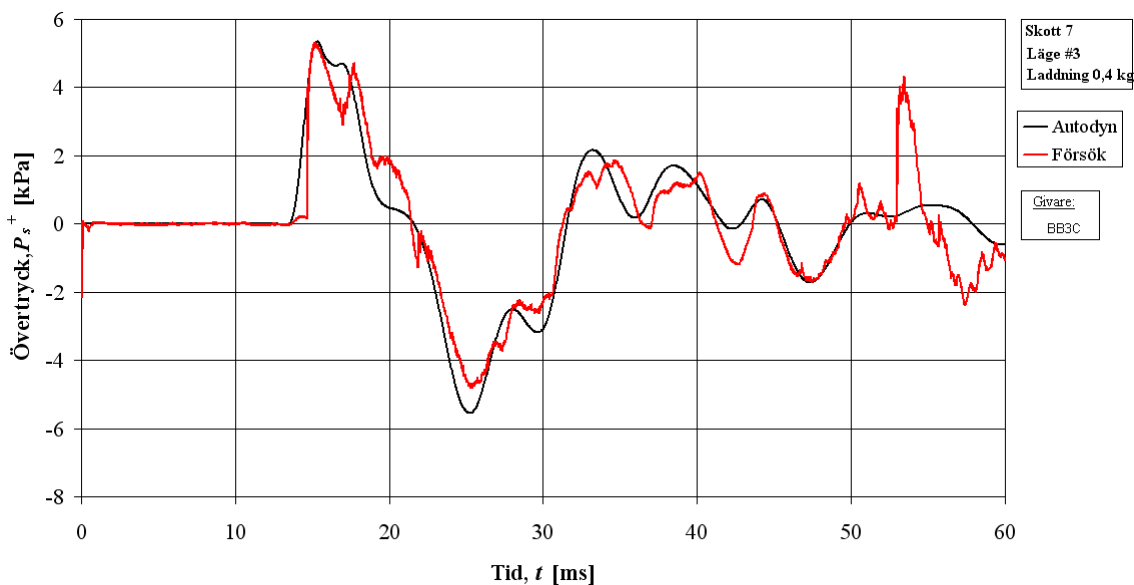


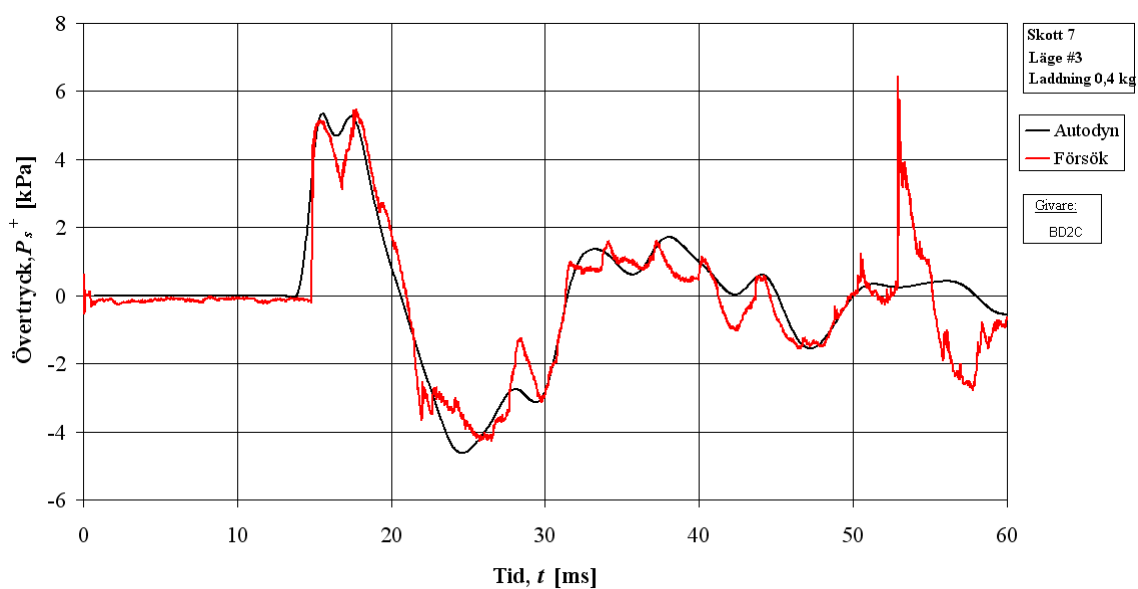
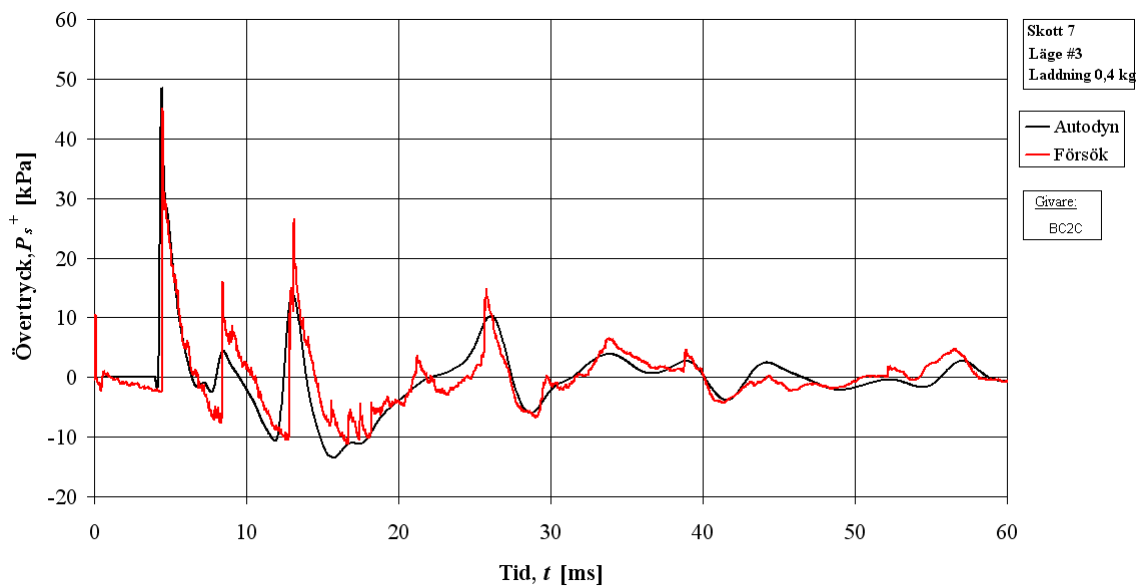






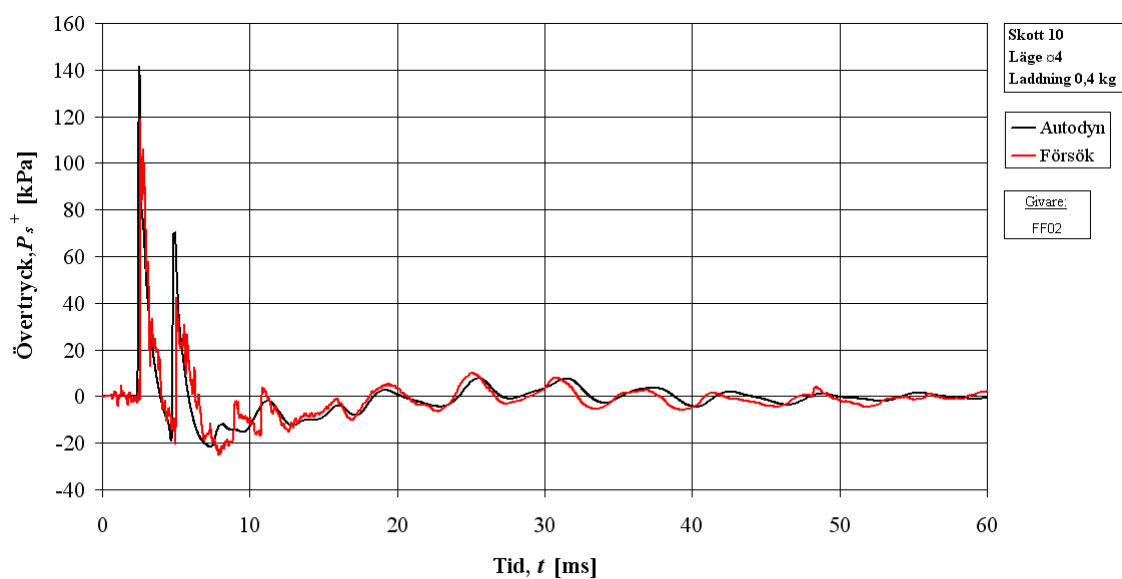
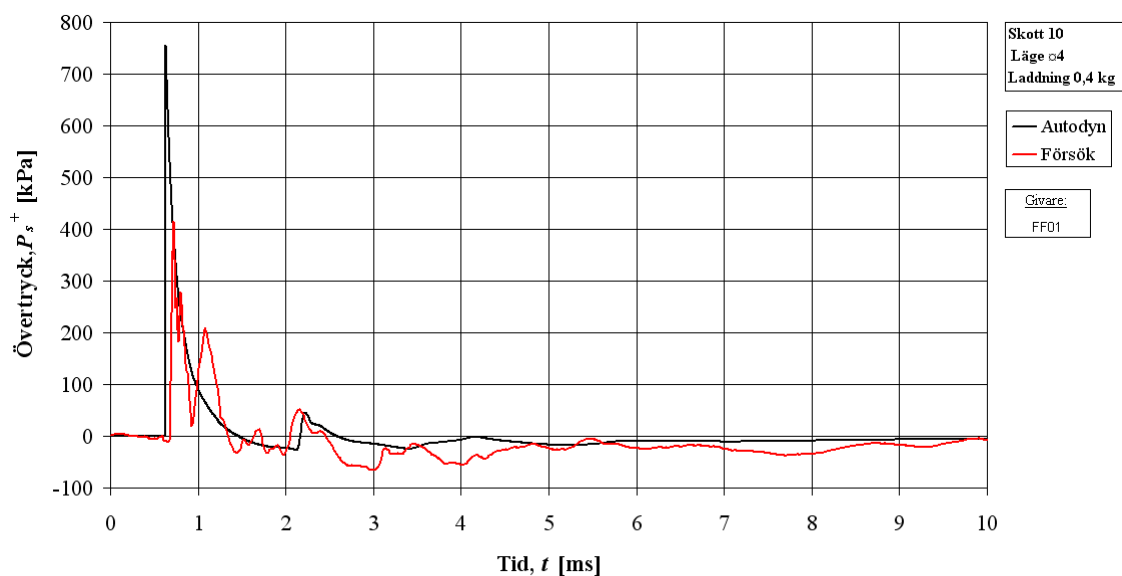


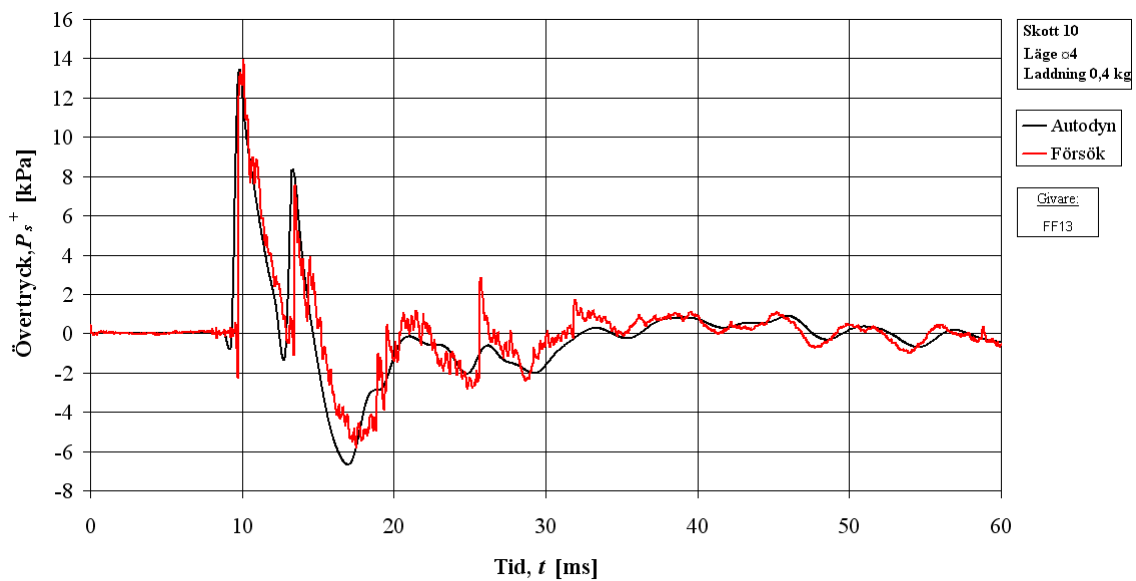
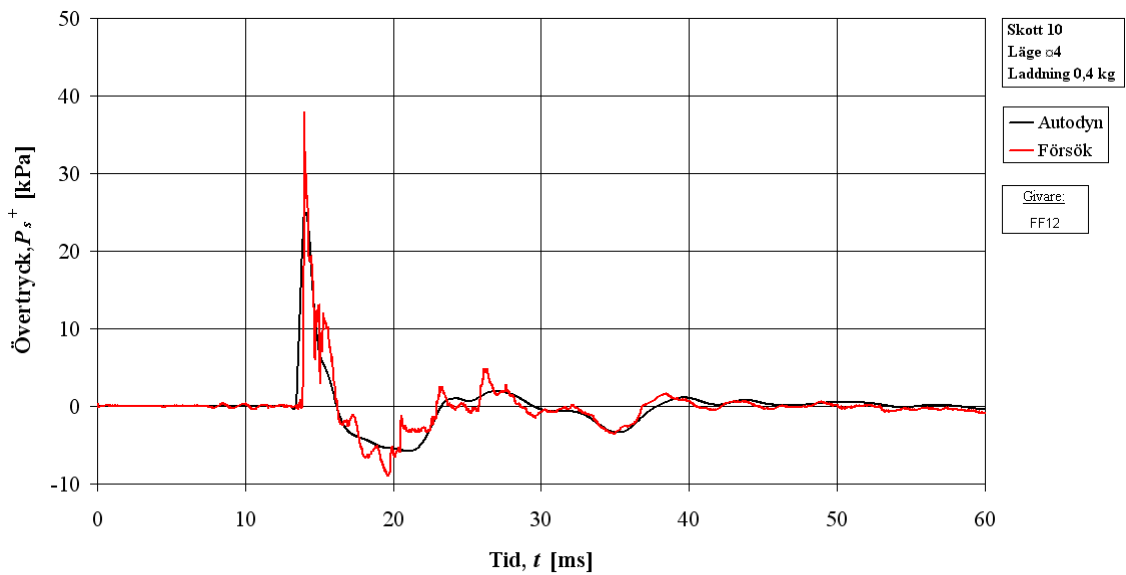
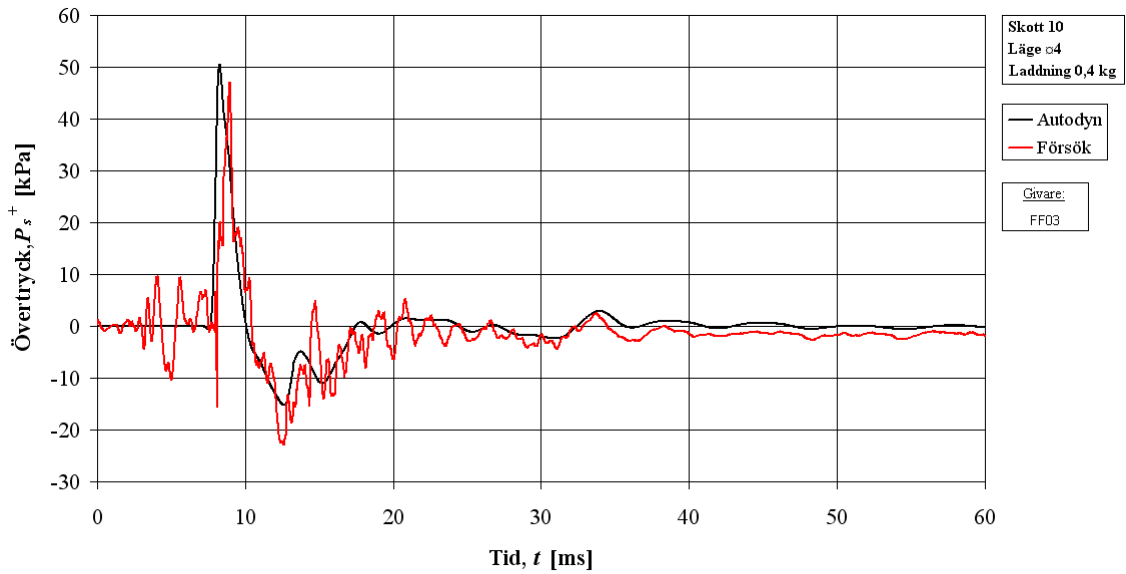


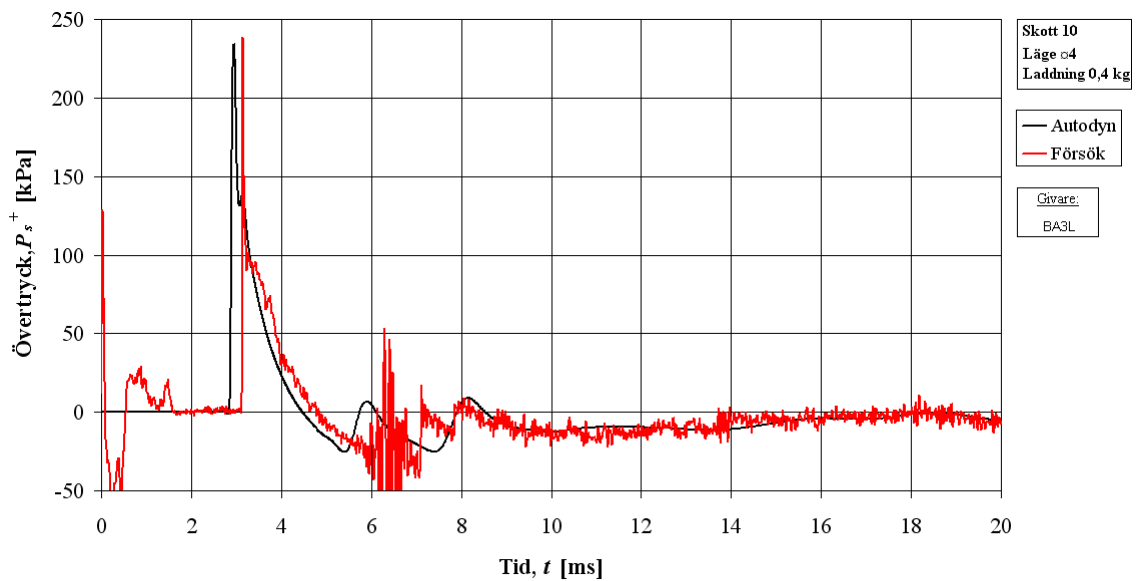
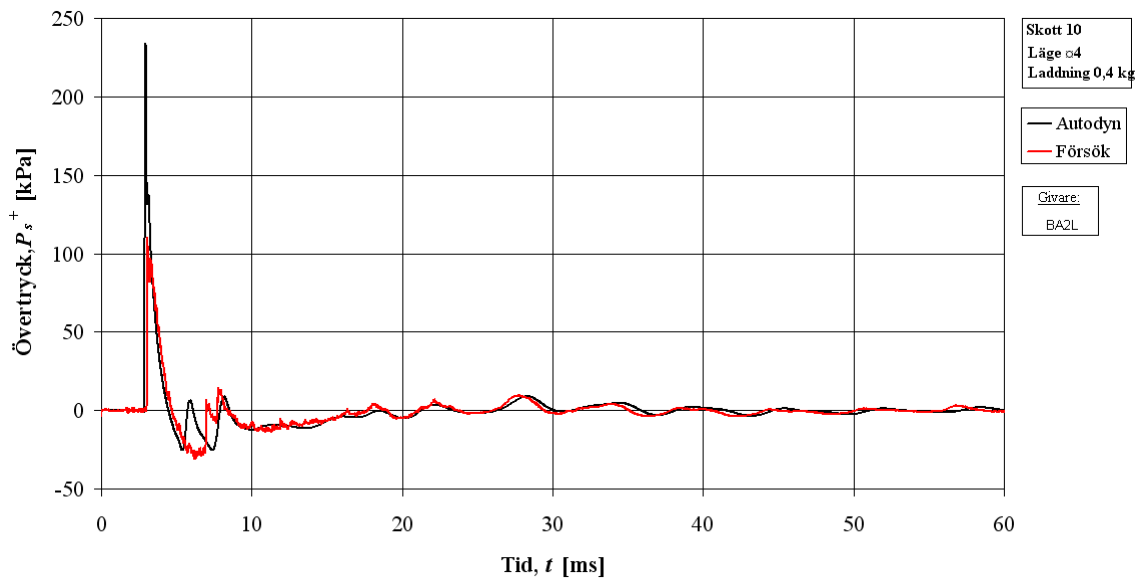
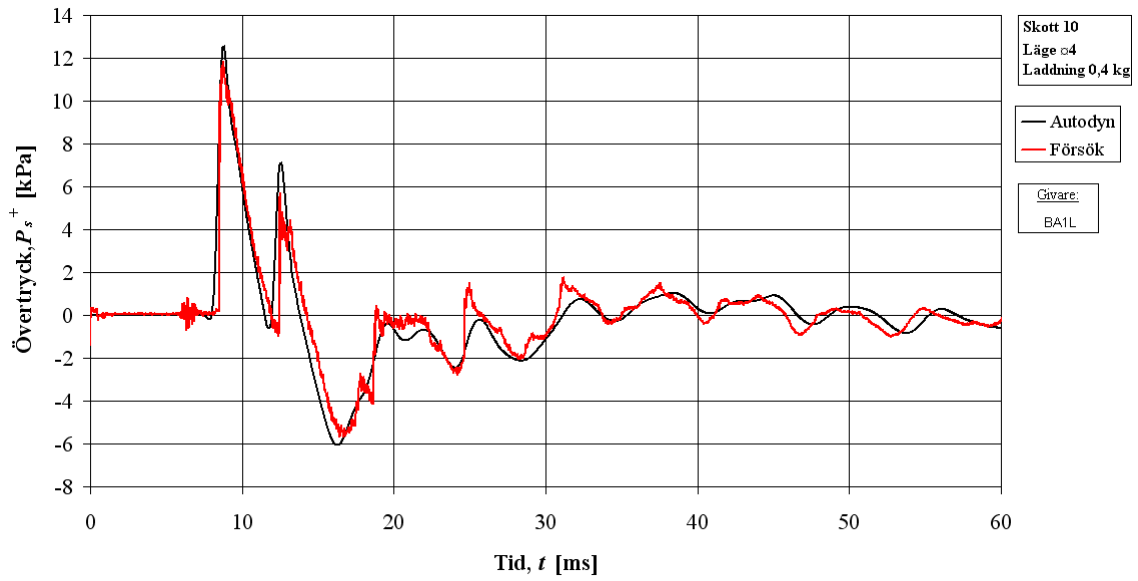


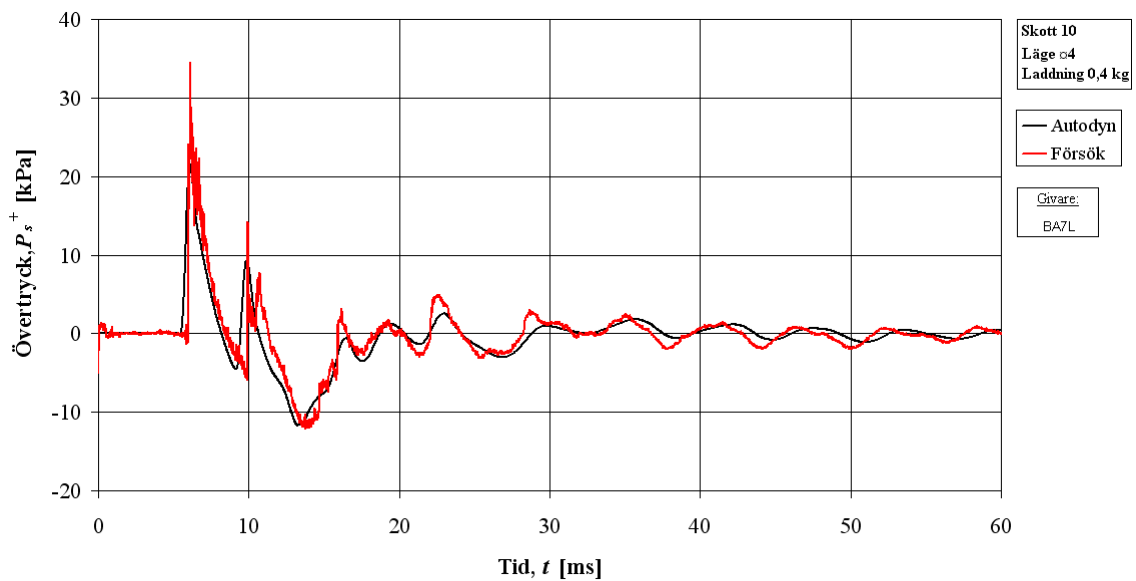
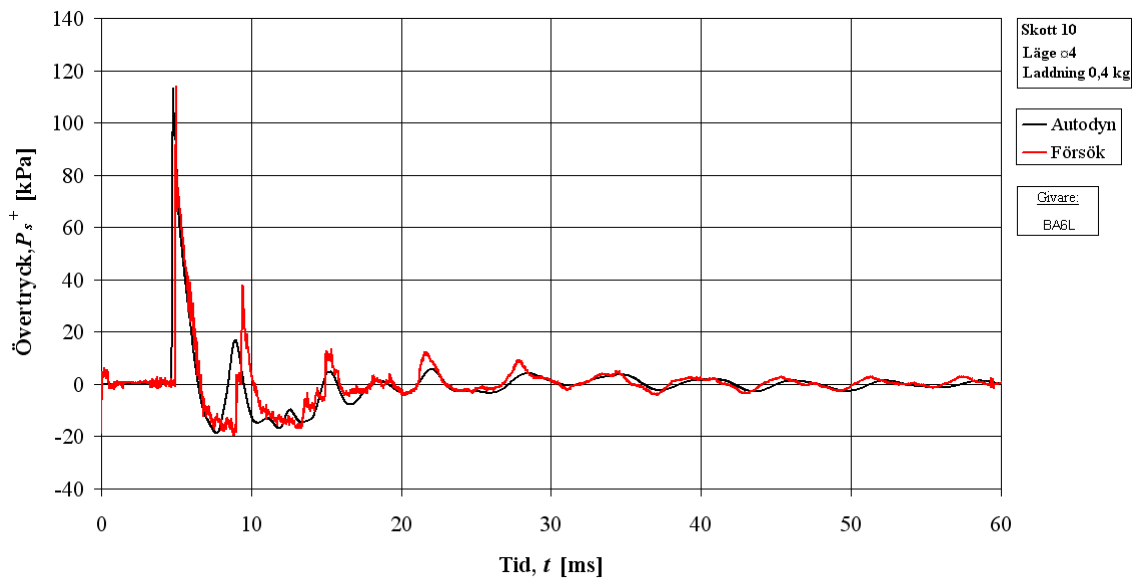
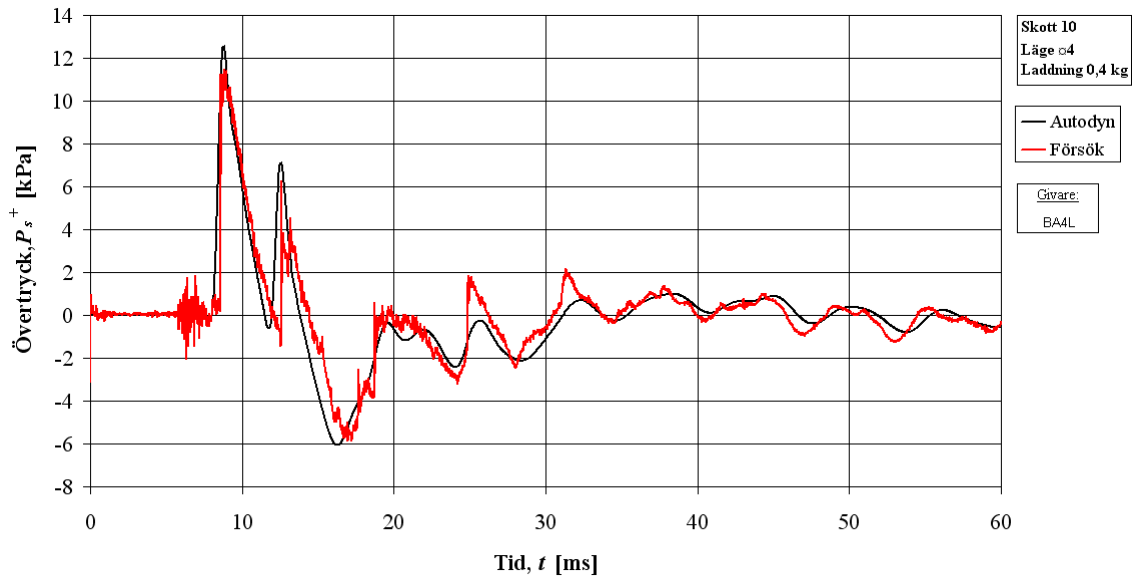
A.4 Skott #10 – 0,4 kg, läge 4

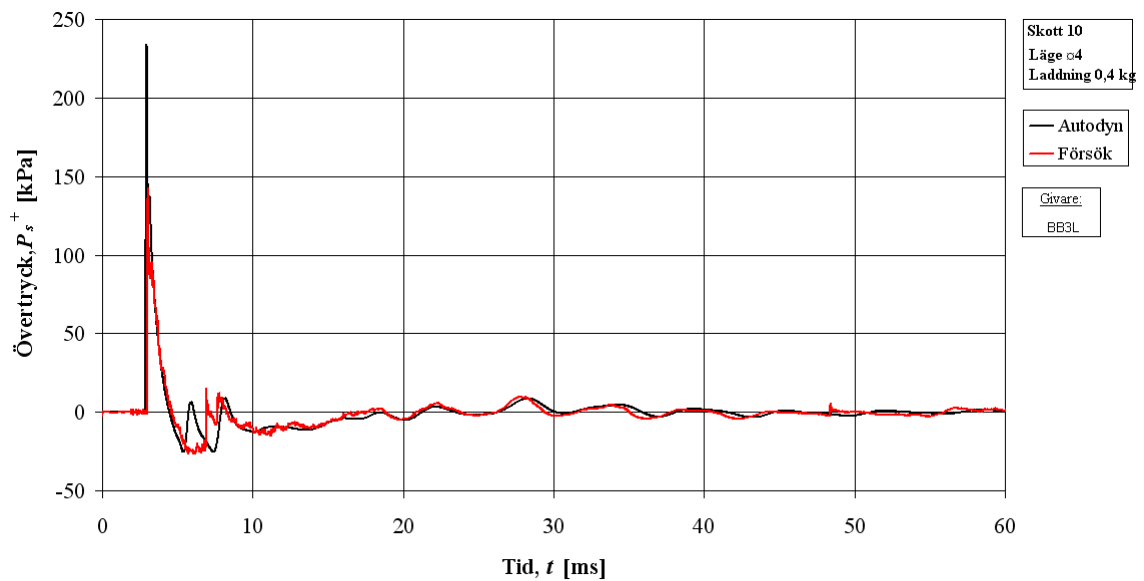
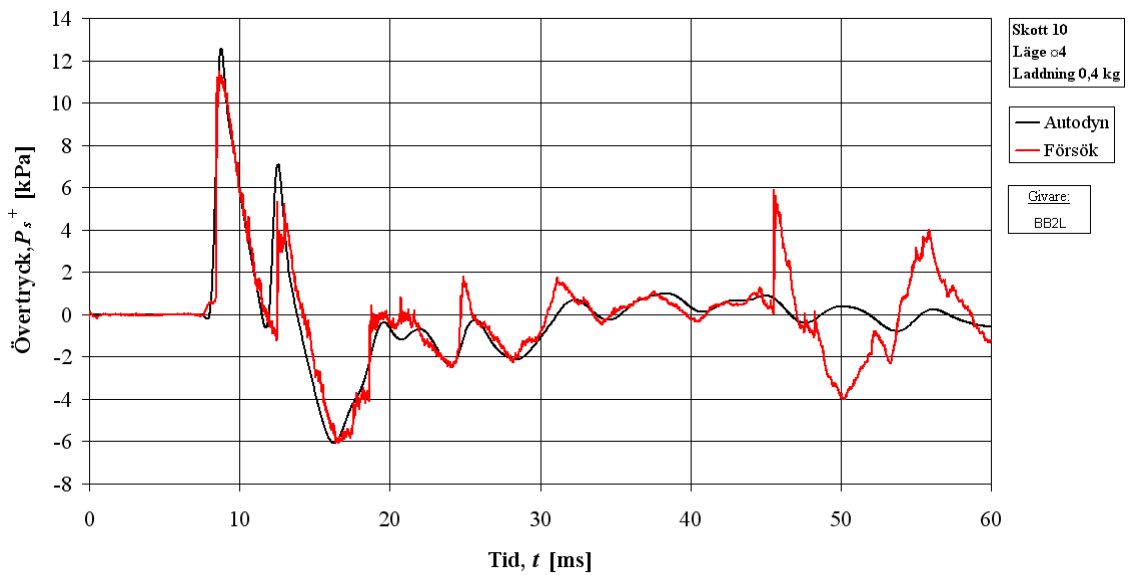
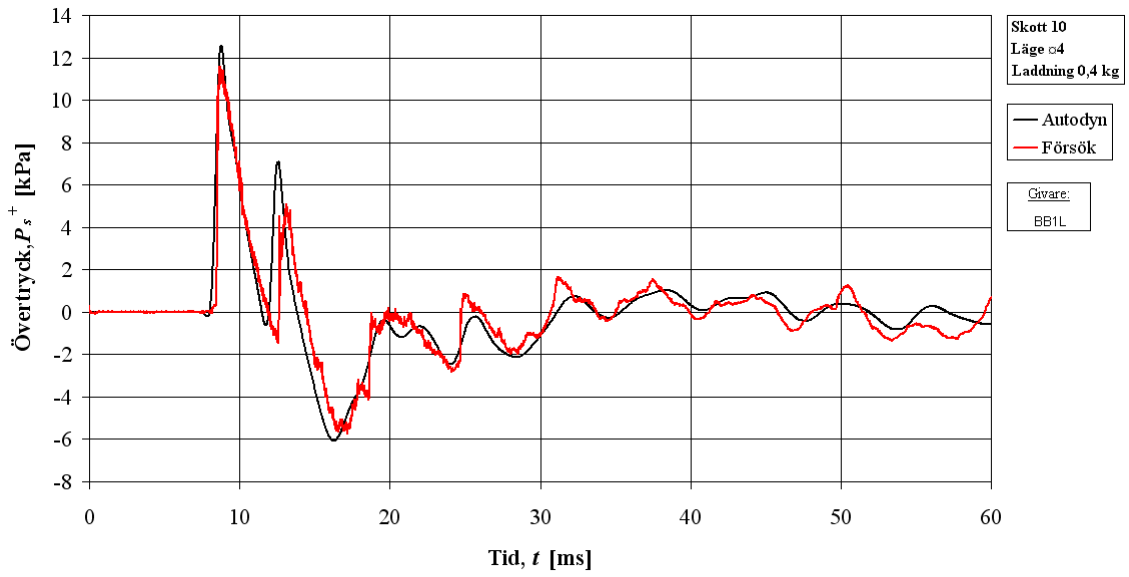
I nedanstående figurer visas tryck-tidskurvor från försök samt motsvarande analyse i Autodyn för skott #10 – 0,4 kg PETN i läge 4. För laddningens samt givarnas position se kapitel 2. I vissa fall har tryckgivaren i försöket inte fungerat tillfredsställande och detta markeras då i aktuell figur.

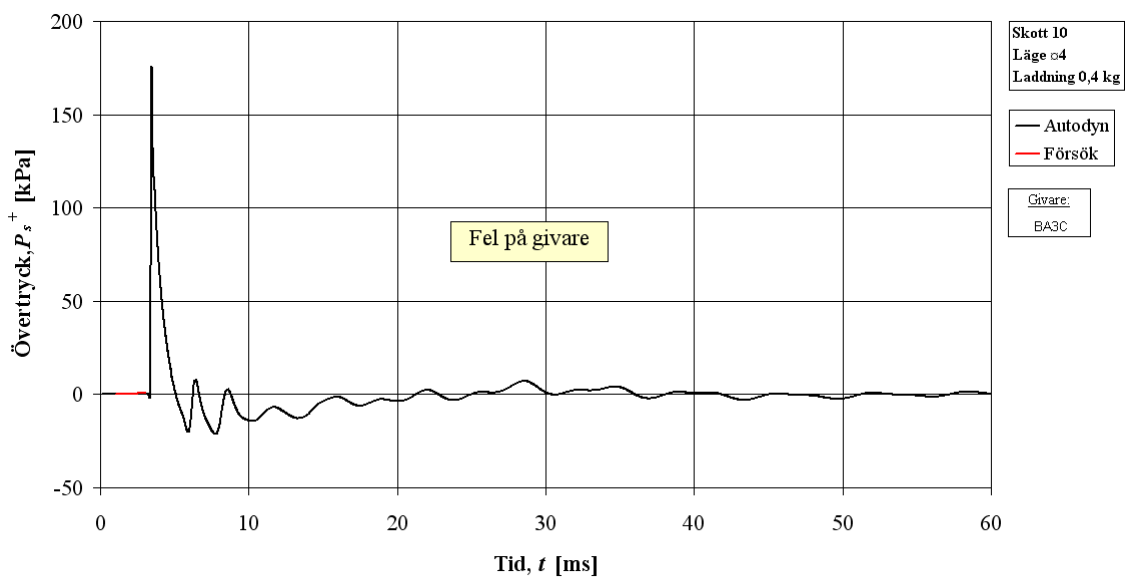
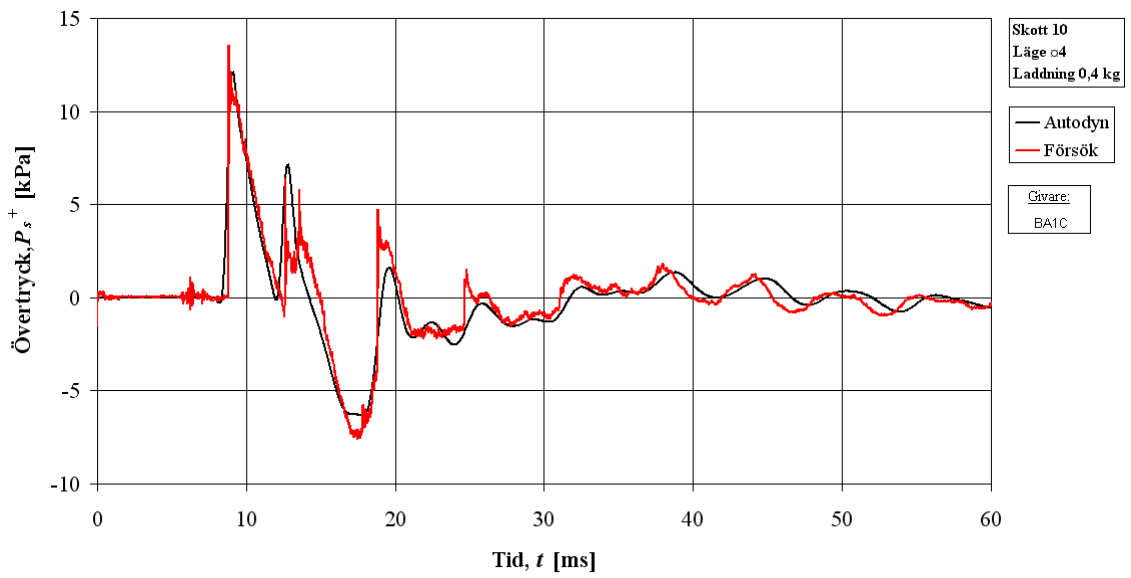
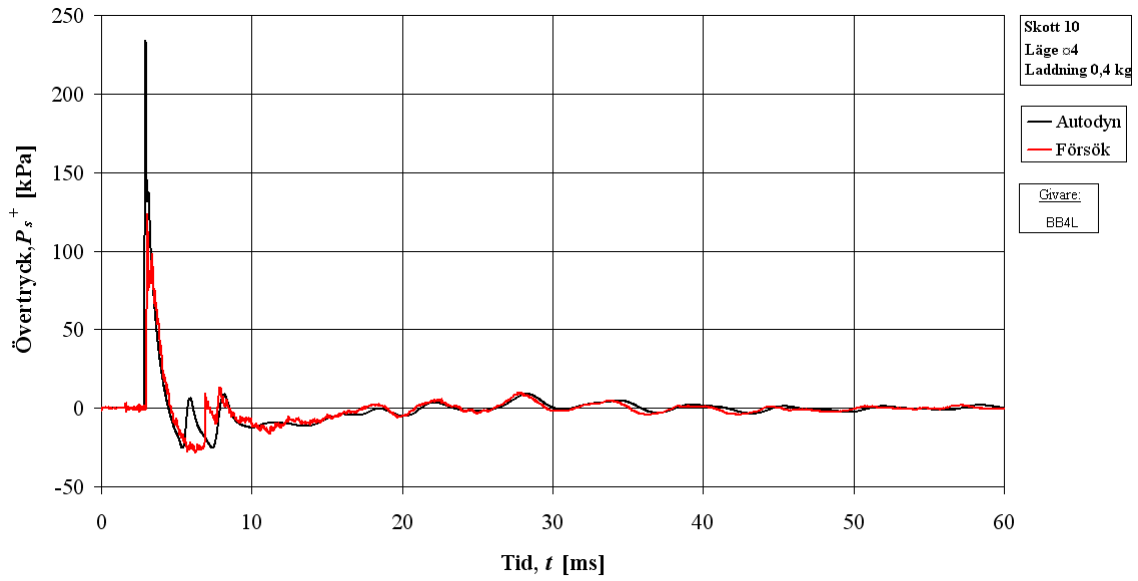


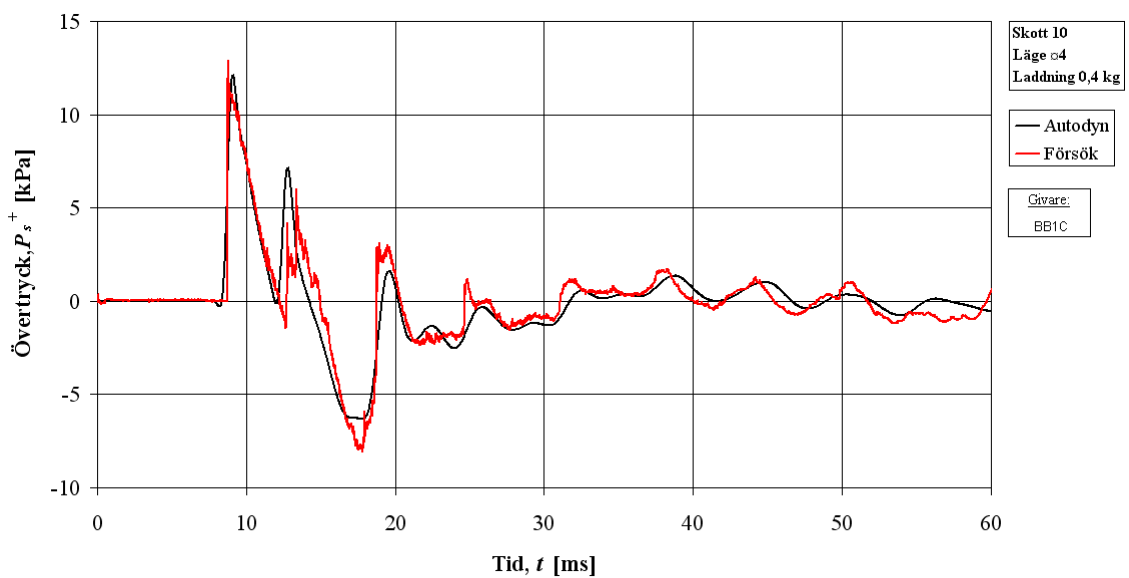
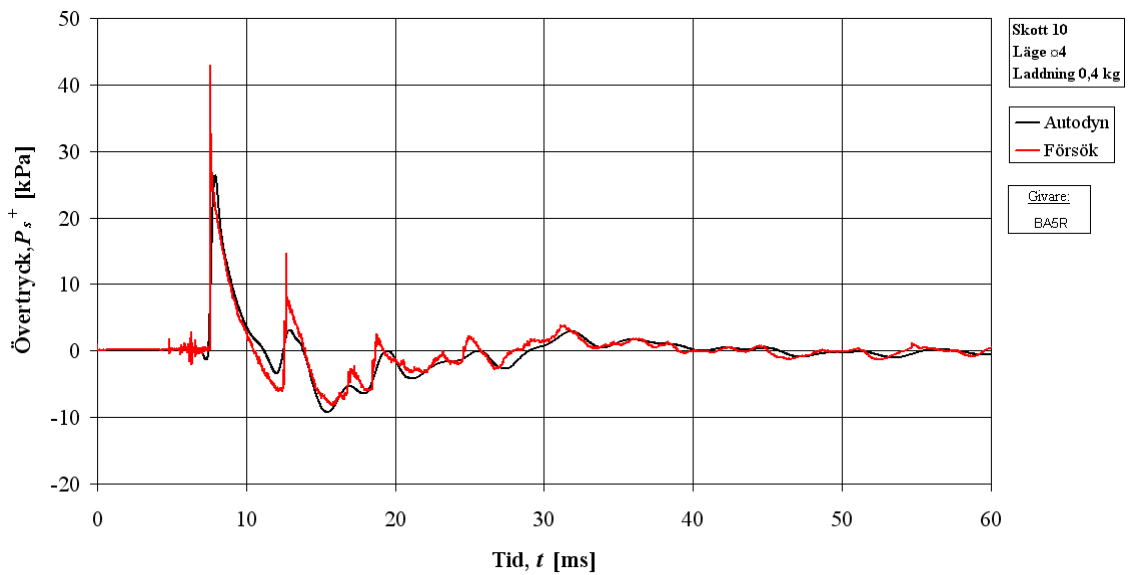
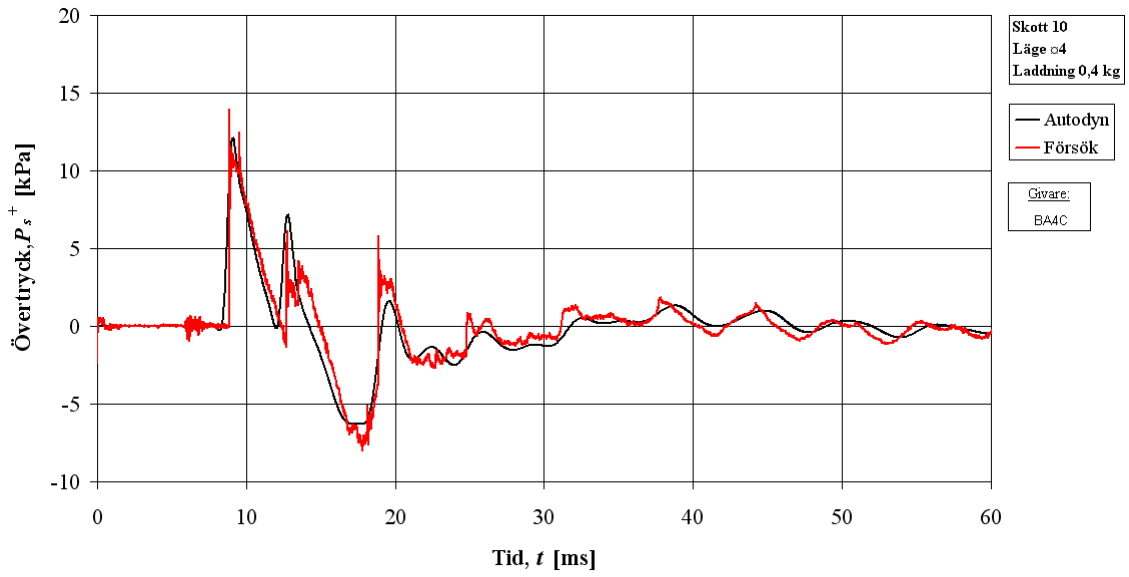


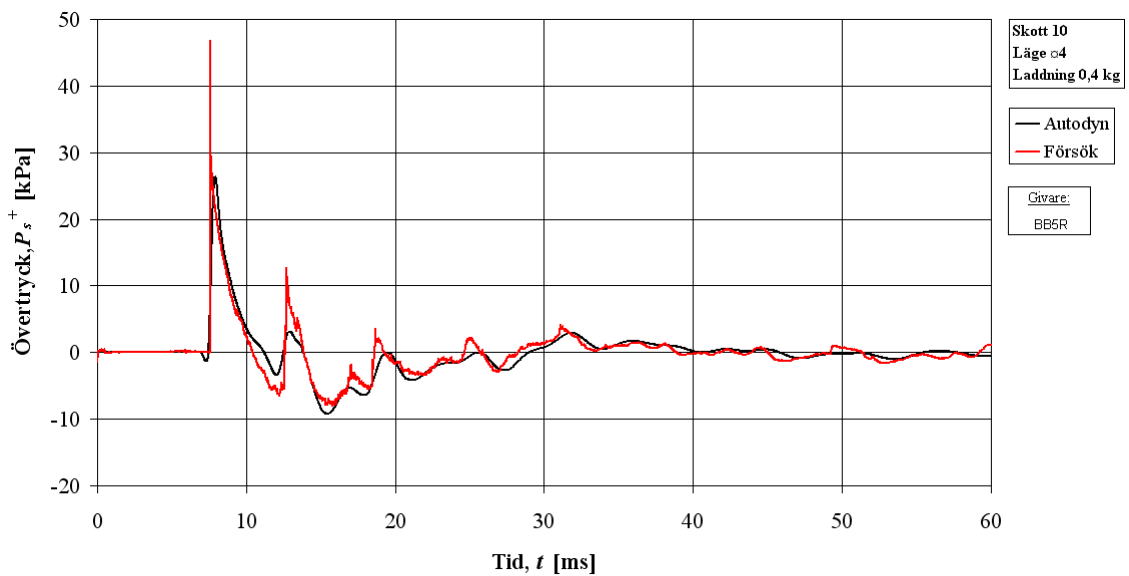
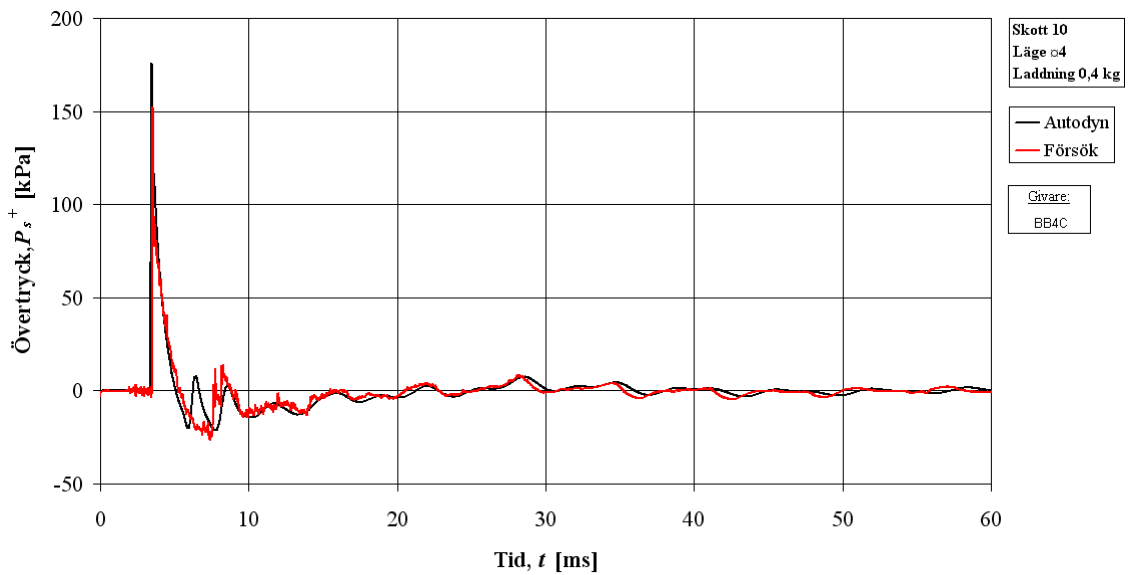
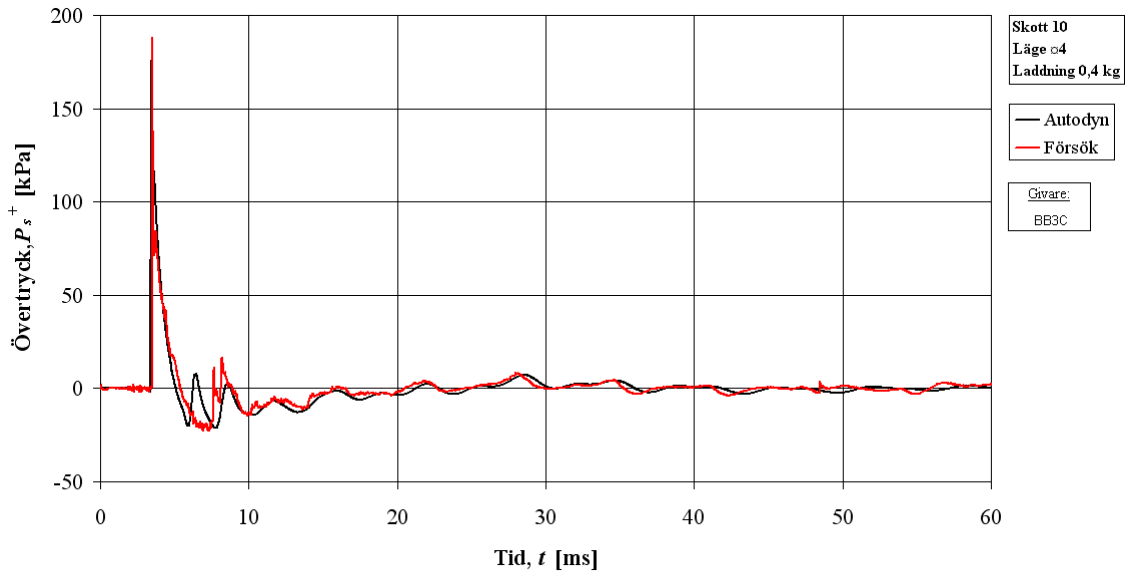


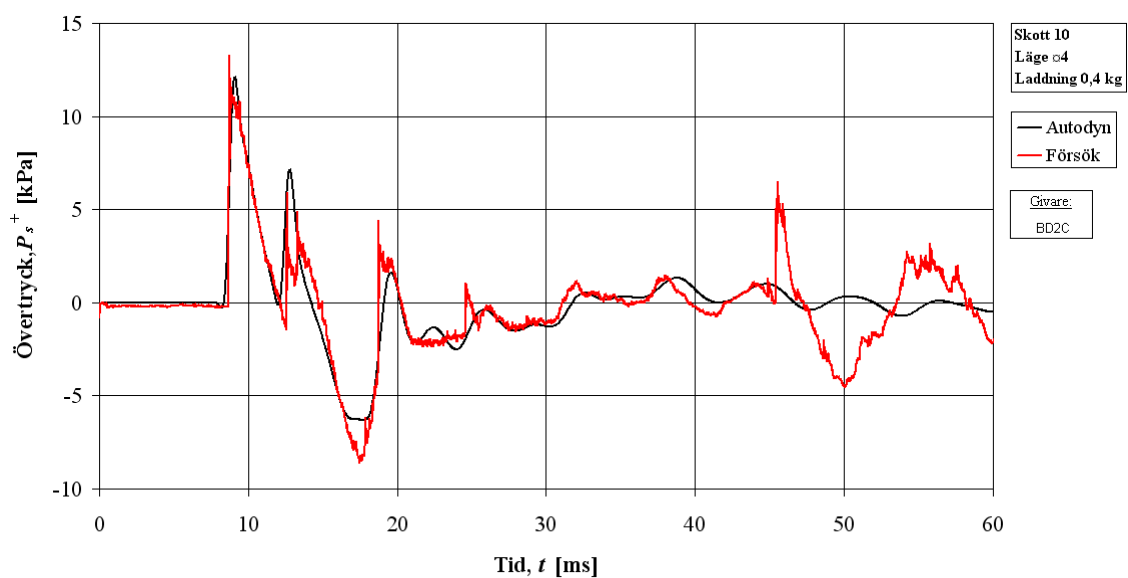
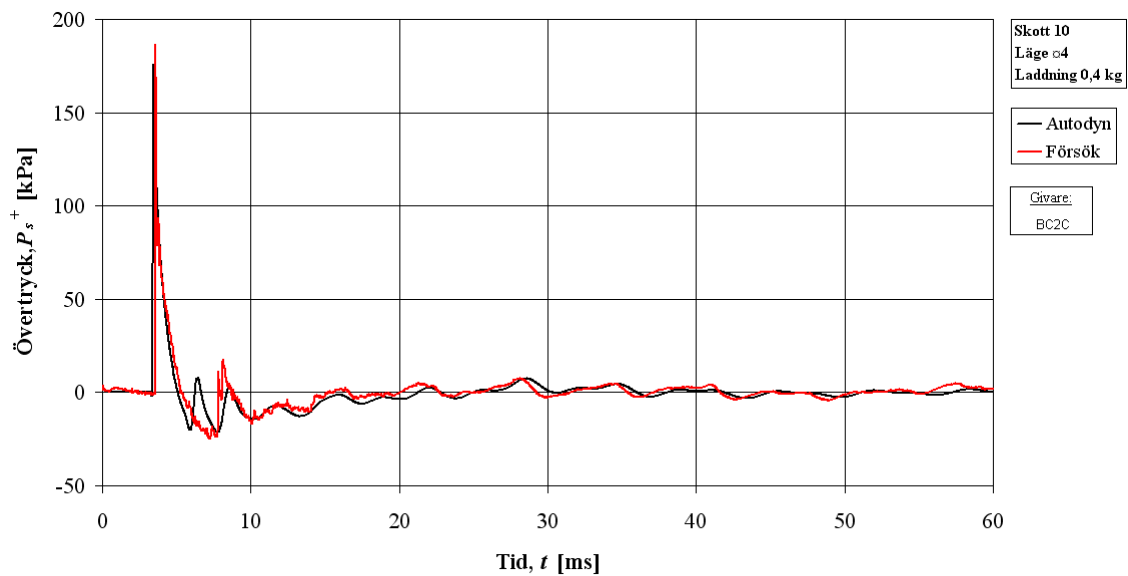






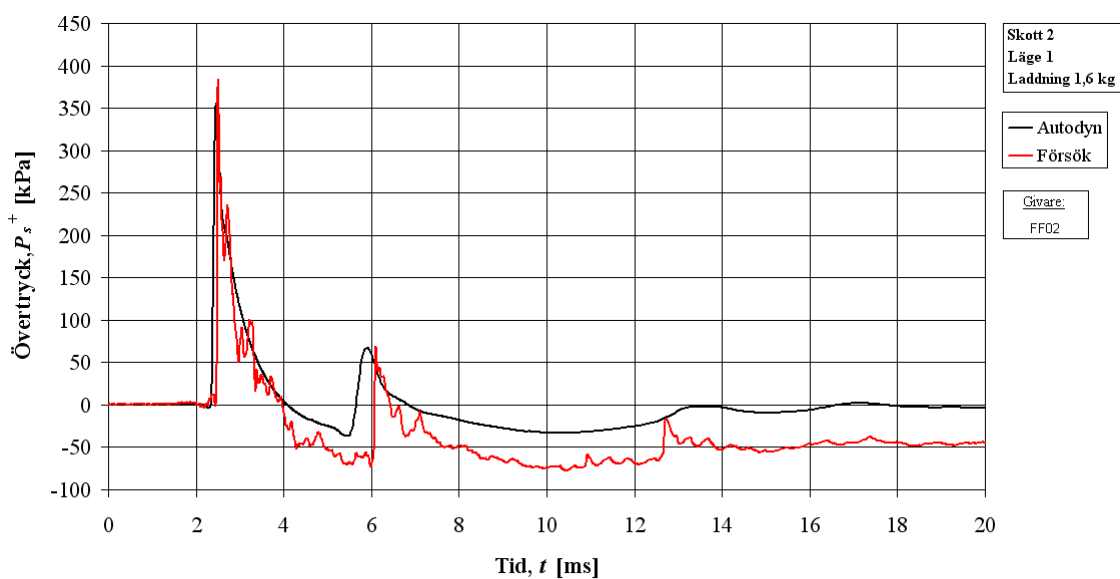
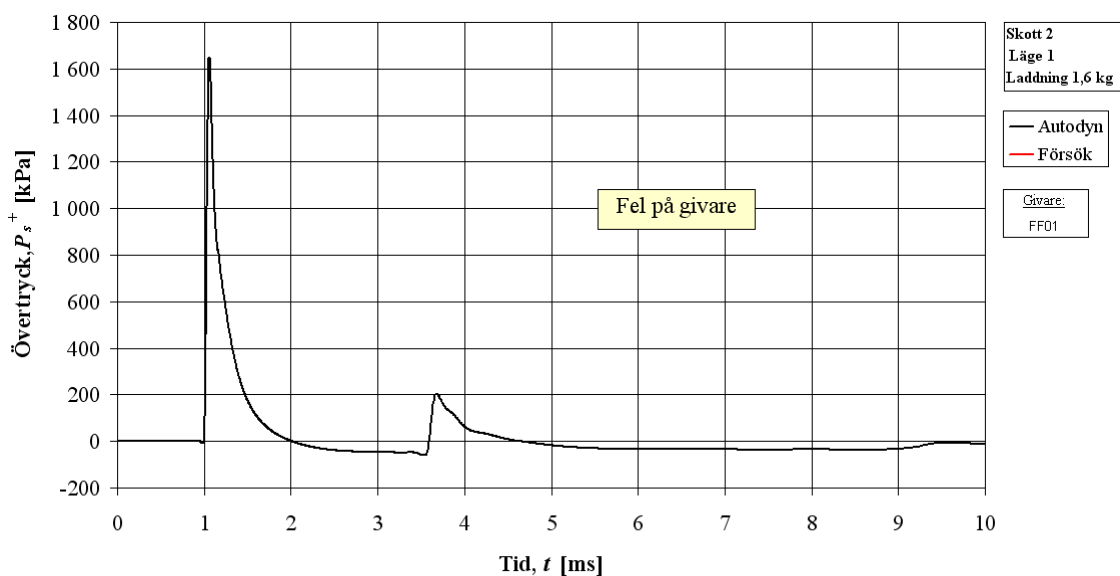


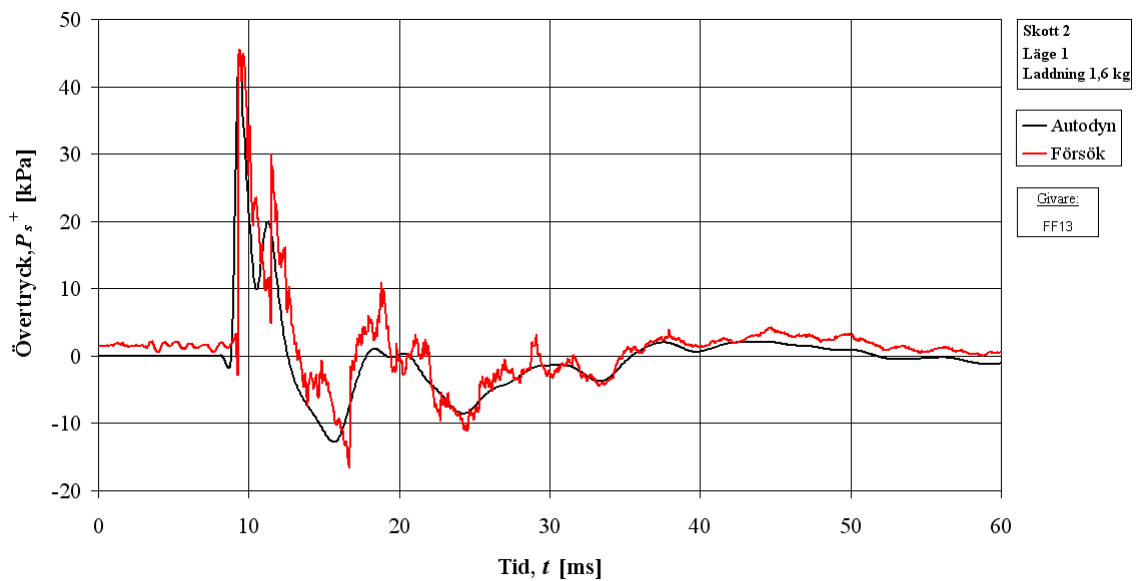
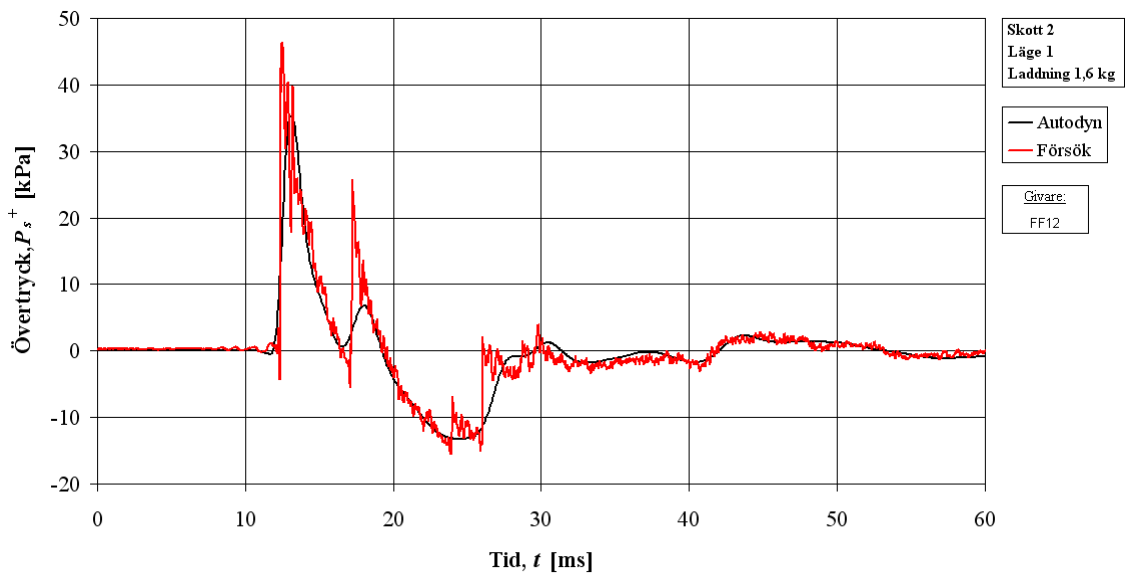
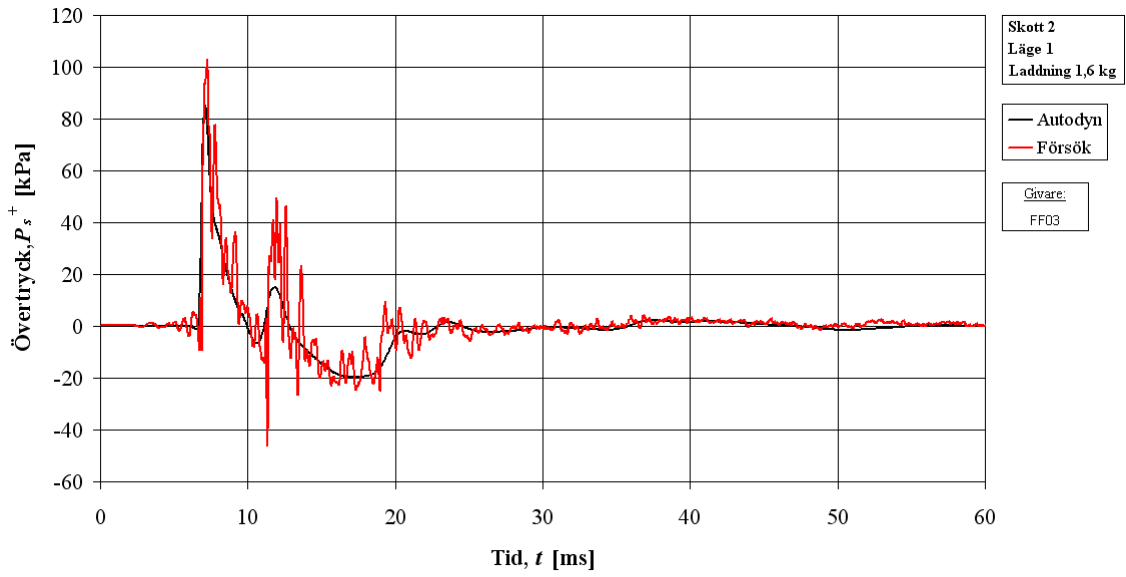


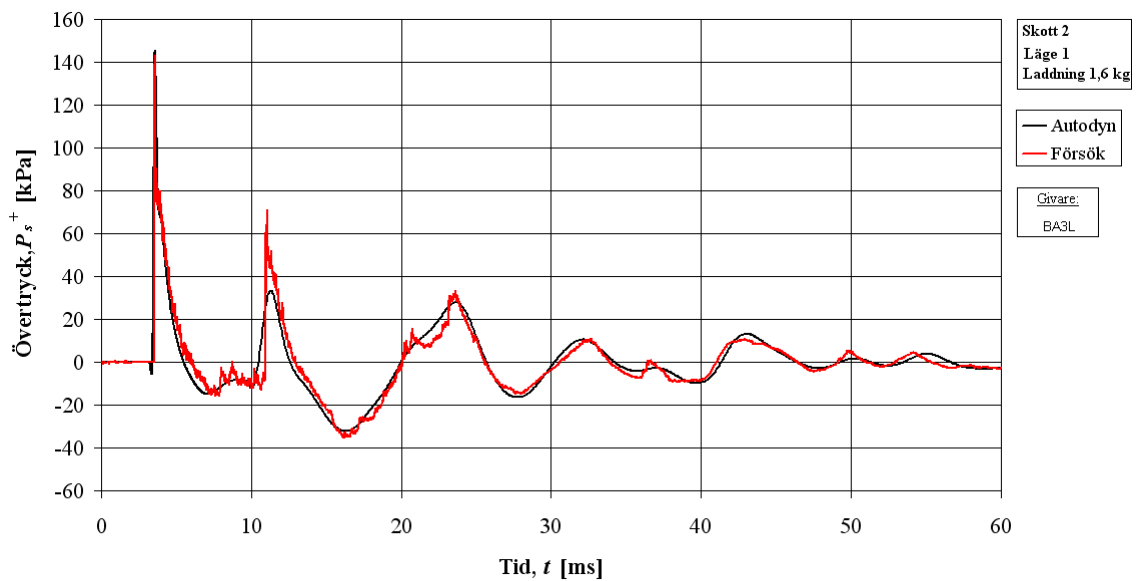
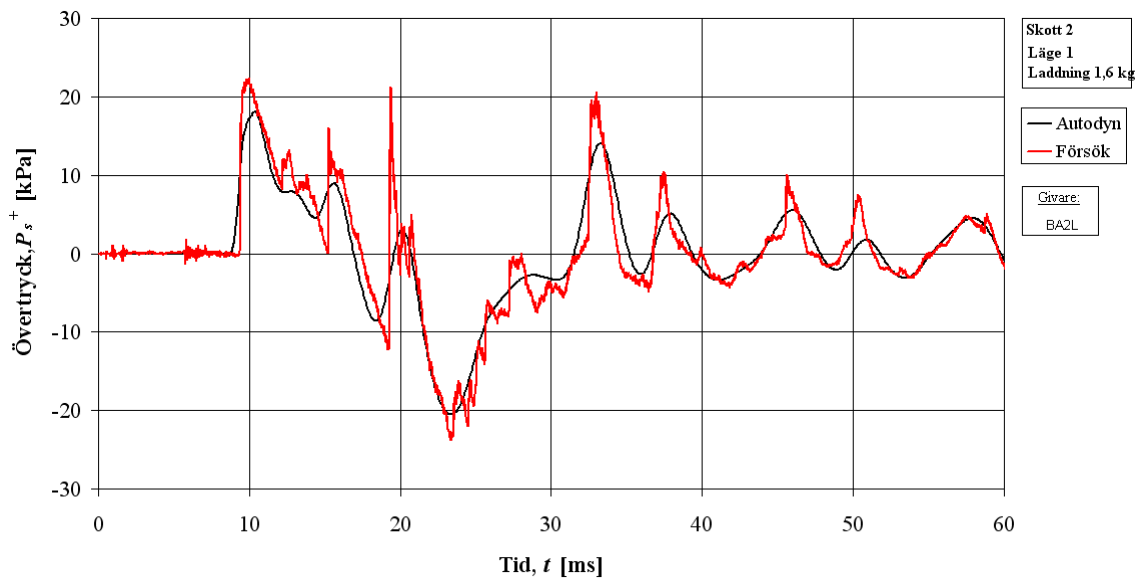
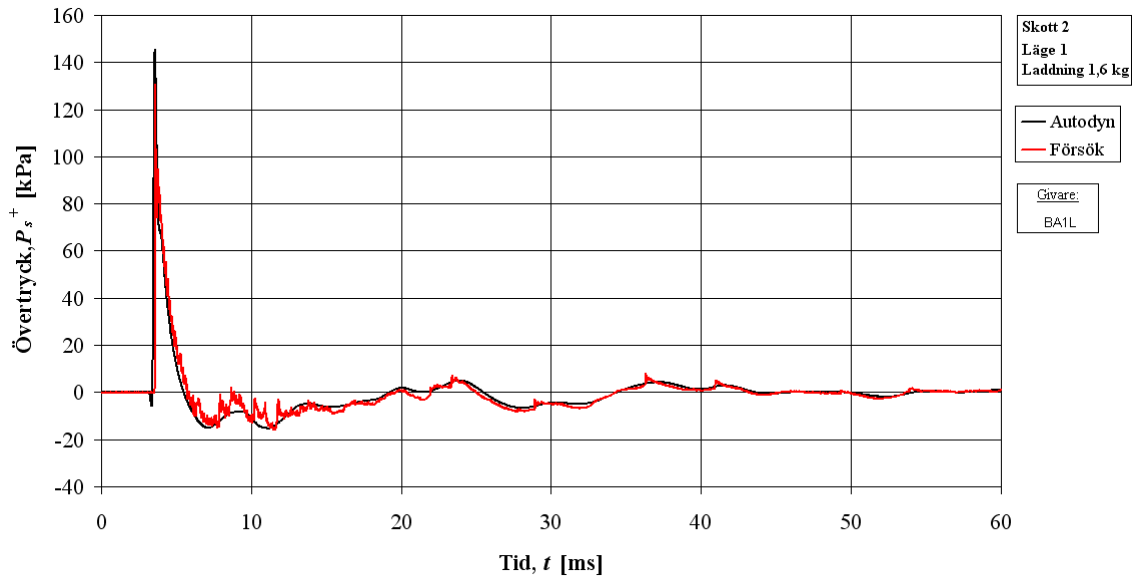


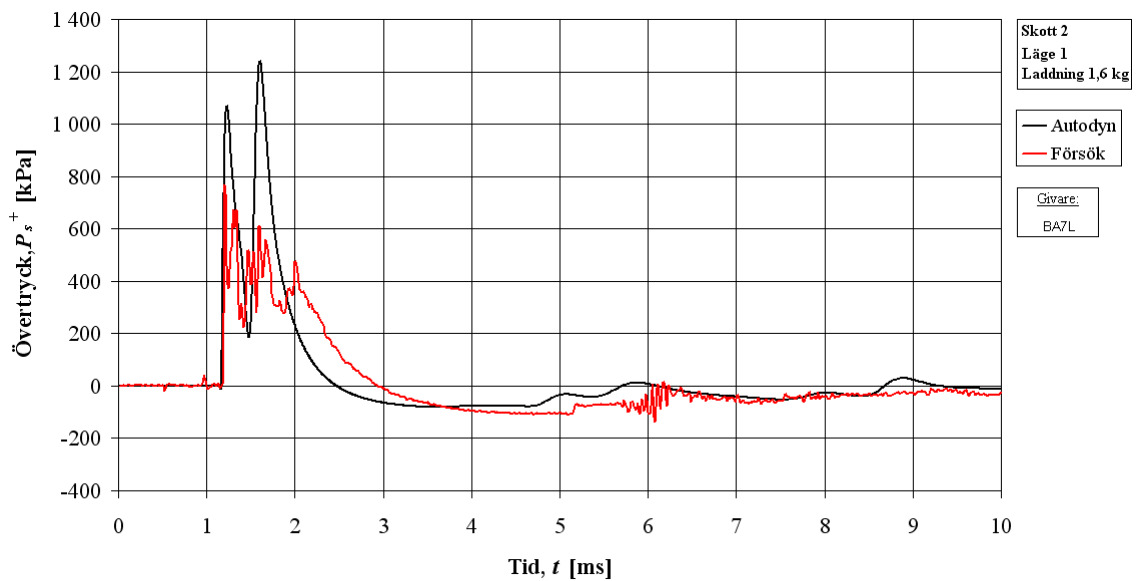
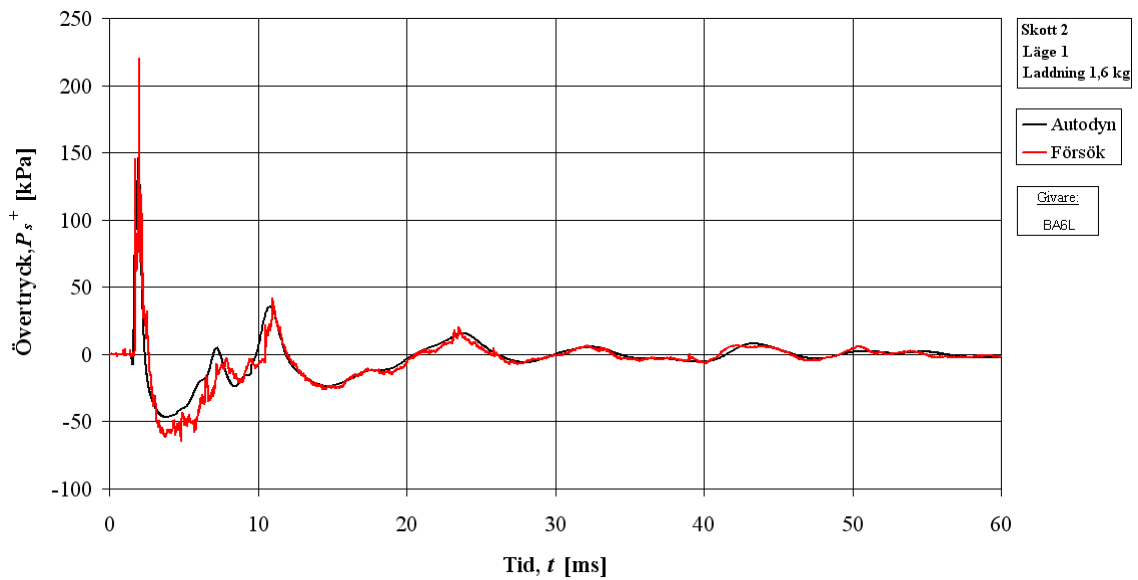
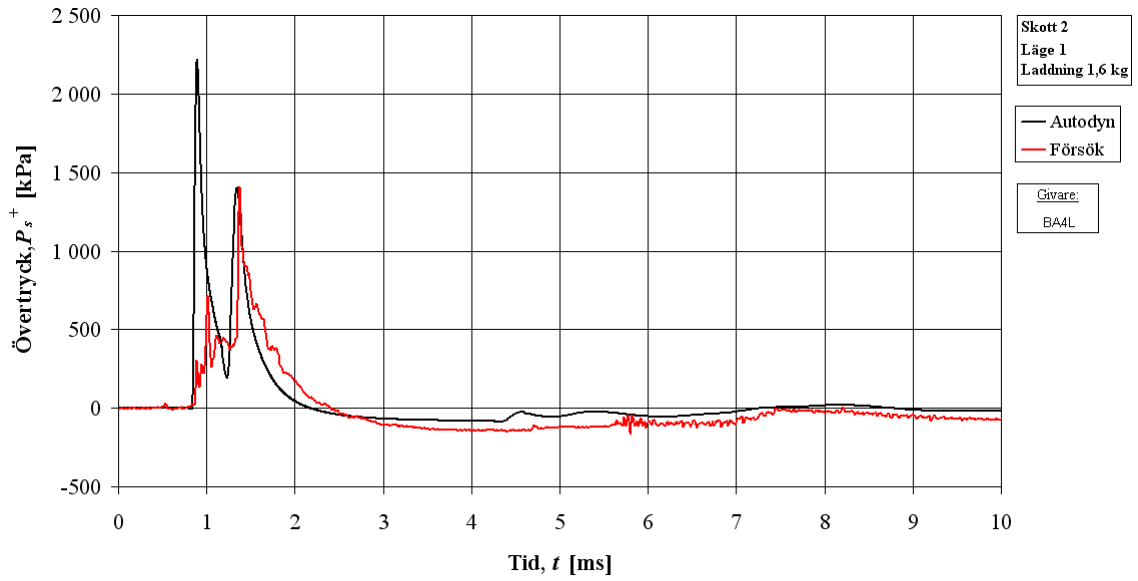
A.5 Skott #2 – 1,6 kg, läge 1

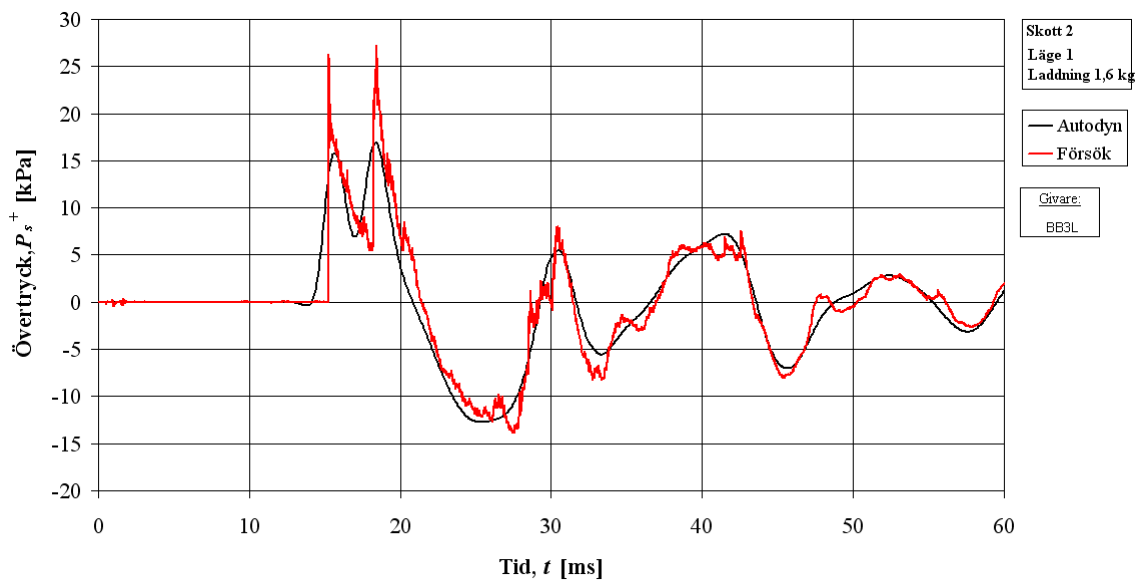
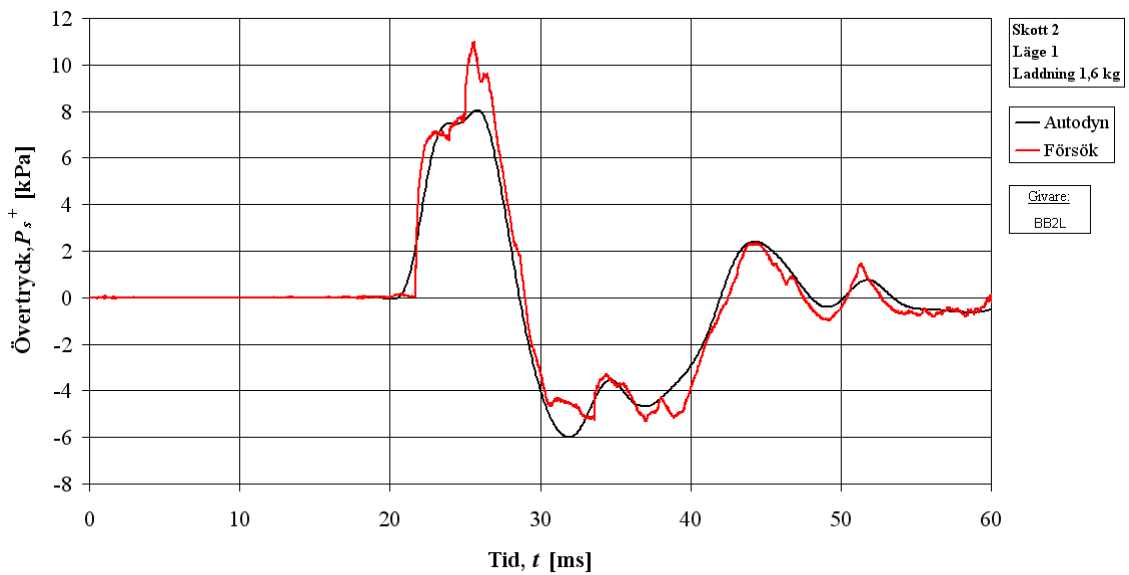
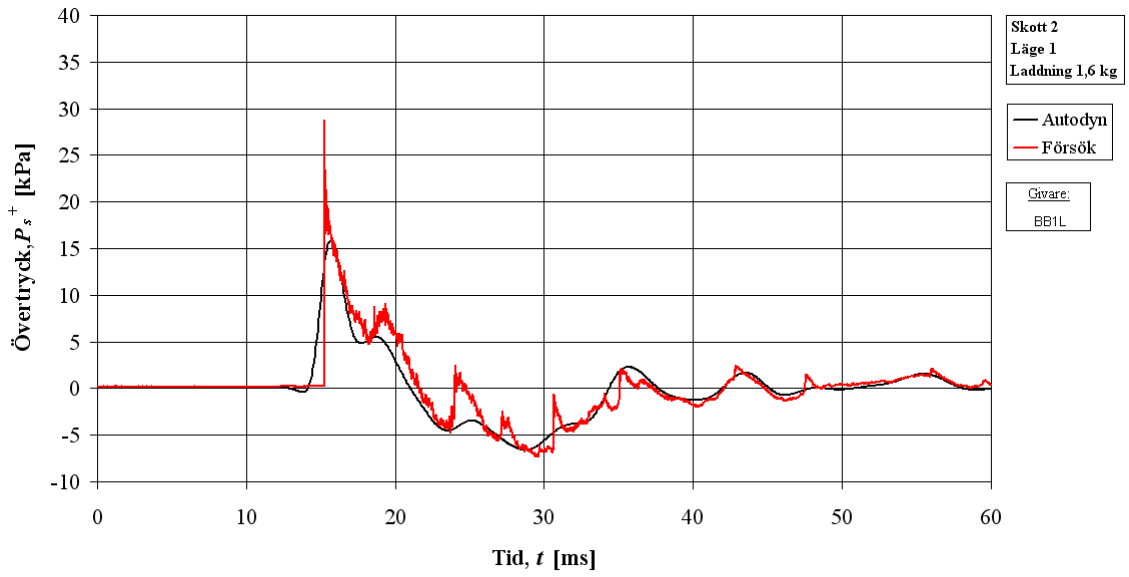
I nedanstående figurer visas tryk-tidskurvor från försök samt motsvarande analyse i Autodyn för skott #2 – 1,6 kg PETN i läge 1. För laddningens samt givarnas position se kapitel 2. I vissa fall har tryckgivaren i försöket inte fungerat tillfredsställande och detta markeras då i aktuell figur.

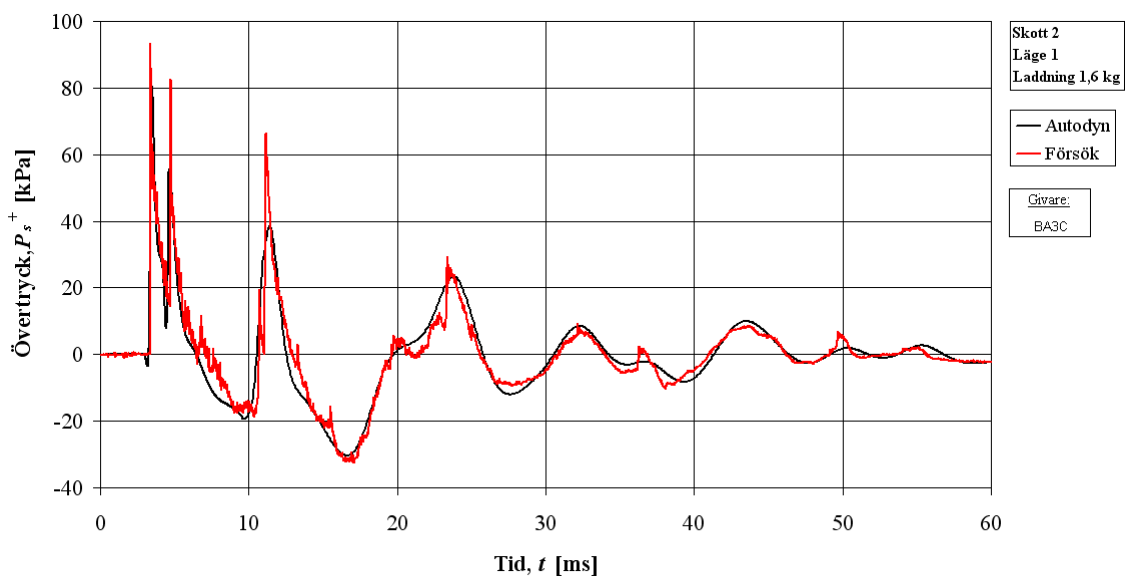
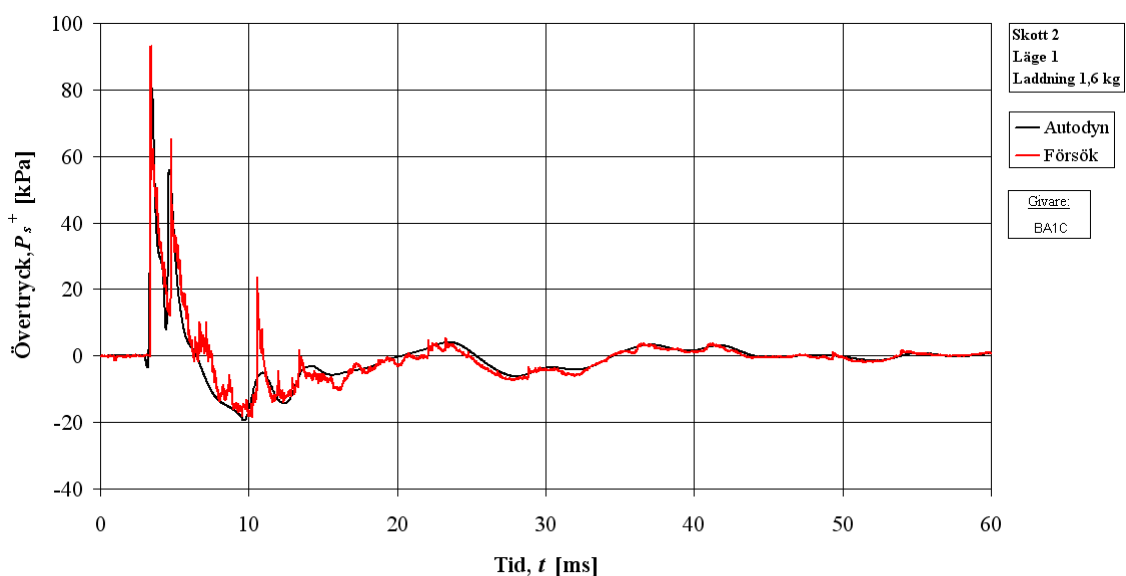
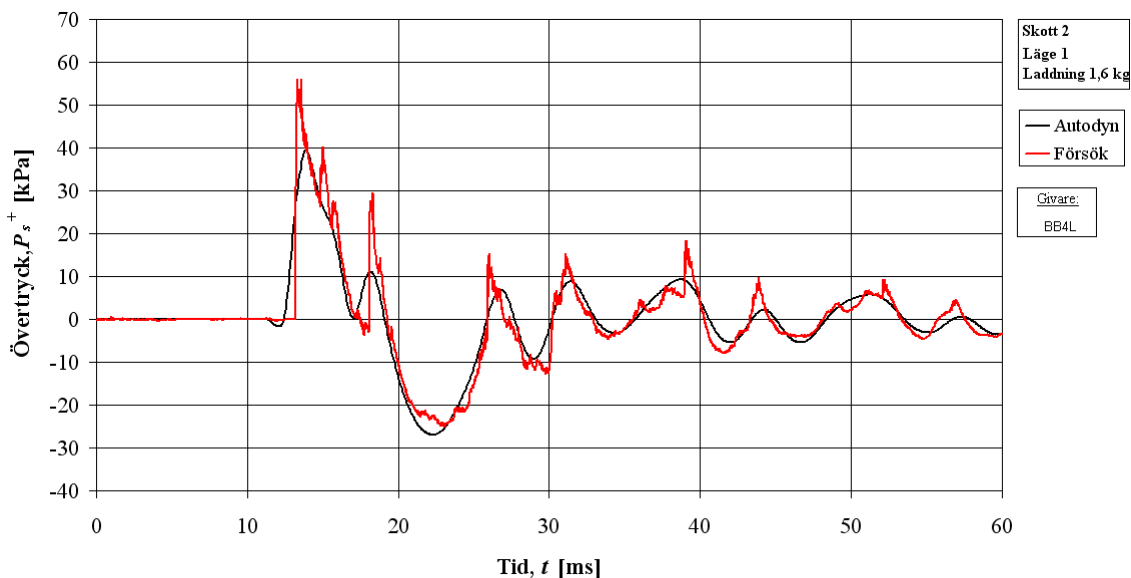


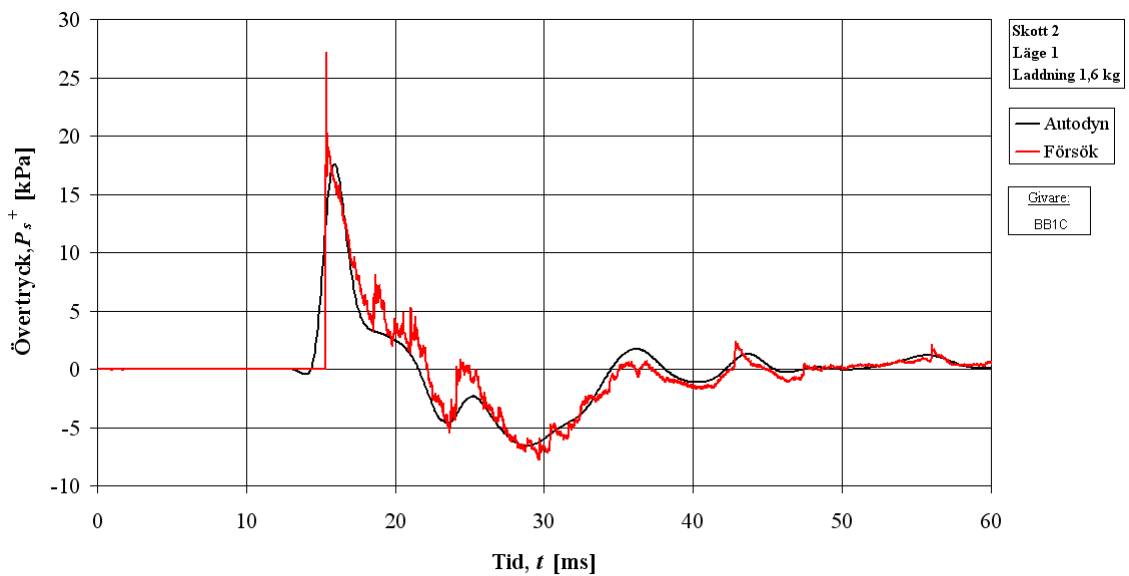
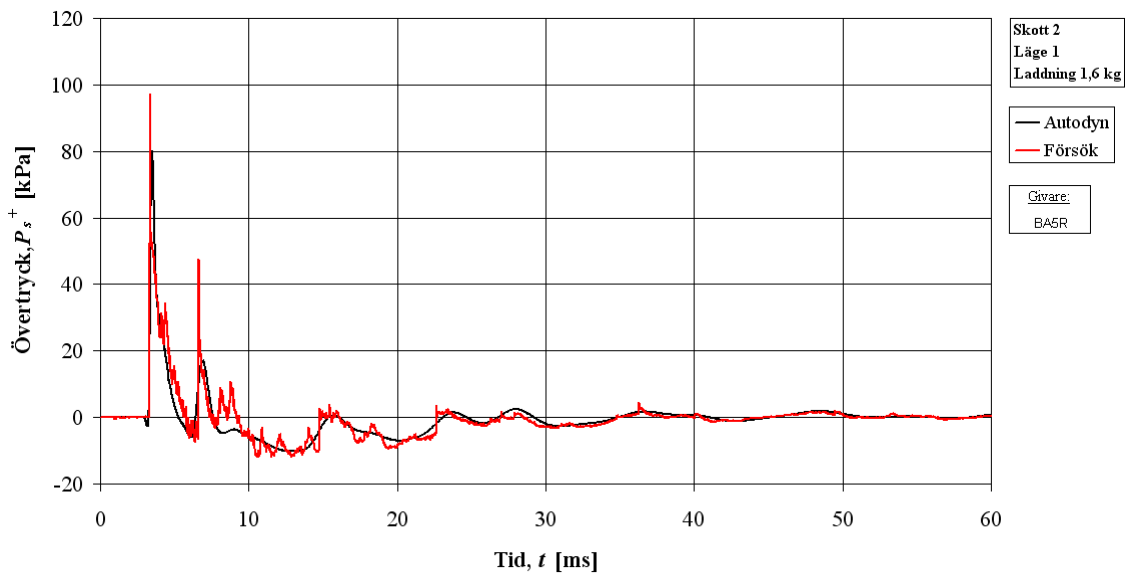
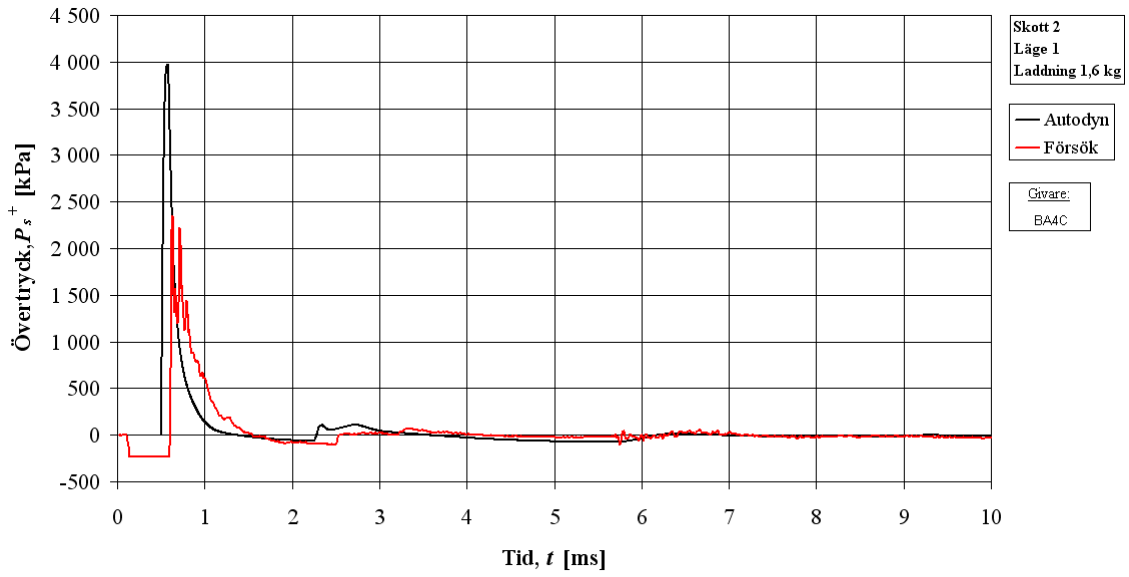


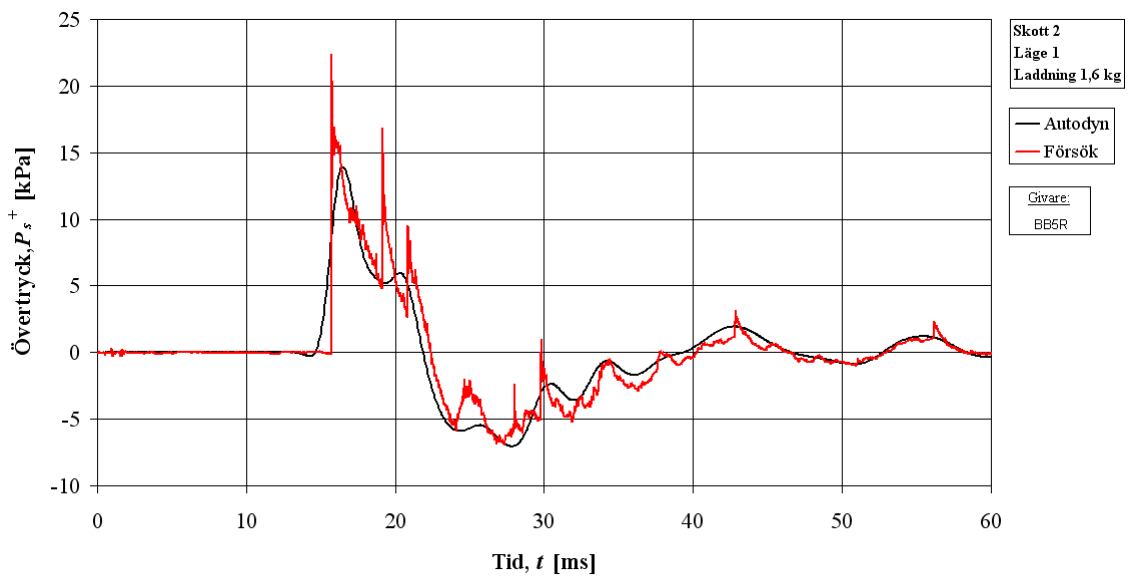
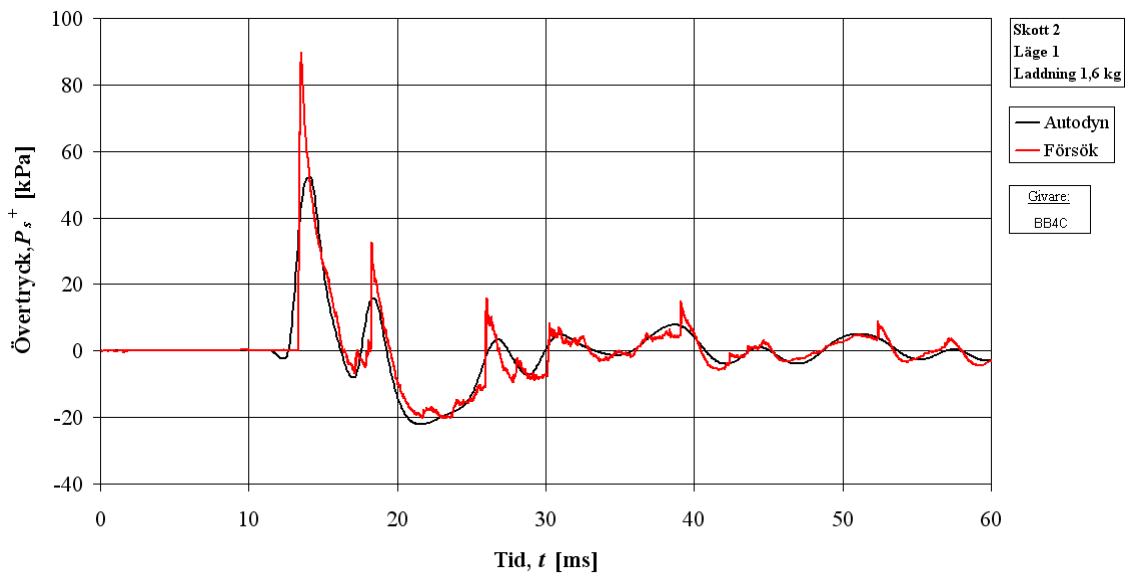
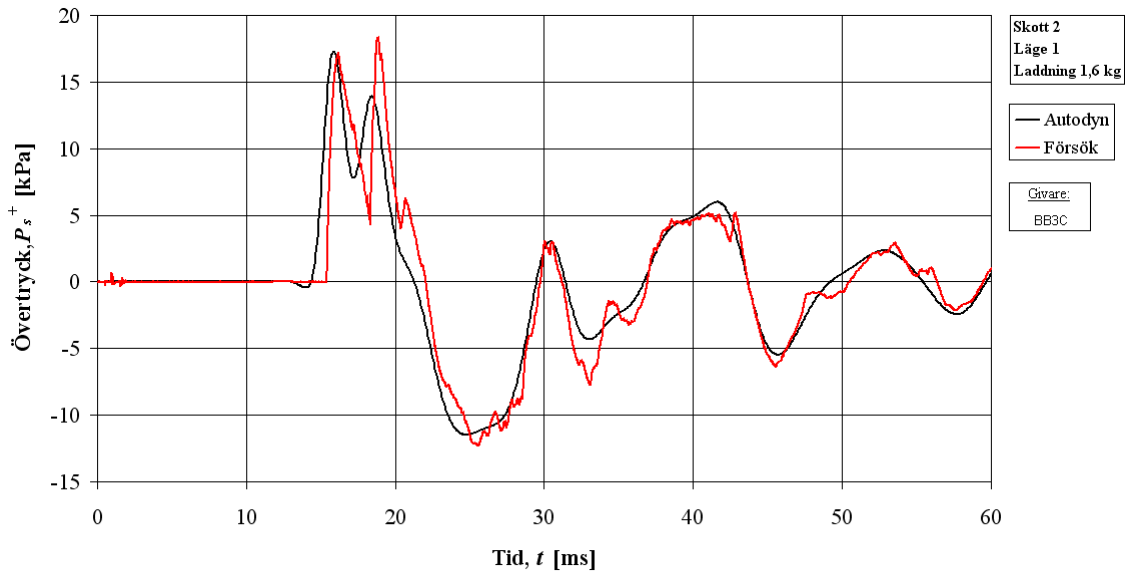


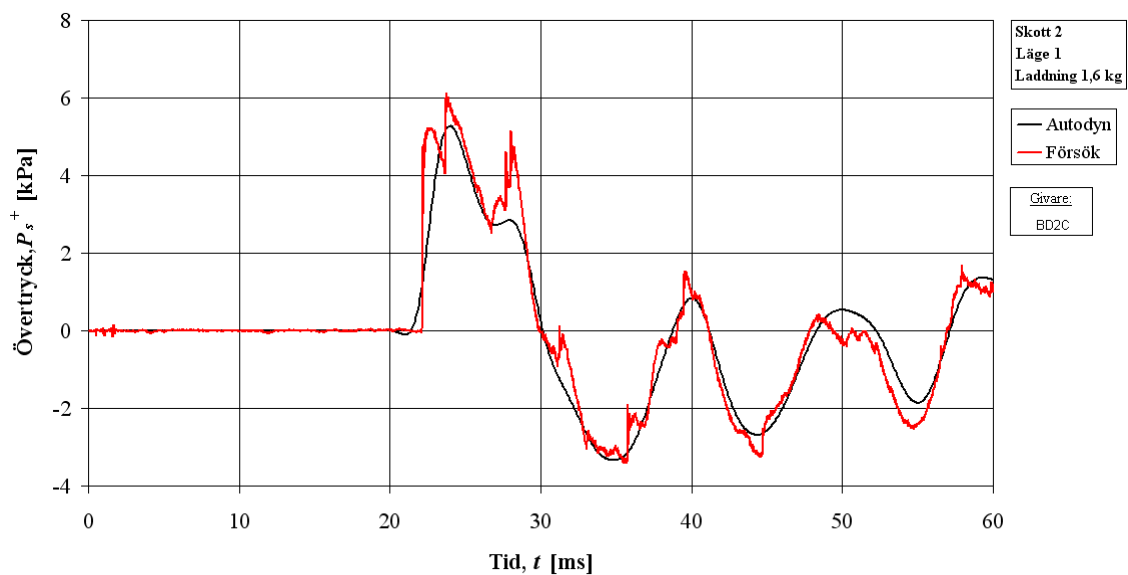
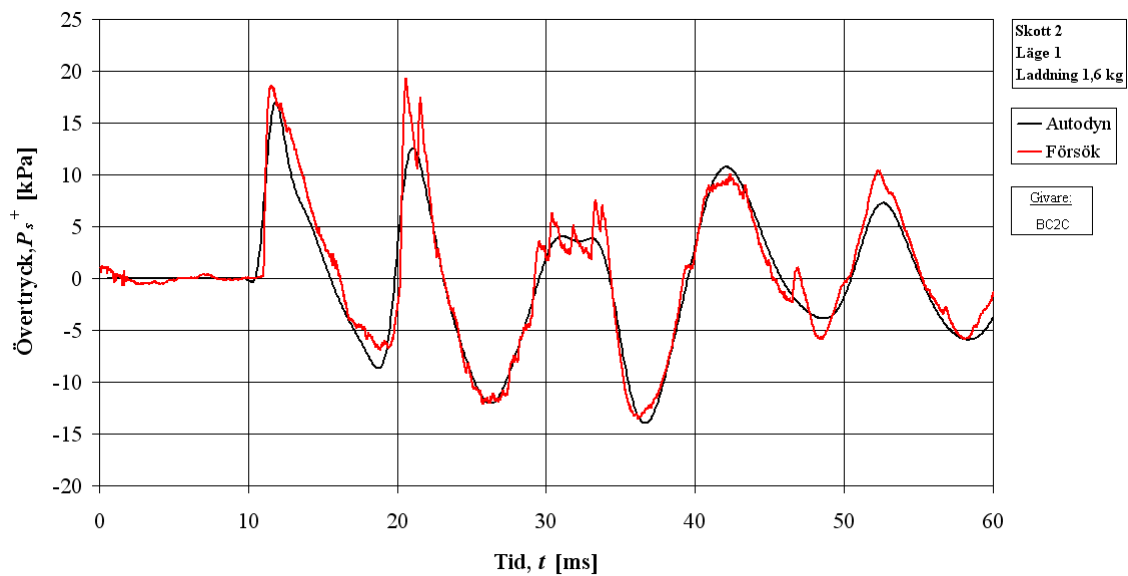






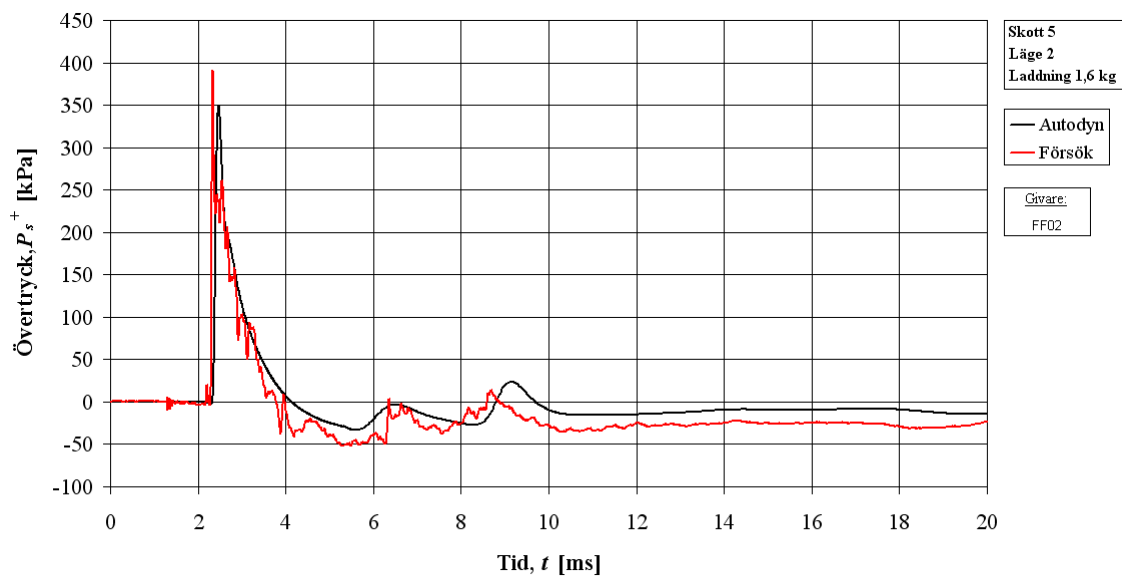
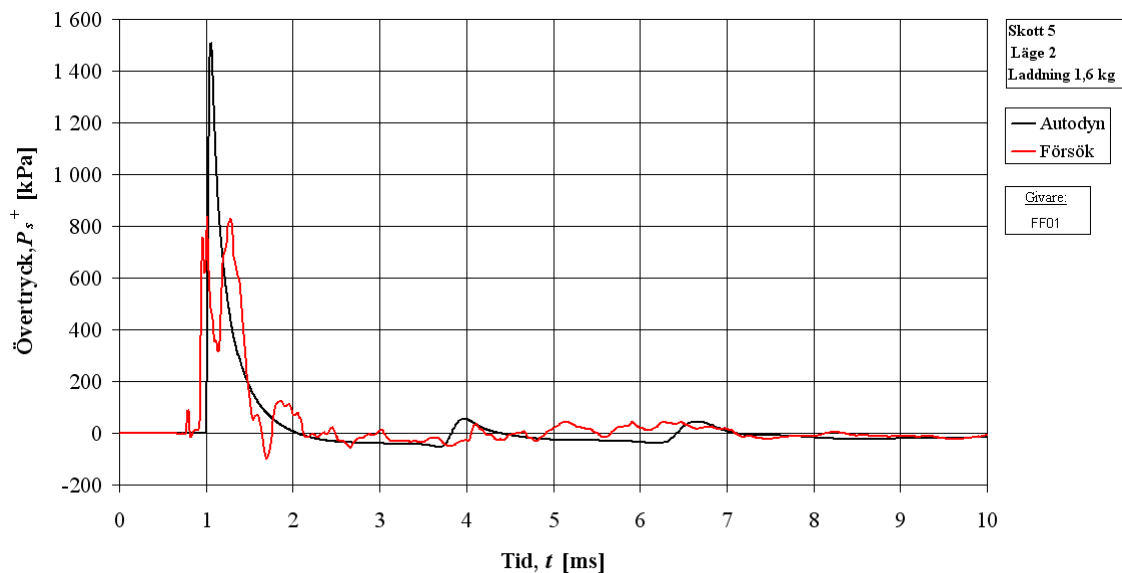


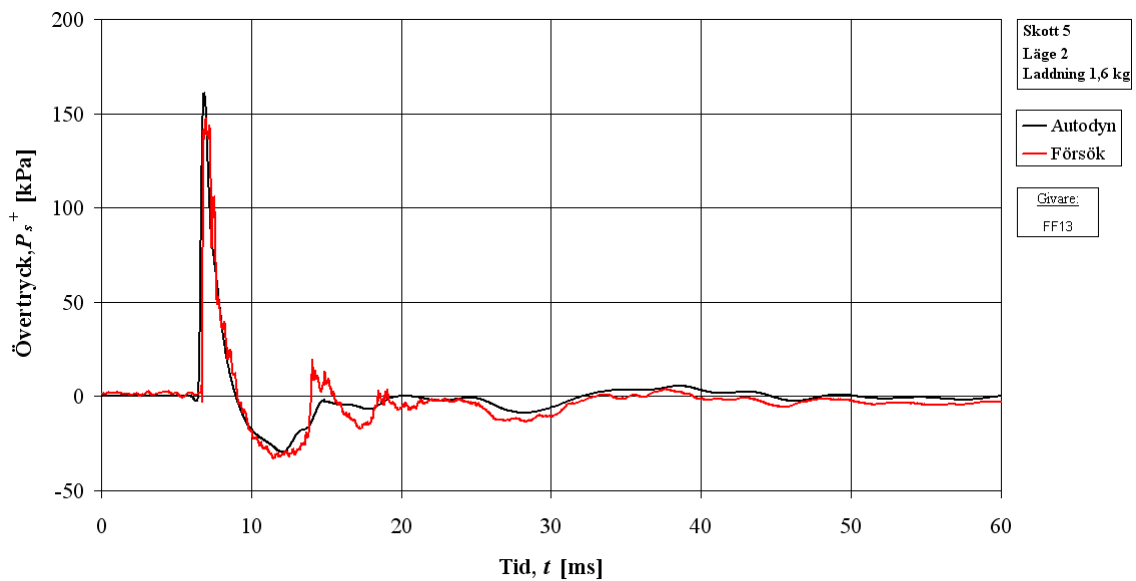
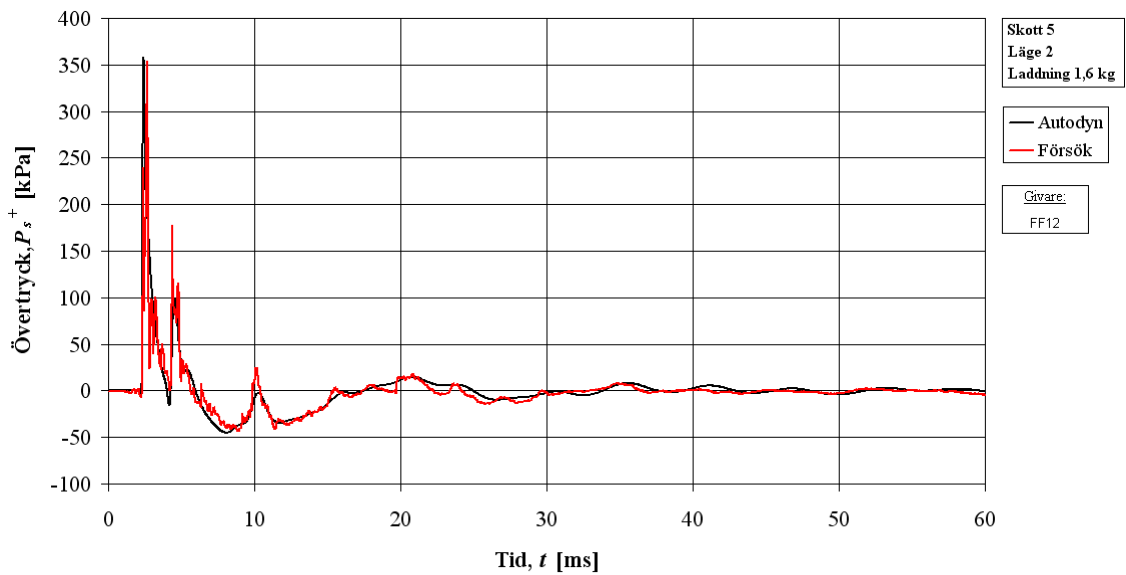
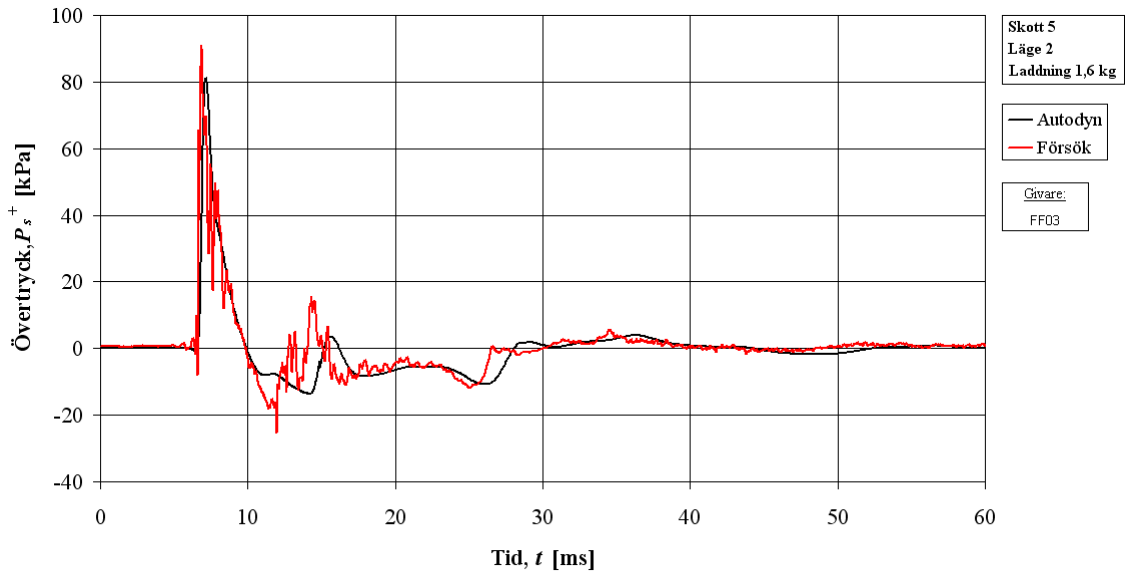


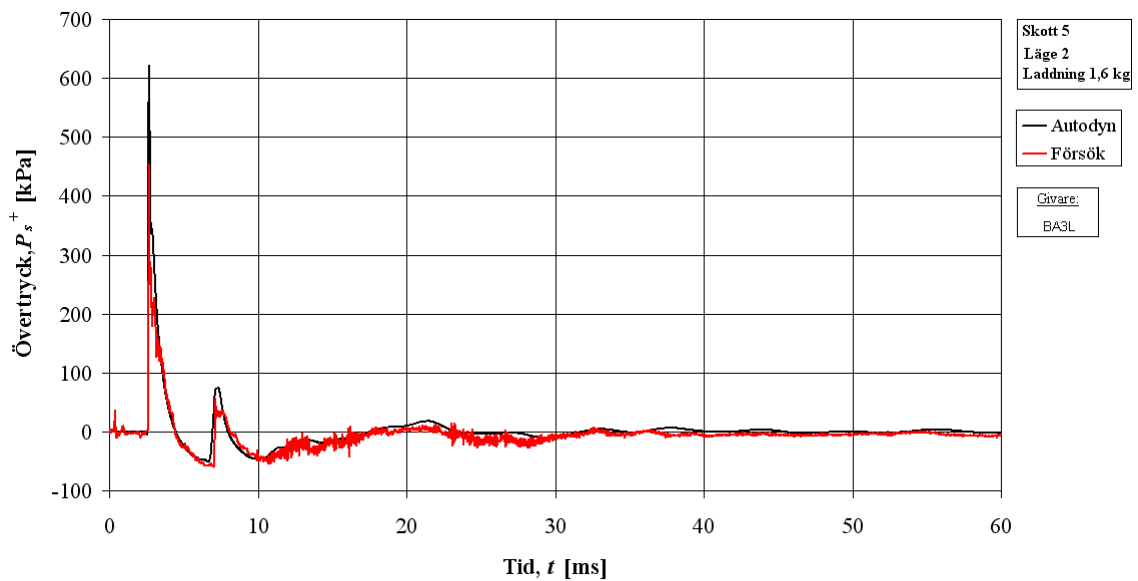
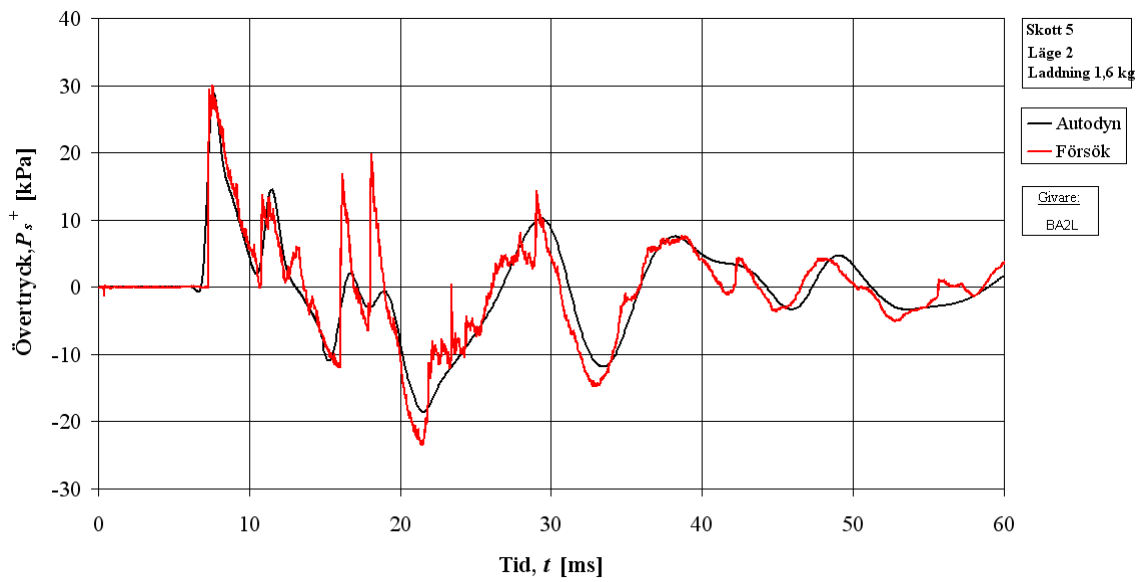
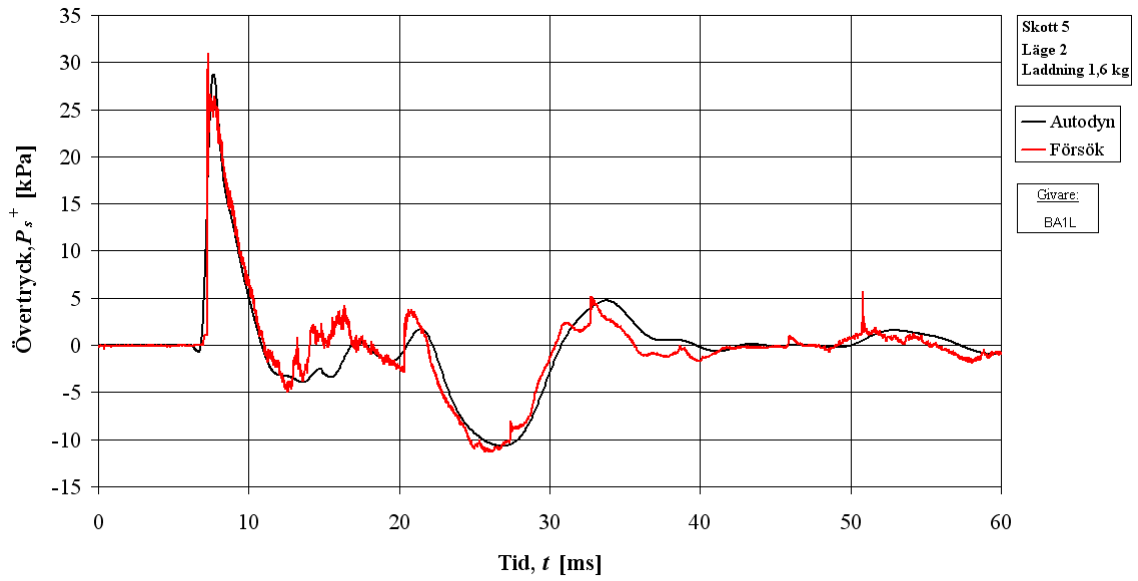


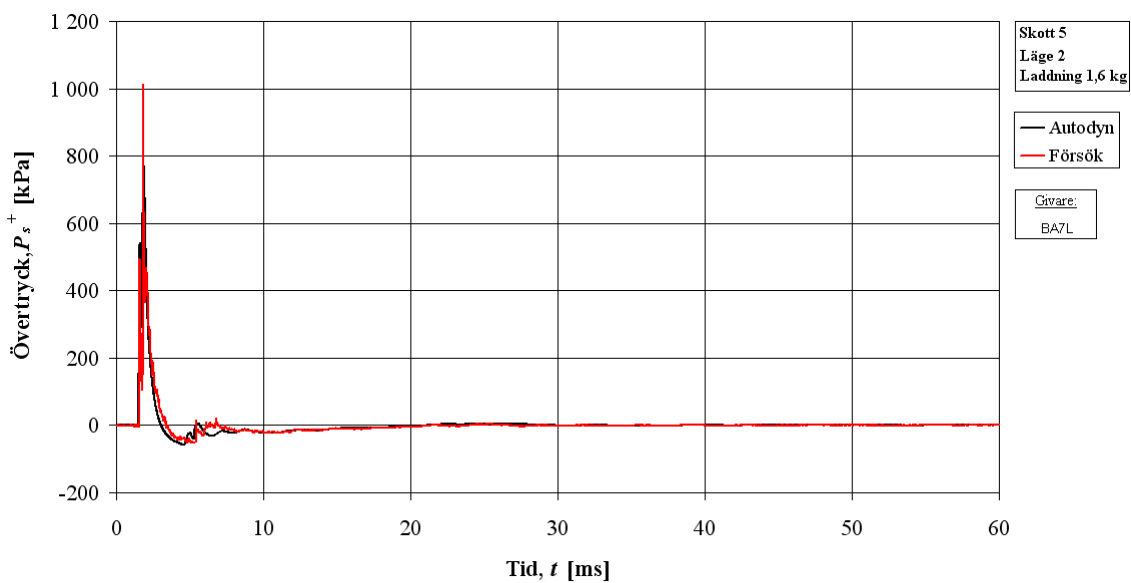
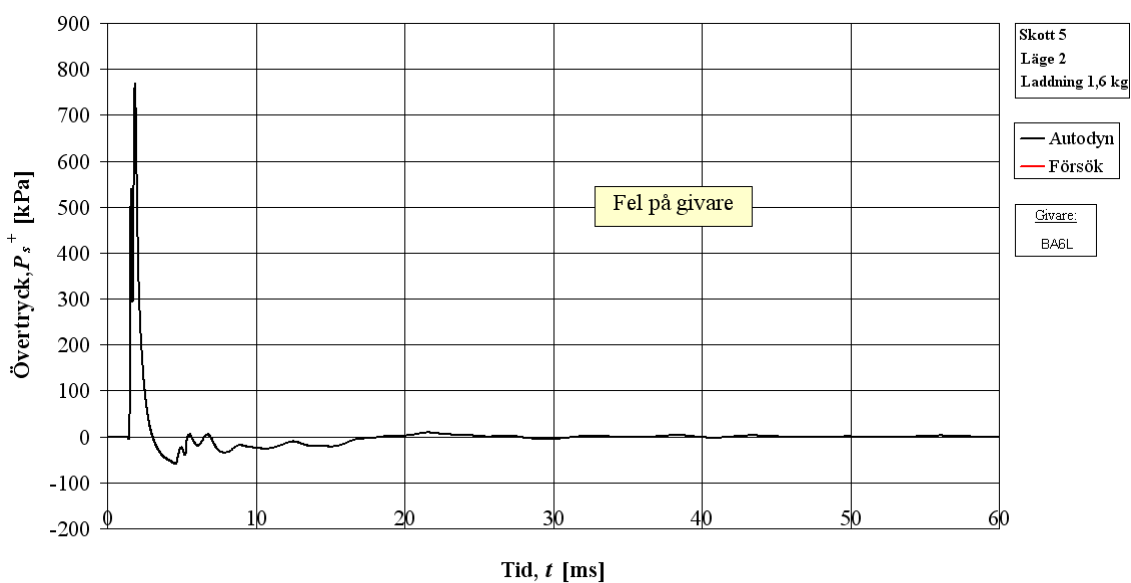
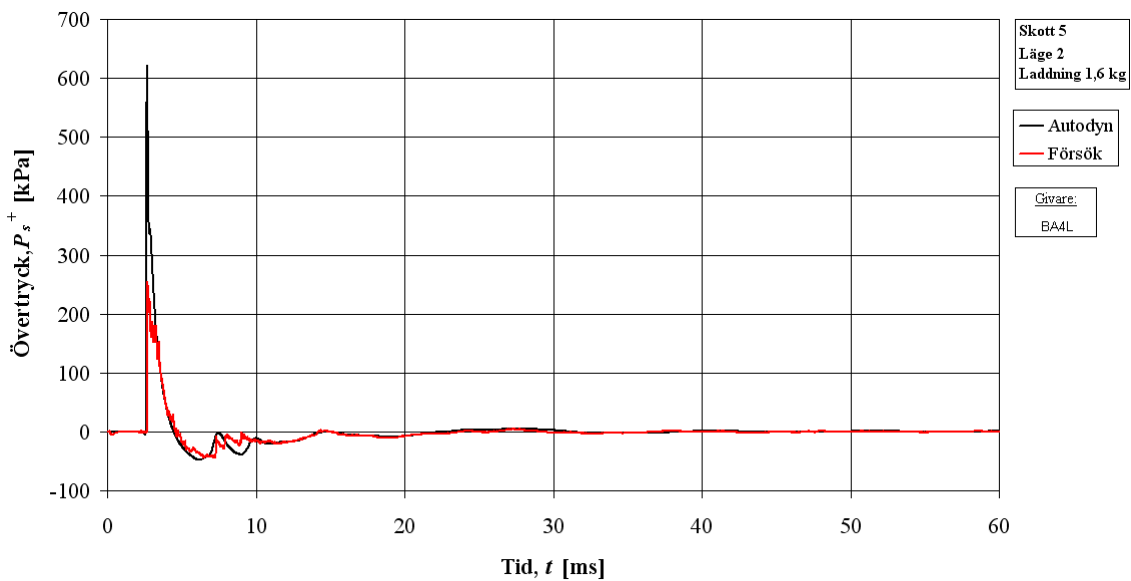
A.6 Skott #5 – 1,6 kg, läge 2

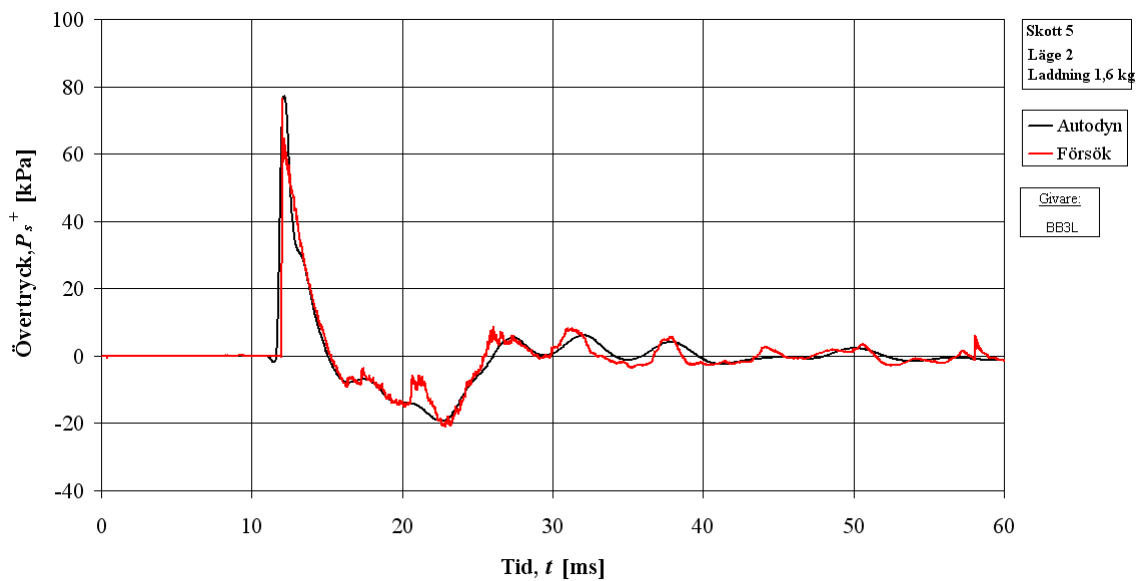
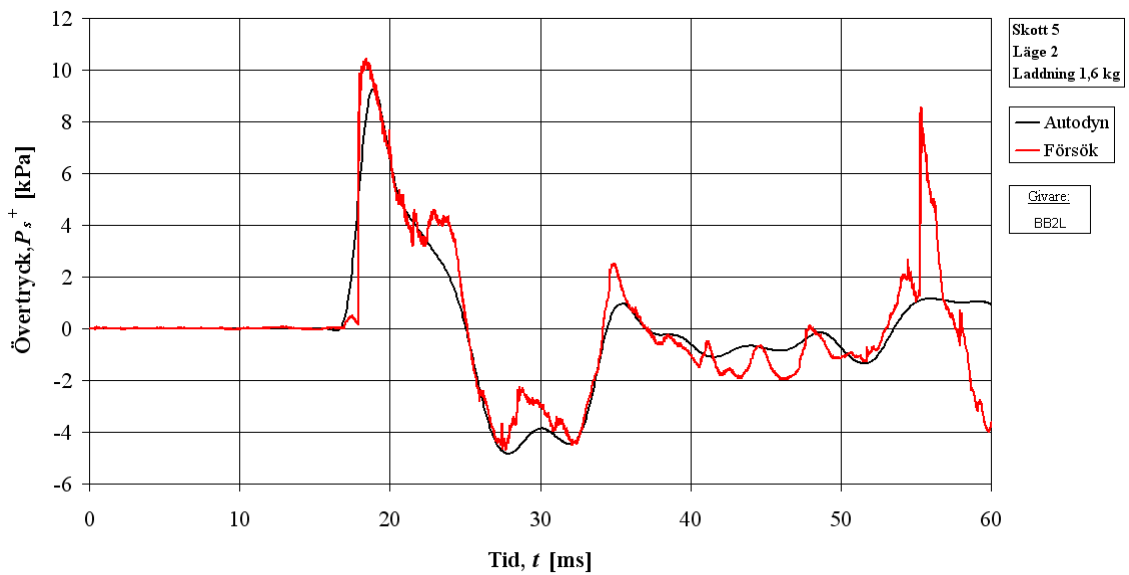
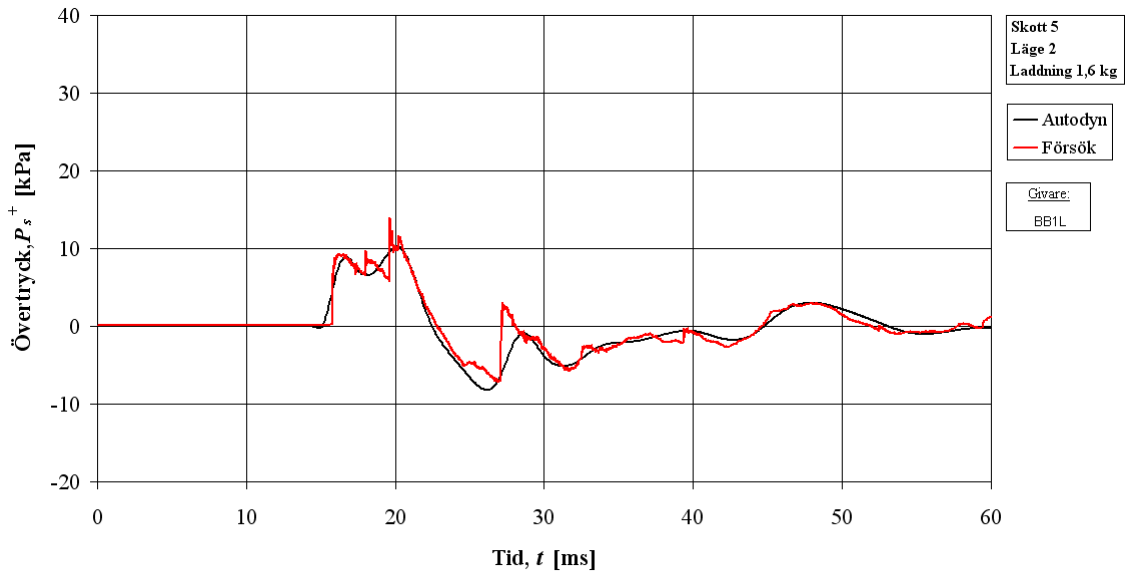
I nedanstående figurer visas tryck-tidskurvor från försök samt motsvarande analyse i Autodyn för skott #5 – 1,6 kg PETN i läge 2. För laddningens samt givarnas position se kapitel 2. I vissa fall har tryckgivaren i försöket inte fungerat tillfredsställande och detta markeras då i aktuell figur.

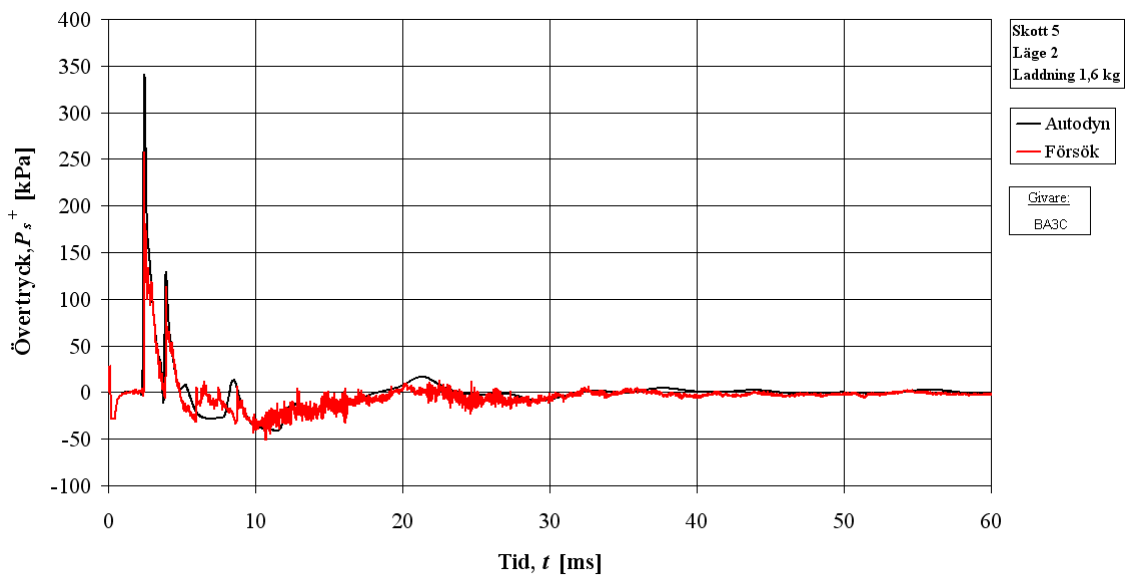
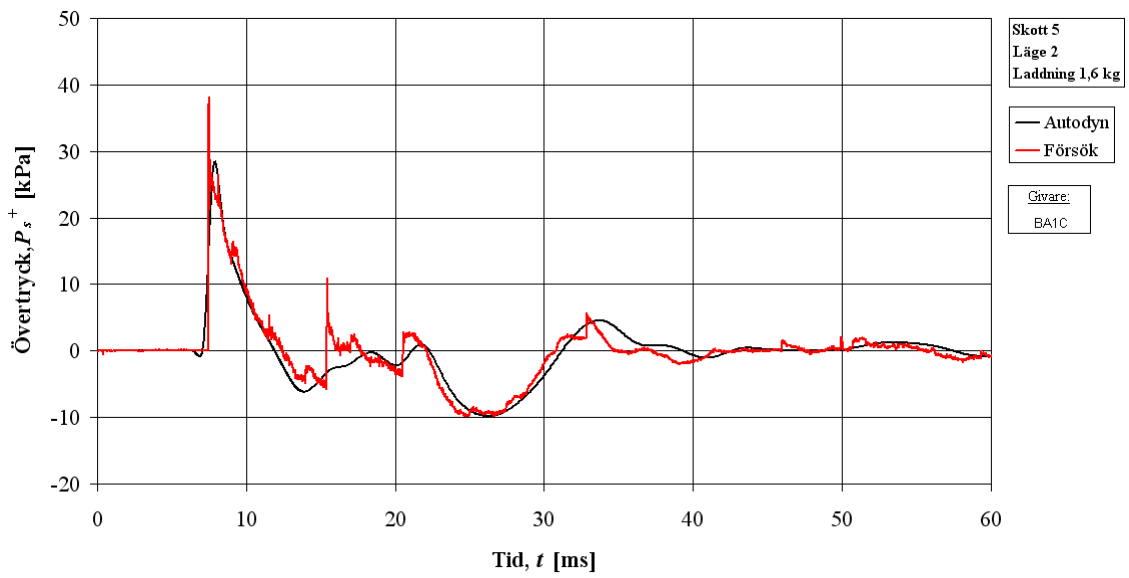
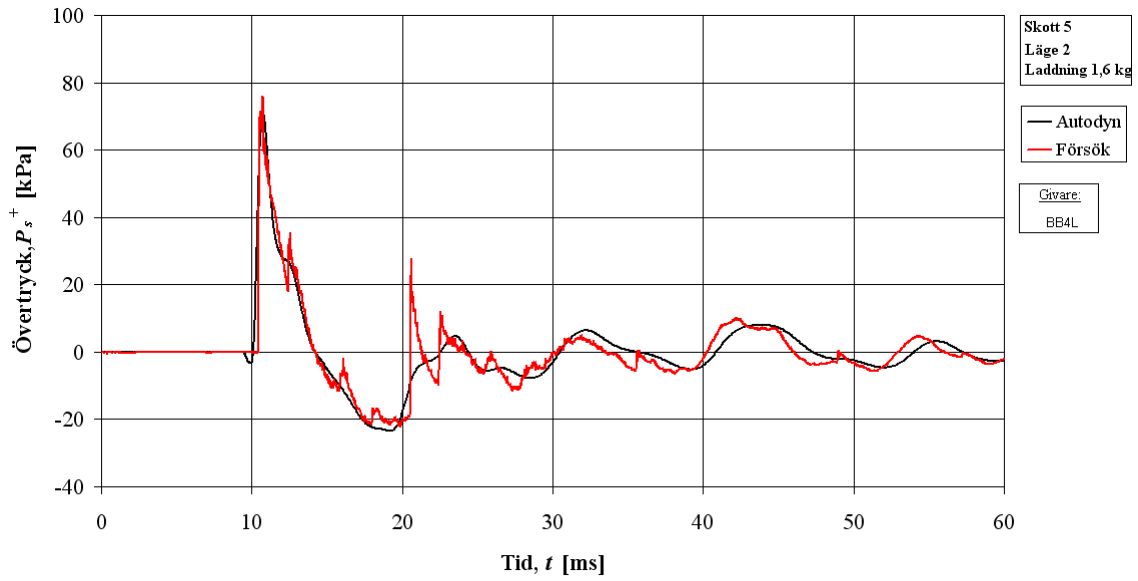


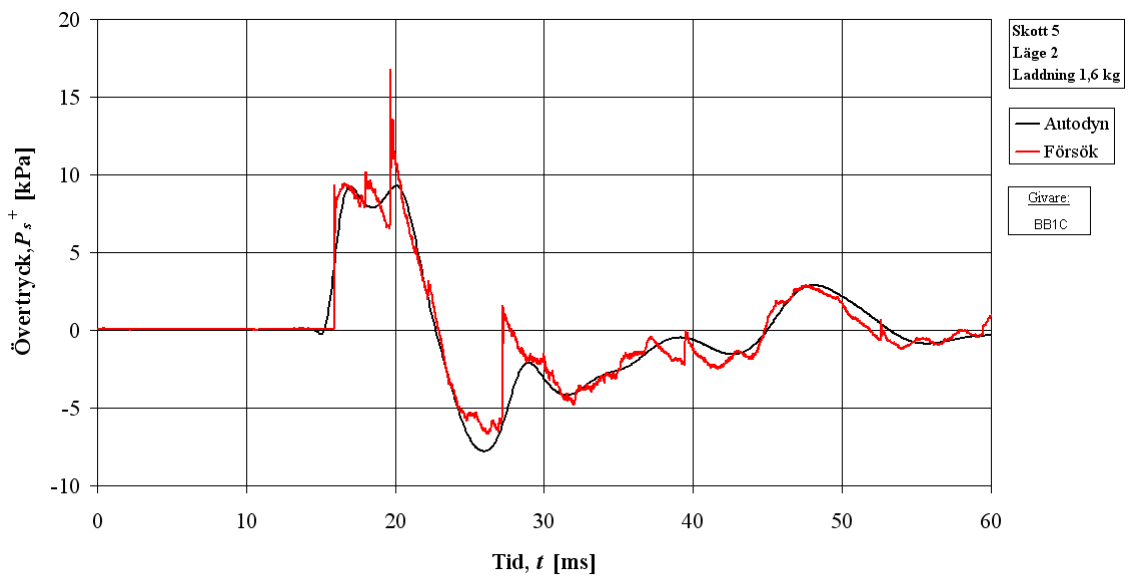
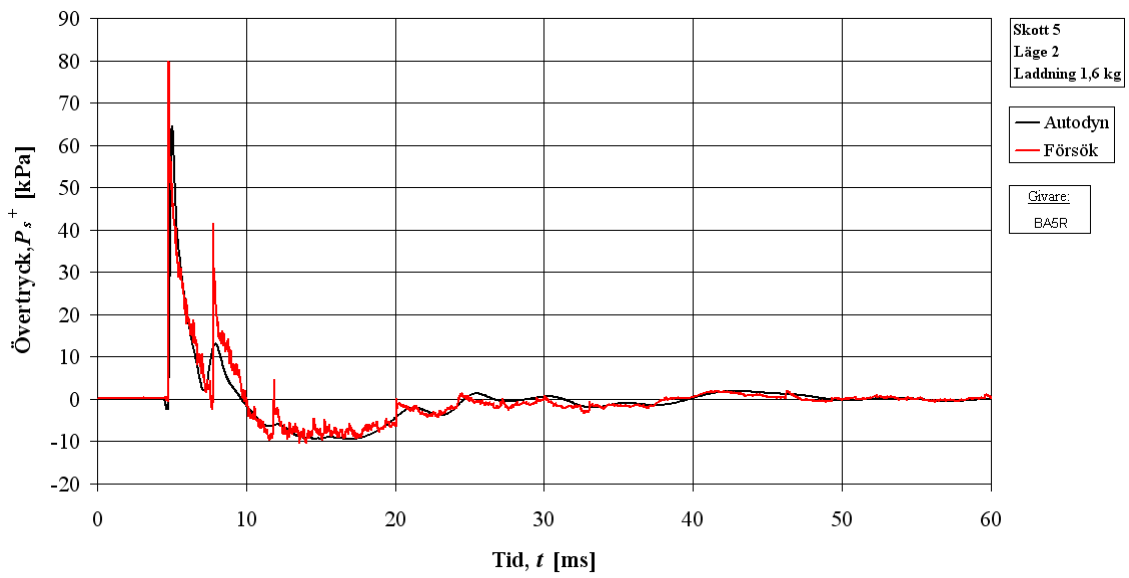
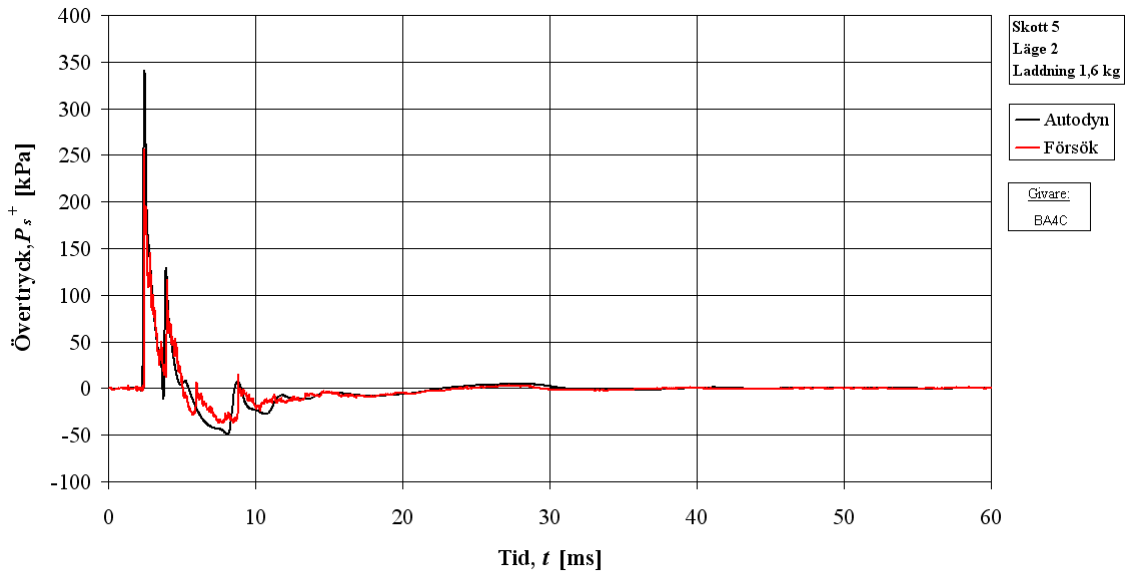


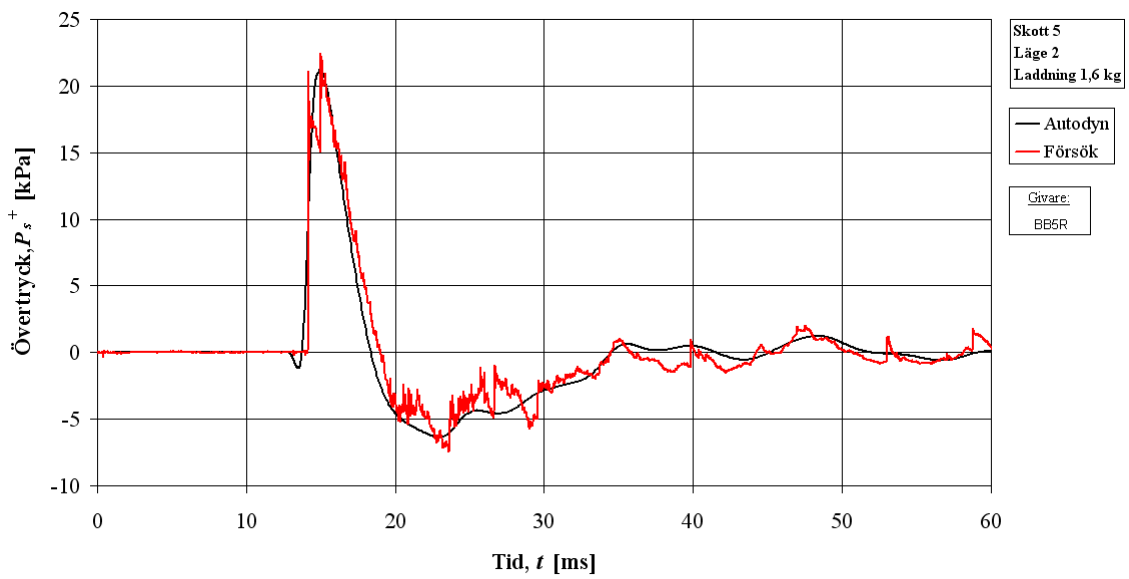
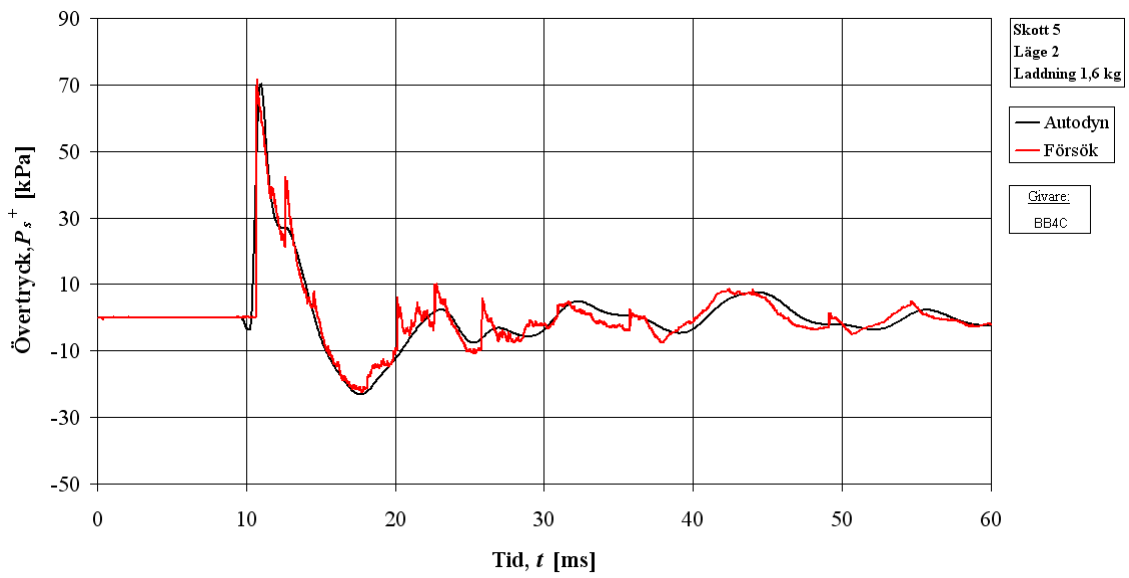
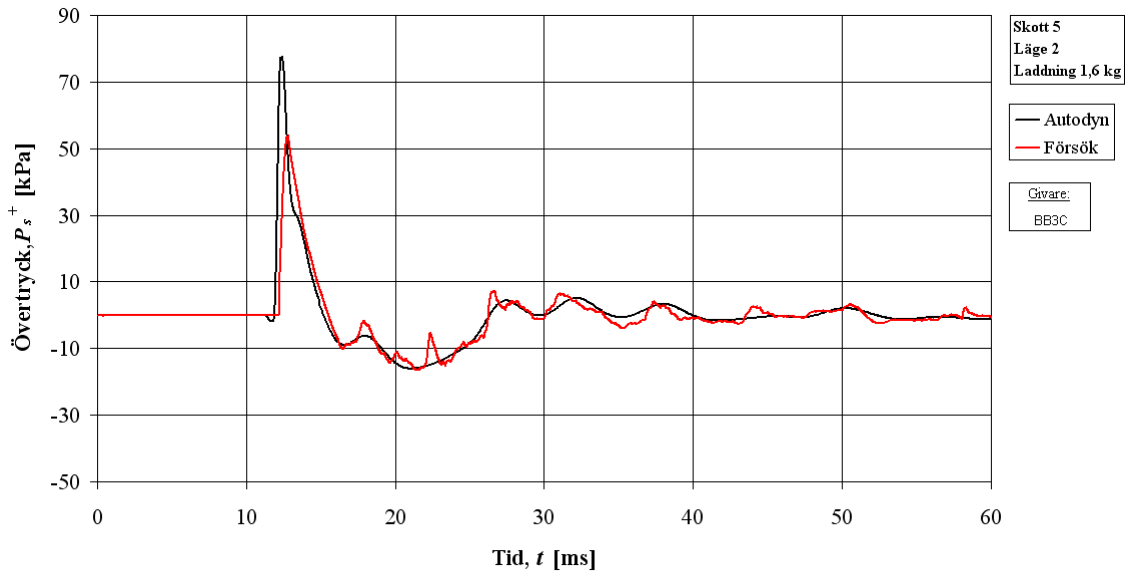


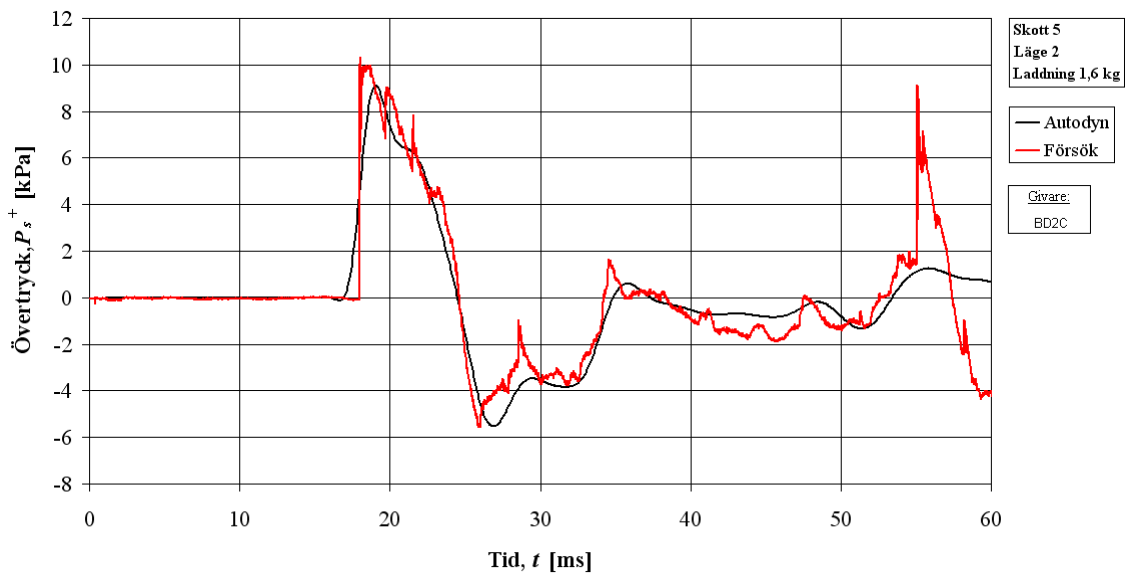
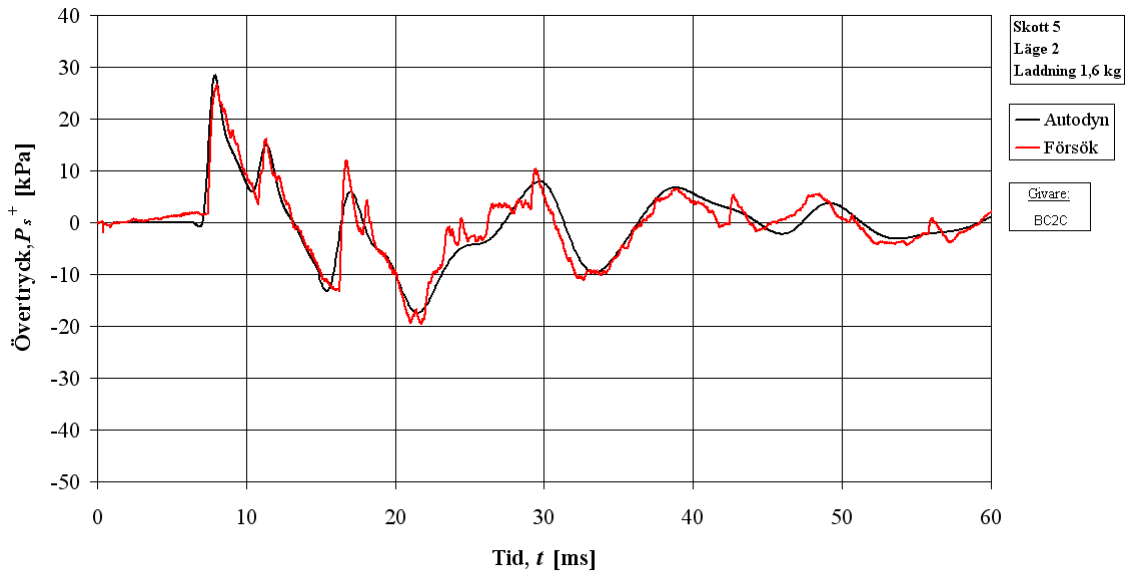






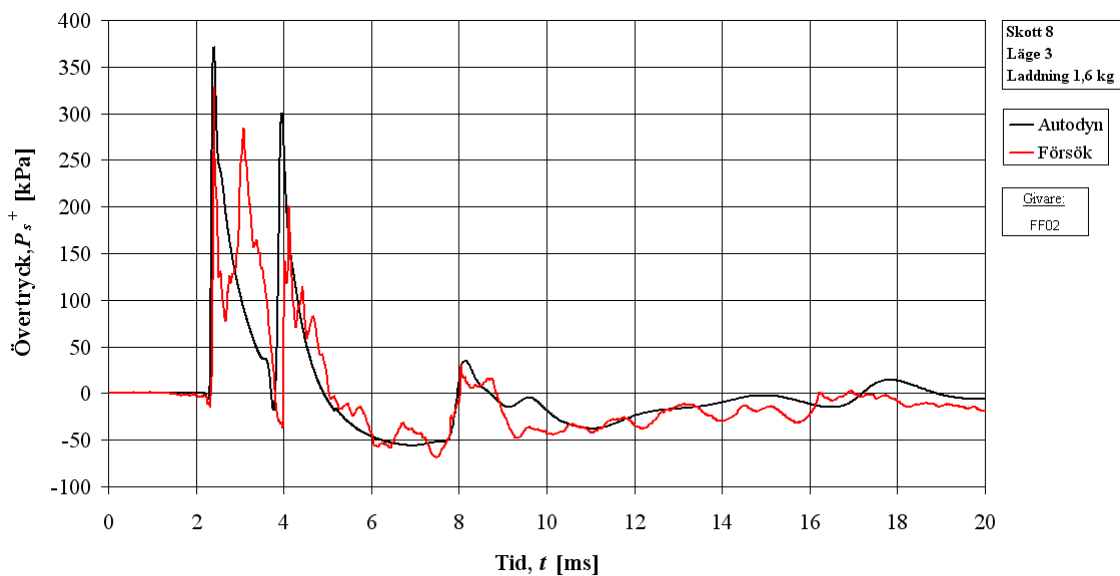
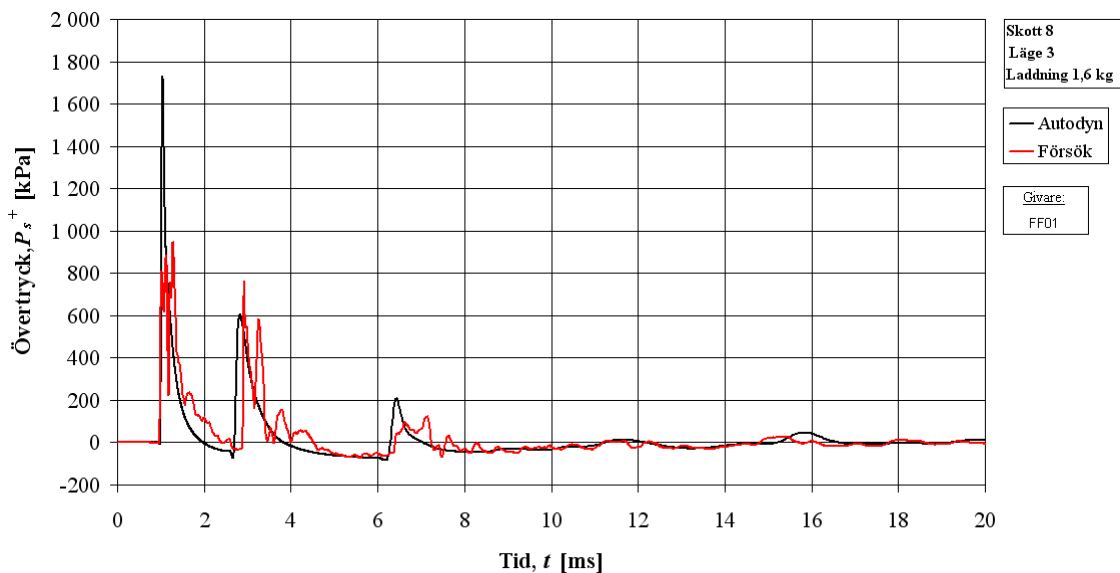


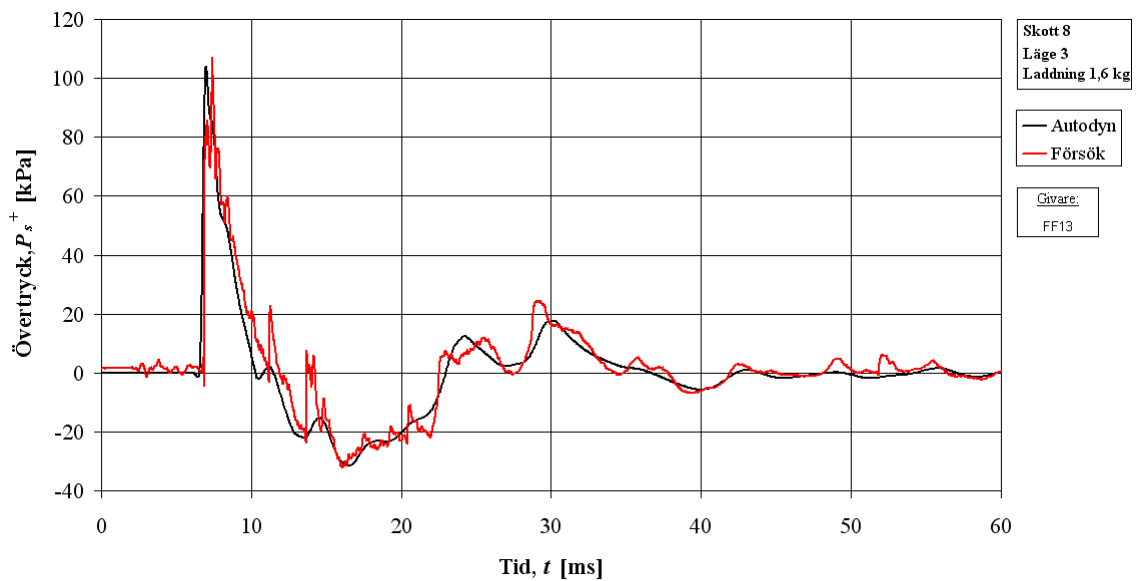
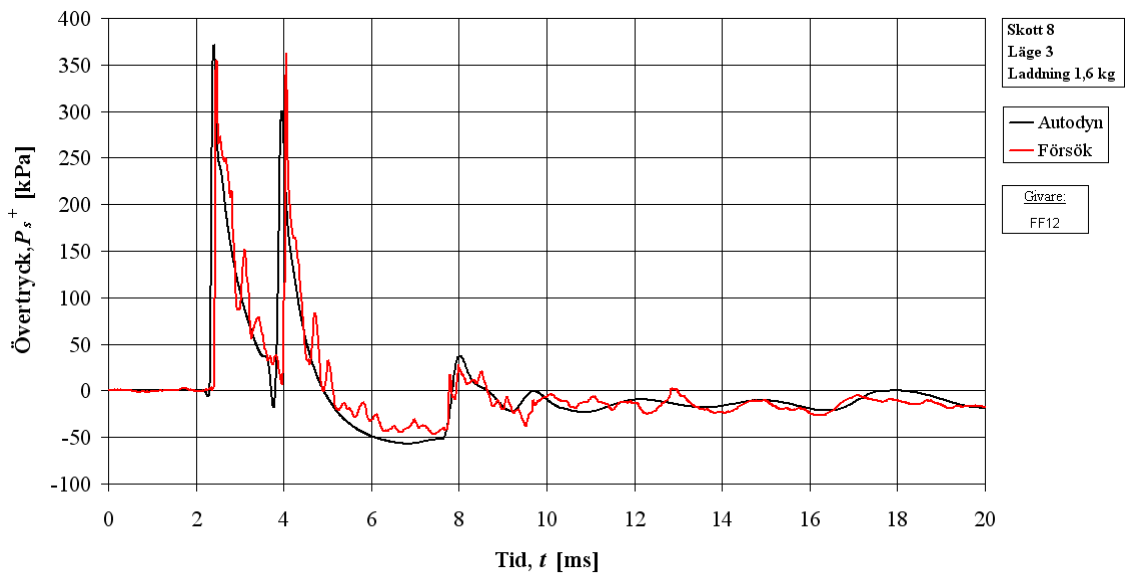
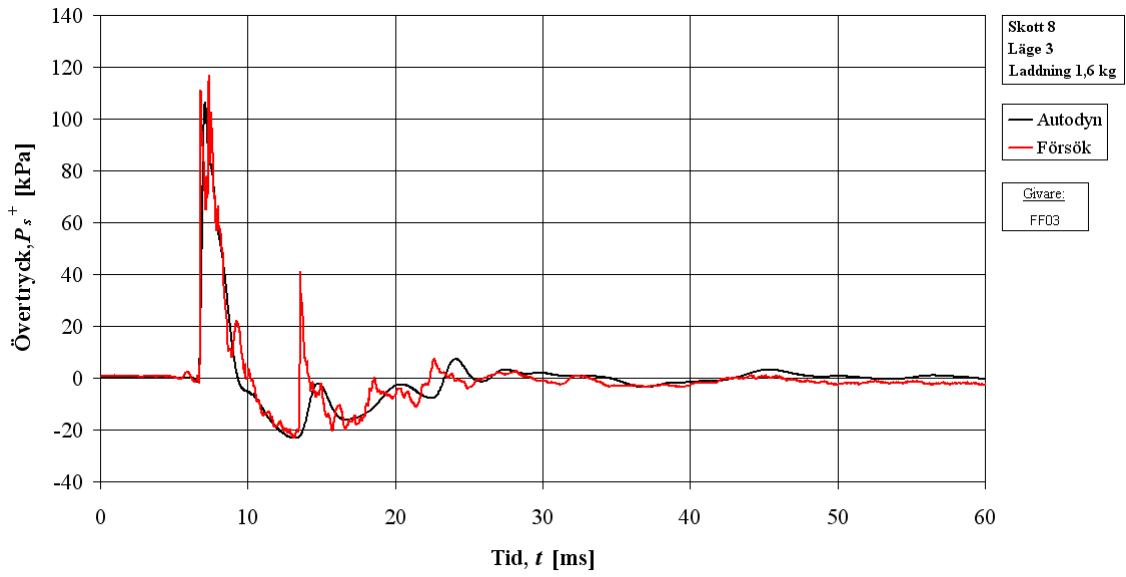


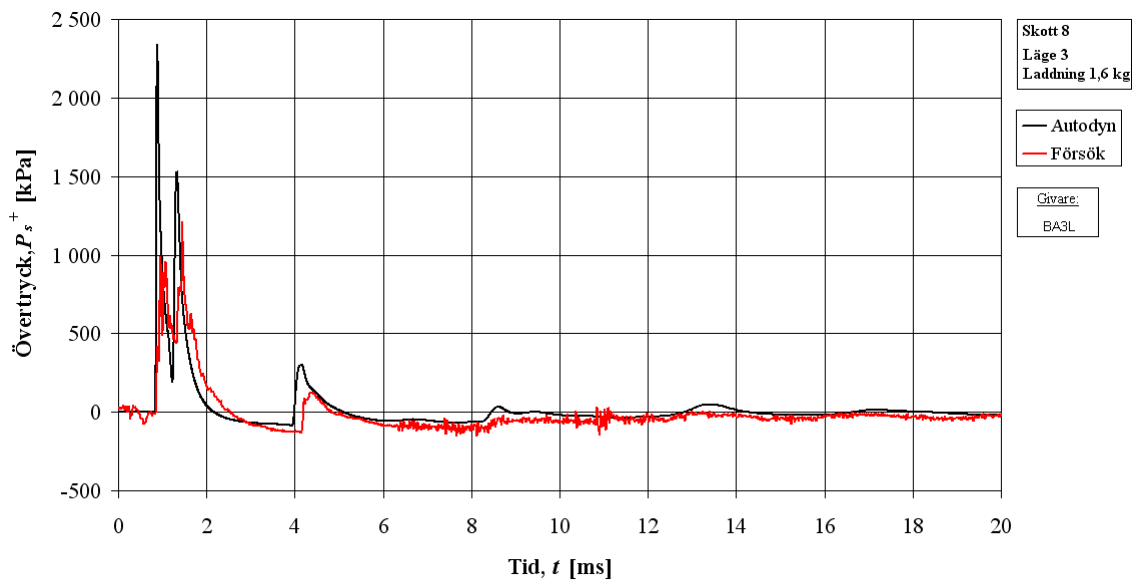
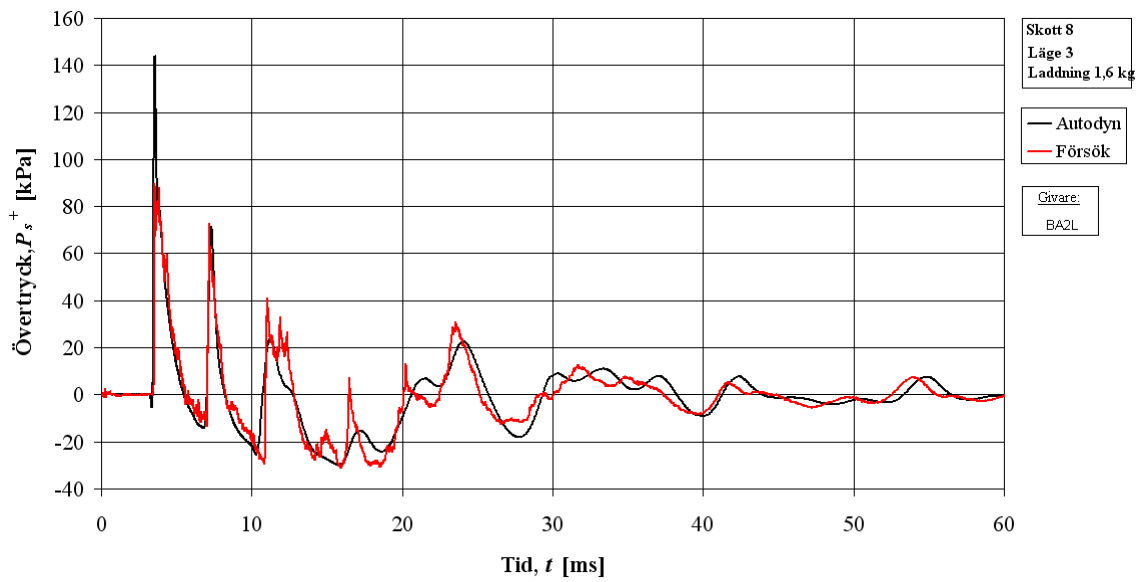
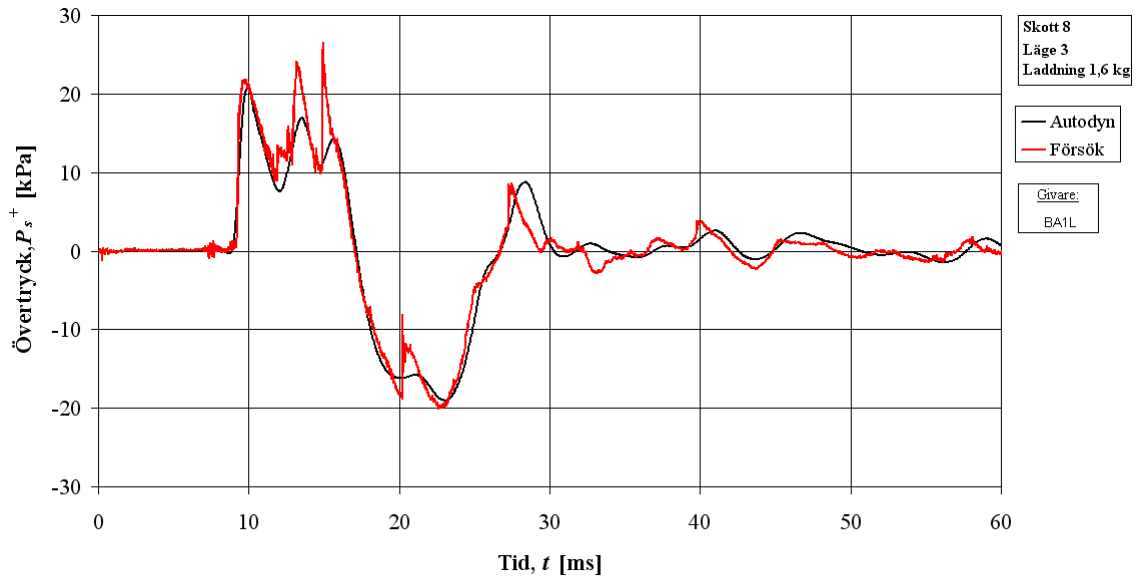


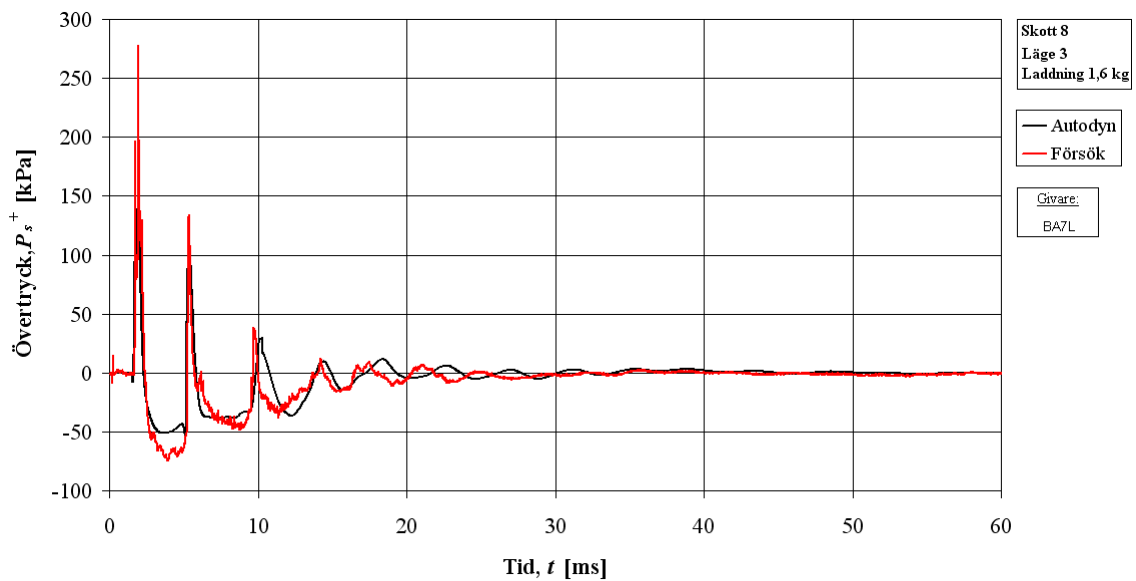
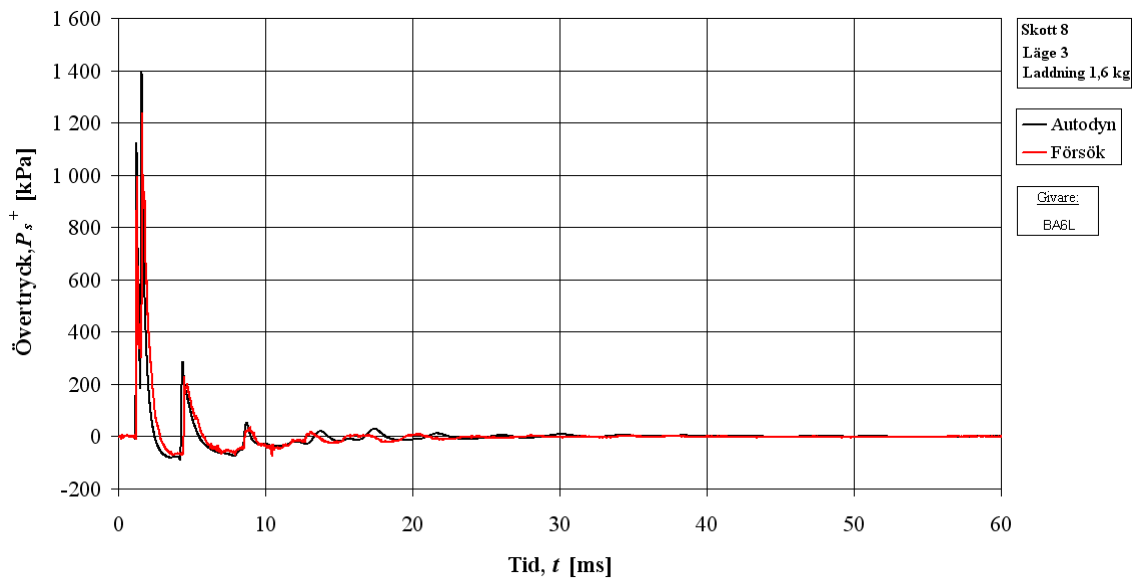
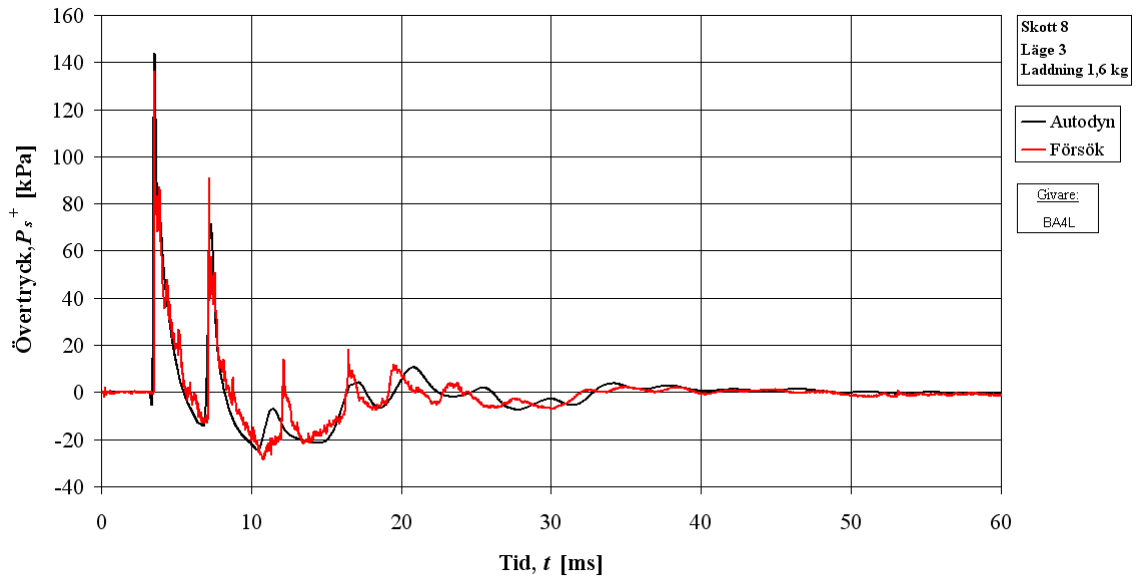
A.7 Skott #8 – 1,6 kg, läge 3

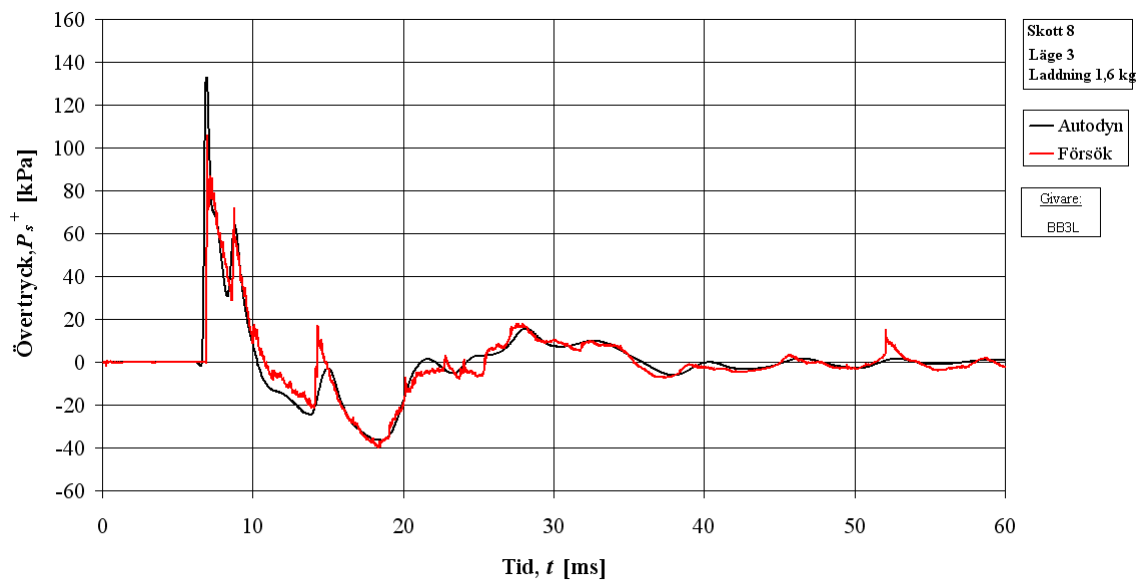
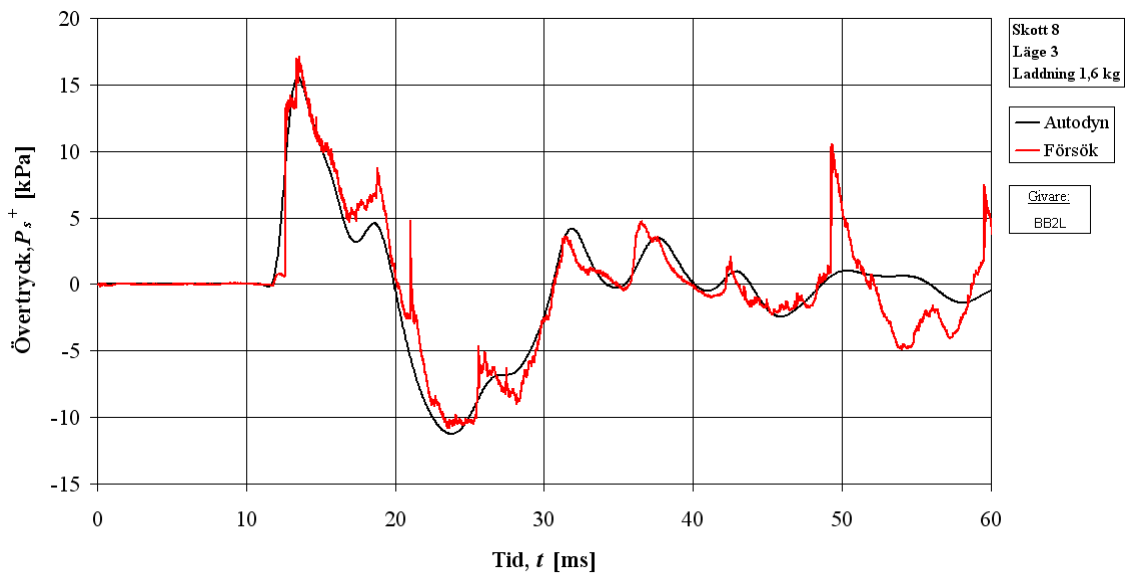
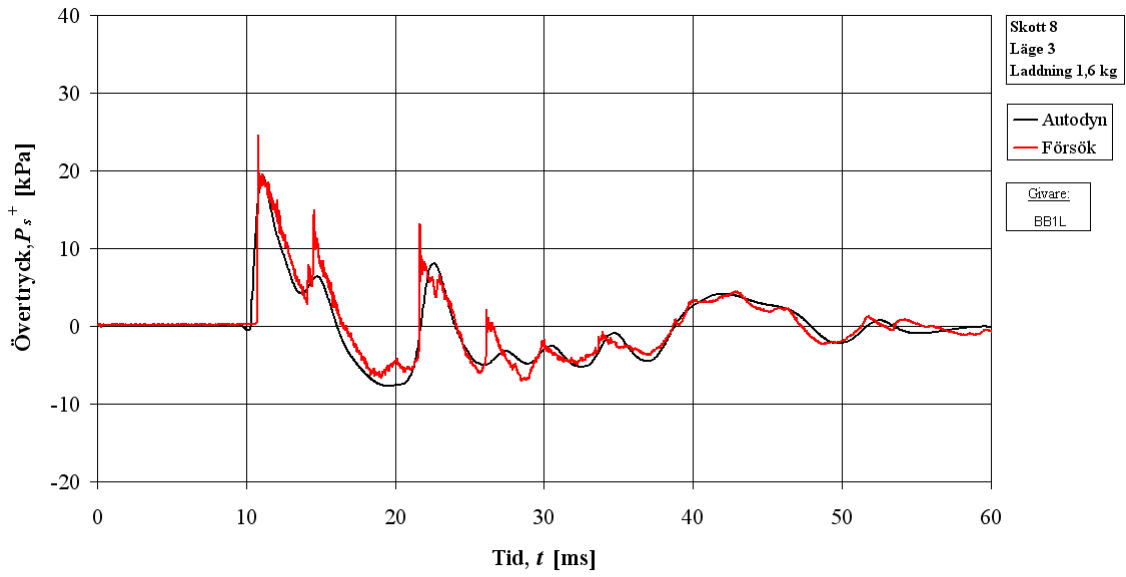
I nedanstående figurer visas tryck-tidskurvor från försök samt motsvarande analyse i Autodyn för skott #8 – 1,6 kg PETN i läge 3. För laddningens samt givarnas position se kapitel 2. I vissa fall har tryckgivaren i försöket inte fungerat tillfredsställande och detta markeras då i aktuell figur.

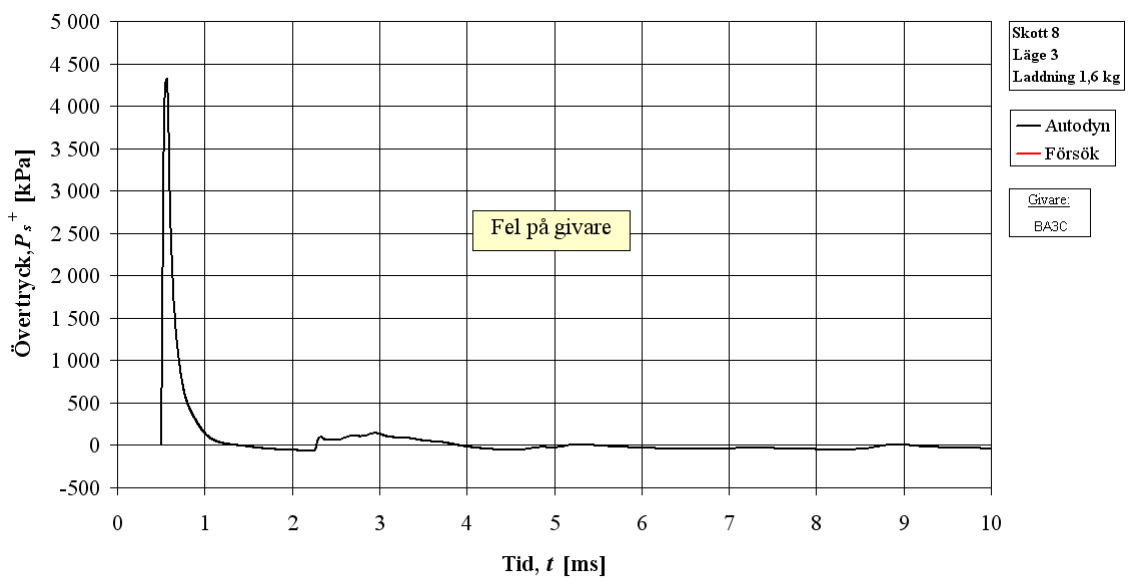
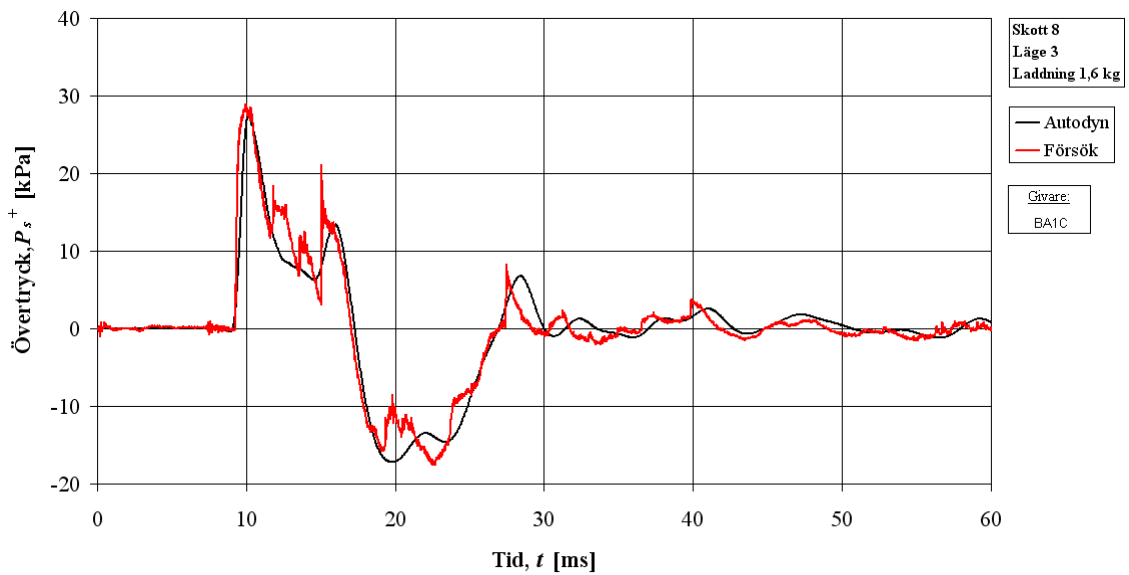
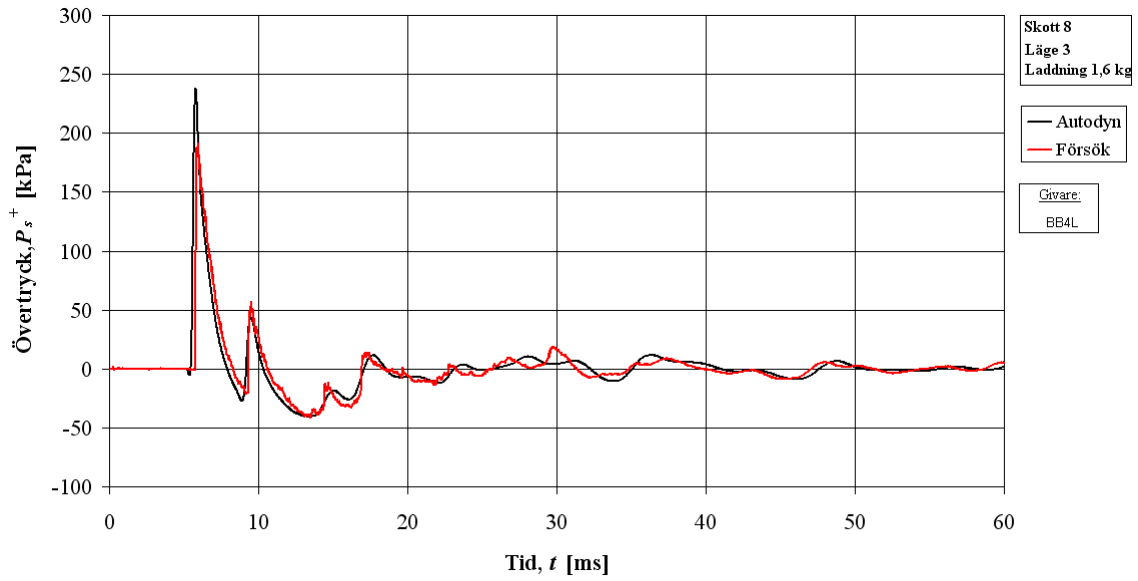


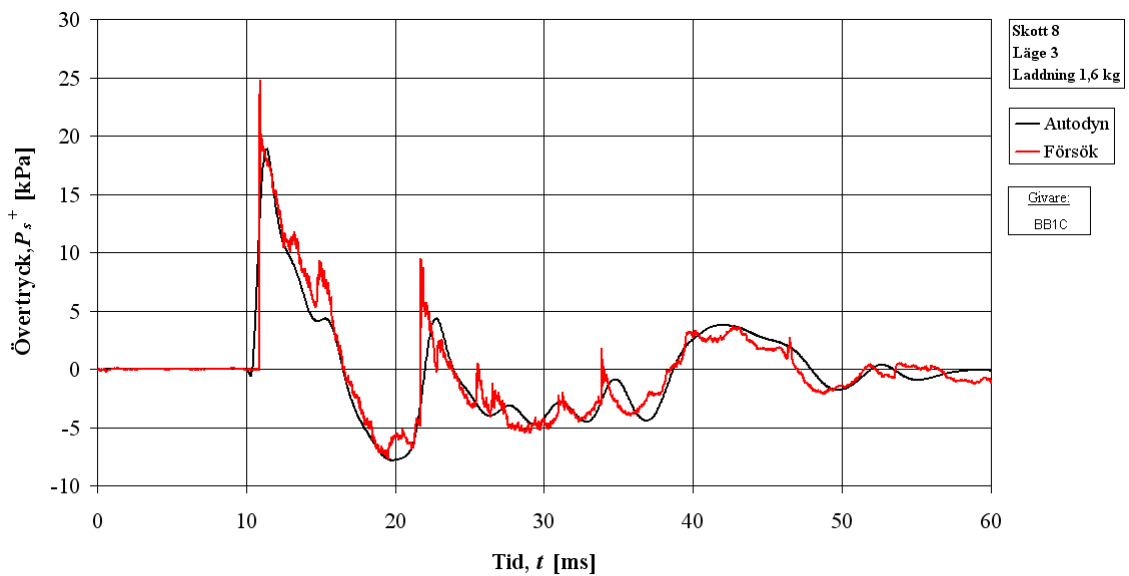
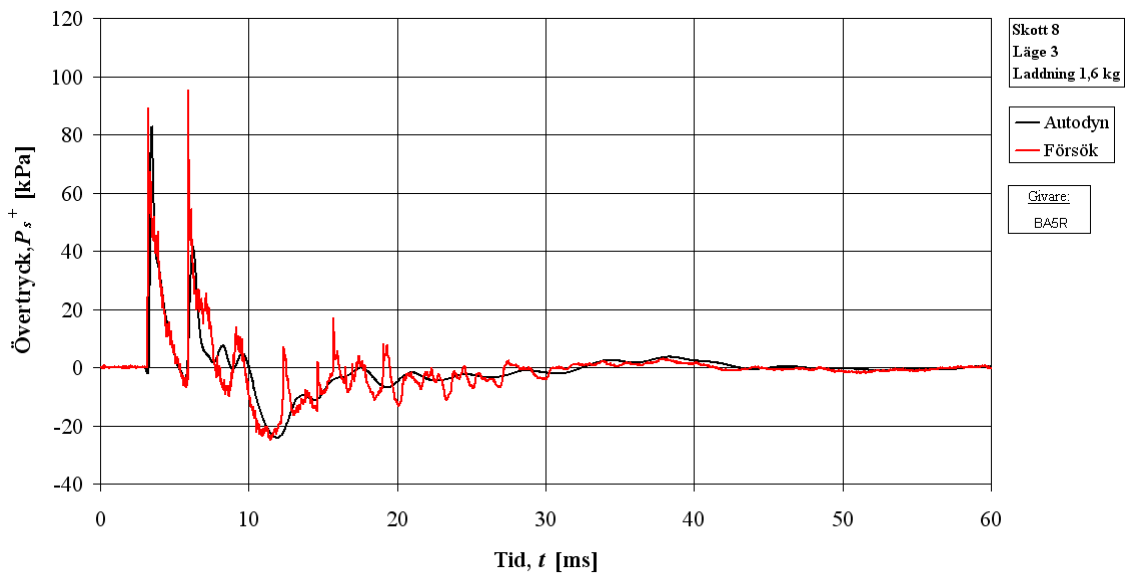
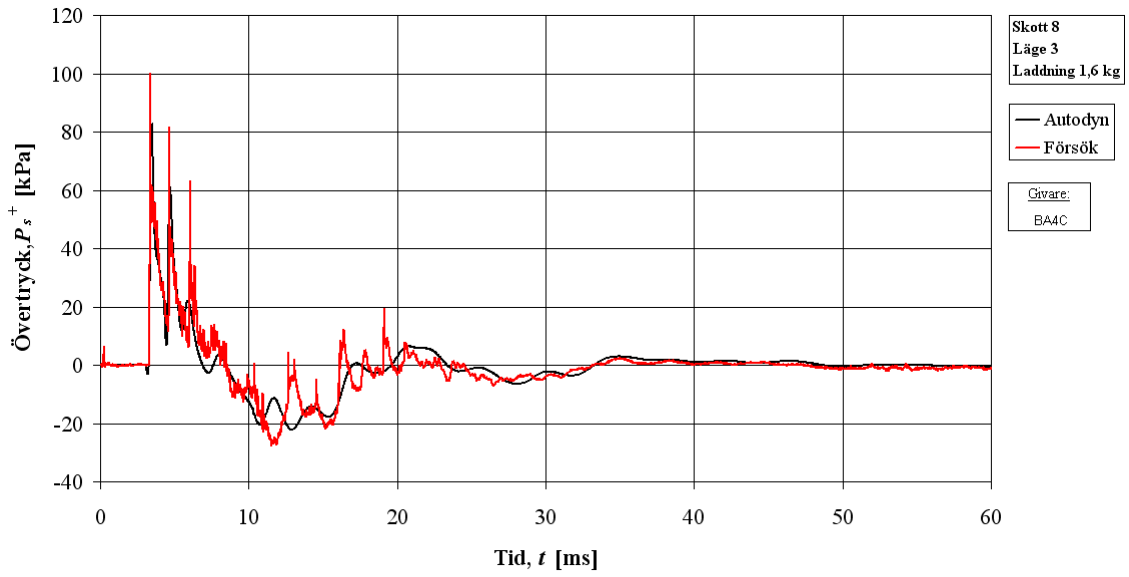


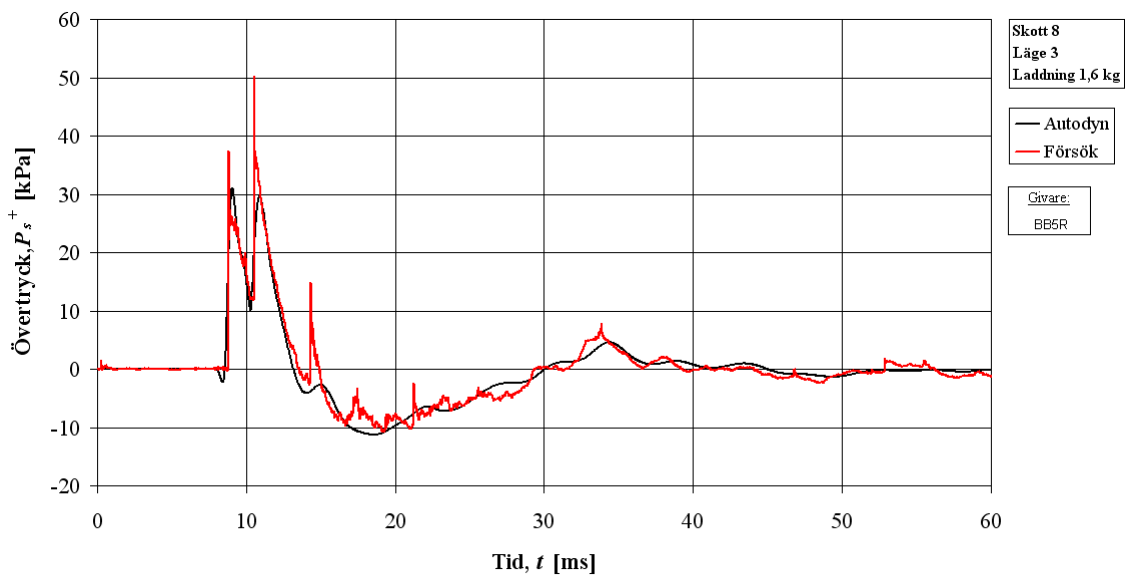
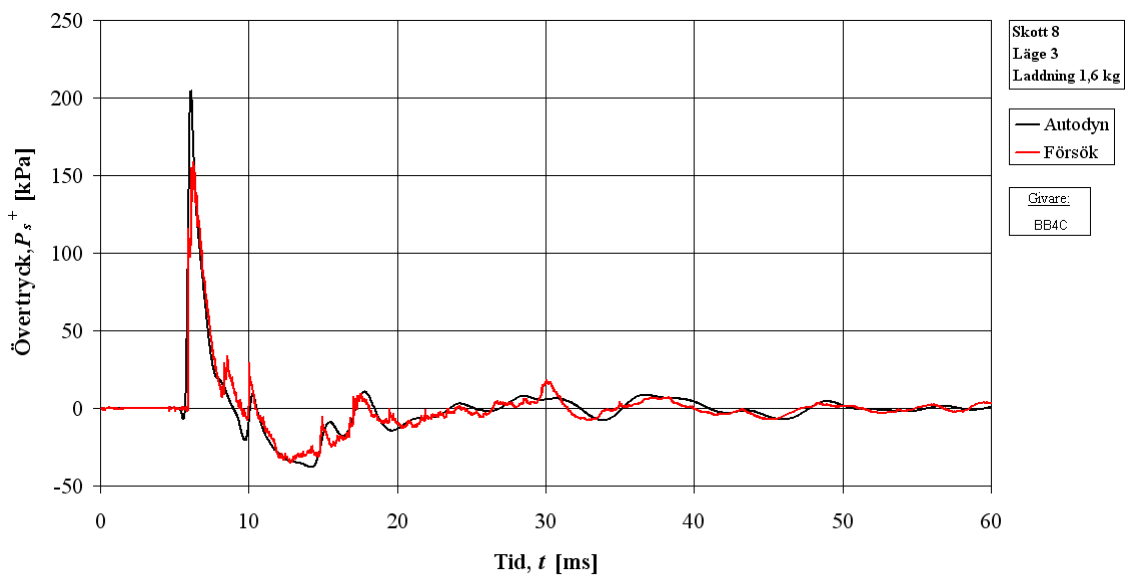
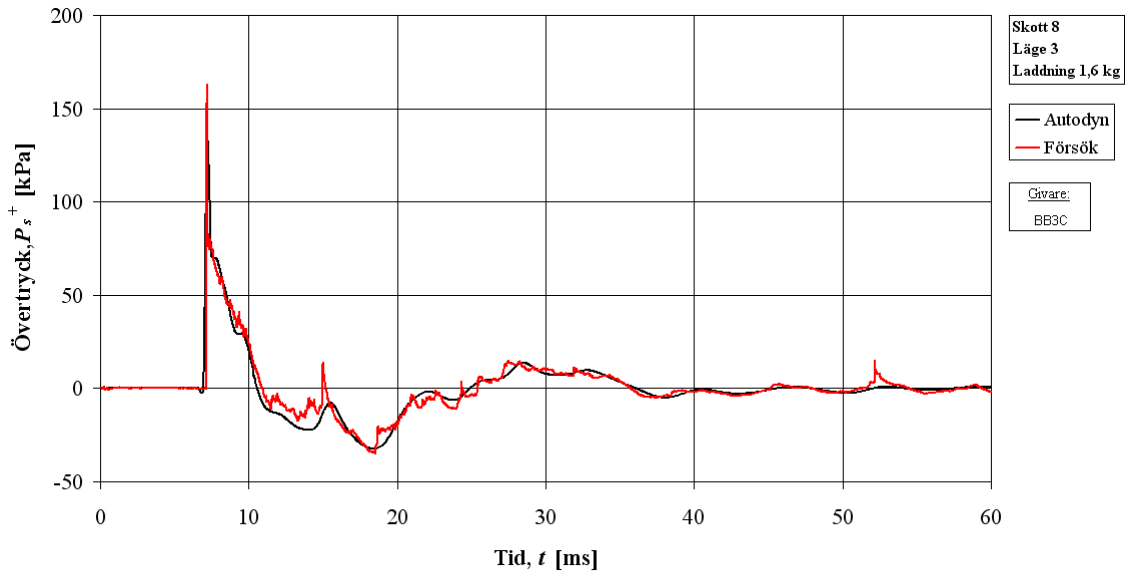


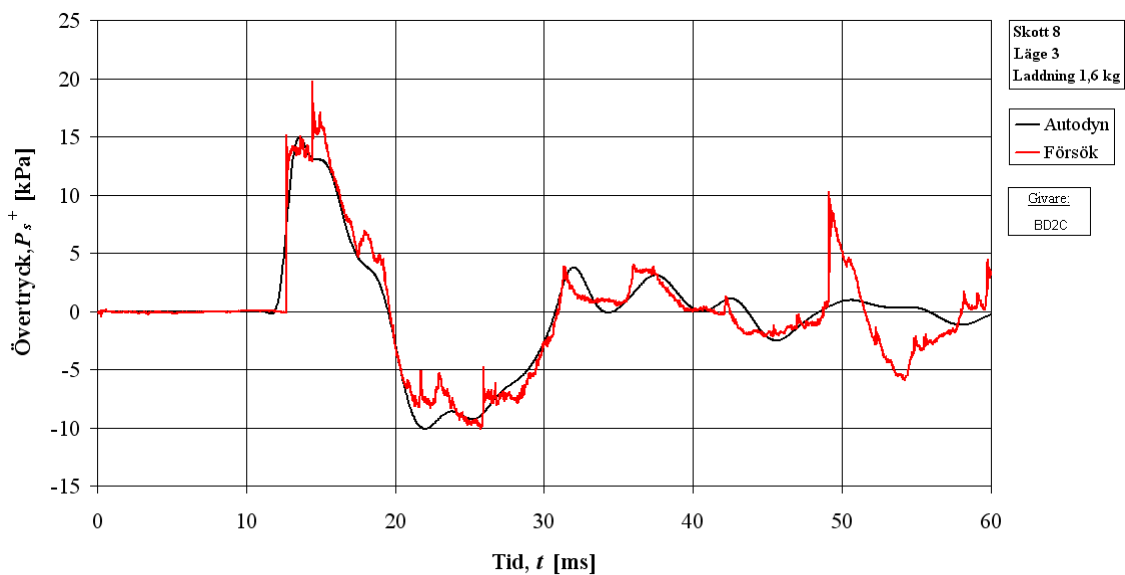
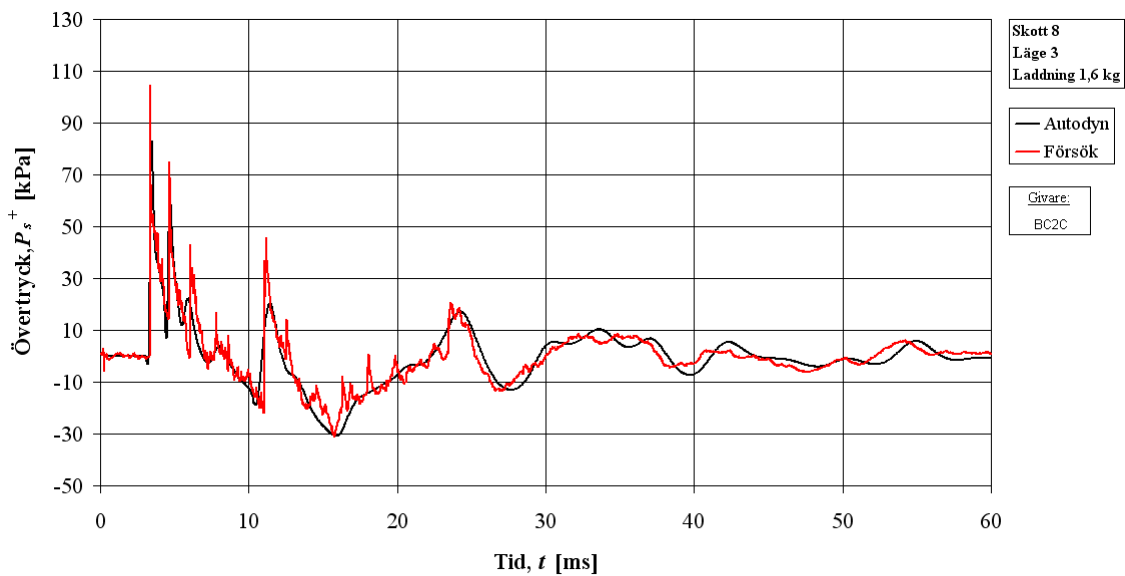






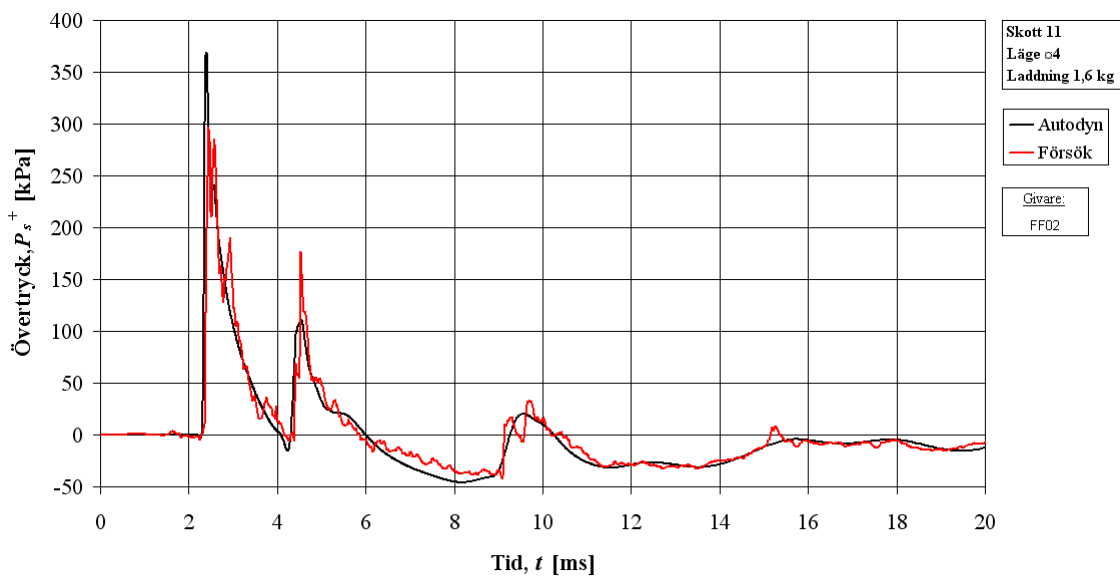
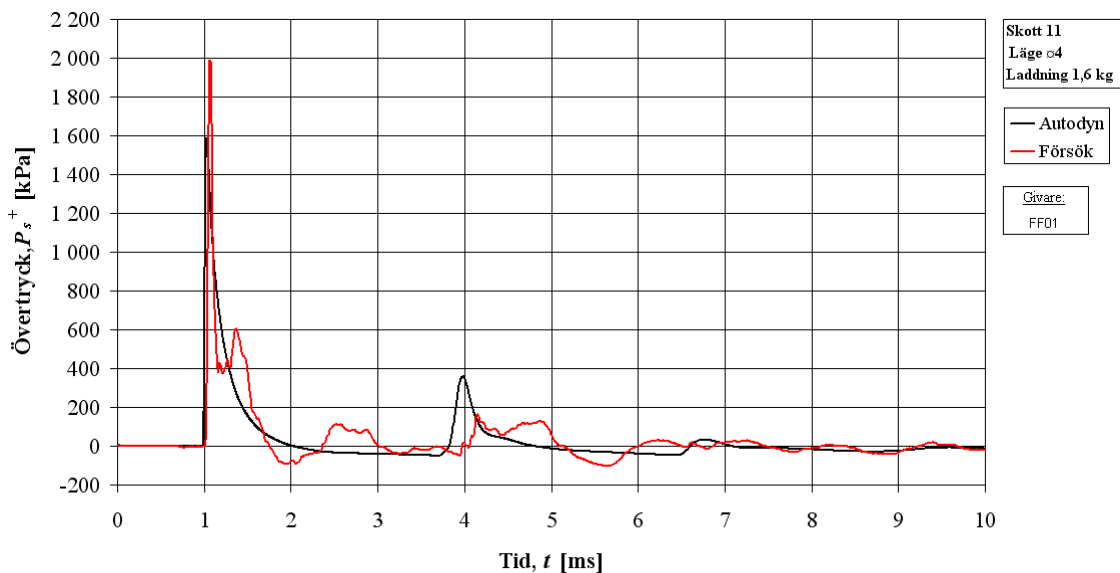


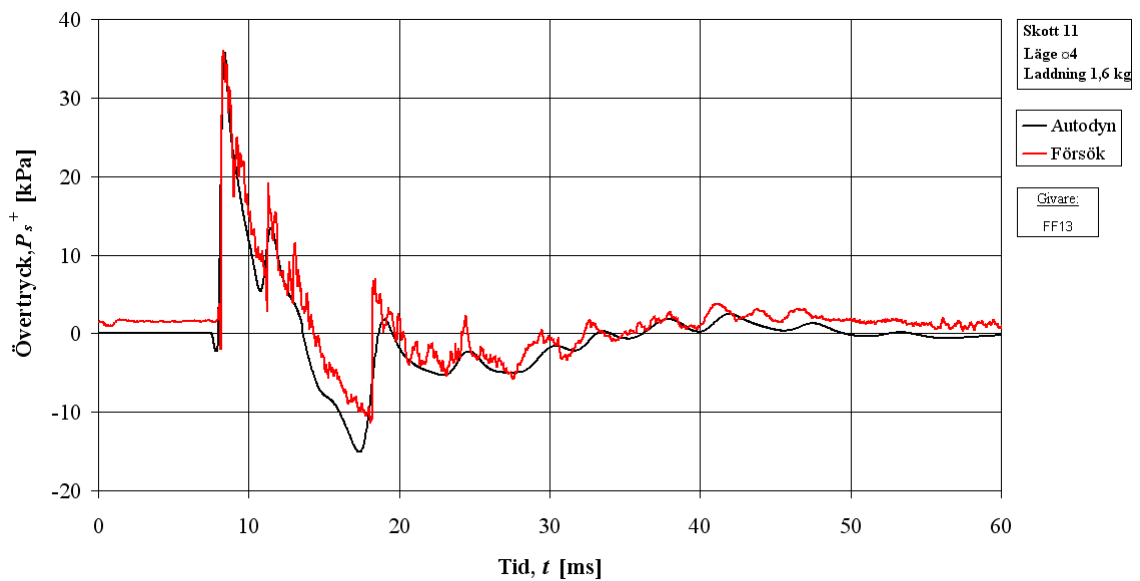
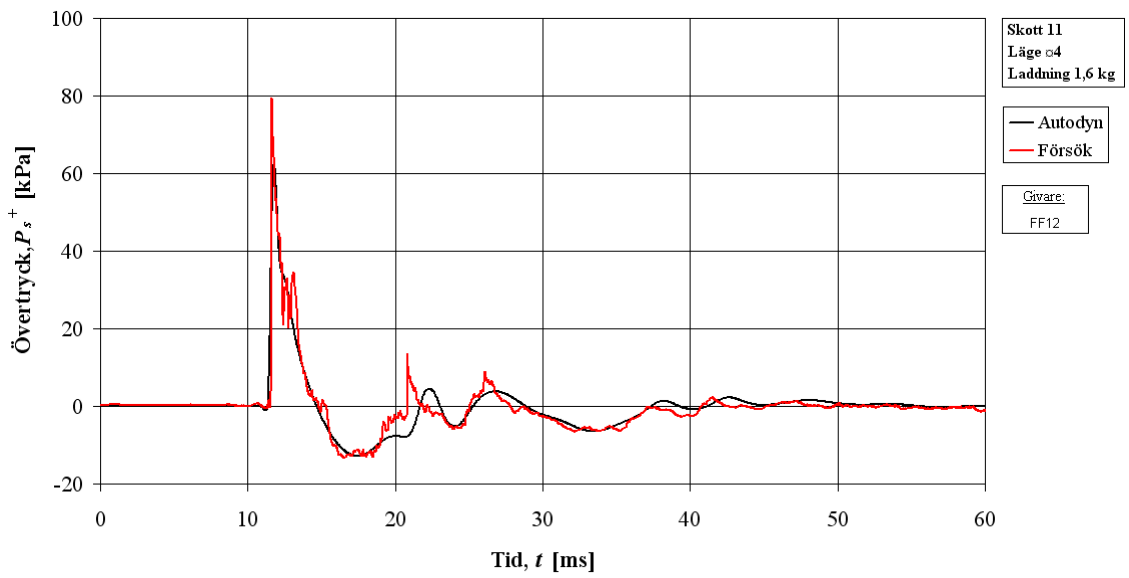
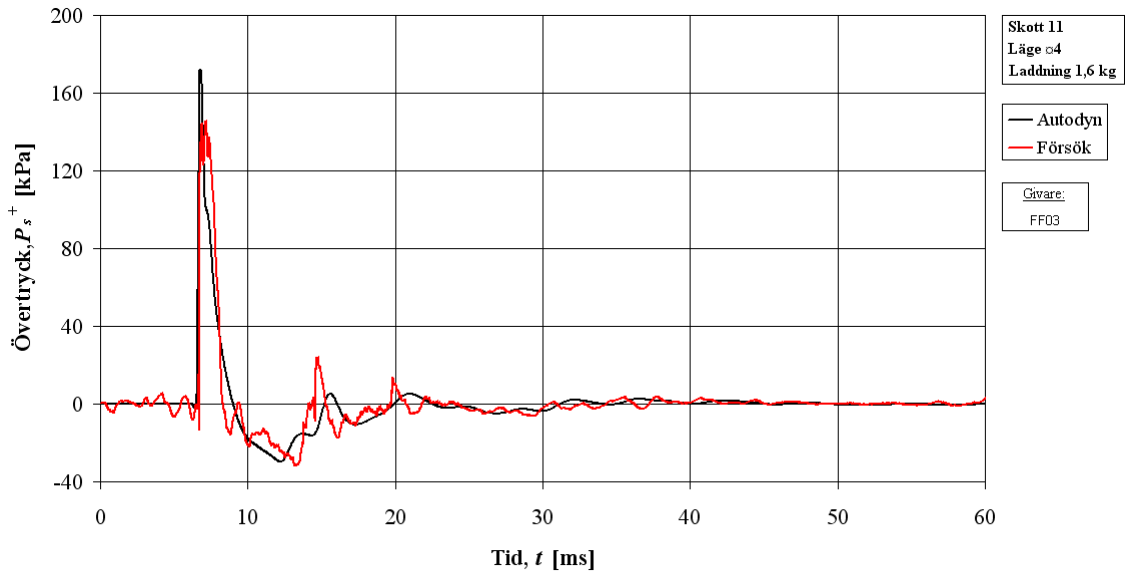


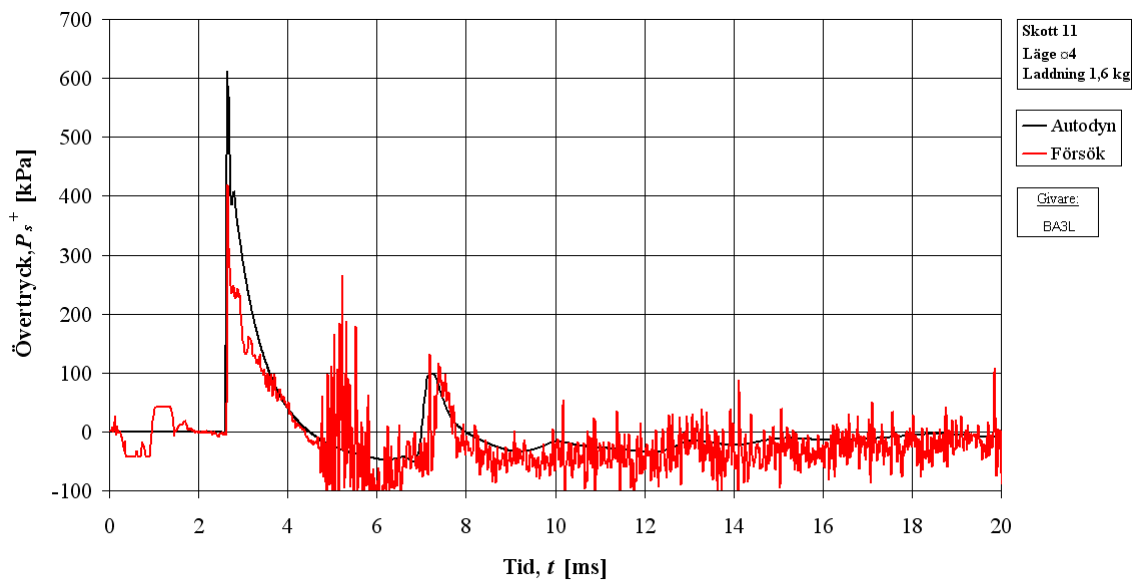
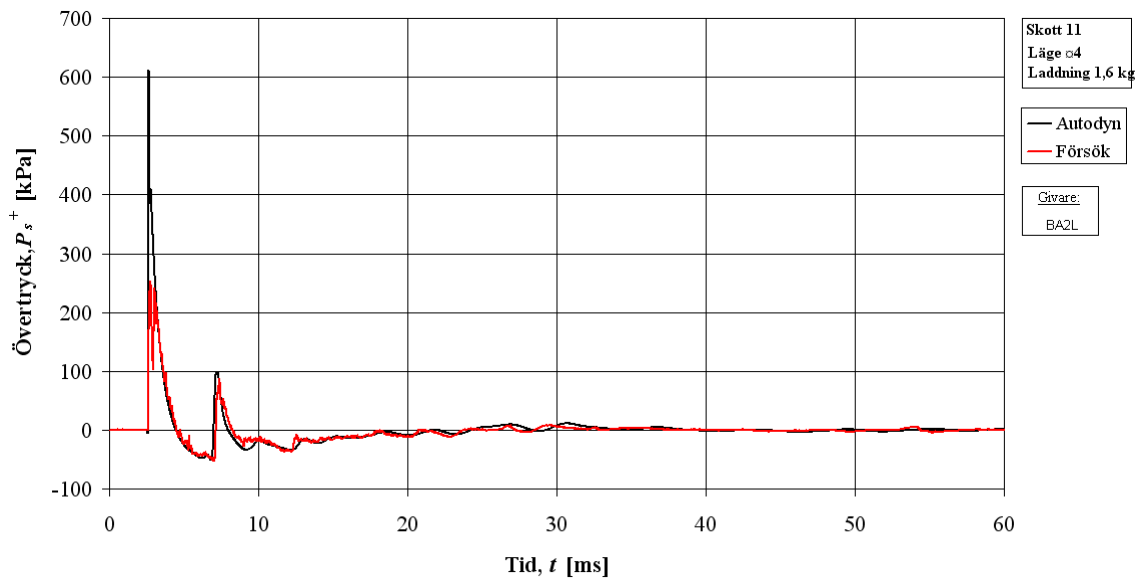
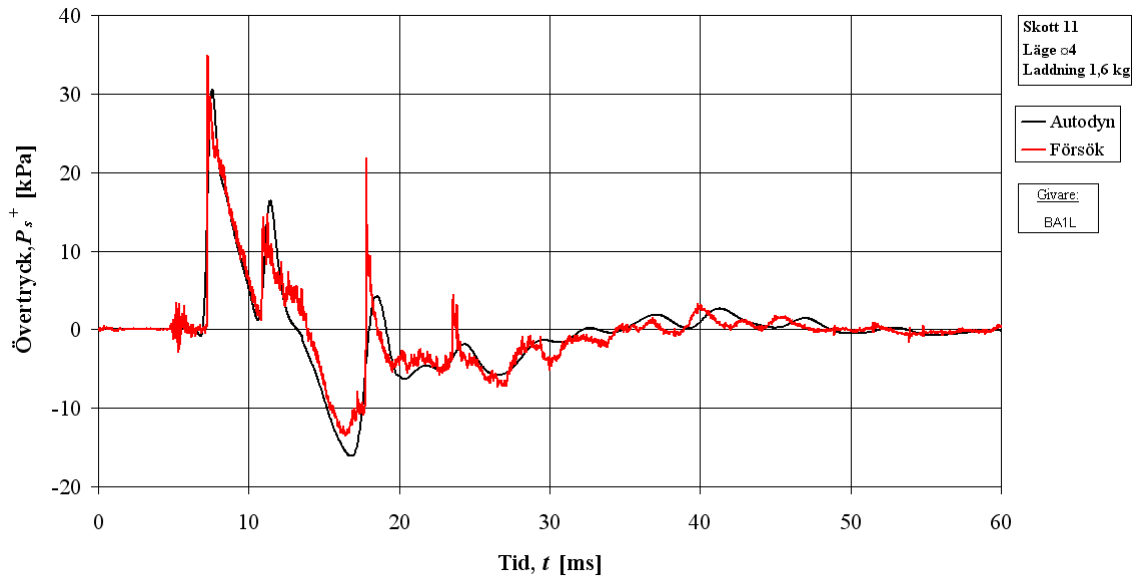


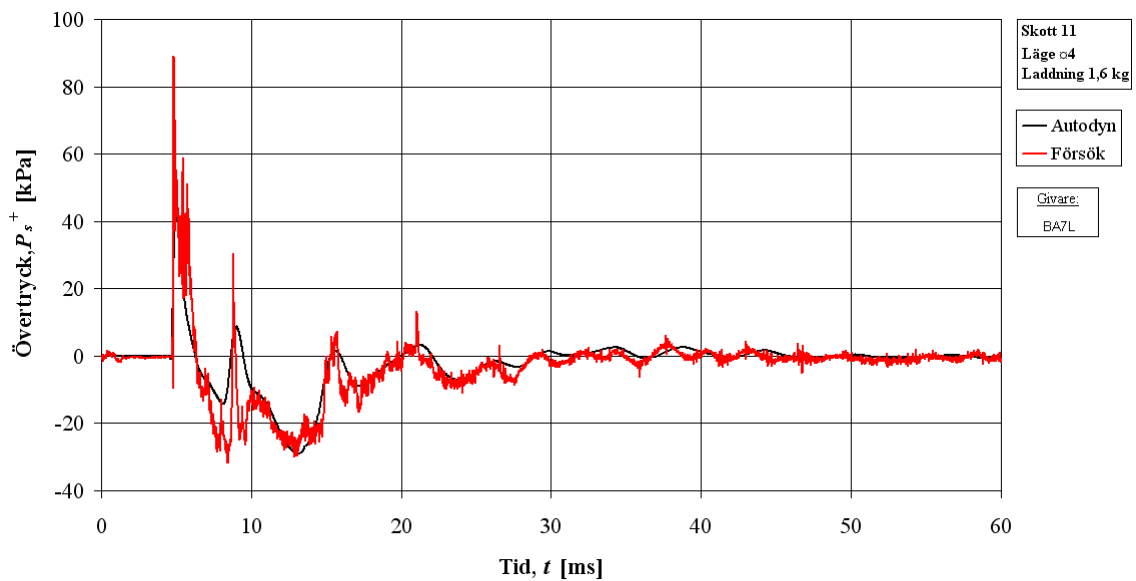
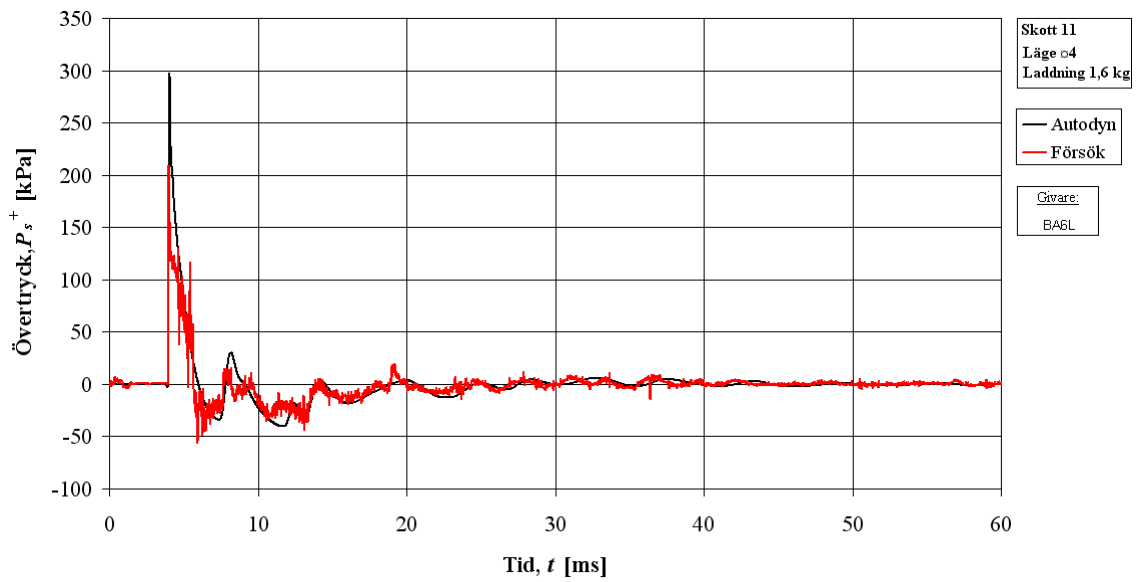
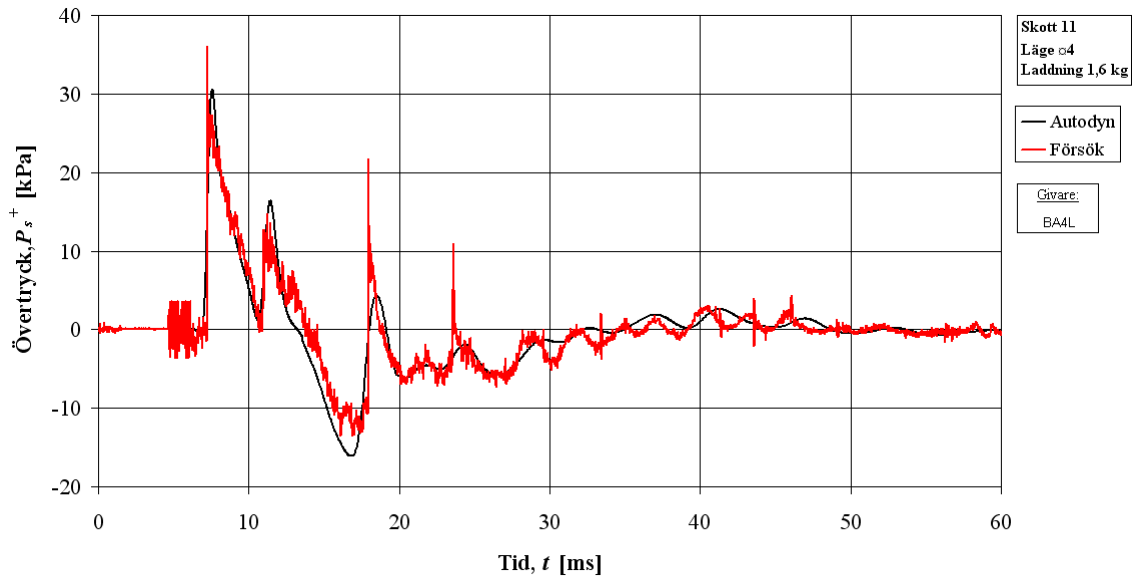
A.8 Skott #11 – 1,6 kg, läge 4

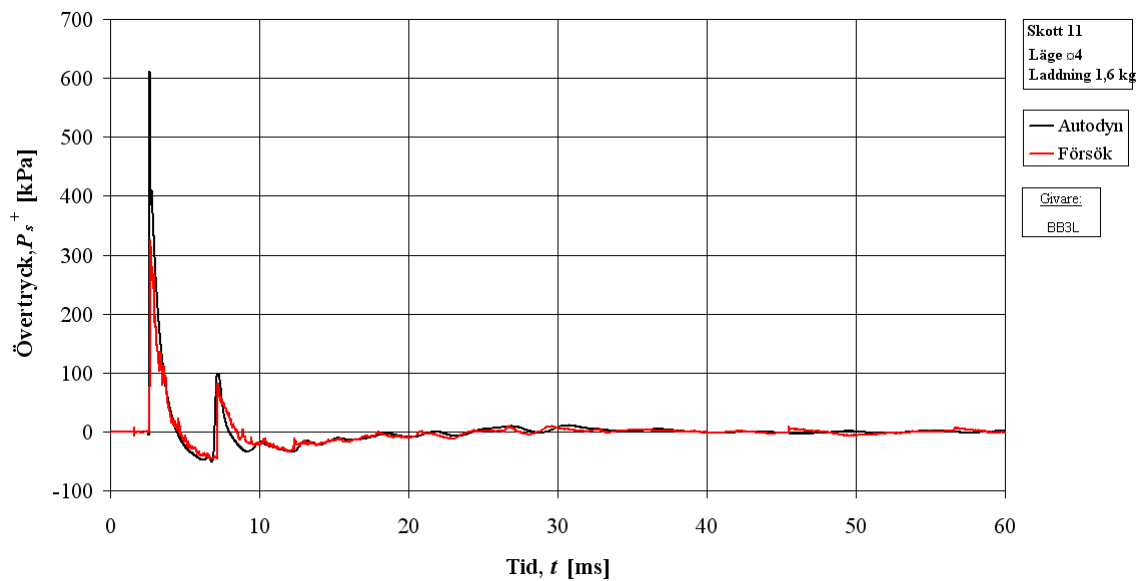
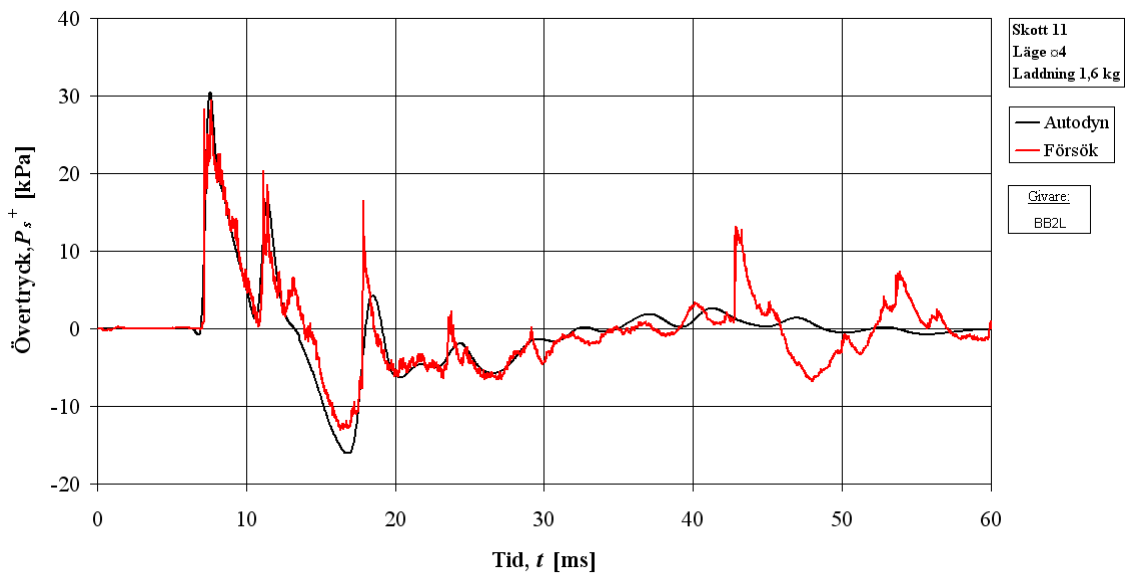
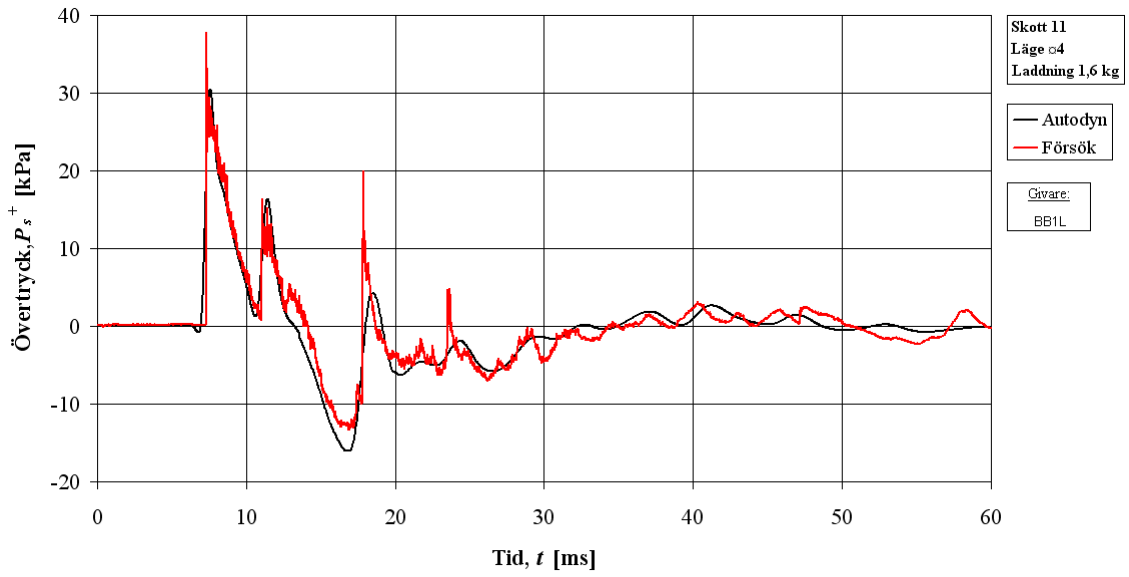
I nedanstående figurer visas tryck-tidskurvor från försök samt motsvarande analyse i Autodyn för skott #11 – 1,6 kg PETN i läge 4. För laddningens samt givarnas position se kapitel 2. I vissa fall har tryckgivaren i försöket inte fungerat tillfredsställande och detta markeras då i aktuell figur.

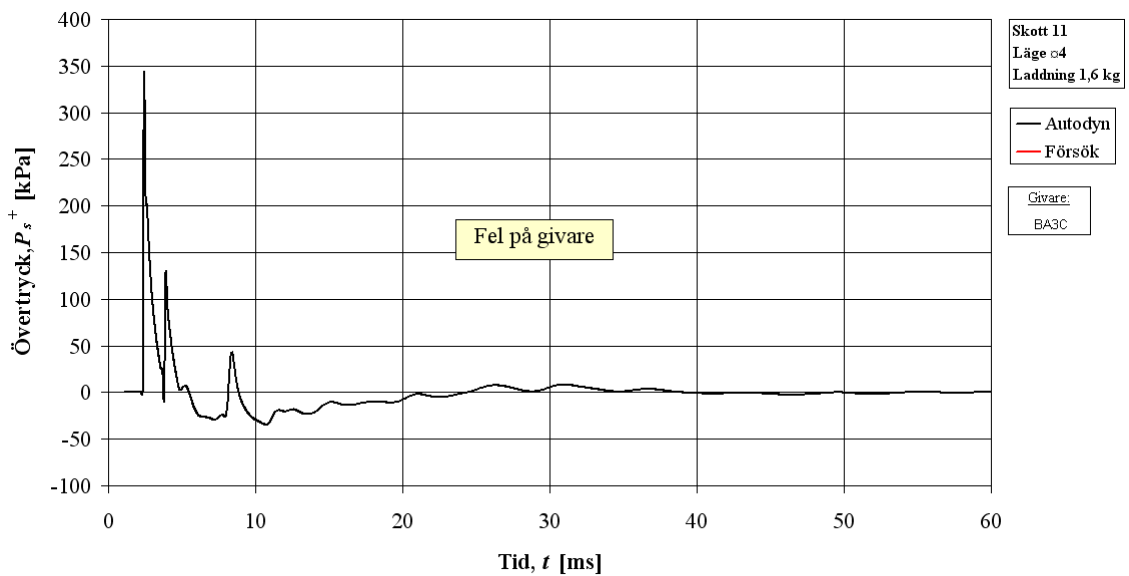
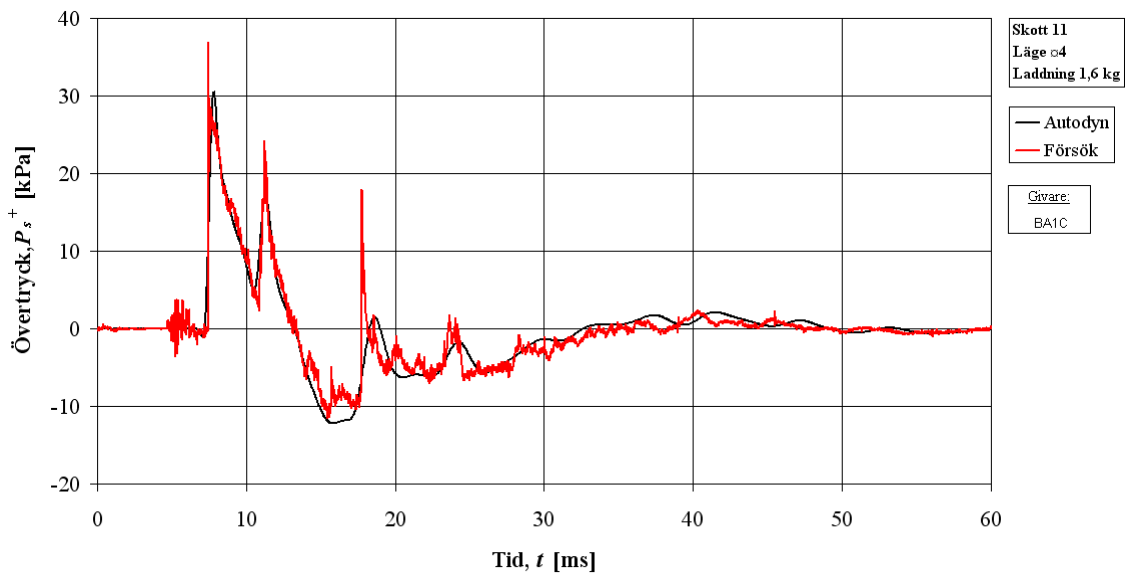
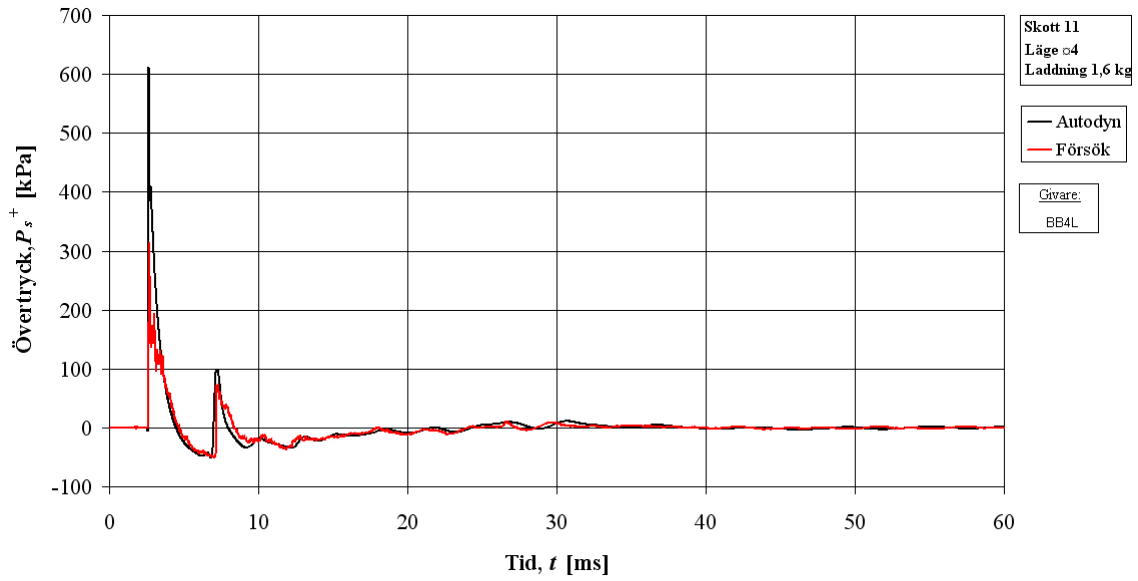


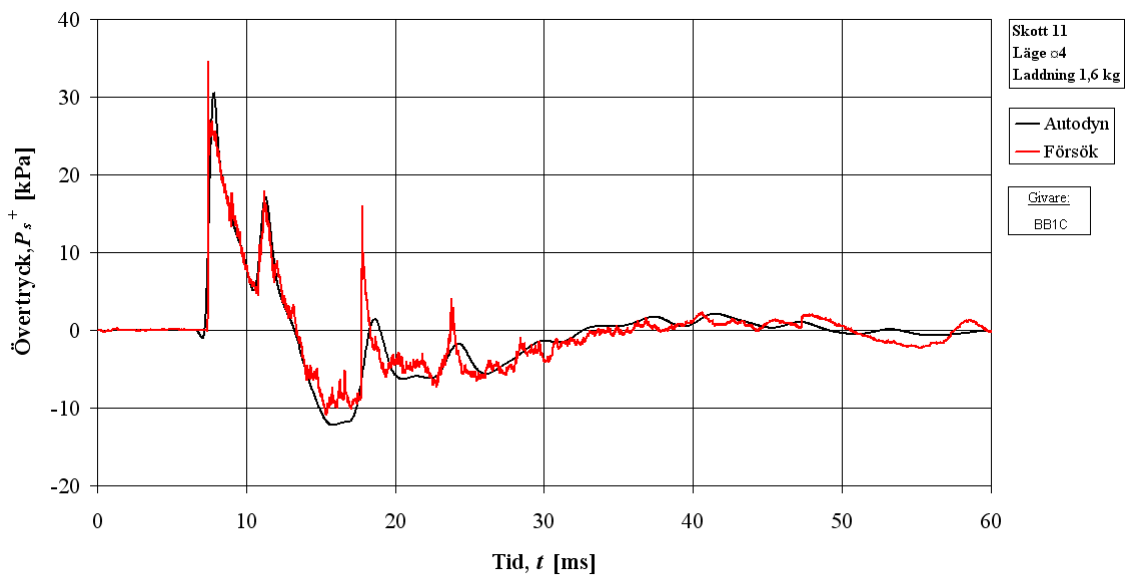
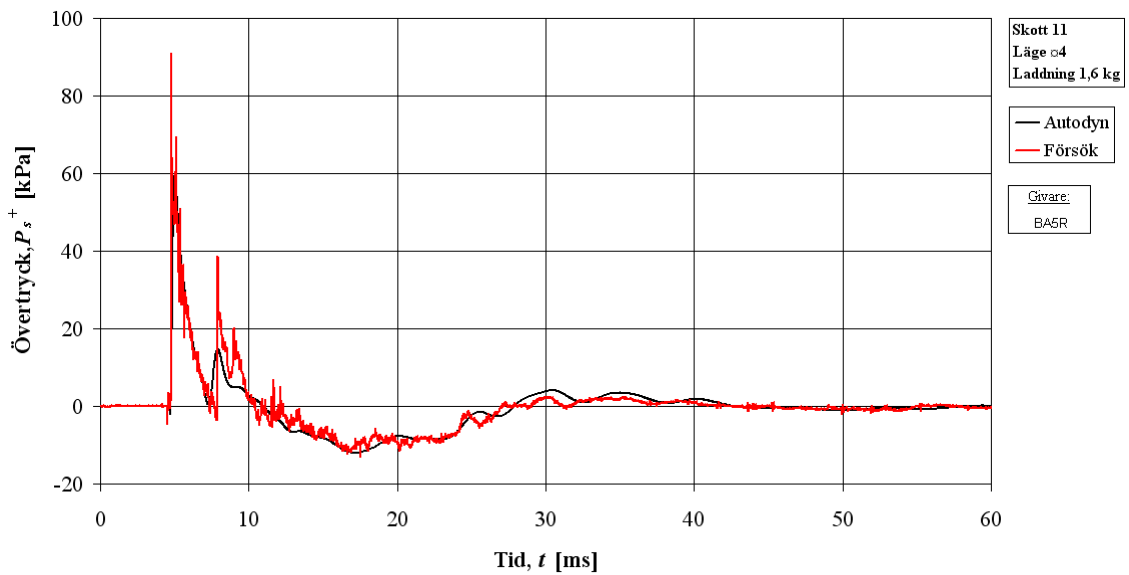
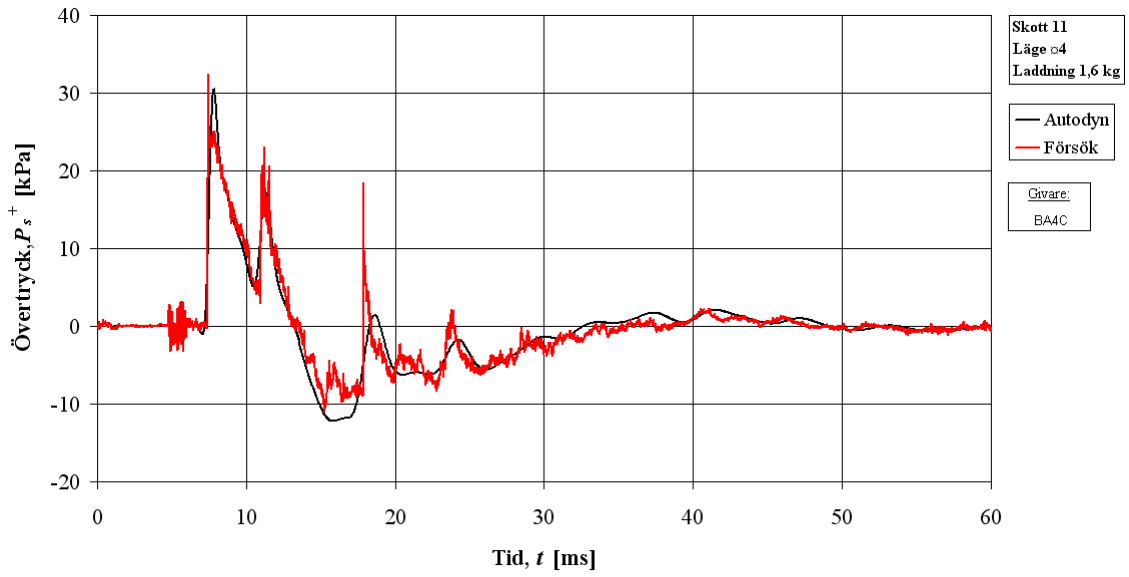


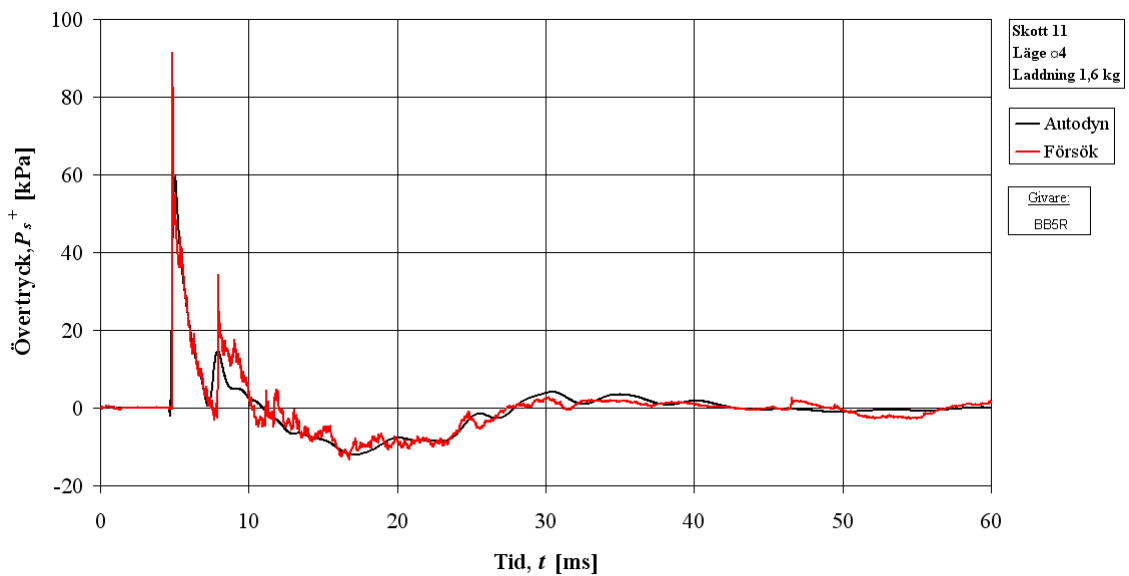
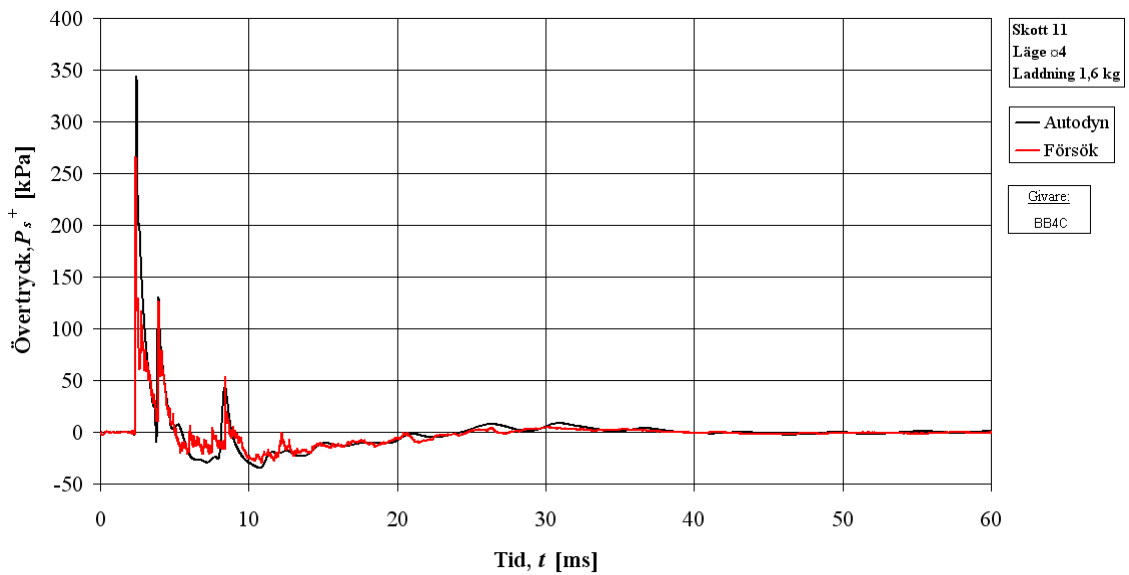
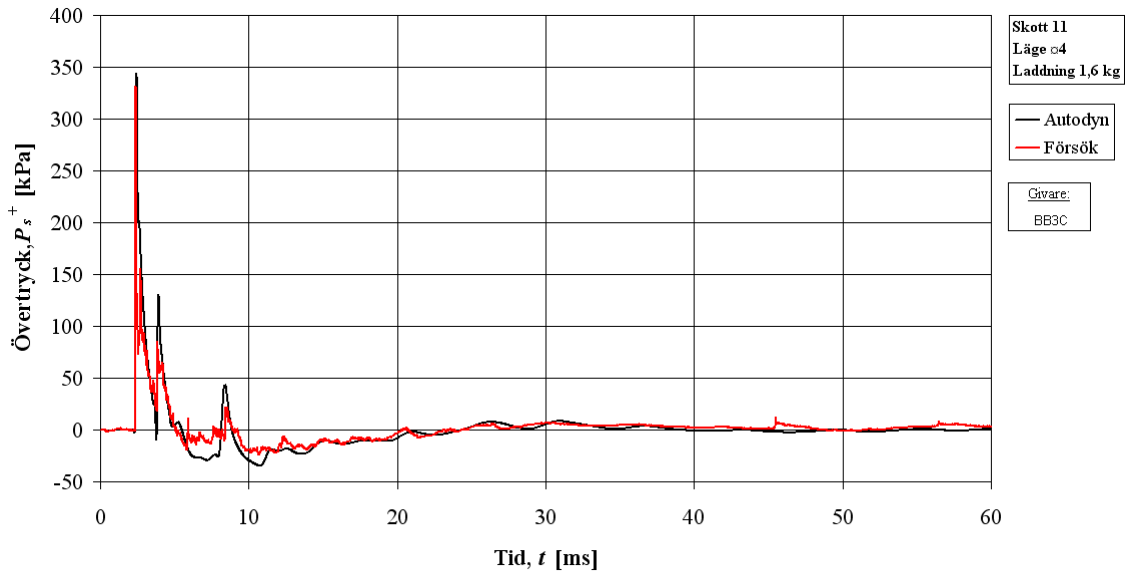


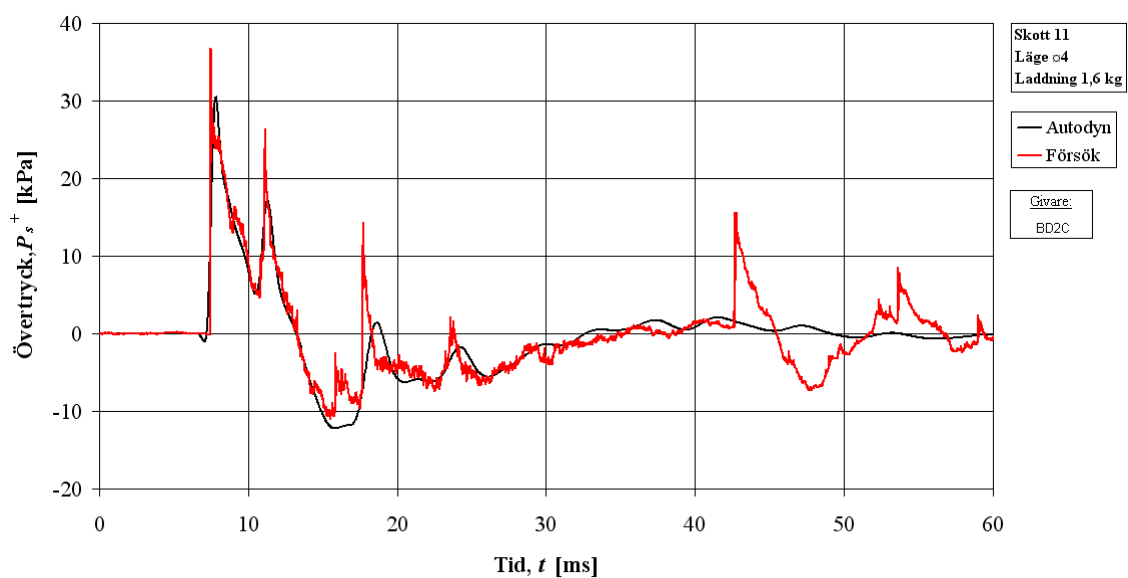
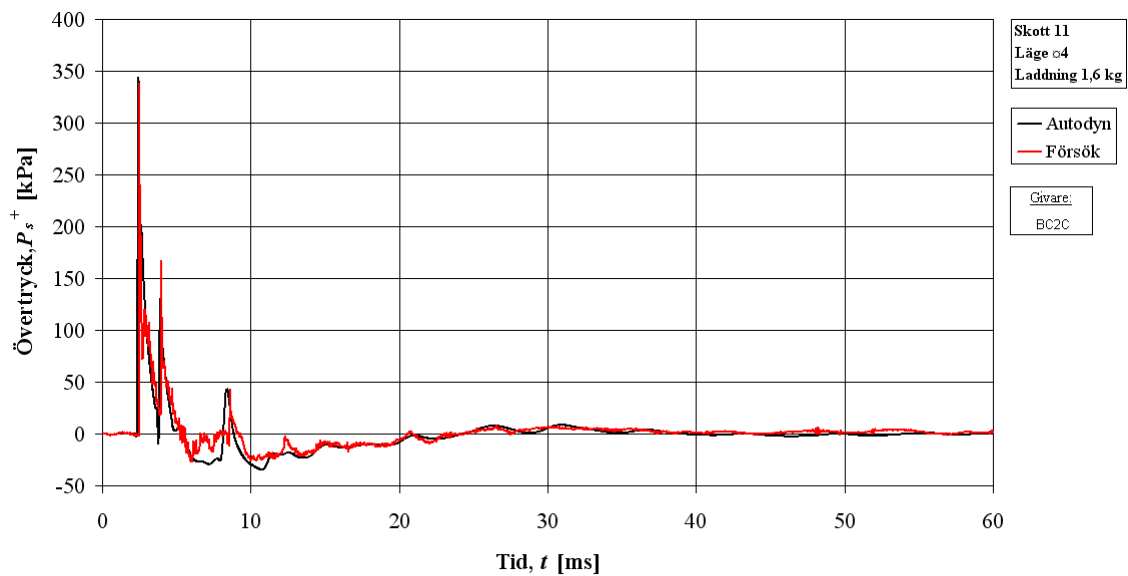












Bilaga B Sammanställning av stötvågsp parametrar i försök och analys i Autodyn

I Tabell B.1 till Tabell B.4 jämförs stötvågsp parametrarna P^+ , t_a , i^+ och i^- för samtliga skott med PETN-laddning. För definition av respektive stötvågsp parameter, se avsnitt C.2.

Tabell B.1 Sammanställning av resulterande stötvågsp parametrar P^+ , t_a , i^+ och i^- för skott 1 och skott 4 från Autodyn och försök när $t_{end} = 50$ ms. Ett ”-” indikerar att försöksresultatet inte är tillförlitligt.

Givare	Skott 1: Laddning 0,4 kg – läge #1								Skott 4: Laddning 0,4 kg – läge #2							
	Autodyn				Försök				Autodyn				Försök			
	P^+ [kPa]	t_a [ms]	i^+ [Pas]	i^- [Pas]	P^+ [kPa]	t_a [ms]	i^+ [Pas]	i^- [Pas]	P^+ [kPa]	t_a [ms]	i^+ [Pas]	i^- [Pas]	P^+ [kPa]	t_a [ms]	i^+ [Pas]	i^- [Pas]
FF01	656	0,62	143	137	480	0,65	248	-	755	0,61	155	152	859	0,46	240	160
FF02	129	2,42	85	94	168	2,58	57	-	137	2,41	86	98	161	2,22	77	97
FF03	32	7,69	52	50	47	8,14	82	54	33	7,72	50	51	41	7,89	51	41
FF12	14	13,45	35	35	20	14,27	38	35	140	2,36	167	168	111	2,52	150	192
FF13	16	9,89	32	32	18	10,50	28	31	52	7,62	74	72	47	8,03	70	80
BA1L	51	3,71	61	67	-	-	-	-	12	7,94	35	37	11	8,00	33	35
BA2L	7	9,63	49	48	8	10,28	53	49	12	7,94	62	63	12	8,50	60	62
BA3L	51	3,71	113	115	63	3,89	112	110	233	2,82	165	159	271	2,90	190	176
BA4L	2 100	0,63	461	208	1 745	0,63	429	-	233	2,82	127	126	155	2,96	93	116
BA6L	94	1,56	76	148	114	1,68	104	107	470	1,43	206	173	-	-	-	-
BA7L	1 221	1,05	290	211	599	1,02	187	452	470	1,43	192	159	373	1,46	159	134
BB1L	6	15,34	20	22	11	16,76	22	19	4	16,59	21	22	6	17,72	21	21
BB2L	3	22,00	21	20	3	23,35	23	20	4	19,46	15	15	4	20,62	16	15
BB3L	6	15,34	42	44	11	16,63	45	44	24	13,31	59	60	30	14,17	60	61
BB4L	14	13,41	68	70	-	-	-	-	26	11,76	69	63	26	12,23	67	62
BA1C	48	4,19	57	63	57	4,42	58	59	12	8,29	32	34	14	8,78	33	32
BA3C	48	4,19	101	104	53	4,38	97	97	174	3,34	141	139	163	3,44	115	203
BA4C	803	1,34	230	195	364	1,23	196	183	174	3,34	113	115	155	3,42	95	100
BA5R	20	5,80	42	46	23	6,02	43	43	25	7,36	42	43	41	7,44	38	49
BB1C	6	15,53	20	21	10	16,87	21	18	4	16,85	22	23	5	17,86	21	21
BB3C	6	15,53	36	38	-	-	-	-	24	13,57	54	54	20	14,41	53	59
BB4C	14	13,65	57	59	16	14,63	62	61	24	12,03	65	60	27	12,50	66	60
BB5R	8	17,38	22	22	16	18,51	24	20	7	15,34	24	25	7	16,33	25	23
BC2C	7	11,80	48	47	8	11,08	42	58	12	8,29	58	59	11	8,81	54	57
BD2C	2	23,11	11	12	2	24,17	12	11	4	19,67	15	15	4	20,65	16	15

Tabell B.2 Sammanställning av resulterande stötvågsp parametrar P^+ , t_a , i^+ och i^- för skott 7 och skott 10 från Autodyn och försök när $t_{end} = 50$ ms. Ett ”-” indikerar att försöksresultatet inte är tillförlitligt.

Givare	Skott 7: Laddning 0,4 kg – läge #3								Skott 10: Laddning 0,4 kg – läge #4							
	Autodyn				Försök				Autodyn				Försök			
	P^+ [kPa]	t_a [ms]	i^+ [Pas]	i^- [Pas]	P^+ [kPa]	t_a [ms]	i^+ [Pas]	i^- [Pas]	P^+ [kPa]	t_a [ms]	i^+ [Pas]	i^- [Pas]	P^+ [kPa]	t_a [ms]	i^+ [Pas]	i^- [Pas]
FF01	698	0,62	226	184	610	0,61	237	704	755	0,61	177	176	431	0,56	168	210
FF02	136	2,38	140	141	93	2,53	120	220	142	2,38	152	160	119	2,43	141	167
FF03	33	7,74	76	77	45	7,78	71	66	50	7,64	73	71	47	8,02	54	118
FF12	136	2,38	137	141	93	2,63	113	155	25	13,35	42	42	38	13,73	40	41
FF13	34	7,61	114	112	37	8,21	106	102	13	9,28	34	35	14	9,63	35	28
BA1L	8	9,71	52	51	8	9,81	49	47	13	7,99	35	35	12	8,39	32	31
BA2L	52	3,73	113	115	40	3,90	110	116	234	2,83	155	154	110	2,90	126	147
BA3L	2 258	0,63	505	235	2 369	0,47	763	328	234	2,83	154	153	238	3,00	131	191
BA4L	52	3,73	70	73	58	3,81	73	74	13	7,99	35	35	11	8,45	32	31
BA6L	1 272	1,05	325	233	991	1,03	345	238	113	4,66	126	125	113	4,81	118	130
BA7L	103	1,61	70	132	146	1,65	72	174	22	5,48	47	59	34	5,84	52	60
BB1L	8	11,55	34	31	8	12,34	32	27	13	7,99	35	35	12	8,12	33	31
BB2L	5	13,52	33	35	5	13,85	32	33	13	7,99	35	35	12	7,62	37	35
BB3L	51	7,93	115	112	54	8,39	99	98	234	2,83	154	153	143	2,87	124	144
BB4L	77	6,45	131	127	73	6,89	122	118	234	2,83	155	154	124	2,86	127	151
BA1C	8	10,03	47	46	8	10,39	46	42	12	8,35	36	36	14	8,67	38	33
BA3C	813	1,34	273	226	296	1,25	107	505	176	3,36	132	134	-	-	-	-
BA4C	49	4,20	67	70	55	4,28	74	66	12	8,35	36	36	14	8,73	38	33
BA5R	21	5,89	51	52	24	5,67	47	50	26	7,43	52	52	43	7,45	56	49
BB1C	8	11,78	30	28	8	12,52	29	24	12	8,35	36	36	13	8,61	37	33
BB3C	51	8,29	109	108	58	8,71	89	85	176	3,36	132	134	188	3,35	118	108
BB4C	73	6,84	119	116	67	7,25	117	102	176	3,36	132	135	153	3,36	111	126
BB5R	15	10,83	43	45	17	11,23	40	35	26	7,43	52	52	47	7,44	55	50
BC2C	49	4,20	99	101	45	4,42	92	95	176	3,36	132	135	187	3,44	125	118
BD2C	5	13,80	34	36	6	14,80	33	34	12	8,35	36	36	13	8,57	41	40

Tabell B.3 Sammanställning av resulterande stötvågparametrar P^+ , t_a , i^+ och i^- för skott 2 och skott 5 från Autodyn och försök när $t_{end} = 50$ ms. Ett ”-” indikerar att försöksresultatet inte är tillförlitligt.

Givare	Skott 2: Laddning 1,6 kg – läge #1								Skott 5: Laddning 1,6 kg – läge #2							
	Autodyn				Försök				Autodyn				Försök			
	P^+ [kPa]	t_a [ms]	i^+ [Pas]	i^- [Pas]	P^+ [kPa]	t_a [ms]	i^+ [Pas]	i^- [Pas]	P^+ [kPa]	t_a [ms]	i^+ [Pas]	i^- [Pas]	P^+ [kPa]	t_a [ms]	i^+ [Pas]	i^- [Pas]
FF01	1 651	1,00	438	300	-	-	-	-	1 508	0,99	409	294	835	0,90	744	182
FF02	356	2,33	231	227	383	2,43	143	-	349	2,32	223	228	390	2,28	169	-
FF03	85	6,60	132	129	102	6,88	170	148	81	6,60	128	135	90	6,60	115	144
FF12	35	11,81	91	89	46	12,36	100	96	358	2,27	337	316	353	2,30	278	323
FF13	44	8,80	88	92	44	9,28	93	101	161	6,42	194	175	146	6,74	157	313
BA1L	146	3,39	127	150	131	3,55	115	148	29	6,80	71	82	31	6,97	70	79
BA2L	18	8,79	124	124	22	9,36	136	132	29	6,80	141	137	30	7,27	146	141
BA3L	146	3,39	282	281	143	3,52	274	272	622	2,57	430	349	455	2,62	270	523
BA4L	2 219	0,84	732	377	1 412	0,85	559	-	622	2,57	330	272	254	2,65	213	249
BA6L	147	1,61	186	354	221	1,70	156	411	769	1,49	453	318	-	-	-	-
BA7L	1 242	1,16	624	411	768	1,17	498	-	769	1,49	434	298	1 015	1,56	386	251
BB1L	16	14,07	53	60	29	15,21	54	59	10	15,01	62	64	14	15,74	61	60
BB2L	8	20,53	51	52	11	21,69	55	52	9	16,66	37	41	10	17,89	42	42
BB3L	17	14,07	104	109	27	15,21	106	109	77	11,60	139	130	76	11,97	133	124
BB4L	40	12,34	171	162	56	13,15	183	174	71	10,05	176	156	76	10,41	173	162
BA1C	80	3,24	114	139	93	3,35	111	140	28	7,02	73	82	38	7,43	72	76
BA3C	80	3,24	243	250	94	3,34	222	231	342	2,31	284	277	283	2,41	164	332
BA4C	3 975	0,50	734	303	2 350	0,60	625	-	342	2,31	245	241	292	2,40	185	215
BA5R	80	3,24	81	102	97	3,29	84	108	65	4,76	87	99	80	4,74	96	97
BB1C	18	14,27	50	56	27	15,31	51	55	9	15,14	61	63	17	15,85	62	57
BB3C	17	14,27	91	97	17	15,38	92	102	78	11,82	128	121	54	12,17	115	122
BB4C	52	12,58	153	146	90	13,33	161	146	70	10,30	168	149	72	10,63	162	143
BB5R	14	14,57	56	59	22	15,68	57	58	21	13,69	60	63	22	14,12	61	57
BC2C	17	10,38	120	125	19	11,02	134	123	28	7,02	134	131	27	3,70	136	129
BD2C	5	21,31	28	30	6	22,12	32	28	9	16,88	40	43	10	17,98	43	43

Tabell B.4 Sammanställning av resulterande stötvågparametrar P^+ , t_a , i^+ och i^- för skott 8 och skott 11 från Autodyn och försök när $t_{end} = 50$ ms. Ett ”-” indikerar att försöksresultatet inte är tillförlitligt.

Givare	Skott 8: Laddning 1,6 kg – läge #1								Skott 11: Laddning 1,6 kg – läge #2							
	Autodyn				Försök				Autodyn				Försök			
	P^+ [kPa]	t_a [ms]	i^+ [Pas]	i^- [Pas]	P^+ [kPa]	t_a [ms]	i^+ [Pas]	i^- [Pas]	P^+ [kPa]	t_a [ms]	i^+ [Pas]	i^- [Pas]	P^+ [kPa]	t_a [ms]	i^+ [Pas]	i^- [Pas]
FF01	1 732	0,99	747	366	945	0,96	755	535	1 589	0,99	514	364	1 988	1,01	609	372
FF02	371	2,30	337	284	327	2,34	304	767	369	2,29	321	303	313	2,29	283	310
FF03	107	6,65	163	163	116	6,71	151	194	172	6,50	183	166	145	6,71	176	190
FF12	371	2,30	374	335	355	2,37	303	419	62	11,33	101	101	79	11,50	92	109
FF13	104	6,52	262	247	106	6,86	273	251	36	7,94	86	90	35	8,17	85	86
BA1L	21	8,84	131	123	27	9,17	137	122	31	6,92	85	91	35	7,20	83	86
BA2L	144	3,40	271	278	90	3,47	252	270	611	2,58	405	332	253	2,60	299	301
BA3L	2 342	0,84	964	453	1 215	0,85	730	1 230	611	2,58	405	332	419	2,61	336	804
BA4L	144	3,40	174	184	136	3,49	151	174	31	6,92	85	91	36	7,21	84	85
BA6L	1 398	1,17	832	477	1 238	1,21	834	422	298	3,94	260	258	209	3,95	202	213
BA7L	148	1,62	166	381	279	1,69	138	433	43	4,69	57	171	90	4,79	75	223
BB1L	19	10,27	84	86	24	10,74	85	81	31	6,92	85	91	38	7,28	85	88
BB2L	16	11,69	78	83	17	11,93	88	79	31	6,92	85	91	30	7,03	93	103
BB3L	133	6,60	267	250	106	6,91	253	248	611	2,58	405	332	326	2,62	287	299
BB4L	238	5,44	336	279	192	5,74	311	268	611	2,58	405	332	314	2,58	269	303
BA1C	28	9,08	124	116	29	9,26	126	112	30	7,17	86	92	37	7,41	82	87
BA3C	4 329	0,50	841	342	-	-	-	-	344	2,33	284	279	-	-	-	-
BA4C	83	3,26	136	153	100	3,30	133	153	30	7,17	86	92	32	7,39	83	84
BA5R	83	3,25	110	126	89	3,17	125	146	60	4,73	111	119	91	4,72	106	110
BB1C	19	10,37	78	79	25	10,86	80	76	30	7,17	86	92	35	7,40	87	87
BB3C	134	6,91	248	237	163	7,13	240	216	344	2,33	284	279	332	2,35	244	176
BB4C	205	5,70	283	246	159	5,90	259	235	344	2,33	284	279	267	2,35	179	232
BB5R	31	8,53	99	105	50	8,78	104	101	60	4,73	111	119	92	4,82	108	110
BC2C	83	3,26	207	223	105	3,31	198	208	344	2,33	284	279	339	2,46	257	189
BD2C	15	11,87	80	84	20	12,68	91	83	30	7,17	86	92	37	7,44	97	107

Bilaga C Uttryck för stötvågparametrar i positiv och negativ fas

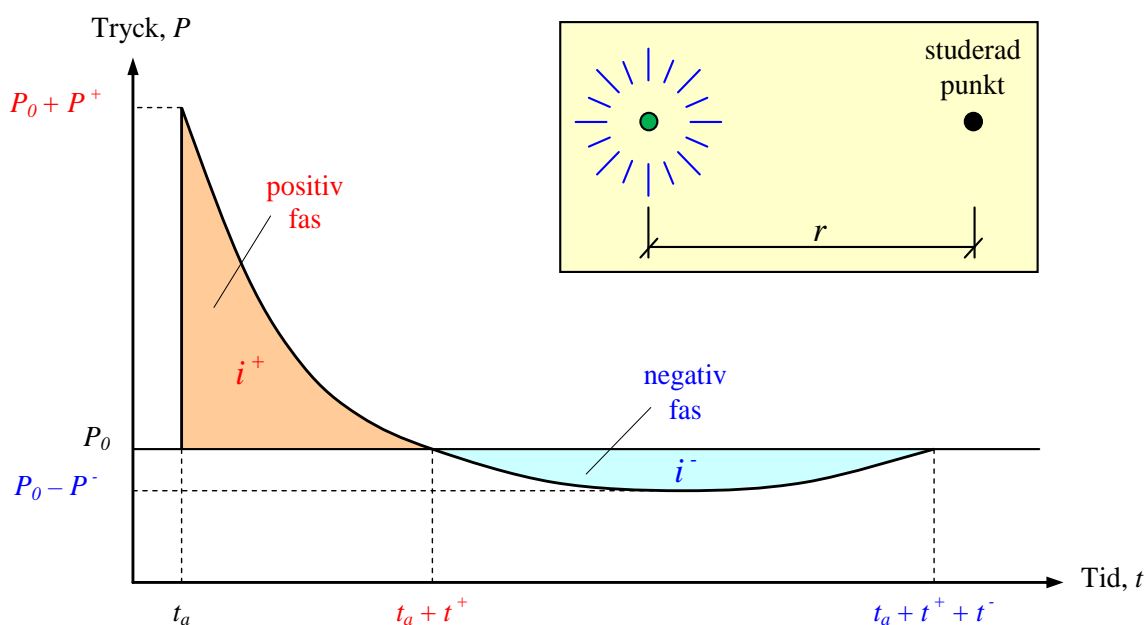
C.1 Orientering

I kapitel 4 beskrivs en förenklad, ingenjörsmässig metod att använda vid bestämning av de resulterande laster som fås i en given punkt vid en explosion i stadsmiljö. I redovisade uttryck hänvisas till framtagandet av ett flertal stötvågparametrar som ligger till grund för de tryck-tidskurvor som tas fram. För den positiva fasen kan med fördel ConWep (1992) användas. Eftersom tillgången till detta program dock är begränsat på den svenska marknaden återges i denna bilaga dessa samband i diagram- och tabellform. För den negativa fasen ges inga värden i ConWep utan dessa får istället hämtas från annat håll.

Material som redovisas i avsnitt C.2 och C.3 är utdrag från Johansson och Laine (2012). Där ändringar gjorts i uttryck kommenteras detta i fotnoter. Avsnitt C.4 baseras på material från Granström (1958), PSADs (1998), von Rosen (2006) samt Johansson och Laine (2012).

C.2 Ideal luftstötvåg vid fri avlastning

Figur C.1 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 då flöden av luft strömmar mot explosionens centrum och därigenom skapar ett partiellt vakuum. Så småningom återgår trycket till P_0 vid tiden $t_a + t^+ + t^-$.



Figur C.1 Typiskt tryck-tidssamband för ideal luftstötvåg vid fri sfärisk utbredning.

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 luftstövåg. Dessa kan definieras som

$$i^+ = \int_{t_a}^{t_a+t^+} (P(t) - P_0) dt \quad (C.1)$$

$$i^- = \int_{t_a+t^+}^{t_a+t^++t^-} (P_0 - P(t)) dt \quad (C.2)$$

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

$$P(t) = P_0 + P^+ \left(1 - \frac{t}{t^+}\right) e^{-\alpha t/t^+} \quad (C.3)$$

Här markerar t tiden efter stötvågens ankomst (dvs. mätt från ankomsttiden t_a) och α en faktor med vilken övertryckets avklingning kan styras. Kombinerad av ekvation (C.1) och (C.4) ger

$$i^+ = P^+ t^+ \left[\frac{1}{\alpha} - \frac{1}{\alpha^2} (1 - e^{-\alpha}) \right] \quad (C.4)$$

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

Framtagningen av ett motsvarande uttryck för den negativa fasen har i litteraturen till stor del bortsetts från. En anledning till detta med 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. Baker (1973) presenterar dock ett uttryck där den negativa fasen kan beskrivas som

$$P(t) = P_0 - P^- \frac{t}{t^-} \left(1 - \frac{t}{t^-}\right) e^{-4t/t^-} \quad (C.5)$$

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 C.3.

En närmare undersökning av uttrycket i ekvation (3.5) pekar på att detta bör modifieras något¹. För att det undertryck P^- som används som indata i uttrycket ska återfås i det resulterande tryck-tids-sambandet krävs en multiplikation med en faktor 13,9 i den andra termen, dvs.

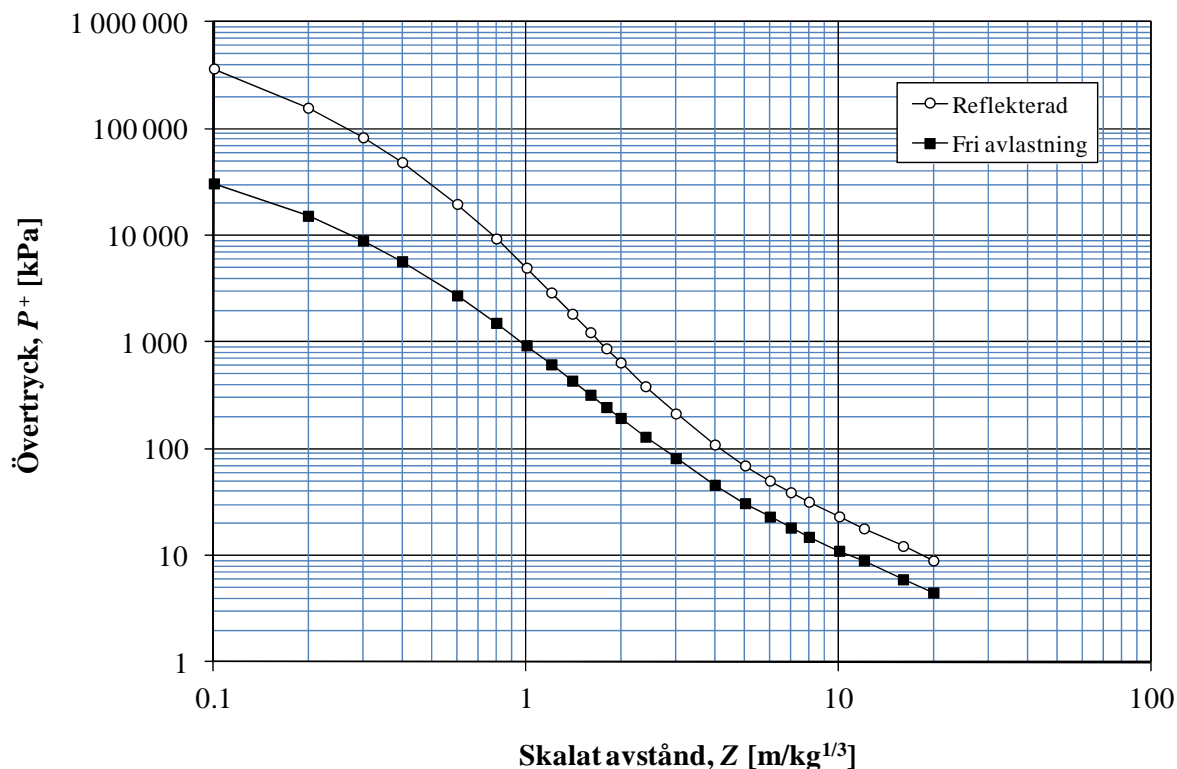
$$P(t) = P_0 - 13,9 \cdot P^- \frac{t}{t^-} \left(1 - \frac{t}{t^-}\right) e^{-4t/t^-} \quad (C.6)$$

¹ Detta är ett tillägg gentemot vad som anges i Johansson och Laine (2012). Ekvation (C.6) ersätter ekvation (C.5).

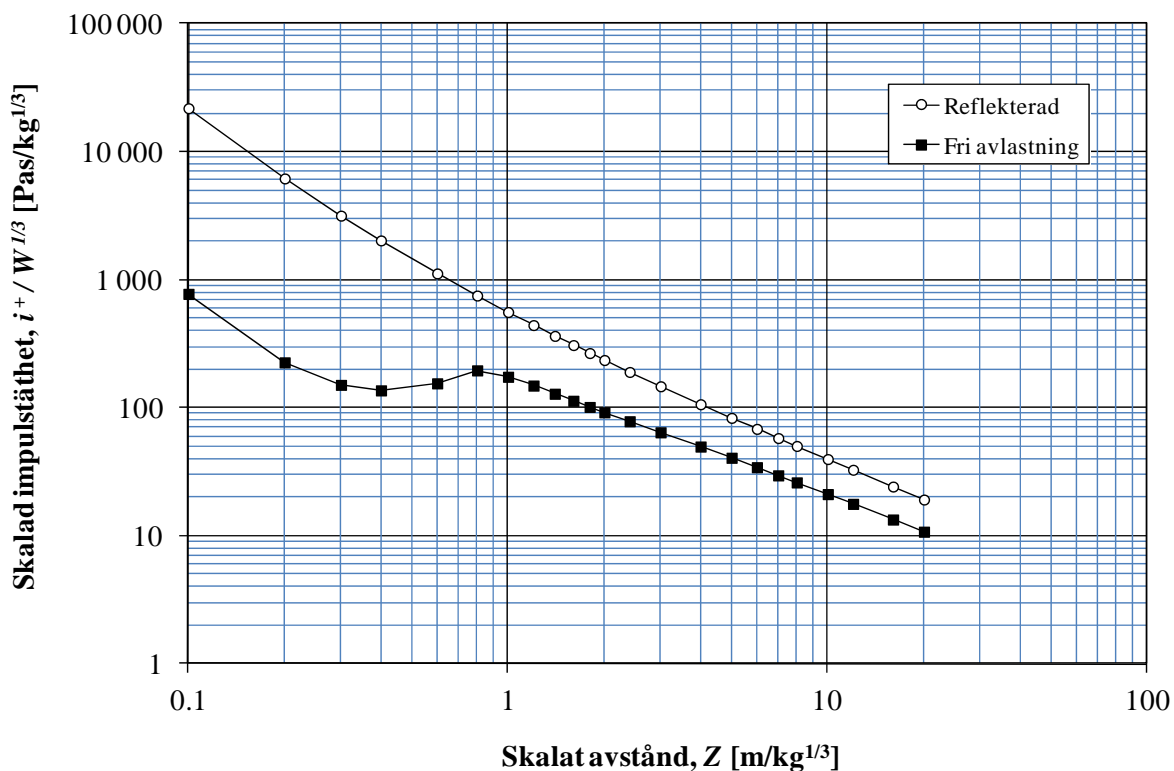
C.3 Positiv fas

Samband för stötvågsparametrar i positiv fas baseras på ConWep (1992) och nedan angivna samband är hämtat från Johansson och Laine (2012).

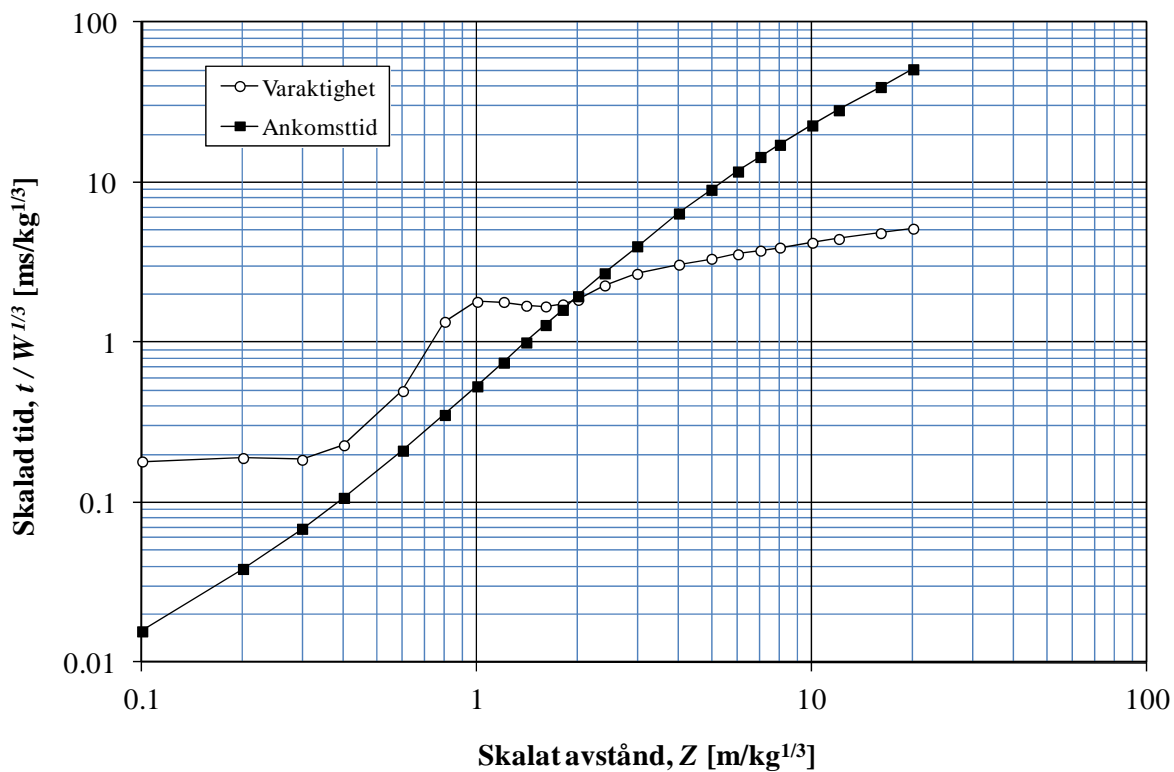
I Figur C.2 till Figur C.4 redovisas tryck, impulstäthet, ankomsttid och varaktighet för en explosion med möjlighet till fri, sfärisk avlastning. För tryck och impulstäthet ges samband för både oreflekterad och reflekterad (normalreflexion) stötvåg. Det ska även noteras att impulstäthet, ankomsttid samt varaktighet har skalats med hänsyn till laddningens storlek $W^{1/3}$ i enlighet med Hopkinsons skallag, se Johansson och Laine (2012). Tabellerade värden presenteras i Tabell C.1.



Figur C.2 Reflekterat och oreflekterat övertryck som funktion av det skalade avståndet Z. Från ConWep (1992).



Figur C.3 Reflekterad och oreflekterad impulstäthet som funktion av det skalade avståndet Z . Från ConWep (1992).



Figur C.4 Ankomsttid och varaktighet som funktion av det skalade avståndet Z . Från ConWep (1992).

Tabell C.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}]	t _a / W ^{1/3} [ms/kg ^{1/3}]	t ⁺ / W ^{1/3} [ms/kg ^{1/3}]
0,1	30 830	368 300	775	21 840	0,016	0,180
0,2	15 300	158 000	226	6 176	0,038	0,190
0,3	8 996	83 360	151	3 164	0,069	0,185
0,4	5 745	48 800	137	2 026	0,107	0,228
0,6	2 747	19 800	155	1 119	0,211	0,496
0,8	1 521	9 384	196	752	0,352	1,346
1	935	5 006	175	559	0,532	1,795
1,2	620	2 931	149	442	0,749	1,792
1,4	437	1 851	129	364	1,001	1,697
1,6	322	1 242	113	309	1,286	1,679
1,8	247	877	101	267	1,601	1,729
2	195	646	92	236	1,944	1,846
2,4	130	387	78	190	2,702	2,272
3	82	215	64	147	3,988	2,684
4	46	110	50	106	6,396	3,064
5	31	70	41	83	8,996	3,334
6	23	50	34	68	11,692	3,556
7	18	39	30	58	14,432	3,748
8	15	32	26	50	17,190	3,916
10	11	23	21	40	22,720	4,200
12	9	18	18	33	28,280	4,434
16	6	12	13	24	39,480	4,822
20	5	9	11	19	50,960	5,142

C.4 Negativ fas

Von Rosen (2006) anger uttryck framtagna efter kurvanpassning mot samband givna i PSADs (1998) ur vilka det negativa trycket och den negativa varaktigheten kan uppskattas som

$$P_s^- = \min \begin{cases} 101,3 \\ 0,0452 \cdot Z - 1,1066 \end{cases} \text{ [kPa]} \quad (\text{C.7})$$

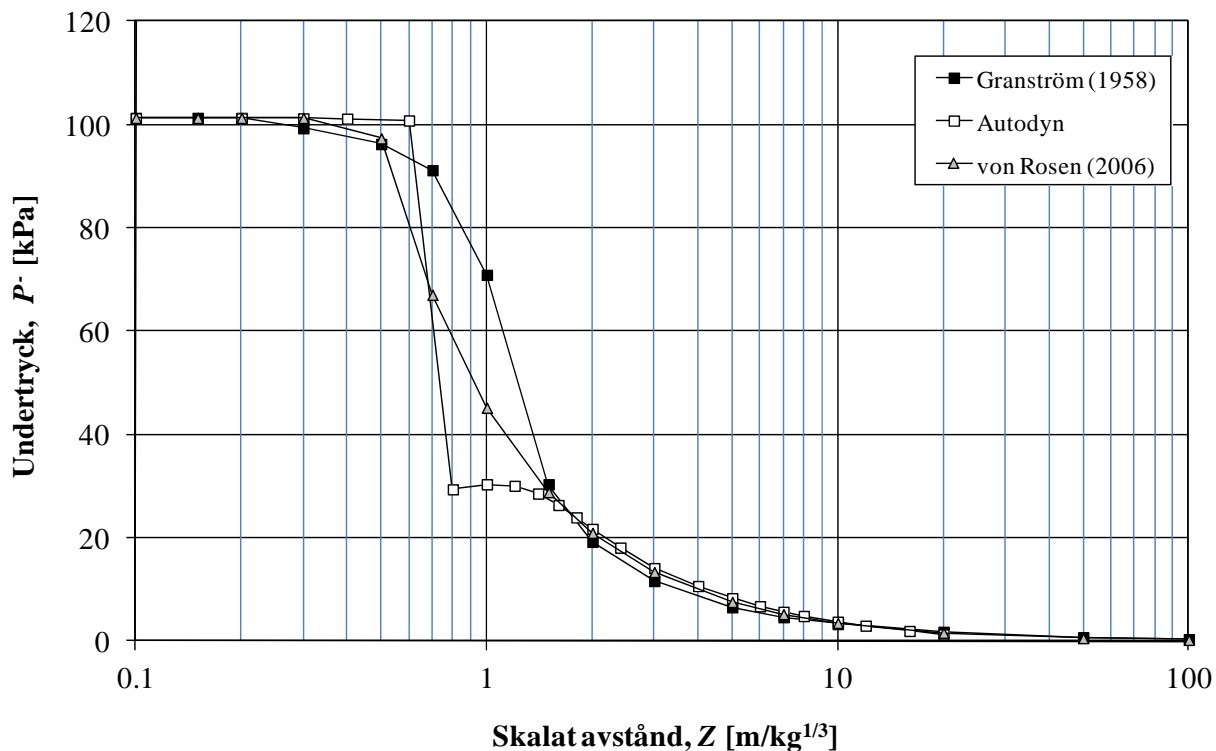
$$t^- = (9,8952 \cdot Z^{0,0931}) \cdot W^{1/3} \text{ [ms]} \quad (\text{C.8})$$

där

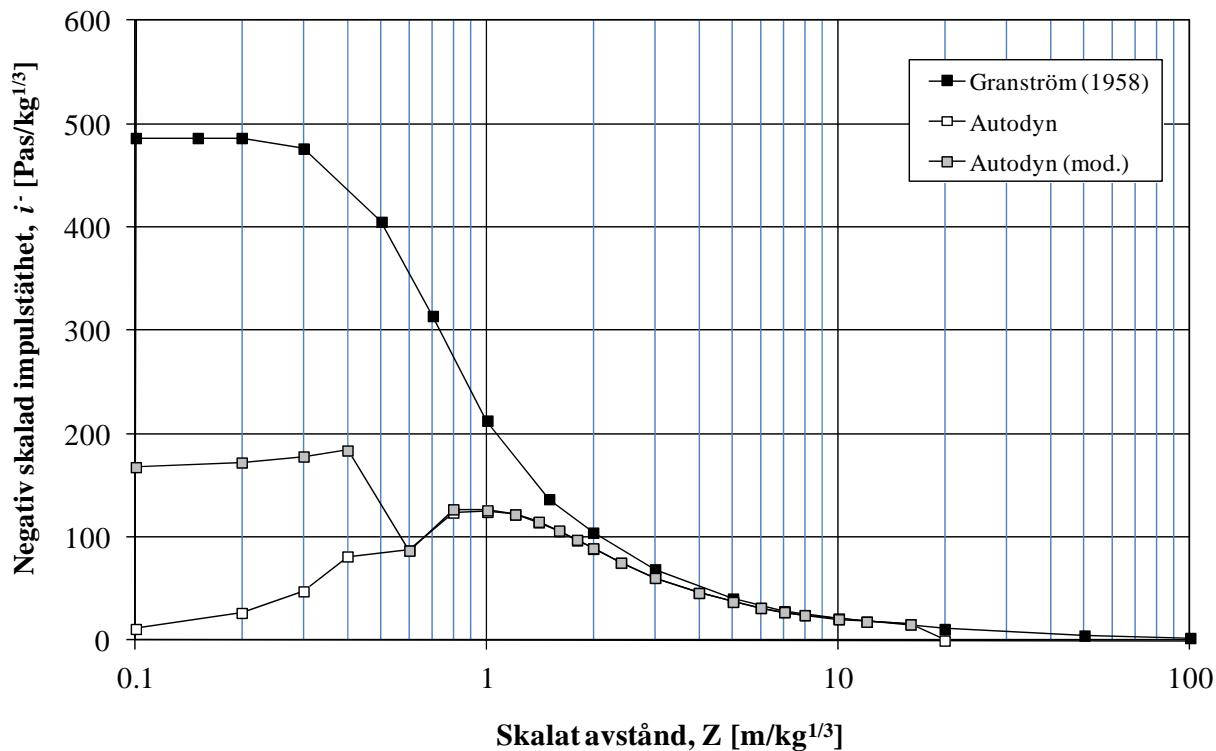
$$Z = \frac{r}{W^{1/3}} \quad (\text{C.9})$$

är det skalade avståndet baserat på avståndet r och laddningsvikten (i ekvivalent mängd TNT) W . Med användning av uttrycket för den negativa fasan enligt ekvation (C.6) kan den negativa impulstätheten sedan tecknas som

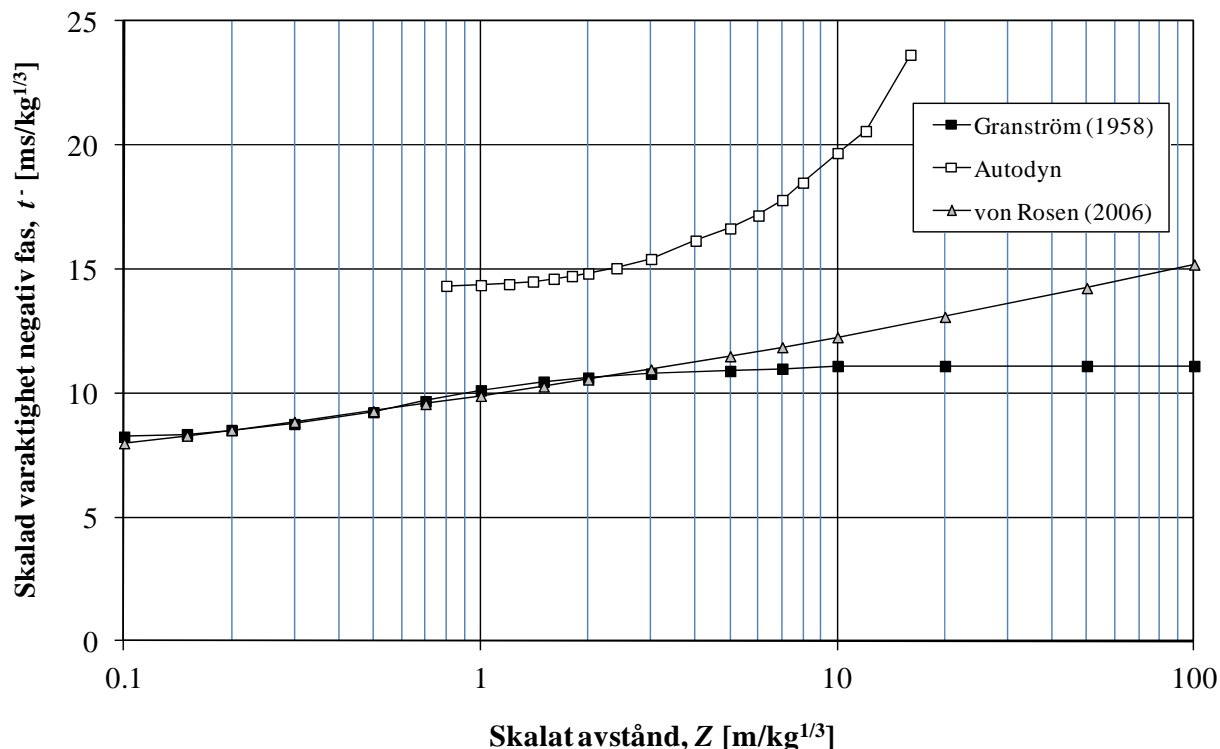
$$i_s^- = (0,458 \cdot P_s^- \cdot t^-) \cdot W^{1/3} \text{ [Pas]} \quad (\text{C.10})$$



Figur C.5 Oreflekterat undertryck P^- som funktion av det skalade avståndet Z . Jämförelse mellan värden från Granström (1958), Autodyn (Johansson och Laine 2012) samt ekvation (C.7) (von Rosen 2006).



Figur C.6 Skalad oreflekterad negativ impulstäthet i^- som funktion av det skalade avståndet Z . Jämförelse mellan värden från Granström (1958), Autodyn (Johansson och Laine 2012) samt ekvation (C.8) (von Rosen 2006).



Figur C.7 Skalad varaktighet t^- för den negativa fasen som funktion av det skalade avståndet Z . Jämförelse mellan värden från Granström (1958), Autodyn (Johansson och Laine 2012) samt ekvation (C.10) (von Rosen 2006).

I Figur C.5 till Figur C.7 jämförs trycket, impulstätheten samt varaktigheten i den negativa fasen med vad som anges i Granström (1958), värden framtagna med hjälp av Autodyn – presenterade i Johansson och Laine (2012) – samt uttryck enligt ekvation (C.7), (C.8) och (C.10) – von Rosen (2006). Av detta framgår att värden enligt Granström och von Rosen genomgående stämmer mycket bra överens med varandra vilket antyder att de i grunden härör från samma källa. Det ska dock även noteras att resultat från Autodyn ger likvärdiga värden för både tryck och impulstäthet för $2 \leq Z \leq 10$ m/kg^{1/3} medan det för varaktigheten skiljer ganska mycket. Utgående från denna jämförelse synes det dock vara en rimlig approximation att använda uttrycken i ekvation (C.7), (C.8) och (C.10) för att bestämma trycket P^- , varaktigheten T^- respektive impulstätheten i^- i den negativa fasen.

Bilaga D Explosion at an intersection in an Urban Environment – Experiments and analyses

Denna bilaga innehåller en publicerad konferensartikel, Johansson *et al.* (2007), som presenterades på SAVIAC:s 78th Shock and Vibration Symposium i Philadelphia, USA, 4-8 november 2007.

Explosion at an intersection in an Urban Environment – Experiments and analyses

Morgan Johansson^{a,*}, Ola Pramm Larsen^b, and Leo Laine^b

^aREINERTSEN Sverige AB

Anders Carlssons gata 14, 417 55 Göteborg, Sweden

*Corresponding author: morgan.johansson@reinertsen.se

^bANKER – ZEMER Engineering A/S

P.O. Box 253, NO-0702 OSLO, Norway

This paper describes the experimental and numerical investigation of an explosion in an intersection built up of four concrete boxes. Scaled experiments (1:5) with a total of eight charges (0.4 and 1.6 kg) of PETN detonated at various locations and were registered using a total of 25 pressure gauges. The experimental results were used to validate numerical simulations made in the explicit code AUTODYNTM prior to the experimental performance. An automatic remapping procedure used in the simulations is briefly described and a coherence measure to compare experimental and numerical results is introduced. It is concluded that AUTODYN managed very well to predict the blast load obtained in a complex urban environment.

INTRODUCTION

The Swedish Rescue Services Agency (SRSA) is responsible for the building regulations of the Swedish civil defence shelters. The shelters have specific regulations for how they are planned, built, equipped and maintained [1]. It is also the responsibility of SRSA to maintain and develop the knowledge connected to these structures. Based on this it has been concluded that there is a need to increase knowledge about the origin of blast loads and how they affect their surroundings. Accordingly, a research project, *Resistance capacities of buildings for extreme dynamic loading* [2], was initiated in 2006 wherein the main aim is to increase the knowledge of how to determine the capacity of any given building or group of buildings to withstand the effect of a blast load. This work is divided into two stages: determination of the load characteristics resulting from the blast load and development of a method to be used to estimate the capacity of a building subjected to such loads. This paper is part of the first stage.

Predicting the load caused by a propagating blast wave in urban environment, in which phenomena such as reflection, diffraction and confinement are to be taken into account, is a complex task. Remennikov [3] lists three types of methods to be used: empirical (or analytical), semi-empirical and numerical methods. For non-complex load cases it is usually sufficient to use engineering tools based on empirical data, e.g. ConWep [4]. For somewhat more complex geometry, though, it is necessary to use semi-empirical methods, i.e. methods based on models in which the important physical process is accounted for in a simplified way. Several researchers have also developed such models, e.g. [5]-[9], that work well within given limits and that provide an increased understanding of the resulting blast load. However, when the geometry gets more complex, which might be the case in an urban environment, it may no longer be possible to use such simplified tools, [10].

In such cases numerical methods incorporating computational fluid dynamics (CFD) techniques, so-called hydrocodes, may be used. However, even though the computational possibilities, regarding both the complexity of

the analysis and the required computer time, steadily increase, it is still of utmost importance to make sure that the results obtained in such methods are correct. Hence, there is a need to verify such programs against experimental results. Once this is guaranteed it is possible to use hydrocode programmes to at least in part replace expensive experimental performances.

In this project the explicit code AUTODYN™ [11] is used and it has been shown in [12] that it provides satisfactory agreement with ConWep in analyses of spherical air bursts. However, it was necessary to verify that this also is the case in a more complex urban environment. Accordingly, an experimental test-series was conducted in co-operation between the Swedish Rescue Services Agency, the Norwegian Defence Estates Agency and the Swedish Defence Research Agency. The aim of this project is twofold: to increase the knowledge about blast load in a complex environment and to investigate the possibility for AUTODYN to predict the resulting load characteristics obtained in a complex environment.

The outline of the paper is as follows: The section EXPERIMENTAL SETUP show how the experiments were performed. The section FINITE ELEMENT MODEL discuss how the model was set-up and what material properties were used for the explosive and air. In the RESULTS section analyses are carried out and results are shown. Finally CONCLUSIONS summarises the findings.

EXPERIMENTAL SETUP

The experimental location consisted of four concrete cubic boxes (dimension 2.3 m) positioned at a distance of 2.3 m apart. Three types of charges, 0.4 kg PETN, 1.6 kg PETN and 1.6 kg TBX, were used and positioned either close to the ground (0.20 m) or at mid height (1.15 m) of the concrete boxes in four different locations, see Fig. 1. The tests were carried out in scale 1:5 meaning that the concrete boxes approximately corresponded to a four-storey building of height 11.5 m with a small charge of 50 kg pentolite, detonating 1.0 m above ground; i.e. a threat situation roughly equal to what might be expected from a small car bomb.

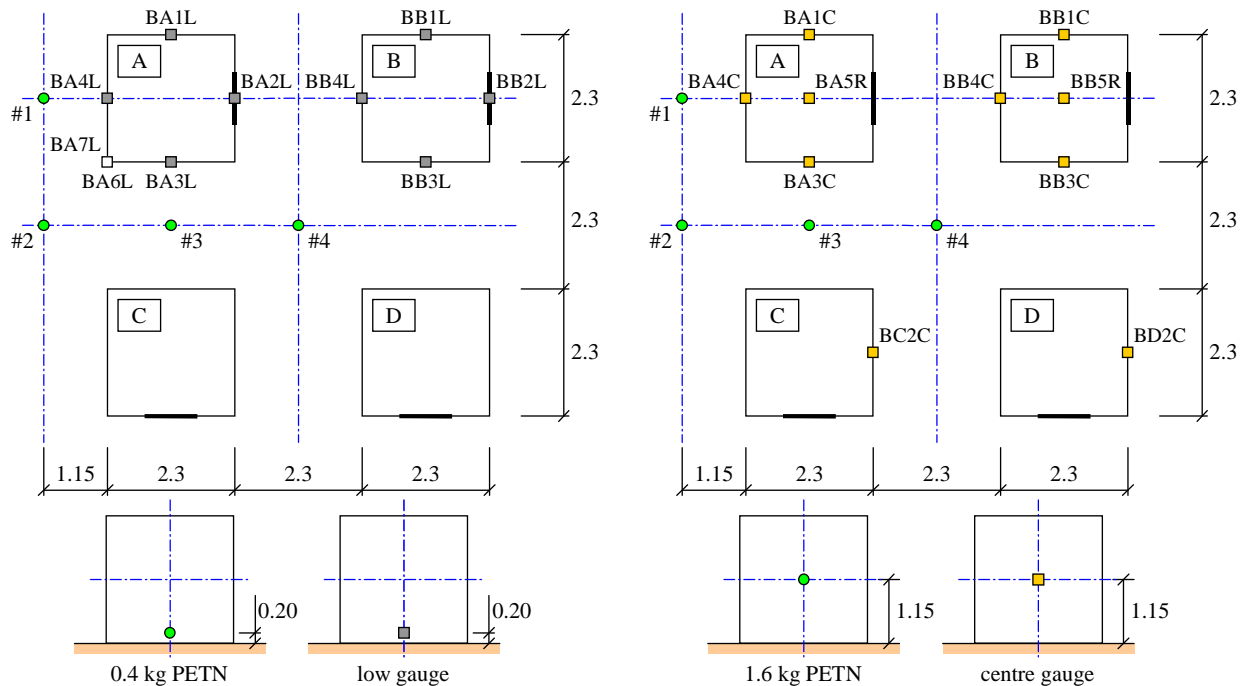


Fig. 1. Top view of the experimental set-up and gauges located on the concrete boxes. The charges were placed in four different positions (#1 – #4) 0.2 m (0.4 kg PETN) or 1.15 m (1.6 kg PETN) above the ground. The naming of the gauges is as follows: Building letter, Gauge no., Low or Centre. All lengths are in metres.

A total of 25 pressure gauges were used to register the pressure-time relations at various locations. 20 gauges (brand: Kulite) had fixed positions in the concrete boxes: 10 low (L) at a level of 0.20 m, 8 in the centre (C) at 1.15 m above the ground and 2 on the roof (R), see Fig. 1. All gauges but two were positioned in the middle of the wall/roof. The last two gauges (BA6L and BA7L) were positioned close to the ground 0.20 m from one of the wall edges in an attempt to get an approximate reading of the effect the diffraction has on the pressure. The remaining 5 gauges (brand: PCB) were fastened on wooden boards placed on the ground and had various positions according to Fig. 2, depending on the position of the charge. Even though all gauges were active in every detonation those gauges set low and in the centre were mainly used for the evaluation of 0.4 kg and 1.6 kg charges, respectively.

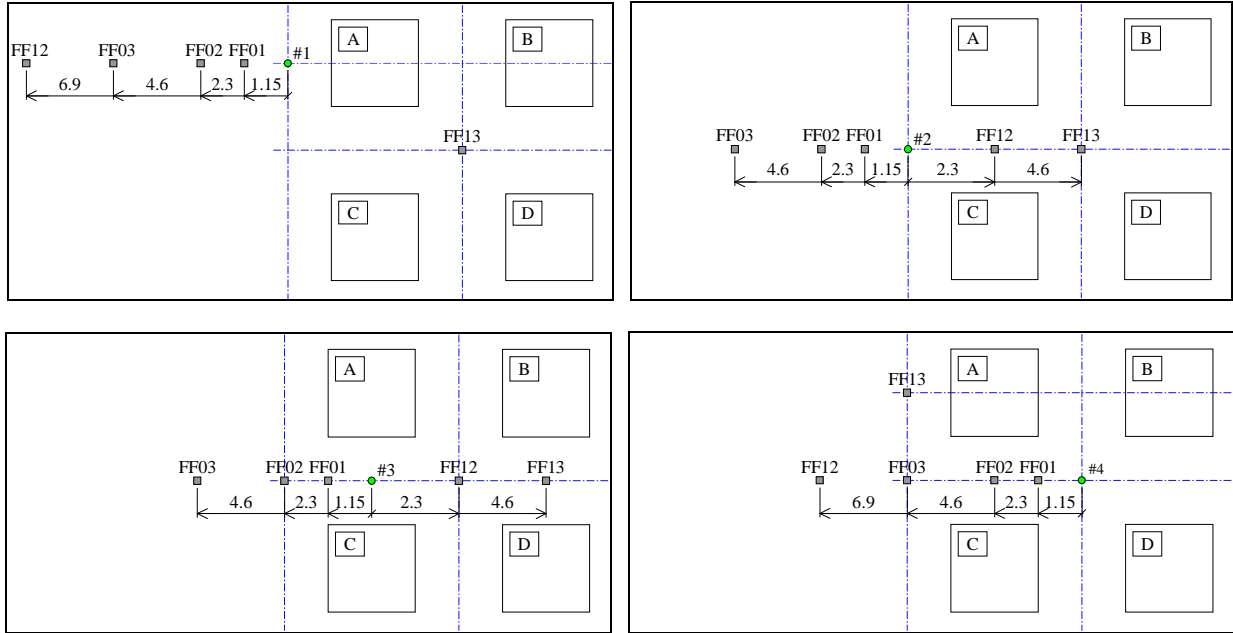


Fig. 2. Top view of the different ground pressure gauge positioning for each charge location. All lengths are in metres.

The explosive used was the Swedish PETN, Sprängdeg m/46, with a density of about 1500 kg/m^3 , which consists of approximately 86 % pentolite and 14 % mineral oil. Accordingly, the 0.4 kg and 1.6 kg charges used consisted of 0.344 kg and 1.376 kg pentolite, respectively. In ConWep [2] the equivalent weight (compared to TNT) of pentolite is given as 1.42 kg and 1.00 kg for pressure and impulse, respectively. However, when determining the pressure-time relations for pentolite ConWep uses the average of these values, i.e. 1.21 kg, and accordingly, a charge of 1 kg Sprängdeg m/46 corresponds to $0.86 \cdot 1.21 \approx 1.04 \text{ kg TNT}$. Using this correlation an approximate value of the scaled distance $Z = R/W^{1/3}$ can be determined. The horizontal projection of the distance between the charges and the pressure gauges varied from 1.15 m to about 10 m; resulting in $1.5 \leq Z \leq 13 \text{ m/kg}^{1/3}$ and $1.0 \leq Z \leq 8.5 \text{ m/kg}^{1/3}$ for the 0.4 kg and 1.6 kg charge, respectively.

In this paper only the results for PETN charges, and then mainly those caused by the smaller 0.4 kg charges, are presented. For more detailed information about the experiments and the analyses performed, see [13].

FINITE ELEMENT MODEL

The blast simulations were performed using the explicit code AUTODYN [11]. All simulations were made before the experiments were carried out, which means that the experimental results are used to validate how well AUTODYN manage to describe the blast load in a complex environment similar to that in a city.

In the numerical model the physical domain was represented by rectangular boxes in 3D which in turn were filled with cube shaped hexahedral linear elements. The size of these rectangular boxes varied based on the blast scenarios as well as the different remap stages and the planar symmetry present. A typical series of 3D remap runs over 4

stages would have approximate rectangular domain sizes of: $(2\text{ m})^3$, $(4\text{ m})^3$, $(8\text{ m})^3$ and $(16\text{ m})^3$. The element size used highly depended on the remap stage and the total number of elements employed in the numerical mesh. The high resolution runs strived to utilise the maximum number of elements possible under the 32 bit addressing space providing approximately 4.5 million elements, which in turn yielded an element size of approximately 10 mm at the first 3D remap stage. The remapping ratio was always 1:2, consequently doubling the element size in each direction at every new remap stage. The four concrete blocks and the ground were modelled using rigid boundaries. The outflow boundary condition was only applied during the last 3D remapping stage to the external phases of the domain. At all other stages no boundary conditions were necessary since the blast wave front was always fully contained inside the corresponding numerical domain.

Each simulation involved separate runs over several stages in which a self-developed automatic remapping technique, further discussed below, was used. The first stage involved a 1D spherical symmetric run using a Multi-Material Euler solver simulating the initial detonation phase with both explosive material and air. A remap procedure was then performed into a 2D axial symmetric domain using the same Multi-Material Euler solver. Finally the simulation was concluded by a series of 3D remapping runs using an Euler-FCT solver with air only. Some of these 3D remapping stages involved planar symmetry, in which case the symmetry was fully exploited in the simulations. All of the eight blast scenarios were completed with as many as 7-9 AUTODYN simulations employing different mesh resolutions for quality assurance and convergence studies. Fig. 3 illustrates the simulation procedure over the various 3D remapping stages.

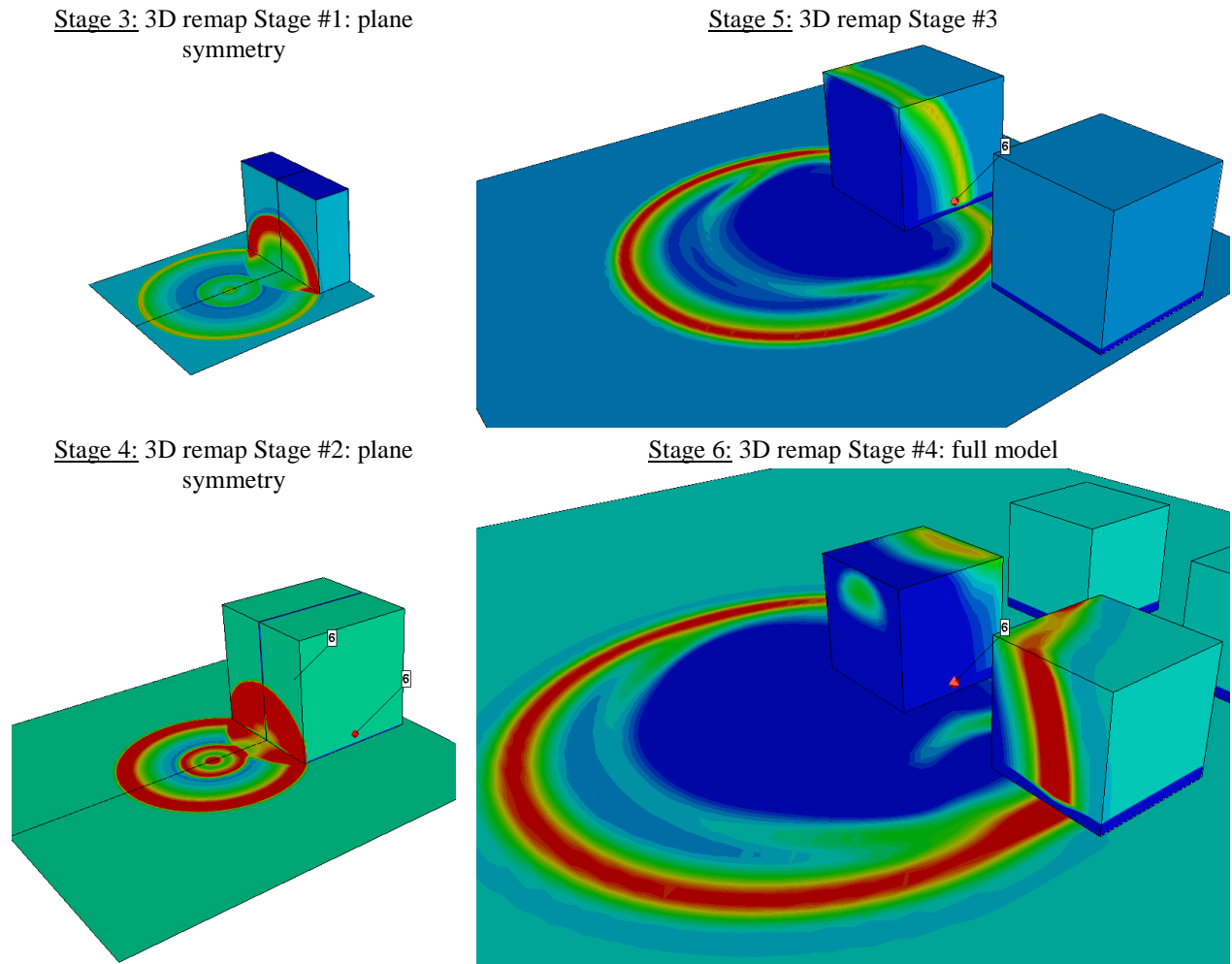


Fig. 3. Illustration of the principal layout of the finite element model for simulation of charge at location #1 for Stages 3 to 6: 3D stages using automatic remapping. Stage 1 (1D spherical symmetry) and Stage 2 (2D axial symmetry) are not shown.

The vast number of simulations with their accompanying remapping stages performed in this project called for automation at several levels of the simulation process. A quite complex system integrating automatic script generation with AUTODYN-linked Fortran user-subroutines were therefore developed. This automation system enabled the batch simulation run of an unlimited number of 3D blast scenarios, each containing several remap stages with arbitrary geometry and symmetry conditions, with a click of a button. The main idea of this methodology is to enable automatic detection of the shock front during the blast, so that a remap process can be initiated at the time when the shock front is close to the boundary. The global script file controls the whole process from the generation of the new remapped FE models up to the batch control of several simulations running in series.

In AUTODYN there are four different pre-defined material models for the explosive PETN, where the material densities are set to: 0.88 kg/m^3 , 1.26 kg/m^3 , 1.50 kg/m^3 and 1.77 kg/m^3 . Which model should be used was unclear, and therefore, an investigation of the different material models were carried out in order to find out what pressures and impulse intensities could be expected for different values of the scaled distance $Z = R/W^{1/3}$. This was done in AUTODYN using a one-dimensional wedge analysis simulating an undisturbed spherical pressure release. The results were compared with a corresponding analysis of TNT, [12], and are for the overpressure summarised in Fig. 4. Here the overpressure is presented as a function of the scaled distance and based on this the equivalent weight of TNT was determined. From this it can be seen that the resulting pressure will be almost identical for the PETN material models, with densities 1.26 kg/m^3 and higher, available in AUTODYN. It can also be concluded that the equivalent weight, based on the average value for $2 \leq Z \leq 10 \text{ m/kg}^{1/3}$, is about 1.45 kg for the pressure. The corresponding relation for the impulse intensity was determined as well and was found to be very similar with the same average equivalent weight of 1.45 kg . Comparing these values with those given in ConWep – 1.42 kg for pressure and 1.00 kg for impulse – shows that the equivalent weight based on pressure was very similar but that it differed considerably for the impulse intensity.

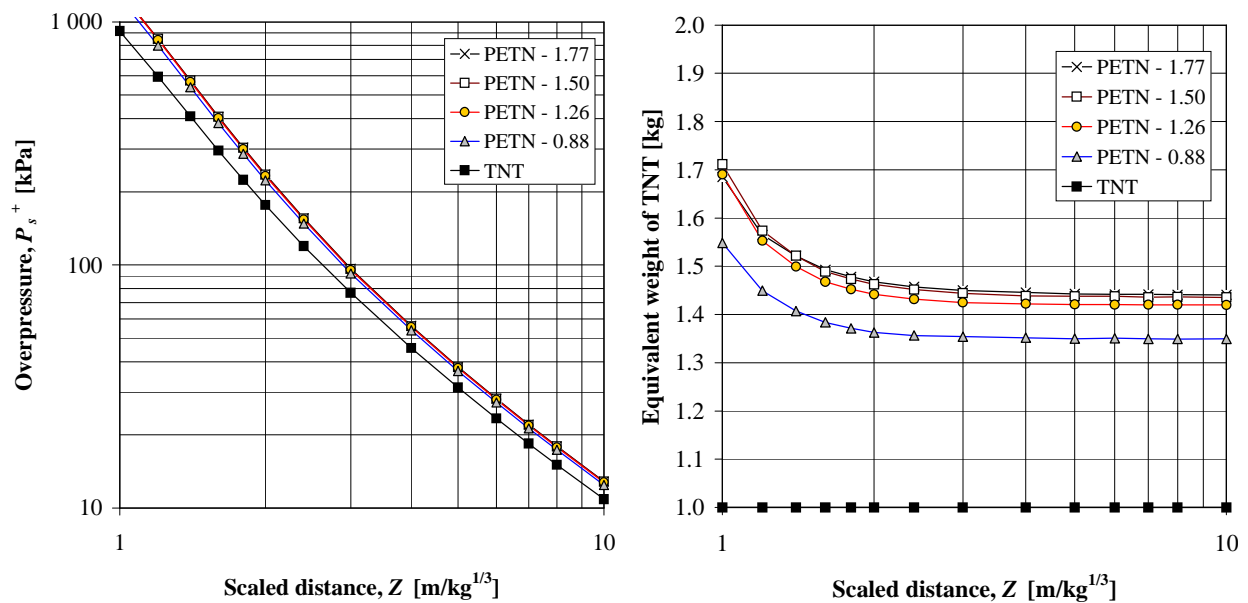


Fig. 4. Results obtained for different explosive PETN material models in AUTODYN: Pressure as function of scaled distance (left) expressed as corresponding equivalent weight of TNT (right).

Based on the above and an approximation that the explosive in the charges used had a density of about 1.7 kg/m^3 , [13], the PETN material model with density 1.77 kg/m^3 was used in the final AUTODYN simulations of the experimental set-up. The explosive was modelled using the JWL Equation of State (EOS) with automatic conversion into Ideal Gas EOS when the entire explosive had reached a compression value of -0.95 . Furthermore, at the start of the first 3D remap stage the explosive was converted into air, thus facilitating the use of the single material Ideal-Gas-EOS-Only Euler FCT solver. Input parameters for air and explosive are listed in Table 1.

Table 1. Summary of input parameters in AUTODYN for air and explosive PETN with density 1.77 kg/m³.

Air		PETN 1.77	
ρ_0	$1.226 \cdot 10^{-3}$ (g/cm ³)	ρ_0	1.77 (g/cm ³)
γ	1.4	C-J Detonation velocity	8 300 (m/s)
P_0	101.3 (kPa)	C-J Energy density	$1.01 \cdot 10^7$ (kJ/m ³)
		C-J Pressure	$3.35 \cdot 10^7$ (kPa)

RESULTS

Most of the ground pressure gauges (FF01 to FF13) were positioned within a straight line free from obstructions from the charge, see Fig. 2, meaning that a direct comparison with results from ConWep is possible. In Fig. 5 the peak pressures, registered in the ground gauges for different charge locations in the experiments, are compared to that of ConWep. The correspondence is fairly good for the short distances of 1.15 m and 2.3 m while it is less accurate for the longer distances of 4.6 m and 6.9 m. This difference is partly due to the confinement effect that the concrete boxes present (especially true for the charge at location #4) but can not fully explain the difference observed. It should be noted, though, that the peak pressure might be a bit difficult to capture properly and that the impulse intensity is a more reliable measure for this type of comparison. However, the disturbances caused by the surrounding concrete boxes, i.e. confinement and reflection effects, make such a comparison with ConWep irrelevant. Nevertheless, the results are regarded to be sufficiently close to ConWep to be satisfactory and more detailed information of resulting pressure-time relations from the experiments are presented together with the numerical analyses below.

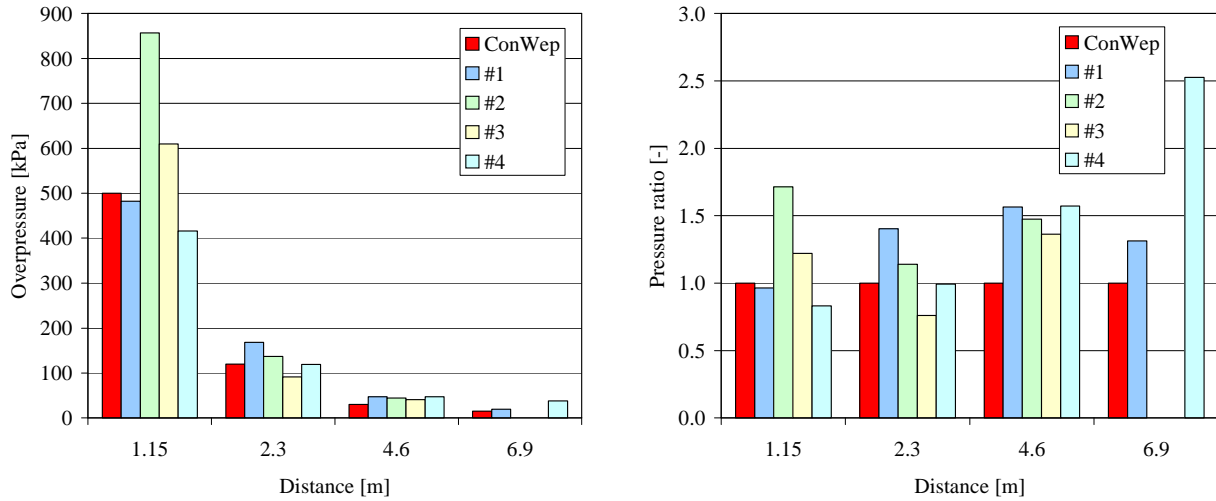


Fig. 5. Comparison of overpressures obtained at ground pressure gauges (FF01 to FF13 in Fig. 2) in experiments and ConWep. The left diagram shows the incident overpressures while the right shows these pressures expressed as a ratio of the peak pressure obtained in ConWep. The deviation observed for charge at location #4 is expected due to confinement effects.

Table 2 presents a comparison of key parameters overpressure P^+ , arrival time t_a and impulse intensity i^+ and i^- obtained in the AUTODYN simulations and that of the experiments. Here, the impulse intensity is defined as the sum of all positive and negative phases, respectively, within the time period t_{end} as shown in Eqs. (1) and (2).

$$i^+ = \sum_{k=1}^n i_k^+ = \sum_{k=1}^n \int_{t_{k,a}}^{t_{k,end}} P^+(t) dt \quad (1)$$

$$i^- = \sum_{k=1}^n i_k^- = \sum_{k=1}^n \int_{t_{k,a}}^{t_{k,end}} P^-(t) dt \quad (2)$$

Table 2. Summary of key parameters P^+ , t_a , i^+ and i^- from AUTODYN analyses and experiments. The impulse intensities i^+ and i^- are determined according to Eq. (1) and Eq. (2) with $t_{end} = 50$ ms. A “-” in the table indicate that the experimental result was not valid.

Gauge	Location #1								Location #2							
	AUTODYN				Experiments				AUTODYN				Experiments			
	P^+ [kPa]	t_a [ms]	i^+ [Pas]	i^- [Pas]	P^+ [kPa]	t_a [ms]	i^+ [Pas]	i^- [Pas]	P^+ [kPa]	t_a [ms]	i^+ [Pas]	i^- [Pas]	P^+ [kPa]	t_a [ms]	i^+ [Pas]	i^- [Pas]
FF01	656	0.62	143	137	480	0.65	248	-	755	0.61	155	152	859	0.46	240	160
FF02	129	2.42	85	94	168	2.58	57	-	137	2.41	86	98	161	2.22	77	97
FF03	32	7.69	52	50	47	8.14	82	54	33	7.72	50	51	41	7.89	51	41
FF12	14	13.45	35	35	20	14.27	38	35	140	2.36	167	168	111	2.52	150	192
FF13	16	9.89	32	32	18	10.50	28	31	52	7.62	74	72	47	8.03	70	80
BA1L	51	3.71	61	67	-	-	-	-	12	7.94	35	37	11	8.00	33	35
BA2L	7	9.63	49	48	8	10.28	53	49	12	7.94	62	63	12	8.50	60	62
BA3L	51	3.71	113	115	63	3.89	112	110	233	2.82	165	159	271	2.90	190	176
BA4L	2 100	0.63	461	208	1 745	0.63	429	-	233	2.82	127	126	155	2.96	93	116
BA6L	94	1.56	76	148	114	1.68	104	107	470	1.43	206	173	-	-	-	-
BA7L	1 221	1.05	290	211	599	1.02	187	452	470	1.43	192	159	373	1.46	159	134
BB1L	6	15.34	20	22	11	16.76	22	19	4	16.59	21	22	6	17.72	21	21
BB2L	3	22.00	21	20	3	23.35	23	20	4	19.46	15	15	4	20.62	16	15
BB3L	6	15.34	42	44	11	16.63	45	44	24	13.31	59	60	30	14.17	60	61
BB4L	14	13.41	68	70	-	-	-	-	26	11.76	69	63	26	12.23	67	62
Gauge	Location #3								Location #4							
	AUTODYN				Experiments				AUTODYN				Experiments			
	P^+ [kPa]	t_a [ms]	i^+ [Pas]	i^- [Pas]	P^+ [kPa]	t_a [ms]	i^+ [Pas]	i^- [Pas]	P^+ [kPa]	t_a [ms]	i^+ [Pas]	i^- [Pas]	P^+ [kPa]	t_a [ms]	i^+ [Pas]	i^- [Pas]
FF01	698	0.62	226	184	610	0.61	237	704	755	0.61	177	176	431	0.56	168	210
FF02	136	2.38	140	141	93	2.53	120	220	142	2.38	152	160	119	2.43	141	167
FF03	33	7.74	76	77	45	7.78	71	66	50	7.64	73	71	47	8.02	54	118
FF12	136	2.38	137	141	93	2.63	113	155	25	13.35	42	42	38	13.73	40	41
FF13	34	7.61	114	112	37	8.21	106	102	13	9.28	34	35	14	9.63	35	28
BA1L	8	9.71	52	51	8	9.81	49	47	13	7.99	35	35	12	8.39	32	31
BA2L	52	3.73	113	115	40	3.90	110	116	234	2.83	155	154	110	2.90	126	147
BA3L	2 258	0.63	505	235	2 369	0.47	763	328	234	2.83	154	153	238	3.00	131	191
BA4L	52	3.73	70	73	58	3.81	73	74	13	7.99	35	35	11	8.45	32	31
BA6L	1 272	1.05	325	233	991	1.03	345	238	113	4.66	126	125	113	4.81	118	130
BA7L	103	1.61	70	132	146	1.65	72	174	22	5.48	47	59	34	5.84	52	60
BB1L	8	11.55	34	31	8	12.34	32	27	13	7.99	35	35	12	8.12	33	31
BB2L	5	13.52	33	35	5	13.85	32	33	13	7.99	35	35	12	7.62	37	35
BB3L	51	7.93	115	112	54	8.39	99	98	234	2.83	154	153	143	2.87	124	144
BB4L	77	6.45	131	127	73	6.89	122	118	234	2.83	155	154	124	2.86	127	151

From this summary it is also clear that the correspondence between experiments and AUTIDYN simulations in several cases are very good. However, to get a better picture of how well the results coincide a coherence measure, according to Eq. (3), was introduced.

$$Coh = 1 - \frac{\int_{t_a}^{t_{end}} |P_{AD}(t) - P_{Exp}(t)| dt}{i_{Exp}^+ + i_{Exp}^-} \quad (3)$$

Here $P_{AD}(t)$ and $P_{Exp}(t)$ are the pressure obtained in the AUTODYN simulations and experiments, respectively, while i_{Exp}^+ and i_{Exp}^- are the total positive and negative impulse intensities from the experiments during the time interval $t_a \leq t \leq t_{end}$. Thereby, it is possible to fairly straightforwardly compare a large number of numerical and experimental results and get a measure of how well they coincide. In Eq. (3) $Coh = 1.0$ signify a perfect match. However, in general a coherence value of 0.5 or better corresponds to very good agreement between simulated and experimental results, see Fig. 6.

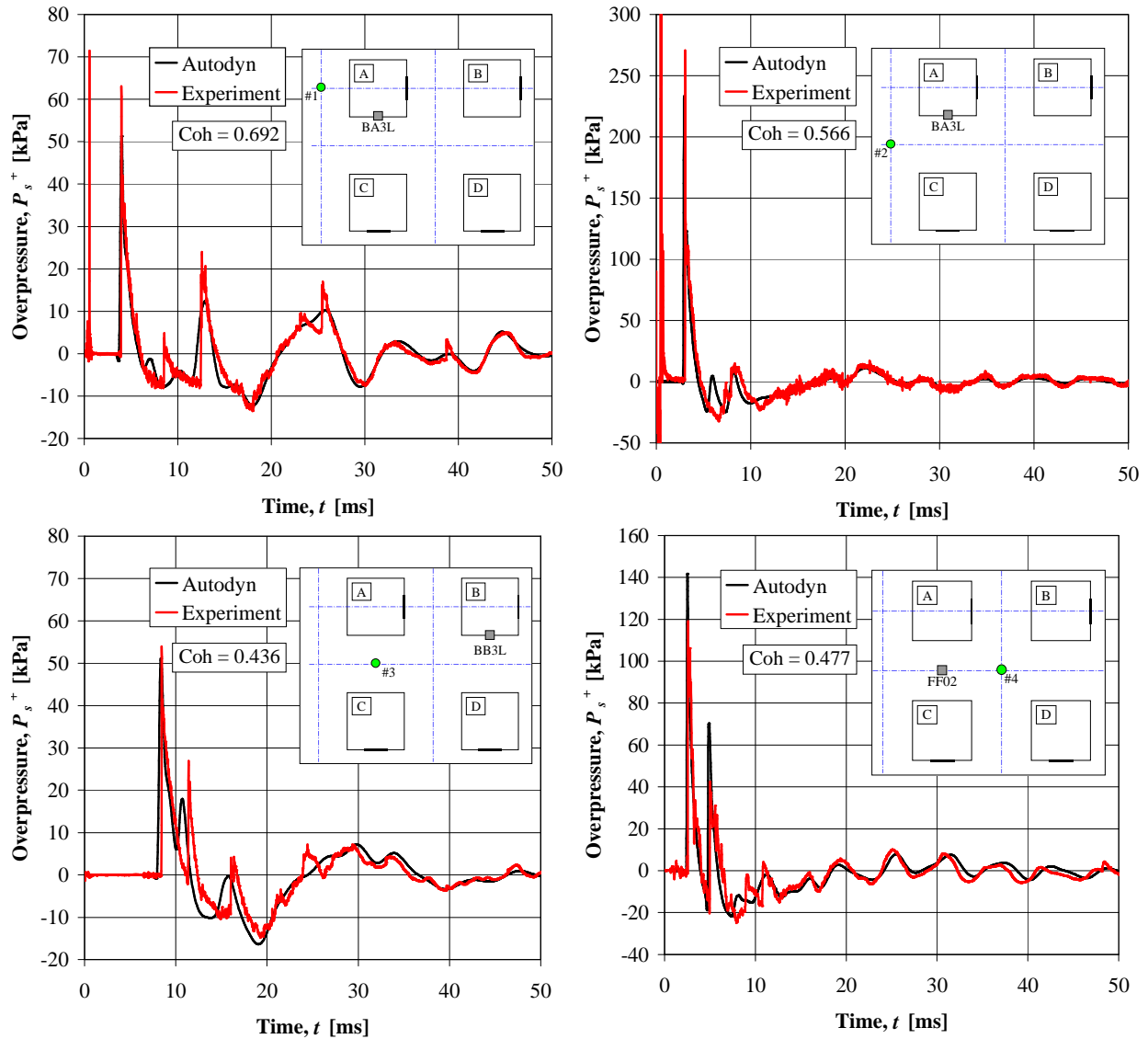


Fig. 6. Example of correlation between AUTODYN analyses and experiments: charge location #1, gauge BA3L (top left); charge location #2, gauge BA3L (top right); charge location #3, gauge BB3L (bottom left) and charge location #4, gauge FF02. The coherences are 0.692, 0.566, 0.436 and 0.477, respectively.

From Table 2 and Fig. 6 it can be seen that the agreement between experimental and numerical results are generally very good. Even though it can be concluded that most results coincided well it was generally observed that the agreement between analyses and experimental results increased when the peak pressure decreased. Thus, when the pressure reduces to less than about 50-100 kPa the general agreement went from very good to excellent. In Fig. 7 the complete batch of coherence data for the 0.4 kg and 1.6 kg charges, totalling 8 charges with almost 200 result series (all in all about 10 gauges failed to produce any trustworthy results during the experiments), is presented. The results have been separated into two groups, 0.4 kg and 1.6 kg charges, and it can be seen that the coherence generally is somewhat higher for the larger charges. Further, it can be noted that about 65 % of the compared results reach a coherence of 0.5 or higher; i.e. a limit indicating very good agreement.

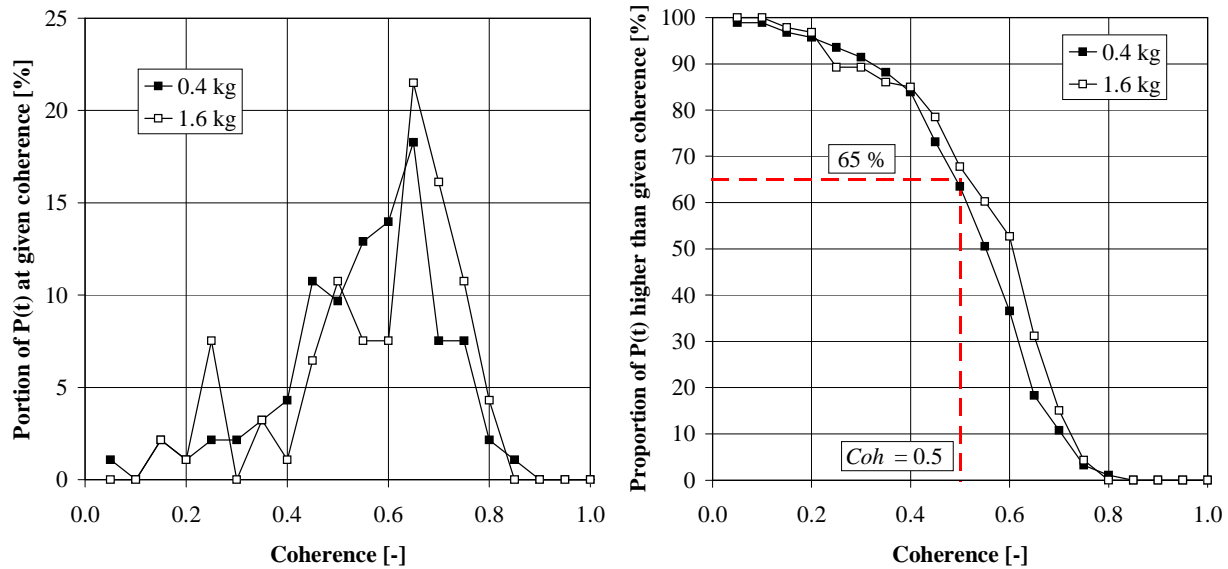


Fig. 7. Coherence of 0.4 kg and 1.6 kg charges presented as portion at given coherence (left) and portion higher than given coherence (right). A coherence value of about 0.5 or higher corresponds to very good agreement, see Fig. 6, and this limit is reached by approximately 65 % of the compared results.

CONCLUSIONS

An experimental and numerical study of blast load at an intersection has been carried out. The load effects of two types of charges, 0.4 kg and 1.6 kg PETN, positioned in four different locations have been simulated using the explicit code AUTODYN and compared to the experimental results. It shall be pointed out that all AUTODYN analyses were made before the experiments were carried out. Hence, the results presented herein are used to validate how well AUTODYN manage to describe the blast behaviour in a complex geometry such as in a city environment.

In the blast simulations in AUTODYN an automatic remapping routine is introduced. This routine enabled automatic detection of the shock front close to a boundary, and thus a criterion for when, in time, to initiate the remapping process. Consequently, an automatic remapping of the modelled volume is possible, allowing for a more simplified approach to large blast simulations in a complex environment.

It is shown that there generally is very good agreement between the results obtained in the experiments and the AUTODYN simulations. A coherence measure is introduced for comparing experimental and numerical results and it is concluded that this is a convenient method to get a rough estimation of how well the results coincide. It is shown that for the results presented herein a measure of $Coh \geq 0.5$ signify very good agreement and that about 65 % of the compared measurements fulfil this limit. For gauges where the pressure was low (less than about 50-100 kPa) the agreement went from very good to excellent. Consequently, it is concluded that AUTODYN manage very well to describe the resulting blast effects in a complex city environment.

As a sub result of this study the relations for pressure and impulse intensity for the four PETN explosives, predefined in AUTODYN, are presented and it is shown that there is only a minor difference between three of them. It is also shown that the equivalent weight, compared to TNT, is about 1.45 kg for both pressure and impulse for scaled distances of $2 \leq Z \leq 10 \text{ m/kg}^{1/3}$; which differ to what is stated in e.g. ConWep.

Even though it is shown herein that AUTODYN performed very well in its prediction of the load characteristics obtained in the experiments, it shall be pointed out that empirical and semi-empirical methods still fulfil an important task in that they provide a basic explanation necessary for understanding complex load situations. Accordingly, such less complex methods are still necessary to better understand the results from a CFD analysis, and hence help prevent the latter from being transformed into a “black box”. It would even be beneficial to use a combination of numerical simulations and experimental data to further improve and develop semi-empirical models in order to better understand the blast load obtained in complex urban environments.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors thankfully acknowledge the support given by the Swedish Rescue Services Agency and especially Björn Ekengren for their support in the project. Furthermore we would like to thank the Norwegian Defence Estates Agency and the Swedish Defence Research Agency for their initiation and successful co-operation with the experimental work presented herein.

REFERENCES

- [1] Ekengren B., 2006, Skyddsrum, SR 06, Swedish Rescue Services Agency, B54-141/06, Karlstad, Sweden.
- [2] Johansson, M. and Laine, L., *Resistance capacities of buildings for extreme dynamic loading*, Research project description, Swedish Rescue Services Agency, http://www.srv.se/templates/SRV_Page____15919.aspx, Karlstad, Sweden.
- [3] Remennikov, A.M., "A review of methods for predicting bomb blast effects on buildings," *Journal of Battlefield Technology*, 2003, 6(3), pp. 5–10.
- [4] 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.
- [5] Rose, T.A. and Smith, P.D., "Influence of the principal geometrical parameters of straight city streets on positive and negative phase blast wave impulses," *International Journal of Impact Engineering*, 2002, 27, pp. 359–376.
- [6] Rose, T.A. and Smith, P.D., "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*, 2003, Mannheim, Germany.
- [7] Dörr, A., Brombacher, B., Gürke, G., "Blast behind street junctions originating from vehicle bombs," *Proceedings of 18th Symposium on the Military Aspects of Blast and Shock*, 2004, Bad Reichenhall, Germany.
- [8] von Rosen, B., Guilbeault, E., Contesabile, E., "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*, 2004, Bad Reichenhall, Germany.
- [9] Remennikov, A.M. and Rose, T.A., "Modelling blast loads on buildings in complex city geometries," *Computers and Structures*, 2005, 83, pp. 2197-2205.
- [10] Smith, P.D. and Rose, T.A., "Blast wave propagation in city streets – an overview," *Prog. Struct. Engng Mater.* 2006, 8, pp. 16-28.
- [11] Century Dynamics Inc., 2004, AUTODYN Theory Manual Revision 5.0, San Ramon, CA, USA.
- [12] Johansson, M. and Laine, L., 2007, "Bebyggelsens motståndsförmåga mot extrem dynamisk belastning, Delrapport 1: Last av luftstöt våg" ("Resistance capacities of buildings for extreme dynamic loading, Report 1: Load from airblast", in Swedish.), Swedish Rescue Services Agency, B54-232/07, Karlstad, Sweden.
- [13] Johansson, M. and Laine, L., 2008, "Bebyggelsens motståndsförmåga mot extrem dynamisk belastning, Delrapport 2: Explosion i gatukorsning" ("Resistance capacities of buildings for extreme dynamic loading, Report 2: Explosion at an intersection", in Swedish.), Swedish Rescue Services Agency, to be published in 2008, Karlstad, Sweden.

Bilaga E Experiments and analyses of explosion at an urban intersection

Denna bilaga innehåller en publicerad konferensartikel, Johansson *et al.* (2008), som presenterades på MABS 20 i Oslo, Norge, 1-5 september 2008.

Rättelser

I publicerad artikel har några fel observerats i efterhand:

- Fel uttryck har angivits i ekvation (4). Rätt uttryck ges i ekvation (4.1) i rapporten.
- Felaktigt värde på impulstätheten och varaktigheten har använts för den negativa fasen som listas i Tabell 5. Vid framtagning av listade värden har ekvation (C.8) och (C.10) i rapporten använts men av misstag har termen $W^{1/3}$ inte beaktats. Detta har medfört att i^- och t^- överskattas eftersom multiplicering av termen $W^{1/3} = 0,4161/3 = 0,747$ inte medtagits i uttrycken. Dvs. varaktigheten på stötvågornas negativa impulser borde minskas med omkring 25 %, vilket innebär en något mer hoptryckt tryck-tidskurva för den negativa fasen.

EXPERIMENTS AND ANALYSES OF EXPLOSION AT AN URBAN INTERSECTION

M. Johansson¹, O.P. Larsen², L. Laine²

¹REINERTSEN Sverige AB, Lilla Bommen 5, SE-411 13 Göteborg, Sweden

²ANKER – ZEMER Engineering A/S, P.O. Box 253, NO-0702 OSLO, Norway

ABSTRACT

Predicting the load caused by a propagating blast wave in urban environment is a complex task. For many load cases engineering tools based on empirical data or semi-empirical methods, is sufficient. However, when the geometry gets more complex, it might be necessary to use so-called hydro code programs to calculate the effect of the blast wave. Hence, there is also a need to verify such programs against experimental results. Once validated, though, such programs may be used to better understand the effects of blast load in complex load situations.

In order to validate the results from the hydro code AUTODYNTM, an experimental test series, scale 1:5, simulating an explosion in urban environment, was carried out. A simplified intersection built up of four concrete boxes, dimension 2.3 m, with a total of eight charges, 0.4 and 1.6 kg of PETN, detonated at various locations were registered using 25 pressure gauges. Numerical simulations were carried out in AUTODYN prior to the experimental test series. In order to handle the simulations, and thus decrease the calculation time needed, an automatic remapping procedure, in which the progress of the shock front was automatically taken into consideration, was developed. To compare experimental and numerical results In addition, a coherence measure was introduced. Out of almost 200 compared pressure-time relations about 65 % reached $Coh \geq 0.5$; i.e. a limit that indicates very good agreement. Consequently, it is concluded that AUTODYN manage very well to predict the blast load obtained in a complex urban environment and that it may provide a powerful tool for further blast load studies.

An approach for a simplified technique, using superposition of several incident shock waves, to estimate the blast load in a more complex environment is presented and compared to the experimental and numerical results. This simplified technique is a rather crude instrument when compared to Autodyn. However, it still provides a general idea of which blast waves sums up the resulting pressure time history, and hence may be used in an early stage to approximately describe the resulting loads on a structure. The results presented herein yield a discrepancy of the positive and negative impulse intensities of only about 20 % compared to that in the experiments.

INTRODUCTION

The Swedish Rescue Services Agency (Räddningsverket) is responsible for the building regulations of the Swedish civil defense shelters. The shelters have specific regulations for how they are planned, built, equipped and maintained [1]. It is also the responsibility of The Swedish Rescue Services Agency to maintain and develop the knowledge connected to these

structures. Consequently, a research project, [2], was initiated in 2006 wherein the main aim is to increase the knowledge of the load characteristics from a blast load and how to determine the capacity of any given building or group of buildings to withstand such loads.

Predicting the load caused by a propagating blast wave in urban environment is a complex task. According to [3] there are three types of methods to be used: empirical, semi-empirical and numerical methods. For non-complex load cases it is usually sufficient to use engineering tools based on empirical data, e.g. ConWep [4]. For more complex situations, though, it is necessary to use semi-empirical methods, i.e. methods based on models in which the important physical process is accounted for in a simplified way. Several researchers have also developed such models, e.g. [5]-[9], that work well within given limits and that provides an increased understanding of the resulting blast load. However, when the geometry gets more complex, such as in an urban environment, it may no longer be enough to use this type of simplified tools, [10]. In such cases numerical methods incorporating computational fluid dynamics (CFD) techniques, so-called hydro codes, may be used. However, even though the computational possibilities, regarding both the complexity of the analysis and the required computer time, steadily increase, it is still of utmost importance to make sure that the results obtained in such methods correlate to the real experimental behavior. Hence, there is a need to verify such programs against experimental results. Once this is guaranteed it is possible to use hydro code programs instead of, or in conjunction with, experimental performances.

In this project the explicit code AUTODYNTM [11] is used. It has previously been shown in [12] that AUTODYN provides satisfactory agreement with ConWep in analyses of spherical air bursts. However, it is also necessary to verify that this is the case in a more complex urban environment. Accordingly, when the opportunity to take part in an experimental test-series, originally initiated and planned by the Norwegian Defense Estates Agency (Forsvarsbygg) and to be carried out in cooperation with the Swedish Defense Research Agency (FOI), revealed itself the Swedish Rescue Services Agency joined in as a co-financier. The aim of this was twofold: to increase the knowledge about blast load in a complex environment and to investigate the possibility for AUTODYN to predict the resulting load characteristics obtained in such a case. Furthermore, the results obtained have also been used to compare the possibility to use a simplified semi-empirical calculation method, based on super positioning of several incident blast waves modified with regard to diffraction.

EXPERIMENTAL STUDY

The experimental location consisted of four concrete cubic boxes (dimension 2.3 m) positioned at a distance of 2.3 m apart, see Figure 1. Two types of charges, 0.4 kg PETN and 1.6 kg PETN were used and positioned either close to the ground (0.20 m) or at mid height (1.15 m) of the concrete boxes in four different locations. The tests were carried out in scale 1:5 meaning that the concrete boxes approximately corresponded to a four-story building of height 11.5 m and the small charge of 50 kg PETN, detonating 1.0 m above ground. Hence, a threat situation roughly equal to what might be expected from a small car bomb.

A total of 25 pressure gauges were used to register the pressure-time relations at various locations. 20 gauges had fixed positions in the concrete boxes: 10 low (L) at a level of 0.20 m, 8 in the center (C) at 1.15 m above the ground and 2 on the roof (R), see Figure 1. All gauges but two were positioned in the middle of the wall/roof. The last two gauges (BA6L and BA7L) were positioned low 0.20 m from one of the box corners. The remaining 5 gauges were used as free field pressure gauges (FF) and fastened on wooden boards placed on the ground, with various positions depending on the position of the charge, see Figure 2.

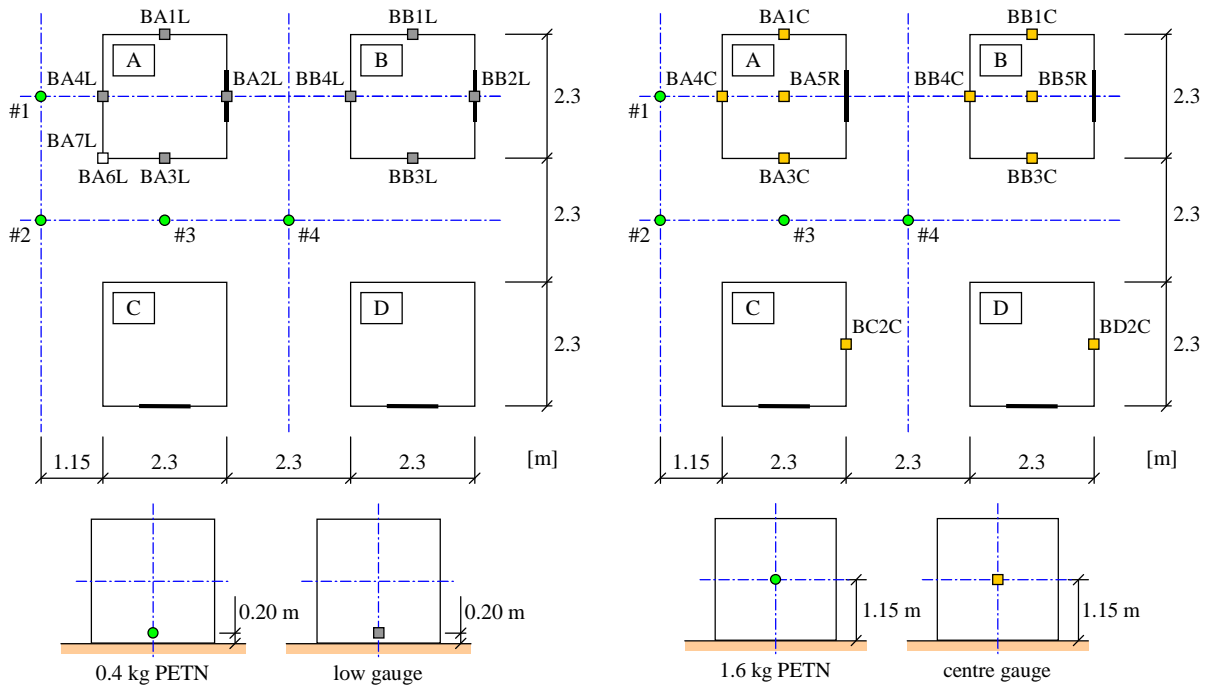


Figure 1: Top view of the experimental set-up and gauges located on the concrete boxes. The charges were placed in four different positions (#1 – #4) at a height of 0.2 m (0.4 kg PETN) or 1.15 m (1.6 kg PETN) above the ground.

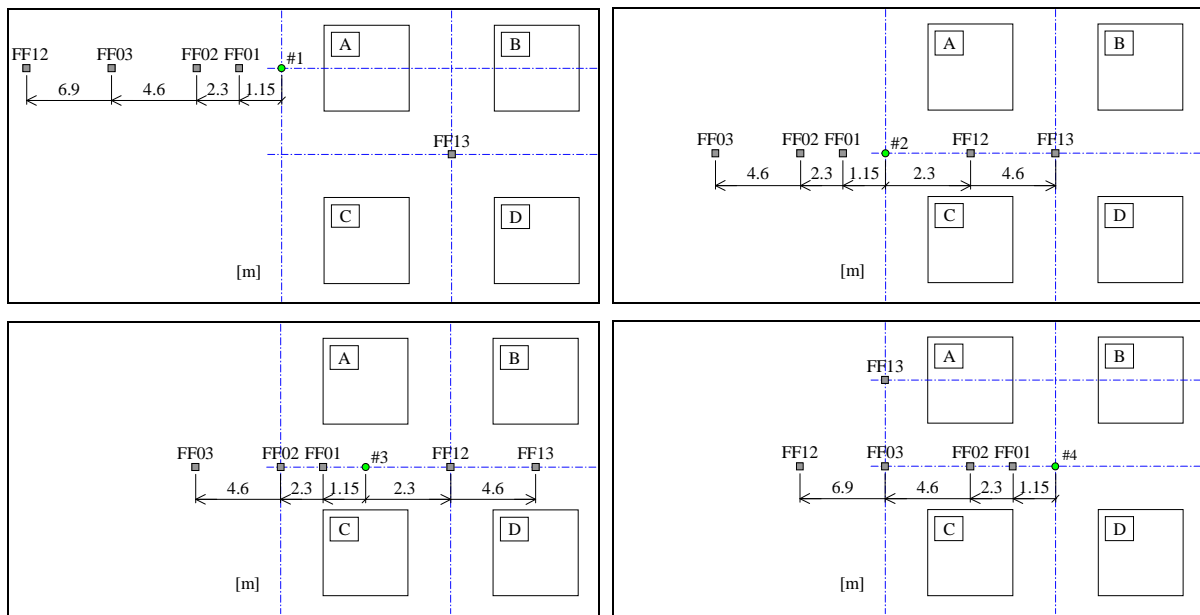


Figure 2: Top view of the different ground gauge positioning for each charge location.

The explosive used was the Swedish PETN, Sprängdeg m/46, with a density of about 1500 kg/m^3 , which consists of approximately 86 % pentolite and 14 % mineral oil. Accordingly, the 0.4 kg and 1.6 kg charges used consisted of 0.344 kg and 1.376 kg pentolite, respectively. Using the average equivalent TNT weight 1.21, given in ConWep, the scaled distance Z (expressed as TNT equivalent) can be determined. The minimum horizontal projection of the distance between the charges and the pressure gauges varied from 1.15 m to about 10 m, which provide a scaled distance of $1.5 \leq Z \leq 13 \text{ m/kg}^{1/3}$ and $1.0 \leq Z \leq 8.5 \text{ m/kg}^{1/3}$ for the 0.4 kg and 1.6 kg charges, respectively.

FINITE ELEMENT MODEL

The blast simulations were performed using the explicit code AUTODYN [11]. All simulations were made before the experiments were carried out, which means that the experimental results are used to validate how well AUTODYN manage to describe the blast load in a complex environment similar to that in a city.

In the numerical model the physical domain was represented by rectangular boxes in 3D which in turn were filled with cube shaped hexahedral linear elements. The size of these rectangular boxes varied based on the blast scenarios as well as the different remap stages and the planar symmetry present. A typical series of 3D remap runs over 4 stages would have approximate rectangular domain sizes of: $(2\text{ m})^3$, $(4\text{ m})^3$, $(8\text{ m})^3$ and $(16\text{ m})^3$. The element size used highly depended on the remap stage and the total number of elements employed in the numerical mesh. The high-resolution runs strove to utilize the maximum number of elements possible, i.e. approximately 4.5 million elements, which in turn yielded an element size of approximately 10 mm at the first 3D remap stage. The remapping ratio was always 1:2, consequently doubling the element size in each direction at every new remap stage. The four concrete boxes and the ground were modeled using rigid boundaries. In all but the last remapping stage no boundary conditions were necessary since the blast wave front was always fully contained inside the corresponding numerical domain. In the last stage, though, an outflow boundary condition was applied to the external boundaries of the domain.

Each simulation involved separate runs over several stages in which a self-developed automatic remapping technique was used. The first stage involved a 1D spherical symmetric run using a Multi-Material Euler solver simulating the initial detonation phase with both explosive material and air. A remap procedure was then performed into a 2D axial symmetric domain using the same Multi-Material Euler solver. Finally the simulation was concluded by a series of 3D remapping runs using an Euler-FCT solver with air only. Some of these 3D remapping stages involved planar symmetry, in which case the symmetry was fully exploited in the simulations. Figure 3 exemplify the simulation procedure for two 3D remapping stages.

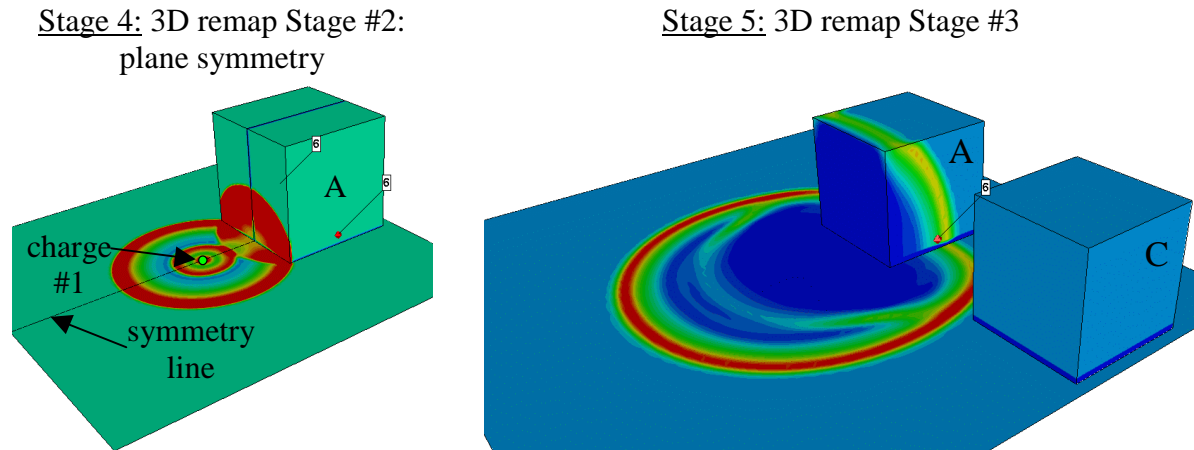


Figure 3: Illustration of the principal layout of the finite element model for simulation of charge at location #1 for Stages 4 and 5.

The large number of simulations with their accompanying remapping stages called for automation at several levels of the simulation process. Therefore, an automatic script generation with AUTODYN-linked Fortran user-subroutines was developed. The main idea of this methodology was to enable automatic detection of the shock front during the blast, so that a remap process could be initiated at the time when the shock front was close to the model rigid boundaries, i.e. concrete boxes, or the boundary of the numerical domain.

In AUTODYN there are four different pre-defined material models for the explosive PETN, where the material densities vary between 0.88 kg/m^3 and 1.77 kg/m^3 . A pre-study was carried out to determine the difference between these material models and it was found that three out of four models generated almost identical results, [13], [14]. This, together with an approximation that the explosive in the charges used had a density of about 1.7 kg/m^3 , [13], lead to the use of the PETN material model with density 1.77 kg/m^3 in the final AUTODYN simulations of the experimental set-up. The explosive was modeled using the JWL Equation of State (EOS) with automatic conversion into Ideal Gas EOS when the entire explosive had reached a compression value of -0.95 . Additionally, at the start of the first 3D remap stage the explosive was converted into air, thus facilitating the use of the single material Ideal-Gas-EOS-Only Euler FCT solver. Input parameters for air and explosive used are listed in Table 1.

Table 1: Summary of input parameters in AUTODYN for air and explosive PETN.

Air		PETN 1.77	
ρ_0	$1.226 \cdot 10^{-3} \text{ (g/cm}^3\text{)}$	ρ_0	$1.77 \text{ (g/cm}^3\text{)}$
γ	1.4	C-J Detonation velocity	8 300 (m/s)
P_0	101.3 (kPa)	C-J Energy density	$1.01 \cdot 10^7 \text{ (kJ/m}^3\text{)}$
		C-J Pressure	$3.35 \cdot 10^7 \text{ (kPa)}$

In this paper mainly the results for the 0.4 kg charges are presented. Hence, if not mentioned otherwise all results presented are related to the small charges. For more information about the experiments and the analyses carried out, see [13], [14].

RESULTS

Comparison with ConWep

A comparison of measured peak pressure in the free field gauges (FF01 to FF13) and that predicted using ConWep has been made in [13] and [14] and it was found that the correspondence was satisfactorily. As a further illustration two samples of the pressure-time relations for charges at location #1 and #4 are compared to that predicted by ConWep in Figure 4. The pressures obtained from the charge at location #1 should agree well with that of ConWep whereas it from the charge at location #4 is expected to deviate somewhat from ConWep due to confinement effects at ranges larger than about 2.3 m.

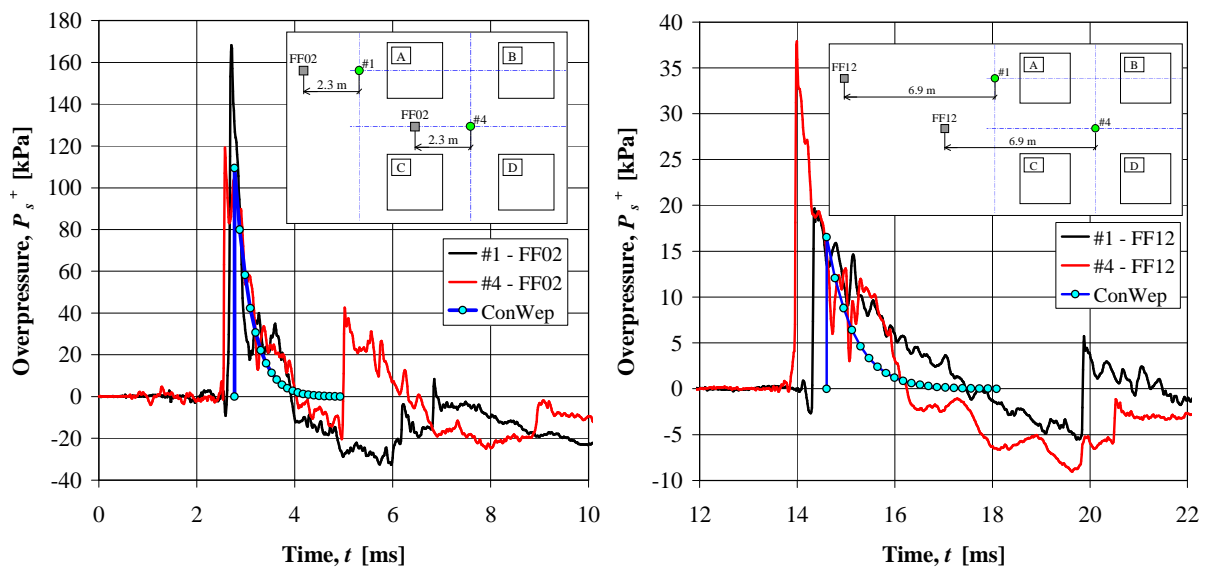


Figure 4: Comparison of pressure-time relations in the experiments and ConWep [4].

The key parameters of this comparison are summarized in Table 2. From this it can be observed that ConWep somewhat underestimate the peak pressure and overestimate the arrival time for the compared pressure relations. The resulting impulse intensity of the initial positive phase, though, is rather similar.

Table 2: Summary of blast key parameters related to pressure-time relations in Figure 4.

Gauge	R [m]	t_a [ms]	P_s^+ [kPa]	i_s^+ [Pas]	T^+ [ms]
#1-FF02	2.3	2.58	168	57	1.31
#1-FF12	6.9	14.3	20	24	3.15
#4-FF02	2.3	2.43	119	67	1.49
#4-FF12	6.9	13.8	38	29	2.41
ConWep	2.3	2.77	109	67	2.16
ConWep	6.9	14.6	17	25	3.49

It shall be observed that the peak pressure from a detonation in location #1 is noticeable higher than from that in location #4 at a distance of $R = 2.3$ m. However, at a distance of 6.9 m the opposite is true, the pressure from the blast wave originating from location #4 being higher. This effect is believed to be a result of the confinement effect obtained when the blast wave propagates in the space between the concrete boxes.

Comparison with AUTODYN

Table 3 presents a comparison of key parameters overpressure P^+ , arrival time t_a and impulse intensity i^+ and i^- obtained in the AUTODYN simulations and that of the experiments for charge locations #1 and #3. Here, the impulse intensities i^+ and i^- are defined as the sum of all positive and negative phases, respectively, within the time period t_{end} .

$$i^+ = \sum_{k=1}^n i_k^+ = \sum_{k=1}^n \int_{t_{a,k}}^{t_{end,k}} P^+(t) dt \quad (1)$$

$$i^- = \sum_{k=1}^n i_k^- = \sum_{k=1}^n \int_{t_{a,k}}^{t_{end,k}} P^-(t) dt \quad (2)$$

To get a better overview of how well the results coincide a coherence measure, according to Eq. (3), was introduced.

$$Coh = 1 - \frac{\int_0^{t_{end}} |P_{AD}(t) - P_{Exp}(t)| dt}{i_{Exp}^+ + i_{Exp}^-} \quad (3)$$

Here $P_{AD}(t)$ and $P_{Exp}(t)$ are the pressure obtained in the AUTODYN simulations and experiments, respectively, while i_{Exp}^+ and i_{Exp}^- are the total positive and negative impulse intensities from the experiments according to Eqs. (1) and (2) up to time $t_{end} = 50$ ms. Thereby, it is possible to fairly straightforwardly compare a large number of numerical and experimental results and get a measure of how well they coincide. Using this measure, $Coh = 1.0$ signify a perfect match. However, as illustrated in Figure 5, $Coh \geq 0.5$ corresponds to very good agreement between simulated and experimental results.

Table 3: Summary of key parameters P^+ , t_a , i^+ and i^- from AUTODYN analyses and experiments for charge locations #1 and #3 when $t_{end} = 50$ ms. A marking “-“ in the table indicate that the experimental result was not valid.

Gauge	Location #1								Location #3							
	AUTODYN				Experiments				AUTODYN				Experiments			
	P^+ [kPa]	t_a [ms]	i^+ [Pas]	i^- [Pas]	P^+ [kPa]	t_a [ms]	i^+ [Pas]	i^- [Pas]	P^+ [kPa]	t_a [ms]	i^+ [Pas]	i^- [Pas]	P^+ [kPa]	t_a [ms]	i^+ [Pas]	i^- [Pas]
FF01	656	0.62	143	137	480	0.65	248	-	698	0.62	226	184	610	0.61	237	704
FF02	129	2.42	85	94	168	2.58	57	-	136	2.38	140	141	93	2.53	120	220
FF03	32	7.69	52	50	47	8.14	82	54	33	7.74	76	77	45	7.78	71	66
FF12	14	13.45	35	35	20	14.27	38	35	136	2.38	137	141	93	2.63	113	155
FF13	16	9.89	32	32	18	10.50	28	31	34	7.61	114	112	37	8.21	106	102
BA1L	51	3.71	61	67	-	-	-	-	8	9.71	52	51	8	9.81	49	47
BA2L	7	9.63	49	48	8	10.28	53	49	52	3.73	113	115	40	3.90	110	116
BA3L	51	3.71	113	115	63	3.89	112	110	2 258	0.63	505	235	2 369	0.47	763	328
BA4L	2 100	0.63	461	208	1 745	0.63	429	-	52	3.73	70	73	58	3.81	73	74
BA6L	94	1.56	76	148	114	1.68	104	107	1 272	1.05	325	233	991	1.03	345	238
BA7L	1 221	1.05	290	211	599	1.02	187	452	103	1.61	70	132	146	1.65	72	174
BB1L	6	15.34	20	22	11	16.76	22	19	8	11.55	34	31	8	12.34	32	27
BB2L	3	22.00	21	20	3	23.35	23	20	5	13.52	33	35	5	13.85	32	33
BB3L	6	15.34	42	44	11	16.63	45	44	51	7.93	115	112	54	8.39	99	98
BB4L	14	13.41	68	70	-	-	-	-	77	6.45	131	127	73	6.89	122	118

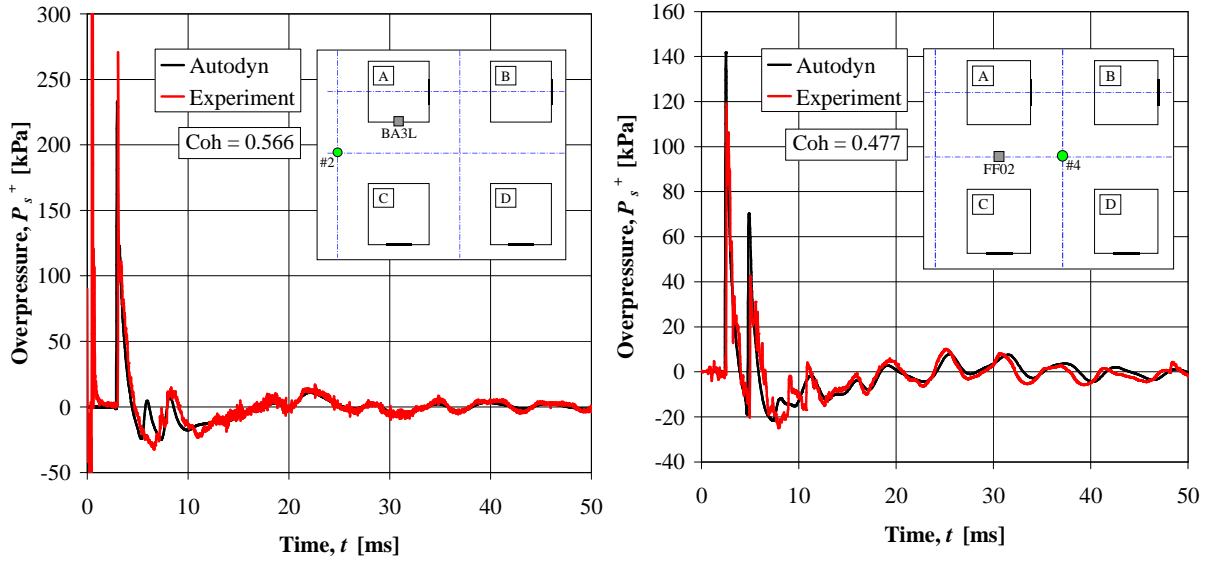


Figure 5: Example of correlation between AUTODYN analyses and experiments: #2-BA3L (left) with $Coh = 0.566$, and #4-FF02, with $Coh = 0.477$.

From Table 3, Figure 5 and further comparisons presented later in this paper it can be seen that the agreement between experimental and numerical results is generally very good. The similarities between the pressures measured in the experiments and those obtained in AUTODYN is evident. It can be concluded, though, that the rapid pressure rise observed in the experiments is not always fully captured in AUTODYN. This is due to the model discretization; i.e. the use of several remapping stages cause loss of information and also leads to an element mesh that is no longer fine enough to accurately capture rapid pressure changes. Nevertheless, the general behavior is still captured with good accuracy. Furthermore, it was observed that the agreement between analyses and experimental results increased when the pressure decreased. Thus, when the pressure was reduced to less than about 50-100 kPa the general agreement went from very good to excellent. In Figure 6 the complete batch of

coherence data for the 0.4 kg and 1.6 kg charges, totaling 8 charges with almost 200 result series, is presented. From this it can be noted that about 65 % of the compared results reach $Coh \geq 0.5$; i.e. a limit that indicates very good agreement.

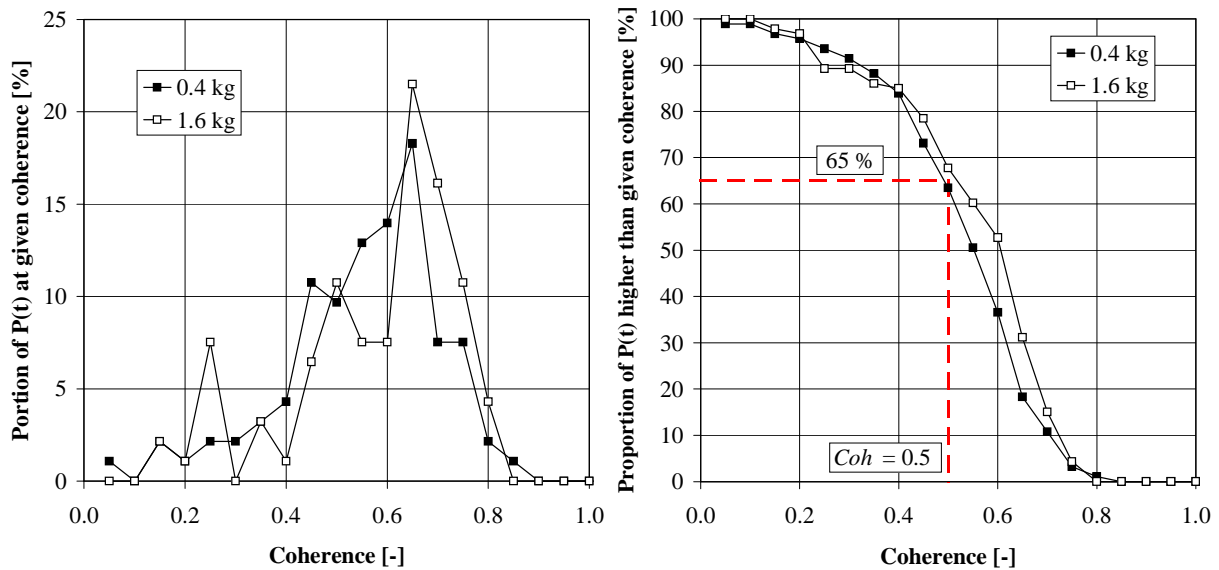


Figure 6: Coherence of 0.4 kg and 1.6 kg charges presented as portion at given coherence (left) and portion higher than given coherence (right).

SUPERPOSITIONING MODEL

Above it was shown that the prediction made in AUTODYN generally shows very good accuracy with that of the experiments. Hence, it has been confirmed that AUTODYN is a powerful tool in the prediction of load characteristics from blasts in an urban environment. The downside, though, is that programs such as AUTODYN are often expensive and demands a highly skilled user to achieve reliable results. This, in addition to the time consuming modeling and the needed CPU time to achieve the accurate results, are factors that weigh heavily against using only FE-calculations to predict blast loading on structures.

Empirical and semi-empirical methods are easier to use and also provide a basic knowledge for understanding different load situations. Such less complex methods are also needed to better understand the results from a more complex analysis, and thus prevent the latter from being transformed into a “black box”. Additionally, such simplified tools can be used to get an approximate view of the resulting load characteristics in a complex situation and could provide sufficient foundation for achieving design loads on the structures.

Based on this an attempt was made to have an engineer’s approach to the problem at hand and below a method based on [8] is presented. The concept of this method is to superpose several blast waves, where each wave is adjusted with regard to diffraction. The influence of reflected pressure is not considered, i.e. the wave characteristics are based on incident pressures only, nor is there an attempt to incorporate any confinement effects. The method is intentionally made simple since the purpose here is to provide a model that may describe the main load characteristics obtained in a complex load situation rather than a fully accurate prediction.

The resulting pressure time-relation, $P(t)$, for a general point in the geometry studied is determined performing the following four steps:

1. Derive all pressure wave paths, W_i , $1 \leq i \leq n$, which will be of interest for the studied point. Calculate the total distances, R_i , for each of the paths from center of charge to the studied point.
2. Use the total distances R_i in conjunction with the charge characteristics to determine the corresponding airblast parameters for both the positive and negative phase of the incident waves; i.e. arrival time t_a , incident pressures P_s^+ , P_s^- , incident impulse intensities i_s^+ , i_s^- , duration T^+ and T^- and the decay coefficient α .
3. Calculate the pressure time histories for incident pressures for all wave paths using

$$P_{w_i}(t) = \begin{cases} 0, & \text{if } t < t_a \\ P_s^+ \left(1 - \frac{t-t_a}{T^+}\right) e^{-\frac{\alpha(t-t_a)}{T^+}}, & \text{if } t_a \leq t < t_a + T^+ \\ -P_s^- \cdot 13.9 \left(1 - \frac{t-(t_a+T^+)}{T^-}\right) e^{-\frac{4(t-(t_a+T^+))}{T^-}}, & \text{if } t_a + T^+ \leq t < t_a + T^+ + T^- \\ 0, & \text{if } t \geq t_a + T^+ + T^- \end{cases} \quad (4)$$

4. The pressure-time histories for each wave W_i is multiplied with diffraction coefficients, $C_{diff,i}$, and summed together according to

$$P(t) = \sum_{i=1}^n C_{diff,i} \cdot P_{w_i}(t) \quad (5)$$

Blast parameters in step 2 may be determined in several ways, e.g. ConWep [4] for the positive phase. However, in order to automate the calculations as far as possible equations according to spherical burst provided in [15] were used for the positive phase. The decay coefficient α was determined in accordance with Eqs. (1) and (4), i.e. so that

$$i_s^+ = P_s^+ T^+ \left[\frac{1}{\alpha} - \frac{1}{\alpha^2} (1 - e^{-\alpha}) \right] \quad (6)$$

was fulfilled. For the negative phase, relations from [16] were used to determine the blast parameters. The influence of reflected pressure was not considered, i.e. the wave characteristics were based on incident pressures only.

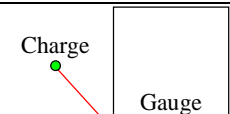
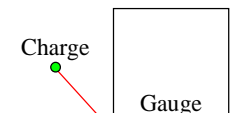
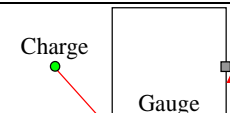
The diffraction coefficients, C_{diff} , used were determined using the experimental results and comparing these to that predicted by ConWep. In [8] the diffraction coefficients were based on the peak pressure P_s^+ . However, in the comparisons made herein it was found that this approach seemed to be a bit uncertain since it proved to differ somewhat also for similar load situations. Therefore, the impulse intensity i_s^+ of the first shock wave was also incorporated in the comparison, see Table 4. Due to reflections, though, it was not possible to identify the full effect of the first blast wave in the pressure-time relations obtained in the experiments, and these results were therefore not included in the comparison.

Table 4 summarizes the pressures and impulse intensities used to determine C_{diff} . Three different load situations were identified: Case 1 with diffraction around one corner to a gauge close to the edge, Case 2 with diffraction around one corner to a gauge positioned far from the edge, and Case 3 with diffraction around two corners to a gauge positioned far from the edge. Average values were determined for the diffractions coefficient when based on the pressure,

$C_{diff,P}$, and the impulse intensity, $C_{diff,I}$, and an average value of these two, $C_{diff,PI}$, was decided. It is observed that $C_{diff,P}$ and $C_{diff,I}$ deviates for Case 1 and 3 but are approximately the same for Case 2. The average diffraction coefficient $C_{diff,PI}$ is higher close to the edge (Case 1) than in the middle of the wall (Case 2), which also is in line with that observed in [8]. However, the coefficient determined based on the impulse intensity is the same, and therefore as a rough approximation it seems reasonable to use the same value $C_{diff,PI}$ for both of them. Hence, an approximate average value of $C_{diff} = 0.6$ is used for both Case 1 and Case 2.

It seems plausible that the resulting diffraction coefficient should depend on the number of corners that the blast wave diffracts around. Observing that the main difference between Case 2 and Case 3 is that the former diffracts around one corner while the second diffracts around two it is found that $C_{diff,3} = C_{diff,2}^2$ seems like a good approximation. Hence, the diffraction coefficient $C_{diff,i}$ in Eq. (4) is set to $C_{diff,i} = C_{diff}^m$, where m is the number of corners that wave W_i diffracts around.

Table 4: Determination of diffraction coefficient $C_{diff,PI}$, based on experimental results and predictions made in ConWep, [4].

Case	Description	Gauge	R [m]	Experiments		ConWep		Diffraction	
				P_s^+ [kPa]	i_s^+ [Pas]	P_s^+ [kPa]	i_s^+ [Pas]	$C_{diff,P}$ [-]	$C_{diff,i}$ [-]
1		#1-BA6L	1.826	114	43.4	180	82.8	0.63	0.52
		#3-BA7L	1.826	146	43.7	180	82.8	0.81	0.53
		#4-BA7L	3.837	34.4	28.7	41.2	43.2	0.84	0.67
		Average value:	$C_{diff,P}$	0.76	$C_{diff,I}$	0.57	$C_{diff,PI}$	0.67	
2		#1-BA1L	2.776	-	-	74.8	57.3	-	-
		#1-BA3L	2.776	63.2	35.5	74.8	57.3	0.84	0.62
		#1-BB1L	7.376	11.5	14.2	15.1	23.4	0.76	0.61
		#1-BB3L	7.376	11.0	11.2	15.1	23.4	0.73	0.48
		#2-BA1L	4.787	11.2	19.1	28.5	35.3	0.39	0.54
		#2-BA2L	4.787	11.9	22.9	28.5	35.3	0.42	0.65
		#2-BB1L	9.387	3.5	-	9.6	18.5	0.36	-
		#2-BB2L	9.282	4.1	10.4	11.1	18.7	0.37	0.56
		#3-BA2L	2.776	40.5	35.0	74.8	57.3	0.54	0.61
		#3-BA4L	2.776	58.0	35.7	74.8	57.3	0.78	0.62
		#3-BB2L	7.126	5.3	-	15.8	24.2	0.34	-
		#4-BA1L	4.787	11.8	19.6	28.5	35.3	0.41	0.55
		#4-BA4L	4.787	11.4	19.5	28.5	35.3	0.40	0.55
#4-BB1L	4.787	11.6	19.3	28.5	35.3	0.41	0.55		
#4-BB2L	4.787	11.5	19.8	28.5	35.3	0.40	0.56		
Average value:	$C_{diff,P}$	0.51	$C_{diff,I}$	0.57	$C_{diff,PI}$	0.54			
3		#1-BA2L	5.076	7.8	15.9	26.0	33.4	0.30	0.48
		#1-BB2L	9.676	2.3	-	10.5	18.0	0.22	-
		#3-BA1L	5.076	7.6	16.9	26.0	33.4	0.29	0.51
		Average value:	$C_{diff,P}$	0.27	$C_{diff,I}$	0.49	$C_{diff,PI}$	0.38	

The number of blast waves used in the calculations presented herein is limited to six. Further, when determining the distances R_i an approximate approach was used based on simple geometrical assumptions regarding angles of reflection; the difference in distance obtained being rather negligible. An example of how the different shock waves are determined and put together in a resulting pressure-time relation is shown in Figure 7 and Table 5. When determining the blast parameters a spherical air burst was assumed. However, since the current load case is more similar to that of a hemispherical airburst the charge weight was increased with a factor 1.8 due to mirroring, [17].

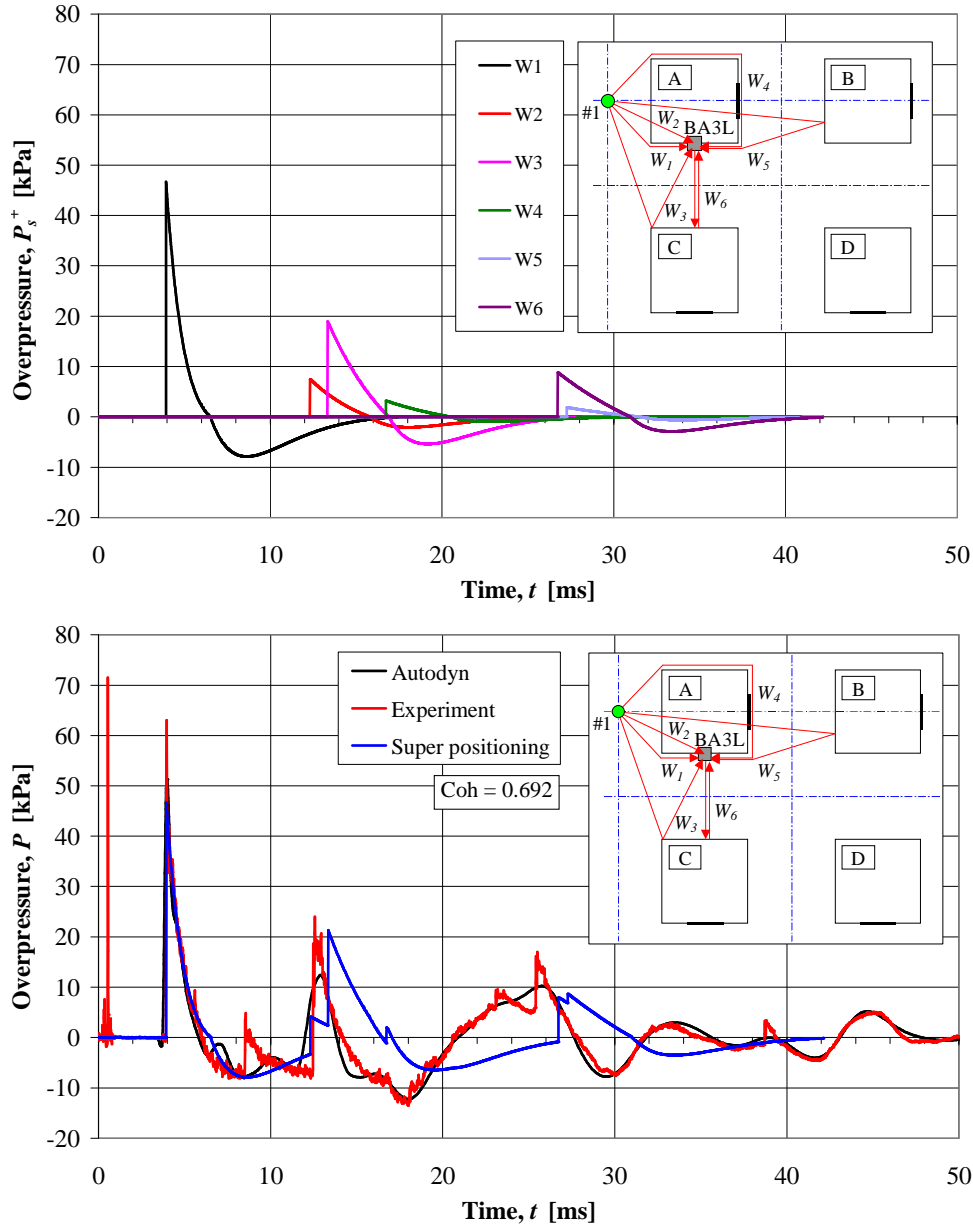


Figure 7: (Top) The six shock wave paths $W_1 - W_6$, multiplied with C_{diff} , that affect the studied point BA3L, and (bottom) comparison with the results from AUTODYN and the experiments. The correlation between AUTODYN and experiments resulted in $Coh = 0.692$.

Table 5: Input data according to Eqs. (4) and (5) for the shock waves shown in Figure 7. The data is based on a spherical airburst using a scaled distance Z based on an equivalent weight of 1.21 and a mirror coefficient of 1.8.

Wave	Geometry		Positive phase					Negative phase			Diffraction	
	R [m]	Z [m/kg ^{1/3}]	t_a [ms]	P_s^+ [kPa]	i_s^+ [Pas]	T^+ [ms]	α [-]	P_s^- [kPa]	i_s^- [Pas]	T^- [ms]	m [#]	C_{diff} [-]
W_1	2.78	3.06	3.932	78.5	60.4	2.591	1.81	-13.1	-66.0	10.980	1	0.60
W_2	5.85	6.44	12.311	20.8	30.6	3.481	0.52	-5.8	-31.0	11.769	2	0.36
W_3	6.21	6.84	13.350	19.0	29.0	3.552	0.47	-5.4	-29.2	11.834	0	1.00
W_4	7.38	8.12	16.738	14.8	24.6	3.759	0.37	-4.5	-24.5	12.026	3	0.22
W_5	10.99	12.10	27.268	8.6	16.8	4.246	0.26	-2.9	-16.4	12.481	3	0.22
W_6	10.81	11.90	26.735	8.8	17.1	4.225	0.28	-2.9	-16.6	12.461	0	1.00

In Figure 8 some further comparisons between experiments, AUTODYN and the super positioning method are illustrated. The correlations of the shown results, based on the positive and negative impulse intensities, are summarized in Table 6.

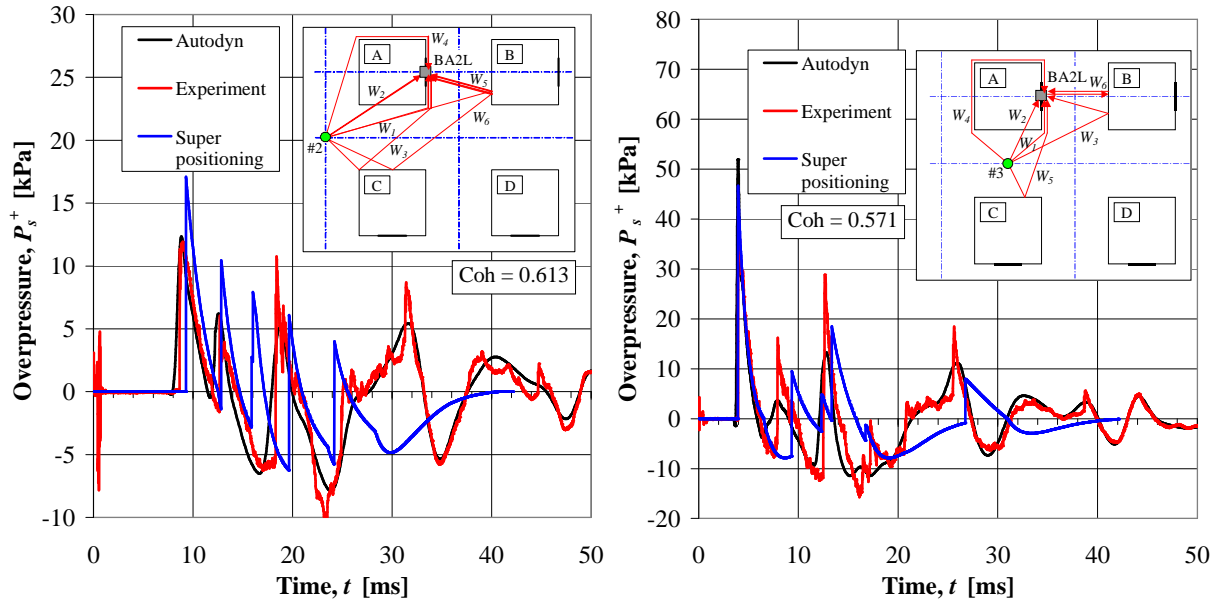


Figure 8: Comparison of pressure-time relation from AUTODYN, experiments and super positioning method: #2-BA2L (left) with $Coh = 0.613$, and #3-BA2L, with $Coh = 0.571$.

Table 6: Comparison of total positive and negative impulse intensities in experiments, AUTODYN and super positioning method according to Eqs. (1) and (2) when $t_{end} = 40$ ms.

Source	#1-BA3L				#2-BA2L				#3-BA2L			
	i_s^+	i_s^-	$\gamma^{+ 1)}$	$\gamma^{2)}$	i_s^+	i_s^-	$\gamma^{+ 1)}$	$\gamma^{2)}$	i_s^+	i_s^-	$\gamma^{+ 1)}$	$\gamma^{2)}$
	[Pas]	[Pas]	[-]	[-]	[Pas]	[Pas]	[-]	[-]	[Pas]	[Pas]	[-]	[-]
Experiment	98.2	-101.2	1.00	1.00	52.8	-56.4	1.00	1.00	102.7	-100.2	1.00	1.00
Autodyn	99.8	-105.3	1.02	1.04	52.6	-58.8	1.00	1.04	105.1	-100.0	1.02	1.00
Super positioning	89.2	-92.5	0.91	0.91	41.0	-53.3	0.78	0.95	80.7	-84.6	0.79	0.84

$$1) \gamma^+ = i_s^+ / i_{s^+}^{Exp}$$

$$2) \gamma^- = i_s^- / i_{s^-}^{Exp}$$

Even though the general pressure-time behavior does not fully correspond with the experimental one for the whole time domain it still generates a good view of the load characteristics obtained. The ratios γ^+ and γ^- presented in Table 6 shows that the total impulse intensities predicted by this simplified model is rather correct, the discrepancy being only about 10-20 %. Hence, the good correlation in the comparisons made above suggest that the super positioning method presented herein represent a simplified approach that yields results fairly close to that observed in reality.

CONCLUSIONS

An experimental and numerical study of blast load at an intersection was carried out. The load effects of two types of charges, 0.4 kg and 1.6 kg PETN, positioned in four different locations were simulated using the explicit code AUTODYN and compared to the experimental results. All AUTODYN analyses were made before the experiments were carried out, and hence the results presented herein are used to validate AUTODYN's ability to describe the blast behavior in an urban environment. An automatic remapping routine was developed for the blast simulations in AUTODYN. This routine enabled automatic detection of the shock front close to a boundary, and thus a criterion for when in time to initiate the remapping process, allowing a more time efficient approach to large blast simulations in a complex environment.

It is shown that the agreement between the results obtained in the experiments and the AUTODYN simulations generally is very good. A coherence measure is introduced for comparing experimental and numerical results and it is concluded that this is a convenient method to get an estimation of how well the results coincide. For the results presented herein it is shown that about 65 % of the compared measurements fulfill $Coh \geq 0.5$, i.e. a the limit that indicates very good agreement. For gauges where the pressure was low, less than about 50-100 kPa, the agreement generally went from very good to excellent. Consequently, it is concluded that AUTODYN manage very well to describe the resulting blast effects and that it with confidence may be used as a powerful tool when studying blast loads in a complex urban environment.

An approach for a simplified technique, using super position of several incident shock waves, to estimate the blast load in a more complex environment is presented and compared to the experimental and numerical results. It is found that the method, despite its simplicity and rather crude approach, manage rather well to describe the general behavior of the resulting load characteristics observed in experiments and numerical analyses. The results presented herein show a deviation of just about 20 % compared to that in the experiments.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors thankfully acknowledge the Swedish Rescue Services Agency (Räddningsverket) for the financing of the research project *Resistance capacities of buildings for extreme dynamic loading*. Special thanks are due to Björn Ekengren for his invaluable support; without him this project had not been the same. Further thanks are due to the Norwegian Defence Estates Agency (Forsvarsbygg), especially Svein Christensen and Ståle Skudal, for their initiation, invitation to take part in and financial support of the experimental work presented herein. Additionally, the Swedish Defence Research Agency (FOI), of whom Richard Forsén, Anders Carlberg and Roger Berglund are thanked, for their part in the experimental performance. Finally, thanks to Bert von Rosen, Canadian Explosives Research Laboratory, for providing help with the super positioning method presented herein.

REFERENCES

- [1] Ekengren, B., 2006, Skyddsrum, SR 06 (Civil defence shelters, SR 06, in Swedish), Swedish Rescue Services Agency, B54-141/06, Karlstad, Sweden.
- [2] Johansson, M. and Laine, L., 2006, Resistance capacities of buildings for extreme dynamic loading, Research project description, Swedish Rescue Services Agency, http://www.srv.se/templates/SRV_Page____15919.aspx, Karlstad, Sweden.
- [3] Remennikov, A.M., 2003, A review of methods for predicting bomb blast effects on buildings, *Journal of Battlefield Technology*, 6(3), pp. 5–10.
- [4] 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.
- [5] Rose, T.A. and Smith, P.D., 2002, Influence of the principal geometrical parameters of straight city streets on positive and negative phase blast wave impulses, *International Journal of Impact Engineering*, 27, pp. 359–376.
- [6] Rose, T.A. and Smith, P.D., 2003, 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, Germany.
- [7] 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, Germany.
- [8] 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, Germany
- [9] Remennikov, A.M. and Rose, T.A., 2005, Modelling blast loads on buildings in complex city geometries,” *Computers and Structures*, 83, pp. 2197-2205.
- [10] Smith, P.D. and Rose, T.A., 2006, Blast wave propagation in city streets – an overview, *Prog. Struct. Engng Mater.* 8, pp. 16-28.
- [11] Century Dynamics Inc., 2004, AUTODYN Theory Manual Revision 5.0, San Ramon, CA, USA.
- [12] Johansson, M. and Laine, L., 2007, Bebyggelsens motståndsförmåga mot extrem dynamisk belastning, Delrapport 1: Last av luftstöt våg (Resistance capacities of buildings for extreme dynamic loading, Report 1: Load from airblast, in Swedish.), Swedish Rescue Services Agency, B54-232/07, Karlstad, Sweden.
- [13] Johansson, M. and Laine, L., 2008, Bebyggelsens motståndsförmåga mot extrem dynamisk belastning, Delrapport 2: Explosion i gatukorsning (Resistance capacities of buildings for extreme dynamic loading, Report 2: Explosion at an intersection, in Swedish.), Swedish Rescue Services Agency, to be published in 2008, Karlstad, Sweden.
- [14] Johansson, M., Larsen O.P., Laine, L., 2007, Explosion at an intersection in an Urban Environment – Experiments and analyses, *Proceedings of the 78th Shock and Vibration Symposium*, Philadelphia, PA, USA.
- [15] Kingery, C.N., Bulmash, G., 1984, Airblast Parameters from TNT Spherical Air Burst and Hemispherical Surface Burst, Ballistic Research Laboratory, Aberdeen Proving Ground, Technical Report ARBRL-TR-02555, Maryland, USA.
- [16] Departments of Special Weapons Agency (DSWA), Army, Navy, and Air Force, 1998, Protective Structures Automated Design System (PSADs), Version 1.0, U.S. Army Corps of Engineers: ATTN: CEMP-ET 20, USA.
- [17] Baker, W.E., Cox, P.A. Westine, P.S., Kulesz J.J. Strehlow R.A., 1983, *Explosion Hazards and Evaluation*, Elsevier Scientific Publishing Company, New York, NY, USA.

