

Henrik Almström

Registrering och simulering av tryckförlopp vid detonation av laddning över markplan

Utgivare Totalförsvarets Forskningsinstitut - FOI Vapen och skydd 147 25 TUMBA	Rapportnummer, ISRN FOI-R--0819--SE	Klassificering Metodrapport
	Forskningsområde 5. Bekämpning	
	Månad, år Mars 2003	Projektnummer E2284
	Verksamhetsgren 5. Uppdragsfinansierad verksamhet	
	Delområde 53 Skydd och anläggningsteknik	
Författare/redaktör Henrik Almström	Projektledare Paul Ström	
	Godkänd av	
	Uppdragsgivare/kundbeteckning	
	Tekniskt och/eller vetenskapligt ansvarig	
Rapportens titel Registrering och simulering av tryckförlopp vid detonation av laddning över markplan		
Sammanfattning (högst 200 ord) Möjligheten att simulera stötvågor, genererade av detonerande laddningar i luft, och deras interaktion med strukturer, har snabbt förbättrats under de senaste åren, som en följd av datorutvecklingen. För att erhålla en god simulering krävs en god beskrivning av detonationsförloppet i sprängämnet, en god beskrivning av reaktionsprodukternas egenskaper (tillståndsekvation), en god beskrivning av luftens egenskaper (tillståndsekvation) samt en god beskrivning av omgivande strukturer såsom marken. För en fullständig beskrivning av förloppet krävs en simulering av turbulenta förlopp vid begränsningsytor samt den turbulenta förbränningen av reaktionsprodukterna med luft. Ofta kan de turbulenta förloppen försummas i vilket fall förloppet beskrivs med Eulerekvationerna. Dessa är implementerade i datorkoderna LS-Dyna och Autodyn där förloppet beskrivs med rumsfasta celler. I avsikt att kalibrera ovanstående koder vad gäller tillståndsekvationer och krav på numerisk noggrannhet har ett antal mätningar utförts för att erhålla experimentellt underlag. Härvid har 6 laddningar (laddningsvikter 15.5 kg och 16.3 kg) detonerats på olika höjder över marken och marktrycket har mätts på 4 olika sidoavstånd från nollpunkten. En simulering med LS-Dyna har utförts vid fallet detonation på 1 m höjd. Med en cellstorlek på ca 10 mm erhålles ca 10% för låga tryckvärden. Två simuleringar med Autodyn har utförts vid fallen detonation på 1 m och 2 m höjd. Med tillräckligt små celler (typiskt 2 mm) erhålles tillfredsställande överensstämmelse med experiment. Förbättrad överensstämmelse kan erhållas genom variation av ingående materialparametrar.		
Nyckelord Luft, stötvåg, detonation, tryckmätning, numerisk, simulering, markreflex, tillståndsekvation, eldklot		
Övriga bibliografiska uppgifter	Språk Svenska	
ISSN 1650-1942	Antal sidor: 62.	
Distribution enligt missiv	Pris: Enligt prislista	

Issuing organization FOI – Swedish Defence Research Agency Weapons and Protection Division SE-147 25 TUMBA	Report number, ISRN FOI-R--0819--SE	Report type Methodology report
	Programme Areas 5. Combat	
	Month year Mars 2003	Project no. E2284
	General Research Areas 5. Commissioned Research	
	Subcategories 53 Protection and Fortification	
Author/s (editor/s) Henrik Almström	Project manager Paul Ström	
	Approved by	
	Sponsoring agency	
	Scientifically and technically responsible	
Report title (In translation) Registration and simulation of air blast pressure of a detonating charge above ground		
Abstract (not more than 200 words) <p>The possibility of simulating the pressure wave, generated by a detonating charge in air, and its interaction with structures, has been rapidly improved during the last years. To obtain a good simulation a good description of the detonation process in the explosive, a good description of the properties of the reaction products, a good description of the properties of the air and a good description of the surrounding structures, such as the ground, are required. For a full description of the phenomena a simulation of the turbulent processes along surfaces and a simulation of the combustion of the reaction products with air are needed. Often the turbulent process can be dismissed in which case the phenomena can be described by the Euler equations. These are implemented in the computer codes LS-Dyna and Autodyn where immovable cells are used.</p> <p>In order to calibrate the above computer codes regarding the equation of states and the demand of numerical accuracy a number of measurements have been conducted to obtain experimental data. Six charges have been detonated at different heights above the ground and the pressure at the ground has been recorded at different horizontal distances from ground zero. One simulation with LS-Dyna has been conducted regarding the case of a detonation at the height of 1 m. With a cell width of around 10 mm the obtained pressures are about 10% too low. Two simulations with Autodyn have been performed for the cases of detonations at the height of 1 m and 2 m. With small cells (typical dimension 2 mm) the agreement with experiment is satisfactory. Optimising the material parameters in the simulation will improve the agreement.</p>		
Keywords Air, blast, detonation, pressure, measurement, numerical, simulation, ground, reflection, equation of state, fire, ball		
Further bibliographic information	Language Swedish	
ISSN 1650-1942	Pages 62	
	Price acc. to price list	

Innehållsförteckning

	Sida
Förord	5
1. Inledning	6
2. Försöksgenomförande	6
3. Mätresultat och utvärdering av försöken	9
4. Analys av eldklot och efterförbränning	18
5. Numerisk simulering av markeffekten	27
5.1. Luftens tillståndsekvation.....	27
5.2. LS-Dynasimulering.....	28
5.3. Autodynsimulering.....	34
6. Diskussion och sammanfattning	42
Referenser	44
Bilaga A1-A6.....	45
Bilaga B1-B6.....	57
Bilaga C, cd. 1 ex till beställaren, 1 ex. till registratören	

Förord

Föreliggande studie är en fortsättning på studien ”Effekt av spegling”, FOA-R—95-00135-6(2.6)--SE, Maj 1995, ref. 1. Enligt FOI offert 01-4068 (alt KRI PLANs beställning) utlovades följande aktiviteter:

1. Litteraturstudie avseende effekt av spegling mot olika markunderlag.
2. Numerisk simulering av olika fenomen som uppkommer vid laddningsdetonationer nära respektive på markytan.
3. Modellskaiförsök, där inverkan på speglingsfaktorn av laddningsvikt, laddningshöjd, laddningsavstånd och typ av markunderlag studeras.

Arbetet har koncentrerats på att erhålla experimentellt underlag vad gäller tryckförloppet vid markplanet som funktion av laddningshöjd och horisontellt laddningsavstånd från nollpunkten för relativt stora laddningar (15.5 kg TNT och 16.3 kg hexotol). Detta arbete täcker aktivitet 3 men endast en marktyp, packad sand med sten svarande mot morän, har studerats.

De experimentella tryckmätningarna har sedan simulerats med hjälp av datorkoderna LS-Dyna och Autodyn. Avsikten var att kalibrera materialmodeller i koderna mot uppmätta tryck. Datorberäkningarna är i dagsläget mycket tidskrävande och minnesutrymmeskrävande varför inga variationer har utförts. Detta arbete täcker aktivitet 2.

Någon litteraturstudie avseende markmaterial har inte utförts.

Den experimentella delen utfördes vid skjutfältet i Älvdalen av Henrik Almström, Bertil Sandberg och Paul Ström med stöd av Klas-Göran Bolling. Signalutvärdering och analys har utförts av Henrik Almström medan numeriska simuleringar med LS-Dyna har utförts av Tommie Sundel och Lars Olovsson och med Autodyn av Håkan Hansson.

1. Inledning

Vid detonation av laddningar i eller nära markplanet reflekteras den avgivna energien och stötvågen blir kraftigare jämfört med om detonationen sker i fri luft. I Fortifikationshandboken del 2, ref. 2, beskrivs fenomenet med markreflektion vid detonation av laddning över mark. I handboken, sidan 28, ges maxövertrycket vid marken för en kärnladdning för olika skalade horisontella avstånd från "nollpunkten" och olika skalade höjder över marken. Avsikten med denna studie är att ta fram experimentellt underlag vad gäller marktrycket på olika sidoavstånd från nollpunkten vid detonation av nakna laddningar på olika höjder över mark. Detta underlag utnyttjas sedan för att kalibrera tillståndsekvationerna i datorkoderna LS-Dyna och Autodyn och för att studera krav på noggrannheten vid simulering av förloppet med hjälp av datorkoderna LS-Dyna och Autodyn.

Maxövertrycket och skalad impuls vid marken ges också som funktion av skalat horisontellt avstånd och skalad höjd. Uppmätta maxövertryck och impulser mot marken har också jämförts med motsvarande värden erhållna från databasen "ConWep", ref. 3.

I avsnitt 2 beskrivs försöket, i avsnitt 3 genomförs analysen av uppmätta trycksignaler, i avsnitt 4 analyseras eldklotet, i avsnitt 5 utförs numeriska simuleringar av förloppet och i avsnitt 6 sammanfattas studien.

2. Försöksgenomförande

Försöken utfördes vid Älvdalens skjutfält v22, 2002. Laddningarna bestod av 4 stycken trotylklot med diametern 26.3 cm, vikt 15.5 kg samt 2 hexotolklot (60% hexogen, 40% TNT) med diametern 26.3 cm, vikt 16.3 kg. I sprängämneskloten var hål borrarad för tändare in till klotens centrum. TNT-kloten hade pentylbostrar ingjutna vid deras centrum för att säkerställa tändöverföringen.

Hexotolkloten detonerades på 4 och 5 meters höjd över marken medan trotylkloten detonerades på 1, 2 och 3 meters höjd över marken samt en liggande till hälften nedgrävd i sand. Laddningarna placerades på pappror som stadgades upp med tre linor, se figur 1.



Skott 1



Skott 2



Skott 3



Skott4



Skott 5



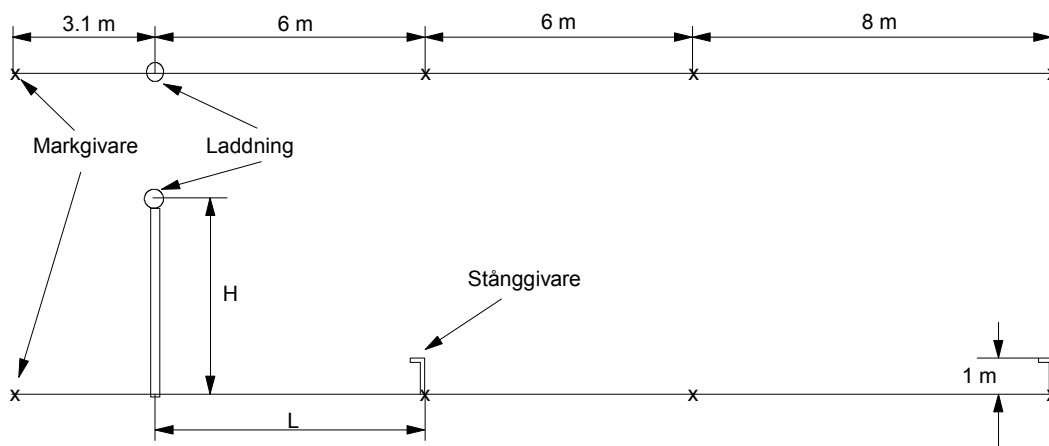
Skott 6

Figur 1. Laddningsarrangemang.

Marken utgjordes av hårt packad sand med sprängsten.

Laddningarna initierades med hjälp av nonelstubin och mätsystemet startades av en kortslutningsgivare placerad på laddningens yta, dvs. nolltidpunkten inträffar när detonationen når sprängämnesytan.

Vid försöken utnyttjades 4 marktrycksgivare (tryckkännande ytans normalriktning vertikal) samt 2 tryckgivare monterade på en stång (stångtrycksgivare), där tryckgivaren befann sig 1 m över markytan och den tryckkännande ytans normalriktning låg i horisontalplanet och pekade mot pappröret. Stånggivarna mäter stagnationstrycket i fallet att laddningen är på 1 m höjd över marken. Mätuppställningen framgår av figur 2.



Figur 2. Mätuppställning

Markgivararrangemanget samt stånggivare visas i figur 3



Figur 3. Markgivararrangemanget och stånggivare

Vid försöken videofilmades förloppen.

3. Mätresultat och utvärdering av försöken

Trycksignalerna har utvärderats vad avser gångtid för stötvågsfronten, maxövertrycket, varaktigheten hos övertrycket samt impulsen hos övertrycket. Signalerna från de 6 skotten och de 4 marktryckgivarna är samlade i bilaga A1-A6. Signalerna från de 2 stångtryckgivarna är samlade i bilaga B1-B6. Råsignalerna är även inbrända på en cd, bilaga C. Ovanstående värden för marktryckgivarna är sammanställda i tabell 1.

Tabell 1. Marktrycksgivarvärden

Skottnr.	Spräng- ämne	Laddnings- vikt (kg)	Höjd (m)	Sida (m)	Ankomst- tid (ms)	1:a maxöver- tryck (MPa)	2:a maxöver- tryck (MPa)	Impuls hos övertryck (Pas)	Över- tryckets varaktig- het (ms)
1	Hexotol	16.3	5	3.1	6.153	0.674		562.5	4.56
				6.0	9.697	0.219		414.1	5.80
				12.0					
				20.0	41.92	0.040		135.2	11.50
2	Hexotol	16.3	4	3.1	4.881	0.692		614.4	3.49
				6.0	8.477	0.326		419.9	5.13
				12.0	20.998	0.078		230.9	10.50
				20.0	40.749	0.037		134.3	11.40
3	TNT	15.5	3	3.1	3.419	0.353	0.66	563.6	3.59
				6.0	7.594	0.274		344.5	4.60
				12.0	20.540	0.062		178.1	9.14
				20.0	40.651	0.029		116.4	11.08
4	TNT	15.5	2	3.1	2.559	0.791	0.77	525.5	1.81
				6.0	6.577	0.272		324.0	3.78
				12.0	19.473	0.062		160.3	7.61
				20.0	39.796	0.027		102.4	10.13
5	TNT	15.5	1	3.1	1.853	0.996		419.3	2.02
				6.0	5.841	0.279		287.0	4.11
				12.0	18.983	0.057		144.2	7.31
				20.0	39.427	0.025		88.6	9.66
6	TNT	15.5	0	3.1	2.088	0.507		318.5	3.26
				6.0	6.395	0.201		279.0	6.21
				12.0	20.352	0.046		124.4	7.47
				20.0	41.192	0.022		78.0	9.39

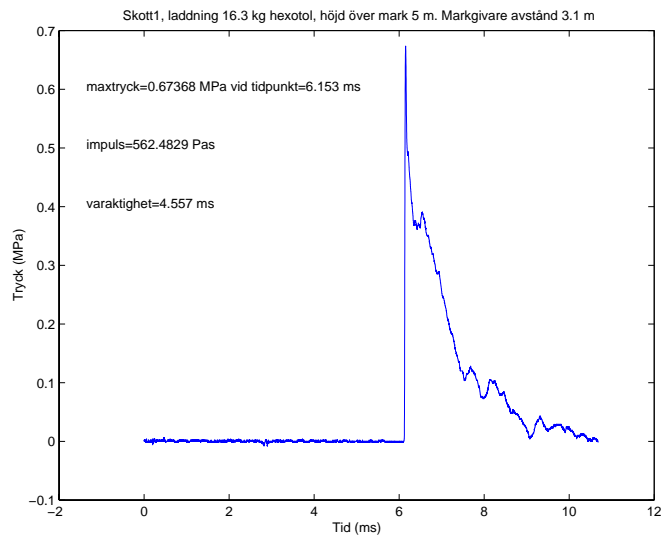
Värden från stångtryckgivarna är sammanställda i tabell 2.

Tabell 2. Stångtrycksgivarvärden

Skott-nr.	Spräng-ämne	Laddn.-vikt (kg)	Höjd (m)	Sida (m)	1:a ankomst-tid (ms)	1:a maxöver-tryck (MPa)	2:a ankomst-tid (ms)	2:a maxöver-tryck (MPa)	Impuls hos övertryck (Pas)	Över-tryckets varaktighet (ms)
1	Hexotol	16.3	5	6	7.874	0.189	10.456	0.220	398.2	7.86
				20	41.829	0.061			135.5	10.41
2	Hexotol	16.3	4	6	6.873	0.273	9.008	0.191	435.3	6.99
				20	40.676	0.057			135.6	10.78
3	TNT	15.5	3	6	6.476	0.370	7.643	0.240	406.7	5.16
				20	40.599	0.050			121.0	11.04
4	TNT	15.5	2	6	5.998	0.725			442.7	3.86
				20	39.756	0.046			105.4	10.17
5	TNT	15.5	1	6	5.233	0.687			416.8	4.02
				20	39.382	0.042			90.9	8.78
6	TNT	15.5	0	6	5.638	0.428			317.9	5.16
				20	41.141	0.035			81.3	9.29

Ankomsttiderna för de olika konfigurationerna avses utnyttjas för jämförelse med de numeriska simuleringarna.

Många trycksignaler har en översläng vid fronten, se tex. skott 1, markgivare på avståndet 3.1 m, i figur 4.



Figur 4. Exempel på översläng hos trycksignal

För att bättre kunna utvärdera maxövertrycket har tryckförloppen för markgivarna filtrerats dvs. uppmätta trycksignaler har anpassats till funktions sambandet

$$p(t) = p_{\max} \left(1 - \frac{t - t_a}{t_0} \right) e^{-(t - t_a)/\tau}$$

där t_a = ankomsttiden till tryckgivaren,
 t_0 = varaktigheten hos övertrycket,
 p_{\max} = maxövertrycket,
 τ = tidskonstant.

Erhållna maxövertryck och impulser efter denna filtrering är sammanställda i tabell 3. Tabellen har kompletterats med reflektionstryck och reflektionsimpuls vid vinkelrätt anslag (sidoavståndet 0 m) hämtade från ref. 2.

Tabell 3. Filtrade maxövertryck och impulser

Skottnr.	Sprängämne	Laddningsvikt (kg)	Höjd (m)	Sida (m)	Maxövertryck (MPa)	Övertryckets varaktighet (ms)	Impuls hos övertryck (Pas)
1	Hexotol	16.3	5	0	0.702		627.7
				3.1	0.510	4.36	555.1
				6	0.165	6.02	419.5
				12			
				20	0.030	11.42	133.8
2	Hexotol	16.3	4	0	1.353		822.6
				3.1	0.616	3.76	621.9
				6	0.213	5.33	420.6
				12	0.064	10.23	230.3
				20	0.029	11.49	132.8
3	TNT	15.5	3	0	2.908		1098.0
				3.1	0.614	2.86	492.3
				6	0.190	5.13	346.2
				12	0.052	8.79	178.6
				20	0.024	11.31	114.8
4	TNT	15.5	2	0	9.315		1868.0
				3.1	0.800	2.52	540.3
				6	0.215	5.12	345.5
				12	0.054	8.87	162.7
				20	0.024	11.41	102.0
5	TNT	15.5	1	0	48.520		5030.0
				3.1	0.776	1.76	419.6
				6	0.209	4.29	286.3
				12	0.049	7.72	144.8
				20	0.021	9.80	88.6
6	TNT	15.5	0	0			
				3.1	0.464	2.80	310.2
				6	0.132	6.03	268.4
				12	0.039	8.15	124.0
				20	0.019	9.87	77.1

Vid två av skotten (skott 1 och skott 2) utgjordes laddningen av hexotol. Enligt ref.3 är Q kg hexotol vad gäller maxövertrycket ekvivalent med $1.11 Q$ kg TNT och vad gäller impulsen ekvivalent med $0.98 Q$ kg TNT. Vi har här valt att översätta hexotolladdningen på 16.3 kg med 18 kg TNT vad gäller maxövertrycket och 16 kg TNT vad gäller impulsen. Då detonationsförloppet i luft skalar relativt väl (lika skalfaktor för längd och tid) och då viskösa effekter spelar mindre roll, kan ett större giltighetsområde för de genomförda försöken erhållas om längder skalas. Med skalade avstånd menas väsentligen att avstånd mätes i antal laddningsradier där sprängämnesmängd översätts till ekvivalent mängd TNT. Om ekvivalent laddningsvikt TNT är Q ges laddningsradien av

$$r_{TNT} = \left(\frac{3Q}{4\pi\rho_{TNT}} \right)^{1/3}$$

där ρ_{TNT} = tätheten hos TNT.

För ett avstånd L erhålles nu antalet laddningsradier till

$$n = \frac{L}{r_{TNT}} = \left(\frac{4\pi\rho_{TNT}}{3} \right)^{1/3} \frac{L}{Q^{1/3}}$$

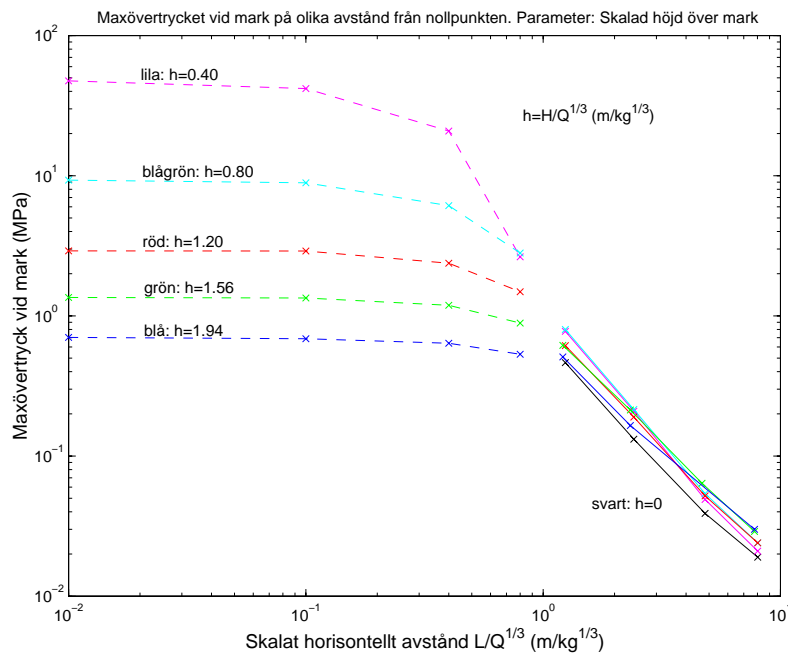
Historiskt används inte antalet laddningsradier direkt utan den ”skalade” längden $L/Q^{1/3}$.

Maxövertryck och skalad impuls vid marken för skalade horisontella avstånd och skalade höjder är sammanställda i tabell 4.

Tabell 4. Maxövertryck och impuls vid marken

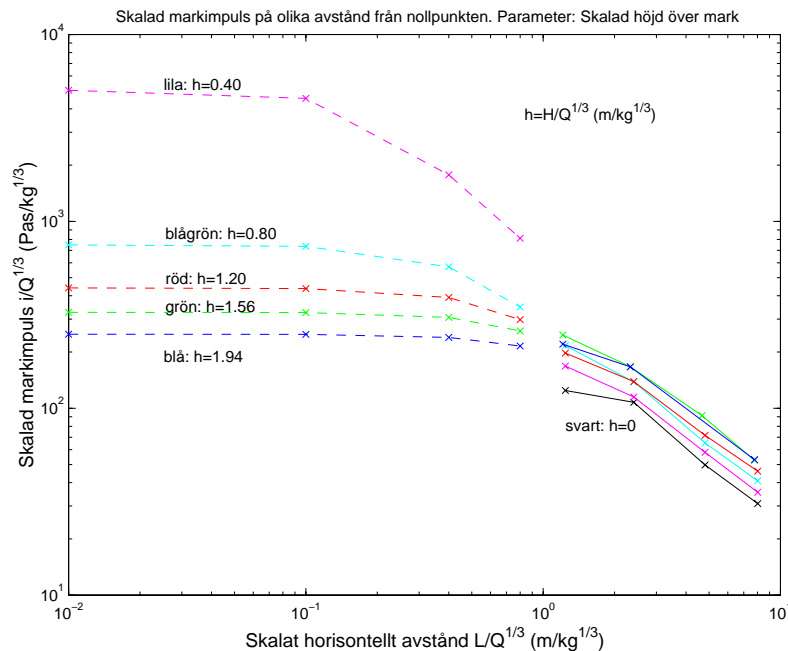
Sprängämne	Laddn.-vikt (kg)	Skalad höjd (m/kg ^{1/3})	Skalat horisontellt avstånd (m/kg ^{1/3})	Maxövertryck (MPa)	Skalad impuls (Pas/kg ^{1/3})
Hexotol	16.3	1.91	0	0.702	
			1.18	0.510	
			2.29	0.165	
			4.58		
			7.63	0.030	
		1.98	0		249
			1.23		220
			2.38		166
			4.76		
			7.94		53
Hexotol	16.3	1.53	0	1.353	
			1.18	0.616	
			2.29	0.213	
			4.58	0.064	
			7.63	0.029	
		1.59	0		326
			1.23		247
			2.38		167
			4.76		91
			7.94		53
TNT	15.5	1.20	0	2.908	440
			1.24	0.614	197
			2.41	0.190	139
			4.81	0.052	72
			8.02	0.024	46
TNT	15.5	0.80	0	9.315	749
			1.24	0.800	217
			2.41	0.215	139
			4.81	0.054	65
			8.02	0.024	41
TNT	15.5	0.40	0	48.520	2017
			1.24	0.776	168
			2.41	0.209	115
			4.81	0.049	58
			8.02	0.021	36
TNT	15.5	0	0		
			1.24	0.464	124
			2.41	0.132	108
			4.81	0.039	50
			8.02	0.019	31

I figur 5 visas maxövertryckets beroende av skalad höjd och skalat sidoavstånd. I figuren, markerade med streckande linjer, är maxövertryck vid marken, hämtade från ”ConWep”, inlagda.



Figur 5. Maxövertrycket vid marken

I figur 6 visas skalad markimpuls beroende av skalad höjd och skalat sidoavstånd. I figuren, markerade med streckande linjer, är markimpulserna, hämtade från ”ConWep”, inlagda.



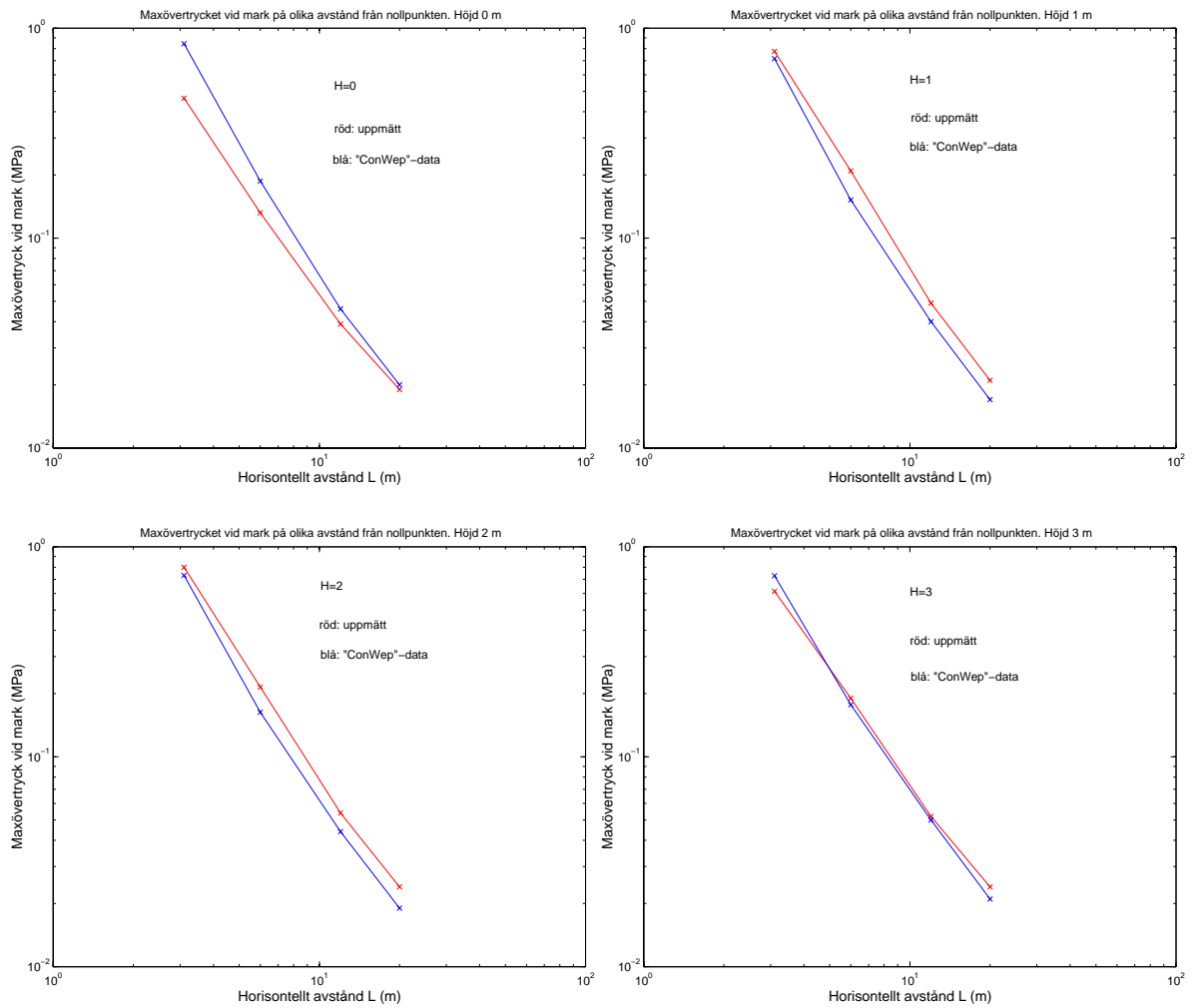
Figur 6. Skalad markimpuls

Maxövertryck och impuls mot marken erhållna från databasen ”ConWep”, för de 4 TNT-skotten, framgår av tabell 5.

Tabell 5. Maxövertryck och impuls mot mark från ”ConWep”, Q=15.5 kg TNT

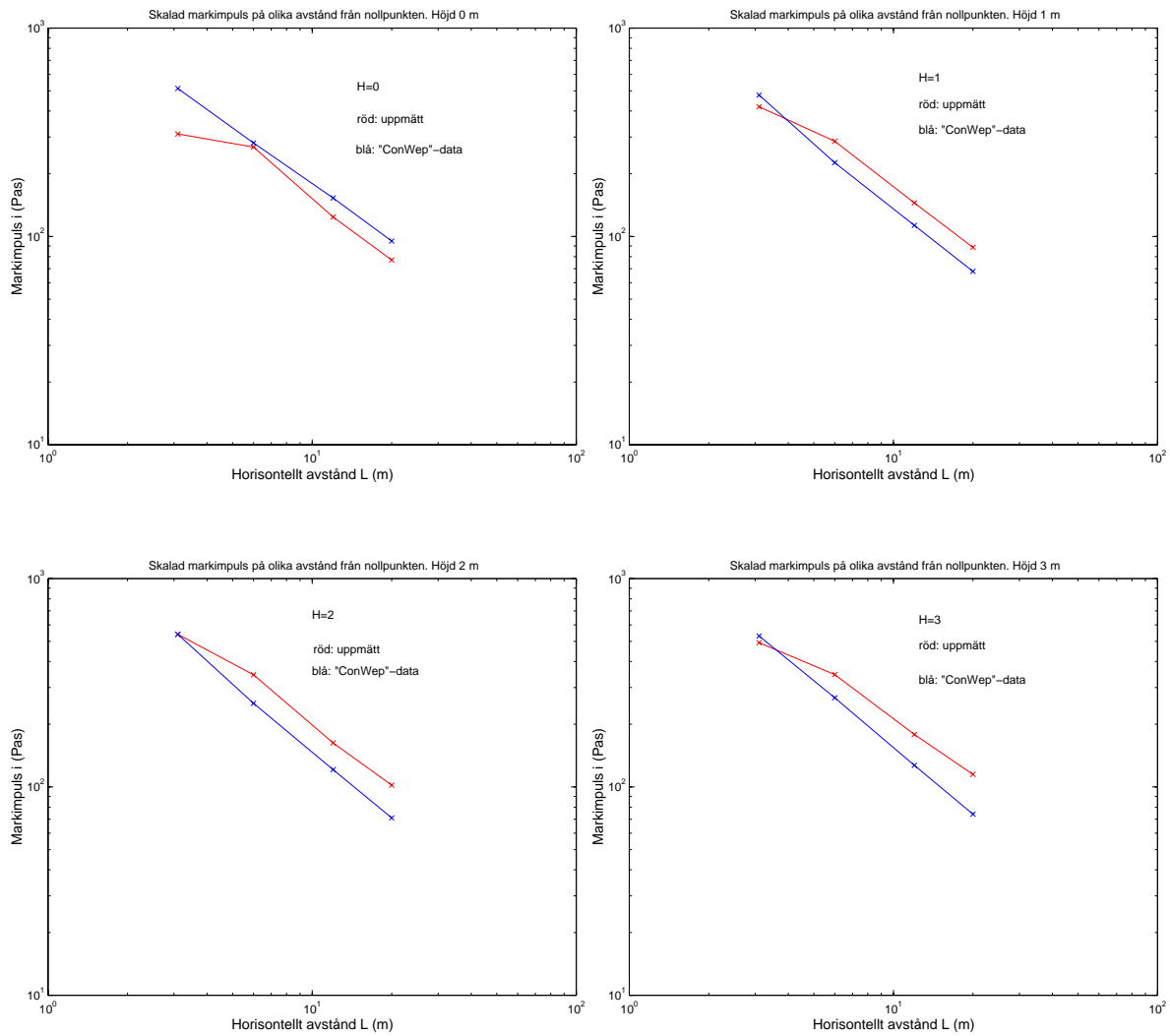
Höjd (m)	Sidoavstånd (m)	Maxövertryck (MPa)	Markimpuls (Pas)
0	3.1	0.844	513
	6	0.187	281
	12	0.046	153
	20	0.020	95
1	3.1	0.716	477
	6	0.152	226
	12	0.040	113
	20	0.017	68
2	3.1	0.731	540
	6	0.163	252
	12	0.044	121
	20	0.019	71
3	3.1	0.728	530
	6	0.177	268
	12	0.050	127
	20	0.021	74

I figurerna 7 och 8 jämförs uppmätta data med ”ConWep”-data.



Figur 7. Jämförelse mellan uppmätta tryck och "ConWep"-tryck

De uppmätta maxövertrycken ligger högre än "ConWep"-trycken för höjderna 1 m och 2 m medan vid 3 m tryckvärdena nära sammanfaller. Vid markliggande laddning ger "ConWep" högre maxövertryck än uppmätta.



Figur 8. Jämförelse mellan uppmätta impulser och ”ConWep”-impulser

De uppmätta markimpulserna ligger över ”ConWep”-impulserna för höjder större än 1 m och sidoavstånd större än 3 m. För markliggande laddning ger ”ConWep” högre markimpulser än uppmätta. Förklaringen till högre maxövertryck och impuls vid markliggande laddning är att ”ConWep” behandlar marken som stel medan vid försöket en avsevärd krater uppstod i marken.

4. Analys av eldklot och efterförbränning

De 6 skotten videofilmades (tid mellan bilderna 40 ms). Från registreringarna har maximala eldklotsdiametern uppskattats, där diametern uppskattats i jämnhöjd med laddningen, samt tid till maximal eldklotsradie. Värdena är sammanställda i tabell 6.

Tabell 6. Eldklotsdata

Skottnr.	Sprängämne	Laddningsvikt (kg)	Höjd (m)	Maxdiameter (m)	Tid till maxdiameter (ms)
1	Hexotol	16.3	5	7.5	160
2	Hexotol	16.3	4	7.5	120
3	TNT	15.5	3	7.4	160
4	TNT	15.5	2	7.3	120
5	TNT	15.5	1	8.2	160
6	TNT	15.5	0	6.7	80

I nedanstående bilder, figur 9, visas situationen vid maximalt ”eldklot” vid de olika skotten



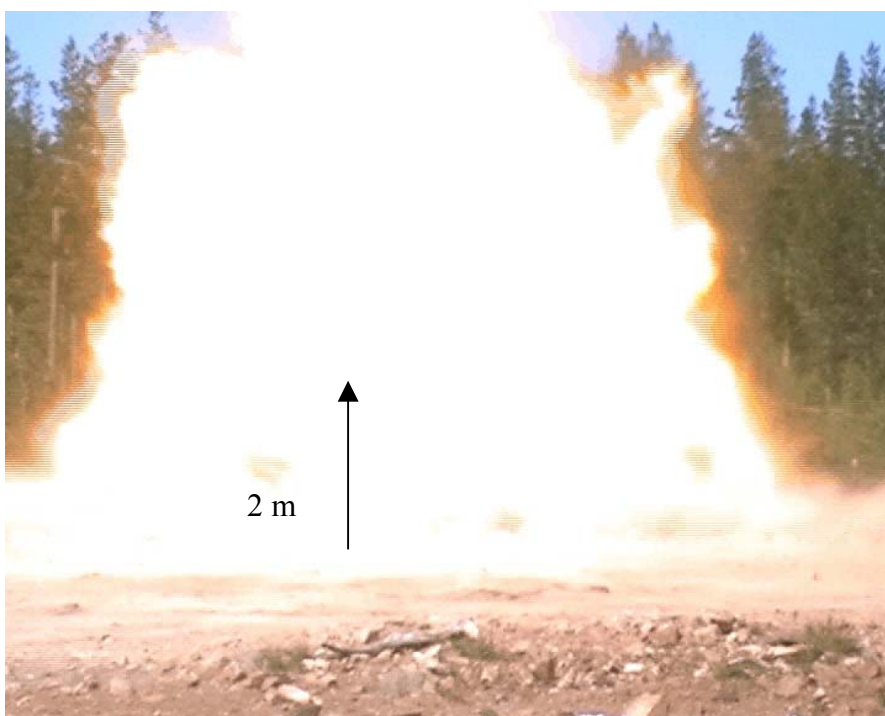
Figur 9a. Skott 1. $t=160$ ms



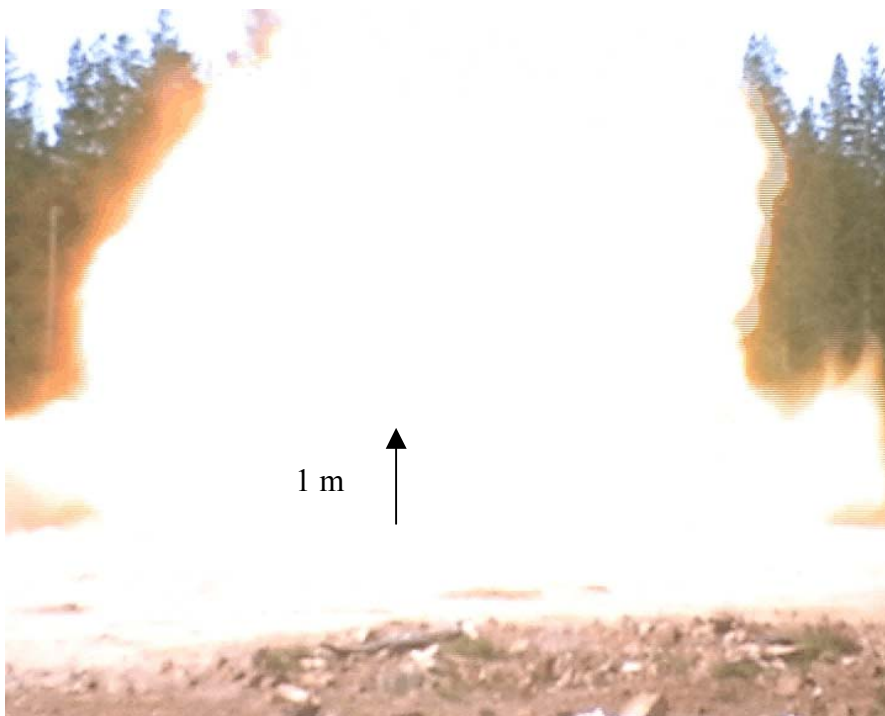
Figur 9b. Skott 2 $t=120$ ms



Figur 9c. Skott 3 $t=160$ ms



Figur 9d. Skott 4 $t=120$ ms



Figur 9e. Skott 5 $t=160$ ms



Figur 9f. Skott 6. $t=80$ ms



Figur 9g. Skott 6. $t=120$ ms



Figur 9h. Skott 6. $t=160$ ms

Figur 9. Maximala "eldklot" vid de 6 skotten

Av videon framgår hur markytan påverkar efterförbränningen av de vid detonationen bildade reaktionsprodukterna. Vid avstånden 4 m och 5 m kan papprören, som laddningarna var placerade på, haft en viss betydelse vid efterförbränningen. Vi ser hur en snabb turbulent förbränning uppstår längs markytan, följande efter Machvågen. Datorkoderna LS-Dyna och Autodyn hanterar inte efterförbränning. Från en simulering med LS-Dyna av skott 5, vid tidpunkten 0.9 ms, figur 10, ser vi hur luften under laddningen har komprimerats och nära inneslutits av reaktionsprodukterna.



Figur 10. Luftinneslutning under reaktionsprodukterna vid simulering av skott 5. Rött område anger reaktionsprodukterna medan blått område anger luft. Uttagen ruta har dimensionerna höjd 1.7 m, längd (radie) 2 m.

I själva verket kommer denna luftmängd att omsättas med reaktionsprodukterna under energiutveckling. Detta energitillskott torde inte påverka maxtrycket hos luftstövågen men kan påverka varaktigheten hos stövågen nära marken. Av figur 9 framgår hur den mot marken reflekterade stövågen sätter i gång en efterförbränning av volymen mellan laddning och mark. När avståndet till marken minskar ökar efterförbränningen på grund av den mer effektiva turbulenta omblandningen vilken skapar ett större eldklot (gäller höjder mindre än 2 m). Med laddningen liggande till hälften nergrävd i sand uppstår stor nedkylning av reaktionsprodukterna (i första hand det fasta kolet) vilket leder till att självantändning endast ofullständigt sker med luften. De svarta molnen i figur 9g och 9h, skott 6, tidpunkterna 120 ms och 160 ms, utgörs av sot (kol).

En uppskattning av maximala radien vid omsättningen av 15.5 kg TNT med luft kan utföras med datorkoden CHEETAH, ref. 4. Om 15.5 kg TNT omsätts med 23.2 kg luft av atmosfärtryck erhåller de bildade gaserna trycket 18 atm och temperaturen 3000 K. Om denna gas expanderas isentropiskt till trycket 1 atm erhålles ett klot med radien 3.3 m och gasen har då temperaturen 1700 K. Uppskattad radie stämmer relativt väl med uppmätta radier.

5. Numerisk simulering av markeffekten

I studien ”Simulering av stötvågsutbredning och strukturrepons från detonationer i luft, principstudie”, ref. 5, har Håkan Hansson studerat stötvågsutbredningen vid detonation av 48 kg hexotol/TNT på höjden 0.85 m över markplanet, med hjälp av datorkoden Autodyn. Vi har i denna studie fortsatt detta arbete där vi dels utnyttjat koden LS-Dyna, dels fortsatt med koden Autodyn.

Vid luftdetonationer uppstår stora förflyttningar av luften och spränggaserna varför fenomenet lämpligen beskrivs med rumfasta celler varvid luft och spränggaser strömmar genom cellerna, så kallade Eulerceller. I de aktuella simuleringarna försummas viskösa effekter varför strömningen längs markytan tänks ske över en glatt yta och Eulers rörelseekvationer beskriver förloppet. I verkligheten uppstår ett turbulent gränsskikt invid marken där lufthastigheten vid marken är noll och rörelseekvationerna som beskriver strömningen är Navier-Stokes ekvationer.

Vid Autodynsimuleringarna beskrivs luften med tillståndsekvationen ideal gas med gammavärdet 1.40. Vid LS-Dynasimuleringarna utnyttjades en mer noggrann tillståndsekvation med ett större giltighetsområde. Denna tillståndsekvation beskrivs i avsnitt 5.1. I avsnitt 5.2 beskrivs LS-Dynasimuleringarna och i avsnitt 5.3 beskrivs Autodynsimuleringarna.

5.1. Luftens tillståndsekvation

Vid bestämning av luftens tillståndsekvation har ref. 6-8 utnyttjats. I ref. 6 ges luftens egenskaper i intervallet

$$60 \text{ K} < T < 2000 \text{ K}$$
$$0.1 \text{ MPa} < p < 2000 \text{ MPa}$$

I ref. 7 ges luftens egenskaper i intervallet

$$6000 \text{ K} < T < 12000 \text{ K}$$
$$0.1 \text{ MPa} < p < 100 \text{ MPa}$$

I ref. 8 ges luftens Hugoniot i tryckintervallet

$$0.1 \text{ MPa} < p < 23 \text{ MPa}$$

För att komplettera luftdata har datorkoden CHEETAH utnyttjats för bestämning av (p, e, T, v) i intervallet

$$2000 \text{ K} < T < 6000 \text{ K}$$
$$0.1 \text{ MPa} < p < 100 \text{ MPa}$$

Anpassningen har gjorts till uttrycket

$$p = \sum_{i=0}^3 \left(\frac{e}{v_0} \right)^i \sum_{j=0}^2 a_{ij} \eta^j$$

där

$$\eta = \frac{\rho}{\rho_0} - 1$$

$$\rho_0 = 1/v_0 = 0.001184 \text{ g/cm}^3$$

$$a_{00} = 1.01325e-6$$

$$a_{01} = 1.0139e-6$$

$$a_{02} = -1.49406e-10$$

$$a_{10} = 0.295599$$

$$a_{11} = 0.295599$$

$$a_{12} = 0.00127742$$

$$a_{20} = -767.016$$

$$a_{21} = -638.27$$

$$a_{22} = 5.76987$$

$$a_{30} = 1.00218e6$$

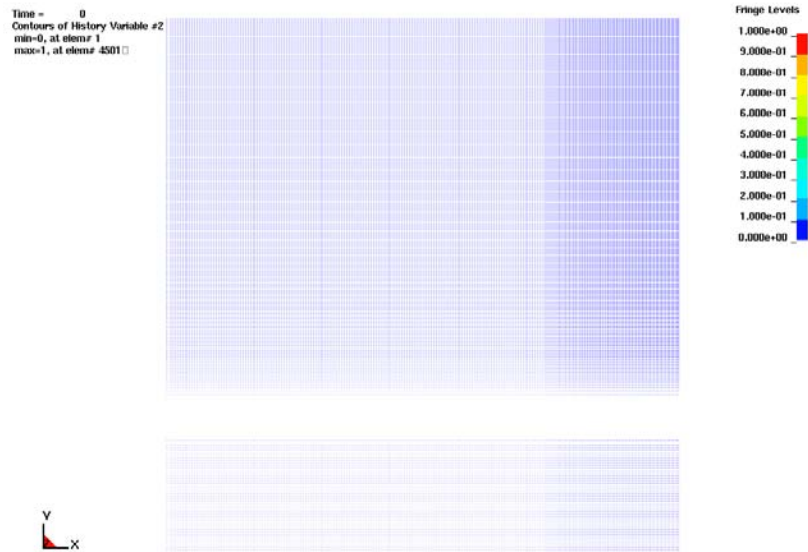
$$a_{31} = 7.86964e5$$

$$a_{32} = -11347.5$$

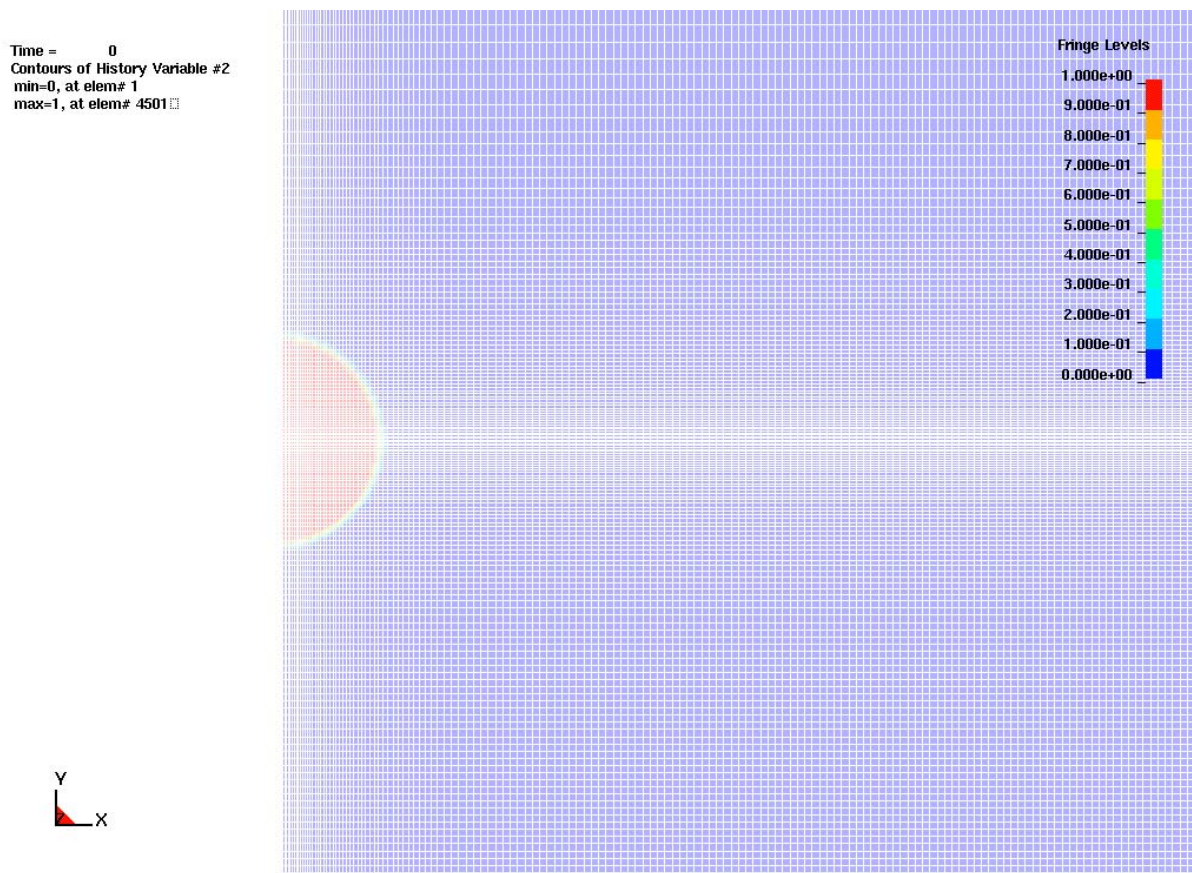
där p är i Mbar.

5.2. LS-Dynasimuleringar

Fenomenet med sfärisk laddning över plan mark har cylindersymmetri. Då LS-Dyna endast är implementerat för tredimensionella problem utnyttjar vi symmetrien genom att endast modellera en tunn sektorskiva varvid problemet blir tvådimensionellt. Detta möjliggör en finare cellindelning vilket ger högre numerisk noggrannhet. Totalt utnyttjades 96800 celler vilket ger en medelcellstorlek på ca 10 mm. Situationen framgår av nedanstående figurer 11 och 12 där vi simulerar skott 5 med den första tryckgivaren på avståndet 3.1 m.



Figur 11. Simulerat område, 4 m gånger 4 m. Den nedre kanten utgörs av marken som modelleras som stel. Den övre kanten har ett utflödesrandvillkor. På grund av den fina cellindelningen i jämnhöjd med laddningen skapas ett vitt fält i figuren vid utskriften.



Figur 12. Förstorad del av figur 11. Sprängämnet (rött) har en radie på 13 cm.

Vid simuleringen initieras det sfäriska sprängämnet TNT (15.5 kg) i dess centrum och programmerad detonation utnyttjas (detonationshastigheten konstant, oberoende av detonationsfrontens krökning). För reaktionsprodukterna utnyttjas Jones-Wilkins-Lee's (JWL) tillståndsekvation

$$p = f(v/v_0) + \omega \frac{e}{v}$$

där

$$f(x) = A \left(1 - \frac{\omega}{ax}\right) e^{-ax} + B \left(1 - \frac{\omega}{bx}\right) e^{-bx}$$

$$A = 3.712 \text{ Mbar},$$

$$B = 0.03231 \text{ Mbar},$$

$$a = 4.15,$$

$$b = 0.95,$$

$$\omega = 0.3,$$

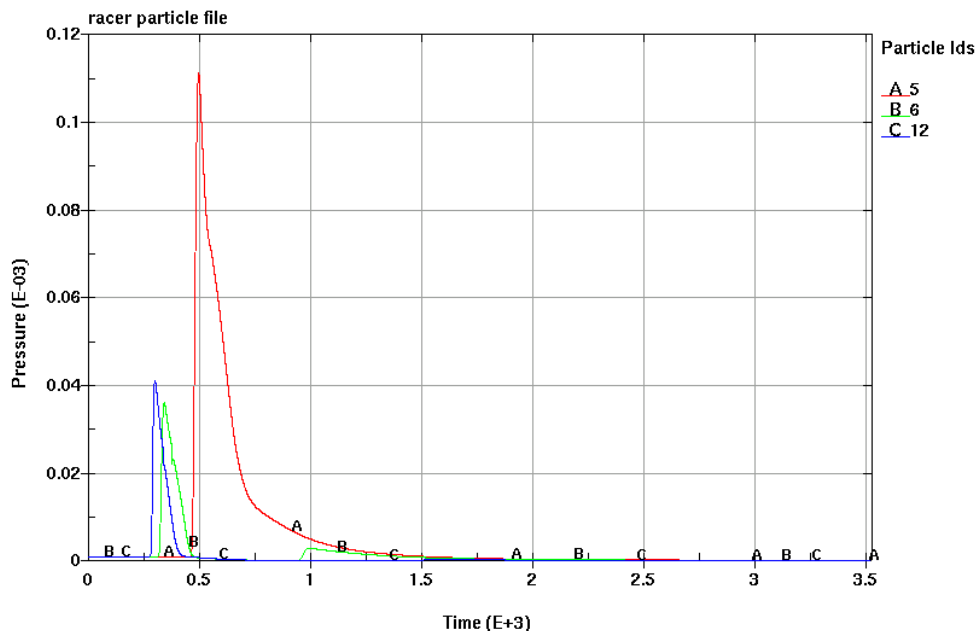
$$\rho_0 = 1/v_0 = 1.63 \text{ g/cm}^3.$$

För den programmerade detonationen gäller detonationshastigheten och detonationstrycket

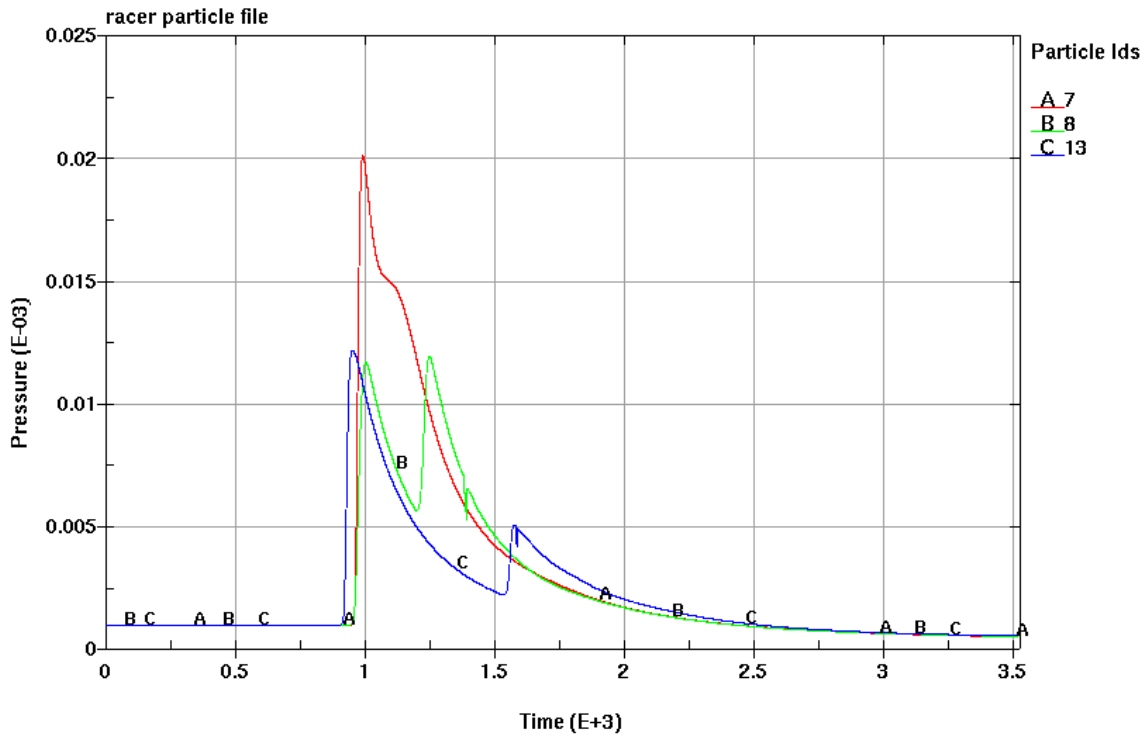
$$D = 6930 \text{ m/s},$$

$$p_{CJ} = 0.21 \text{ Mbar}$$

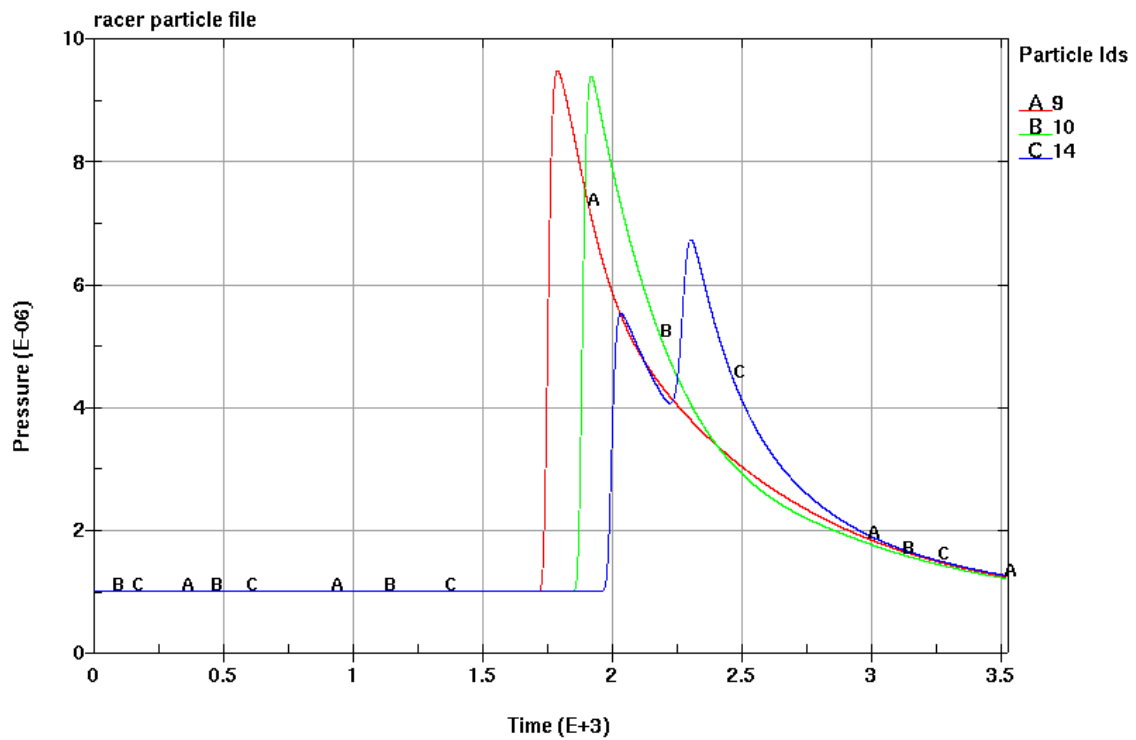
För luft utnyttjas tillståndsekvationen från avsnitt 5.1. Tryckprofilen på olika avstånd och höjd över marken framgår av nedanstående figurer 13-15. Trycket mäts i enheten Mbar och tiden i μs .



Figur 13. A5, röd: sidoavstånd 1 m, höjd 0.005 m (på marken).
 B6, grön: sidoavstånd 1 m, höjd 0.5 m.
 C12, lila: sidoavstånd 1 m, höjd 1 m

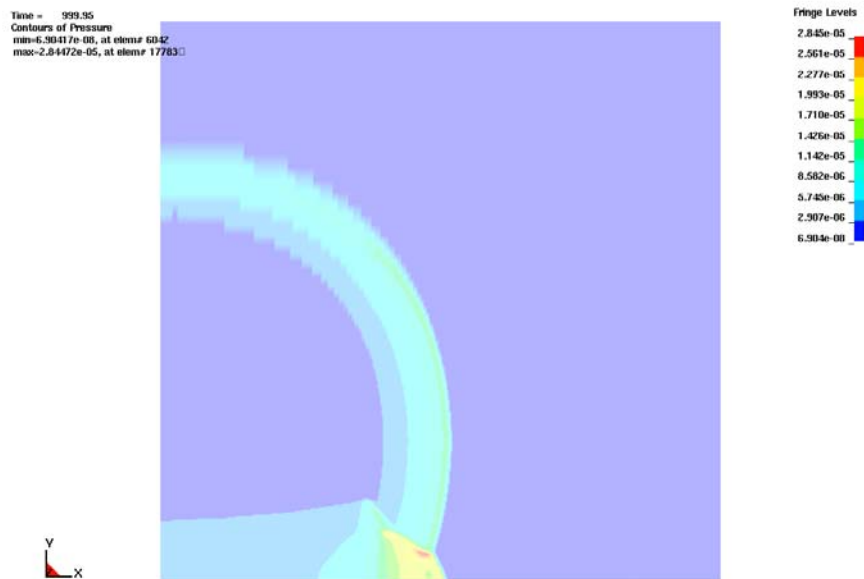


Figur 14. A7, röd: sidoavstånd 2 m, höjd 0.005 m (på marken).
 B8, grön: sidoavstånd 2 m, höjd 0.5 m.
 C13, lila: sidoavstånd 2 m, höjd 1 m

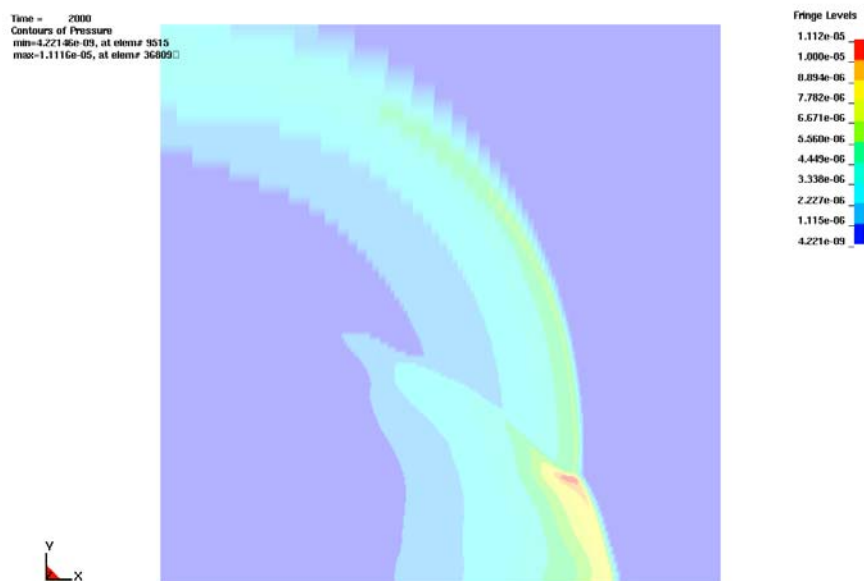


Figur 15. A9, röd: sidoavstånd 3 m, höjd 0.005 m (på marken).
 B10, grön: sidoavstånd 3 m, höjd 0.5 m.
 C14, lila: sidoavstånd 3 m, höjd 1 m

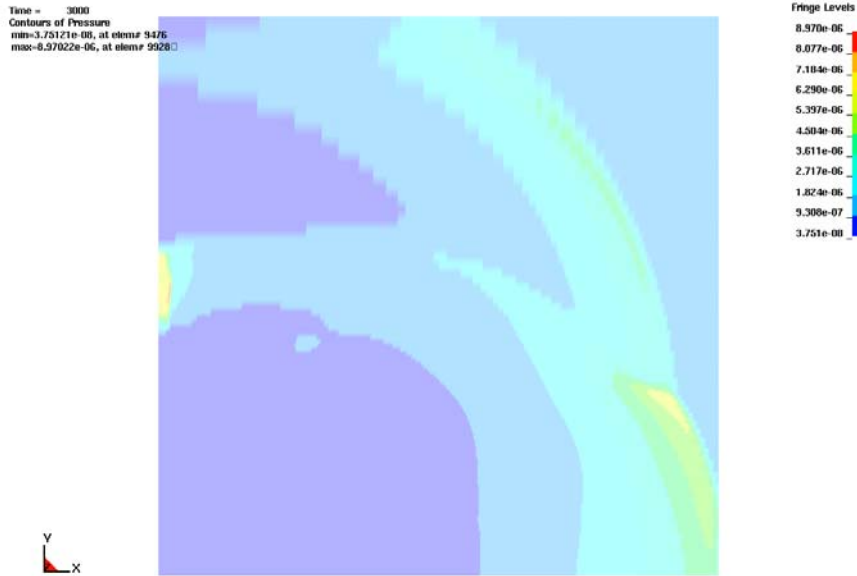
Trycket i rummet vid tre tidpunkter framgår av figurerna 16-18. Visad ruta har dimensionerna 4 m gånger 4 m. Utvecklingen av Machvågen framgår tydligt av figurerna.



Figur 16. Tidpunkt: 1 ms



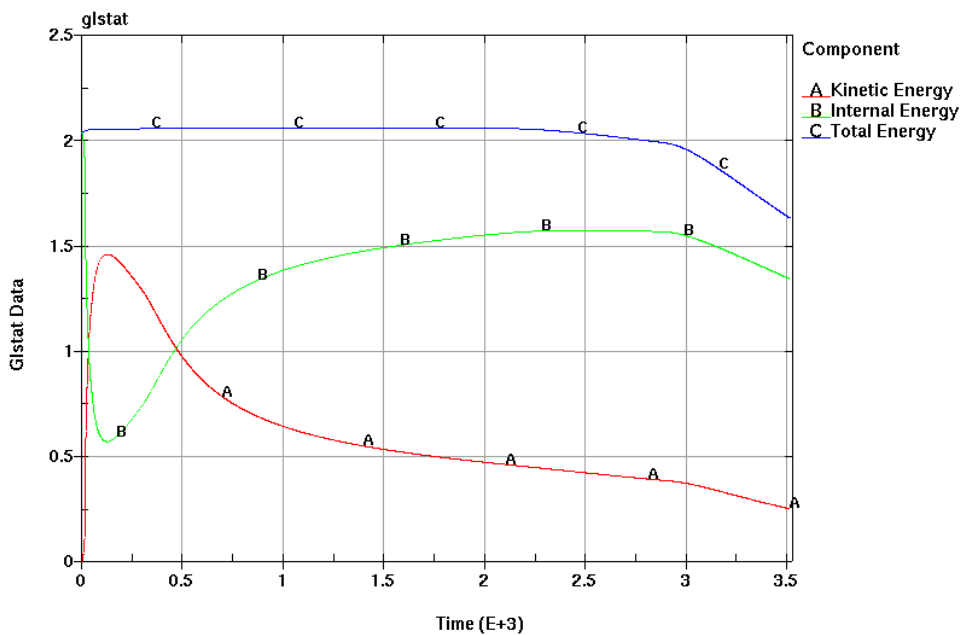
Figur 17. Tidpunkt: 2 ms



Figur 18. Tidpunkt: 3 ms

Beräknade tryck kan jämföras med uppmätta tryck på avståndet 3.1 m (tabell 1). Uppmätt maxövertryck är 9.96 bar medan beräknat maxövertryck är 8.5 bar. Varaktigheten har uppmätts till 1.76 ms medan beräkningar ger 1.8 ms. Uppmätt ankomsttid är 1.85 ms medan beräknad är 1.83 ms.

Vid de inledande simuleringarna visade det sig att energin inte bevarades. Efter korrigering i koden bevaras nu totalenergin med stor noggrannhet. I figur 19 visas summan av gasernas rörelseenergi (A), summan av gasernas inre energi (B) samt den totala energien (C). Avvikelsen efter ca 2.2 ms sammanhänger med att tryckvågen passerar randen på beräkningsnätet.



Figur 19. Energibalans vid LS-Dynasimulering

5.3. Autodynsimulering (avsnittet skrivet av Håkan Hansson)

Här har fallen laddningen (15.5 kg TNT) på 1 och 2 meters höjd simulerats. Den studerade domänen har dimensionen 3 m höjd och 8 m längd (radie) där de sista 2 m har utglesade celler. Totalt utnyttjas 2 450 000 celler (ca 26 gånger fler celler än vid LS-Dynasimuleringen).

I Autodyn är det bara i 1D- och 2D-versionerna som en lösningsalgoritm för Euler med flera material ("multimaterial Euler", i fortsättning benämnd med bara Euler) finns tillgängliga. Förutom denna algoritm finns även Euler-FCT modellen som bara kan hantera ett material, denna lösningsalgoritm finns även tillgänglig i Autodyn 3D. Simuleringarna med Autodyn 2D har genomförts med Pentium4-datorer med 2,2 GHz processorer och 1024 MB minne. Typiska beräkningstider för de rotationssymmetriska 2D-modellerna är 10 till 14 dygn.

För att spara beräkningstid används i Autodyn tekniken att överföra data mellan modeller (1D-modelldata till 2D-modelldata, 2D-modelldata till 3D-modelldata). Vid de aktuella försöken har sfäriska laddningar använts. Första steget i beräkningen är då att studera förloppet med sfäriska koordinater d v s ett endimensionellt fall. När stötvågen når fram till marken överförs 1D-modellens data till en rotationssymmetrisk 2D-modell, varefter beräkningen startas från denna tidpunkt i 2D. För fortsatta simuleringar, tex. för bestämmande av strukturrepons, är det möjligt att överföra data från en 2D-modell till en 3D-modell.

För explosivämnen under den sena expansionsfasen och för luften används materialmodellen "ideal gas". Tabell 7 nedan redovisar de använda materialparametrarna. Initialenergin motsvarar trycket 101.3 kPa för luft.

Tabell 7. Använda materialparametrar för idealgasmodell.

Parameter	Luft	TNT (expansionsfas)
Referensdensitet (g/cm ³)	1.225×10 ⁻³	1.63×10 ⁻⁴
γ	1.40	1.35
Initialenergi (kJ/kg)	206.8	Från detonationsmodell eller överföring
Initialdensitet (g/cm ³)	1.225×10 ⁻³	

I Autodyn används Jones-Wilkins-Lee's (JWL) tillståndsekvation normalt för explosivämnen (samma som vid LS-Dynasimuleringen). Denna är väletablerad för att studera verkan av explosivämnen och parametrarna för tillståndsekvationen är bestämda och redovisade för alla vanligt förekommande explosivämnen. De använda materialparametrarna för trotyl finns redovisade i tabell 8 nedan (dessa avviker något från utnyttjade parametrar vid LS-Dynasimuleringen).

Tabell 8. Materialparametrar för explosivämnen.

Parametrar	TNT
Referensdensitet (g/cm ³)	1.63
A (GPa)	374
B (GPa)	3.75
a	4.15
b	0.9
ω	0.35
C-J det. hastighet (m/s)	6930
C-J det. energi (MJ/m ³)	6000
C-J detonationstryck (GPa)	21.00

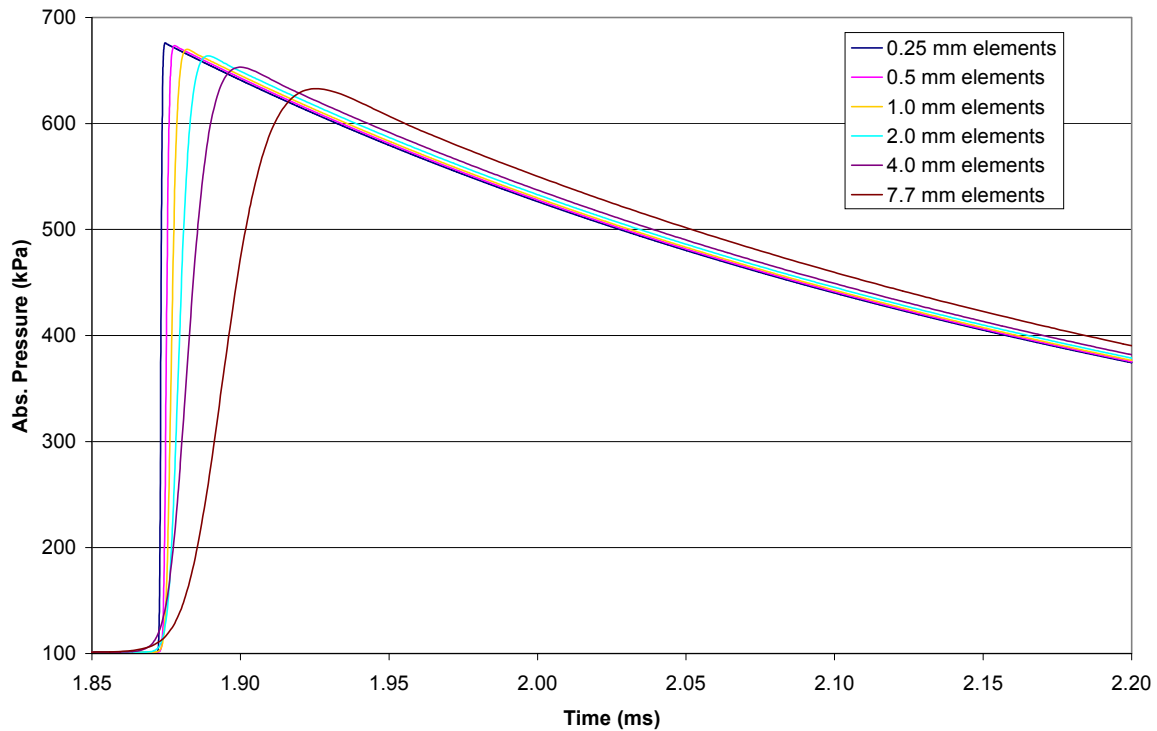
En endimensionell modell, med sfäriska koordinater, med radien 4.0 m användes för att studera sfärisk stötvågsutbredning, se figur 20. Trotylladdningens radie för alla modellerna är 131 mm. Denna geometri användes för att ge underlag för dataöverföringen till rotationssymmetriska 2D- modeller och för att studera elementberoendet, se tabell 9. Inverkan av elementstorleken på det beräknade frifältstrycket 3.0 m från laddningen är även redovisat i figur 21. Automatisk konvertering av materialmodell från JWL till idealgasmodell utnyttjades under expansionsfasen av spränggaserna för 1D-modellerna. Energibalansen för modellen med 0.5 mm element är redovisad i figur 22. För att dataöverföringen till 2D ska fungera får inte stötvågen ha nått fram till någon begränsningsyta i 2D modellen. Överföringen av data från 1D-modellen med 0.5 mm elementstorlek sker vid tidpunkterna 0.2 och 0.8 ms vid de två laddningshöjderna.



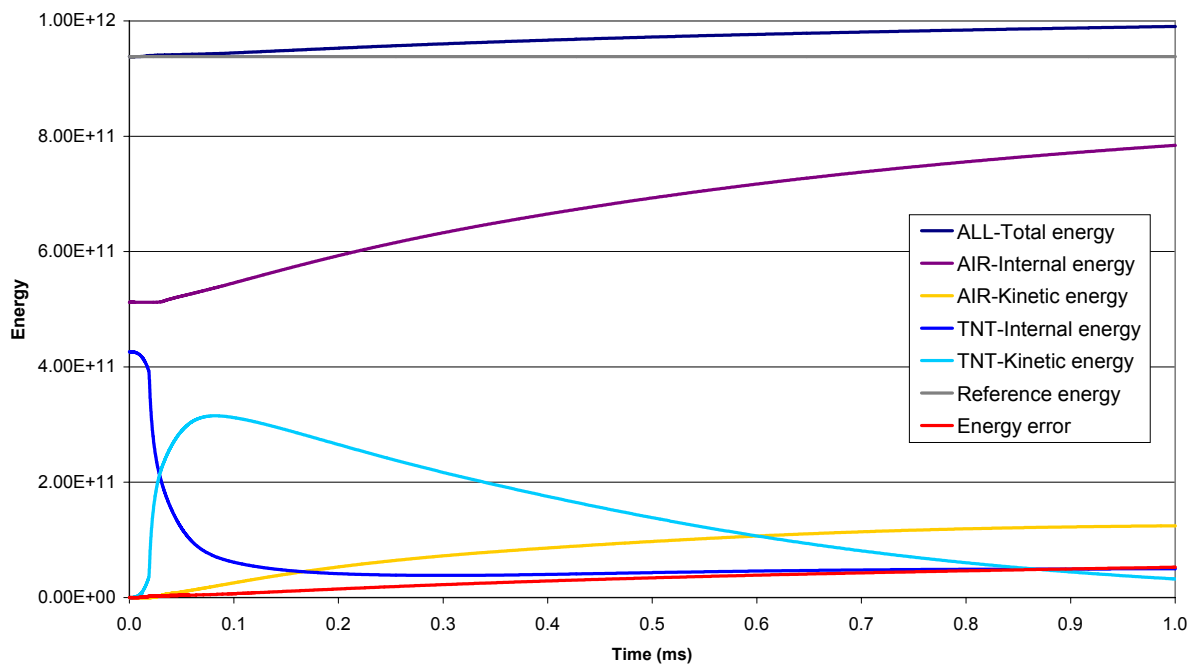
Figur 20. Principfigur med materiallokalisering av 1D-modell för detonationsberäkning.

Tabell 9. 1D-modeller med multimaterial Euler

Modellidentitet	Elementstorlek	Maximalt frifältstryck på 3.0 m avstånd
TEST09	0.25 mm	576 kPa
TEST04	0.50 mm	574 kPa
TEST05	1.0 mm	570 kPa
TEST06	2.0 mm	564 kPa
TEST07	4.0 mm	553 kPa
TEST08	7.7 mm	533 kPa

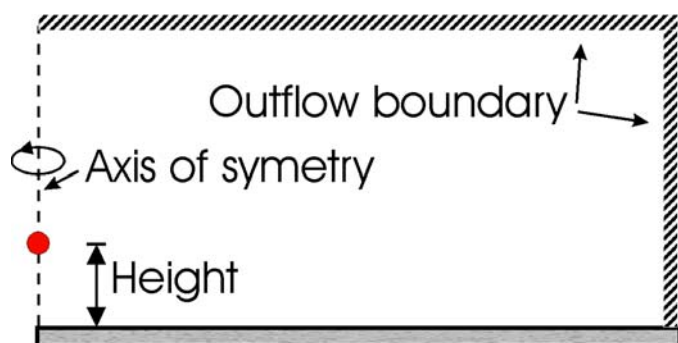


Figur 21. Elementberoendet för det beräknade trycktidförloppet 3.0 m från en 15.5 kg trotylladdning.



Figur 22. Energibalans för 1D-modell med 0.5 mm element.

Principskiss av 2D-modellen visas i figur 23. Längs kanten och uppåt finns ett utflödesrandvillkor. Detta tillåter material att försvinna från modellen när det kommer fram till modellens kant. På avstånden 3.1 m och 6.0 m registrerades reflekterat tryck i försöken.



Figur 23. Frifältsmodell med randvillkor.

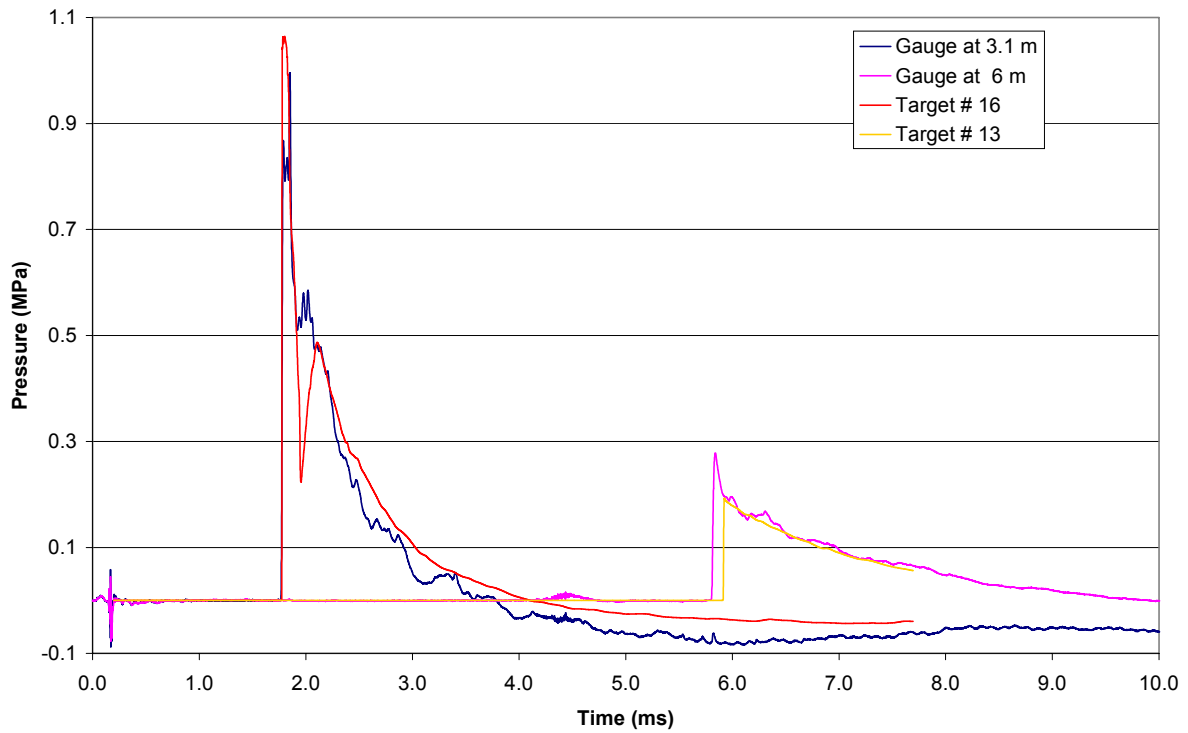
För de tvådimensionella simuleringarna användes Euler-FCT som lösningsalgoritm. För att använda denna lösningsalgoritm antas allt material vara luft vid dataöverföringen av initialtillståndet från 1D-modellen. Initialtillståndet för 2D-modellerna importerades från 1D-lösningen med 0.5 mm element vid tidpunkterna 0.2 respektive 0.8 ms, för laddningshöjderna 1 respektive 2 m. Modellerna är redovisade i tabell 10 nedan.

Tabell 10. 2D-modeller med Euler-FCT

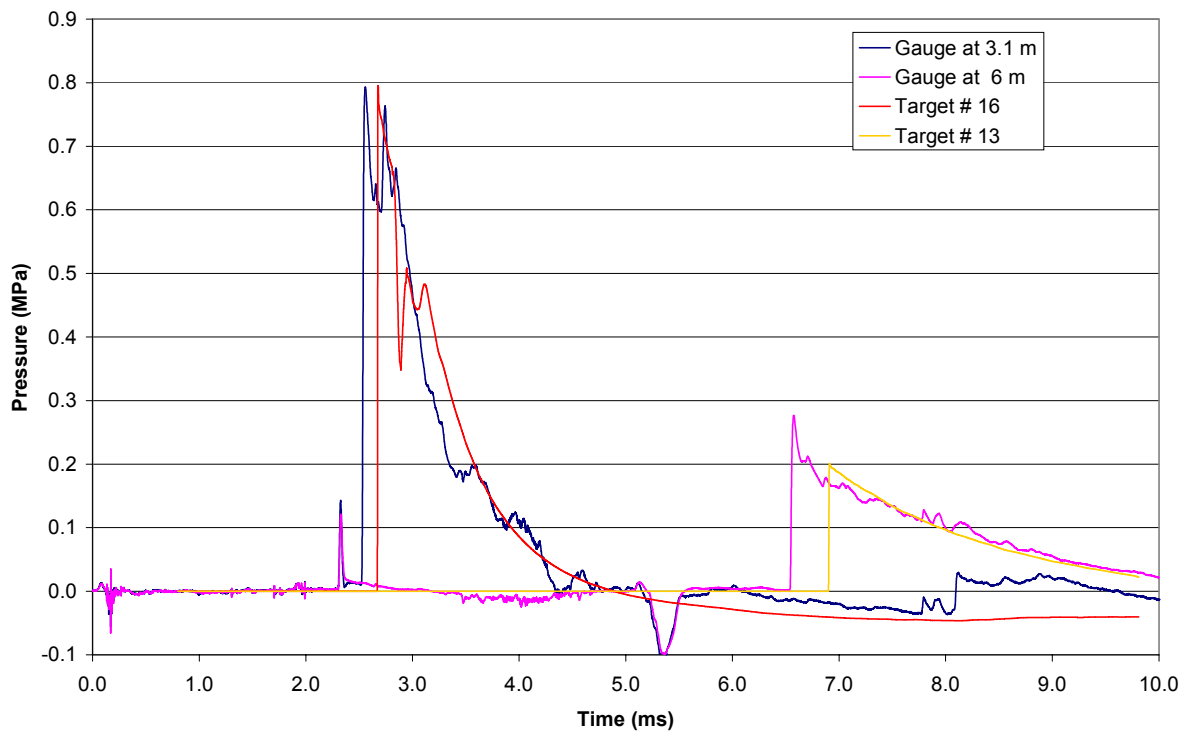
Modellidentitet	AIR101	AIR201
Modellstorlek (höjd×radie)	3 m × 8 m	
Antal element (höjd×radie)	700×3500	
Totalt antal element	2450 000	
Elementstorlek på höjden	2 mm upp till 0.5 m och där över graderat elementnät från 2 mm till 12 mm	
Radiell elementstorlek	2 mm ut till 6.0 m och där efter graderat elementnät från 2 mm till 7 mm	
Laddningshöjd	1.0 m	2.0 m
”Remapp” från 1D-modell vid tiden	0.2 ms	0.8 ms
Energifel för 1D.modell vid ”remap”	1.6%	5.0%
Maximalt tryck vid 3.1 m (Target #16)	1063 kPa	794 kPa
Maximalt tryck vid 6.0 m (Target #13)	193 kPa	201 kPa
Energifel för 2D-modell vid 8 ms	-2.6%*	-0.2%*

*: Energifel vid “remap” av data är ej inkluderat i redovisat värde.

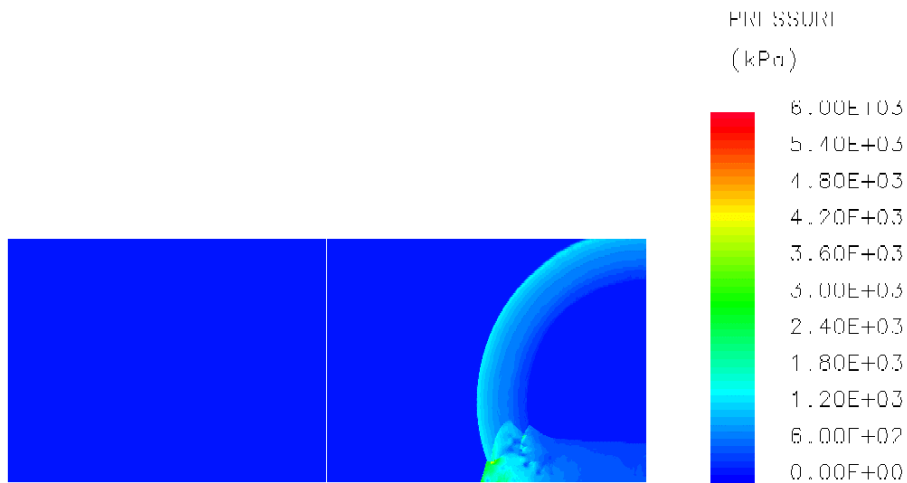
Nedan redovisas jämförelse mellan uppmätta tryck (gauges) och beräknade tryck (targets), för de två beaktade fallen, i figur 24 och 25. Dessutom visas tryckkonturer vid 1, 2 och 4 ms för simuleringarna i figur 26 till 31. Energibalansen för modellen med laddningshöjden 1 m redovisas i figur 32.



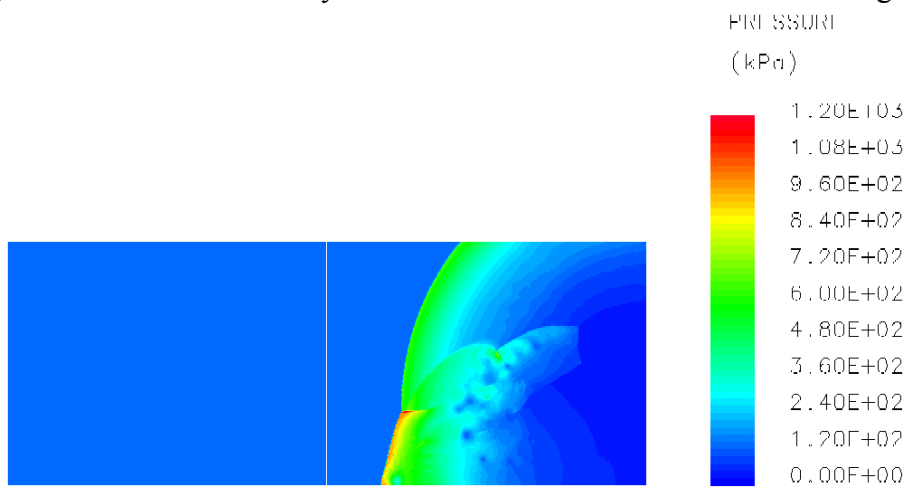
Figur 24. Registrerade och beräknade trycktidförloppet på avstånden 3.1 m och 6.0 m för en laddning på höjden 1.0 m.



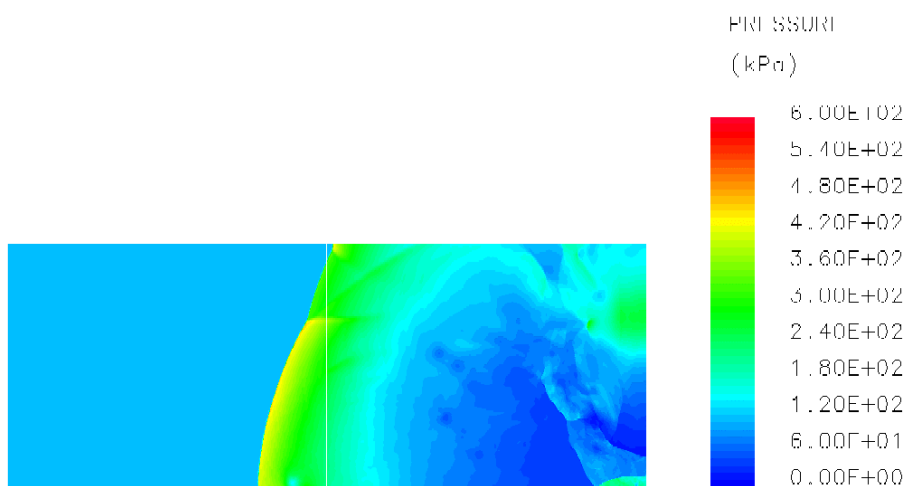
Figur 25. Registrerade och beräknade trycktidförloppet på avstånden 3.1 m och 6.0 m för en laddning på höjden 2.0 m.



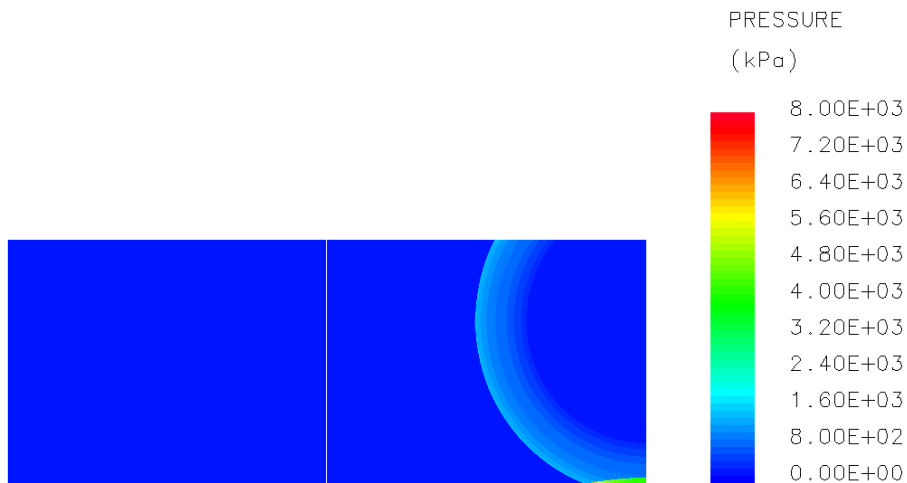
Figur 26. Beräknat absoluttryck 1 ms efter detonation för 1.0 m laddningshöjd.



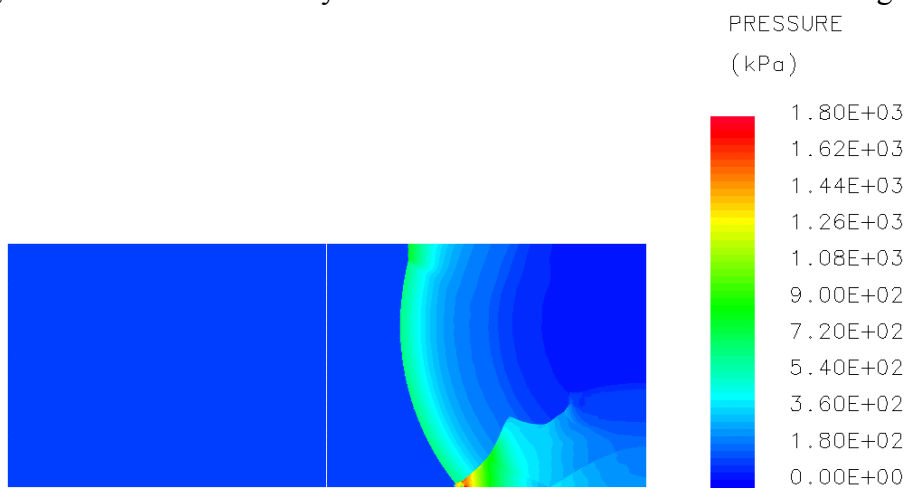
Figur 27. Beräknat absoluttryck 2 ms efter detonation för 1.0 m laddningshöjd.



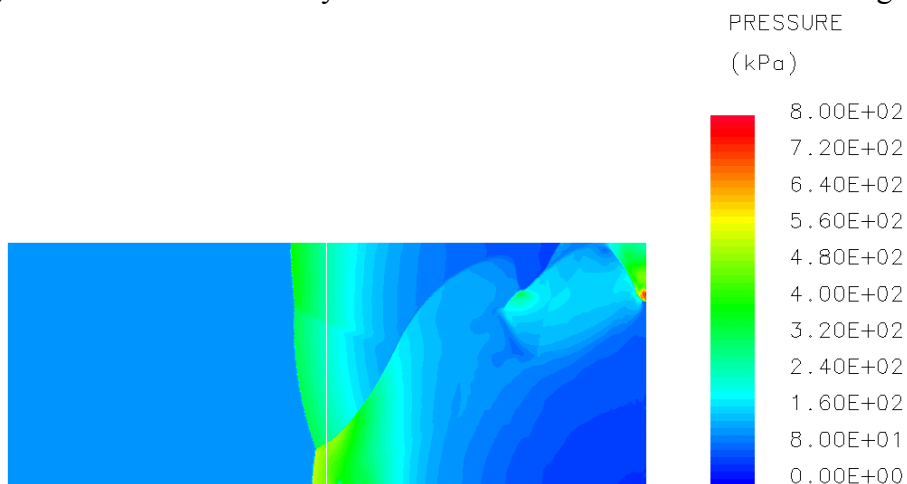
Figur 28. Beräknat absoluttryck 4 ms efter detonation för 1.0 m laddningshöjd.



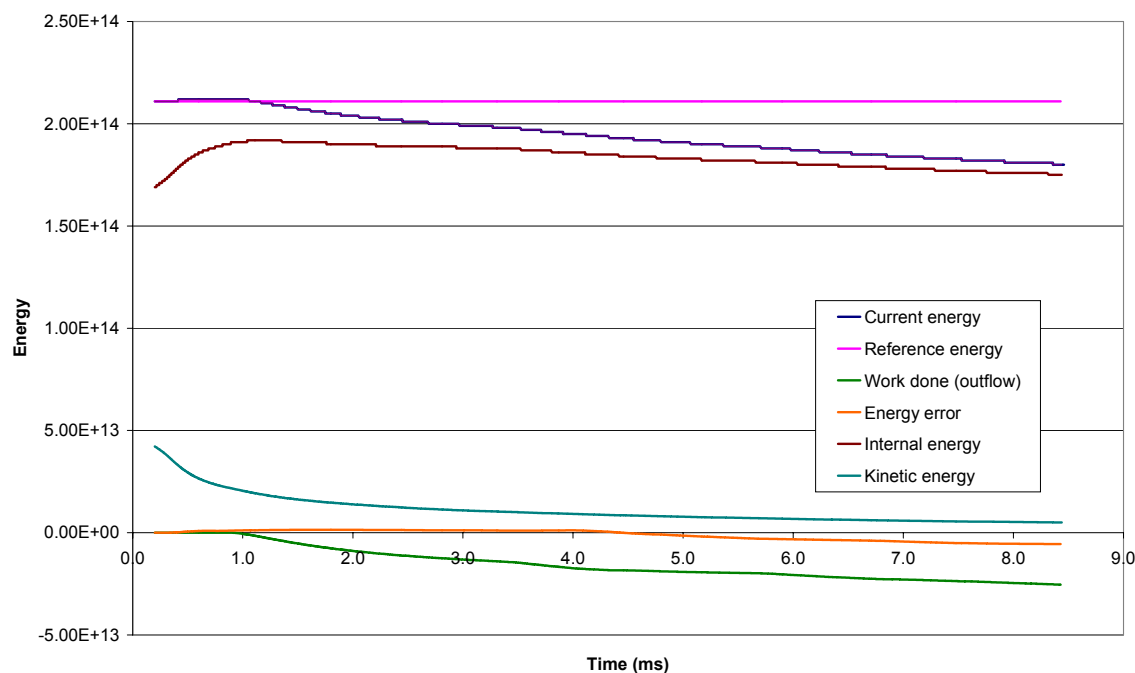
Figur 29. Beräknat absoluttryck 1 ms efter detonation för 2.0 m laddningshöjd.



Figur 30. Beräknat absoluttryck 2 ms efter detonation för 2.0 m laddningshöjd.



Figur 31. Beräknat absoluttryck 4 ms efter detonation för 2.0 m laddningshöjd.



Figur 32. Energibalans för 2D-modell med laddningen 1.0 m över marken.

Bedömning av metod och begränsningar

Metoden som används i Autodyn för att överföra data från 1D-modeller till 2D-modeller, respektive 2D- till 3D-modeller har visat sig vara bra för att reducera beräkningstiderna. Vid simuleringar har tryck och impulser från stötvågen kunnat beräknas med relativt god överensstämmelse relativt nära en detonerande laddning. Överensstämmelsen mellan beräknat och uppmätt tryck minskar dock på längre avstånd. En bidragande orsak till detta är antagligen att den använda elementstorleken är för stor för att det ska vara möjligt att simulera reflektionsfenomenet längs med markytan.

Val av materialparametrar och materialmodeller kräver också fortsatta studier, liksom val av lösnings- och transportalgoritmer för modellerna. Tillståndsekvation och materialparametrar för luft behöver även diskuteras närmare för modeller som resulterar i relativt sett låga tryck.

Som förväntat visade det sig att beräknat trycktidförlopp påverkas av den valda elementstorleken. Framst gäller detta värdet på maximalt tryck som är kraftigt elementberoende. Fortsatta systematiska studier inom detta område är nödvändiga, dock är till och med 2D-modeller mycket beräkningskrävande vid realistiska geometrier och användande av lämplig elementstorlek.

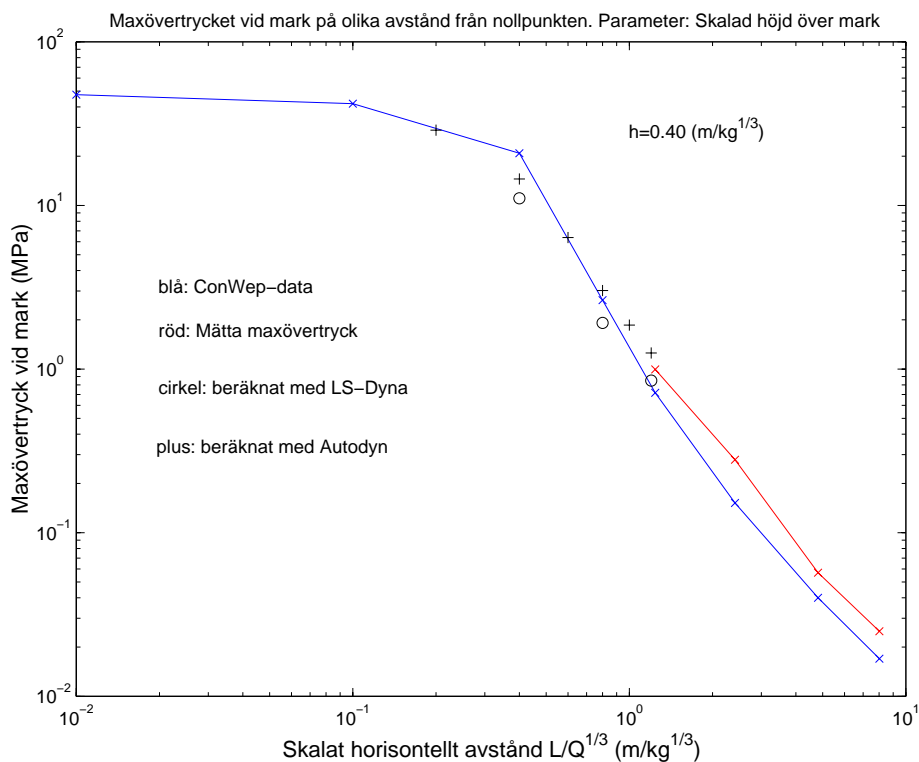
Utflödesrandvillkoret i Autodyn visade sig vid simuleringarna påverka tryckförloppet nära randen på ett icke fysikaliskt sätt. Speciellt gäller detta stötvågor med sneda infallsvinklar mot randen. På grund av detta behöver modellerna ta hänsyn till ett större område än den volym som anses vara av intresse vid modelleringen. Inverkan av den beaktade volymen för modellerna och använda randvillkor behöver studeras vid framtida simuleringar.

Inverkan av markmaterialens egenskaper och geometri behöver ytterligare studeras, både experimentellt och med simuleringar, för att bestämma påverkan från dessa faktorer. Vid

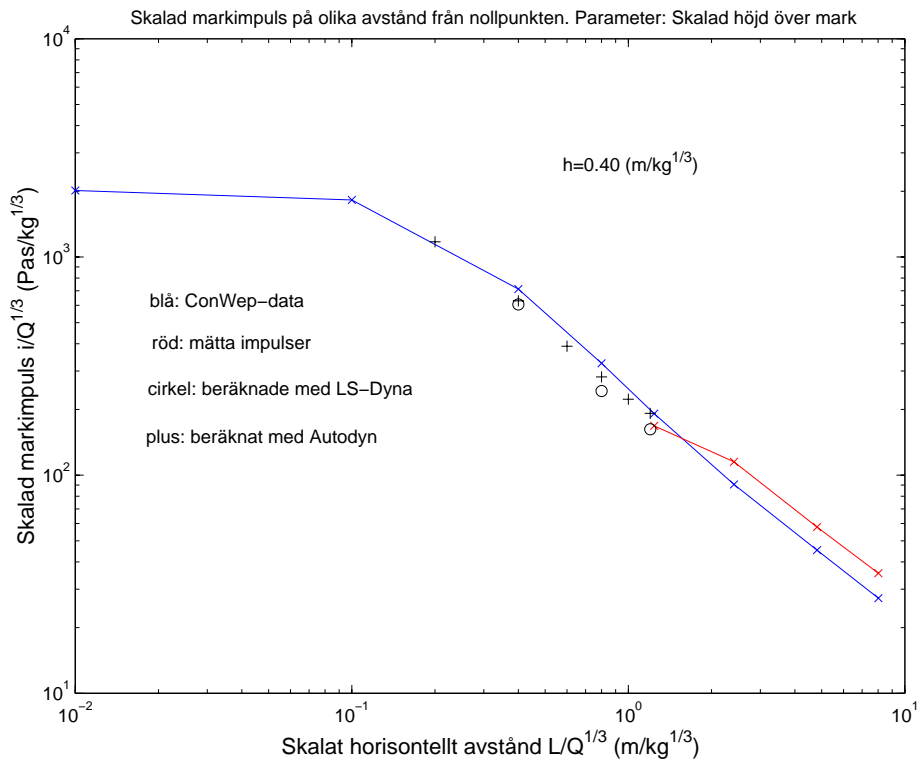
aktuella numeriska simuleringar är underlagt en perfekt reflekterande yta, medan det i det verkliga fallet förloras energi tex. via stötvågstransmission och kraterbildning (gäller korta avstånd till marken).

6. Diskussion och sammanfattning

Genom att mäta marktrycket vid 4 avstånd från nollpunkten och vid 6 laddningshöjder över marken har kurvor för maxövertrycket vid marken och skalade markimpulser, som funktion av skalat sidoavstånd och skalad höjd, tagits fram, figurerna 5 och 6. Av figurerna framgår att det skulle vara önskvärt att även mäta trycket vid ett sidoavstånd på 0.5 m, 1 m och 2 m för att bättre bestämma kurvformen. Om vi, vid skott 5, utnyttjar oss av de beräknade maxövertrycken och markimpulserna (för sidoavstånden 1 m, 2 m och 3 m vid LS-Dynasimuleringen och för sidoavstånden 0.5 m, 1 m, 1.5 m, 2 m, 2.5 m och 3 m vid Autodysimuleringen) erhåller vi sambanden för maxövertrycket och markimpulsen vid skalad laddningshöjden på 0.4 (verklig höjd 1 m) enligt figurerna 20 och 21. Beräknade värden från LS-Dynasimuleringen är markerade med ringar medan värden från Autodysimuleringen är markerade med plustecken. I figurerna har även maxövertryck och impulser vid marken, erhållna från databasen ”ConWep”, lagts in. Här har ofiltrerade mätvärden utnyttjats.



Figur 20. Maxövertryck vid mark



Figur 21. Markimpuls

För skalade sidoavstånd större än 2 ger mätningarna högre värden än ”ConWep”. Orsaken till detta är inte klarlagd.

Beräknade maxövertryck och impulser från LS-Dynasimuleringar är lägre än ”ConWep”-data medan Autodysimuleringen ger värden nära ”ConWep”-data. Studien visar att cellstorleken 10 mm är för stor vid LS-Dynasimuleringen. Med tillräckligt små luftceller (2 mm) ger Autodysimuleringar en god beskrivning av fenomen. En ytterligare förbättring av överensstämmelsen mellan experimentella mätningar och simuleringar kan erhållas genom att optimera materialparametrarna i programmet. För att utföra denna optimering krävs ett större antal experimentella data från försök med detonation av sfäriska laddningar över plan och hård yta. Vid sådana inledande försök skall ytan utgöras av grov (30 mm) stålplåt. När luft- och sprängämnesparametrar har optimerats kan annat markmaterial studeras. De experimentella data som erhållits vid denna studie är inte av tillräckligt hög kvalitet för att möjliggöra denna optimering.

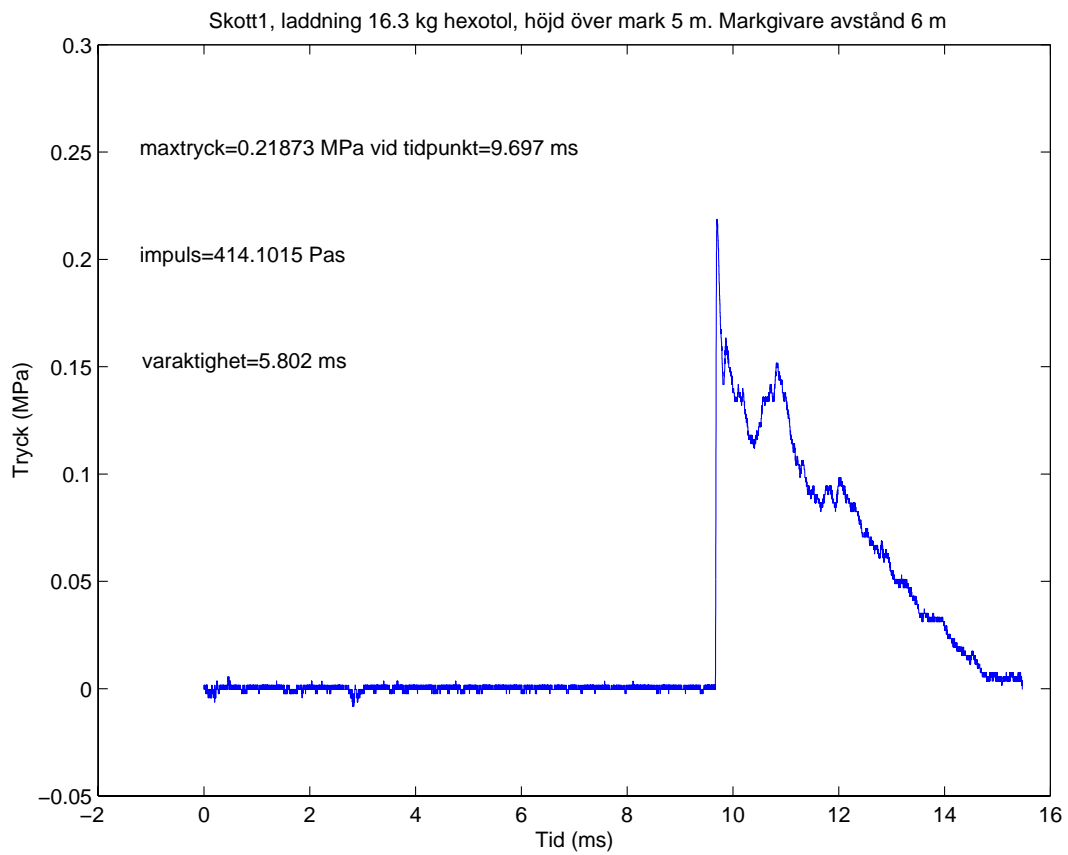
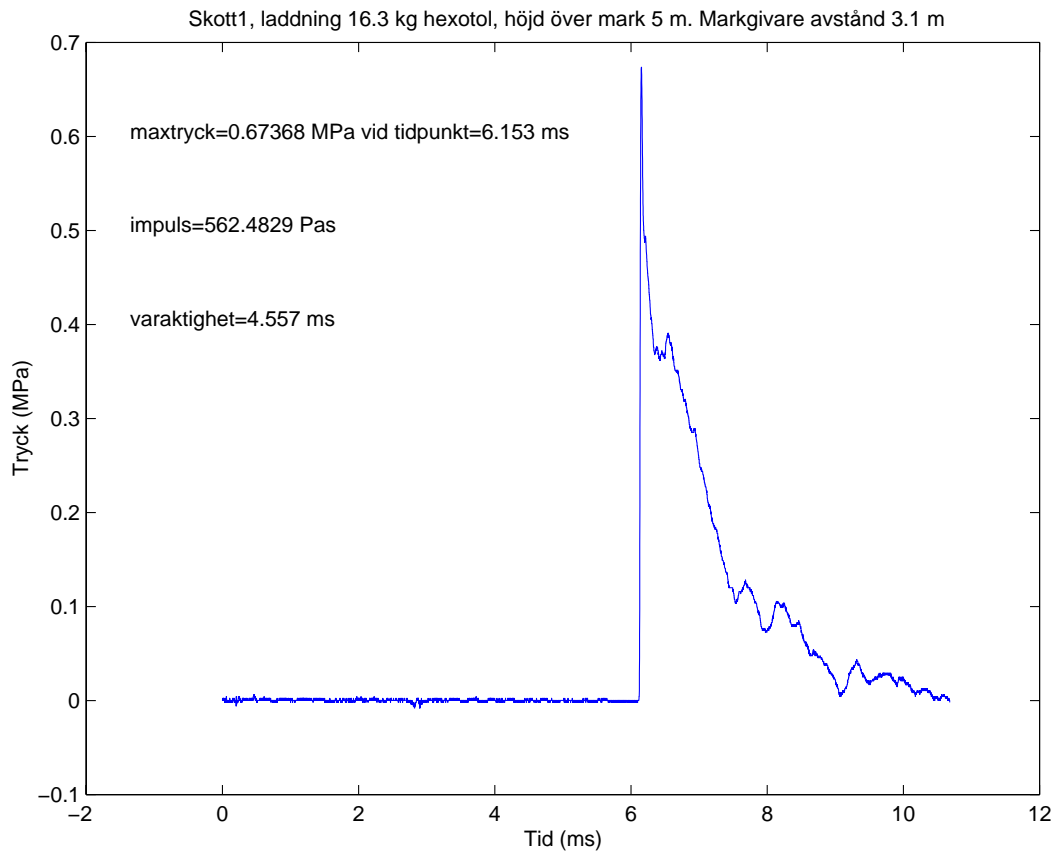
LS-Dyna och Autodyn kan inte beskriva efterförbränningen med luft varför den senare fasen av förloppet (eldklotsutvecklingen) inte kan modelleras. En kod som har potential att hantera dessa fenomen med turbulent gränsskikt vid marken och turbulent förbränning av reaktionsprodukterna med luft är datorprogrammet FOAM, ref. 9.

En grov bild av eldklotets utveckling har erhållits med videoupptagningen, bilaga C. Från registreringen kan vi konstatera att bildhastigheter 25 bilder/s var för låg. Filmhastigheten borde ha varit högre (tex. 400 bilder/s).

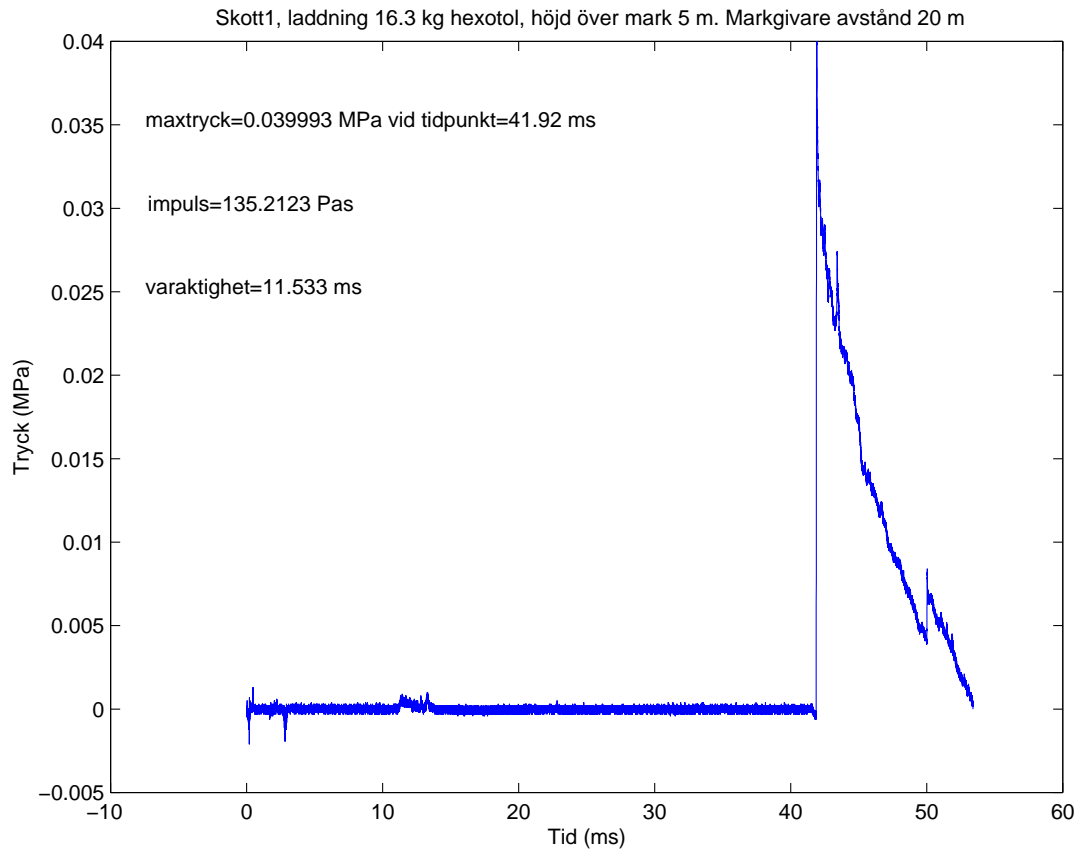
Referenser

1. Elfving C., ”Effekt av spegling”, FOA-R—95-00135-6(2.6)—SE, Maj 1995.
2. Fortifikationshandboken, del 2, FortH 2, Försvarets bok- och blankettförråd, 1991.
3. ”Fundamentals of Protective Design for Conventional Weapons, ConWep”, TM 5-855-1.
4. Laurence E.F., *Cheetah 1.39 User's Manual*, Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, CA 94550, UCRL-MA-117541 Rev. 3, 1996.
5. Hansson H., ”Simulering av stötvågsutbredning och strukturrepons från detonationer i luft, principstudie”, FOA-R—00-01637-311—SE, December 2000.
6. Panasiti M.D., Lemmon E.W., Penoncello S.G., Jacobsen R.T. and Friend D.G., ”Thermodynamic properties of air from 60 to 2000 K at pressures up to 2000 Mpa”, *Int. J. Thermophys.*, Vol. 20, No. 1, 1999.
7. Predvoditelev A.S., Stupochenko E.V., Samuilov E.V., Stakhanov I.P., Pleshanov A.S., Rozhdestvenskii I.B., *Tables of Thermodynamic functions of air for the temperature range 6000 – 12000 K and pressure range 0.001-1000 atm.*, Infosearch limited, London, 1957.
8. Deal W.E., ”Shock Hugoniot of air”, *J. Appl. Phys.*, **28**, 782 (1957).
9. Weller H.G., Tabor G., Jasak H. And Fureby C., ”A tensorial approach to computational continuum mechanics using object-oriented techniques” *Computers in Physics*, vol. 12, no. 6 nov/dec 1998.

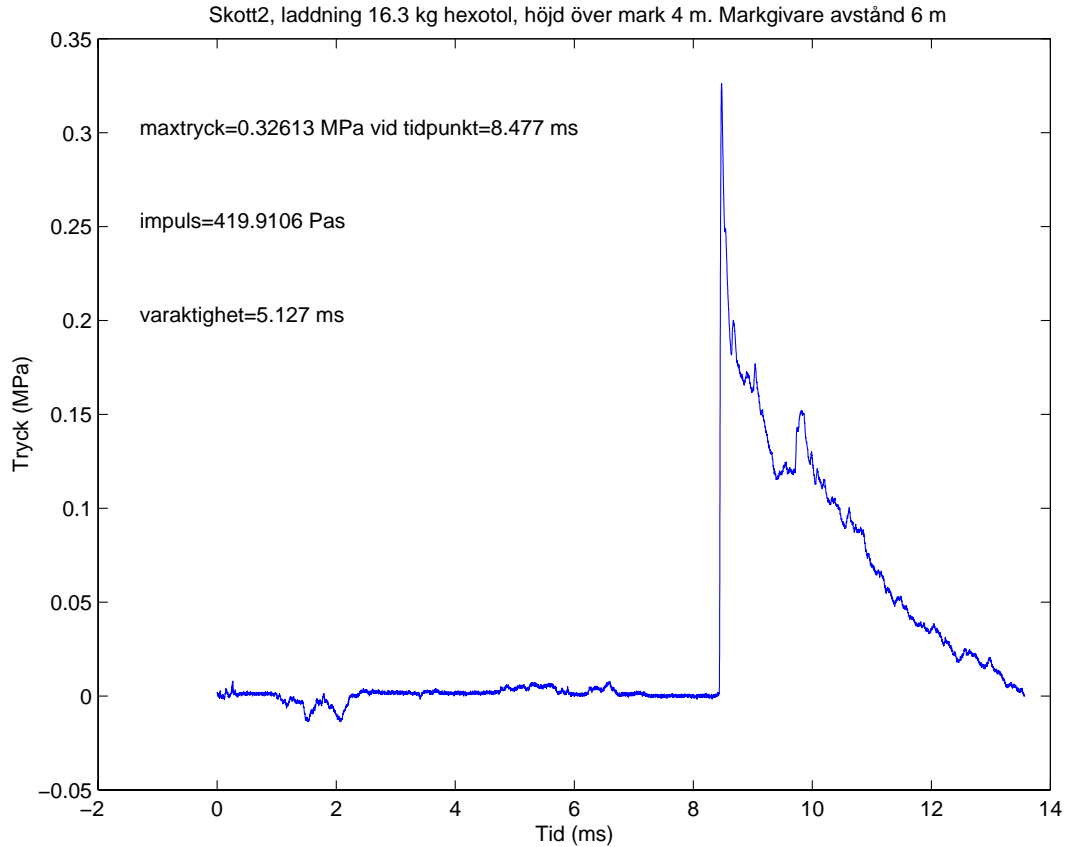
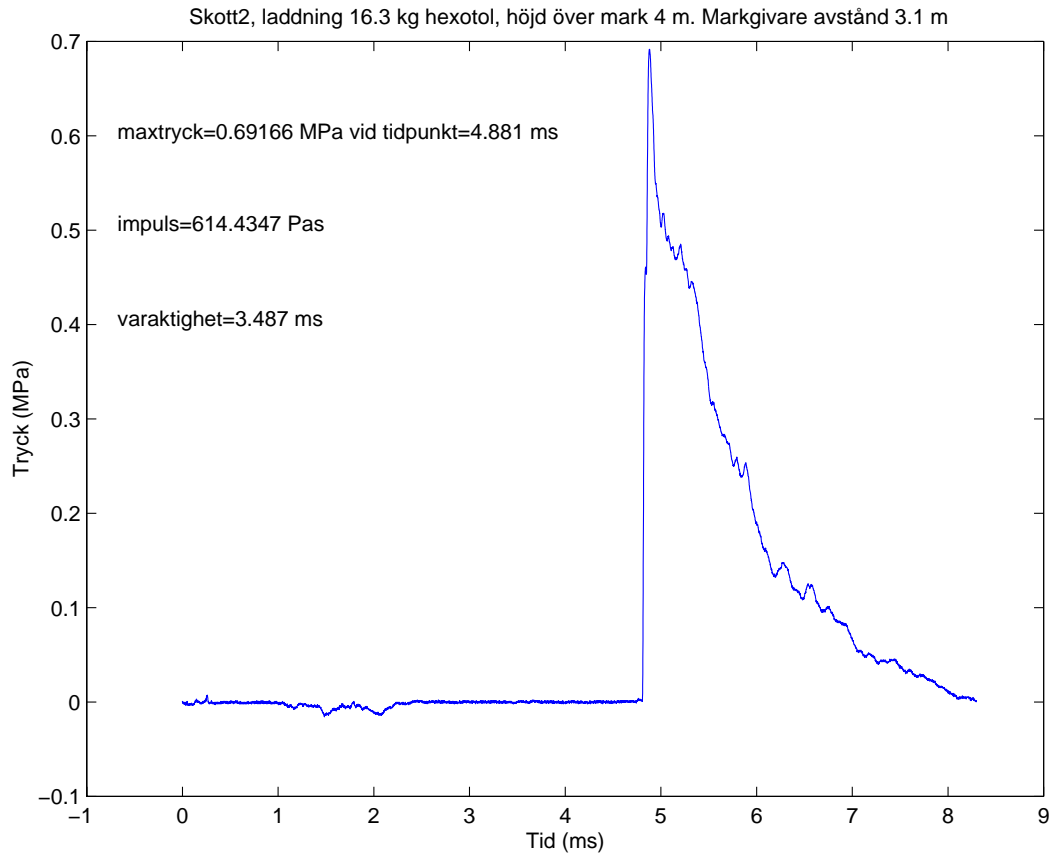
Bilaga A1



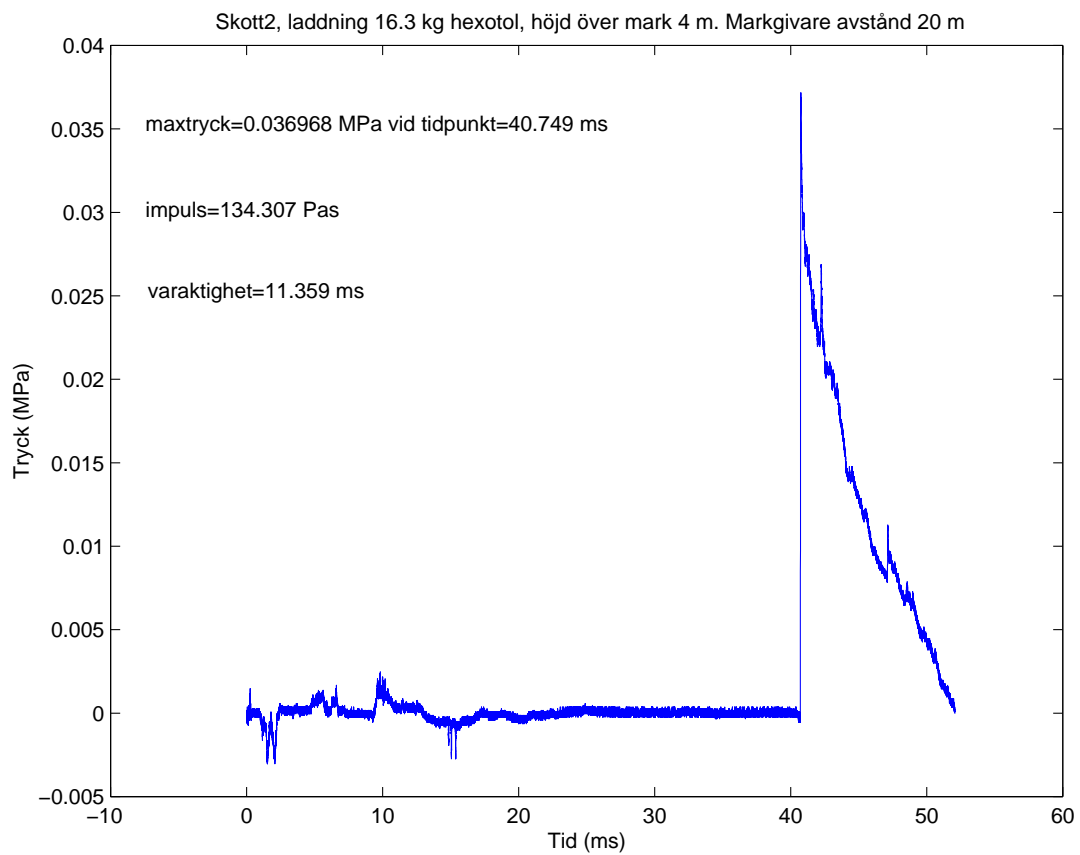
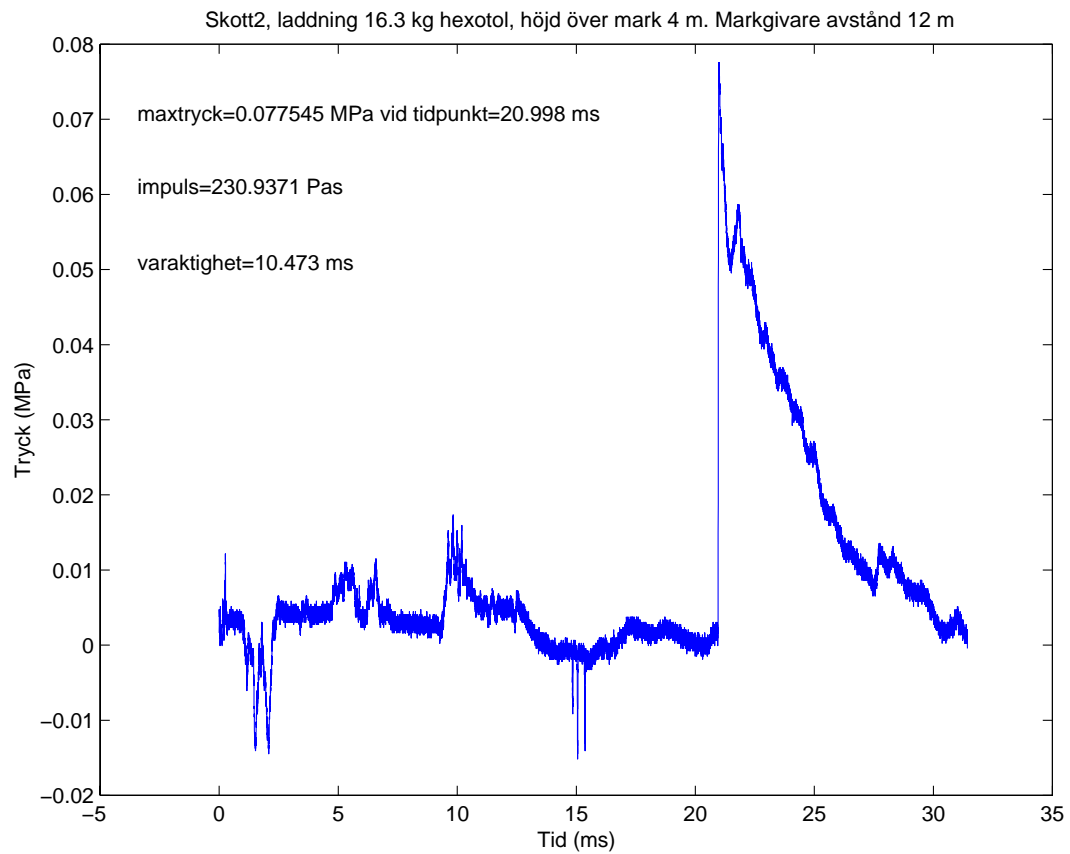
Bilaga A1



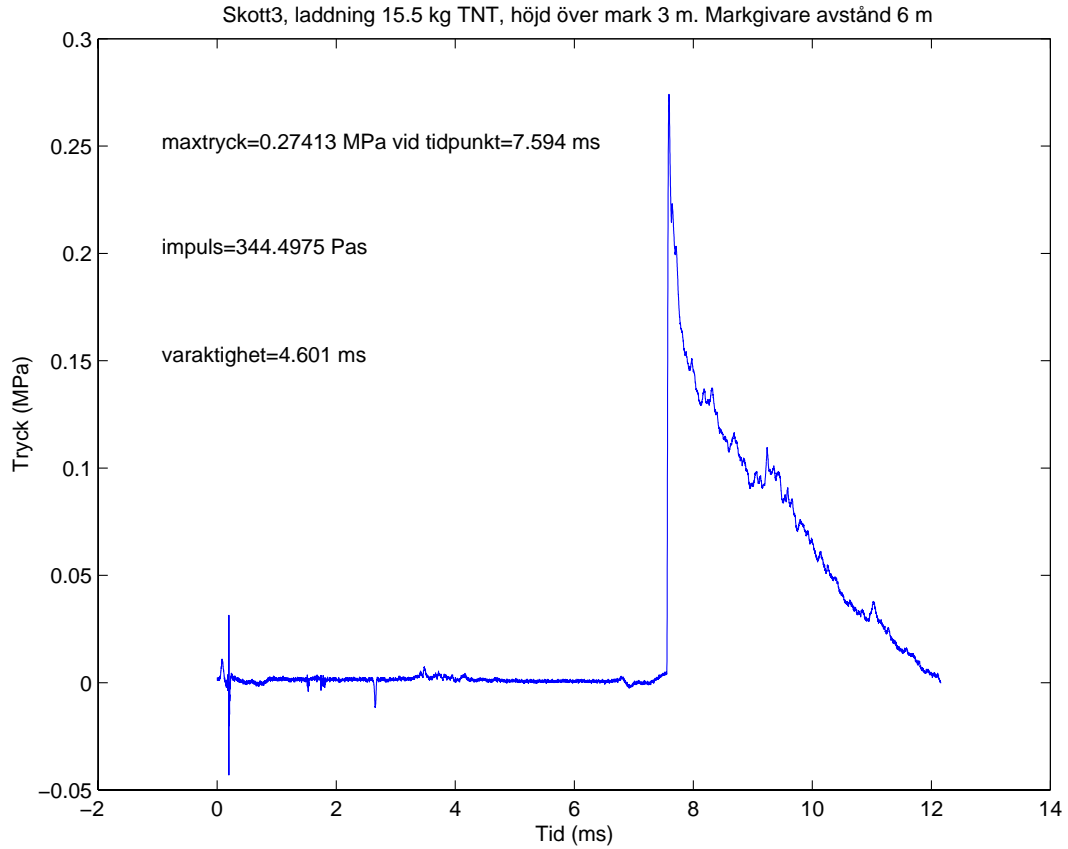
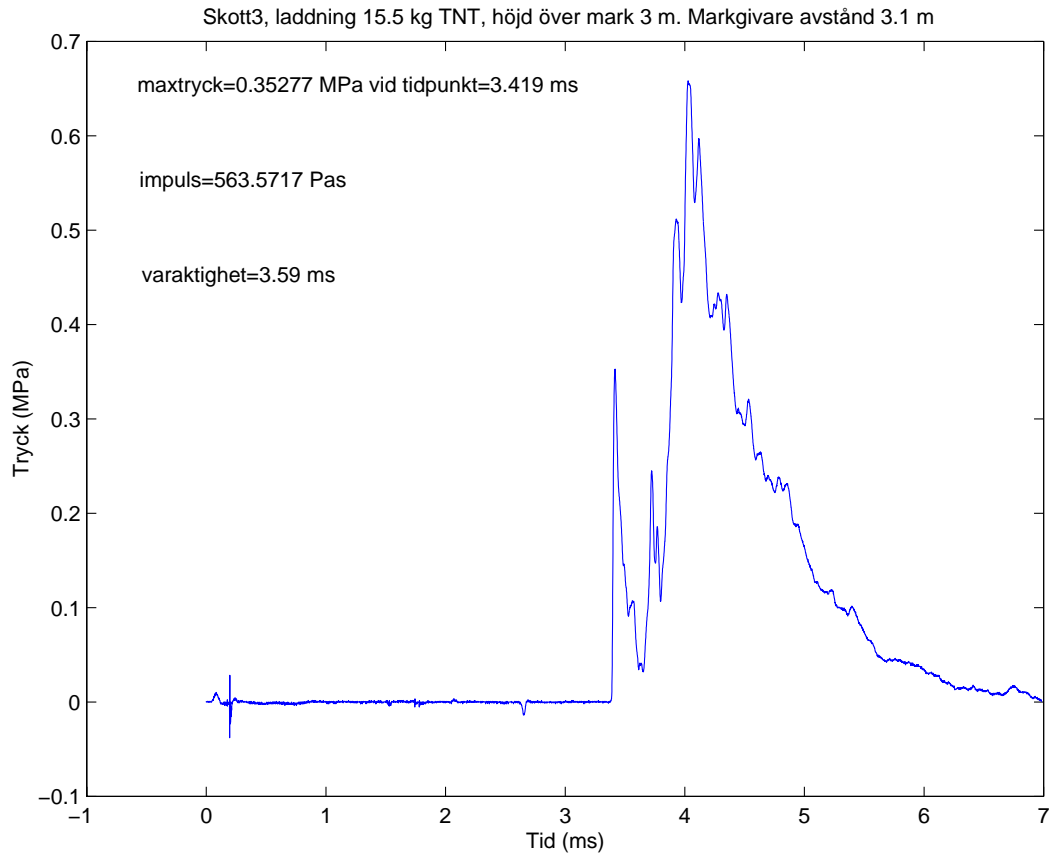
Bilaga A2



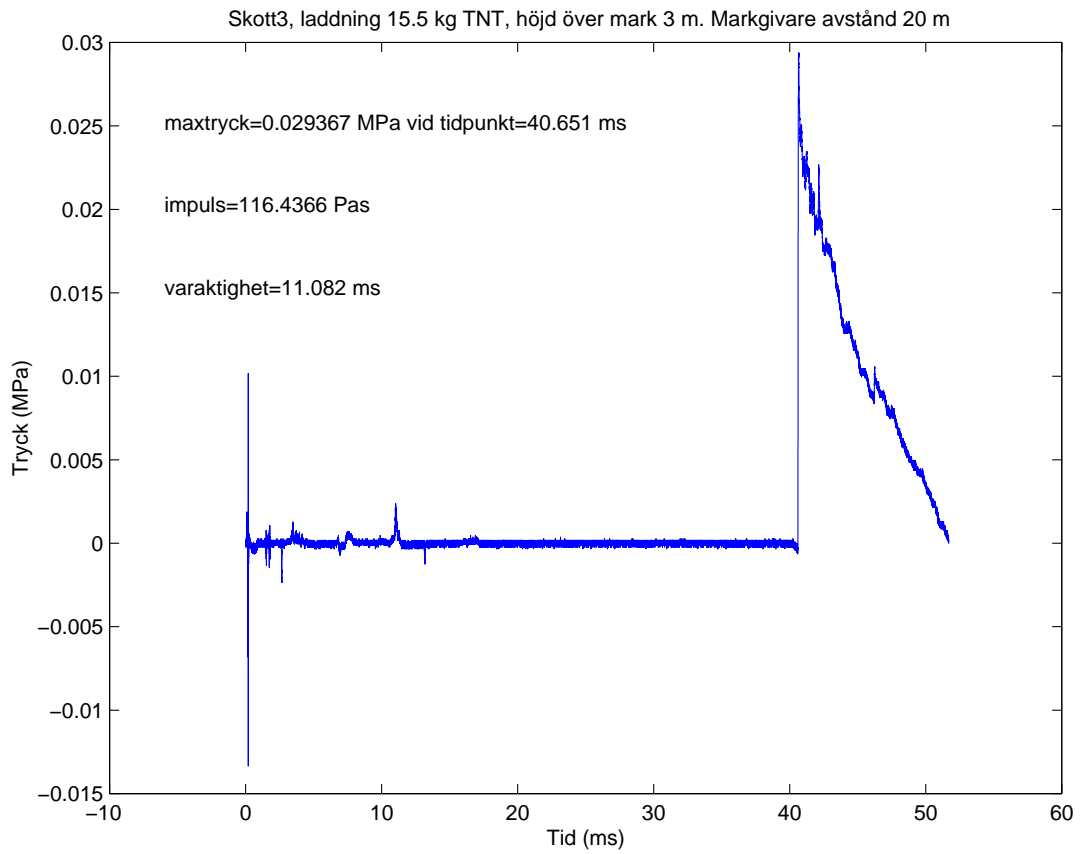
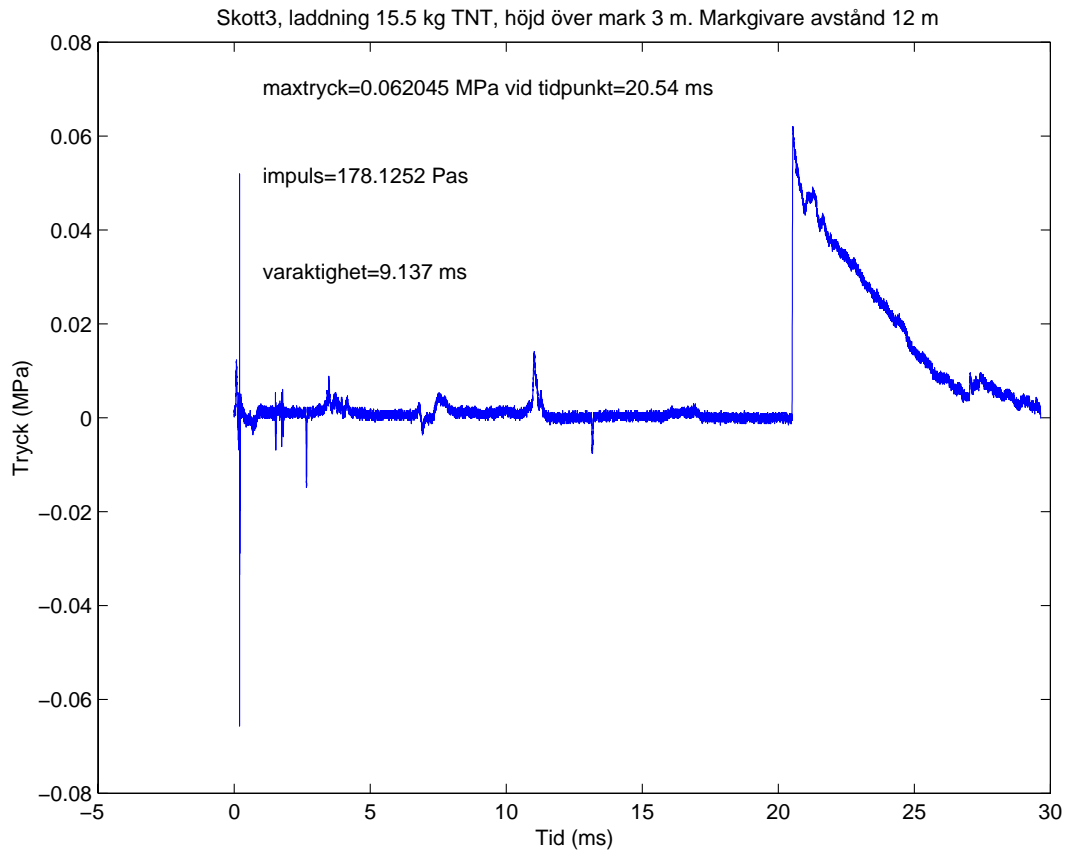
Bilaga A2



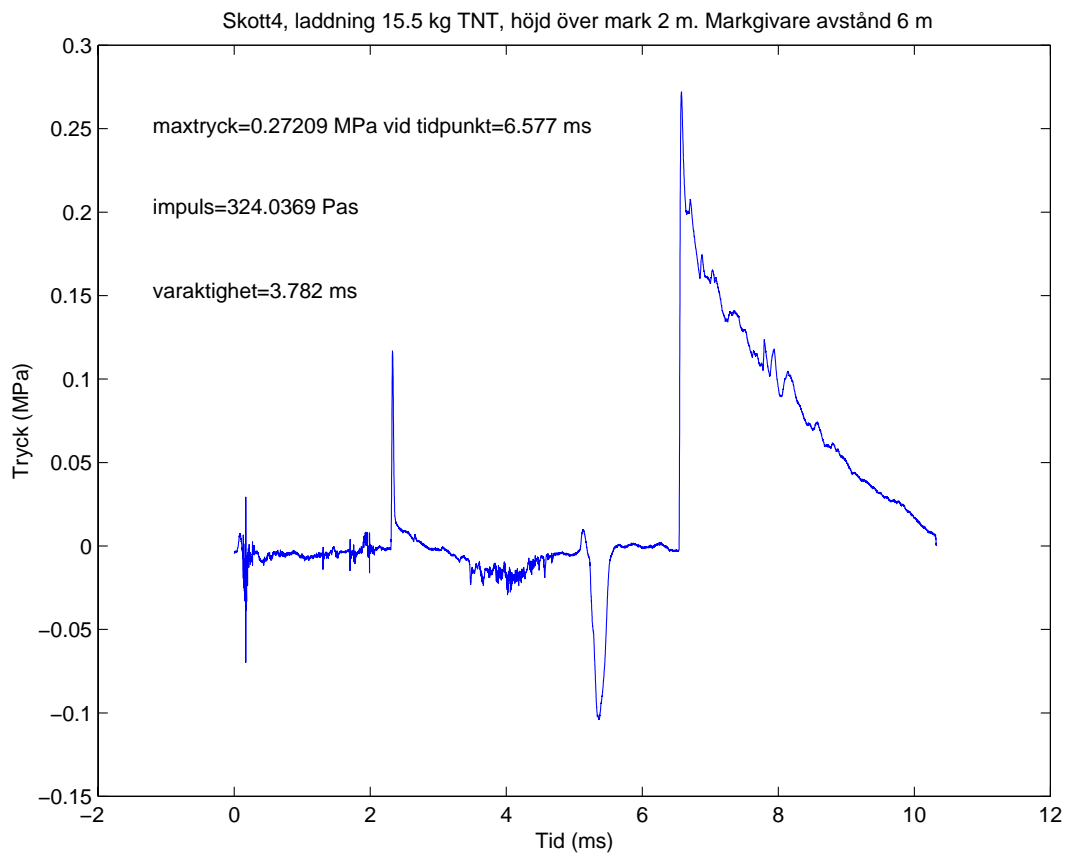
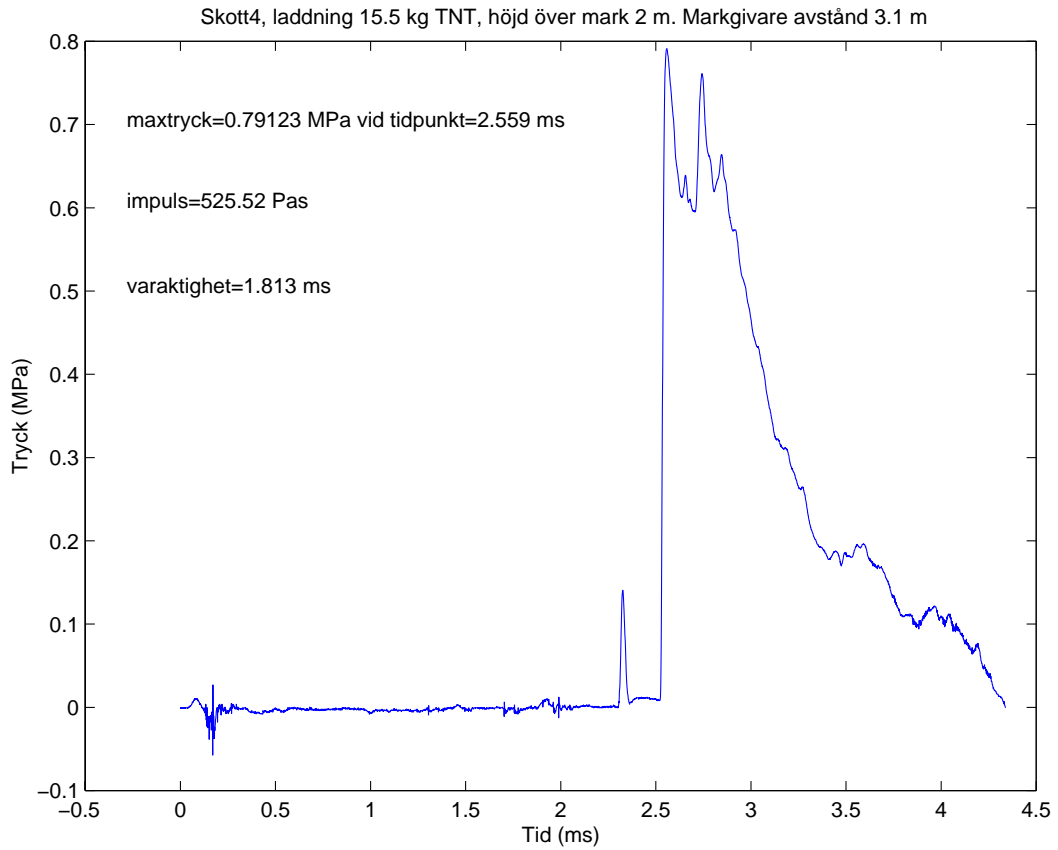
Bilaga A3



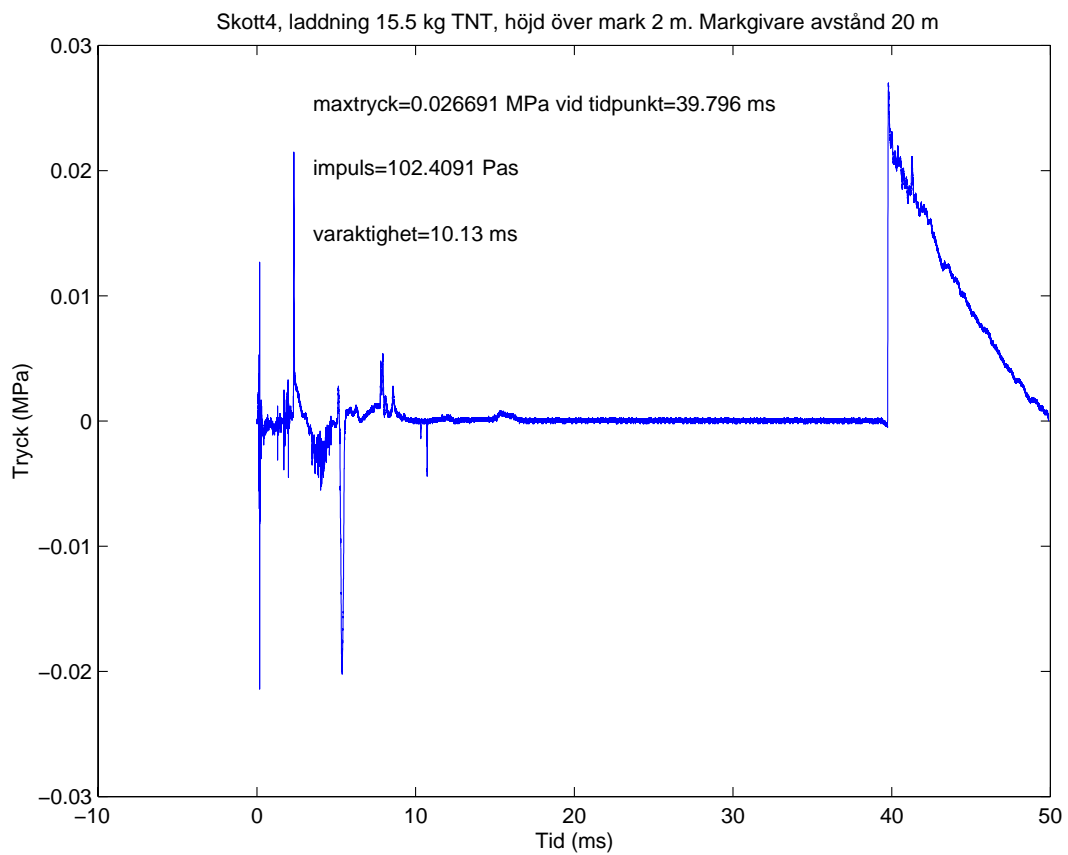
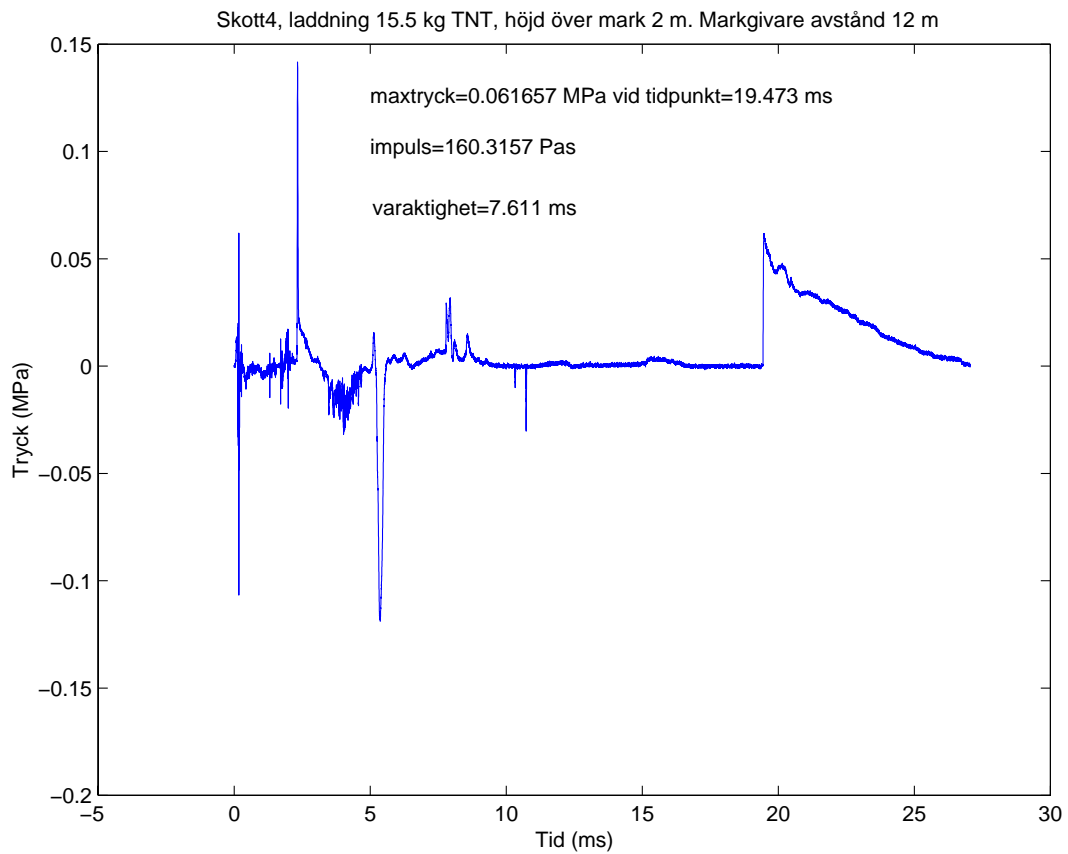
Bilaga A3



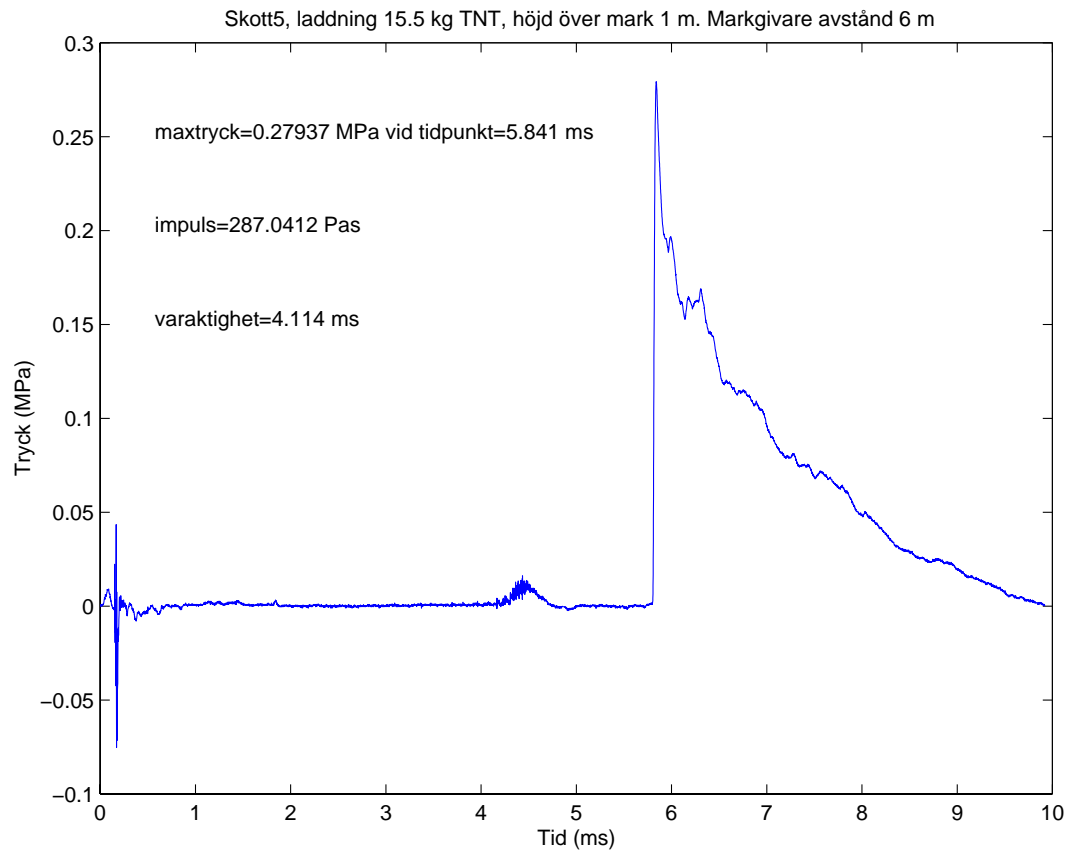
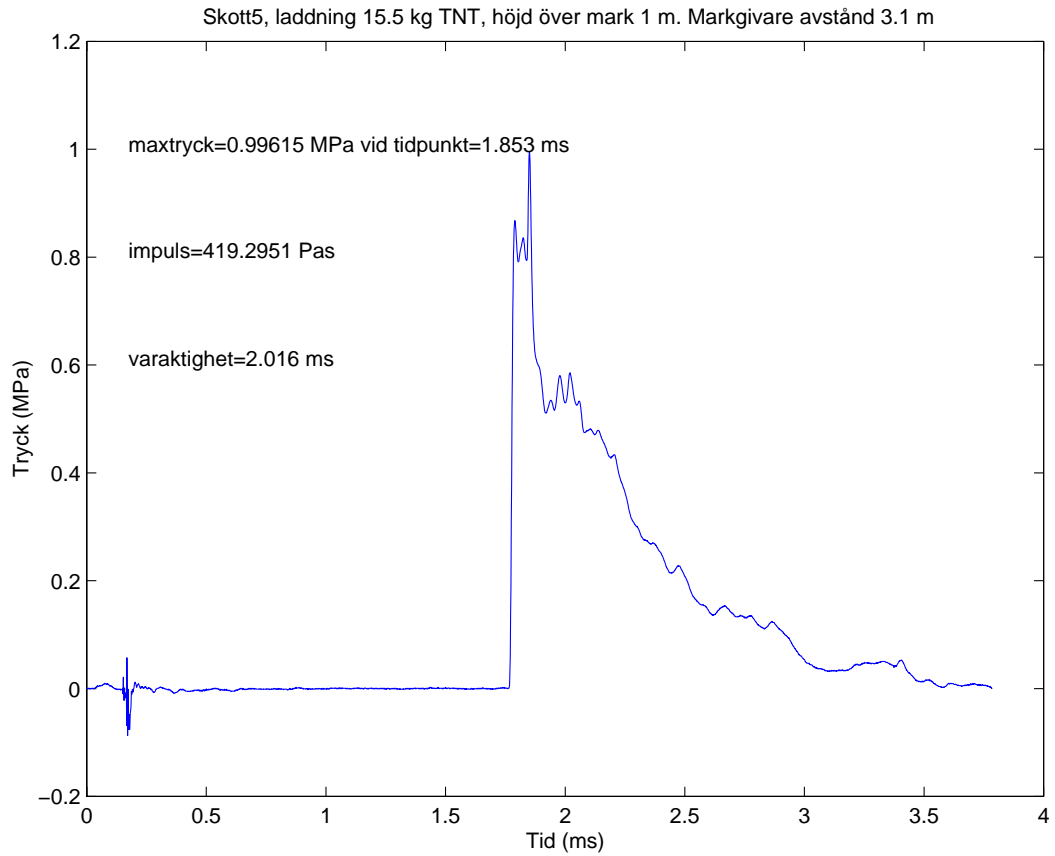
Bilaga A4



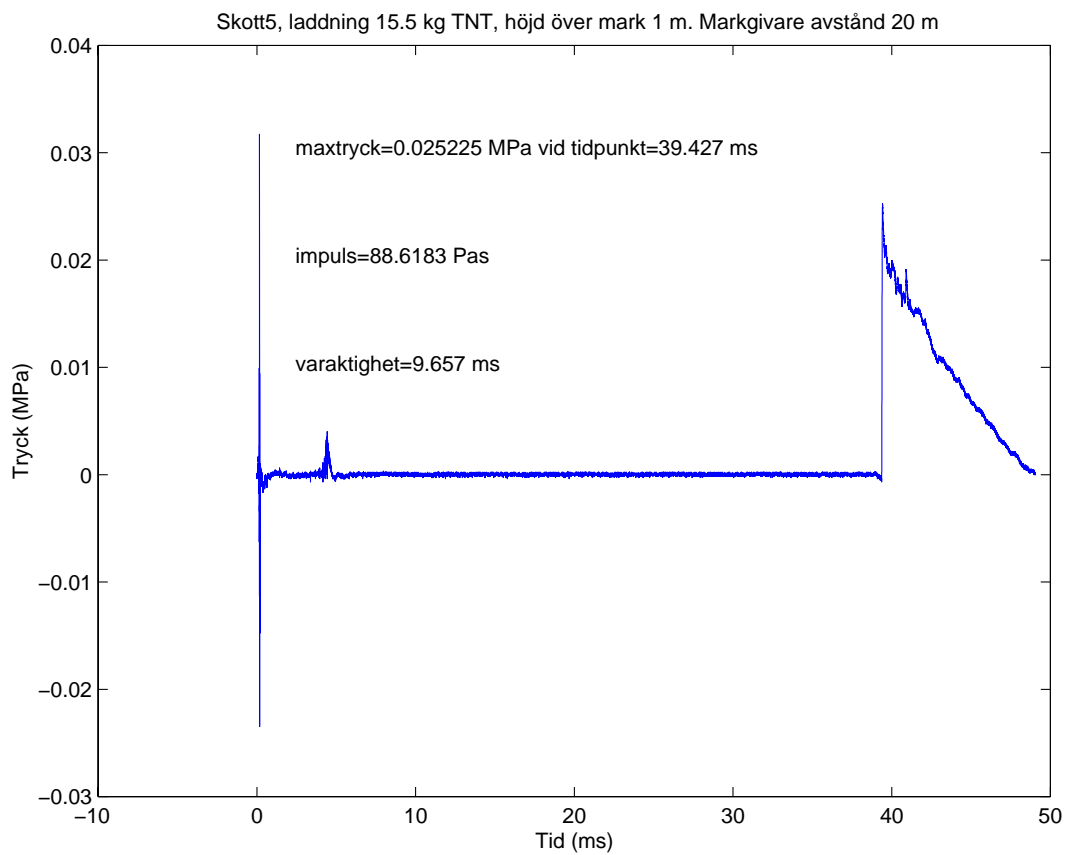
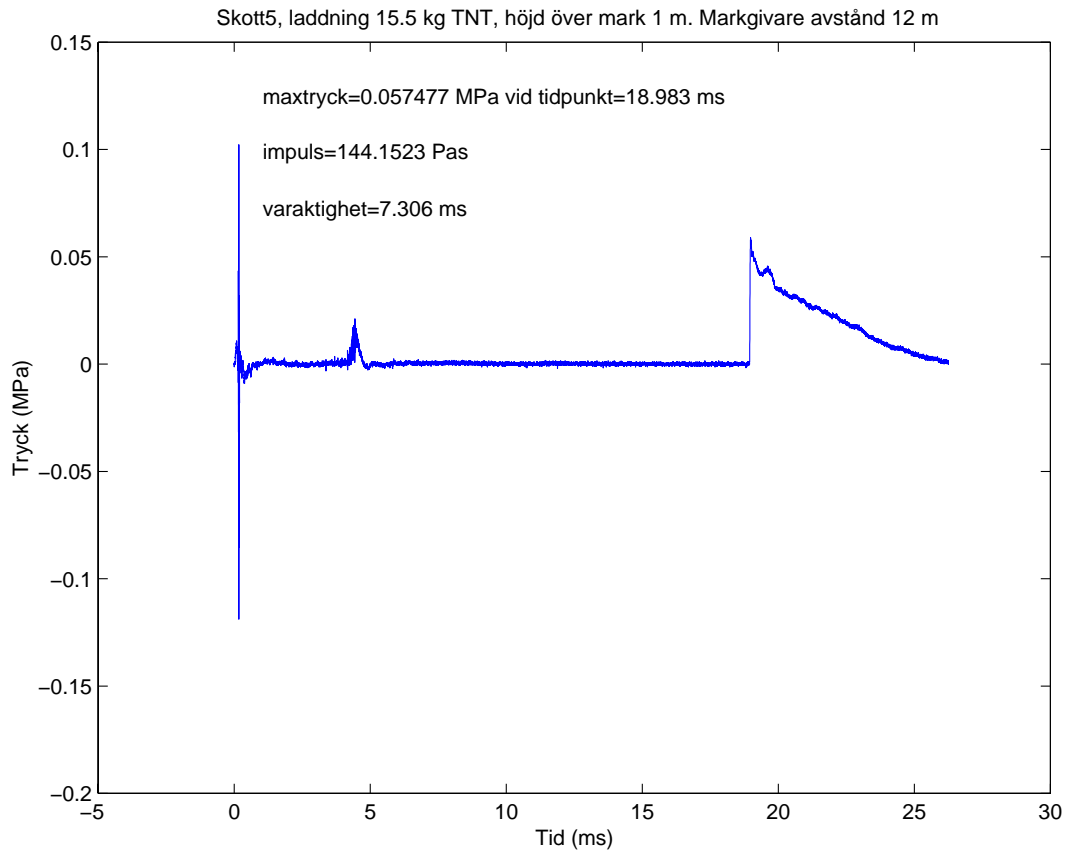
Bilaga A4



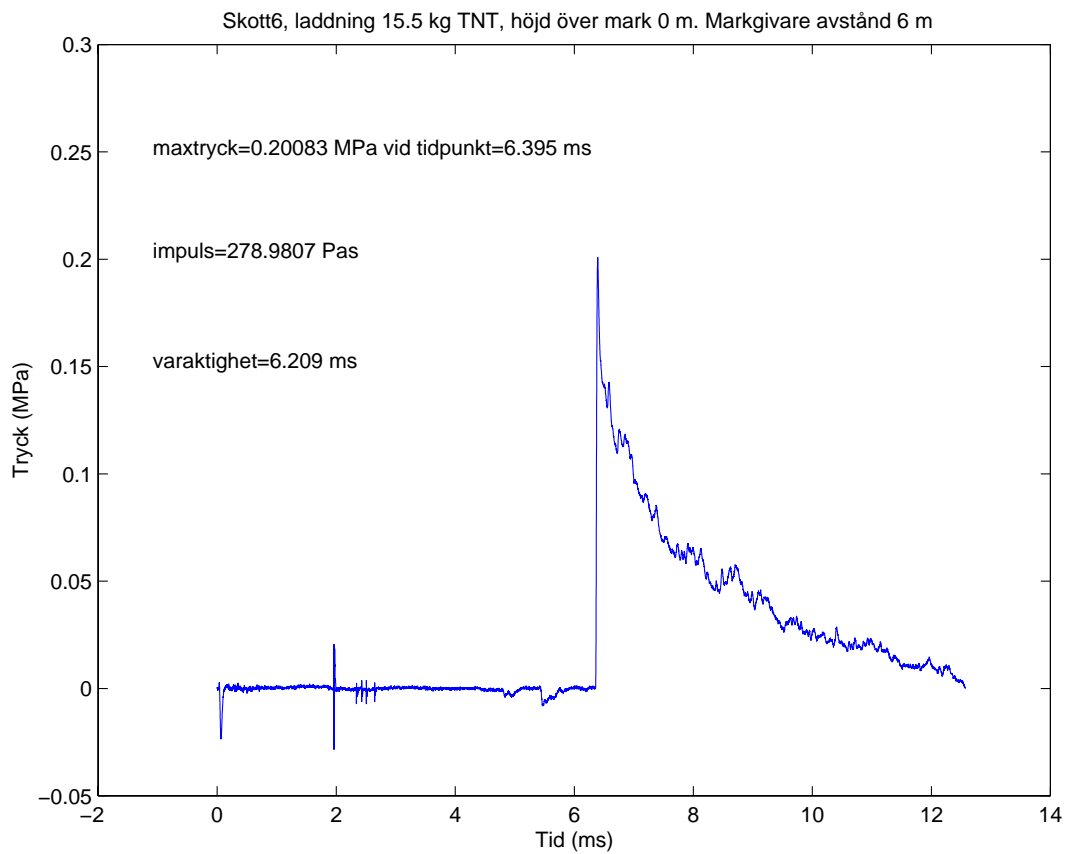
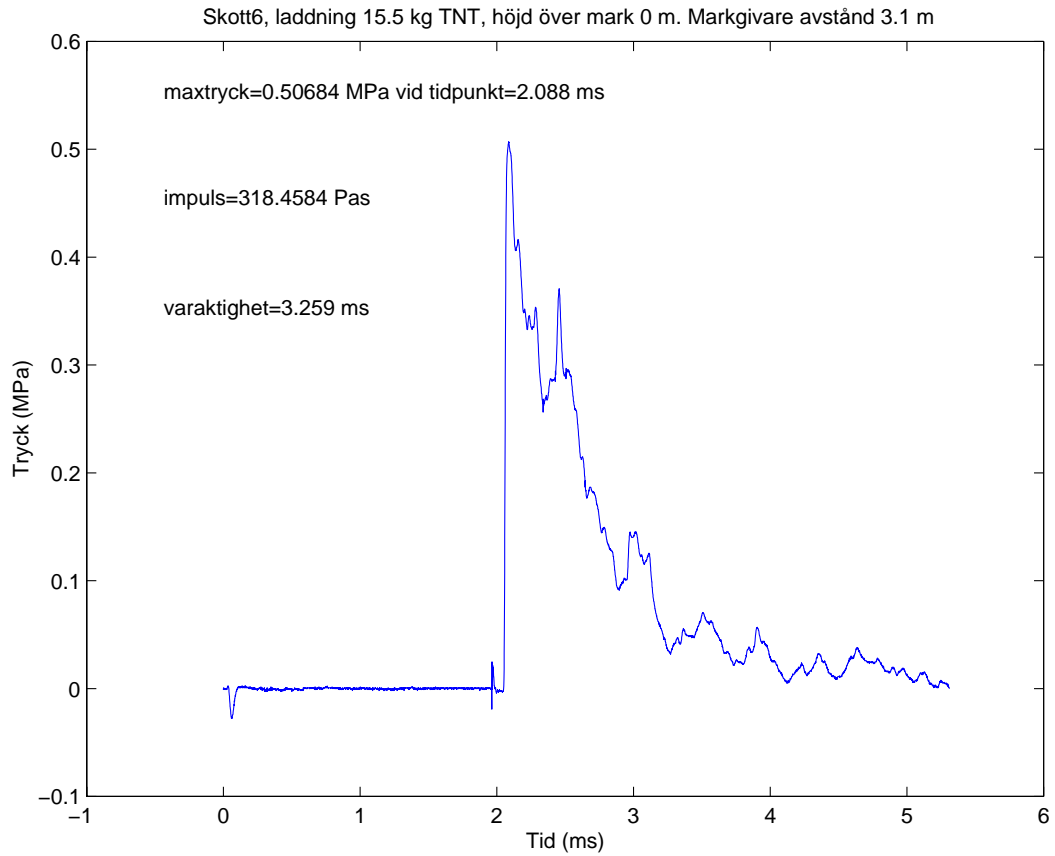
Bilaga A5



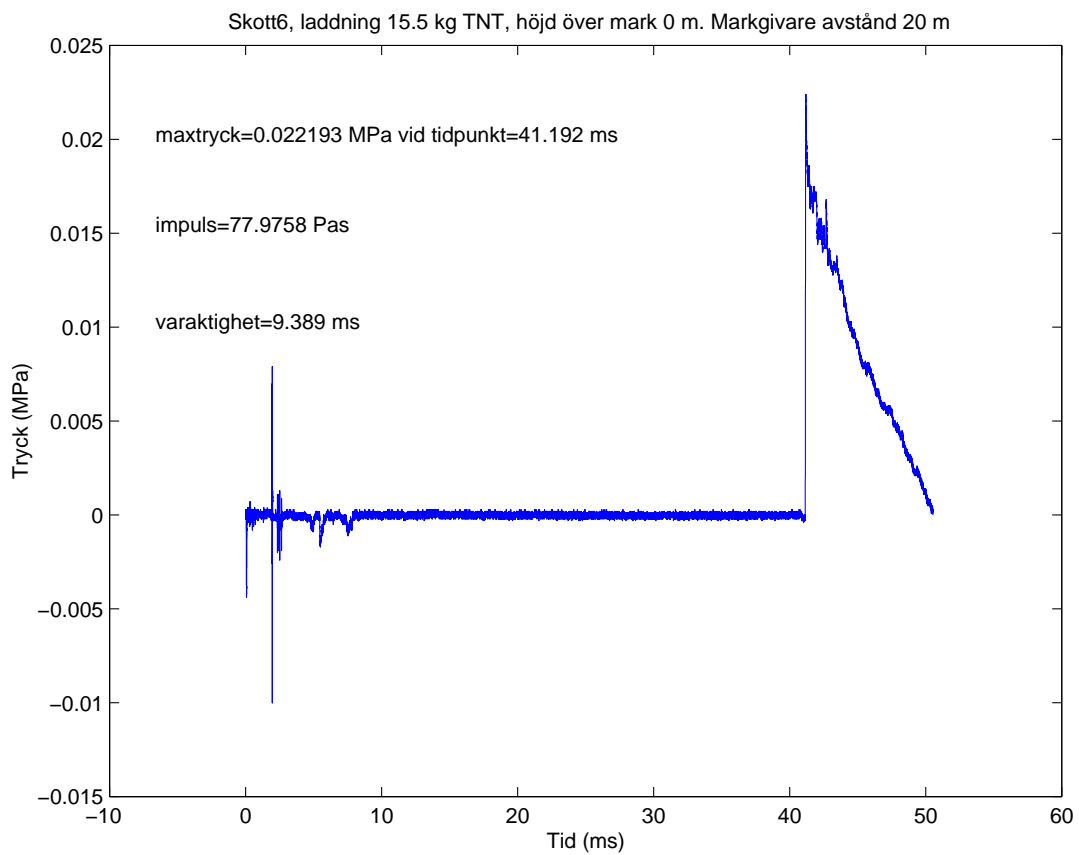
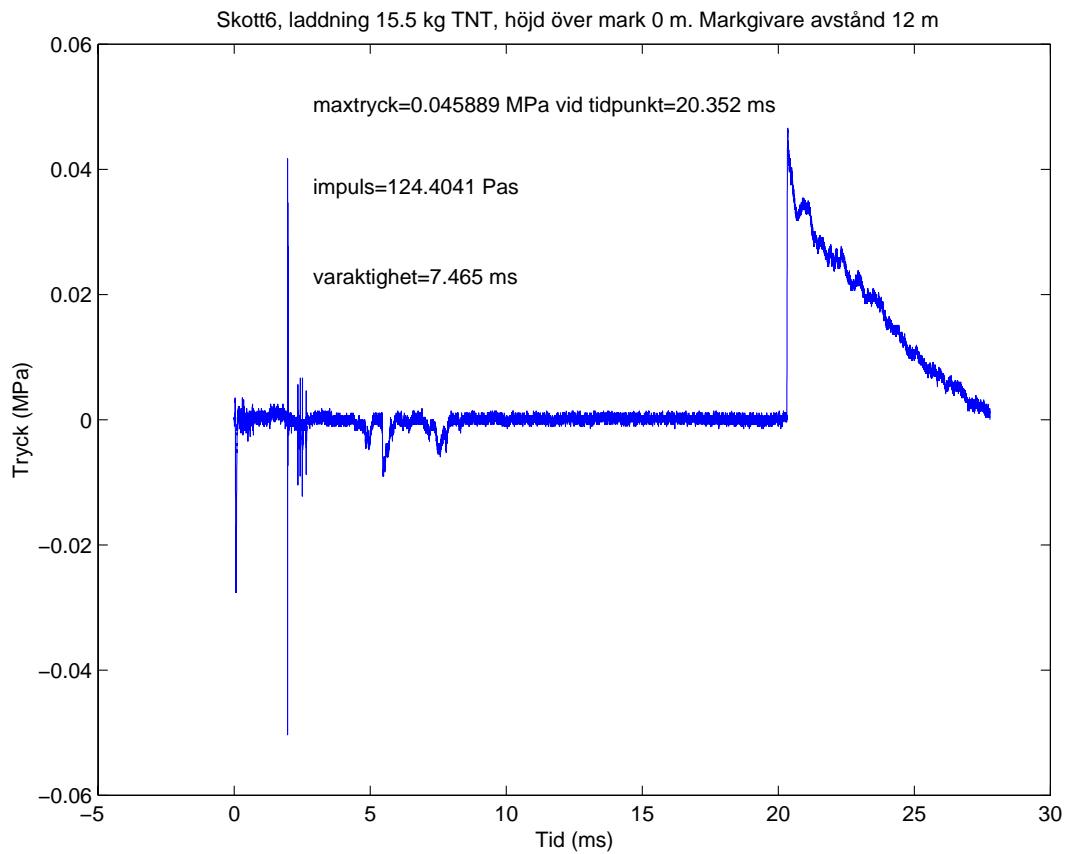
Bilaga A5



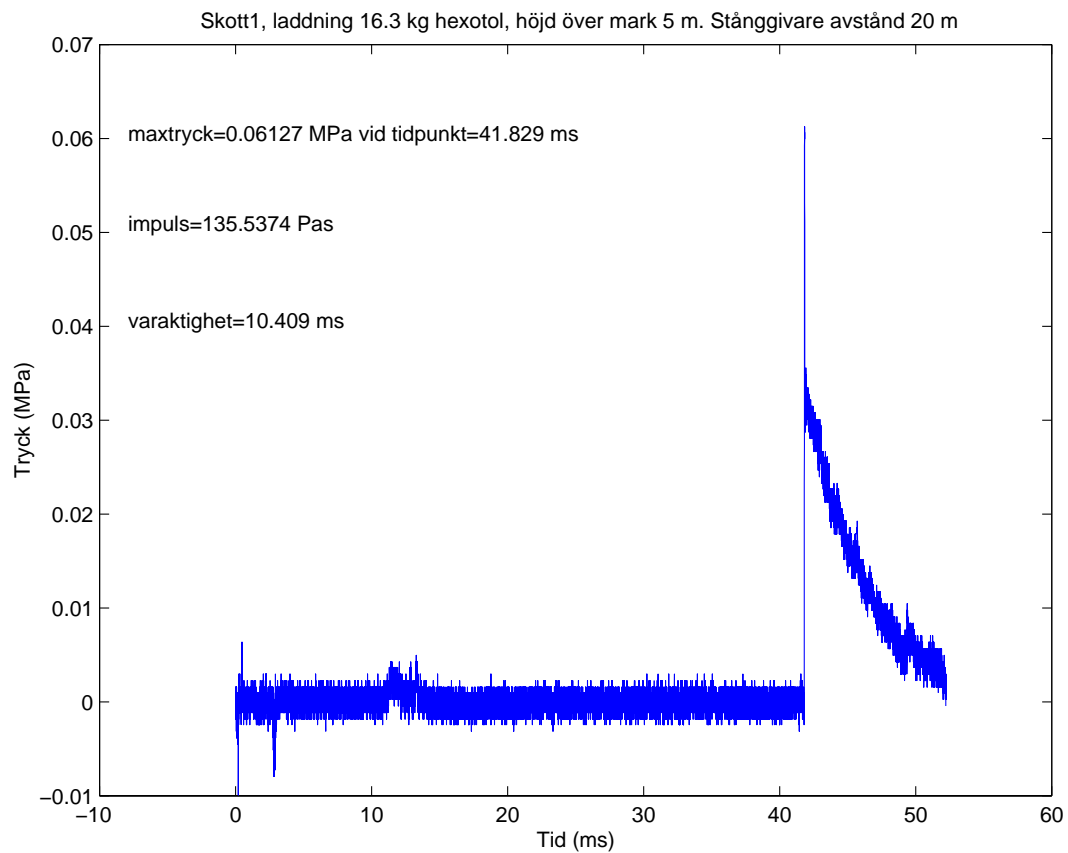
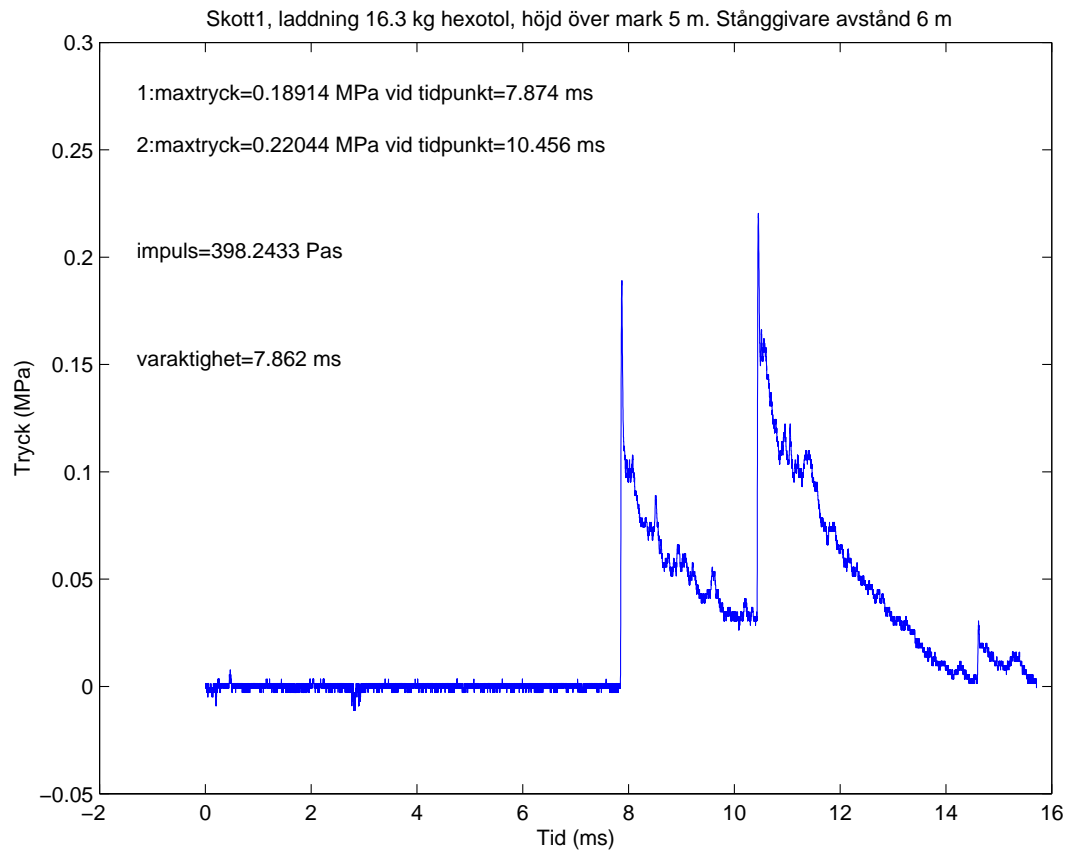
Bilaga A6



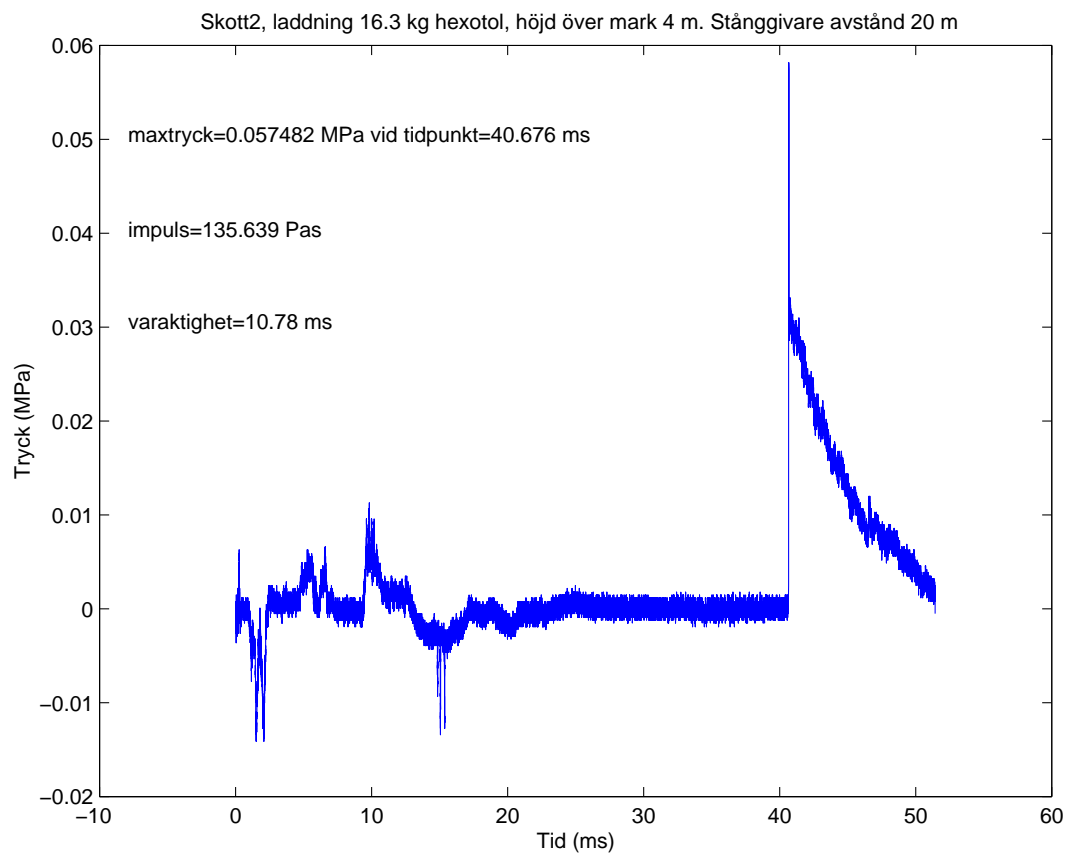
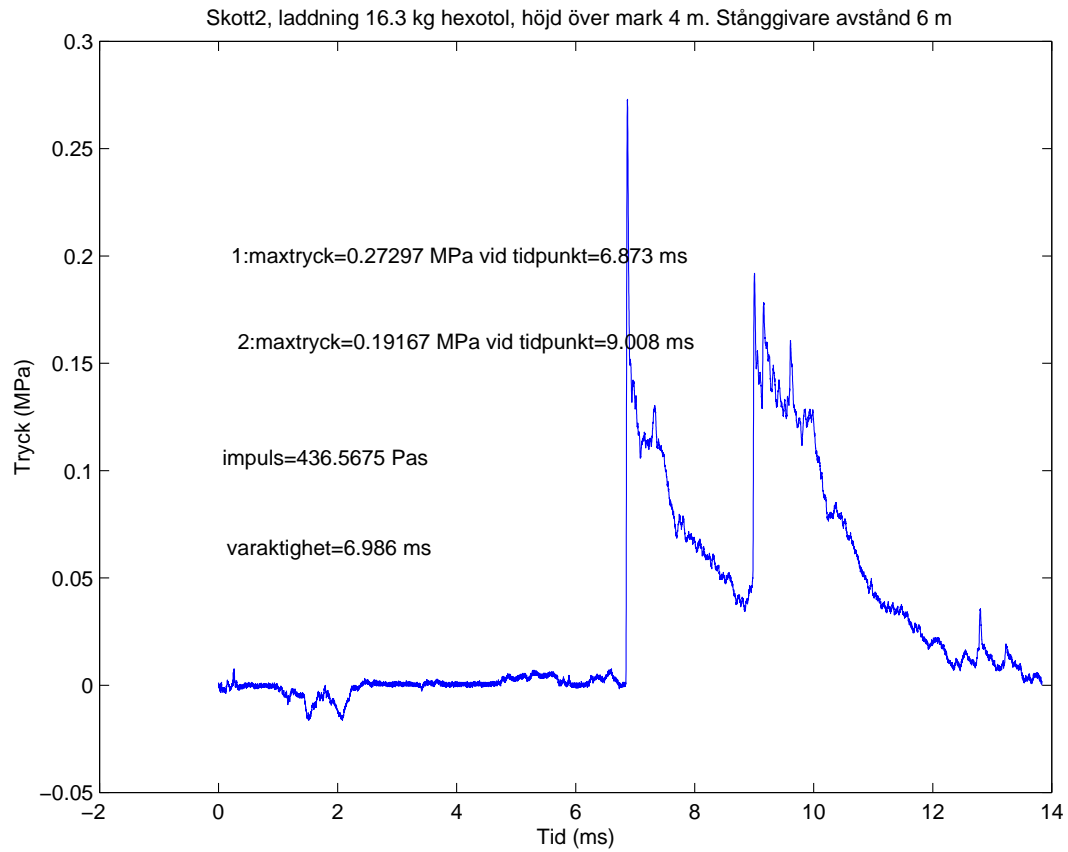
Bilaga A6



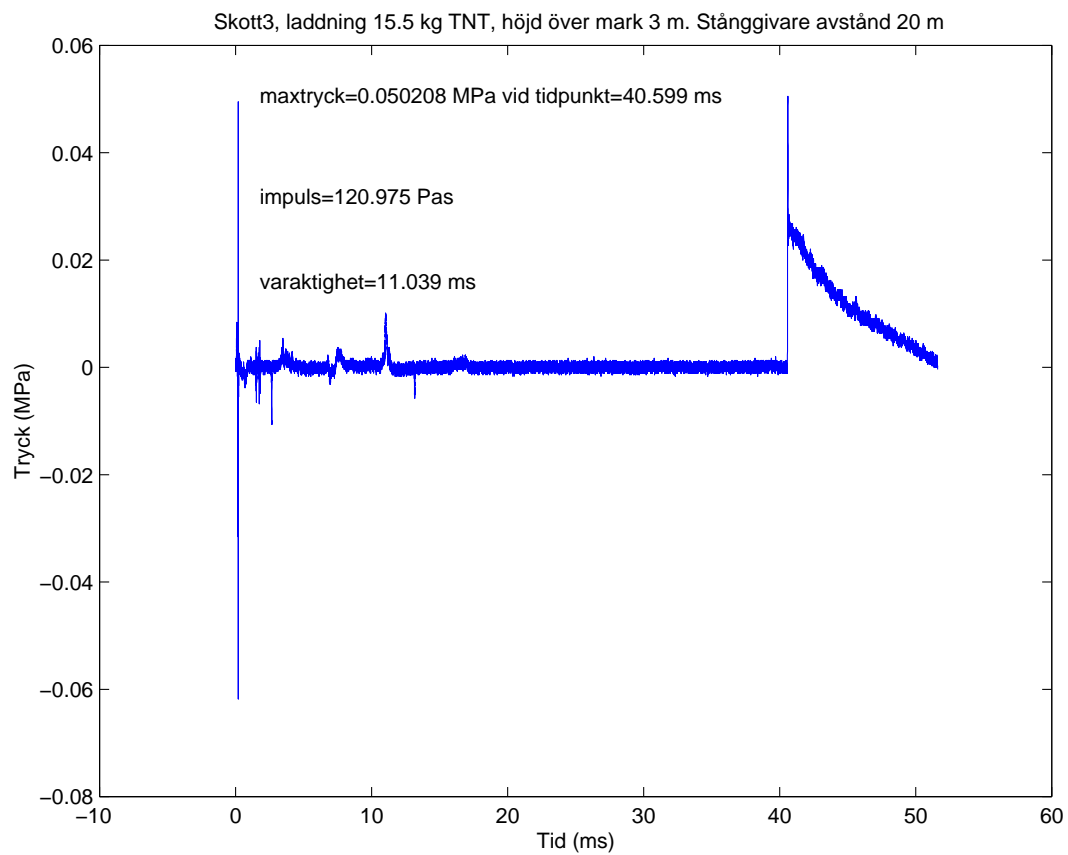
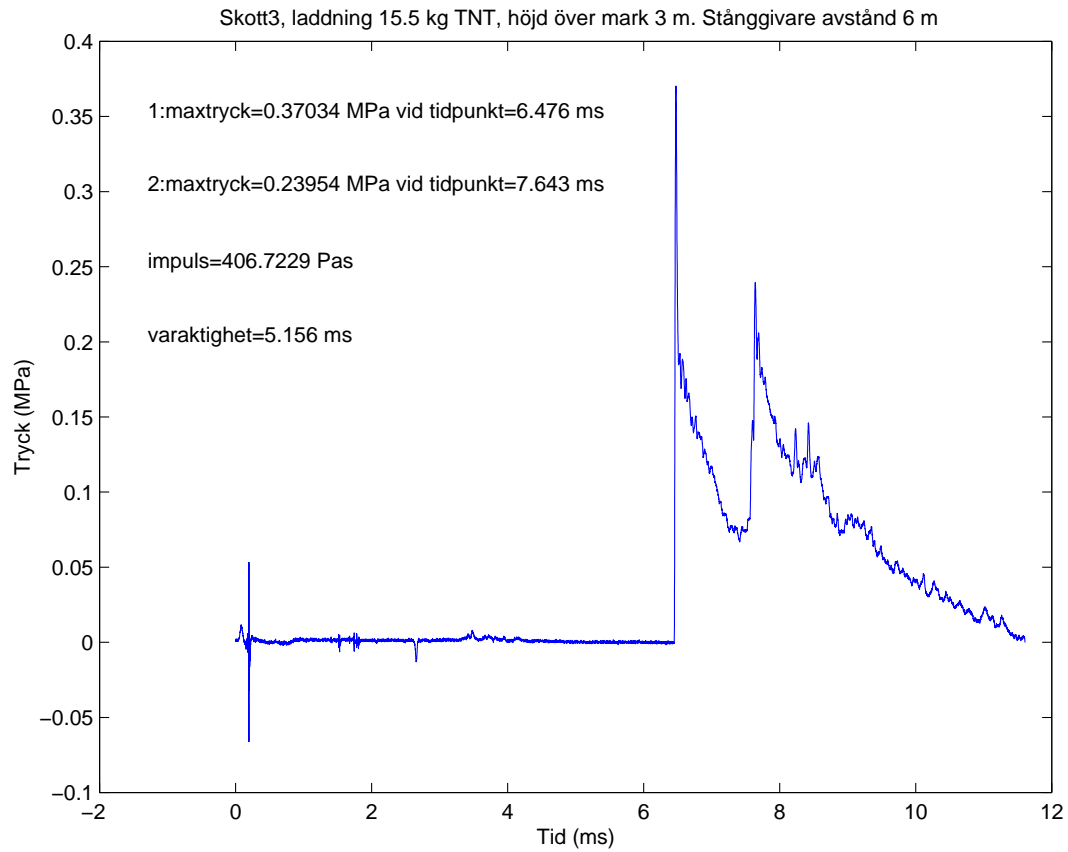
Bilaga B1



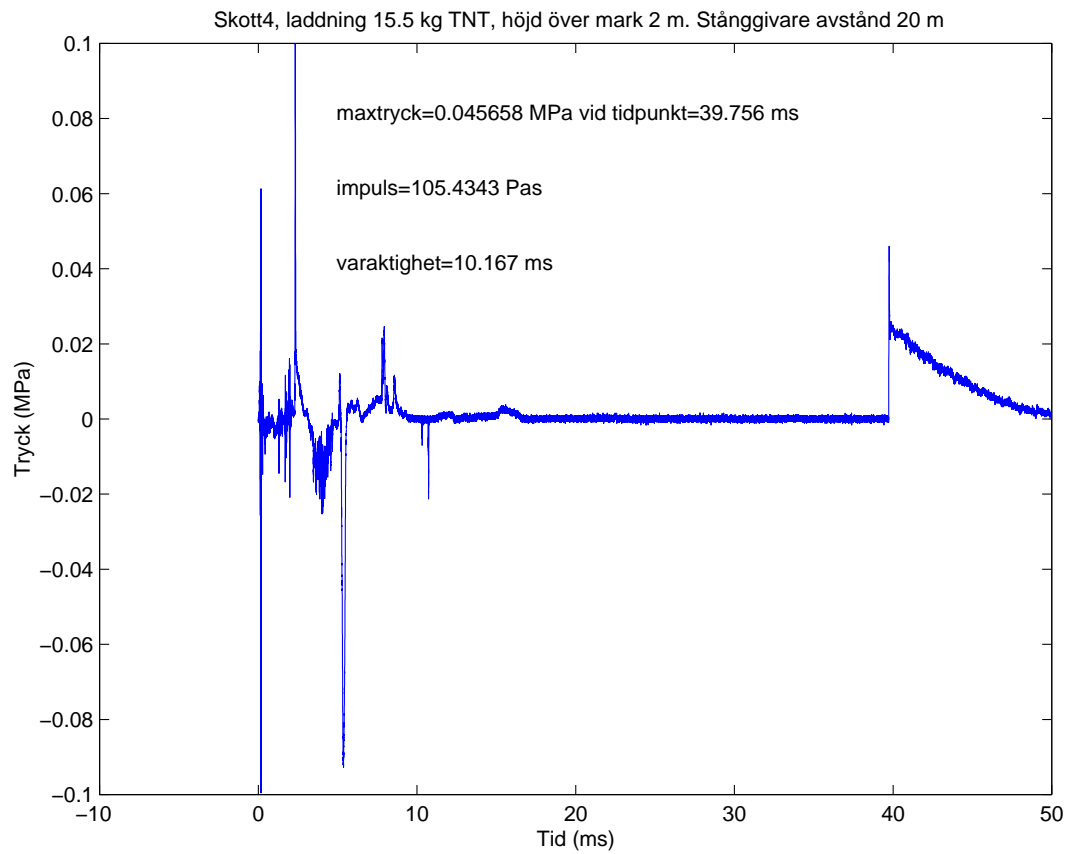
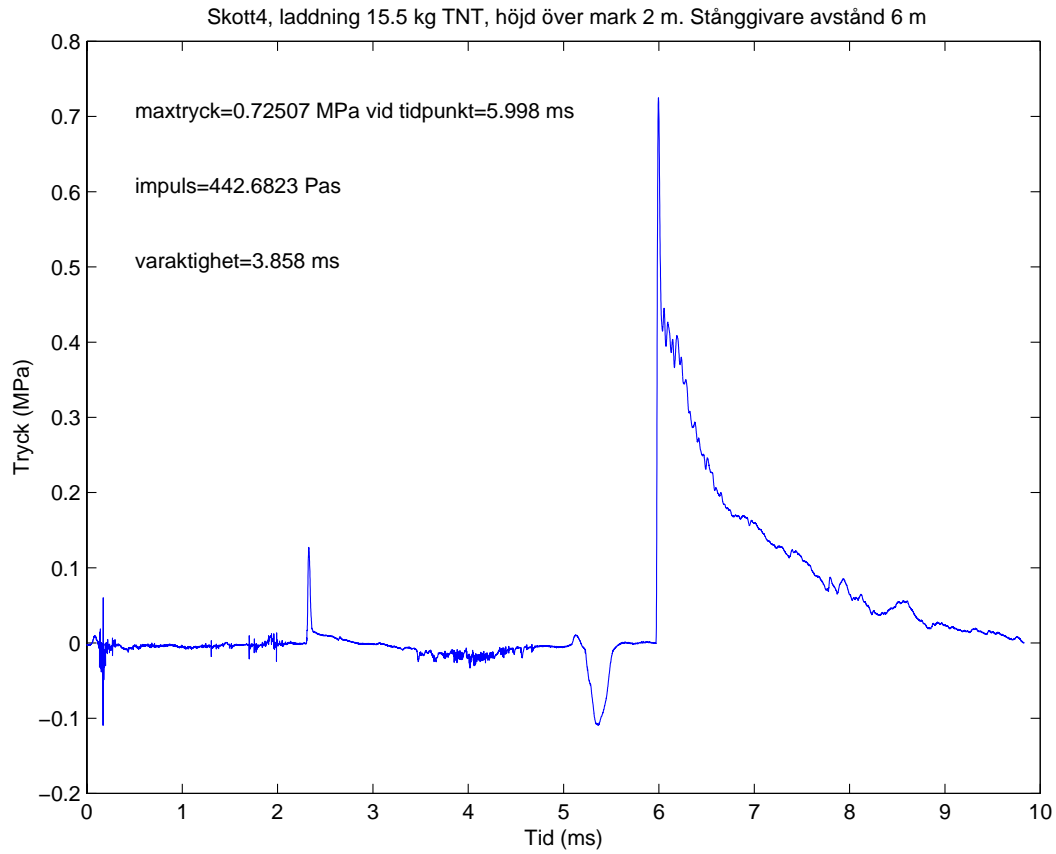
Bilaga B2



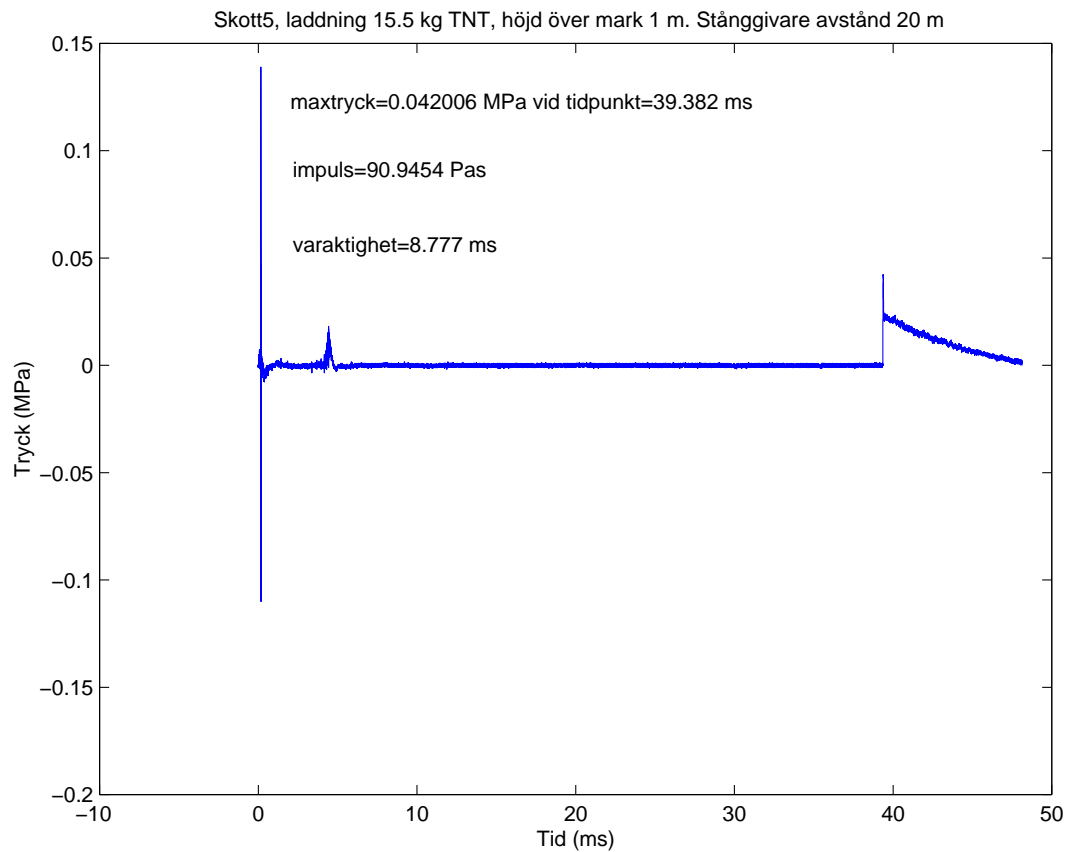
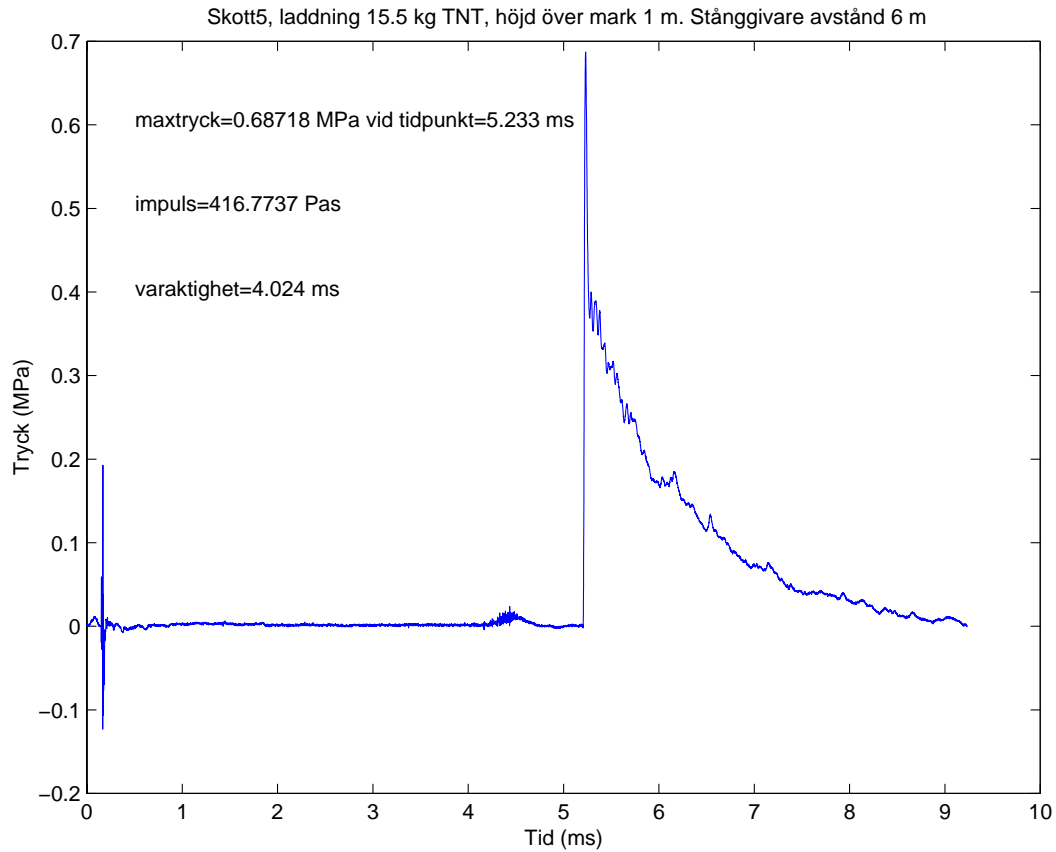
Bilaga B3



Bilaga B4



Bilaga B5



Bilaga B6

