

Roger Berglund

Utformning bergtunnlar Etapp 8



TOTALFÖRSVARETS FORSKNING SINSTITUT

Vapen och skydd

147 25 Tumba

FOI-R--0872--SE

Maj 2003

ISSN 1650-1942

Teknisk rapport

Roger Berglund

Utformning bergtunnlar Etapp 8

Vapen och skydd
147 25 Tumba

Utgivare Totalförsvarets Forskningsinstitut - FOI Vapen och skydd 147 25 Tumba	Rapportnummer, ISRN FOI-R--0872--SE	Klassificering Teknisk rapport
	Forskningsområde 5. Bekämpning	
	Månad, år Maj 2003	Projektnummer E2352
	Verksamhetsgren 5. Uppdragsfinansierad verksamhet	
	Delområde 53 Skydd och anläggningsteknik	
Författare/redaktör Roger Berglund	Projektledare Anders Carlberg	
	Godkänd av	
	Uppdragsgivare/kundbeteckning Försvarsmaktens högkvarter, KRI MTRL anlägg	
	Tekniskt och/eller vetenskapligt ansvarig	
Rapportens titel Utformning bergtunnlar Etapp 8		
Sammanfattning (högst 200 ord) För att studera luftstötsvågsutbredningen i ett tunnelsystem påbörjades ett projekt 1995 med försök i full- och modellskala. Fullskaleförsöken har utförts i en bergtunnel på Älvdalens skjutfält. I etapp 8 har i fullskala jämförelser gjorts mellan olika typer av sprängmedel, olika form på laddningarna, laddningar med och utan hölje, laddningens tyngdpunkt lågt eller högt placerad samt hur tryckutbredningen i tunneln varierar beroende på olika anslagsvinklar för laddningen utanför tunnelmynningen. Resultaten från de olika försöken redovisas i denna rapport i form av tabeller och diagram.		
Nyckelord Bergtunnlar, luftstötståg, komplexa geometrier, fortifikation, experiment, barriärer		
Övriga bibliografiska uppgifter	Språk Svenska	
ISSN 1650-1942	Antal sidor: 132 s.	
Distribution enligt missiv	Pris: Enligt prislista	

Issuing organization FOI – Swedish Defence Research Agency Weapons and Protection SE-147 25 Tumba	Report number, ISRN FOI-R--0872--SE	Report type Technical report
	Programme Areas 5. Combat	
	Month year May 2003	Project no. E2352
	General Research Areas 5. Commissioned Research	
	Subcategories 53 Protection and Fortification	
Author/s (editor/s) Roger Berglund	Project manager Anders Carlberg	
	Approved by	
	Sponsoring agency Swedish Armed Forces Headquarters	
	Scientifically and technically responsible	
Report title (In translation) Design of Rock Tunnels Phase 8		
Abstract (not more than 200 words) In order to study the propagation of blast wave in tunnel systems, a project started 1995 with tests in full scale and model scale. The full-scale test has been performed in a rock tunnel at the shooting range in Älvdalen. In phase 8, a full scale test with comparisons between different explosives, shape of the charge, charges with and without casing, height of centre of gravity and how the pressure wave propagates in the tunnel with different angles of incident have been conducted. The results are presented in tables and graphs.		
Keywords Rock tunnels, air blast, complex geometry's, fortification, experiments, barriers		
Further bibliographic information	Language Swedish	
ISSN 1650-1942	Pages 132 p.	
	Price acc. to pricelist	

Innehållsförteckning

INNEHÅLLSFÖRTECKNING	5
BAKGRUND	7
SPRÄNGMEDEL OCH LADDNING.....	9
FRIFÄLTSFÖRSÖK	11
<i>Instrumentering och registreringsutrustning</i>	<i>11</i>
<i>Försöksprogram för frifältsmätningarna</i>	<i>12</i>
RESULTAT FRÅN FRIFÄLTSFÖRSÖKEN	15
<i>Kontroll av symmetri.....</i>	<i>16</i>
<i>Givarhöjd, P11-P16.....</i>	<i>16</i>
<i>Tabeller över front och maxtryck.....</i>	<i>17</i>
FÖRSÖK VID TUNNELN	19
<i>Instrumentering och registreringsutrustning</i>	<i>19</i>
<i>Försöksprogram för tunnelmätningarna.....</i>	<i>20</i>
RESULTAT FRÅN TUNNELFÖRSÖKEN	23
<i>Allmänt om utvärdering</i>	<i>23</i>
<i>Laddningarna i olika vinklar.....</i>	<i>23</i>
<i>Laddningarna på mark eller i ställning.....</i>	<i>27</i>
<i>Tändning i olika ändar.....</i>	<i>28</i>
<i>Tabeller över front och maxtryck.....</i>	<i>29</i>
TIDIGARE ETAPPER	31
REFERENSER	33
REGISTRERINGAR.....	35
<i>Test 801, 125 kg Prillit.....</i>	<i>35</i>
<i>Test 802: 125 kg Prillit.....</i>	<i>37</i>
<i>Test 803: 114 kg Hexotonal i papprör</i>	<i>39</i>
<i>Test 804: 114 kg Hexotonal i papprör</i>	<i>41</i>
<i>Test 805: 114 kg Hexotonal i stålrör.....</i>	<i>43</i>
<i>Test 806: 114 kg Hexotonal i stålrör.....</i>	<i>45</i>
<i>Test 807: 114 kg Hexotonal i stålrör.....</i>	<i>47</i>
<i>Test 808: avstånd 10 m, 125 kg Prillit</i>	<i>49</i>
<i>Test 809: avstånd 5 m, 125 kg Prillit</i>	<i>53</i>
<i>Test 810: avstånd 10 m, 114 kg Hexotonal, stående cylinder.</i>	<i>57</i>
<i>Test 811: avstånd 5 m, 114 kg Hexotonal, stående cylinder.</i>	<i>61</i>
<i>Test 812: avstånd 5 m, 114 kg Hexotonal, 120° cylinder.....</i>	<i>65</i>
<i>Test 813: avstånd 5 m, 114 kg Hexotonal, 150° cylinder.....</i>	<i>69</i>
<i>Test 814: avstånd 5 m, 114 kg Hexotonal, 0° cylinder.....</i>	<i>73</i>
<i>Test 815: avstånd 5 m, 114 kg Hexotonal, 60° cylinder.....</i>	<i>77</i>
<i>Test 816: avstånd 5 m, 114 kg Hexotonal, 150° åt sidan cylinder.</i>	<i>81</i>
<i>Test 817: avstånd 5 m, 114 kg Hexotonal, liggande tvärs cylinder.....</i>	<i>85</i>
<i>Test 818: avstånd -2 m, 125 kg Prillit</i>	<i>89</i>
<i>Test 819: avstånd -2 m, 114 kg Hexotonal, stående cylinder.....</i>	<i>93</i>
<i>Test 820: avstånd 5 m, 114 kg Hexotonal, 150° cylinder.....</i>	<i>97</i>
<i>Test 821: avstånd -2 m, 114 kg Hexotonal, liggande cylinder.....</i>	<i>101</i>
<i>Test 822: avstånd 5 m, 114 kg Hexotonal, stående cylinder på mark.</i>	<i>105</i>
<i>Test 823: avstånd 5 m, 114 kg Hexotonal, liggande cylinder längs med på mark.</i>	<i>109</i>
<i>Test 824: avstånd 5 m, 114 kg Hexotonal, liggande cylinder tvärs på mark.</i>	<i>113</i>
<i>Test 825: avstånd 10 m, 114 kg Hexotonal, stående cylinder på mark.</i>	<i>117</i>
<i>Test 826: avstånd 10 m, 114 kg Hexotonal, liggande cylinder längs med på mark.</i>	<i>121</i>
<i>Test 827: avstånd 10 m, 114 kg Hexotonal, liggande cylinder tvärs på mark.</i>	<i>125</i>
<i>Test 828: avstånd 5 m, 114 kg Hexotonal, liggande cylinder längs med på mark.</i>	<i>129</i>
<i>Tänd i motsatt ände.....</i>	<i>129</i>

Bakgrund

FOA/FOI har sedan 1995 deltagit i projekt benämnt "Utformning av bergtunnlar" där stötvågsutbredning studerats i ett tunnelsystem som successivt byggts ut i olika etapper. Fullskaleförsöken har utförts i en bergtunnel belägen på Älvdalens skjutfält. Till tidigare etapper har datorsimuleringar och modellförsök genomförts parallellt med huvudförsöken. De tidigare etapperna redovisas i separata rapporter, se Referenserna. En schematisk sammanfattning kan läsas i kapitlet "Tidigare etapper".

Syftet med försöksserierna har varit att studera om skydd av diverse utrustning eller personal mot detonationer i anslutning till en tunnel, kan uppnås utan portar eller barriärer i tunneln. I denna etapp har en avlång mer "bomblik" laddning används. I första delen jämfördes vanliga Prillit laddningar med Hexotonalladdningar i rör. Både med stål och papprör. Andra delen utfördes vid tunneln. Här studerades hur tryckutbredningen i tunnelsystemet påverkades av den avlånga laddningens placering/anslagsvinkel och avstånd.

Sprängmedel och laddning

Två olika sorters laddningar användes i denna etapp. Dels rena Prillitladdningar i form av 25 kg säckar. Dels en mer ”bomblik” cylinderformad laddning som bestod av 114 kg Hexotol i ett av ett papprör med en inre diameter på 250 mm och en längd på 1 500 mm eller ett stålhöje med godstjocklek på 14.2 mm.

Detonationen startades med sprängdeg och en elsprängkapsel.

Vid försöken användes Prillit som är DynoNobels namn på deras standard ANFO sprängmedel. Det består av en granulerad blandning av ammoniumnitrat och 6 % dieselolja. Det används vanligen för laddningar i torra borrhål. Prillit har en TNT ekvivalent på 0.8.

Tekniska data

Densitet	800	kg/m ³
Energi innehåll	4.0	MJ/kg
Detonations hastighet	~ 3 000	m/s
TNT ekvivalent	0.8	(Tryck)

Till de cylinderformade laddningar användes Hexotonal.

Tekniska data

Hexogen	40%	
TNT	40%	
Aluminium	15%	
Vax	5%	
Densitet	1 740	kg/m ³
Energi innehåll	6.44	MJ/kg
Detonations hastighet	~ 7 990	m/s
TNT ekvivalent	1.2	(Medel)
TNT ekvivalent (H-6)	1.38	(Tryck)
(45/30/20/5)	1.15	(Impuls)

Aluminiumet är svårt att få jämnt fördelat. Hexotonalet är ett sk ”non-ideal” sprängämne med en ojämn detonationutbredning vilket kan ge en ”stökig” tryck-tidkurva.

TNT ekvivalensen är svår att kvantifiera då är olika för tryck och impuls. Den varierar dessutom för olika trycknivåer.

Frifältsförsök

Instrumentering och registreringsutrustning

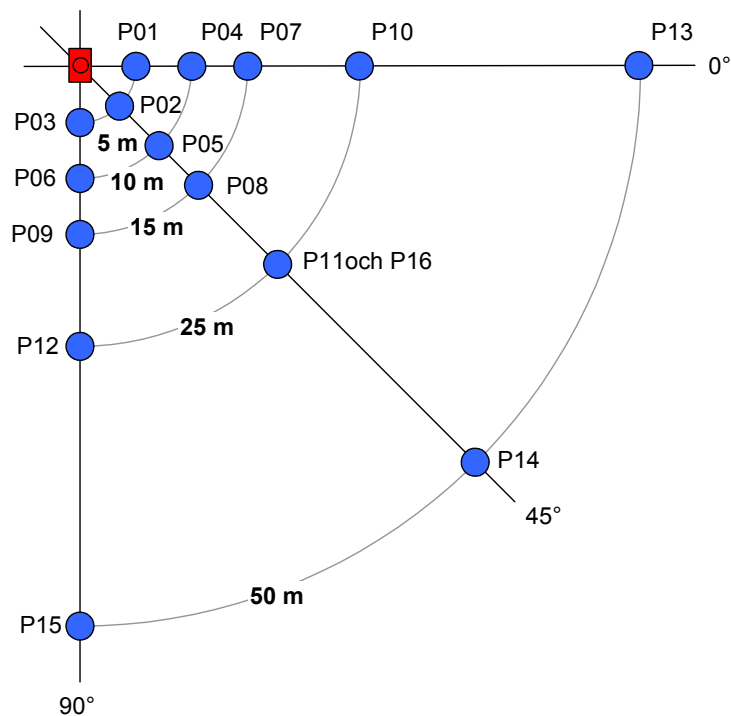
En triggsignal plockades med hjälp av en spole runt tändledningen. Fördröjningssatsen i sprängkapseln varierar med ± 2 ms vilket omöjliggör tidmätningar mellan laddning och givare P01 och mellan olika försök. Signalerna spelades in med 16 kanligt PC-baserat insamlingssystem (TEAM 490). Samplingshastighet var 50 kHz filtrerat med 20 kHz analogfilter. Vid försök 801-802 samplades med 100 kHz.



Bild 1. Mät punkt 2. Side-On givare på platta.

Tabell 1. Sammanfattning av givare med placering.

Givare	Typ	Givartyp	Serie nr	Avstånd	Riktning	h	Anmärkning
1	PCB 113A24	På platta	9034	5	0°	0	
2	PCB 113A24	På platta	9031	5	45°	0	
3	PCB 113A24	På platta	9032	5	90°	0	
4	PCB 113A24	På platta	8779	10	0°	0	
5	PCB 113A24	På platta	8563	10	45°	0	
6	PCB 113A51	På platta	8781	10	90°	0	
7	PCB 113A51	”Lollipop”	4262	15	0°	0.5	
8	PCB 113A51	”Lollipop”	3658	15	45°	0.5	
9	PCB 113A51	”Lollipop”	3659	15	90°	0.5	
10	PCB 113A51	”Lollipop”	5671	25	0°	0.5	
11	PCB 113A51	”Lollipop”	1703	25	45°	0.5	
12	PCB 113A51	”Lollipop”	2074	25	90°	0.5	
13	PCB 137A23	”Spjut”	2430	50	0°	0.5	
14	PCB 137A23	”Spjut”	2431	50	45°	0.5	
15	PCB 137A23	”Spjut”	2432	50	90°	0.5	
16	PCB 113A51	”Lollipop”	x	25	45°	2.4	Högt placerad



Figur 1. Plan över frifältsmätningen.

Försöksprogram för frifältsmätningarna

Målen med frifältsförsöken var att se hur Prillit verkar i jämförelse med mer realistiska sprängmedel samt hur formen och inneslutningen av Hexotonal i olika typer av höljen påverkar tryckutbredningen. Mätningar i tre riktningar möjliggjorde också kontroll av asymmetrifaktorer för Prillitsäckarna. Rörladdningarna placerades hela tiden stående. I en punkt, 25 m 45°, placerades två givare på olika höjd. 0.5m och 2.4 m.



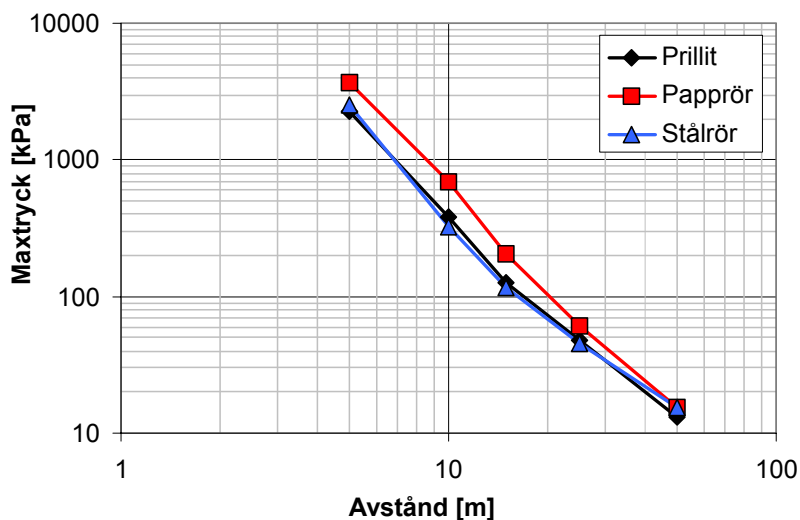
Bild 2. Hexotonalladdning i papprör.

Tabell 2. Sammanfattning av frifältsförsöken vid etapp 8.

Test	Laddning [kg]	Typ	Datum	Samplings- hastighet	Anmärkning
800					Bomskott
801	125	Prillit	99-06-08	100 kHz	
802	125	Prillit	99-06-08	100 kHz	
803	114	Hexotonal	99-06-08	50 kHz	
804	114	Hexotonal	99-06-08	50 kHz	
805	114	Hexotonal i stålrör	99-06-09	50 kHz	P7, P8 trasiga, P16 långt borta?
806	114	Hexotonal i stålrör	99-06-09	50 kHz	P2, P7, P8, P9, P13 trasiga P16 långt borta?
807	114	Hexotonal i stålrör	99-06-09	50 kHz	P2, P8, P9, P16

Resultat från frifältsförsöken

I Figur 2 visas medeltrycken för de olika försöken. 114 kg Hexotonal i stålhölje visar god överstämmelse med 125 kg Prillit.



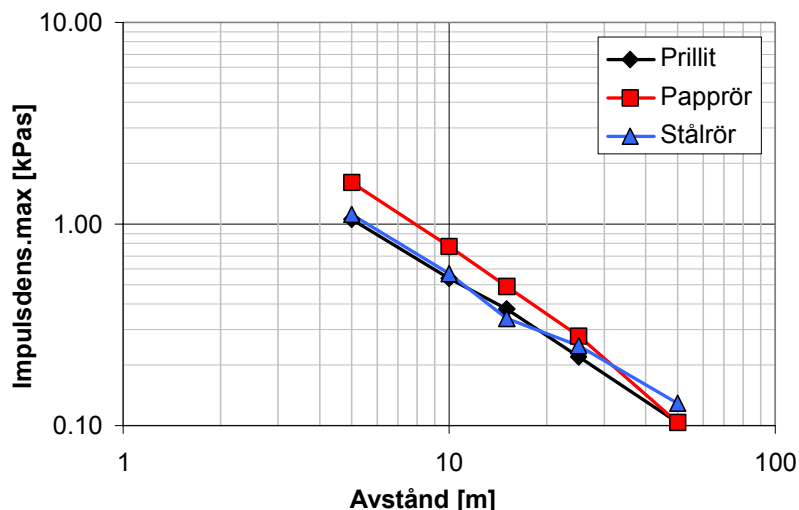
Figur 2. Maxtryck kontra avstånd grundade på medelvärdet av flera försök

I Tabell 3 visas kvoterna mellan de olika försökstyperna. Observera att kvoterna inte direkt går att jämföra med någon sorts TNT ekvivalens. TNT ekvivalensen beräknas alltid på sprängmedelsmassorna. Avstånden skall också skalas med tredjeron ur laddningsvikten. Siffrorna inom parentes visar kvoterna om hänsyn tas till att det 10 % mer vikt Prillit (125/114). Jämförelsen stålrör/papprör ger att stålhöljet reducerar trycket med ca 30 %. Även här skall poängteras att en traditionell ekvivalensfaktor för höljesladdningar skall läggas på vikterna och inte trycket.

Tabell 3. Kvoter för maxtrycken grundade på medelvärdet av flera försök

Test/Givare	1-3	4-6	7-9	10-12	13-15	Medel/Kvot
Papprör/Prillit	1.59 (1.74)	1.81 (1.99)	1.61 (1.76)	1.29 (1.42)	1.16 (1.28)	1.49 (1.69)
Stålrör/Prillit	1.11 (1.21)	0.83 (0.91)	0.92 (1.01)	0.96 (1.05)	1.16 (1.27)	1.00 (1.09)
Stålrör/Papprör	0.70	0.46	0.57	0.74	1.00	0.69

I Figur 3 och Tabell 4 jämförs på liknade sätt impulsdensiteterna. Samma resonemang gällande kvoterna gäller givetvis även här.



Figur 3. Impulsdensitetsmax kontra avstånd.

Tabell 4. Kvoter impulsdensitetsmax.

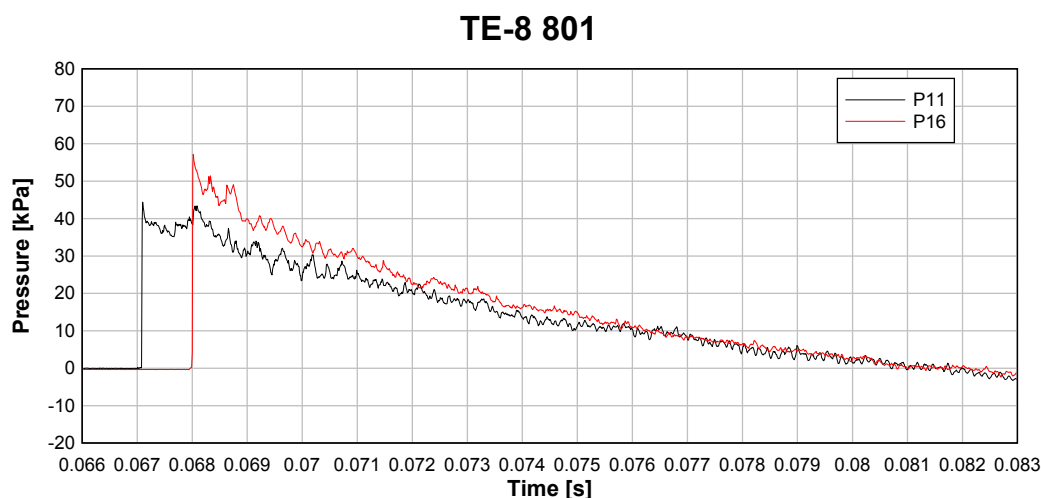
Test/Givare	1-3	4-6	7-9	10-12	13-15	Medel/Kvot
Papprör/Prillit	1.51 (1.66)	1.44 (1.58)	1.29 (1.42)	1.27 (1.40)	1.00 (1.10)	1.30 (1.43)
Stålrör/Prillit	1.05 (1.15)	1.06 (1.16)	0.89 (0.98)	1.15 (1.26)	1.26 (1.38)	1.08 (1.18)
Stålrör/Papprör	0.69	0.73	0.69	0.90	1.26	0.85

Kontroll av symmetri

Viss variation av trycket i olika riktningar kan ses på försök med Prillitsäckar. Skillnader är speciellt tydliga när man tittar på ankomsttiderna på tryckvågen. Var man initierar detonationen påverkar också. Trycket är genomgående lägre och ankomsttiden senare för givarna 45° linjen vid Prillitförsöken. De cylinderformade laddningarna har som väntat betydligt mer samstämmiga ankomsttider. Trycken varierar dock något ändå. Stålrörstesterna uppvisar större spridning.

Givarhöjd, P11-P16

Den högre placerade givaren, P16, gav ca 30% högre tryck än P11. Tryckfronten ankommer ca 1 ms senare till den övre.



Figur 4. Side-On tryck mätt på två olika höjder men samma avstånd, 25 m.

Tabeller över front och maxtryck

Tabell 5. Maximalt tryck [kPa].

Test/Givare	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
801	2319	1559	2672	372	327	415	144	128	118	55	44	45	11	13	10	57
802	2111	2118	3000	457	338	400	135	124	116	52	47	42	15	15	15	60
803	3048	3225	4492	687	679	687	196	192	191	67	50	60	15	15	16	66
804	3207	4424	3523	837	651	644	217	196 ¹	236	70	57	65	15	15	16	75
805	1250	2224	2811	346 ²	148 ²	208 ²	x	x	98 ³	50 ³	46 ³	43 ³	13 ⁴	14 ⁴	14 ⁴	9.4
806	2209	x	3960	336 ²	450 ²	245 ²	x	x	X	48 ³	38 ³	46 ³	x	15	16	x
807	1741	x	3166	370 ²	292 ²	490 ²	137 ³	x	x	50 ³	43 ³	47 ³	14	16	20	x

¹ Störningar

² Suspekt signal

³ Medelvärde av 5 punkter

⁴ Medelvärde av 9 punkter

Tabell 6. Impulstäthet [kPas].

Test/Givare	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
801	1.0	0.91	1.2	0.57	0.50	0.56	0.40	0.42	0.32	0.21	0.23	0.20	0.10 ¹	0.11 ¹	0.10 ¹	0.23
802	1.1	0.94	1.2	0.61	0.49	0.51	0.40	0.42	0.33	0.21	0.25	0.21	0.11	0.11	0.11	0.25
803	1.6	1.5	1.8	0.84	0.74	0.84	0.50	0.44	0.45	0.29	0.29	0.25	0.15	0.15	0.14	0.30
804	1.5	1.6	1.6	0.77	0.69	0.78	0.51	0.59 ²	0.47	0.29	0.29	0.26	0.14	0.14	0.14	0.33
805	1.1	1.2	1.4	0.59 ³	0.53 ³	0.69 ³	x	x	0.34	0.29	0.24	0.25	0.14	0.14	0.14	0.099
806	1.1	x	1.1	0.57 ³	0.41 ³	0.54 ³	x	x	x	0.27	0.24	0.20	x	0.13	0.11	x
807	1.0	x	0.99	0.52 ³	0.67 ³	0.61 ³	0.34	x	x	0.26	0.25	0.25	0.14	0.12	0.13	x

¹ För kort inspelningstid. Troligen något högre.

² Något hög pga störning

³ Suspekt signal

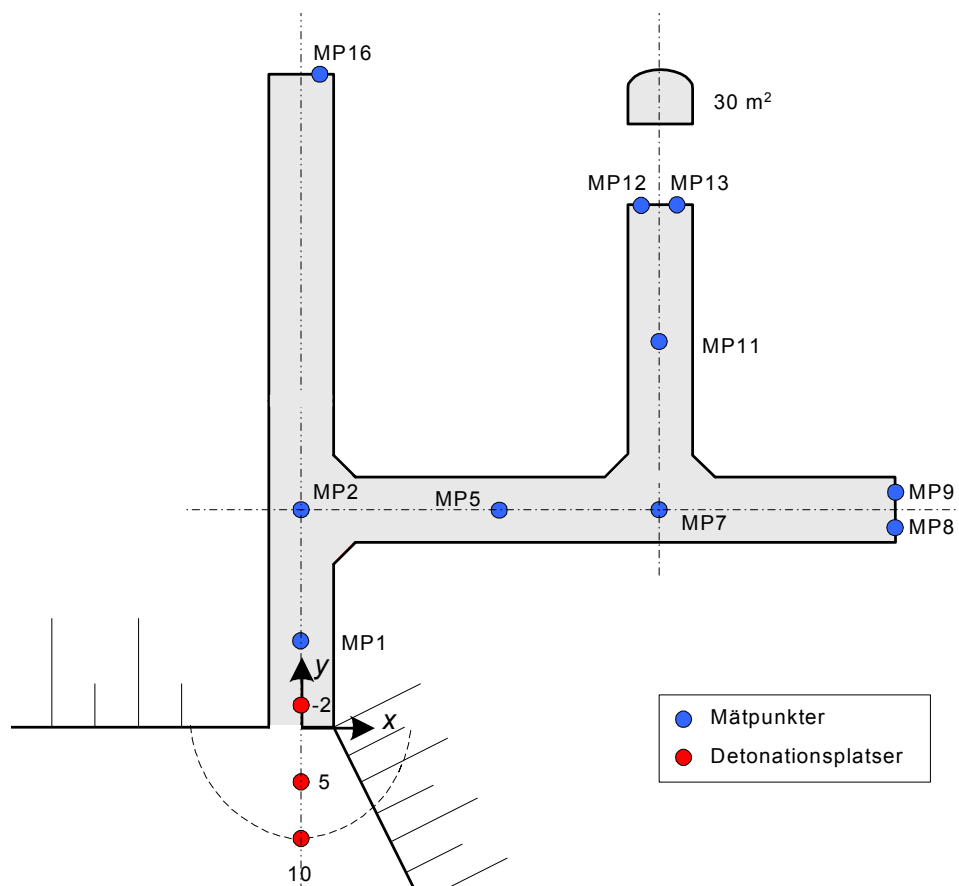
Försök vid tunneln

Instrumentering och registreringsutrustning

En triggsignal plockades med hjälp av en spole runt tändledningen. Fördröjningssatsen i sprängkapseln varierar med ± 2 ms vilket omöjliggör tidmätningar mellan laddning och givare P01 och mellan olika försök. Signalerna spelades in med 16 kanligt PC-baserat insamlingssystem (TEAM 490). Samplingshastighet var 20 kHz.

Tabell 7. Sammanfattning av givare med placering.

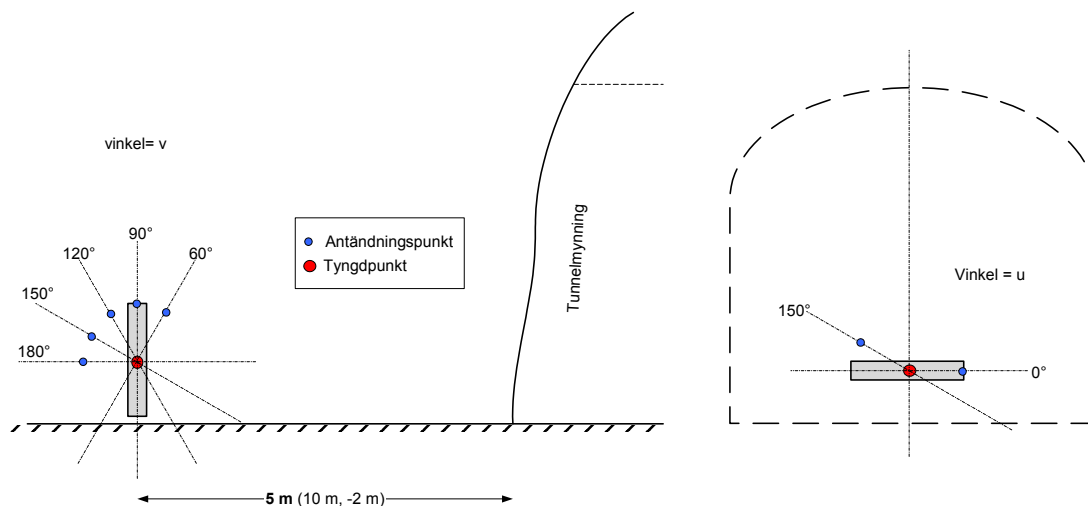
Givare	Typ	Serie nr	x	y	h	Anmärkning
1	PCB 113A24 Side-on	9034	0	10	0	På platta
2	PCB 113A24 Side-on	9032	0	20	0	På platta
5	PCB 113A66 Side-on	5671	18	20	0.5	“Lollipop”
7	PCB 113A66 Side-on	2074	35	20	0.5	“Lollipop”
8	PCB 113A24 Reflektion	9029	53	18	1.5	
9	PCB 113A24 Reflektion	9030	53	22	1.5	
11	PCB 113A66 Reflektion	1703	35	35.5	0.5	“Lollipop”
12	PCB 113A24 Reflektion	8779	33	48	1.5	
13	PCB 113A24 Reflektion	8563	35	48	1.5	
16	PCB 113A24 Reflektion	8781	2	60.5	1.5	



Figur 5. Plan över tunnelsystemet.

Försöksprogram för tunnelmätningarna

Laddningarnas placering varierades förutom i avstånd också lutningar i två plan, se Figur 6. Tyngdpunkten på laddningarna låg på ca 90 cm. Slutligen testades att placera laddningar direkt på mark på tvär och längdled i tunnelriktningen. Antändningen skedde företrädesvis i toppen, till höger eller ytterst på cylindern. Som referens användes laddningar av Prillit. Laddningsmängden var 125 kg. Säckarna travades ovanpå ett 60 cm högt "frigolitbord". Se Bild 3. Detta ger laddningen samma tyngdpunkt som rörladdningarna. Laddningarna placerades på -2, 5 respektive 10 m avstånd från tunnelmynningen. Försöksprogrammet presenteras i Tabell 8.



Figur 6. Cylinderladdningarna placering framför tunnelöppningen



Bild 3. 125 kg Prillit 5m utanför tunnelmynningen, försök 809.



Bild 4. Olika placeringar av cylinderladdningarna. Alla på 5 meters avstånd.

Tabell 8. Sammanfattning av tunnelförsöken vid etapp 8.

Test	Laddning [kg]	Avstånd [m]	Riktning/Höjd [v, u, cm]	Datum	Anmärkning
808	125 Prillit	10	-/-/90	99-06-16	Säckar
809	125 Prillit	5	-/-/90		Säckar
810	114 HE	10	90°/90°/90	99-06-17	Cylinder, stående
811	114 HE	5	90°/90°/90		Cylinder, stående
812	114 HE	5	120°/90°/90		Cylinder, lutar utåt
813	114 HE	5	150°/90°/90		Cylinder, lutar utåt
814	114 HE	5	180°/90°/90		Cylinder, liggande längs med
815	114 HE	5	60°/90°/90		Cylinder, lutar inåt
816	114 HE	5	-/150°/90	99-06-18	Cylinder, lutar åt vänster
817	114 HE	5	-/0°/90		Cylinder, liggande tvärs
818	125 Prillit	-2	-/-/90		Säckar
819	114 HE	-2	90°/90°/90	99-06-29	Cylinder, stående
820	114 HE	-2	150°/90°/90		Cylinder, lutar utåt
821	114 HE	-2	180°/90°/90		Cylinder, liggande längs med
822	114 HE	5	90°/90°/~90		Cylinder, stående på mark
823	114 HE	5	180°/90°/0		Cylinder, liggande längs på mark
824	114 HE	5	-/0°/0		Cylinder, liggande tvärs på mark
825	114 HE	10	90°/90°/0		Cylinder, stående på mark
826	114 HE	10	180°/90°/0	99-06-30	Cylinder, liggande längs på mark
827	114 HE	10	-/0°/0		Cylinder, liggande tvärs på mark
828	114 HE	5	0°/90°/0		Cylinder, liggande längs på mark, antändes närmast tunnelmynningen

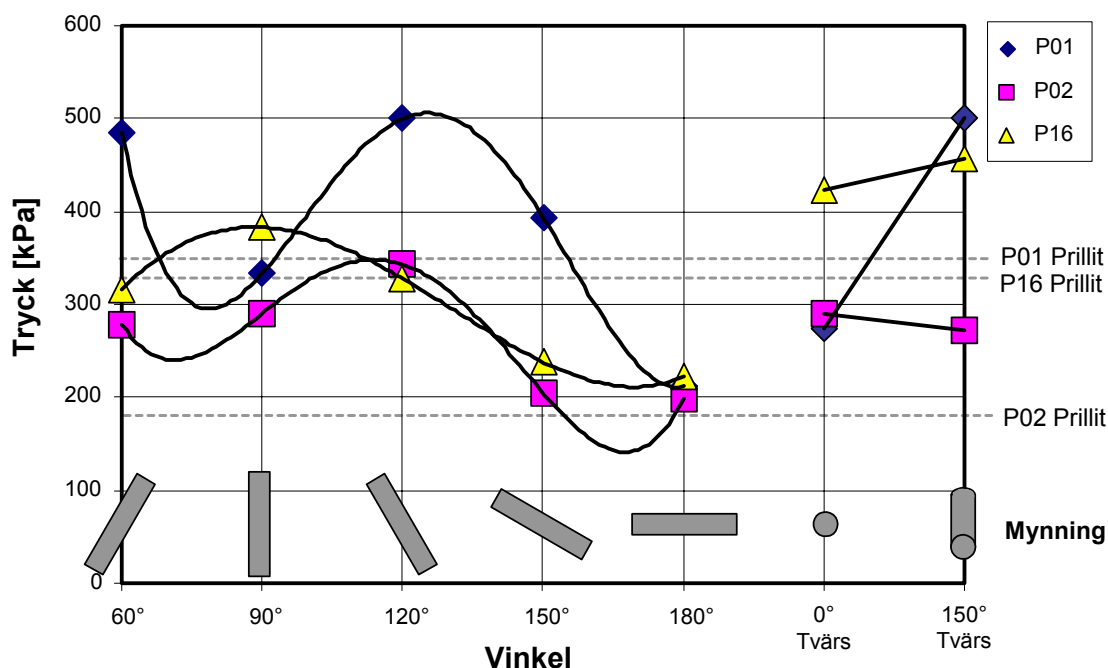
Resultat från tunnelförsöken

Allmänt om utvärdering

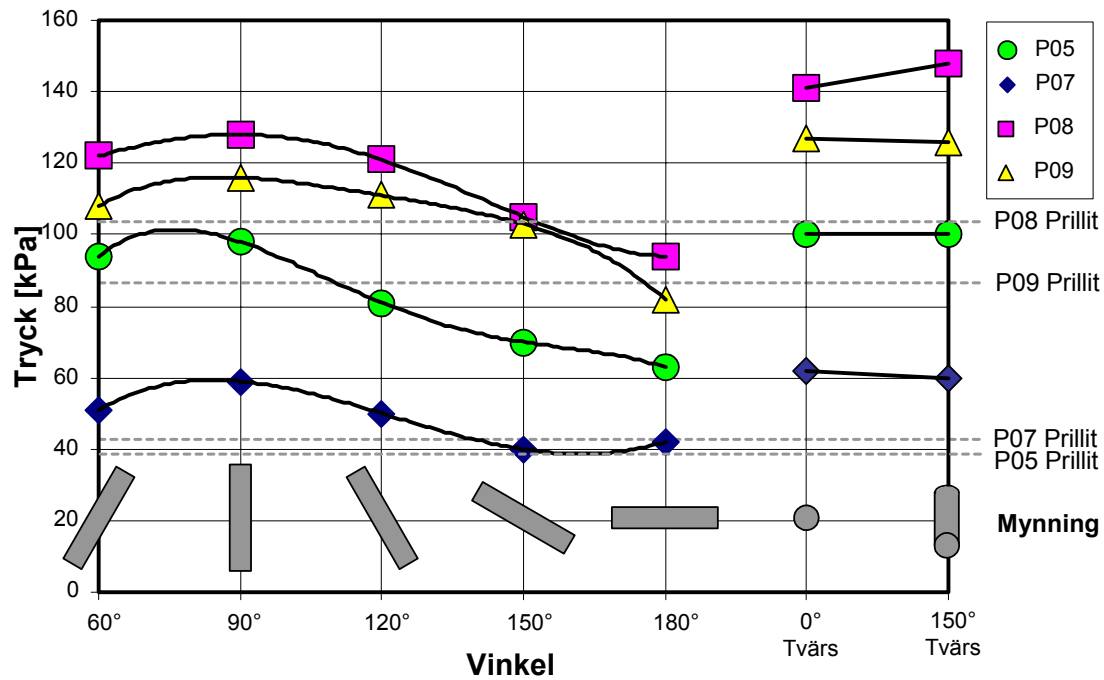
Bara 5 m avståndet är behandlat i följande utvärdering. Maximalt värde är taget utan någon filtrering. Impulsdensitetens maxvärde har tagits vid den första övertrycksfasen. Strecken mellan punkterna när laddningar i olika vinklar presenteras är en anpassning med ett 4:e grads polynom. Det ligger inget vetenskapligt bakom detta utan används bara för att binda ihop linjerna. Bara ett försök är utfört för varje försöksuppställning. Trycket i närområdet P01 och även delvis på P02, sett i tidsplanet, varierar mycket mellan de olika försöken. Trycken längre bort har ett betydligt enhetligare utseende. Tunneln ”jämnar” ut effekterna av lutningar och placeringar av laddningarna.

Laddningarna i olika vinklar

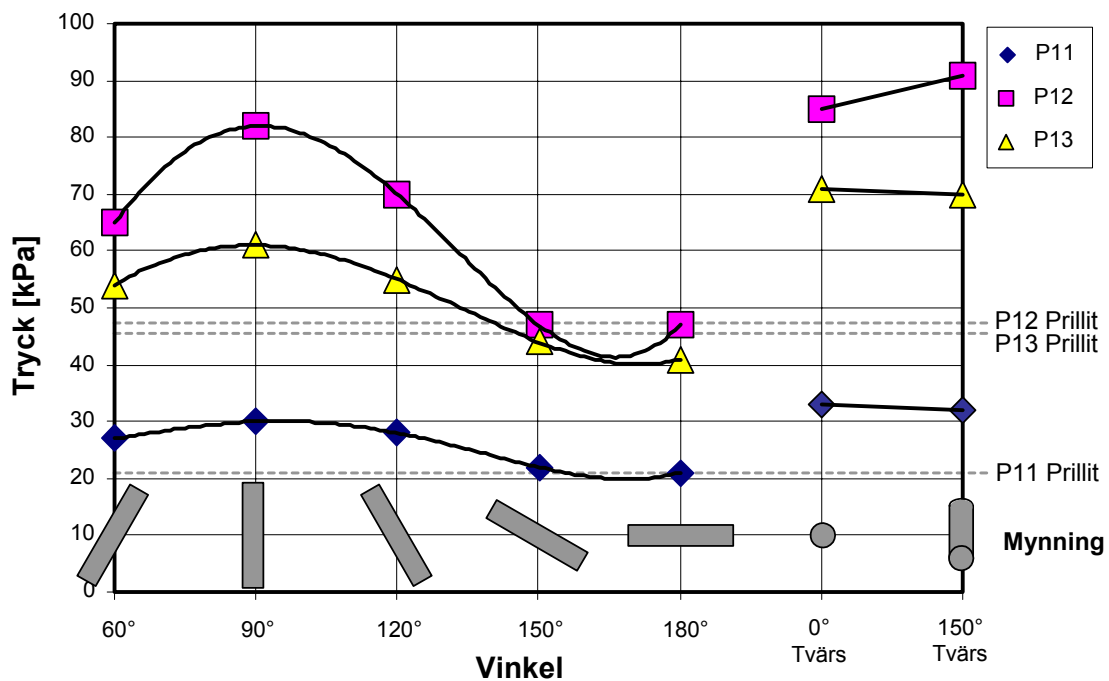
När man bara studerar maxtrycket eller maximpulsdensiterna ser man klart en symmetri över 60°-90°-120°. Maxtrycken varierar mellan 1.5-2 ggr mellan lägsta och högsta maxtryck. Se Figur 7-Figur 9. Referensladdningen av Prillit överensstämmer bäst med rörladdningen i 150° och 180° lutning.



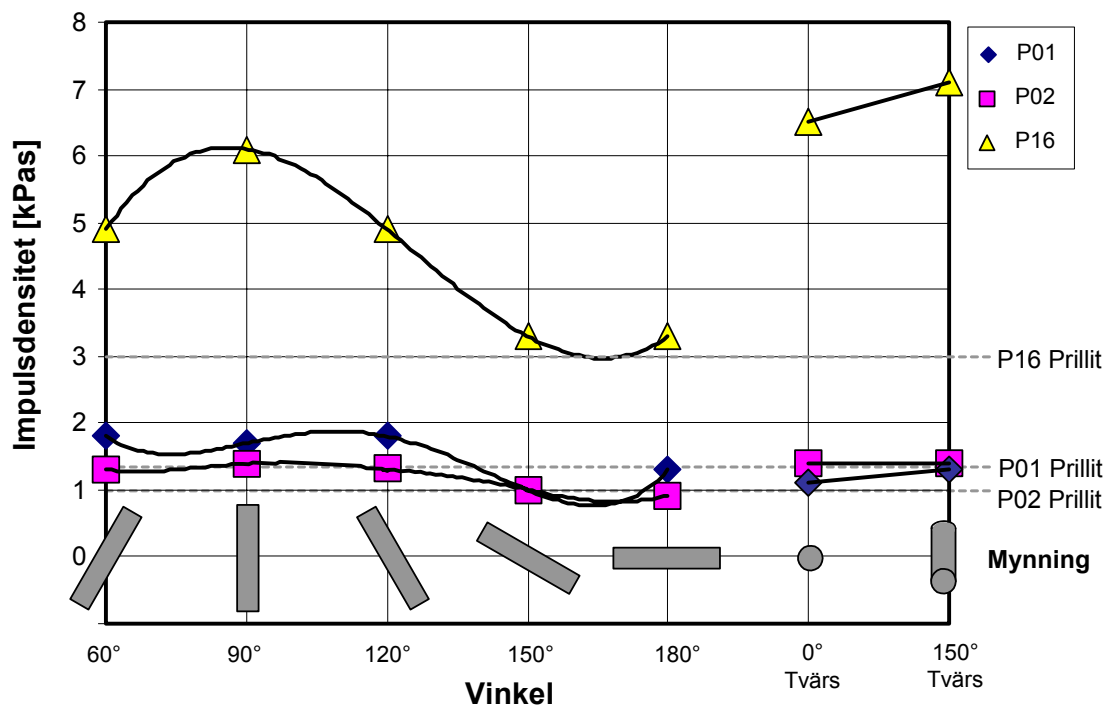
Figur 7. Tryckets beroende av vinkel på laddningen. P01, P02 och P16, avstånd 5m, tyngdpunkt 90 cm.



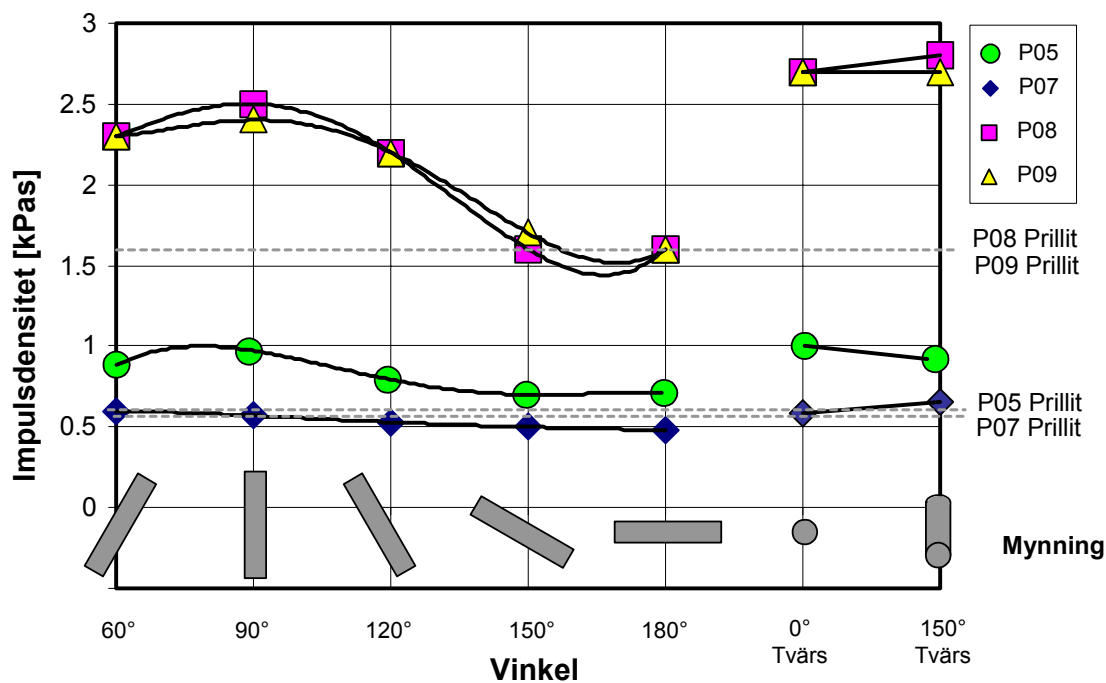
Figur 8. Tryckets beroende av vinkel på laddningen. P07, P08 och P09, avstånd 5 m, tyngdpunkt 90 cm.



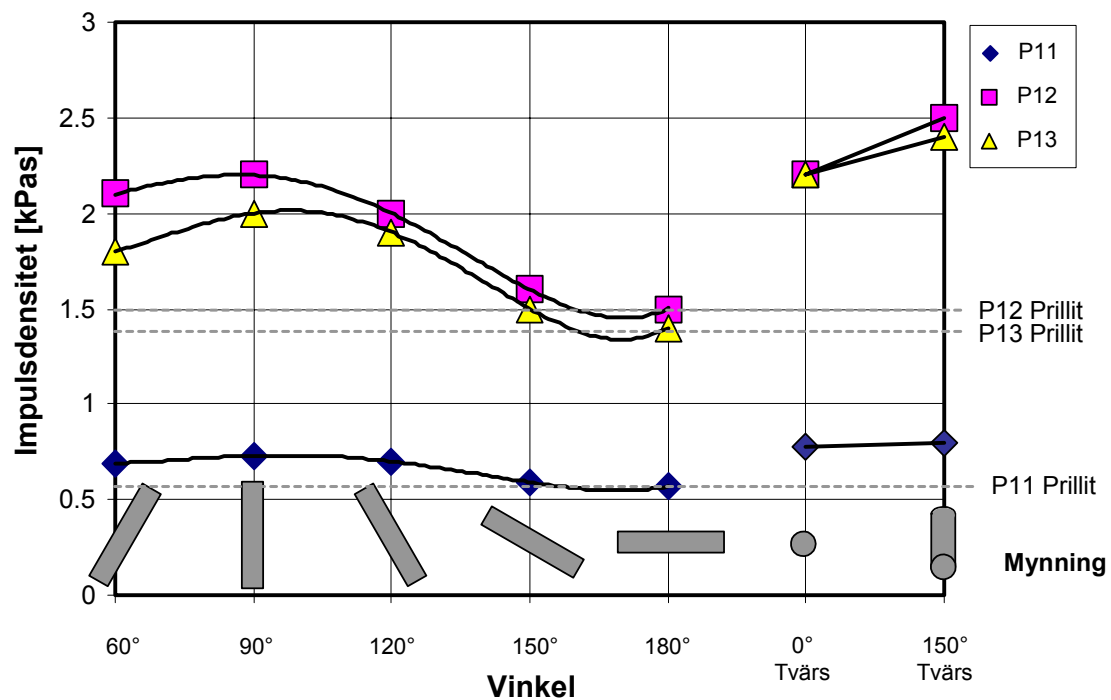
Figur 9. Tryckets beroende av vinkel på laddningen. P11, P12 och P13, avstånd 5 m, tyngdpunkt 90 cm.



Figur 10. Impulsdensitetens beroende av vinkel på laddningen. P01, P02 och P16, avstånd 5 m, tyngdpunkt 90 cm.



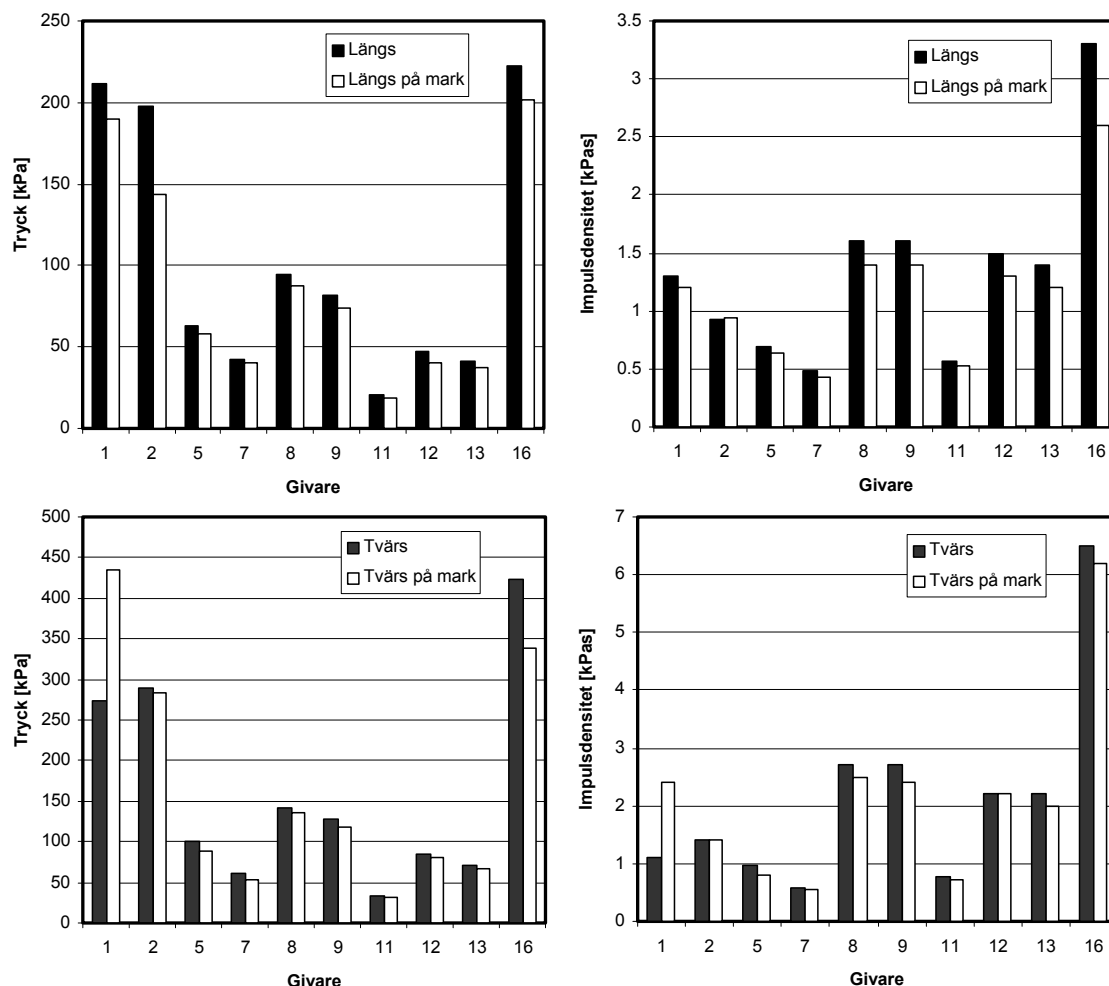
Figur 11. Impulsdensitetens beroende av vinkel på laddningen. P07, P08 och P09, avstånd 5m, tyngdpunkt 90 cm.



Figur 12. Impulsdensitetens beroende av vinkel på laddningen. P11, P12 och P13, avstånd 5m, tyngdpunkt 90 cm.

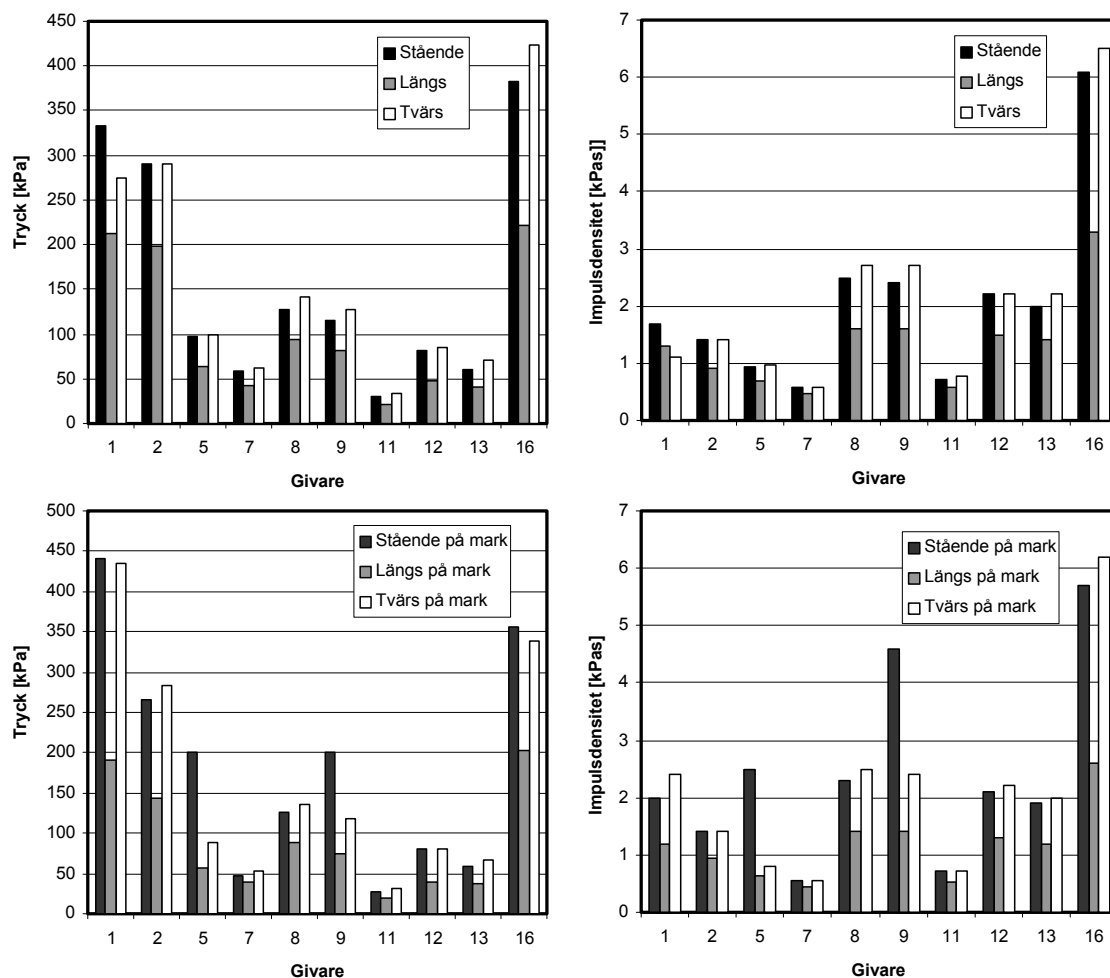
Laddningarna på mark eller i ställning

I jämförelse mellan att ha laddningen direkt på mark eller med tyngdpunkten 90 cm över marken ger en högre tyngdpunkt endast något högre maxtryck/maximpulser. Som tidigare nämnts ser i närområdet (P01) tid-tryckkurvorna mycket olika ut.



Figur 13. Jämförelse mellan laddningar direkt på mark och med tyngdpunkten 90 cm ovanför mark, avstånd 5m.

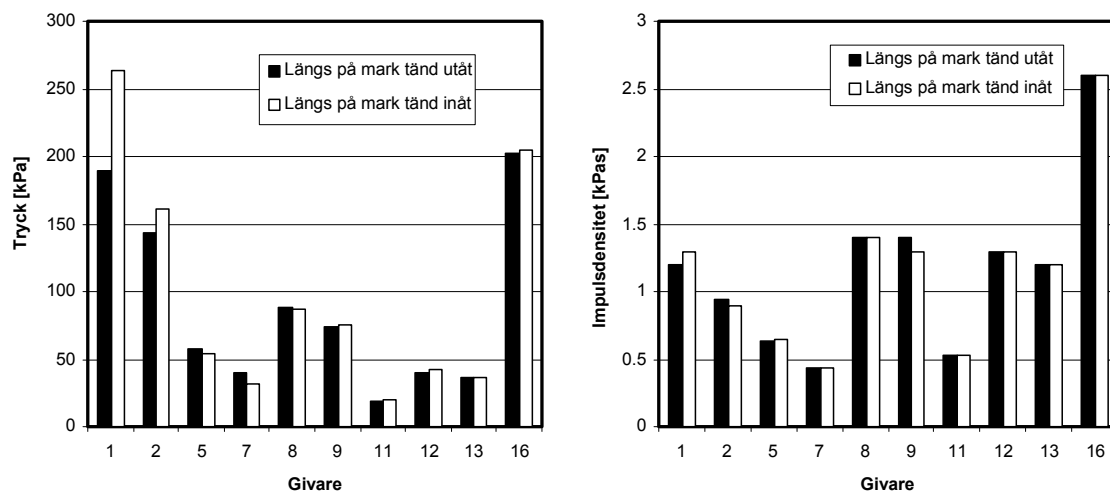
I Figur 14 visas hur tryck och impulsmaximum varierar om rörladdningen står, ligger tvärs, eller ligger på marken längs med tunnelriktningen. Stående och tvärs ger ungefär samma resultat. Längs med ger alltid lägre värden.



Figur 14. Jämförelse mellan laddningar stående, längs med och tvärs huvudtunnelriktningen, direkt på mark och med tyngdpunkten 90 cm ovanför mark, avstånd 5m.

Tändning i olika ändar

Att tända en längsmed liggande laddning i olika ändar visar att maxtryck/maximpuls inte nämnvärt påverkas



Figur 15. Jämförelse mellan att tända i olika ändar av laddningen, laddningar direkt på mark, avstånd 5m.

Tabeller över front och maxtryck

Tabell 9. Maximalt tryck [kPa].

Test/Givare	1	2	5	7	8	9	11	12	13	16
808	194	129	72	27	69	56	15	34	27	155
809	349	178	39	43	102	86	21	47	45	236
810	227	163	57	41	98	91	20	44	38	215
811	333	290	98	59	128	116	30	82	61	383
812	500	343	81	50	121	111	28	70	55	328
813	394	205	70	40	105	103	22	47	44	238
814	212	198	63	42	94	82	21	47	41	222
815	485	279	94	51	122	108	27	65	54	316
816	500	272	100	60	148	126	32	91	70	457
817	274 ¹	290	100	62	141	127	33	85	71	423
818	1196	573	101	57	164	123	36	99	73	429
819	1076	447 ¹	190	165	275	223	68	167	133	774
820	1551	741	178	107	255	194	59	151	124	800
821	805	549	192	99	245	174	53	147	121	717
822	441	266	200 ²	48	126	200	28	80	60	357
823	190	144	58	40	88	74	19	40	37	202
824	436	283	88	53	136	119	31	81	66	339
825	170	132	52	33	85	73	18	42	38	199
826	120	108	35	23	70	58	14	31	27	152
827	300	147	58	32	104	88	21	49	47	231
828	264	161	54	32	87	75	20	42	37	205

¹ Svårtolkad

² Överstyr

Tabell 10. Impulstäthet [kPas].

Test/Givare	1	2	5 ¹	7 ¹	8 ¹	9 ¹	11 ¹	12 ¹	13 ¹	16
808	0.90	0.70	0.79	0.40	1.1	1.0	0.43	1.0	0.87	1.8
809	1.3	1.0	0.59	0.55	1.6	1.6	0.57	1.5	1.4	3.0
810	1.2	0.99	0.72	0.48	1.5	1.5	0.54	1.4	1.2	2.8
811	1.7	1.4	0.95	0.57	2.5	2.4	0.73	2.2	2.0	6.1
812	1.8	1.2	0.77	0.53	2.2	2.2	0.70	2.0	1.9	4.9
813	1.0	1.0	0.68	0.50	1.6	1.7	0.59	1.6	1.5	3.3
814	1.3	0.92	0.69	0.48	1.6	1.6	0.57	1.5	1.4	3.3
815	1.8	1.3	0.86	0.60	2.3	2.3	0.69	2.1	1.8	4.9
816	1.3	1.4	0.90	0.65	2.8	2.7	0.80	2.5	2.4	7.1
817	1.1	1.4	0.98	0.59	2.7	2.7	0.78	2.2	2.2	6.5
818	1.8	1.2	0.60	0.67	2.8	2.8	0.80	2.4	2.2	6.7
819	2.1	1.7 ²	0.73	0.87	6.3	6.4	1.0	5.3	4.3	19
820	3.8 ²	1.4	0.69	0.82	5.0	5.0	0.90	4.3	3.6	20
821	3.9 ²	1.4	0.61	0.81	4.8	4.8	0.88	4.0	3.3	18
822	2.0	1.4	2.5 ³	0.55	2.3	4.6	0.72	2.1	1.9	5.7
823	1.2	0.94	0.64	0.43	1.4	1.4	0.53	1.3	1.2	2.6
824	2.4	1.4	0.80	0.55	2.5	2.4	0.73	2.2	2.0	6.2
825	1.3	0.88	0.63	0.41	1.4	1.3	0.52	1.4	1.1	2.5
826	0.93	0.68	0.55	0.33	0.97	0.93	0.41	0.96	0.86	1.7
827	1.5	0.99	0.69	0.49	1.6	1.6	0.56	1.5	1.5	3.0
828	1.3	0.89	0.65	0.44	1.4	1.3	0.52	1.3	1.2	2.6

¹ Värdet avser första pulstoppen

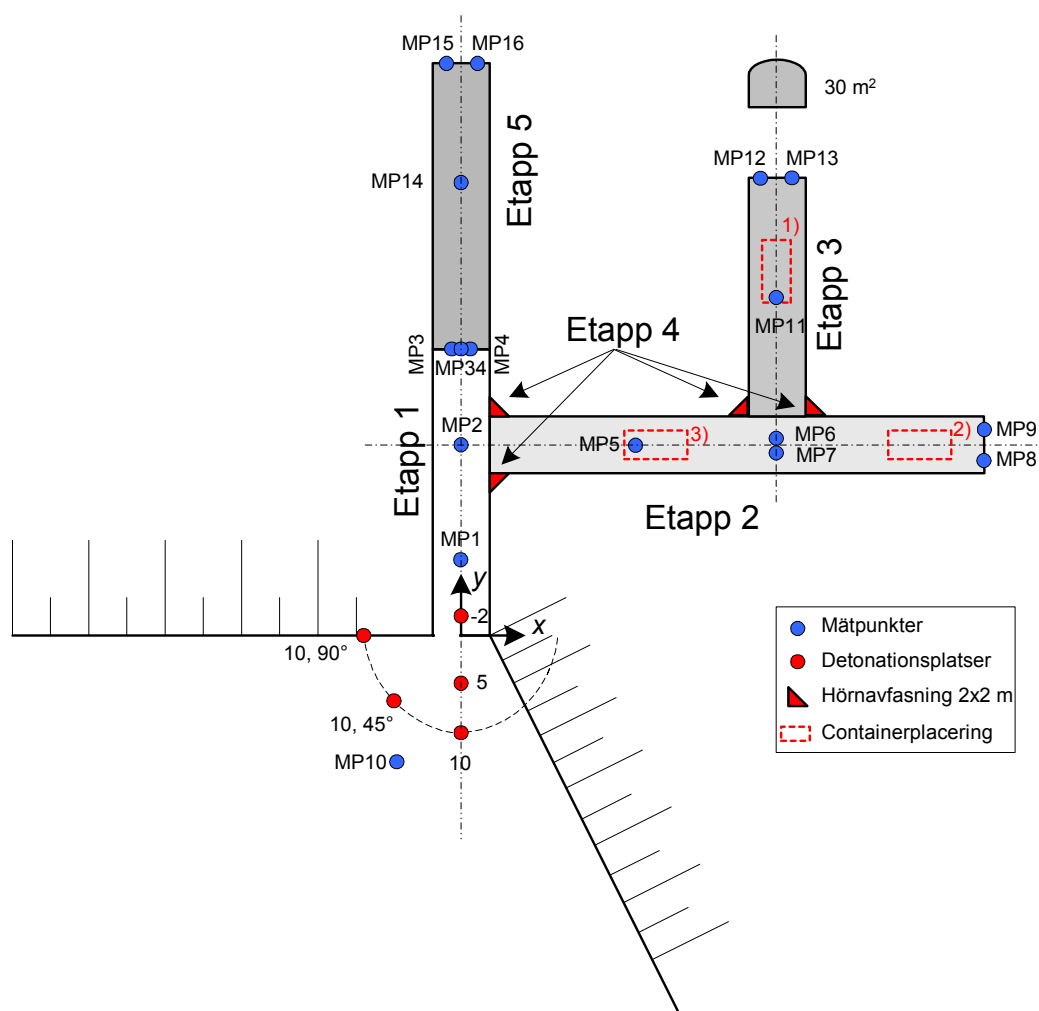
² Svårtolkad

³ Överstyr

Tidigare etapper

Tabell 11. Sammanfattning av tidigare genomförda etapper

Etapp	År	Geometri/försökstyp	Variabler	Givare
1	1995	30 m rak tunnel	Detonationsplats och storlek	1, 2, 3, 4
2	1996	50 m ny tunnel t.h.	Detonationsplats och storlek	Etapp 1+ 5, 6, 7, 8, 9, 10
3	1996	25 m ny tunnel t.v.	Detonationsplats och storlek	Etapp 2+11, 12, 13 ej 6
4	1997	Avfasning av hörn	Detonationsplats och storlek	Etapp 3
5	1997	Förlängning av huvudtunnel med 30 m	Detonationsplats och storlek	1, 2, 34, 5, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16
6	1998	Tester utanför tunneln	Infrastruktur som skydd: vägg, slänt, viadukt	
7	1998	Inverkan av container	Detonationsplats, storlek och container placering	5, 7, 8, 9, 12, 13, 15, 16, C1-C5
8	1999	Olika typer av laddningar	Laddningens form, riktning och avstånd	1, 2, 5, 7, 8, 9, 11, 12, 13, 14, 16



Figur 16. Översikt över försöksplats.

Tabell 12. Översikt över givare i alla etapper

Givare	Typ	x	y	h	Anmärkning
1	Side-on	0	10	0	
2	Side-on	0	20	0	
3	Reflektion	-2	30	1.5	
4	Reflektion	2	30	1.5	
34	Side-on	0	30	0.5	
5	Side-on	18	20	0.5	“Lollipop”
6	Side-on	33	20	0	
7	Side-on	33	20	0.5	“Lollipop”
8	Reflektion	53	18	1.5	
9	Reflektion	53	22	1.5	
10	Side-on			0.5	“Lollipop”
11	Side-on	33	35.5	0.5	“Lollipop”
12	Reflektion	31	48	1.5	
13	Reflektion	35	48	1.5	
14	Side-on	0	46.95	0 och 1.5	
15	Reflektion	-2	60.5	1.5	
16	Reflektion	2	60.5	1.5	
C1	Side-on				Mitt framsida container
C2	Side-on				Mitt höger långsida container
C3	Side-on				Mitt vänster långsida container
C4	Side-on				Mitt baksida container
C5	Side-on				Mitt tak container

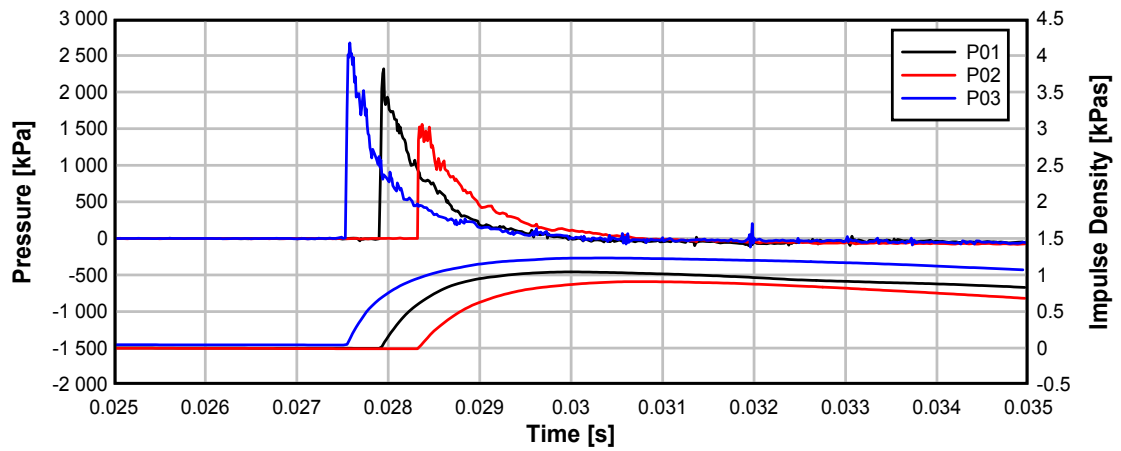
Referenser

- [1] Carlberg Anders, *Utformning av bergtunnlar. Etapp 1*, FOA-D—96-0023-2.6—SE, Februari 1996
- [2] Carlberg Anders, *Utformning av bergtunnlar. Etapp 2 och 3*, FOA-R—97-00467-311_SE, Mars 1997
- [3] Carlberg Anders, Eriksson Siwert, *Utformning av bergtunnlar, Etapp 4*, FOA-R—99-01030-311—SE, Februari 1999
- [4] Carlberg Anders, Eriksson Siwert, *Utformning av bergtunnlar. Etapp 5*, FOA-R—99-01197-311—SE, Augusti 1999
- [5] Carlberg Anders, Eriksson Siwert, *Utformning av bergtunnlar. Etapp 6*, Kommande FOI rapport
- [6] Carlberg Anders, Eriksson Siwert, *Utformning av bergtunnlar. Etapp 7*, FOA-R—00-01420-311—SE, Januari 2000

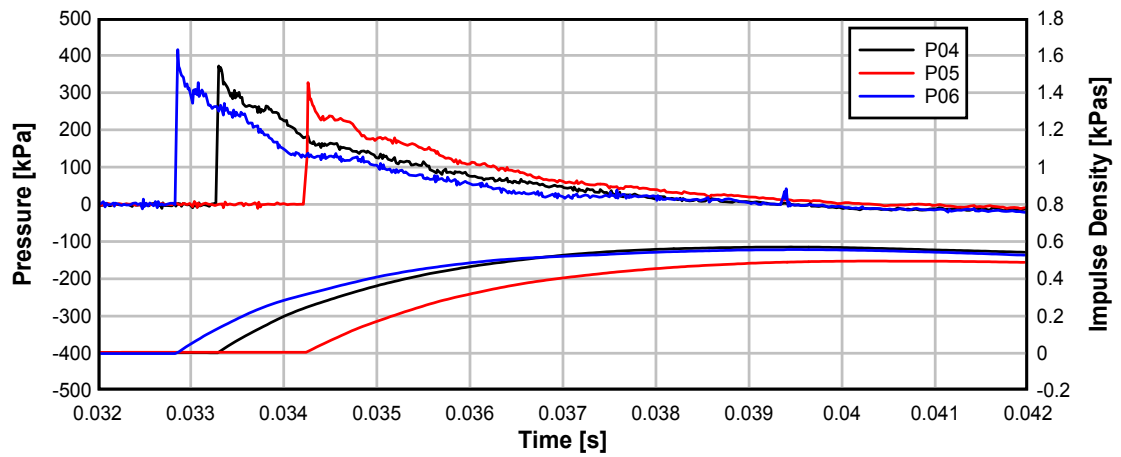
Registreringar

Test 801, 125 kg Prillit

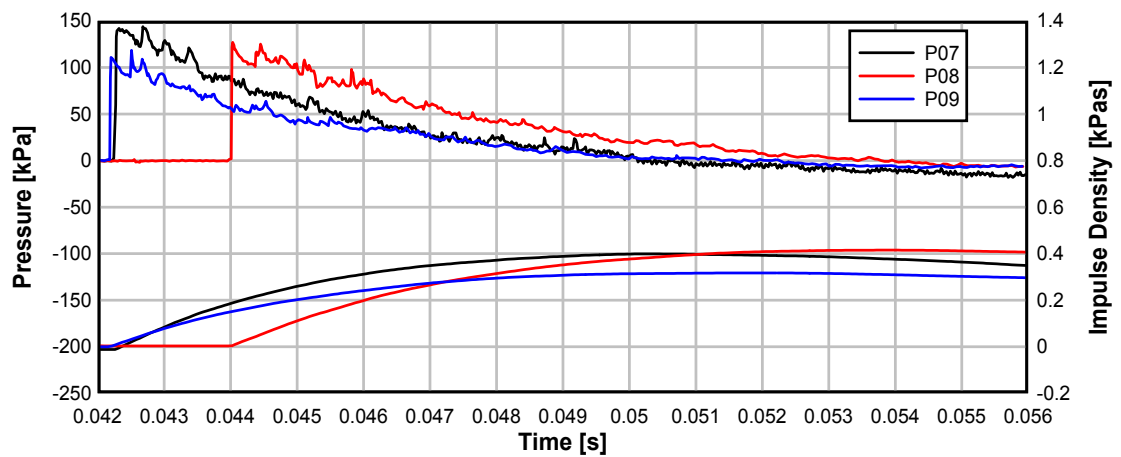
TE-8 801



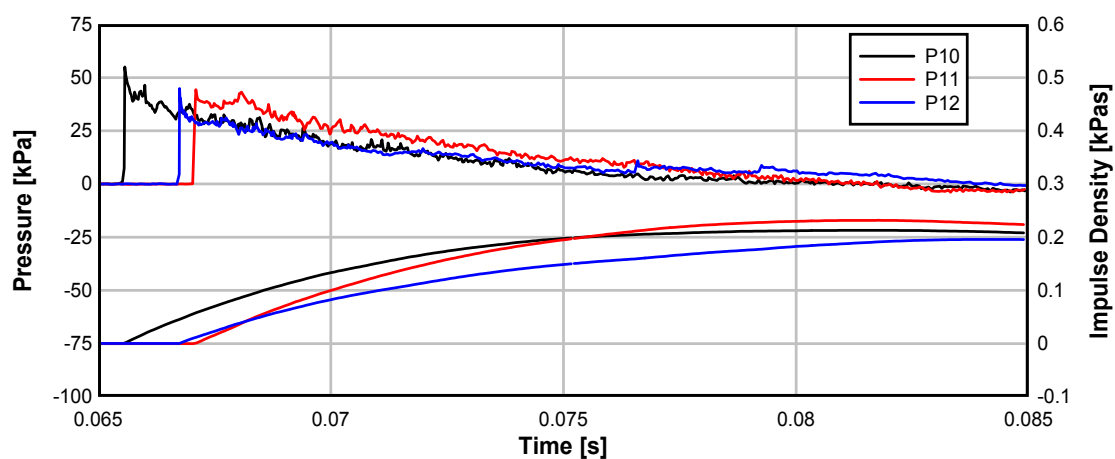
TE-8 801



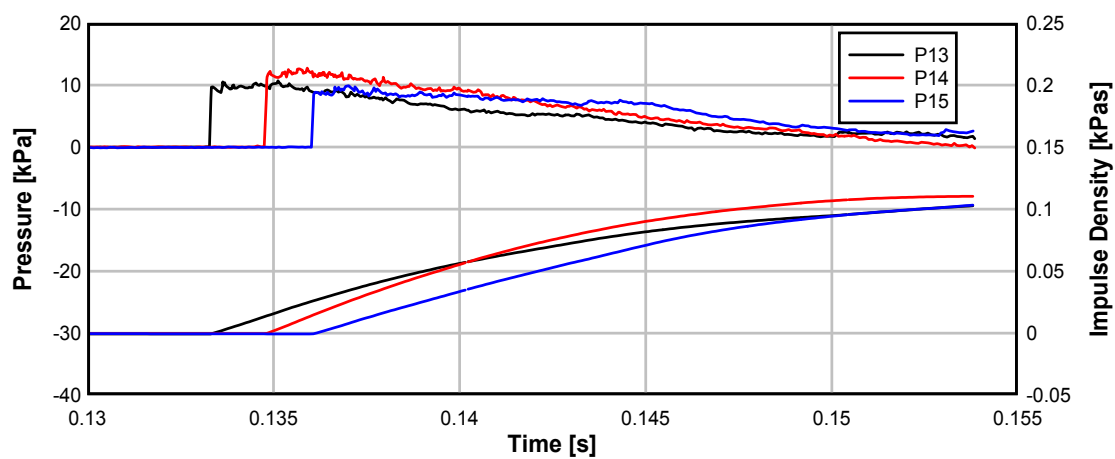
TE-8 801



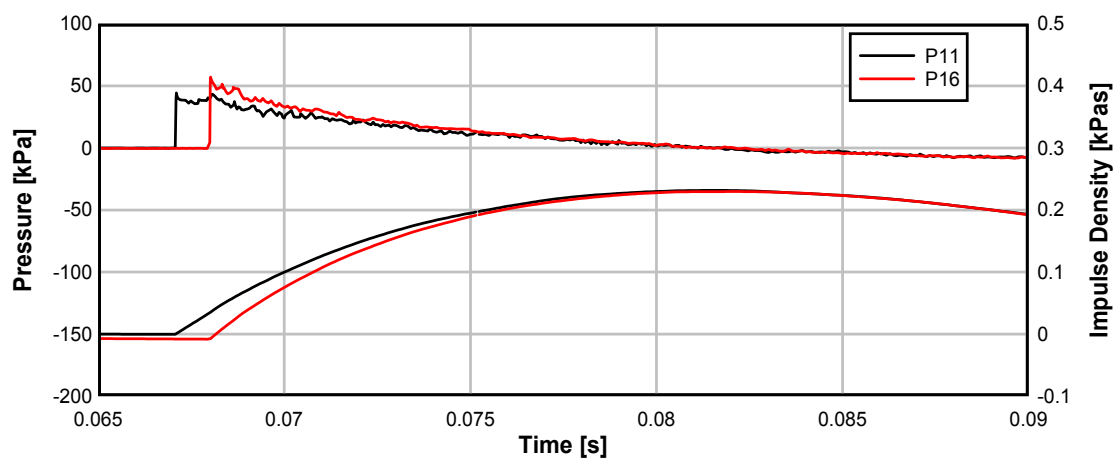
TE-8 801

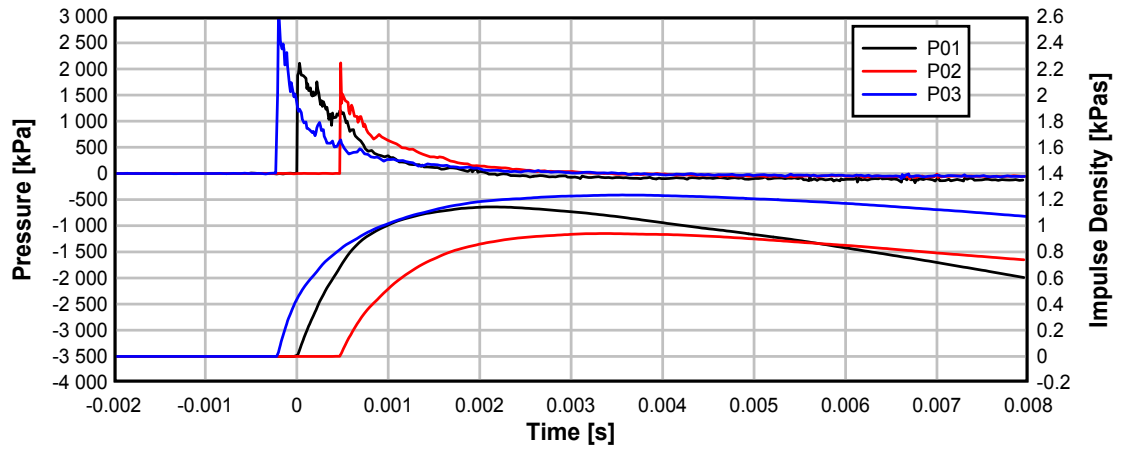
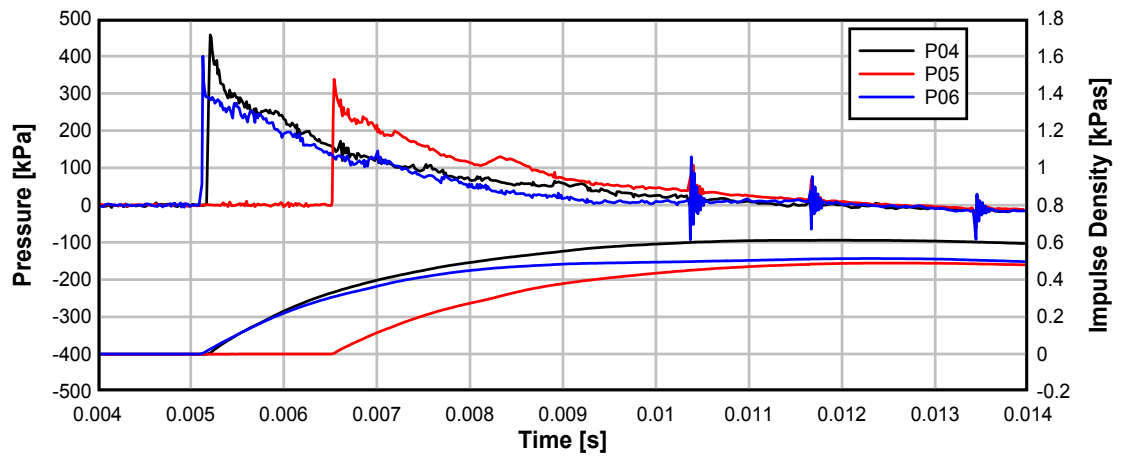
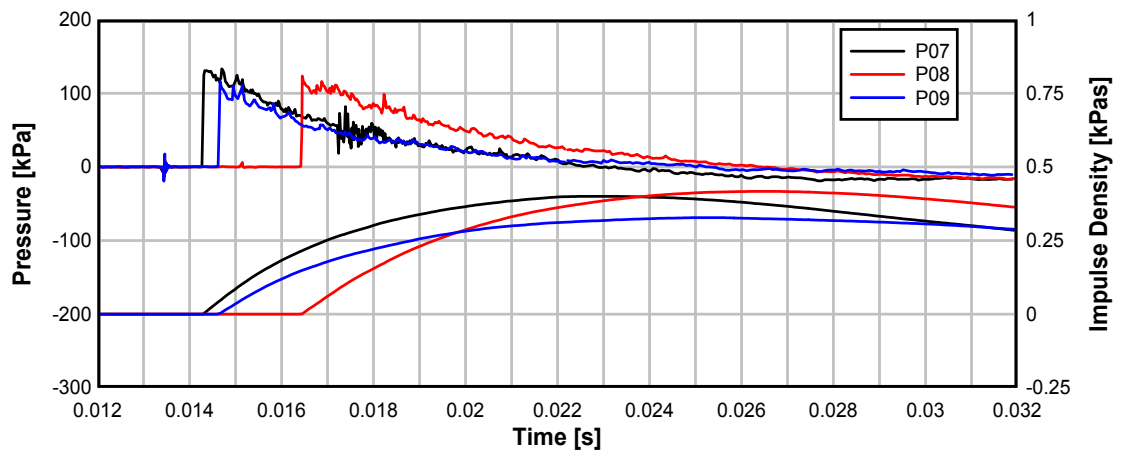


TE-8 801

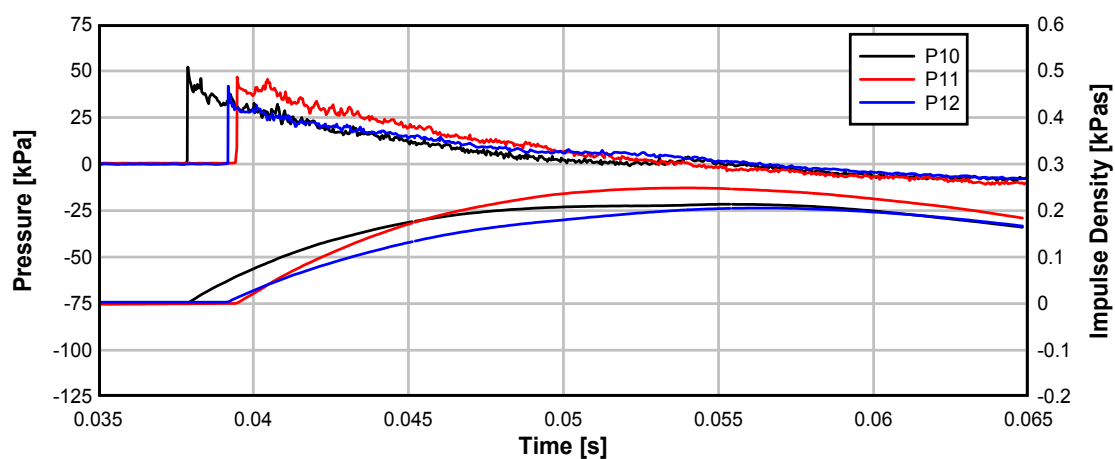


TE-8 801

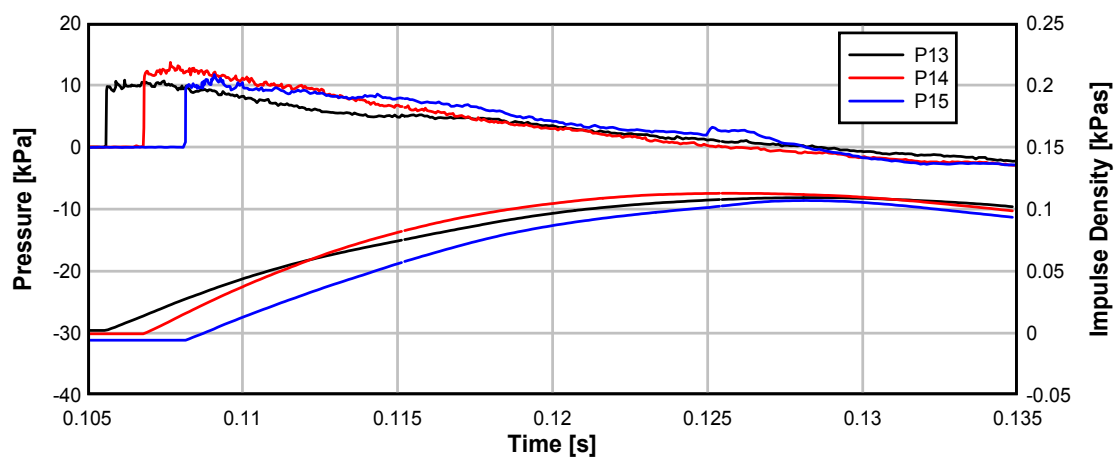


Test 802: 125 kg Prillit**TE-8 802****TE-8 802****TE-8 802**

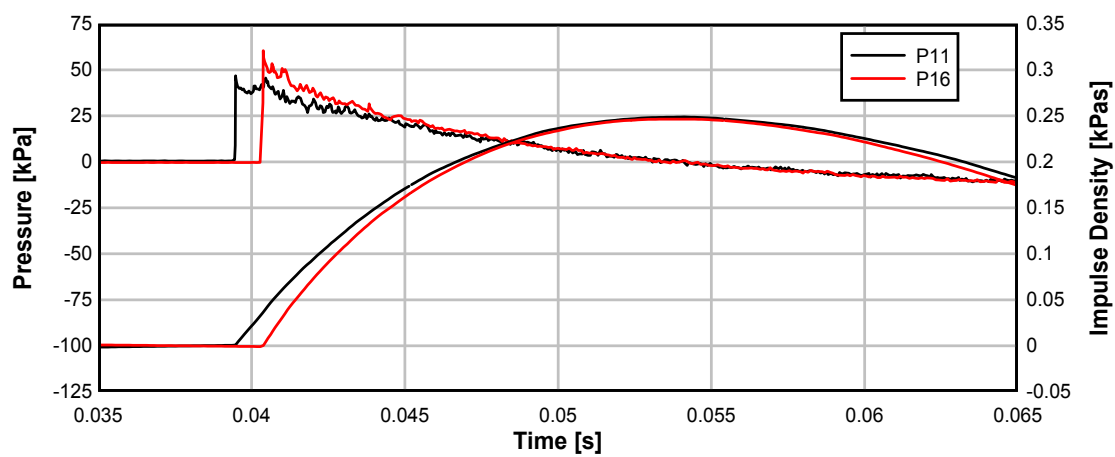
TE-8 802



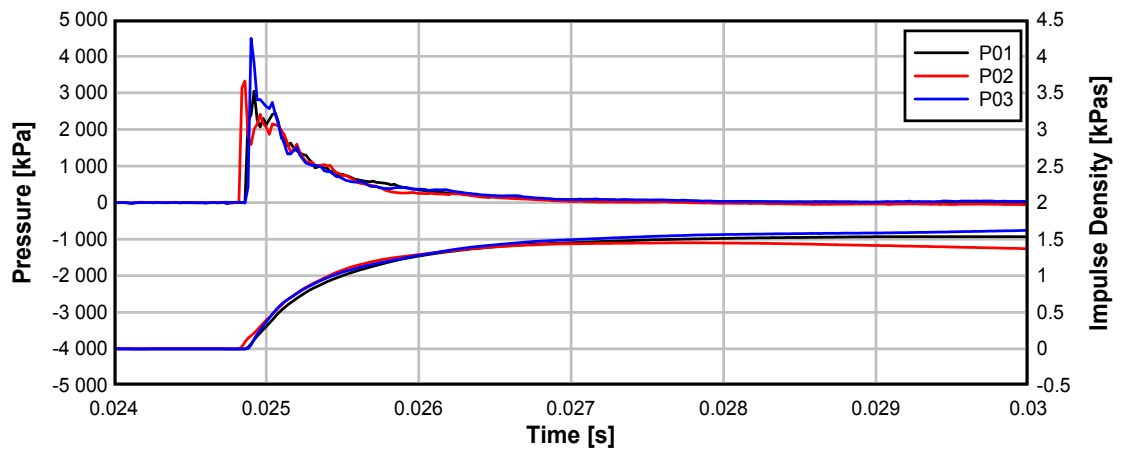
TE-8 802



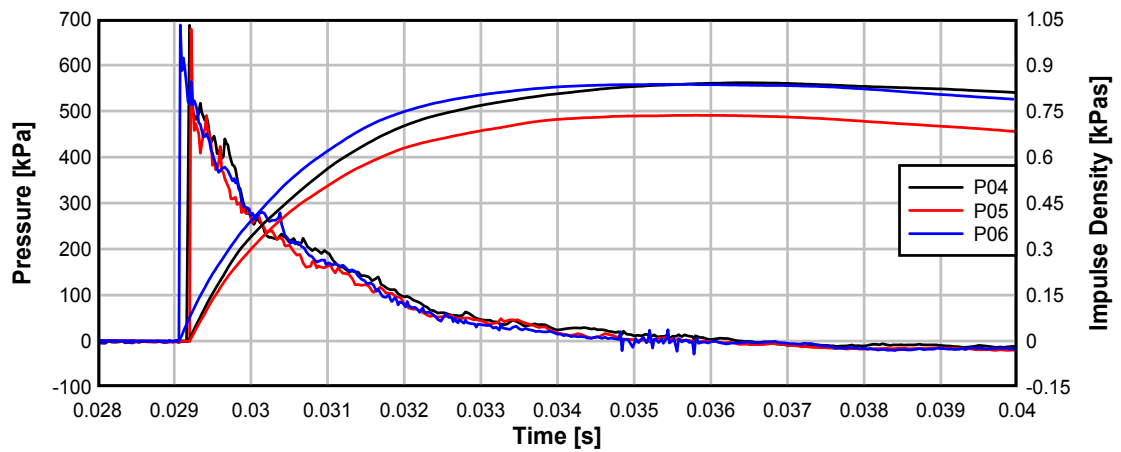
TE-8 802



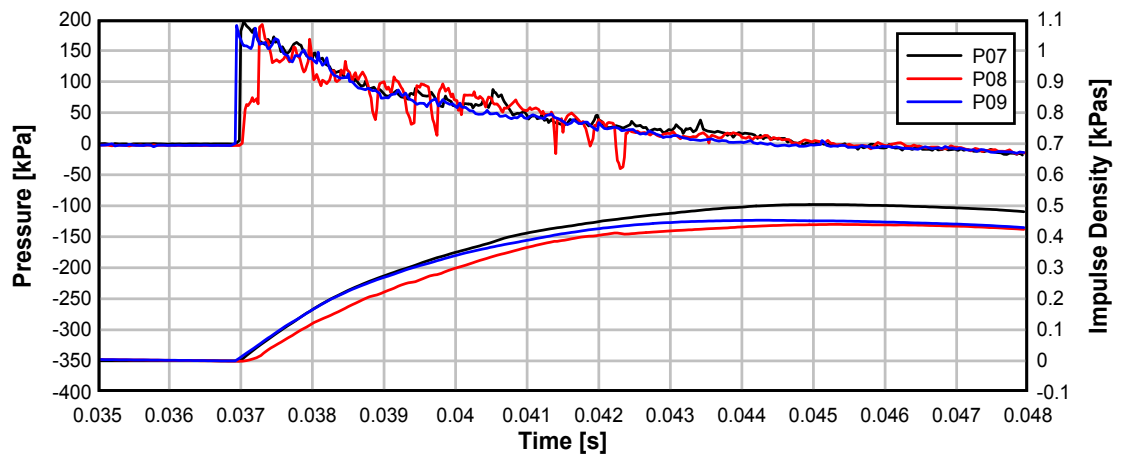
Test 803: 114 kg Hexotonal i papprör
TE-8 803

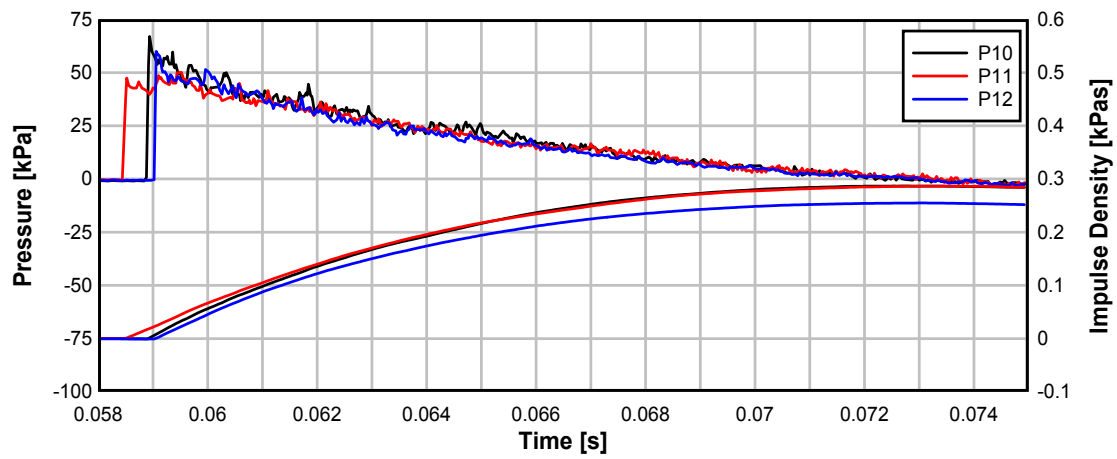
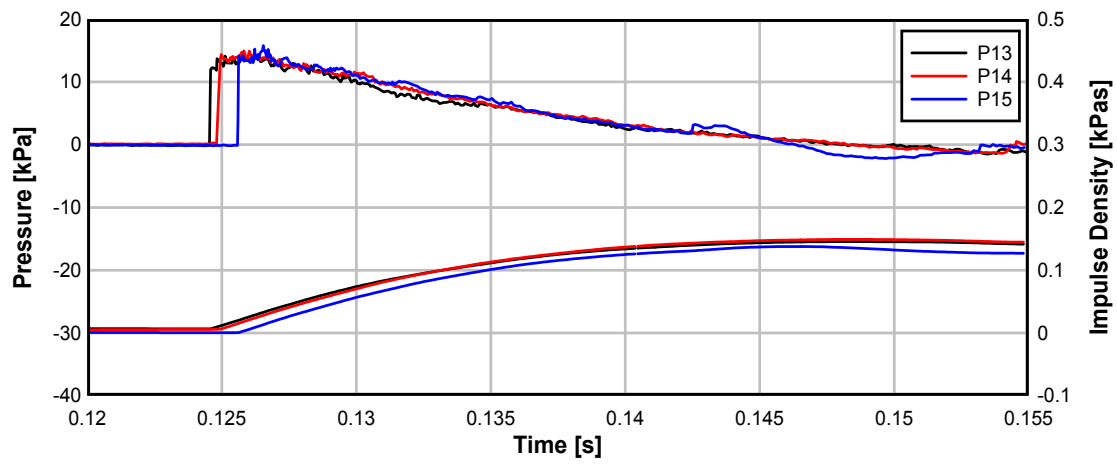
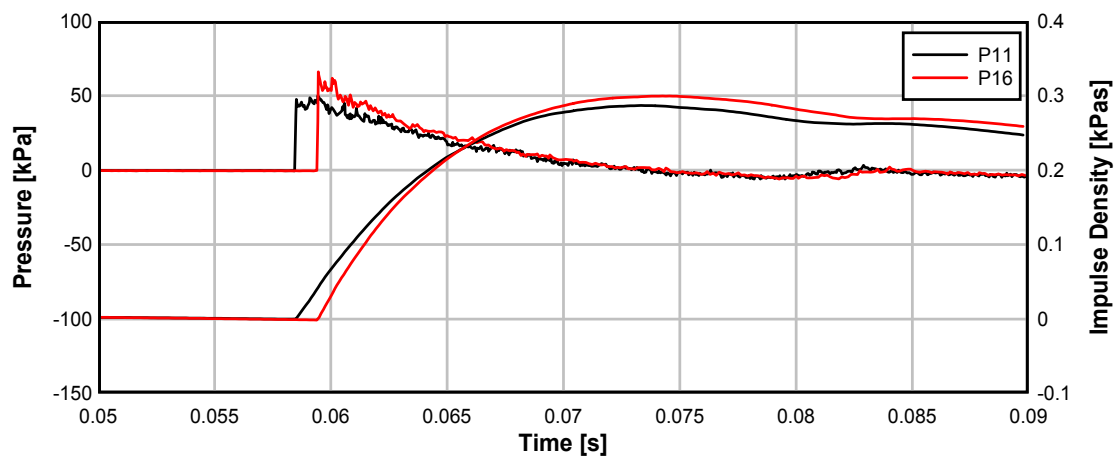


TE-8 803

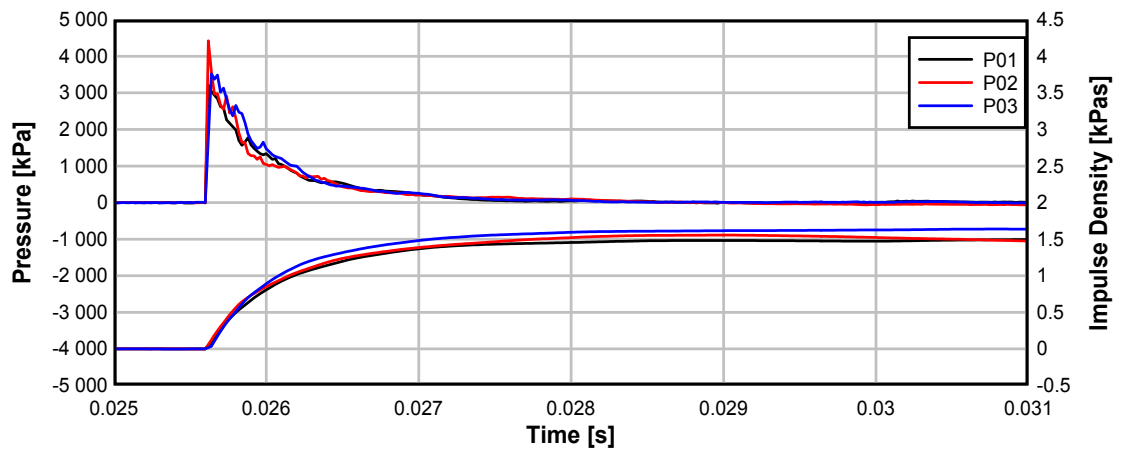


TE-8 803

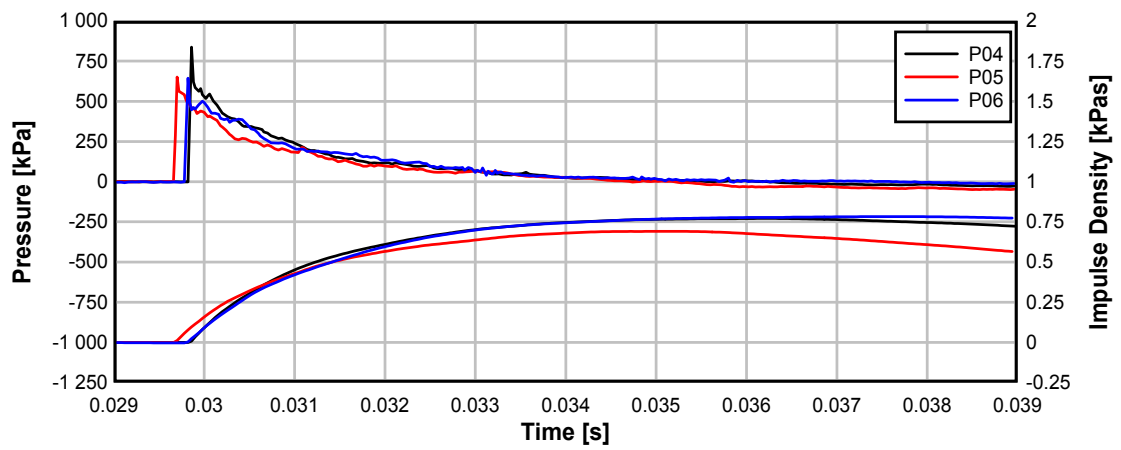


TE-8 803**TE-8 803****TE-8 803**

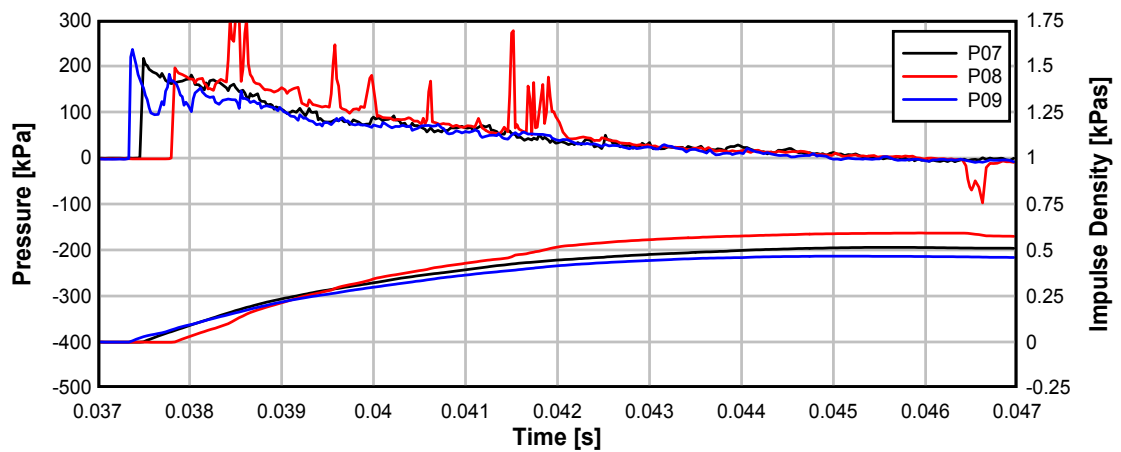
Test 804: 114 kg Hexotonal i papprör
TE-8 804



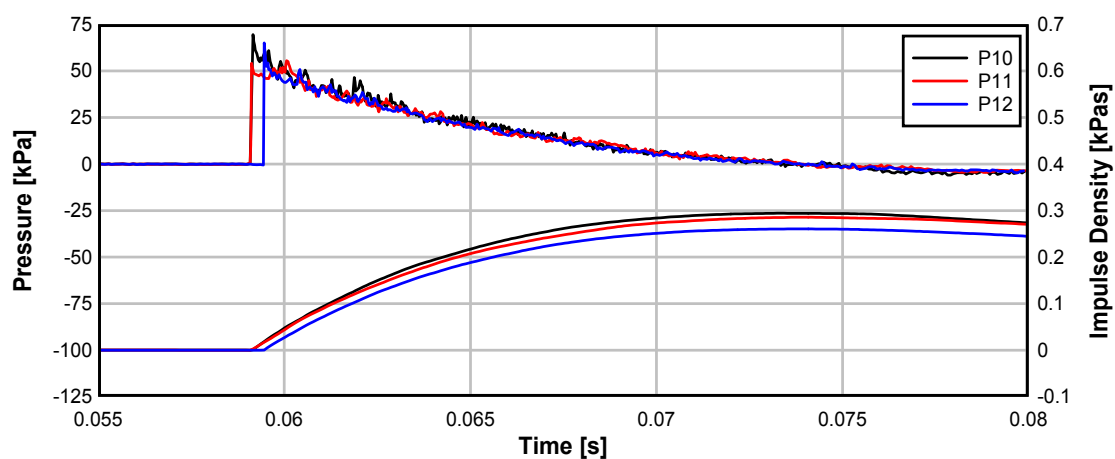
TE-8 804



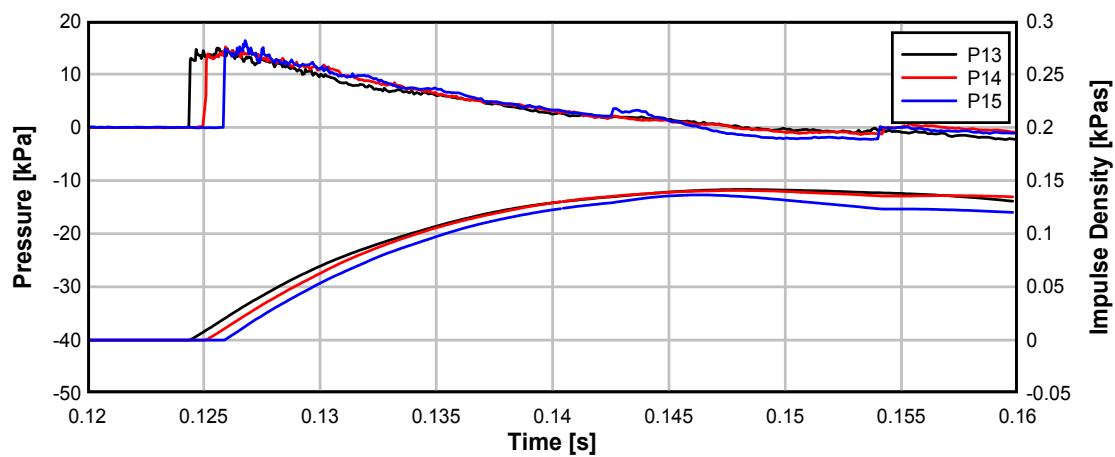
TE-8 804



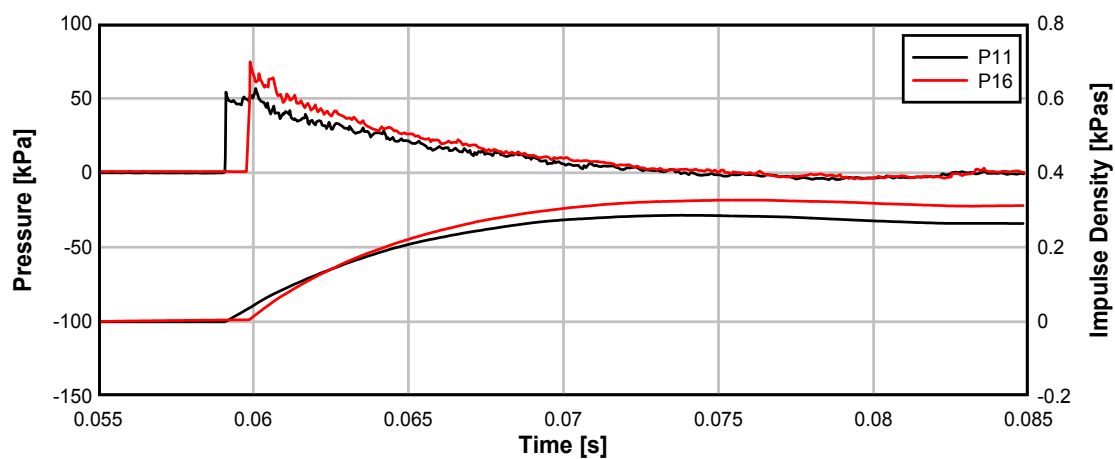
TE-8 804

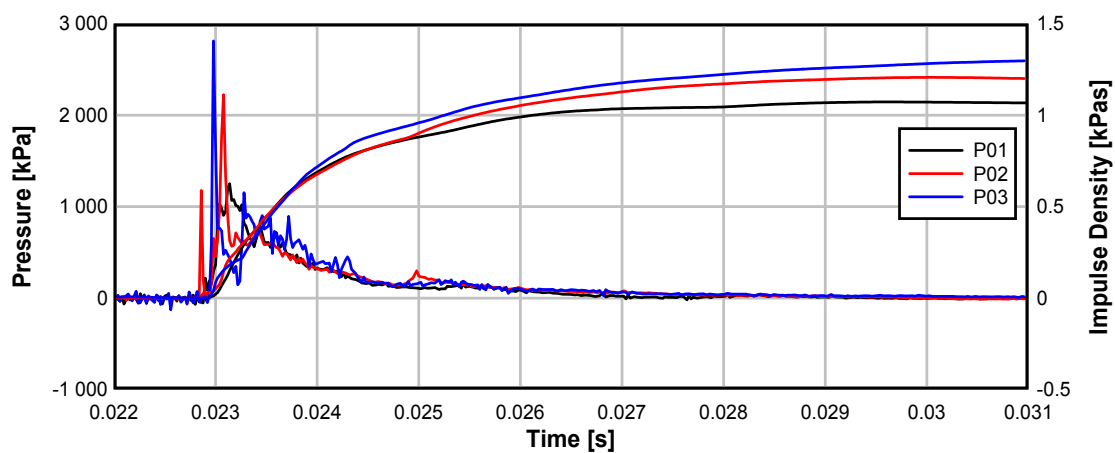
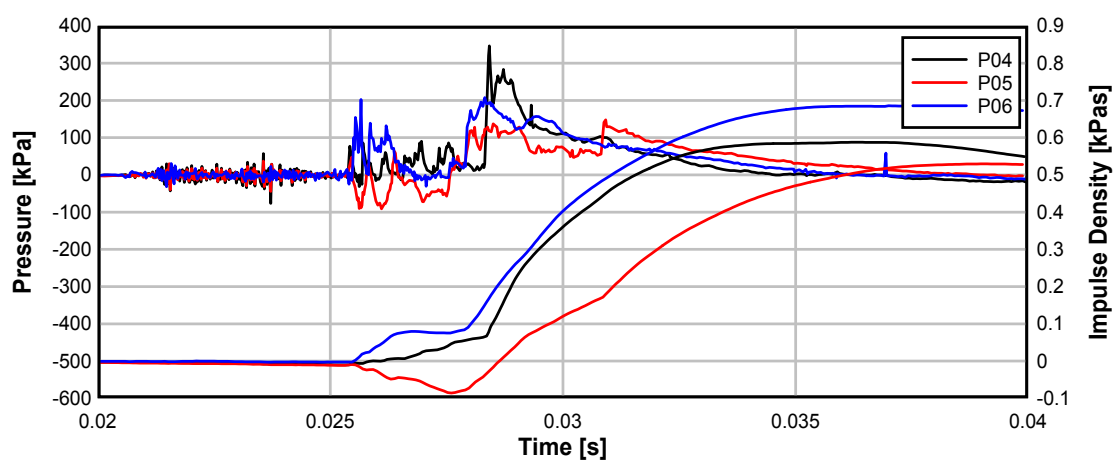
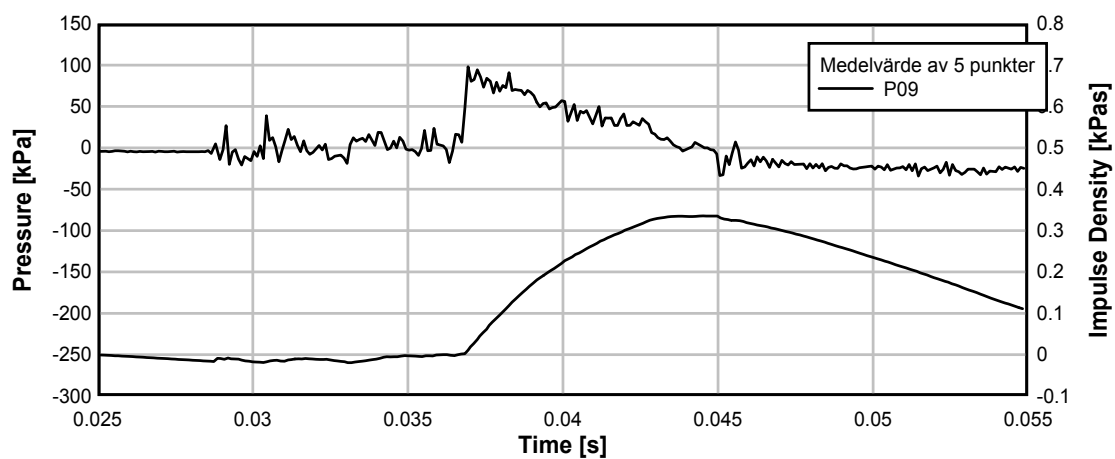


TE-8 804

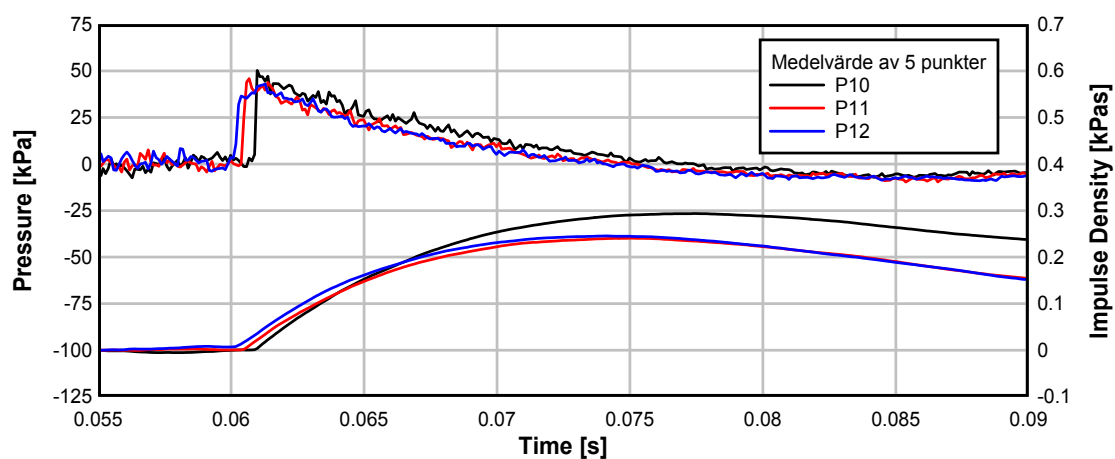


TE-8 804

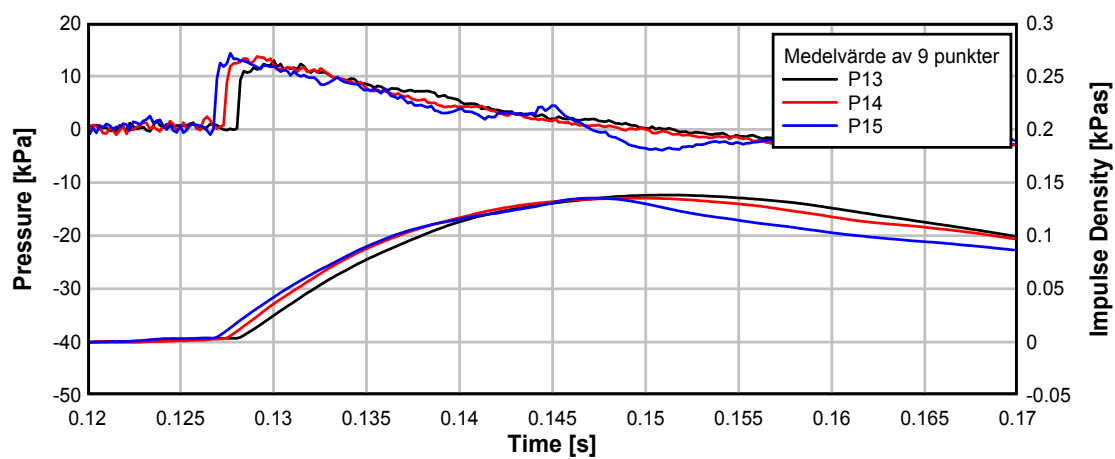


Test 805: 114 kg Hexotonal i stålrör**TE-8 805****TE-8 805****TE-8 805**

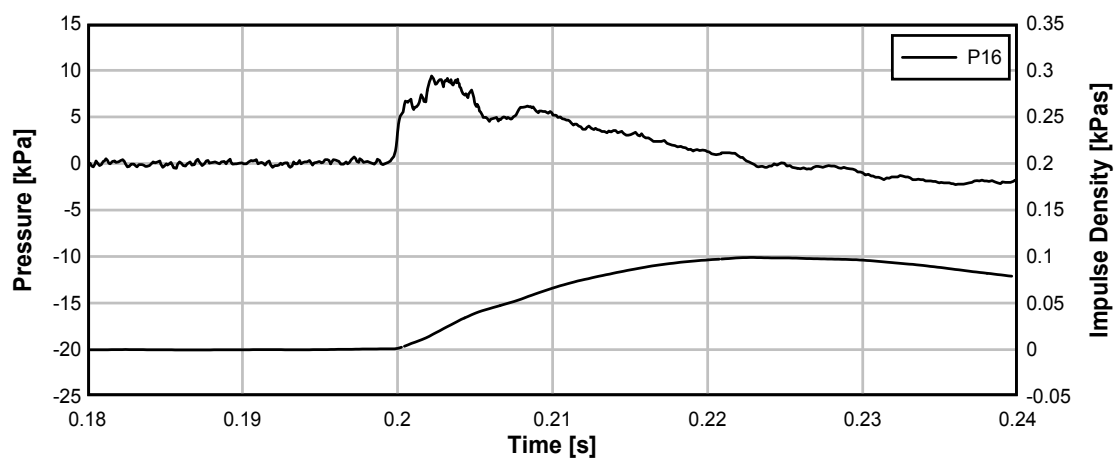
TE-8 805

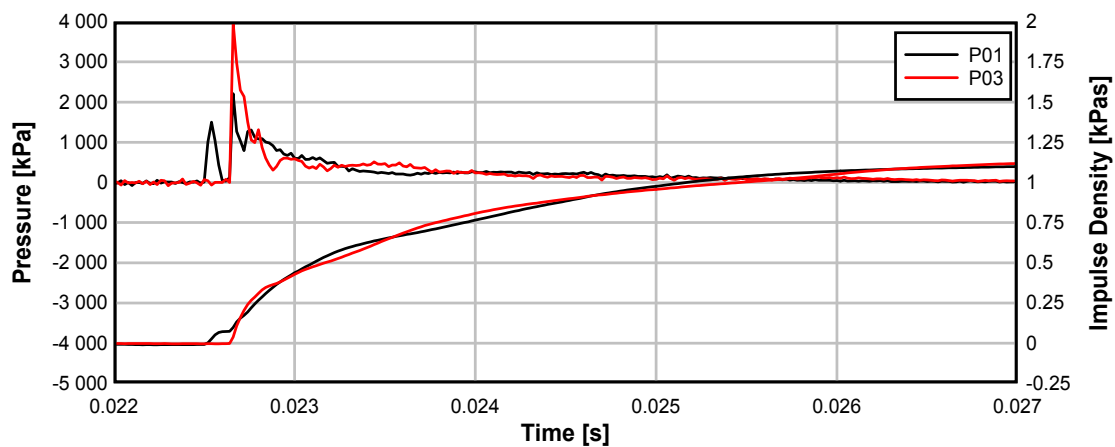
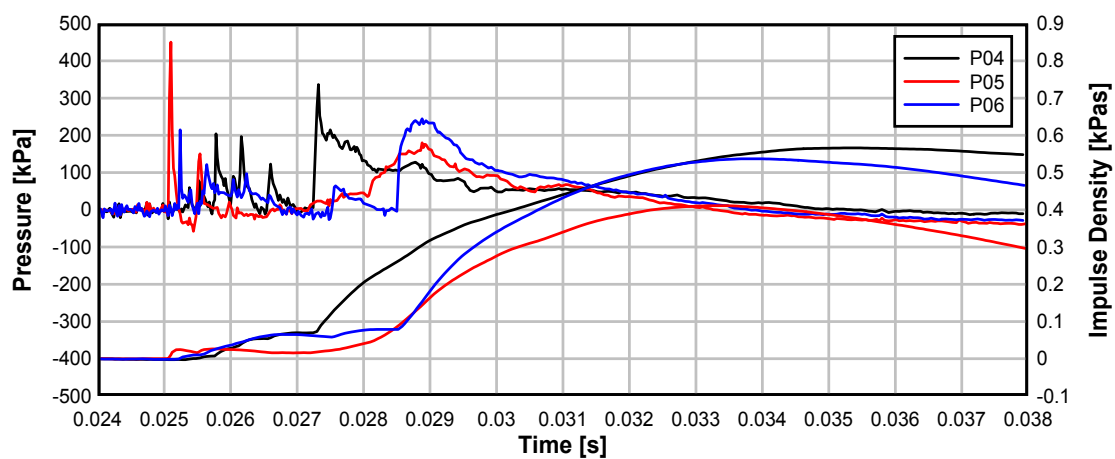
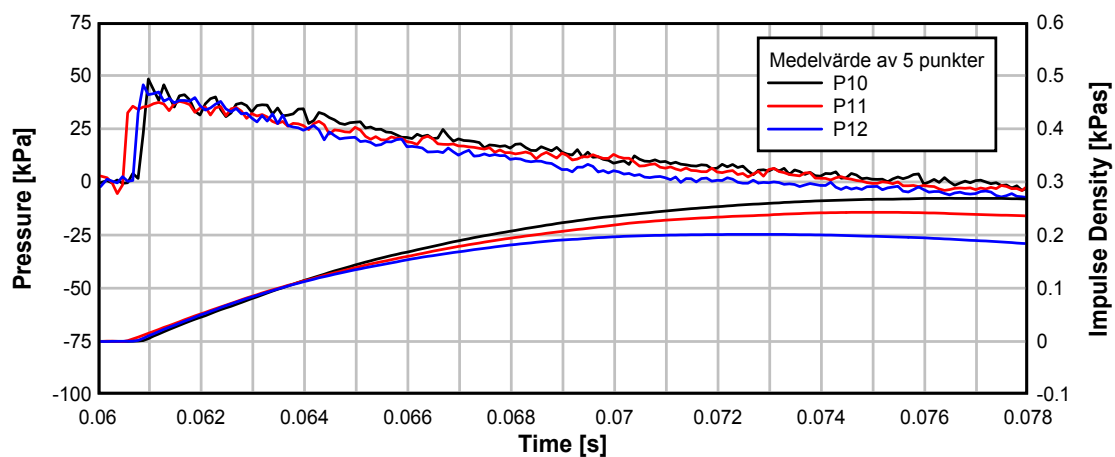


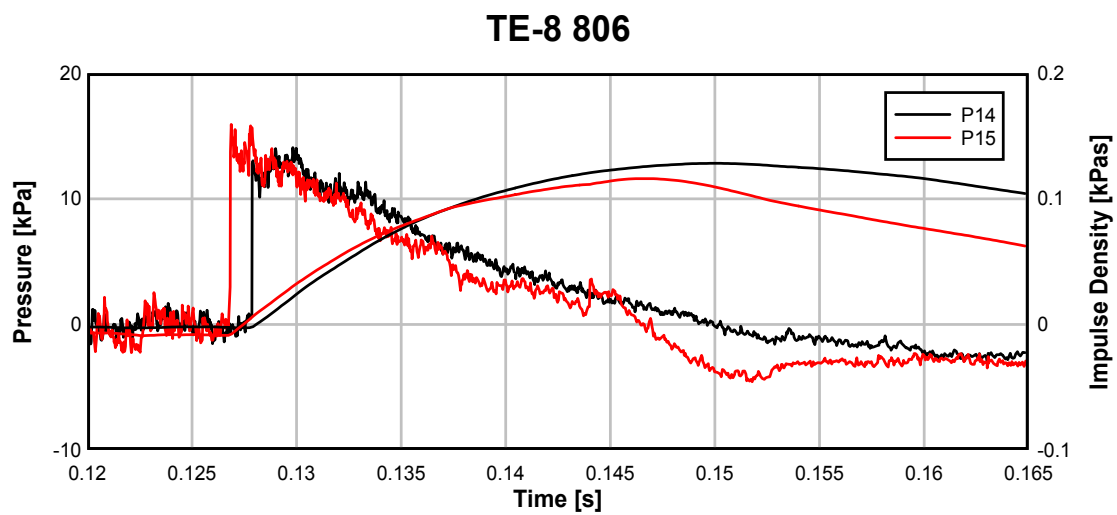
TE-8 805



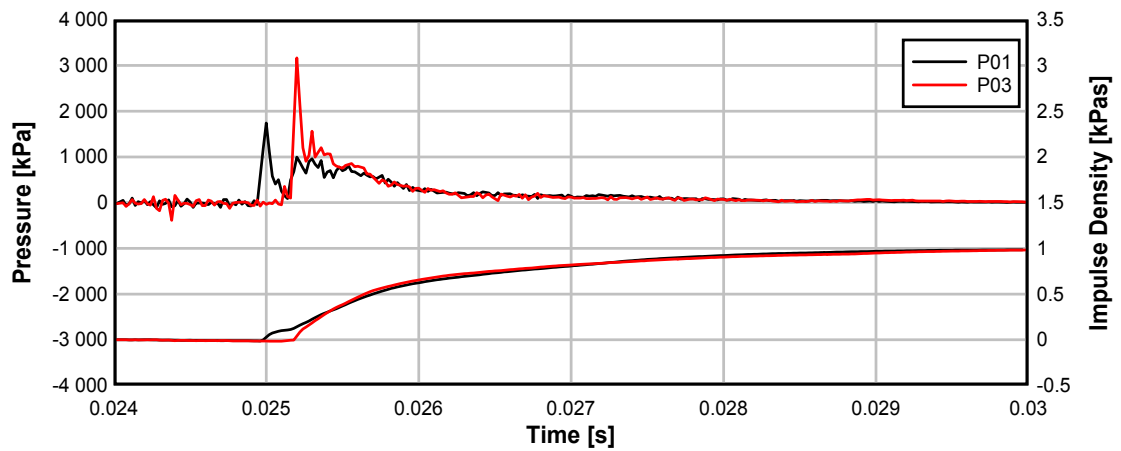
TE-8 805



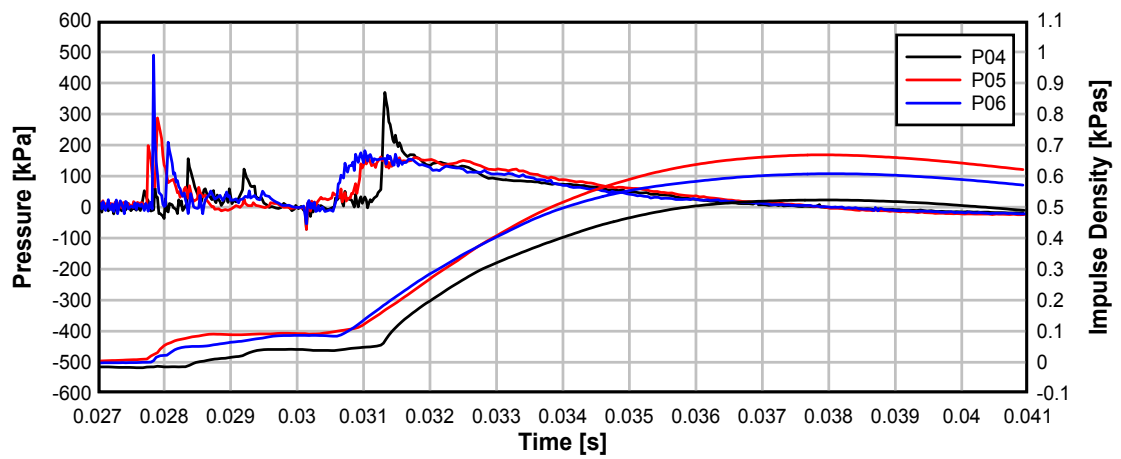
Test 806: 114 kg Hexotonal i stålrör**TE-8 806****TE-8 806****TE-8 806**



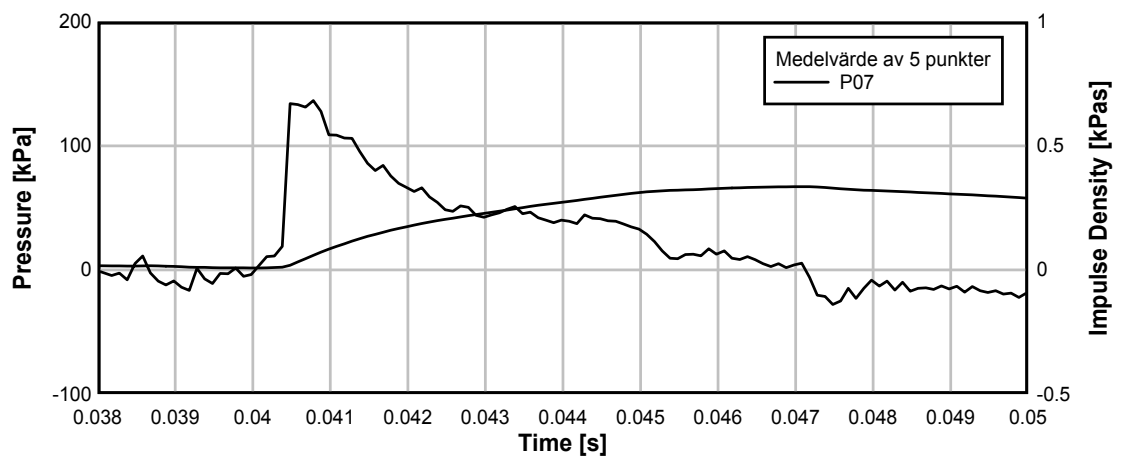
Test 807: 114 kg Hexotonal i stålrör
TE-8 807



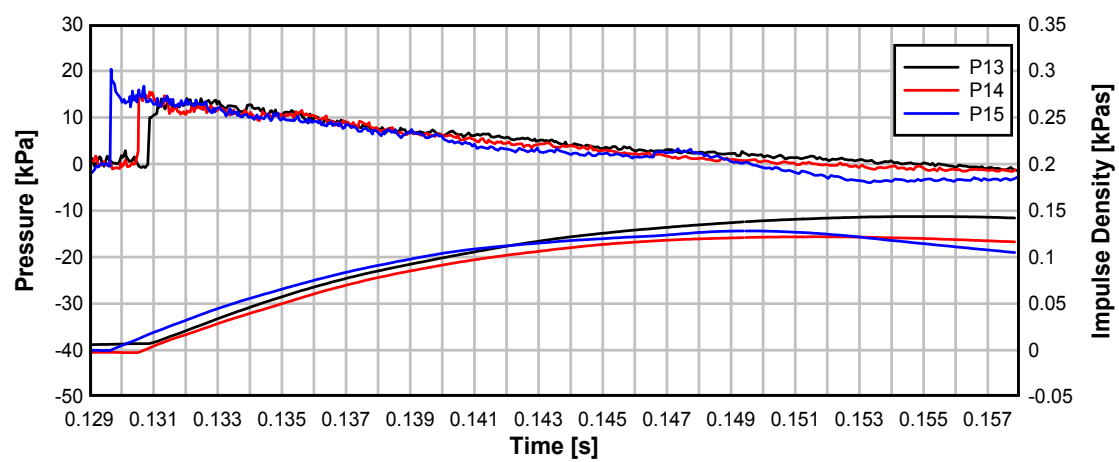
TE-8 807



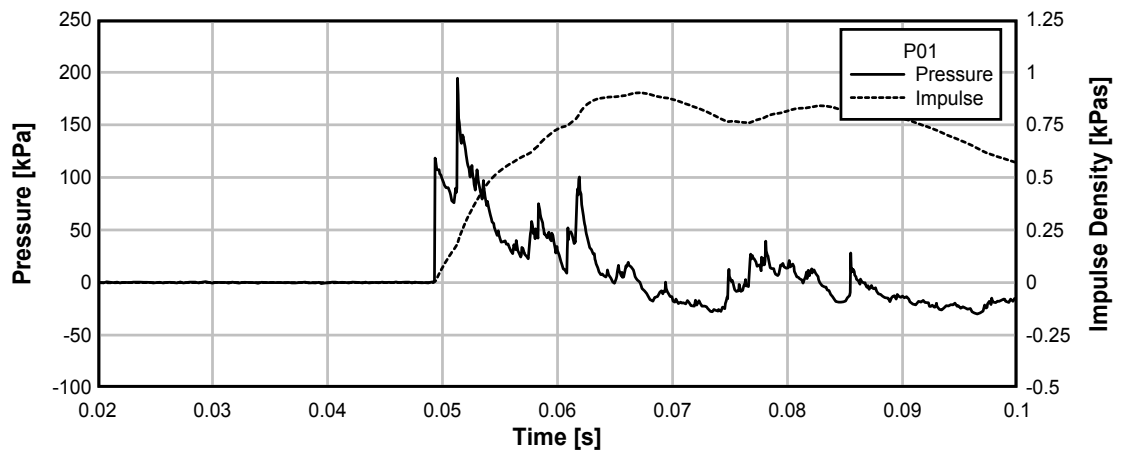
TE-8 807



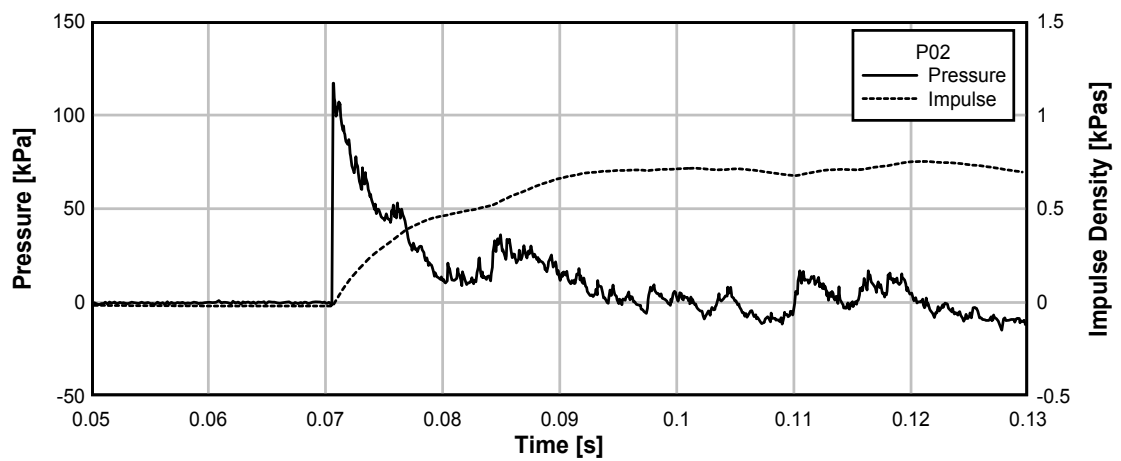
TE-8 807



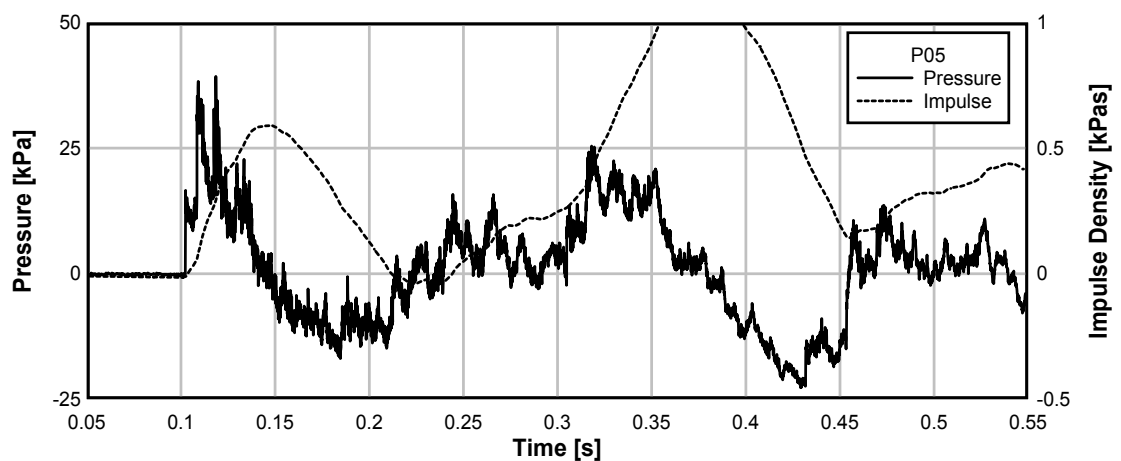
Test 808: avstånd 10 m, 125 kg Prillit
TE-8 808



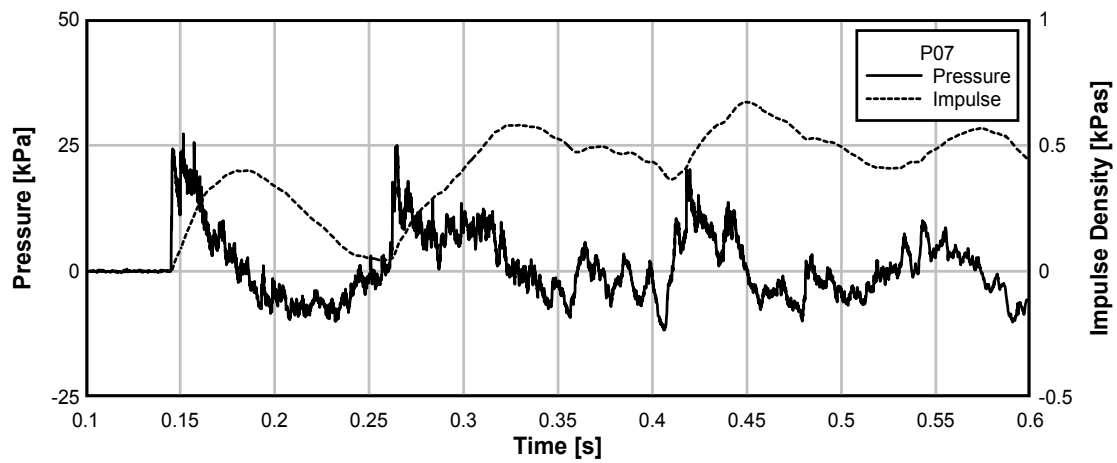
TE-8 808



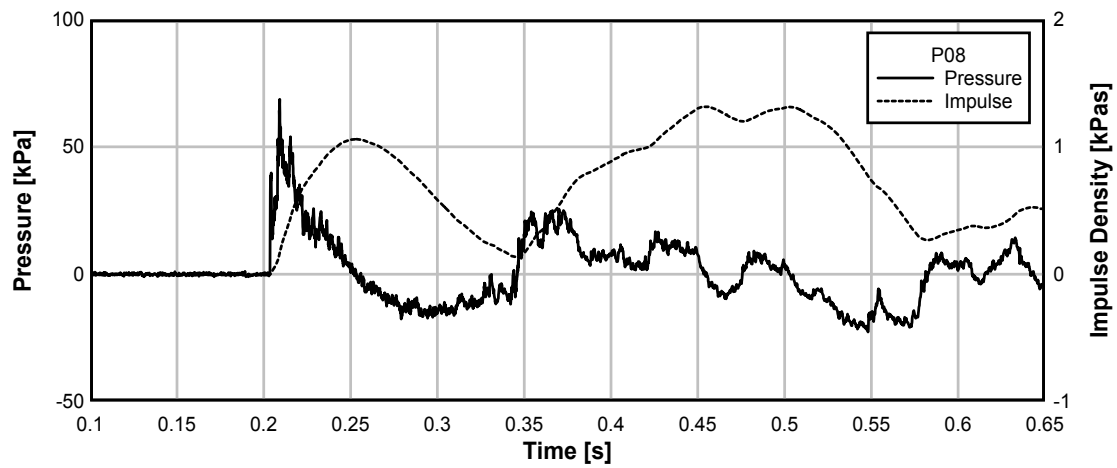
TE-8 808



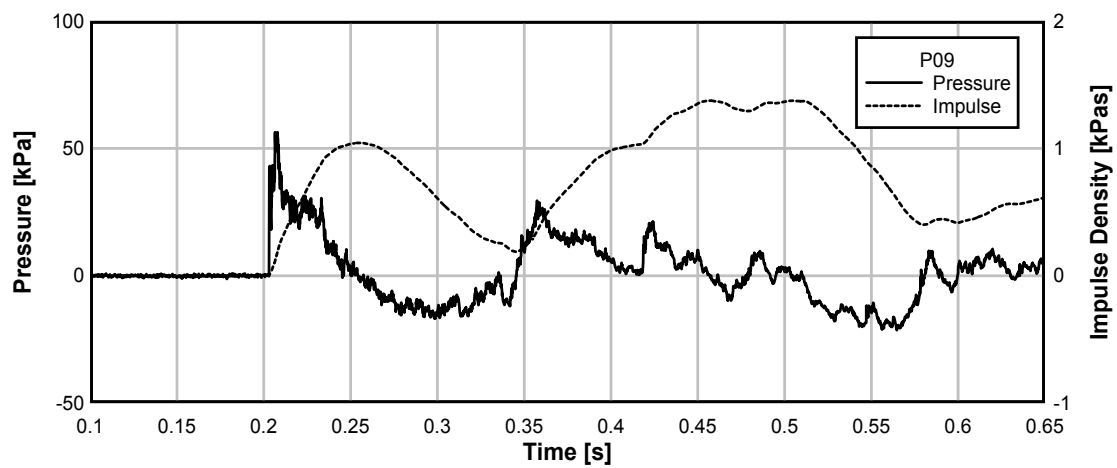
TE-8 808



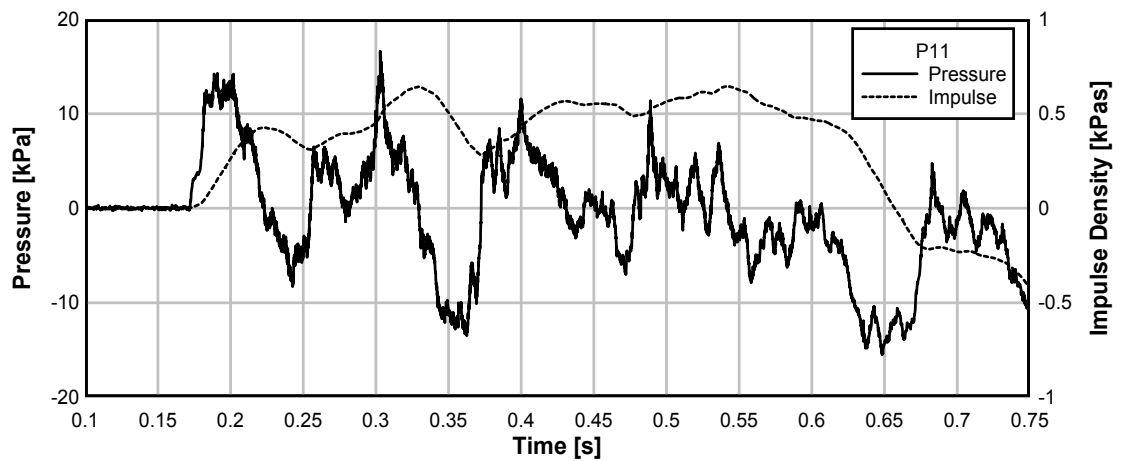
TE-8 808



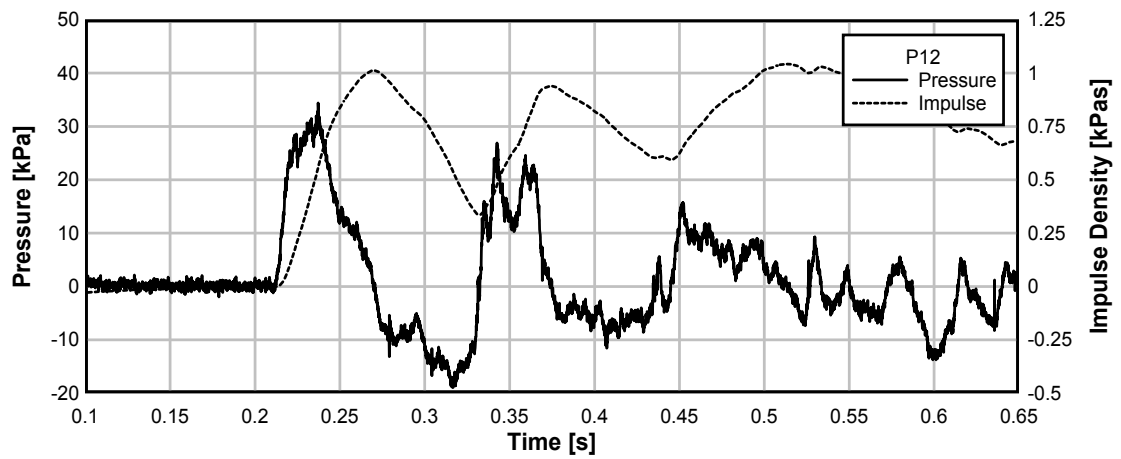
TE-8 808



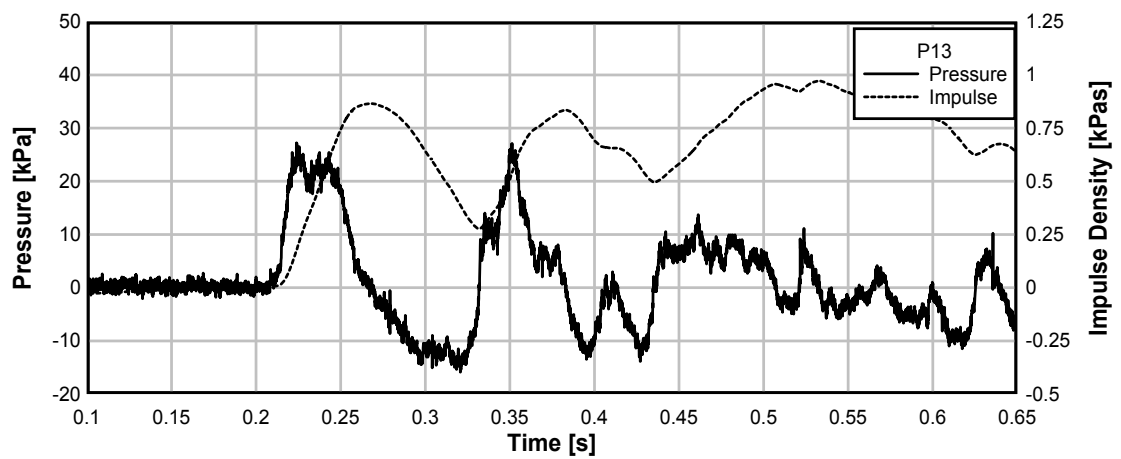
TE-8 808



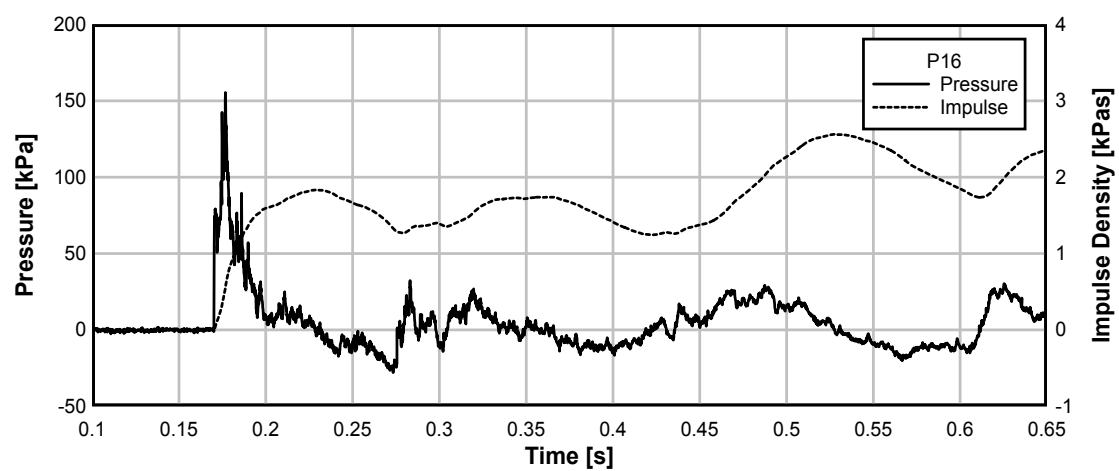
TE-8 808

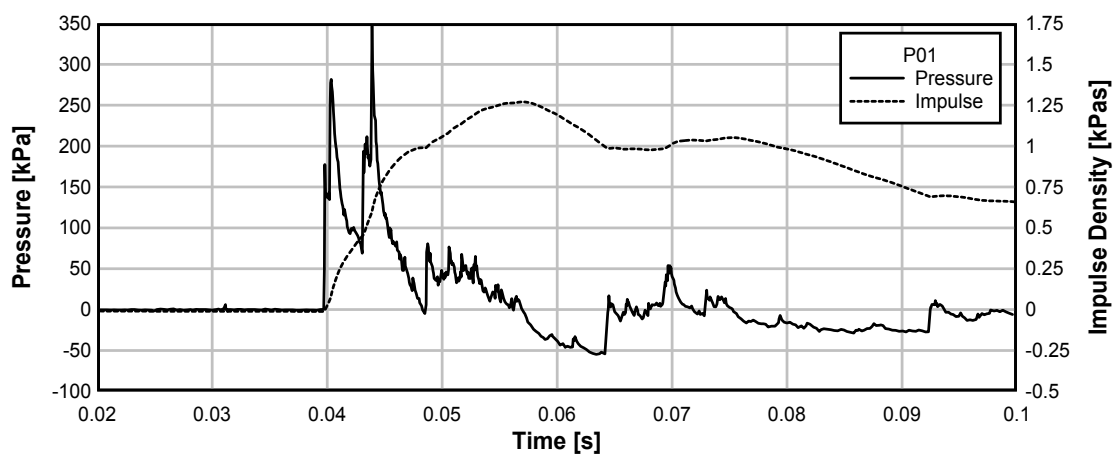
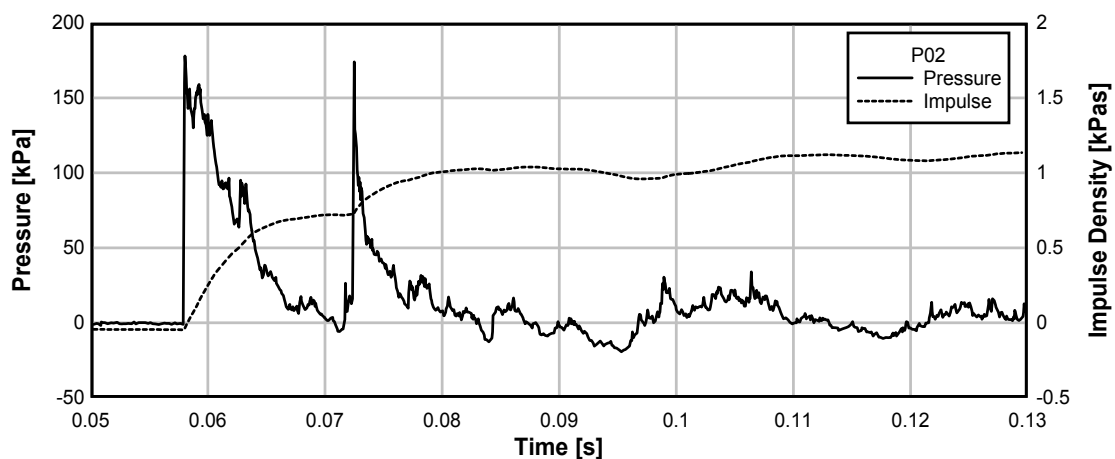
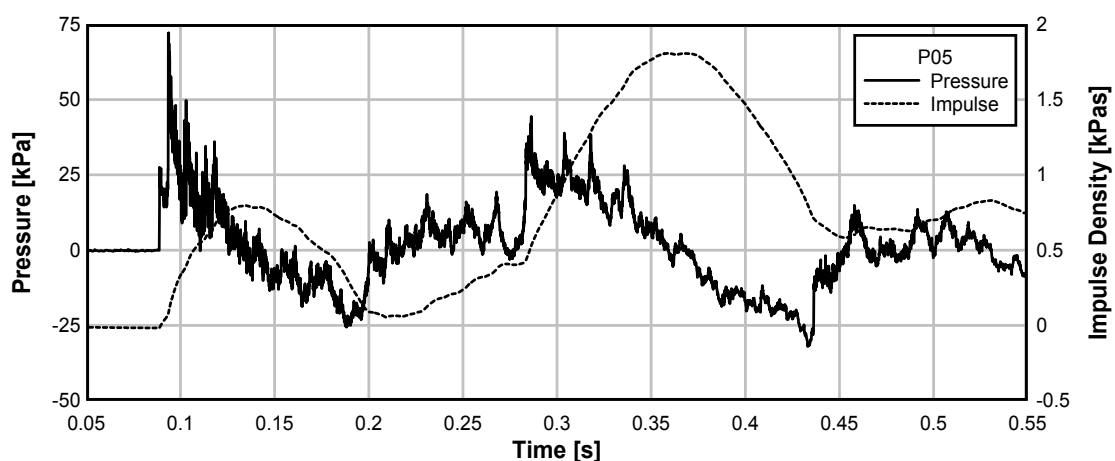


TE-8 808

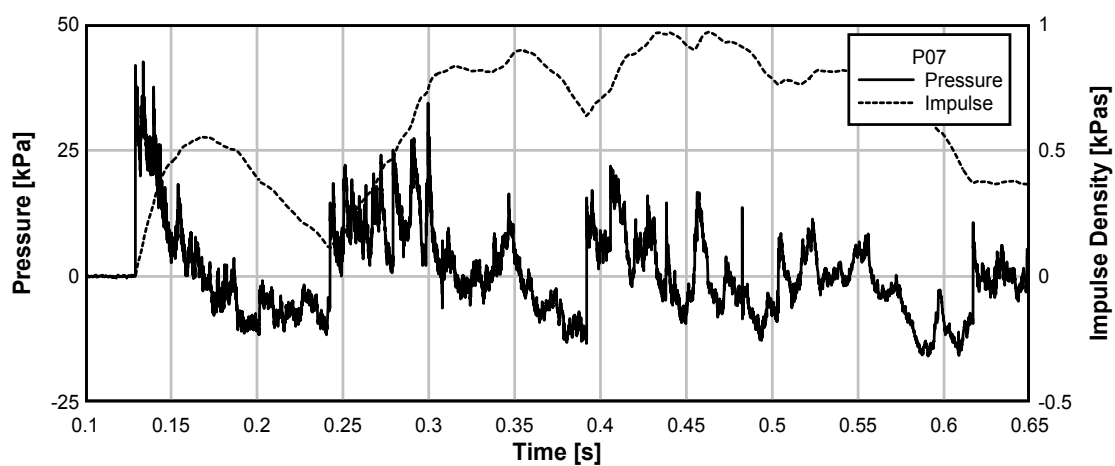


TE-8 808

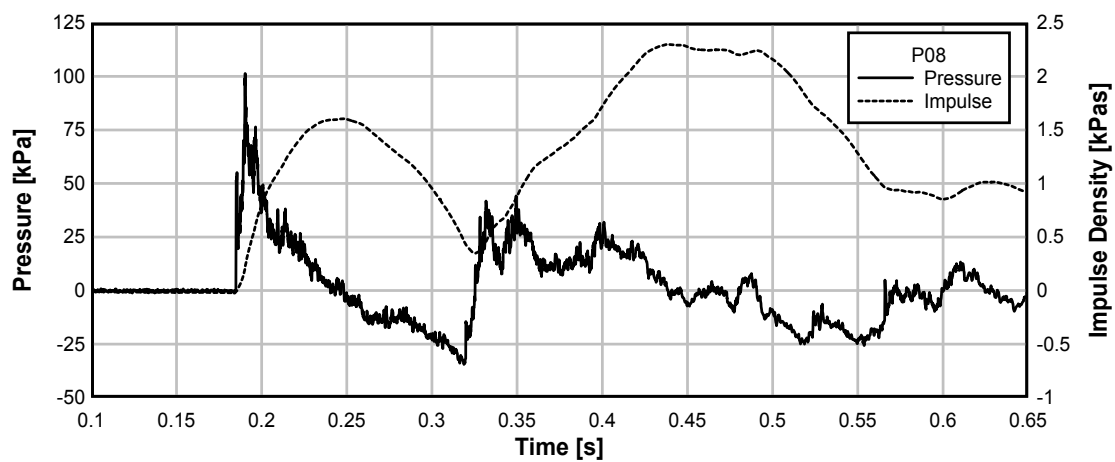


Test 809: avstånd 5 m, 125 kg Prillit**TE-8 809****TE-8 809****TE-8 809**

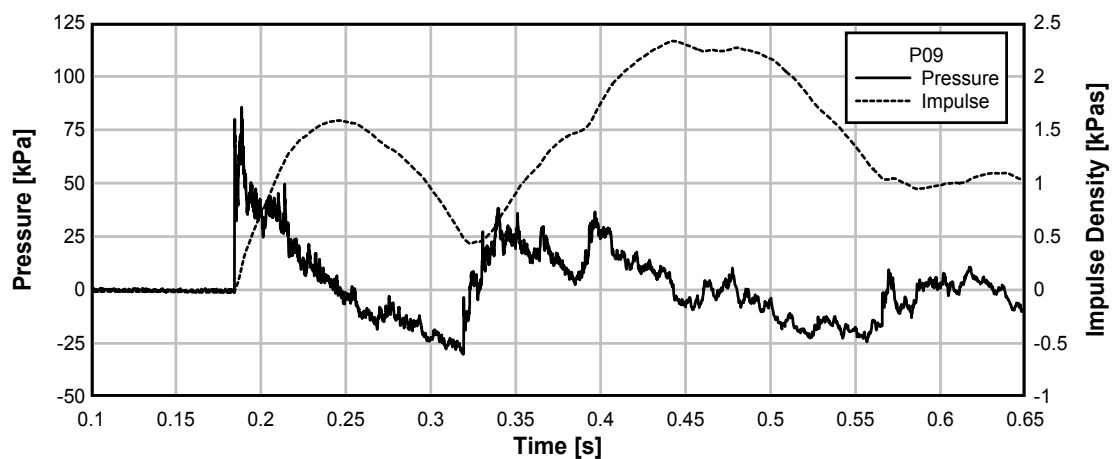
TE-8 809



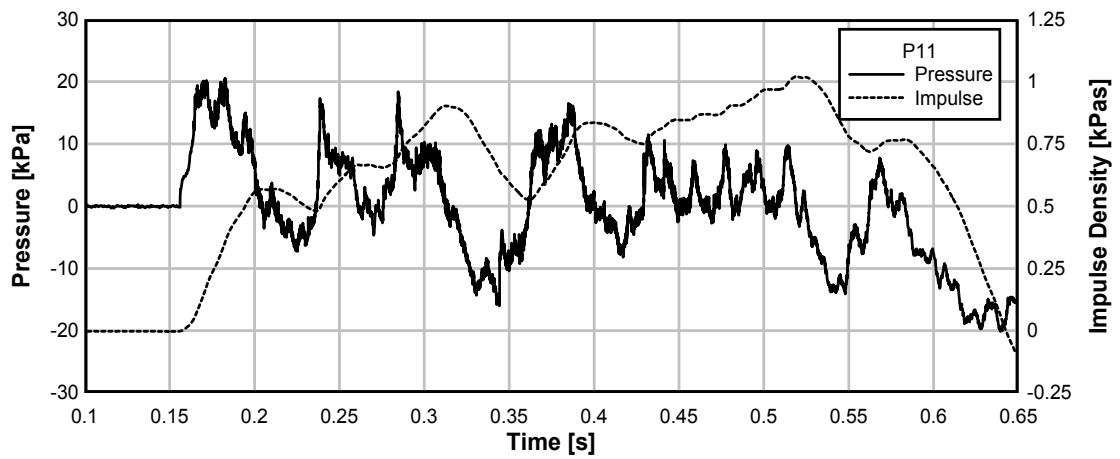
TE-8 809



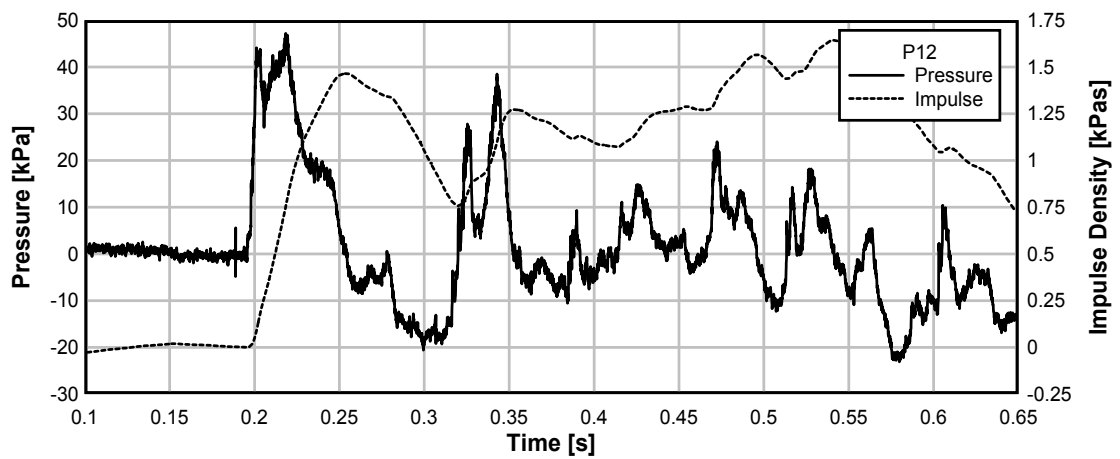
TE-8 809



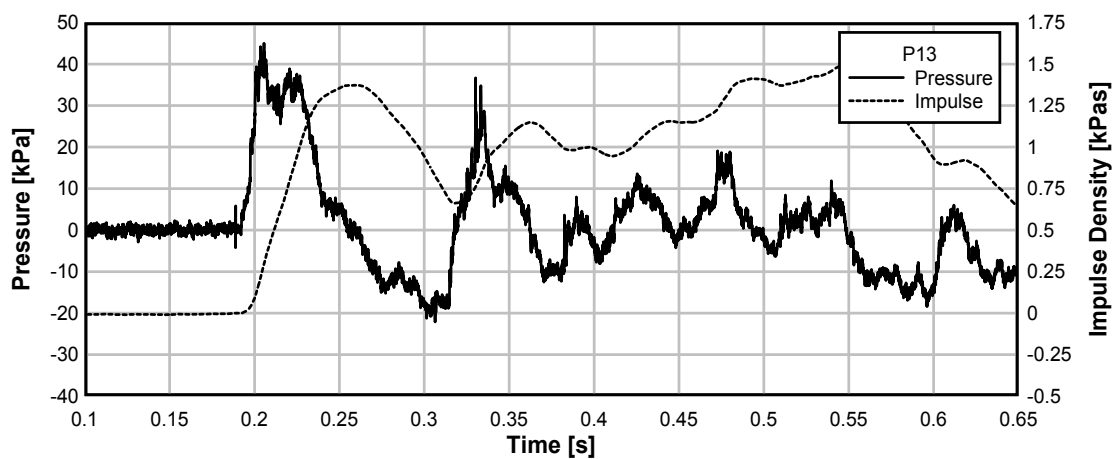
TE-8 809



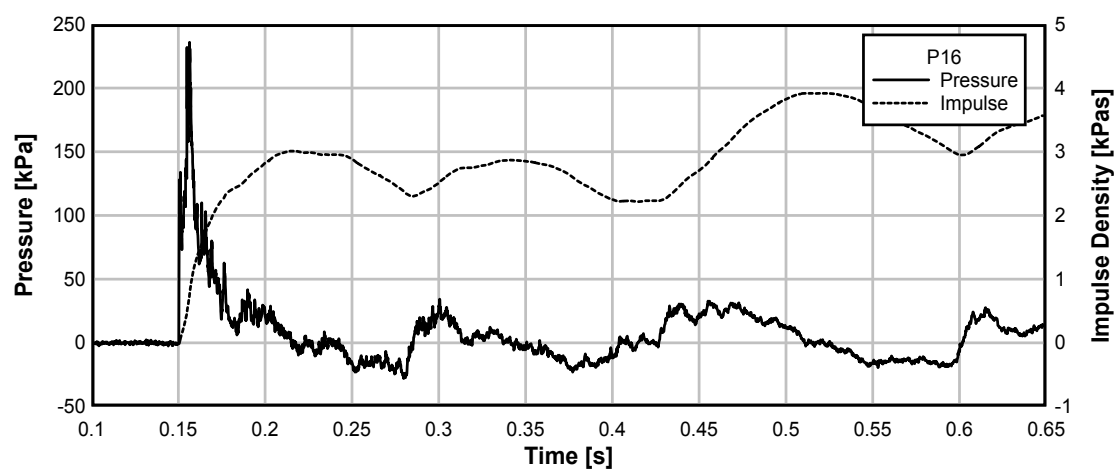
TE-8 809

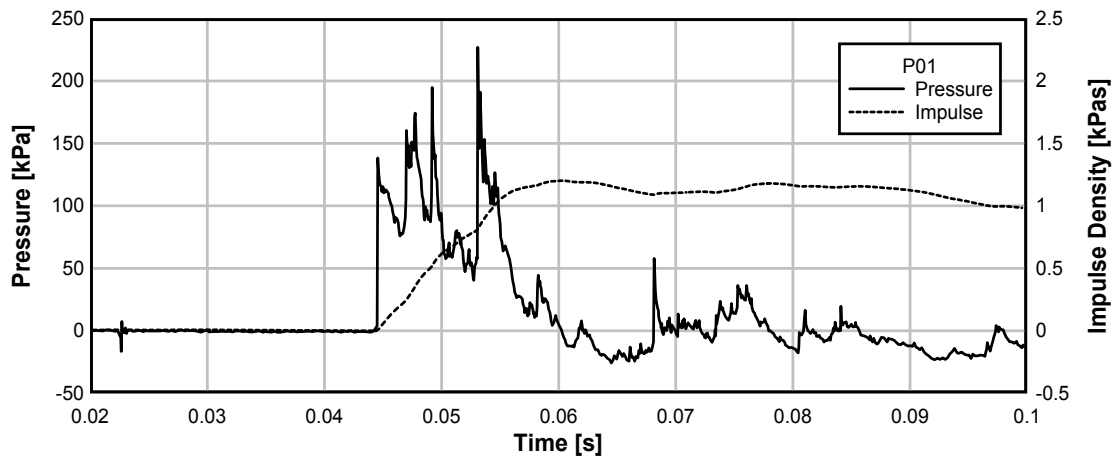
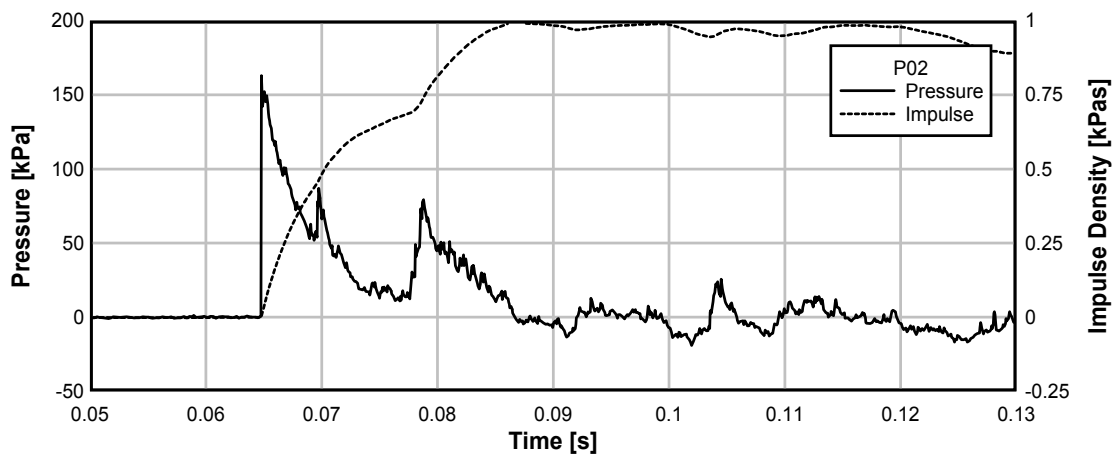
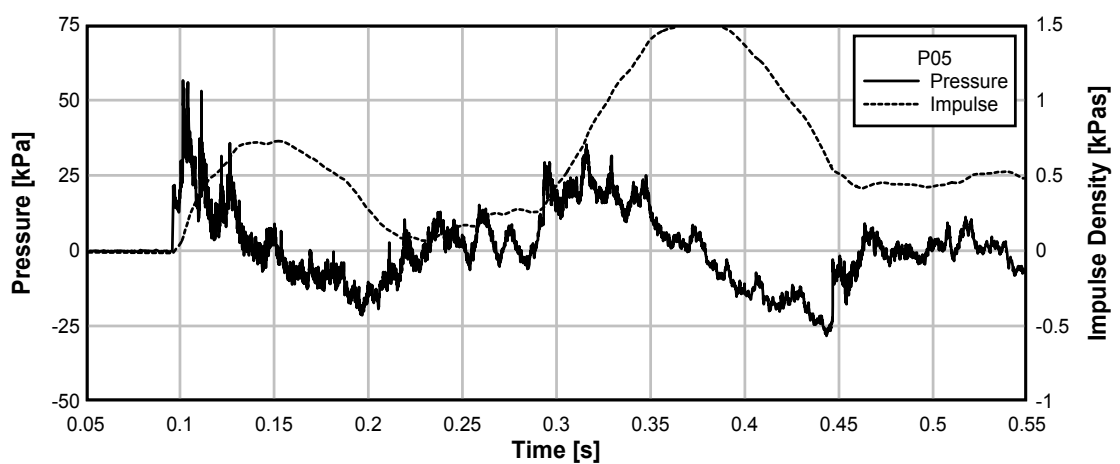


TE-8 809

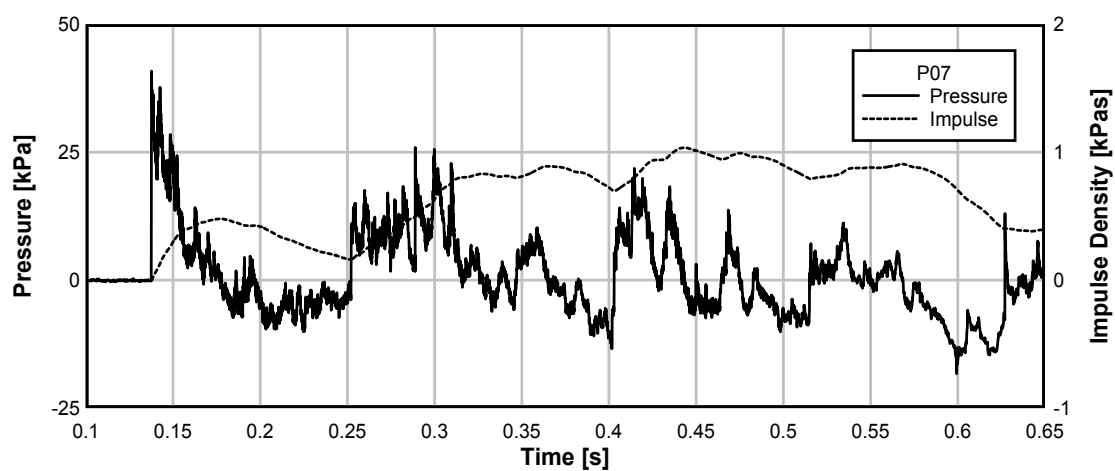


TE-8 809

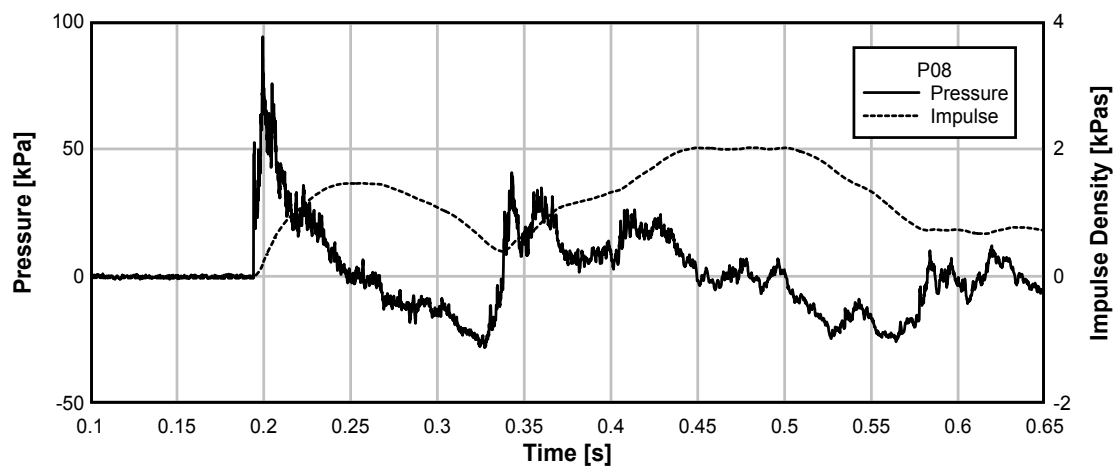


Test 810: avstånd 10 m, 114 kg Hexotonal, stående cylinder.**TE-8 810****TE-8 810****TE-8 810**

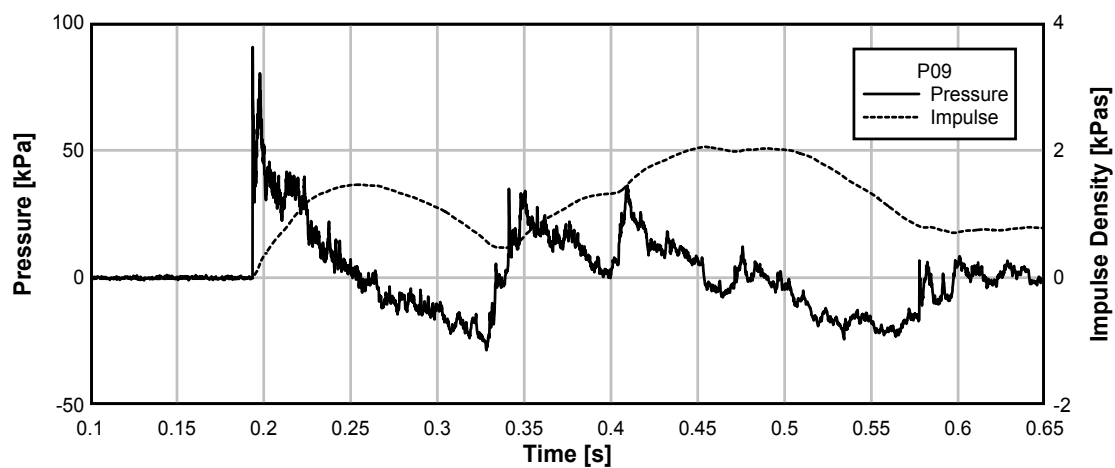
TE-8 810



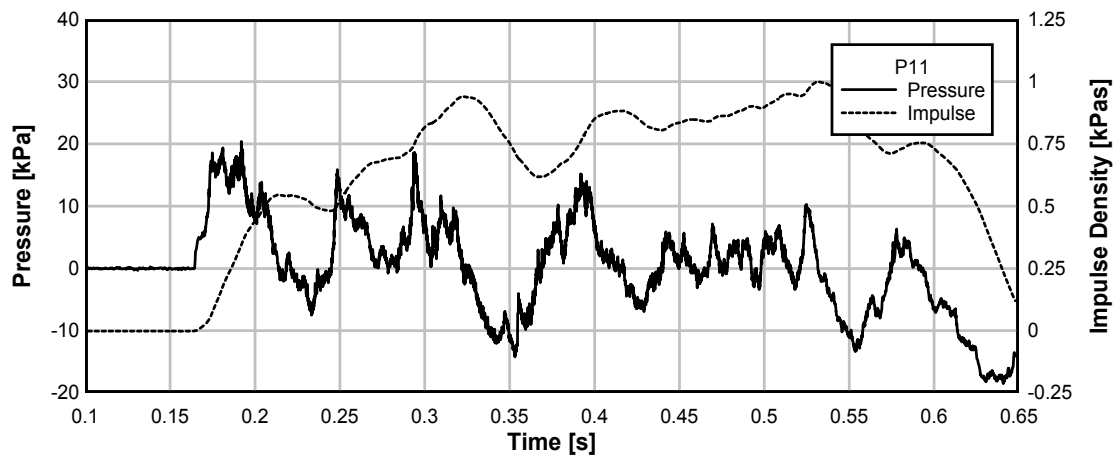
TE-8 810



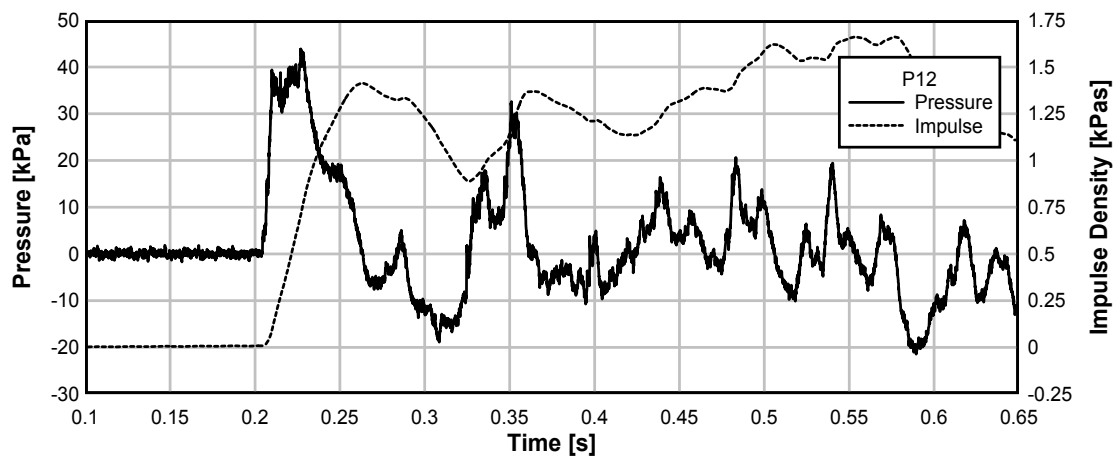
TE-8 810



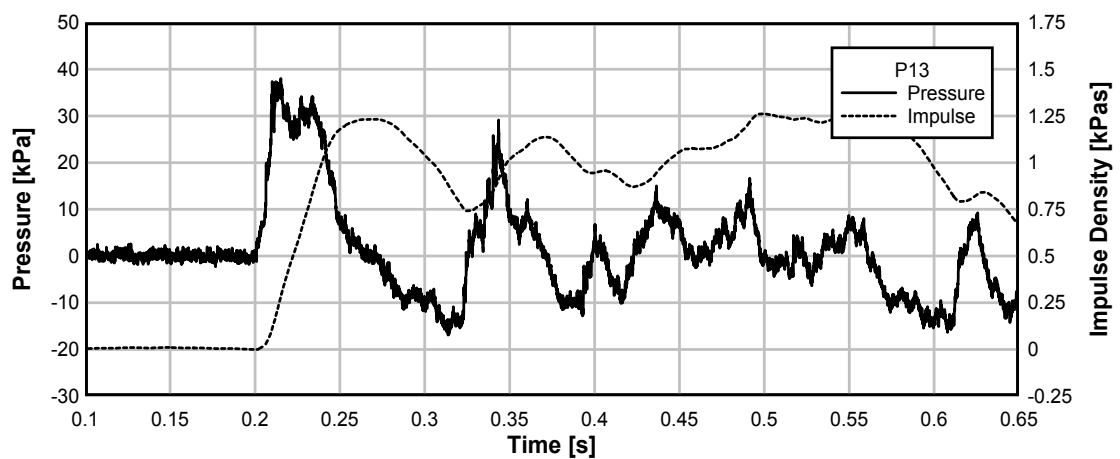
TE-8 810



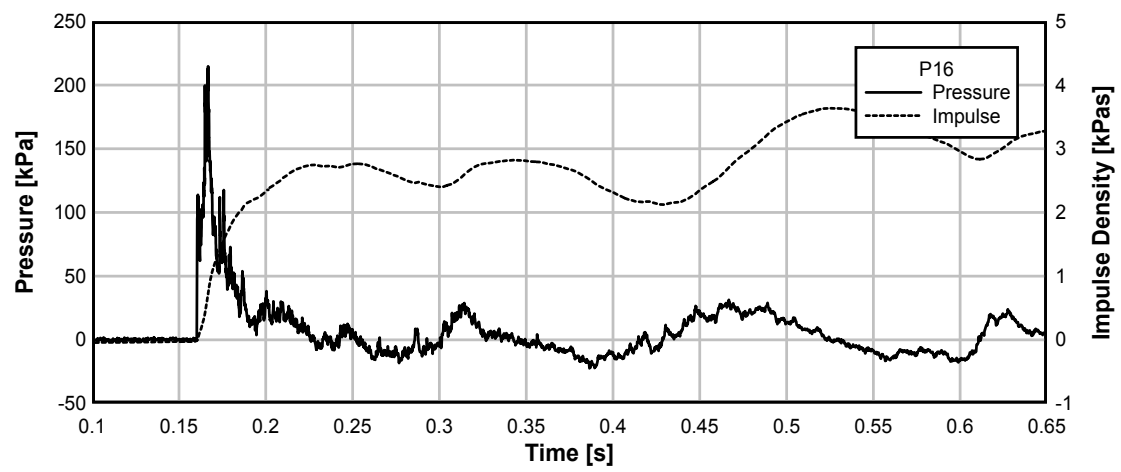
TE-8 810

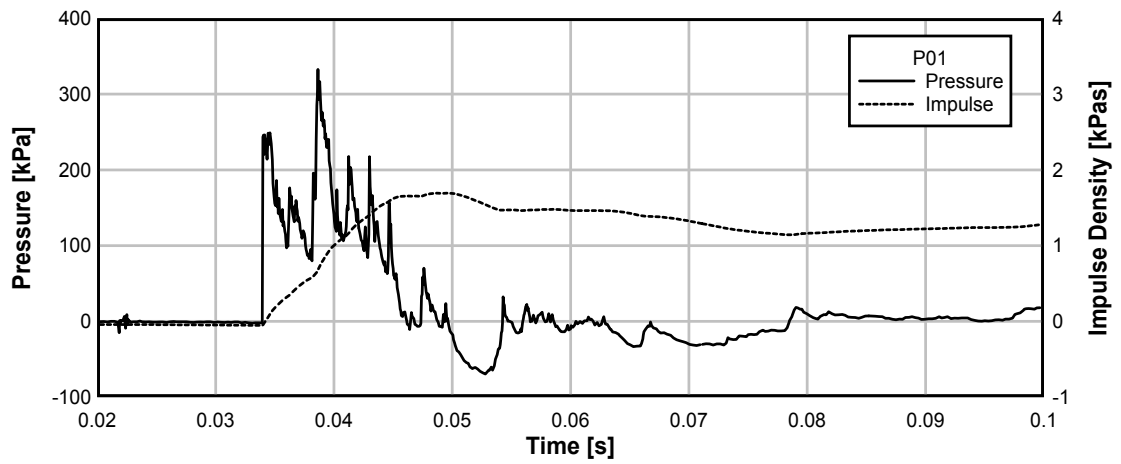
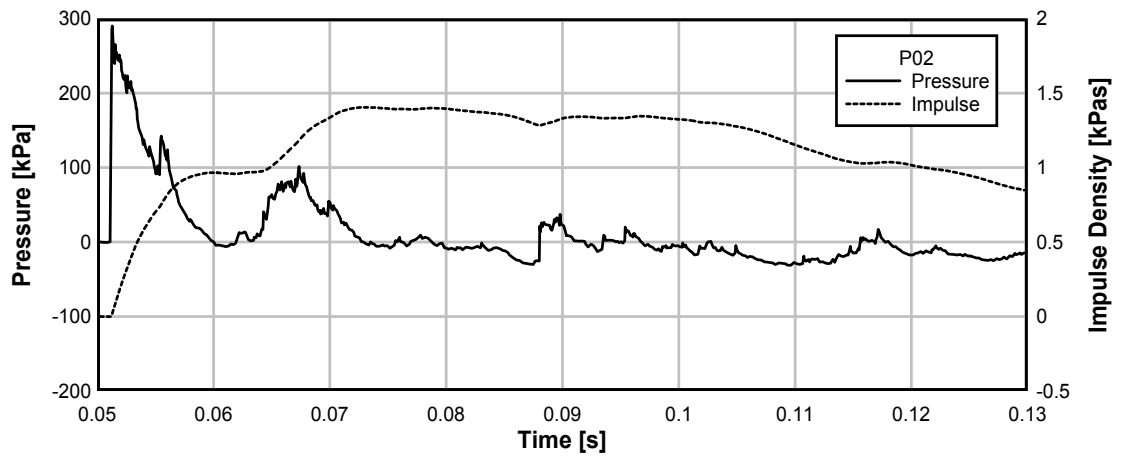
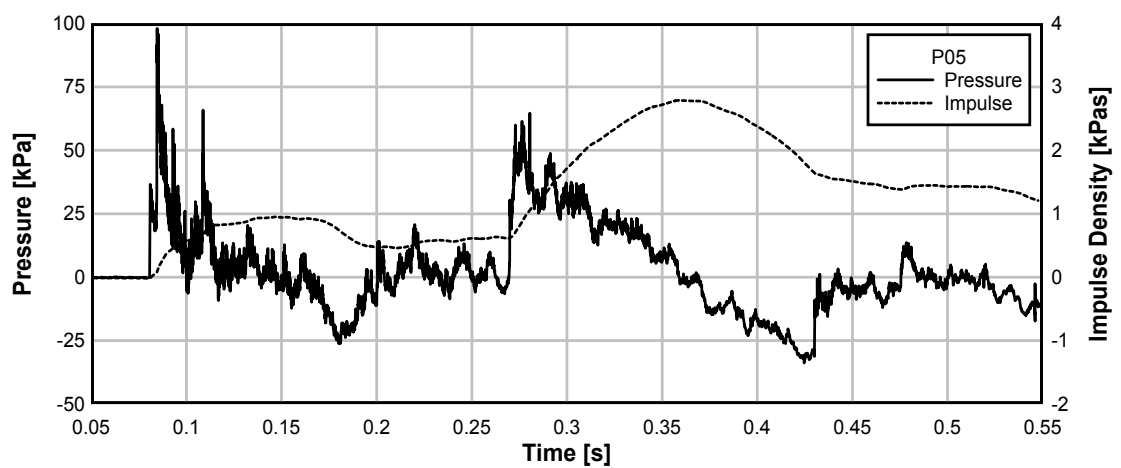


TE-8 810

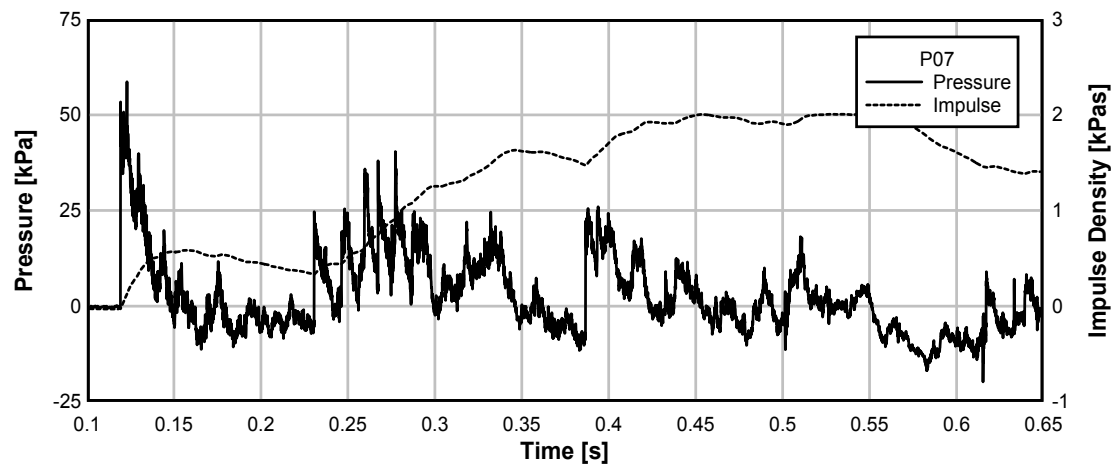


TE-8 810

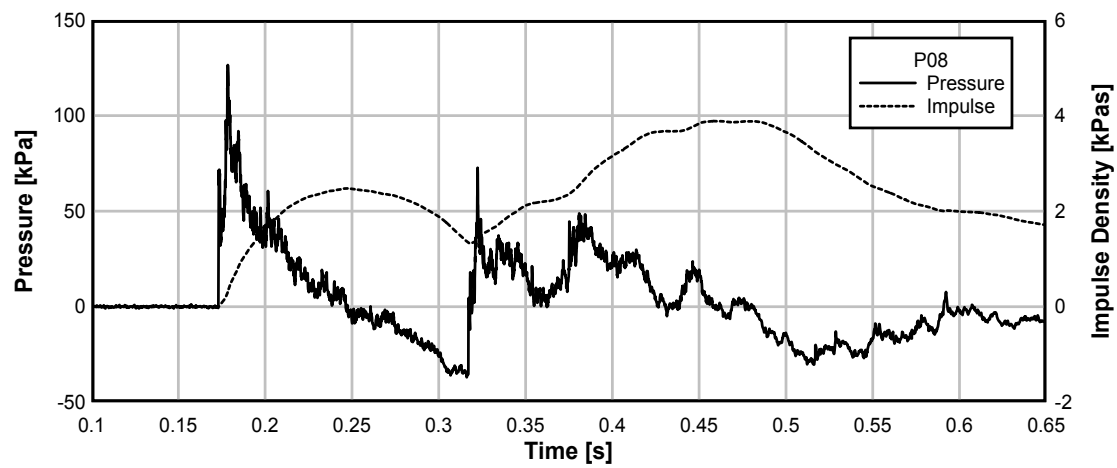


Test 811: avstånd 5 m, 114 kg Hexotonal, stående cylinder.**TE-8 811****TE-8 811****TE-8 811**

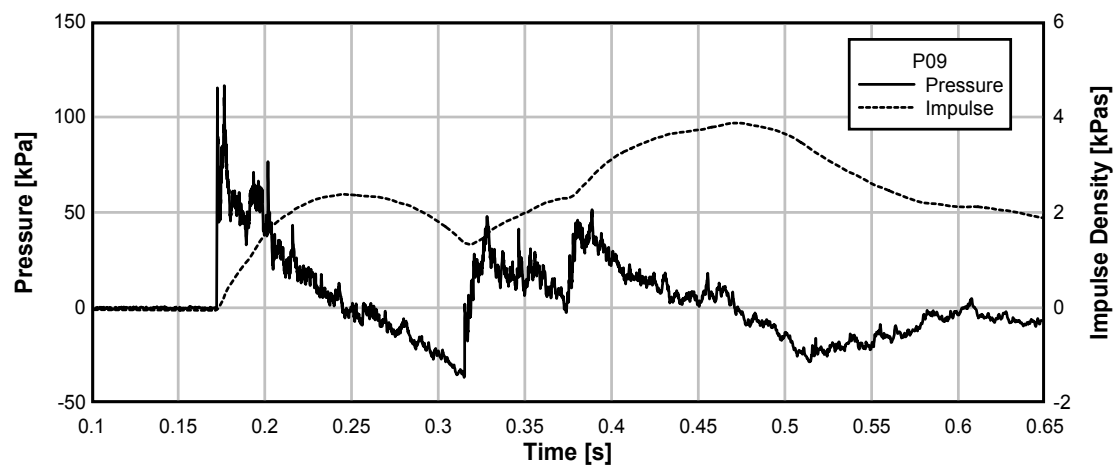
TE-8 811



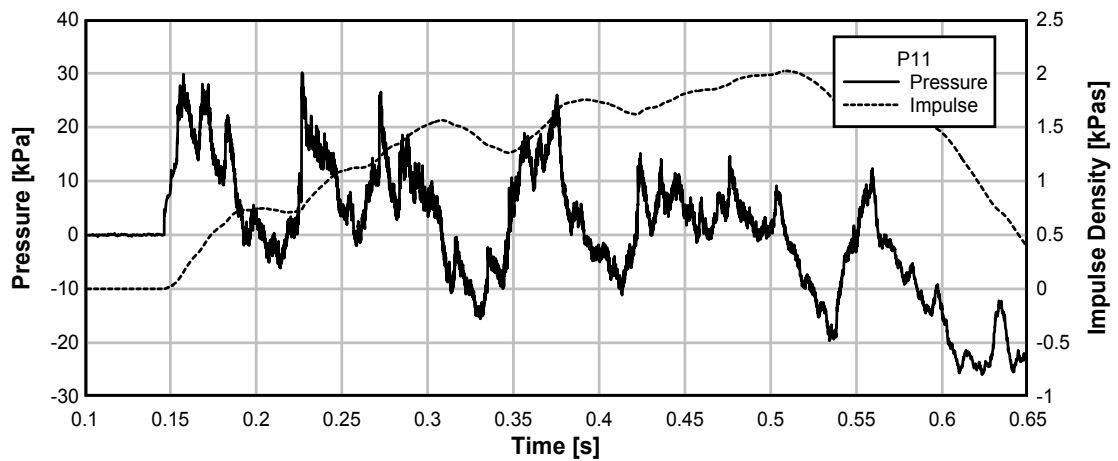
TE-8 811



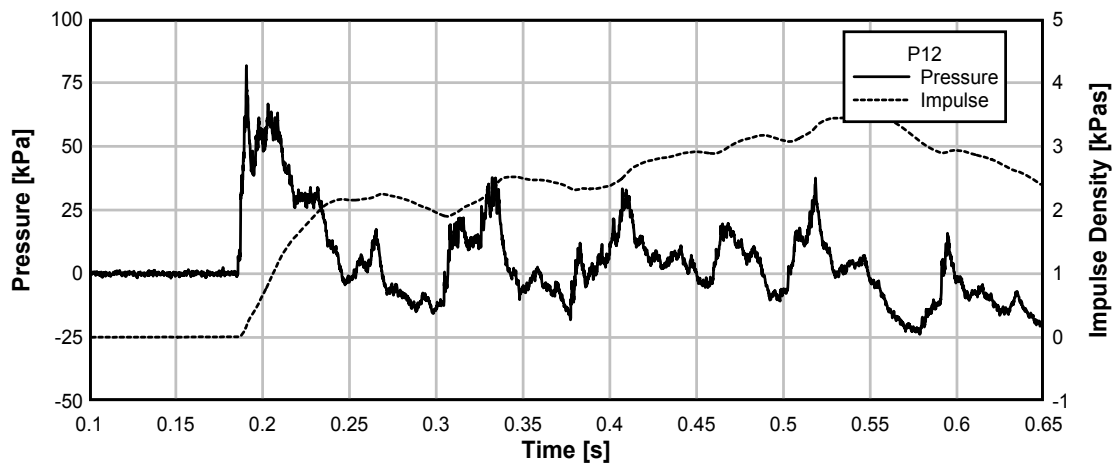
TE-8 811



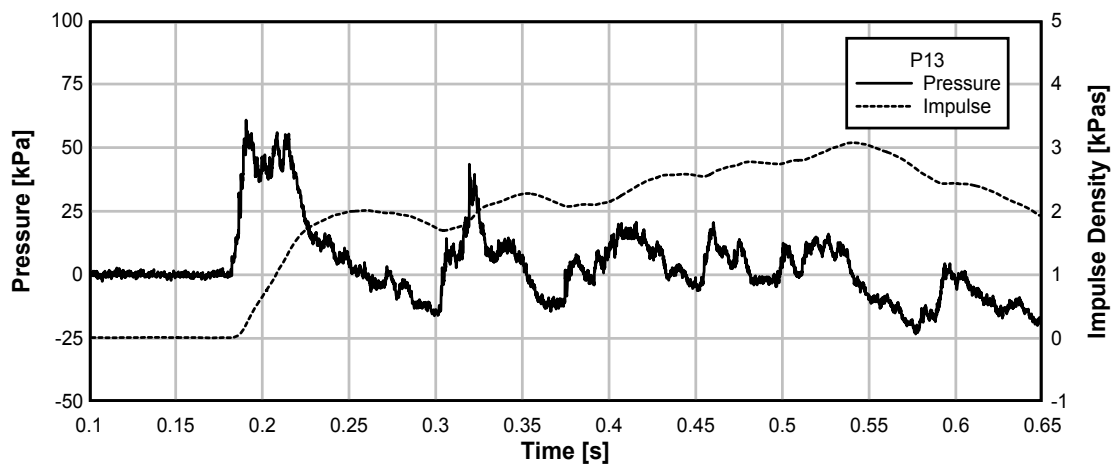
TE-8 811

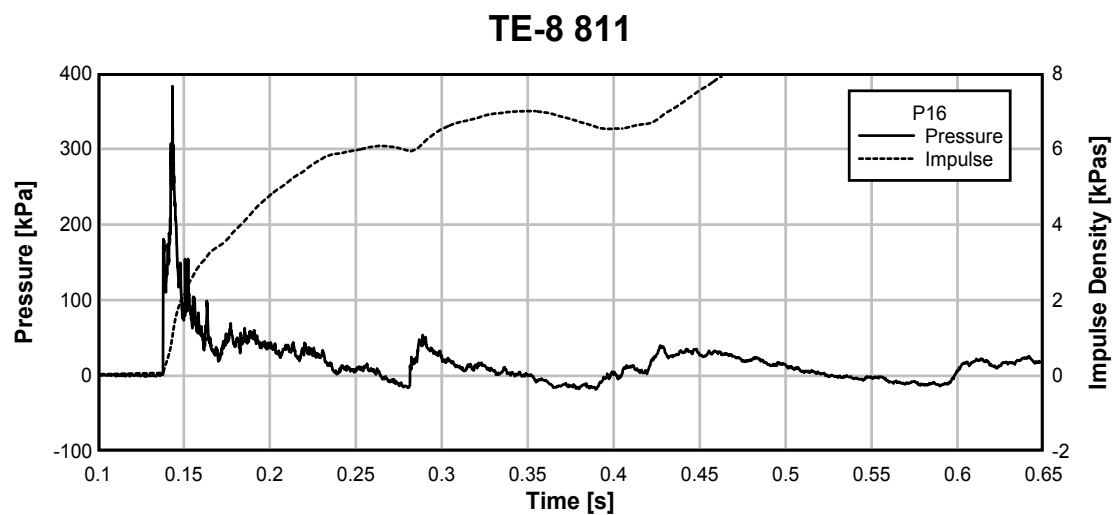


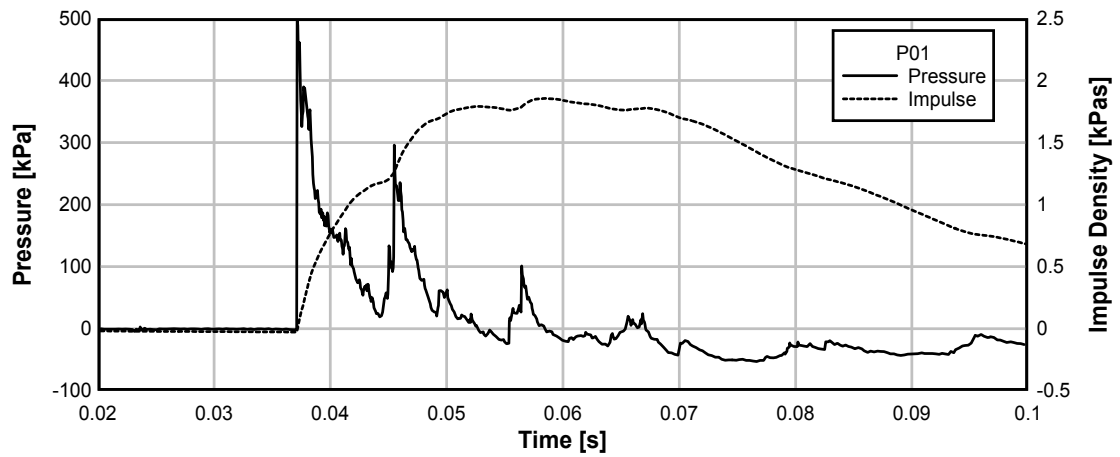
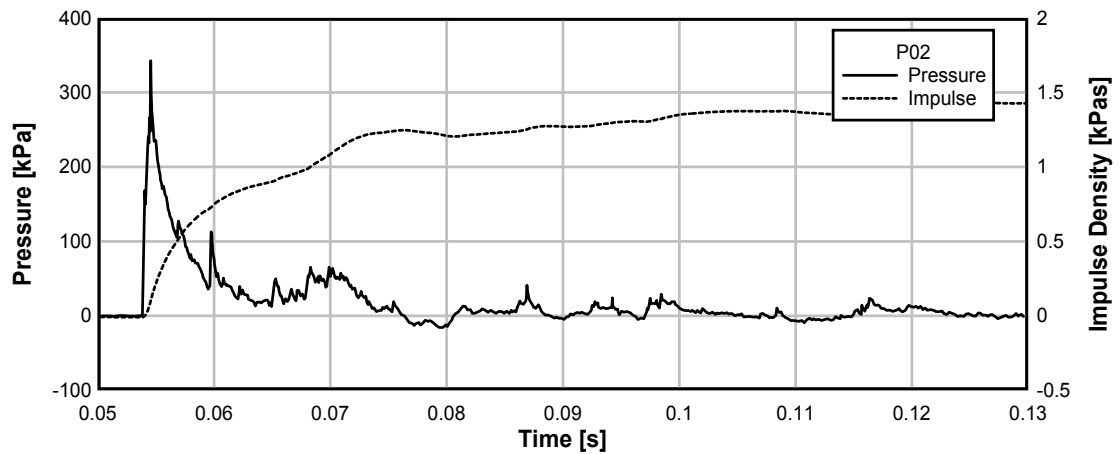
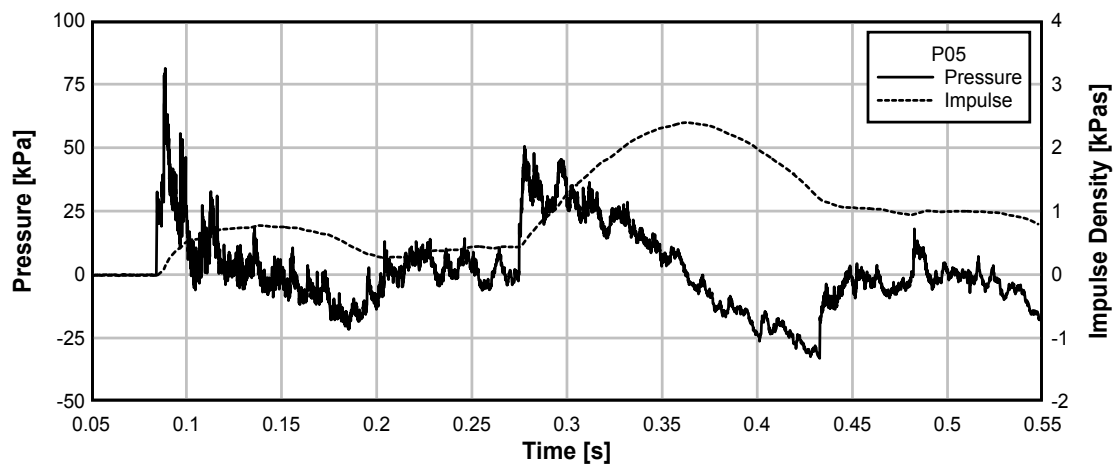
TE-8 811



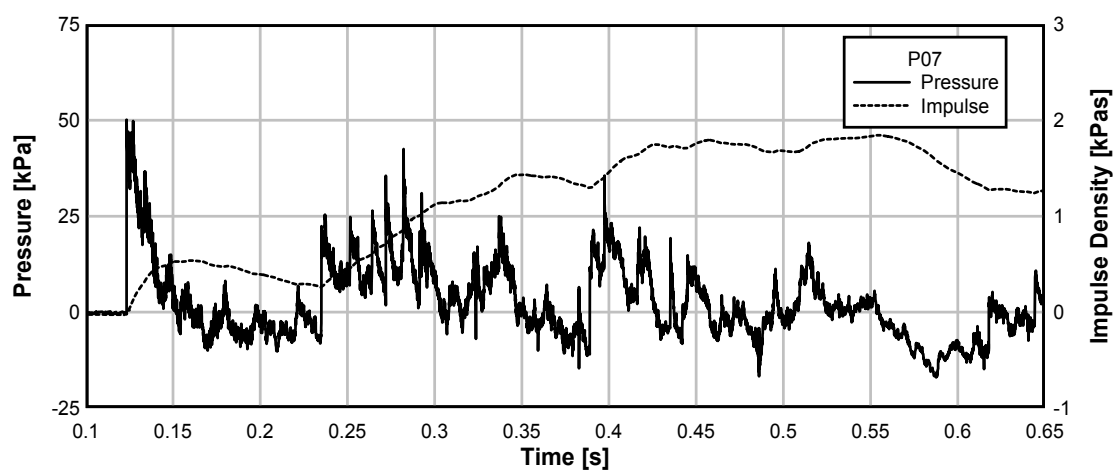
TE-8 811



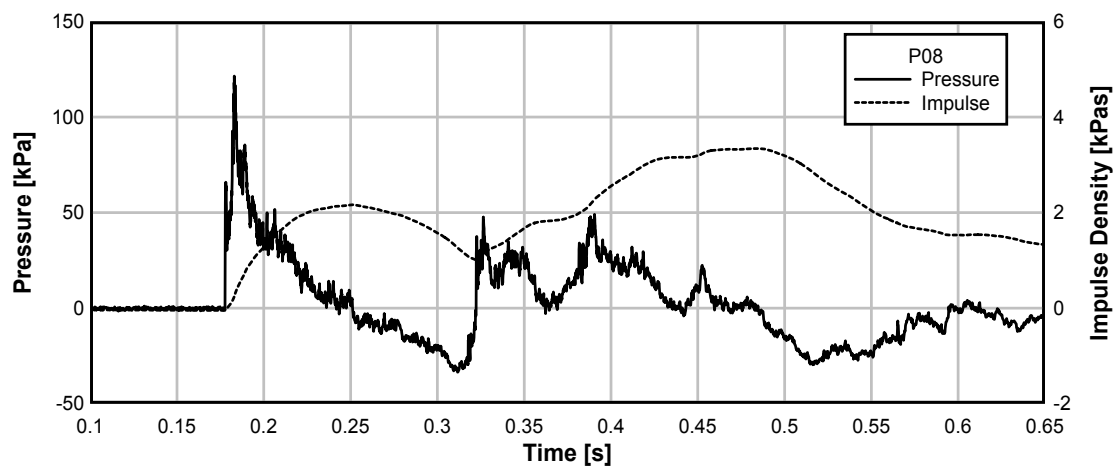


Test 812: avstånd 5 m, 114 kg Hexotonal, 120° cylinder.**TE-8 812****TE-8 812****TE-8 812**

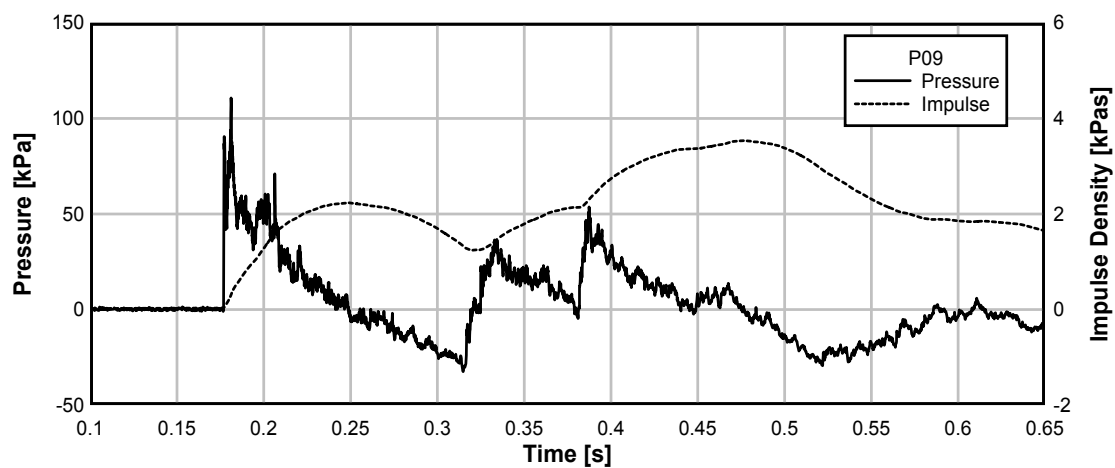
TE-8 812



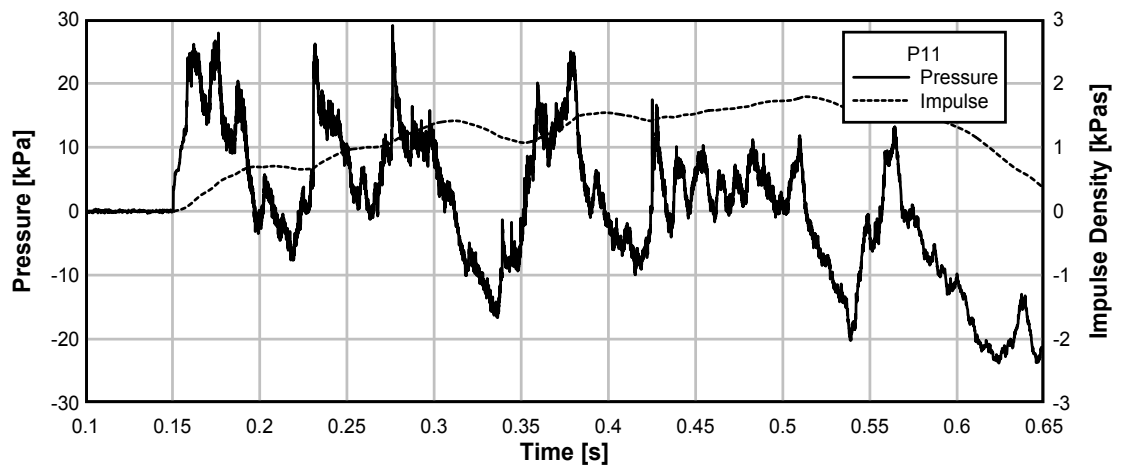
TE-8 812



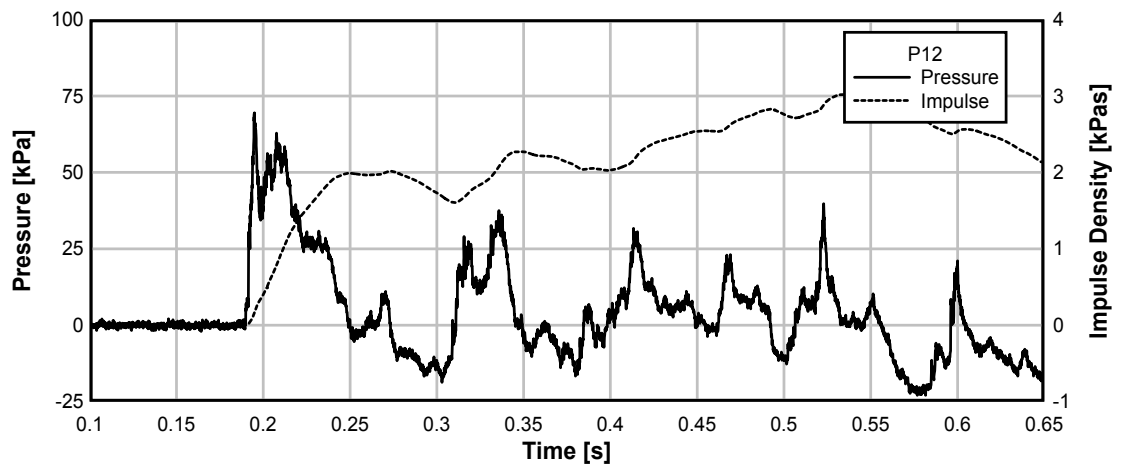
TE-8 812



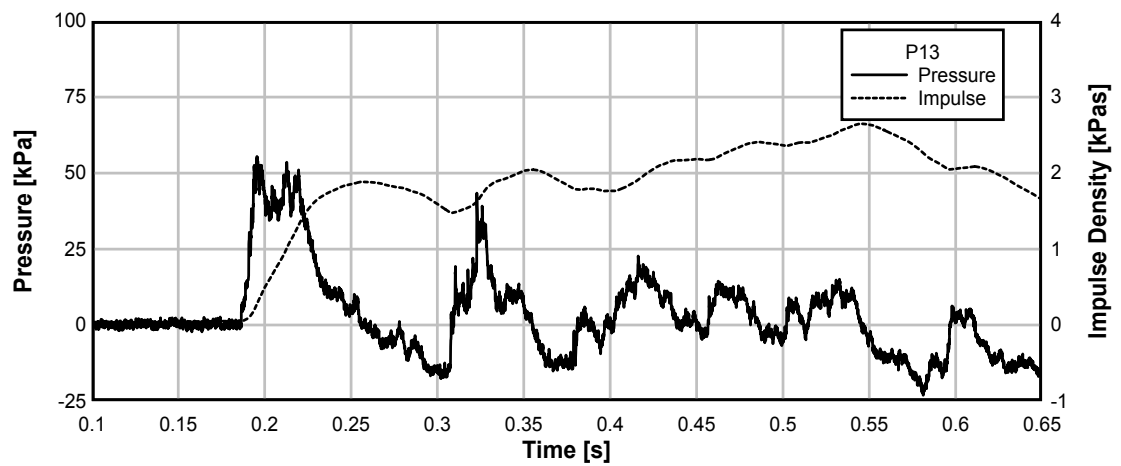
TE-8 812

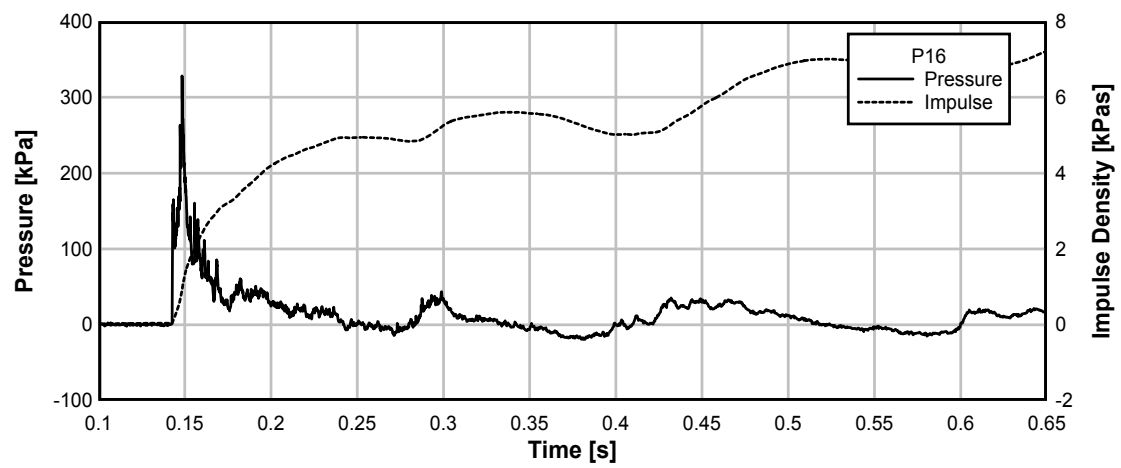


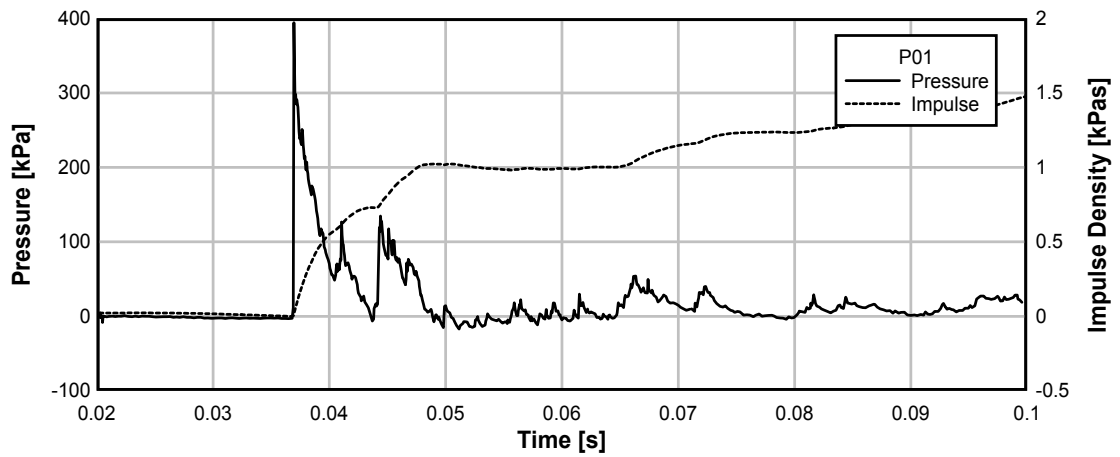
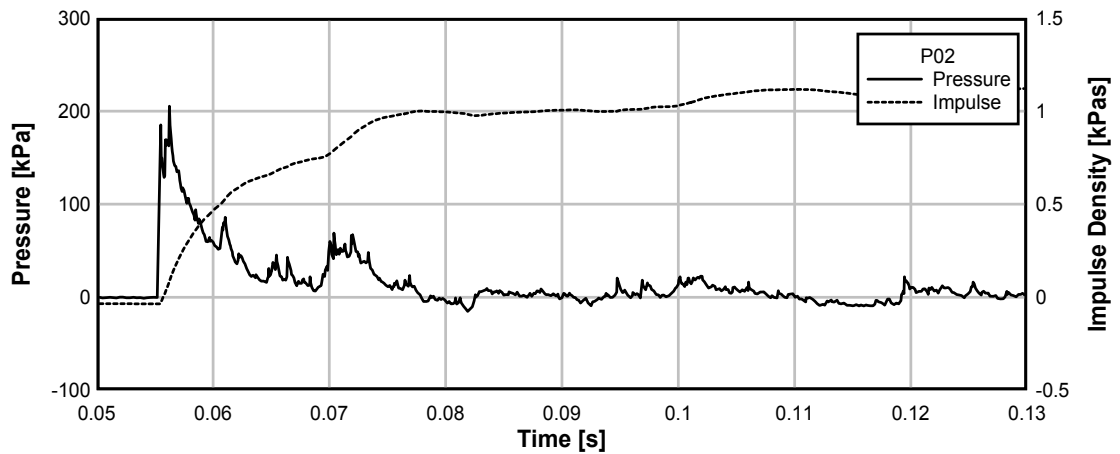
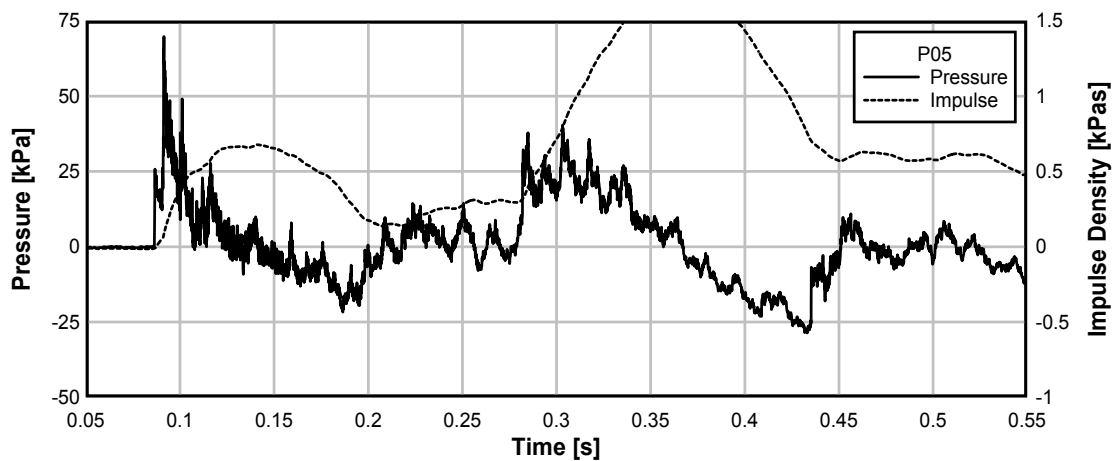
TE-8 812



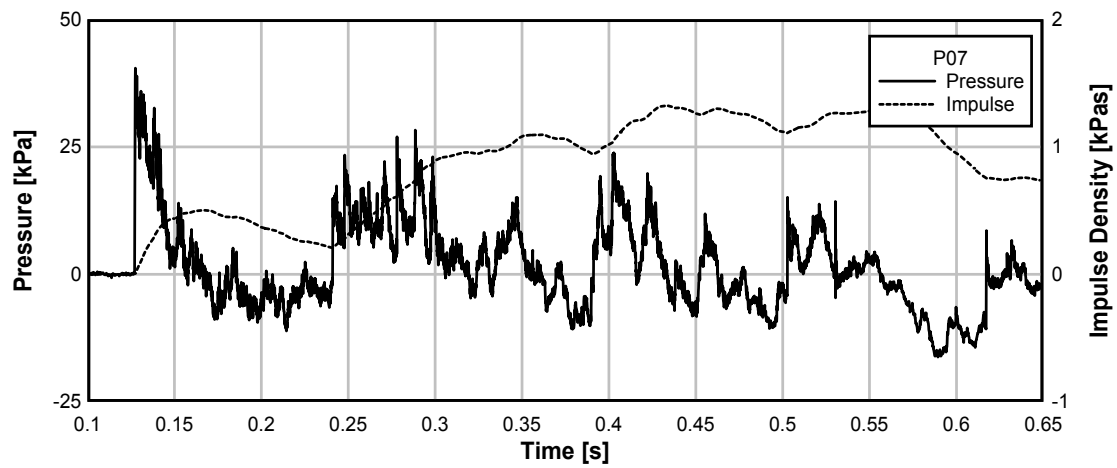
TE-8 812



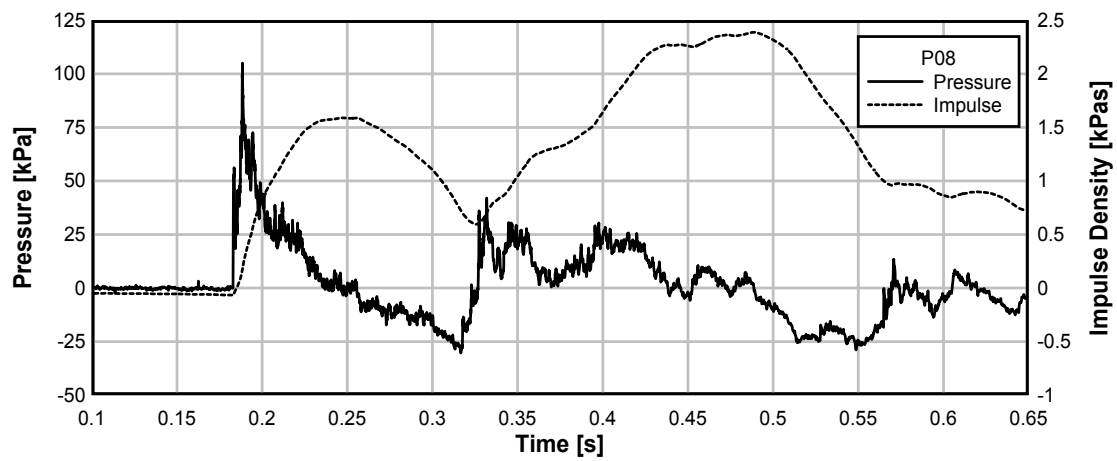
TE-8 812

Test 813: avstånd 5 m, 114 kg Hexotonal, 150° cylinder.**TE-8 813****TE-8 813****TE-8 813**

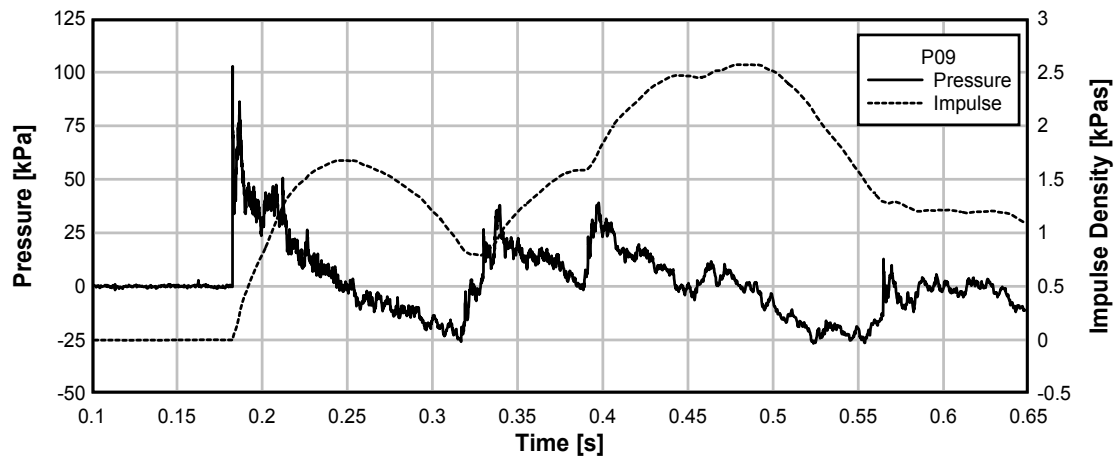
TE-8 813



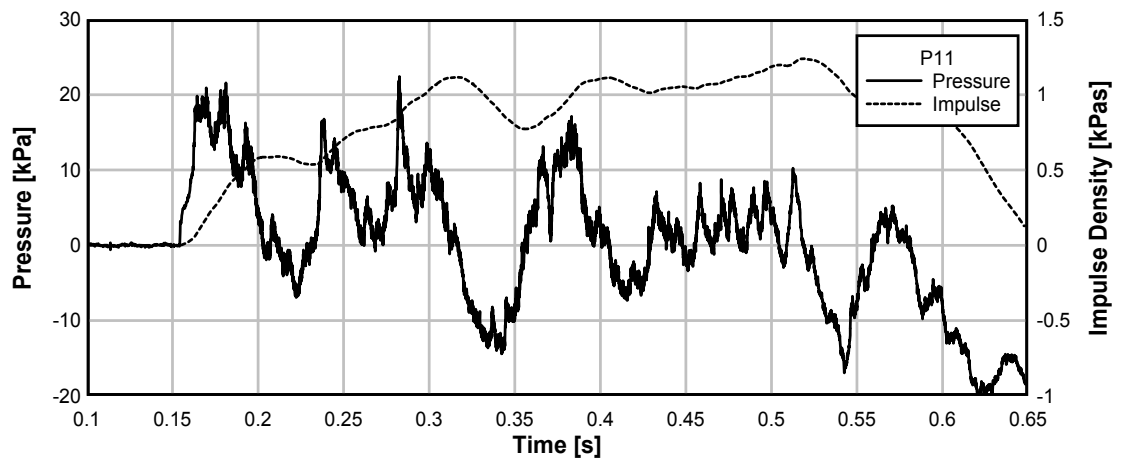
TE-8 813



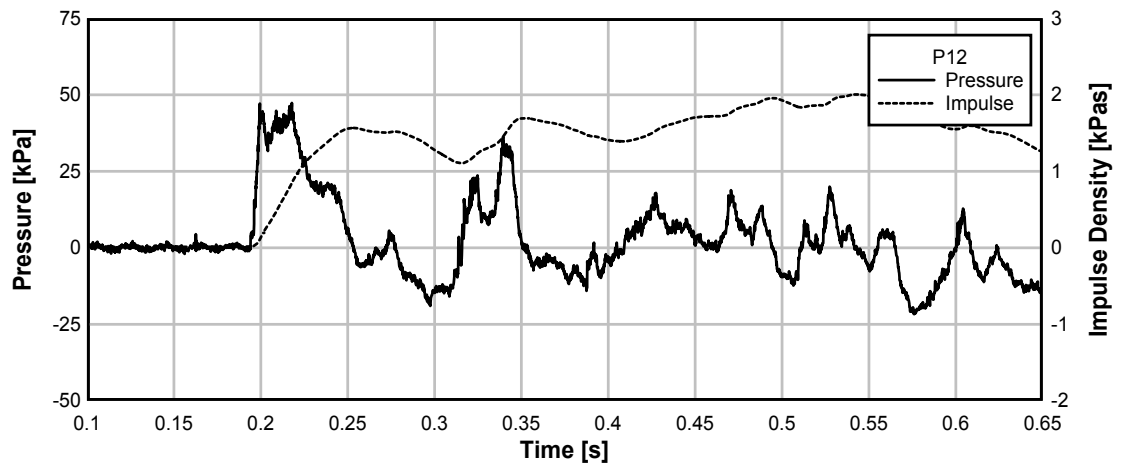
TE-8 813



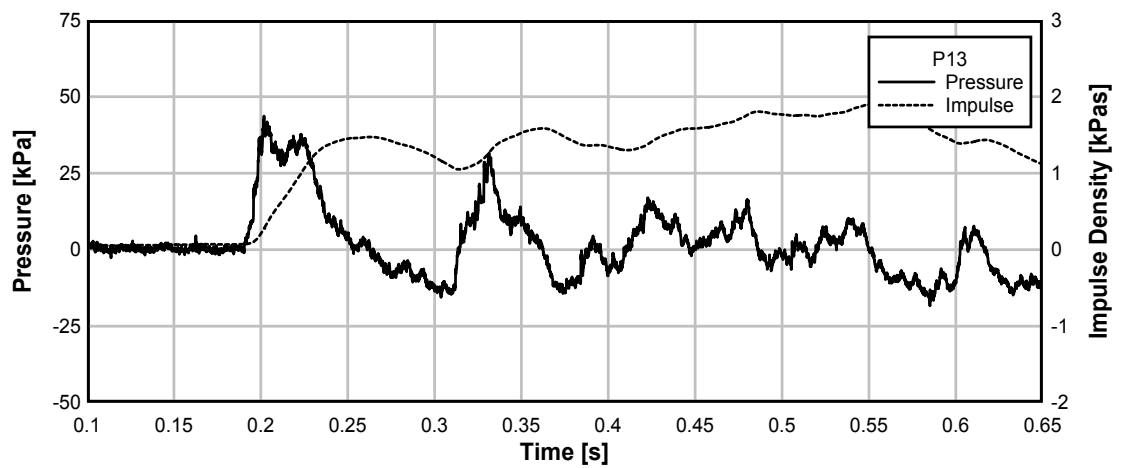
TE-8 813

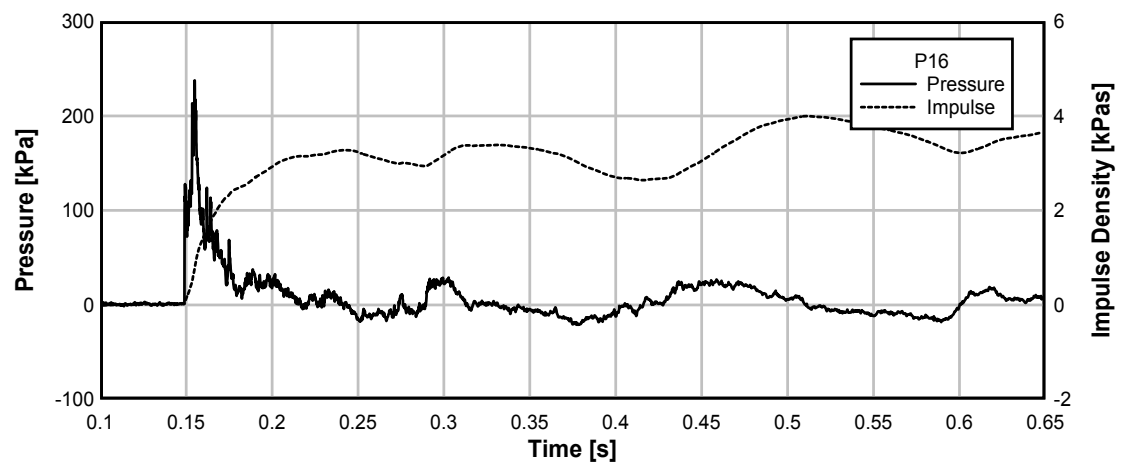


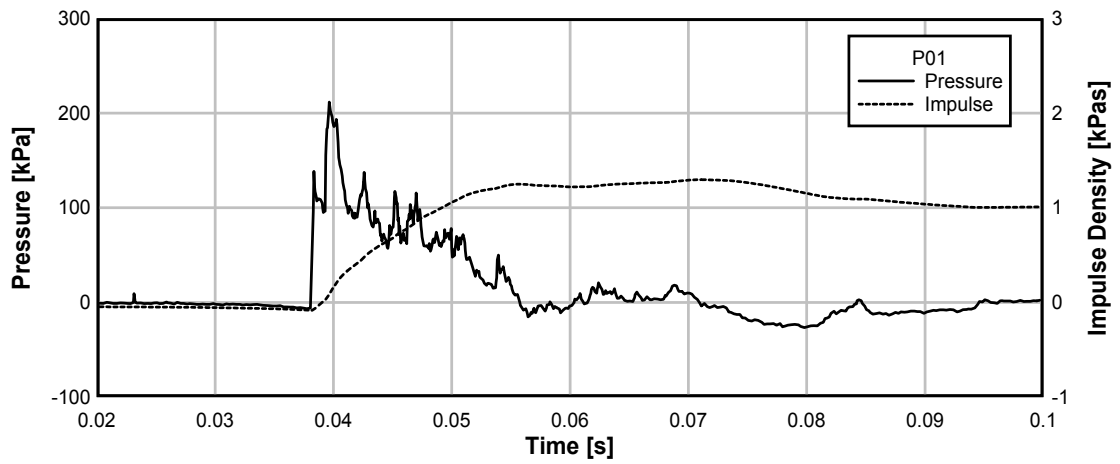
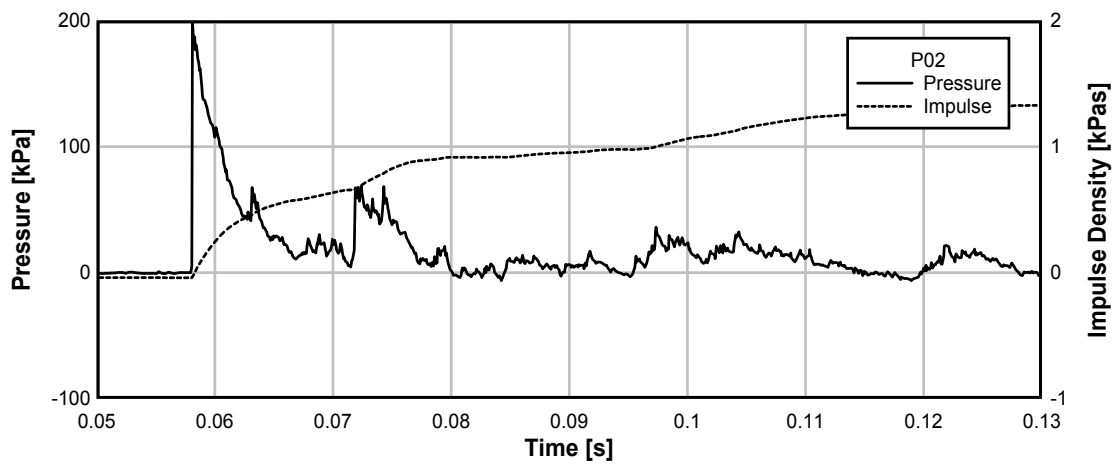
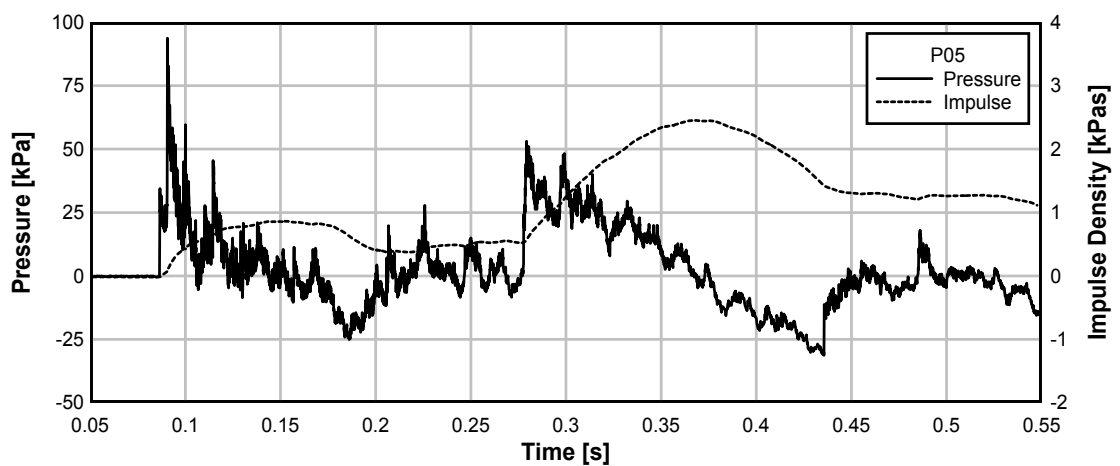
TE-8 813



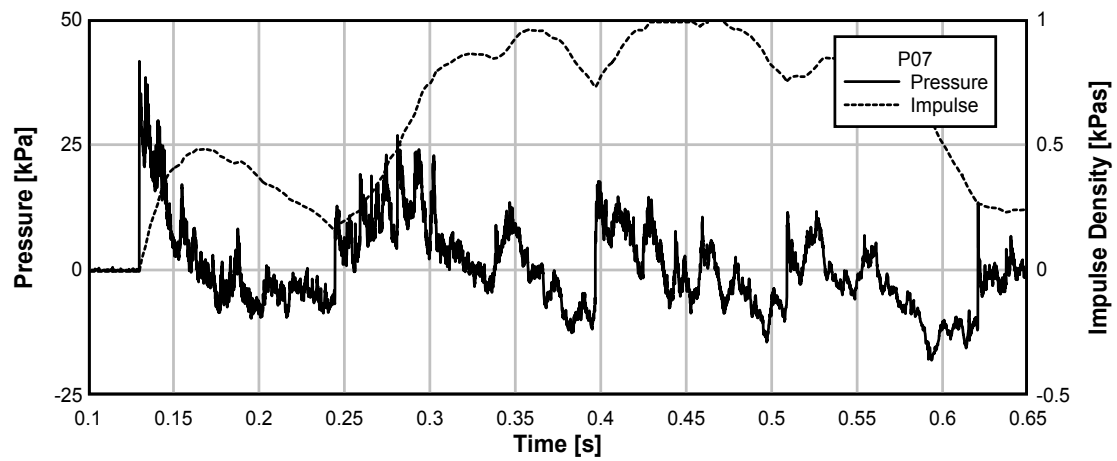
TE-8 813



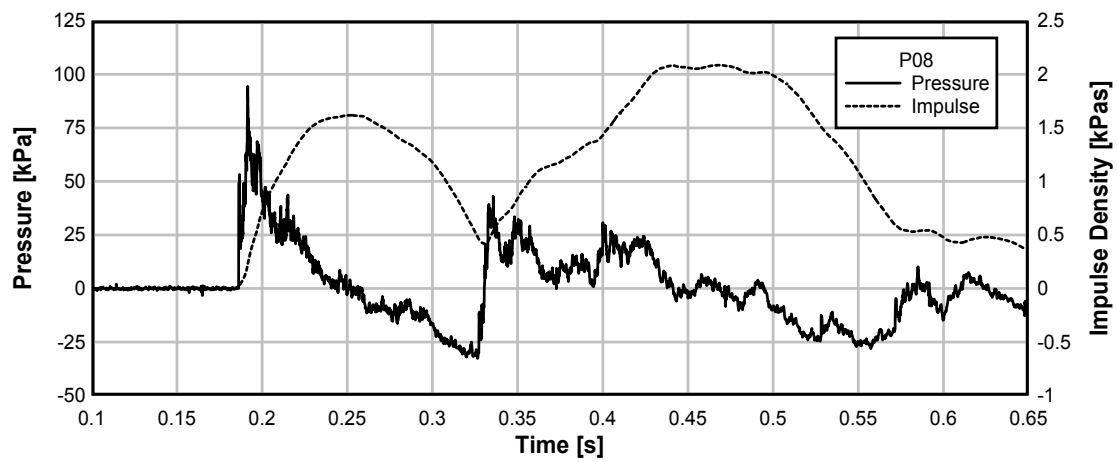
TE-8 813

Test 814: avstånd 5 m, 114 kg Hexotonal, 0° cylinder.**TE-8 814****TE-8 814****TE-8 815**

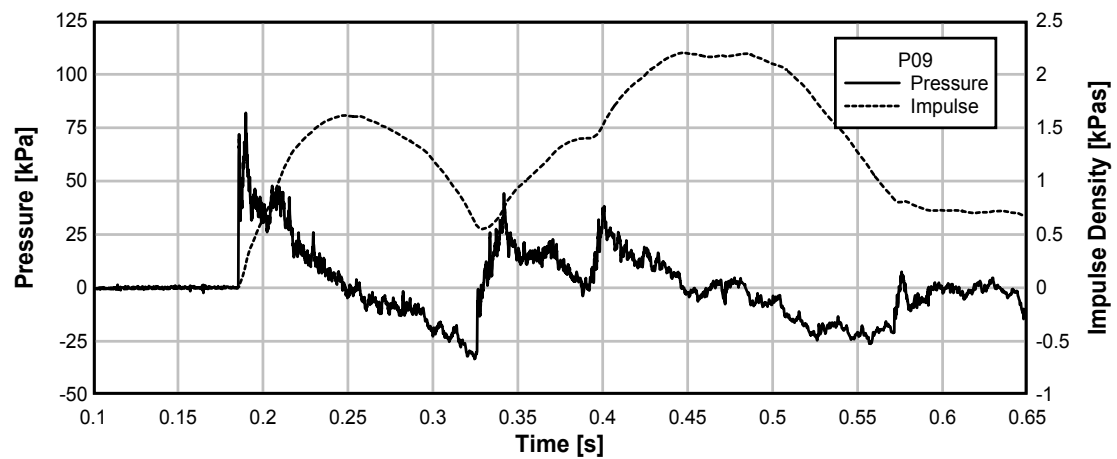
TE-8 814



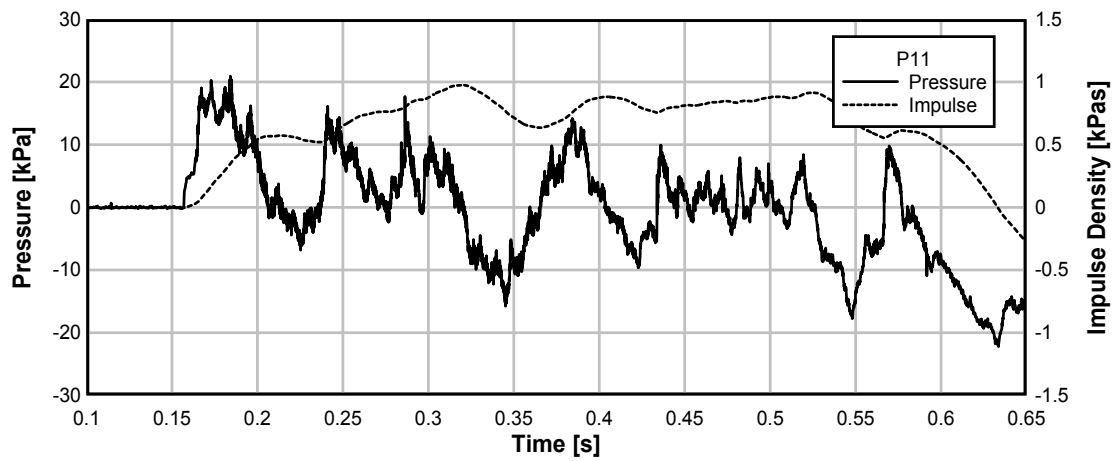
TE-8 814



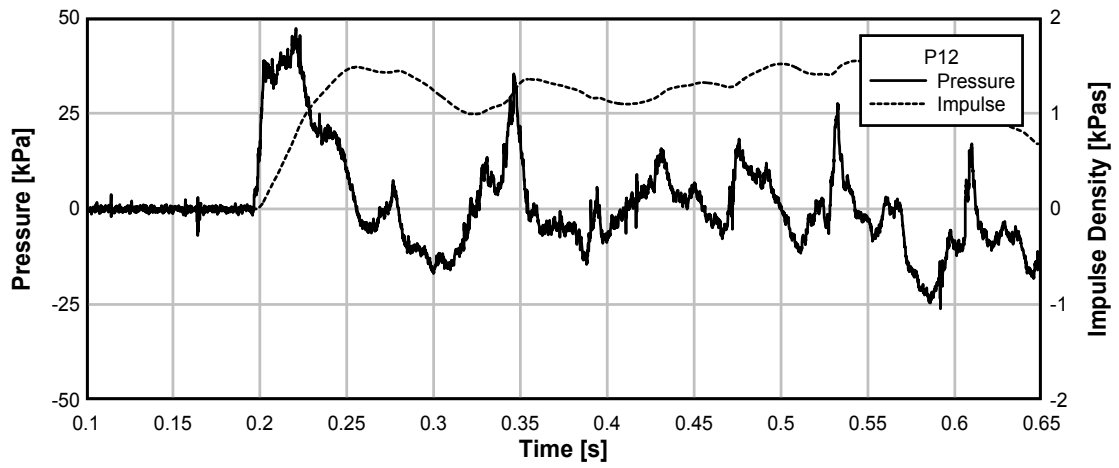
TE-8 814



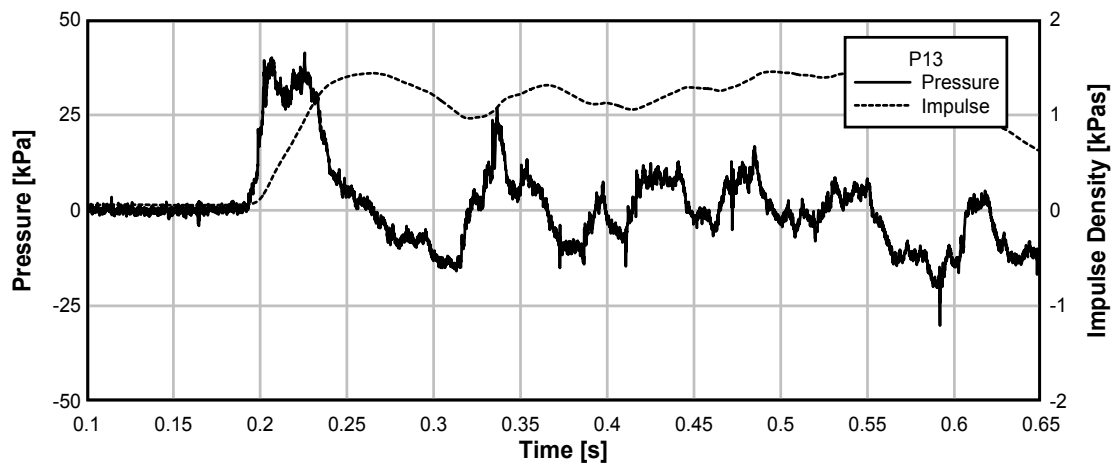
TE-8 814



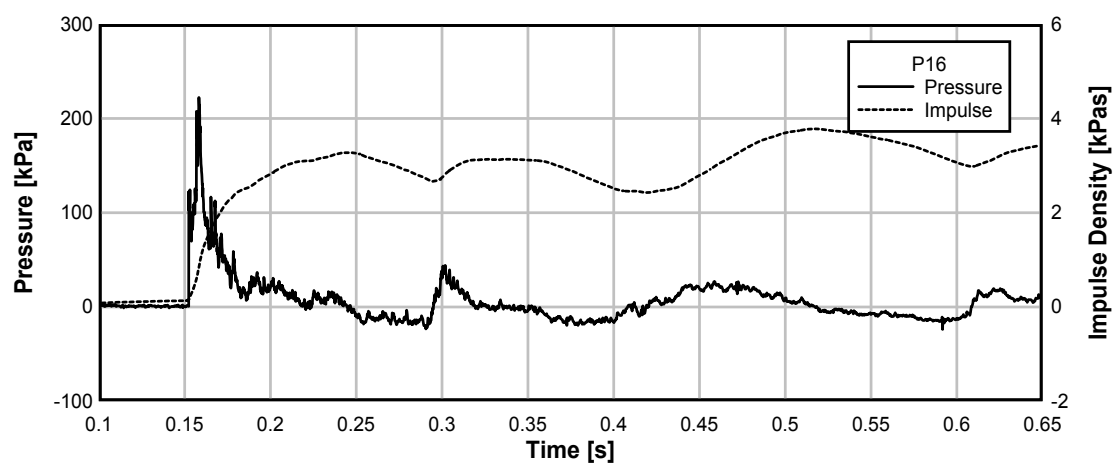
TE-8 814

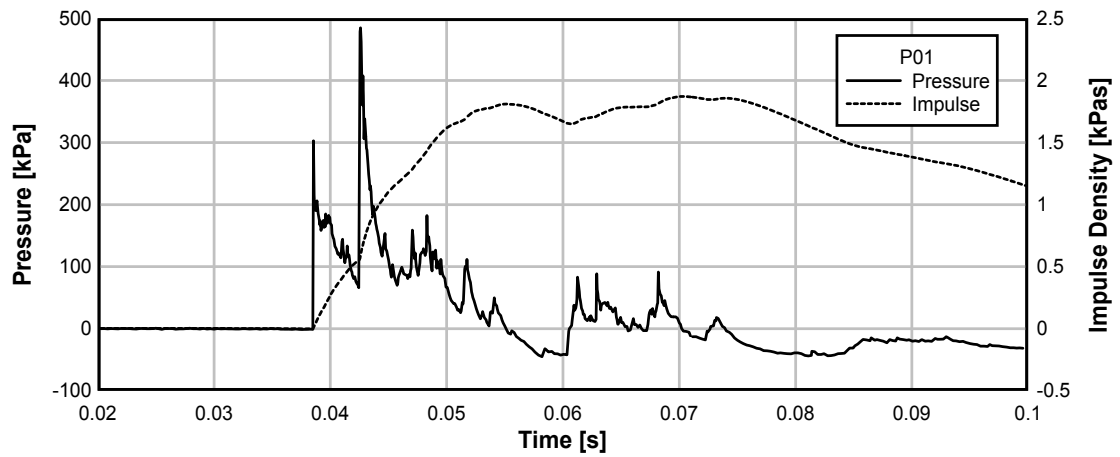
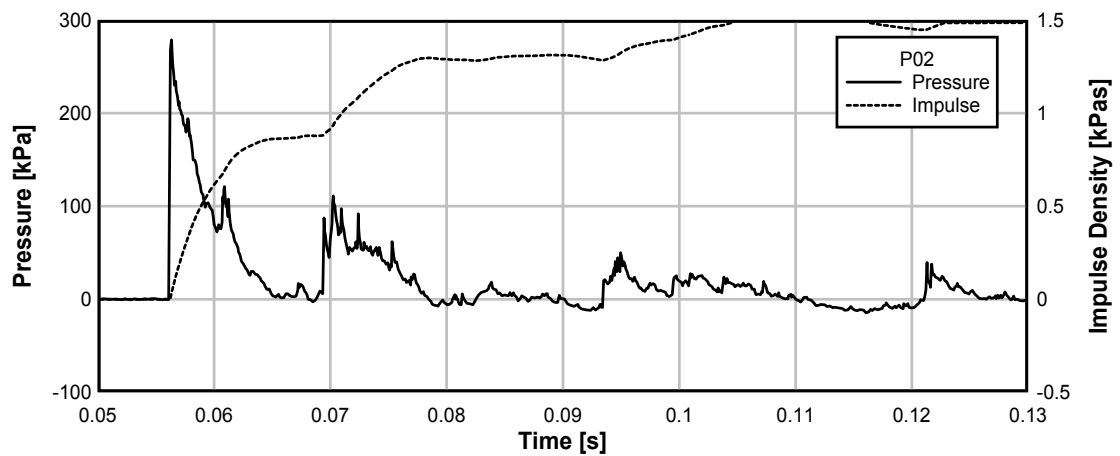
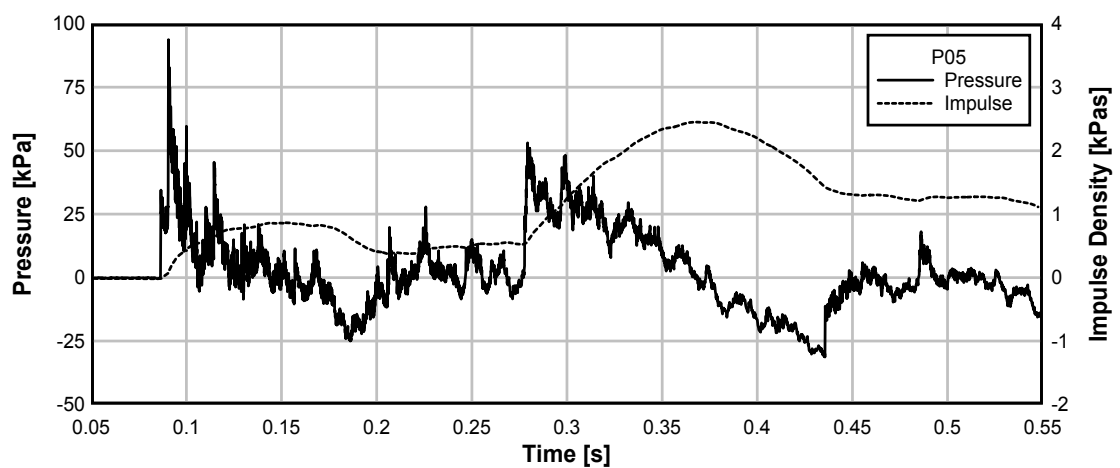


TE-8 814

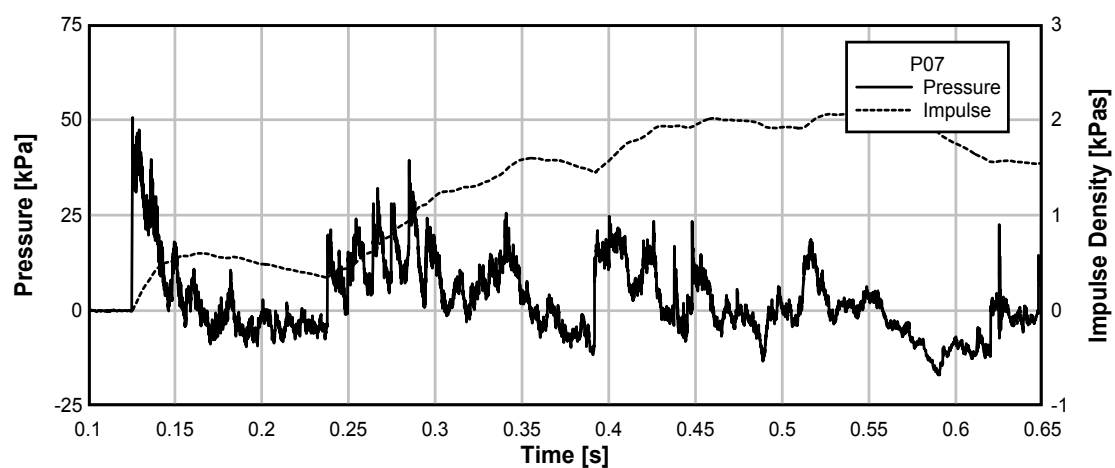


TE-8 814

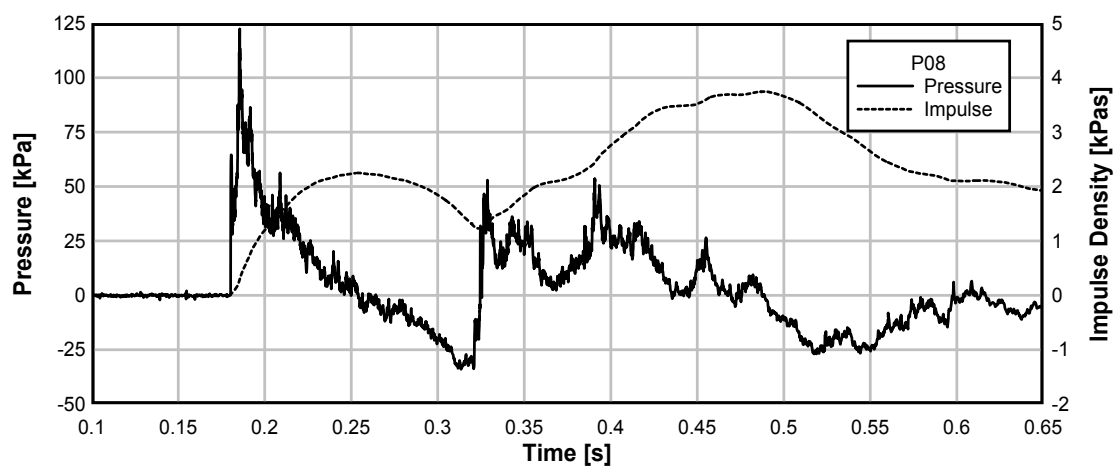


Test 815: avstånd 5 m, 114 kg Hexotonal, 60° cylinder.**TE-8 815****TE-8 815****TE-8 815**

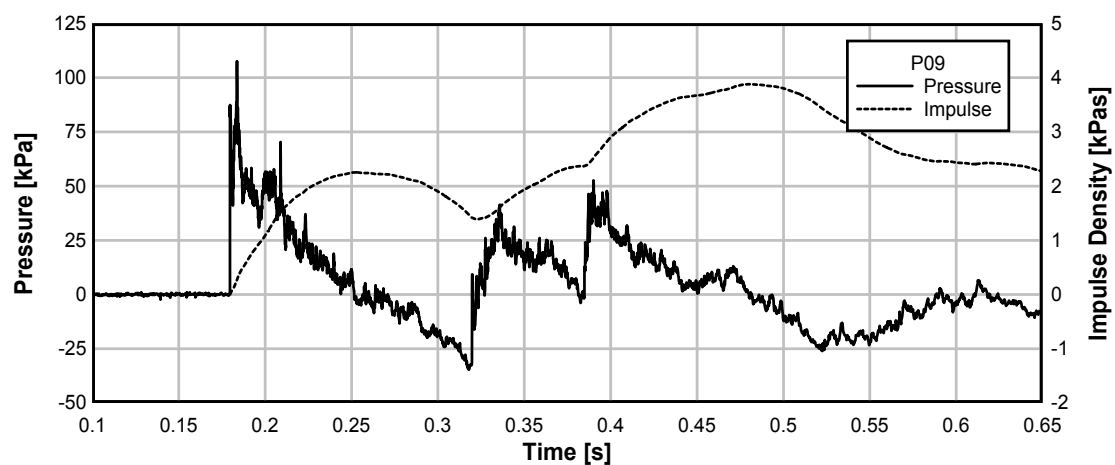
TE-8 815



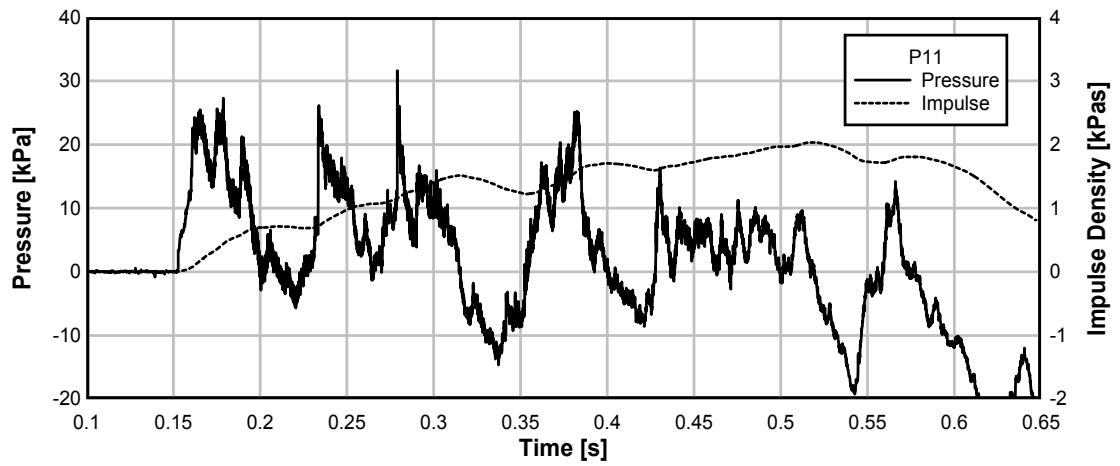
TE-8 815



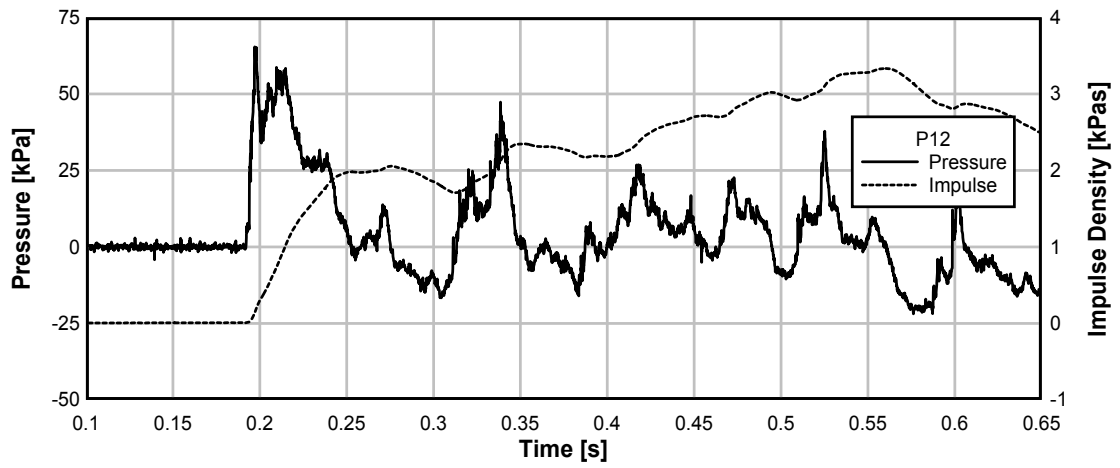
TE-8 815



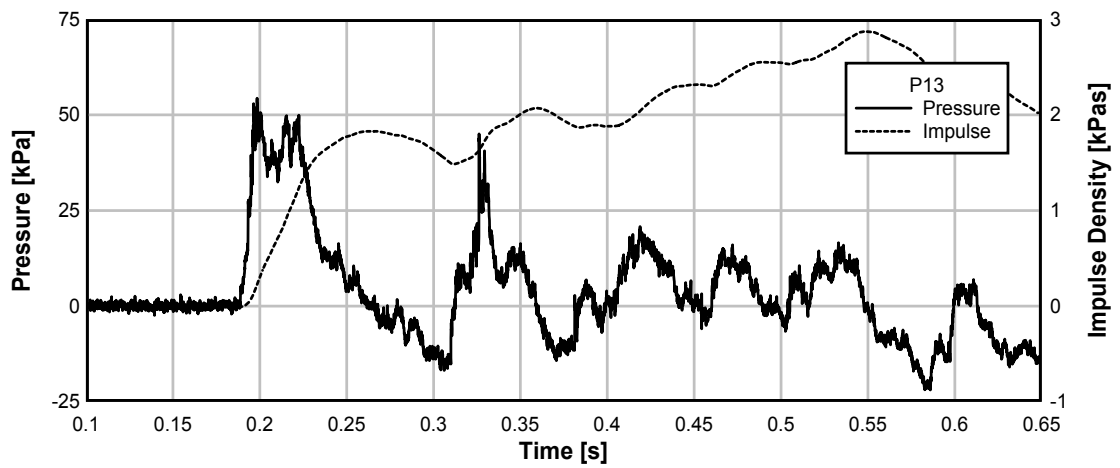
TE-8 815

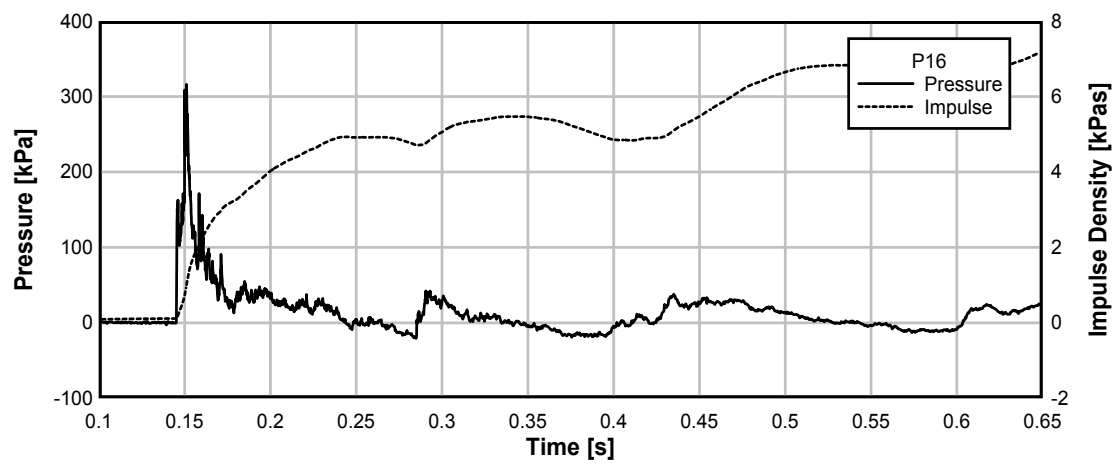


TE-8 815



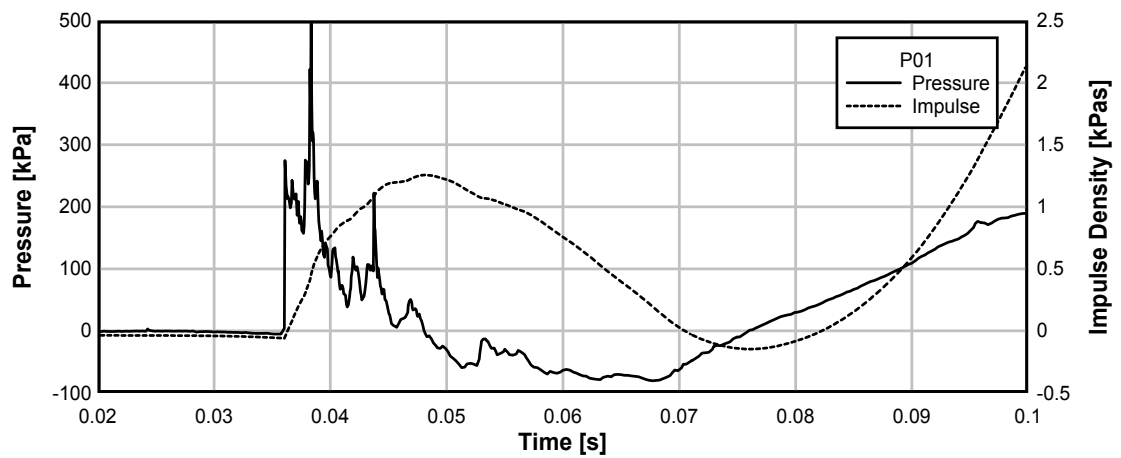
TE-8 815



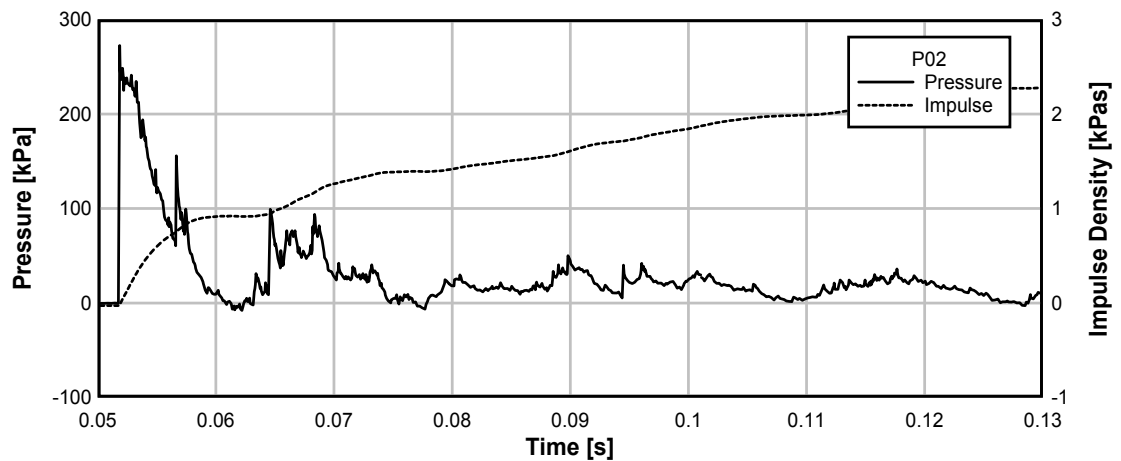
TE-8 815

Test 816: avstånd 5 m, 114 kg Hexotonal, 150° åt sidan cylinder.

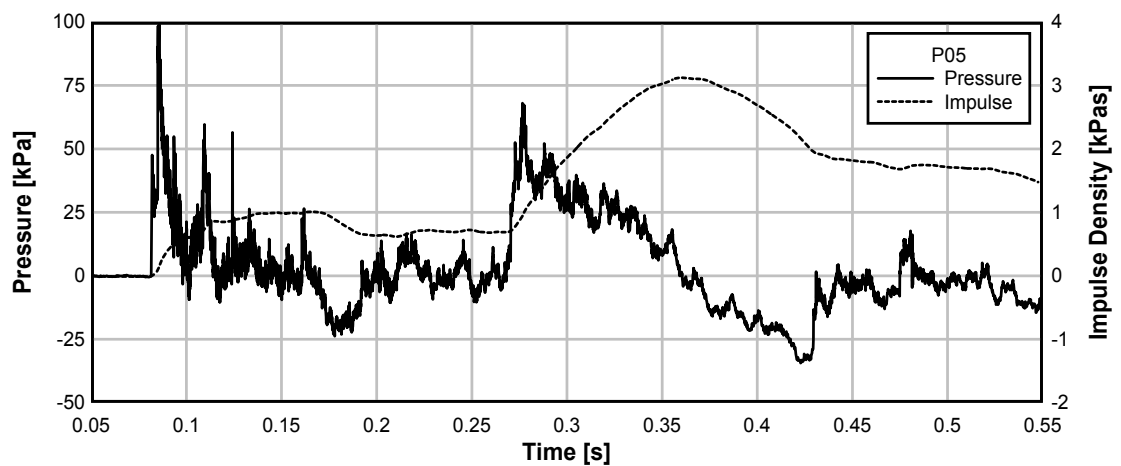
TE-8 816



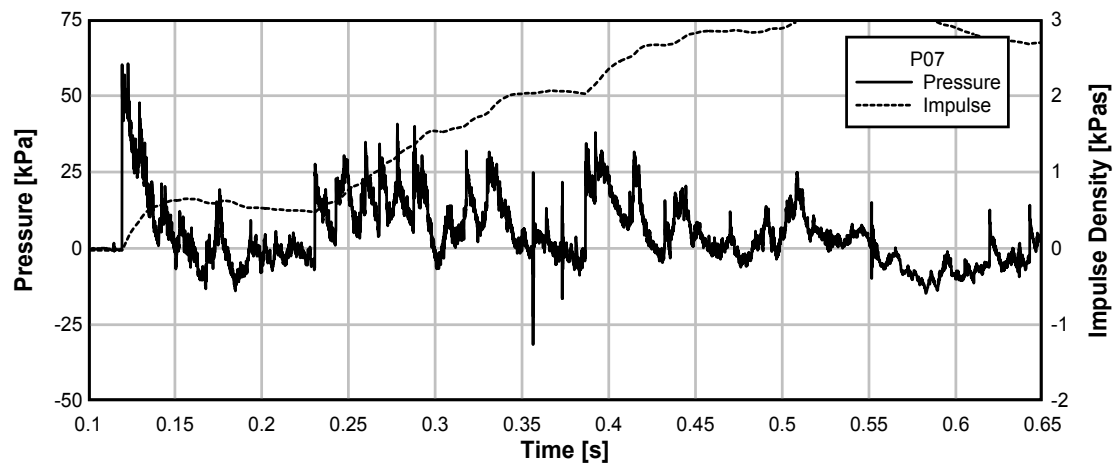
TE-8 816



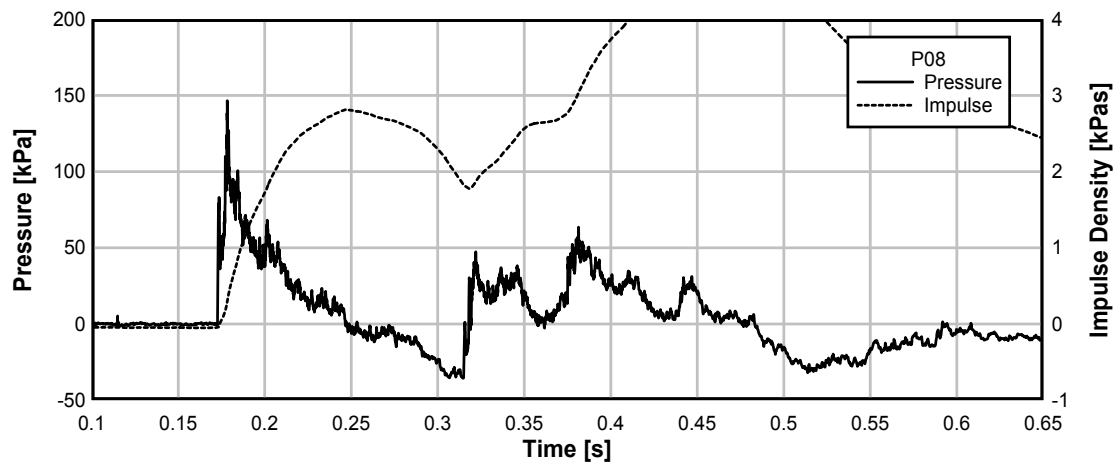
TE-8 816



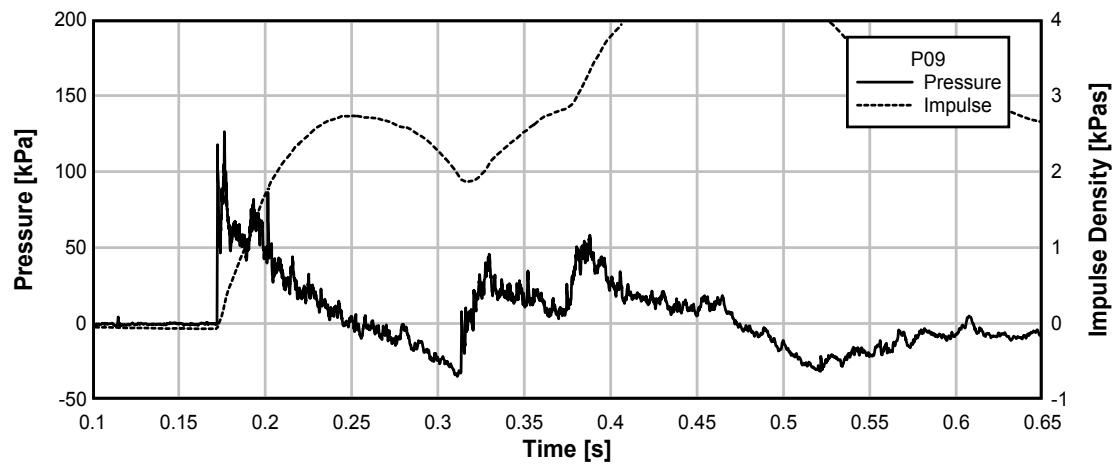
TE-8 816



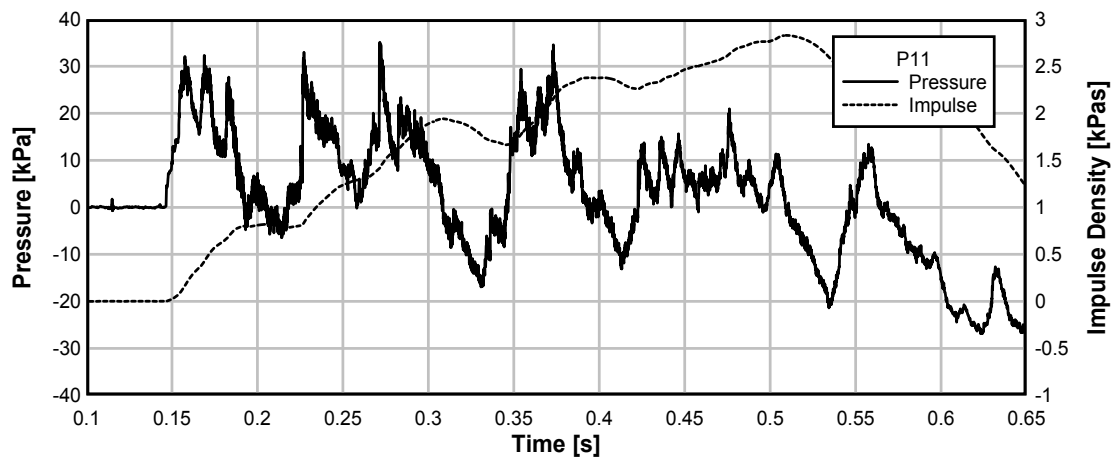
TE-8 816



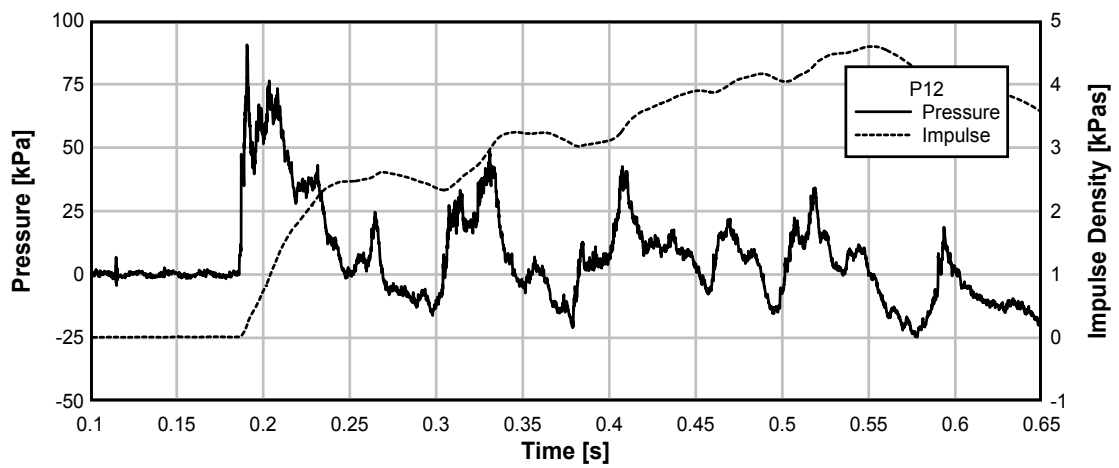
TE-8 816



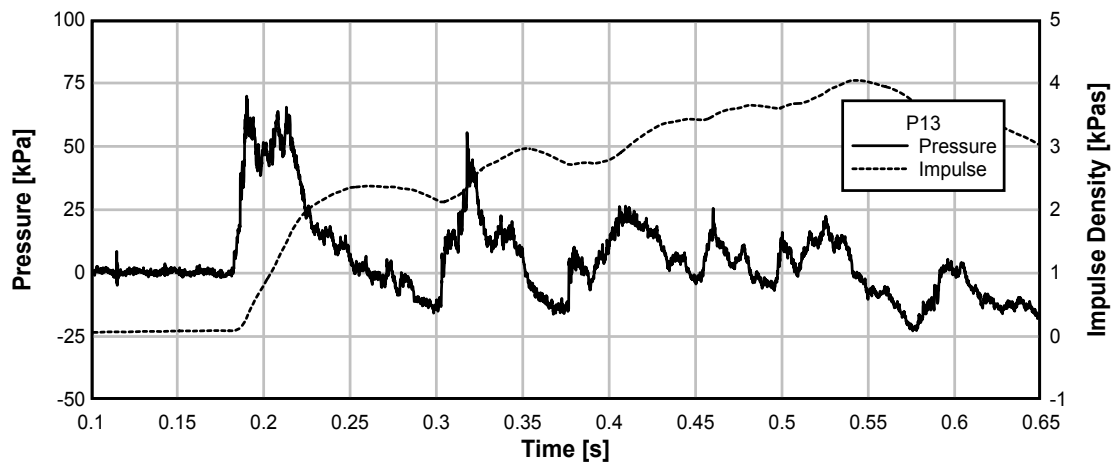
TE-8 816

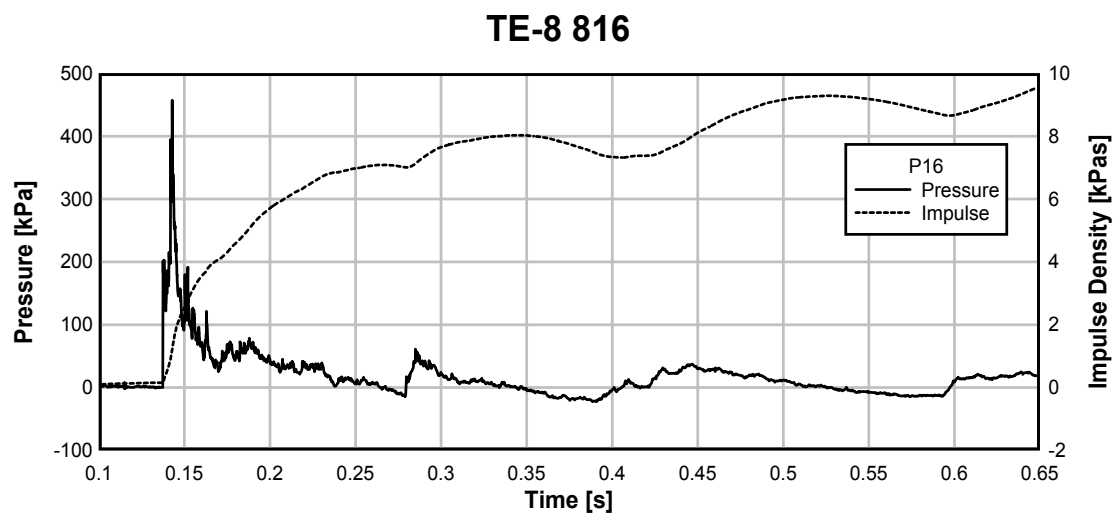


TE-8 816



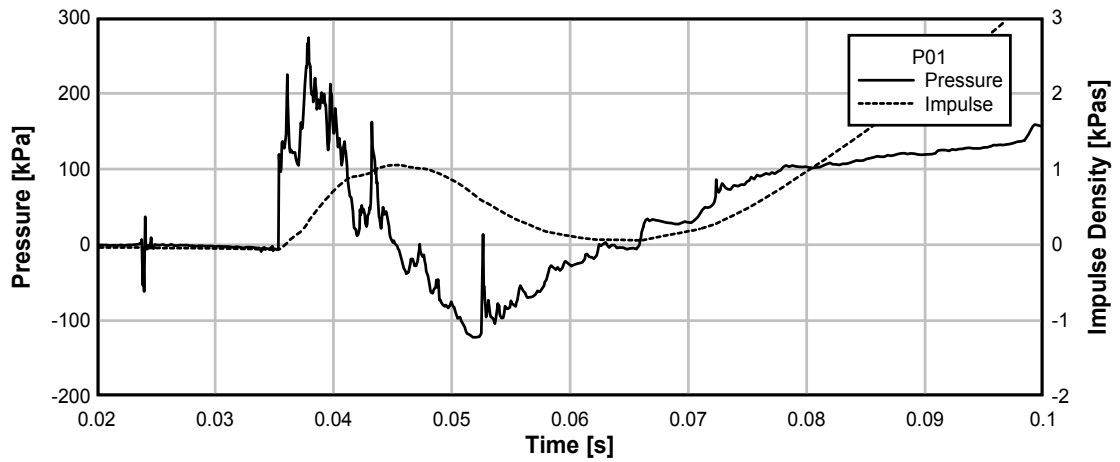
TE-8 816



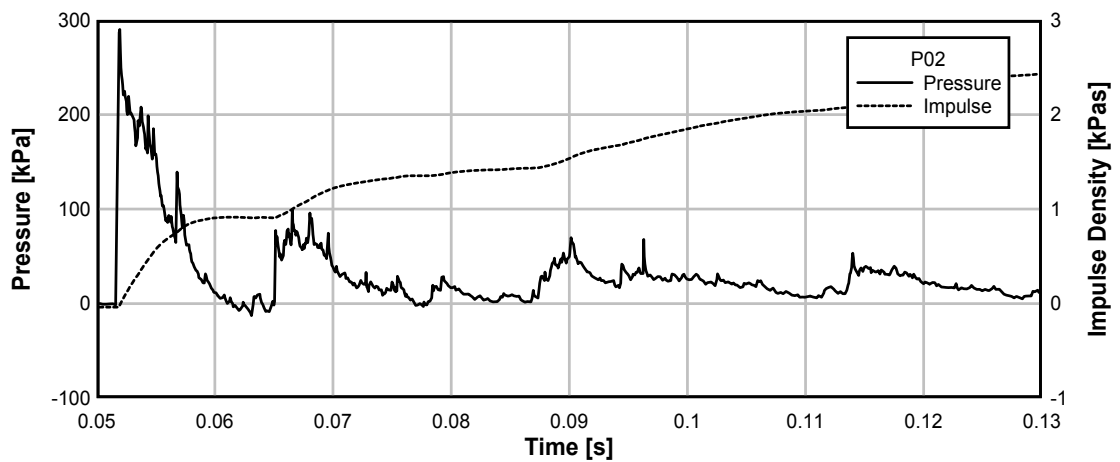


Test 817: avstånd 5 m, 114 kg Hexotonal, liggande tvärs cylinder.

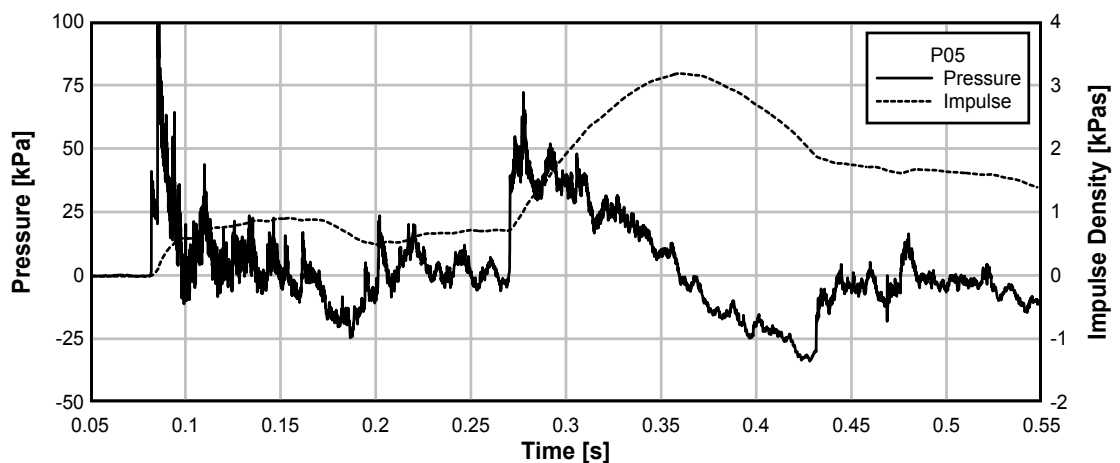
TE-8 817



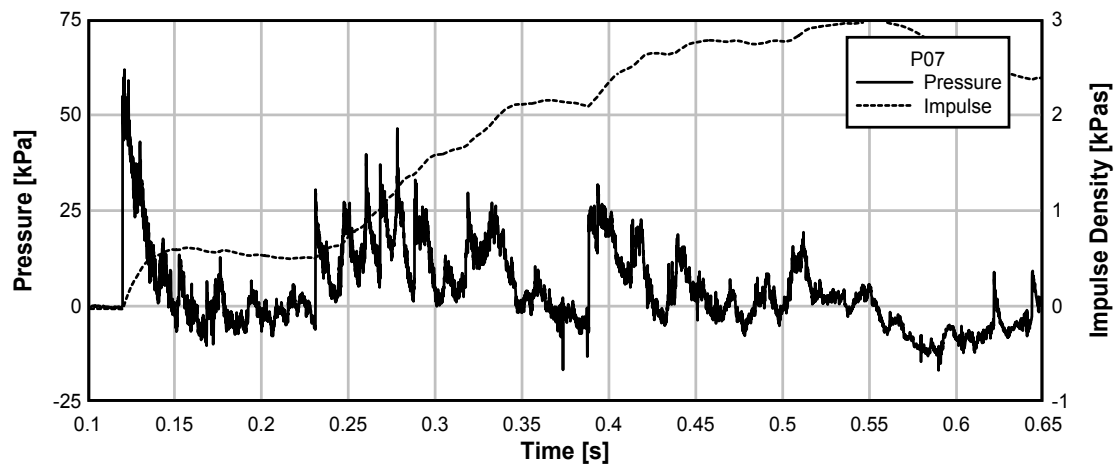
TE-8 817



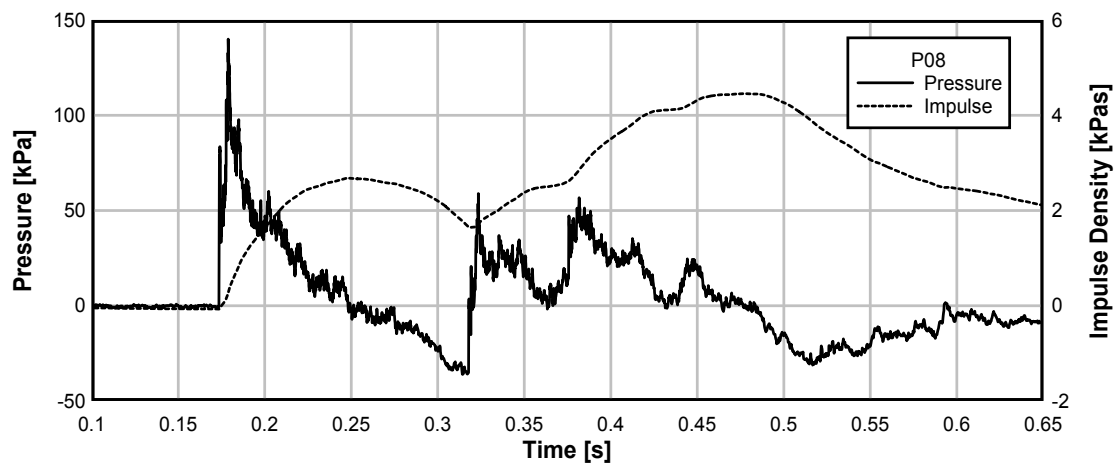
TE-8 817



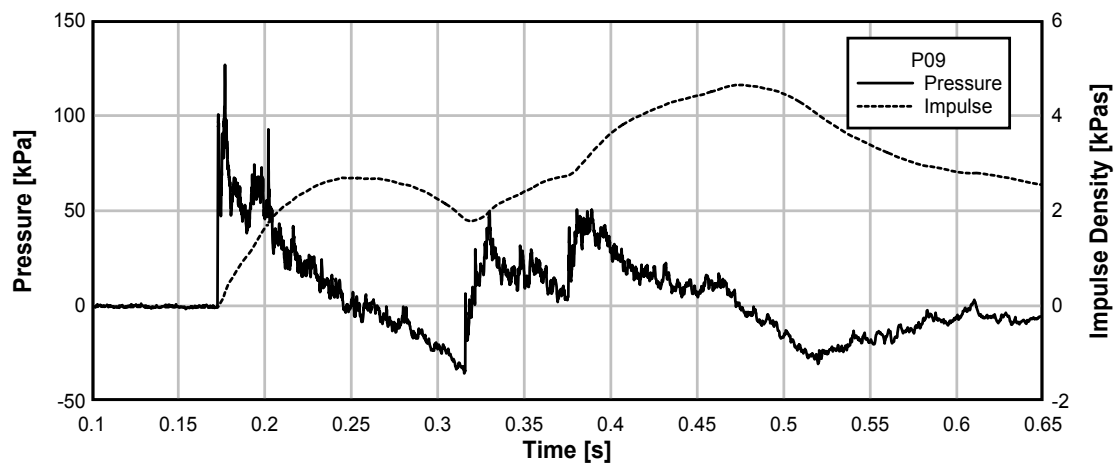
TE-8 817



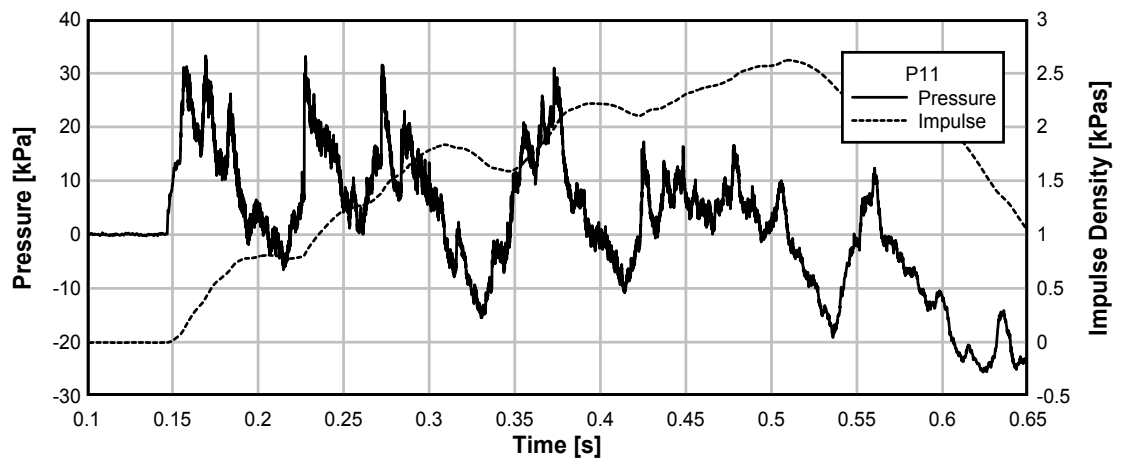
TE-8 817



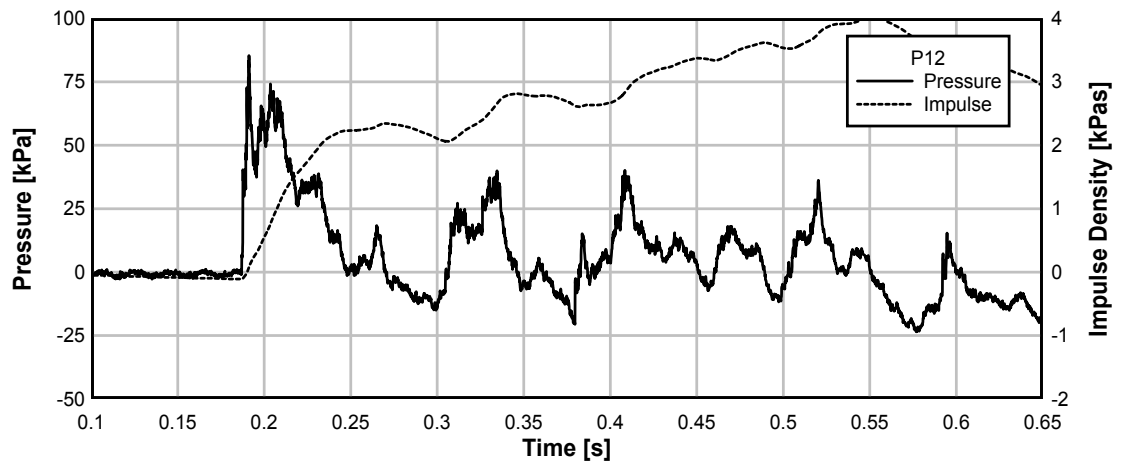
TE-8 817



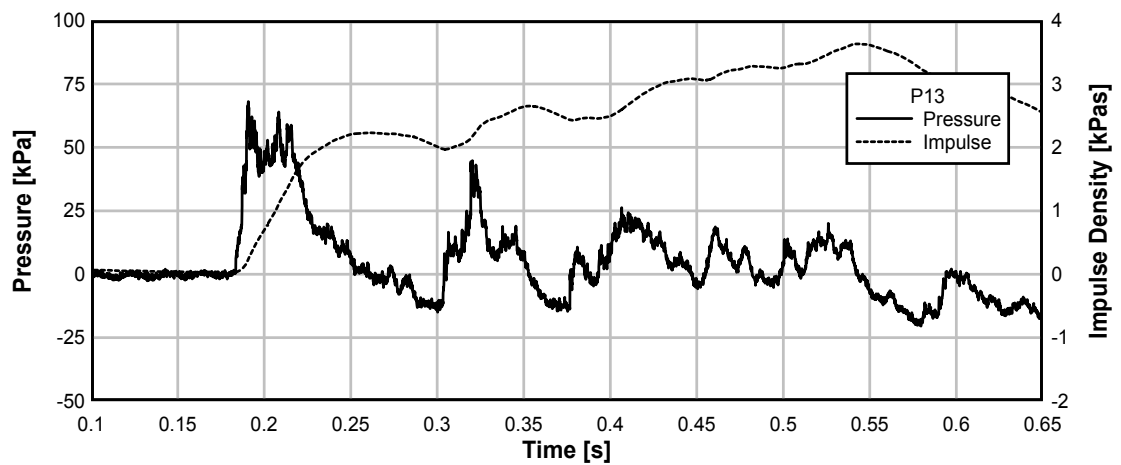
TE-8 817

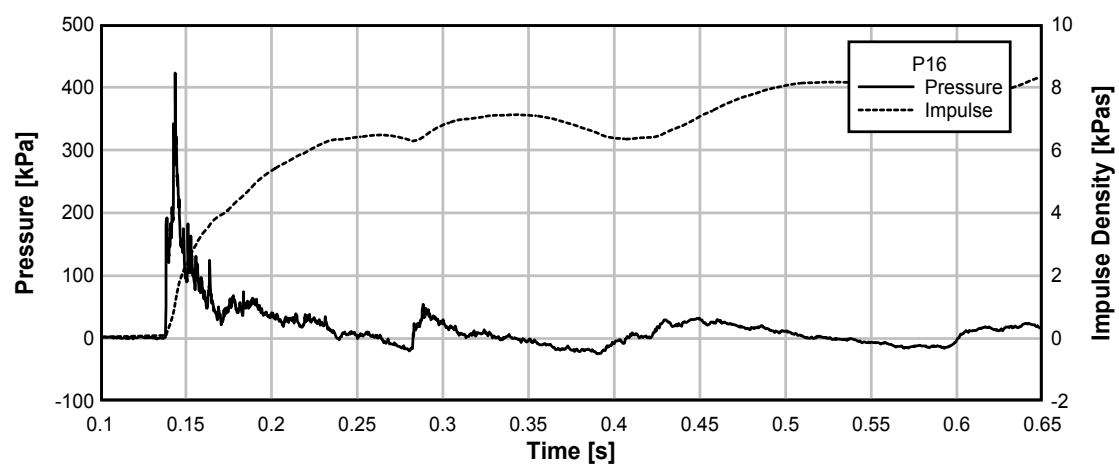


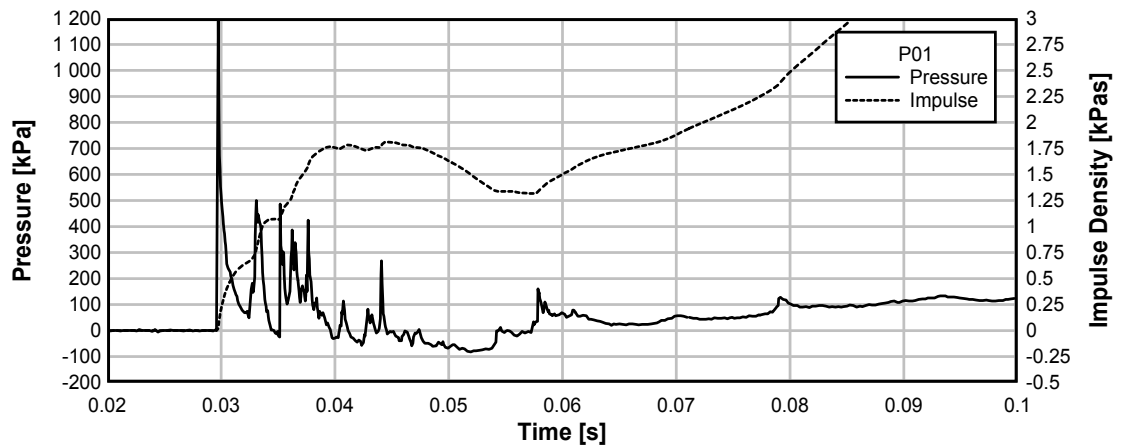
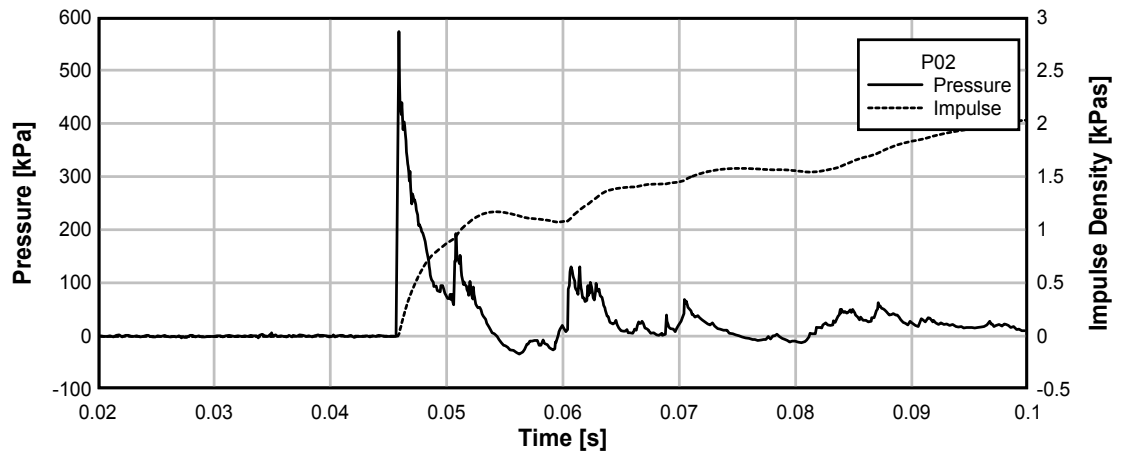
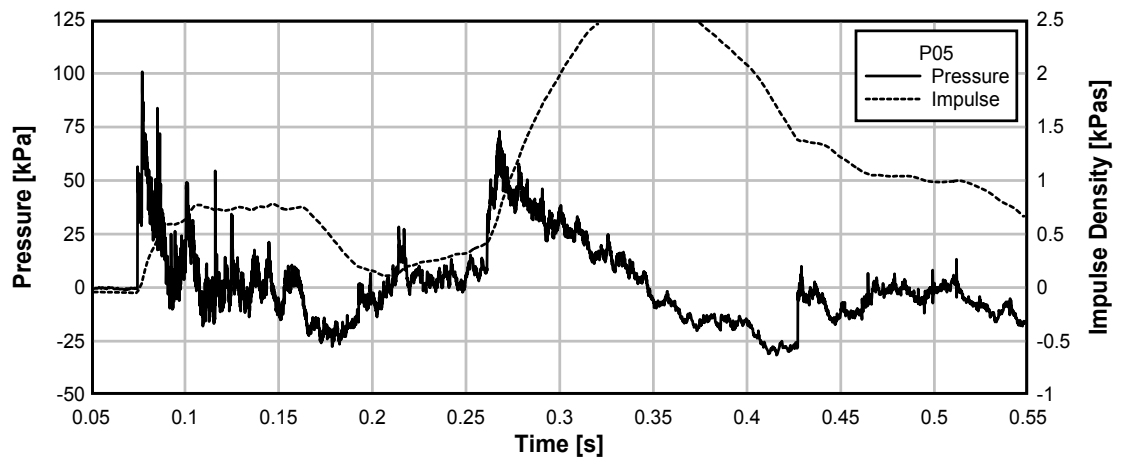
TE-8 817



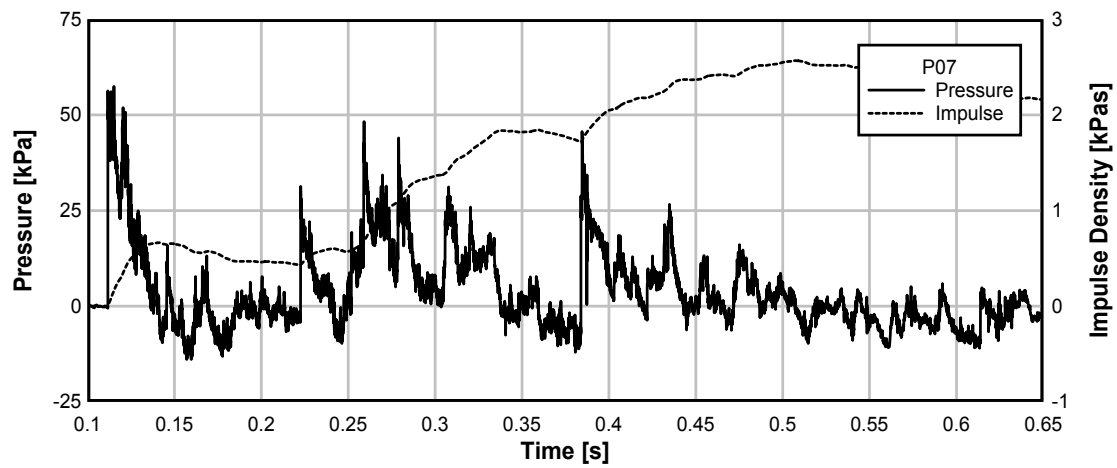
TE-8 817



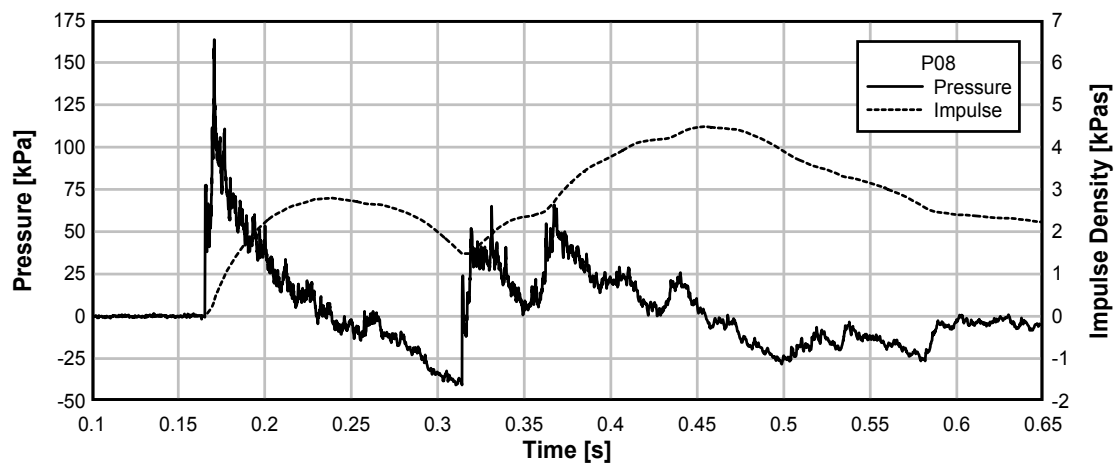
TE-8 817

Test 818: avstånd -2 m, 125 kg Prillit.**TE-8 818****TE-8 818****TE-8 818**

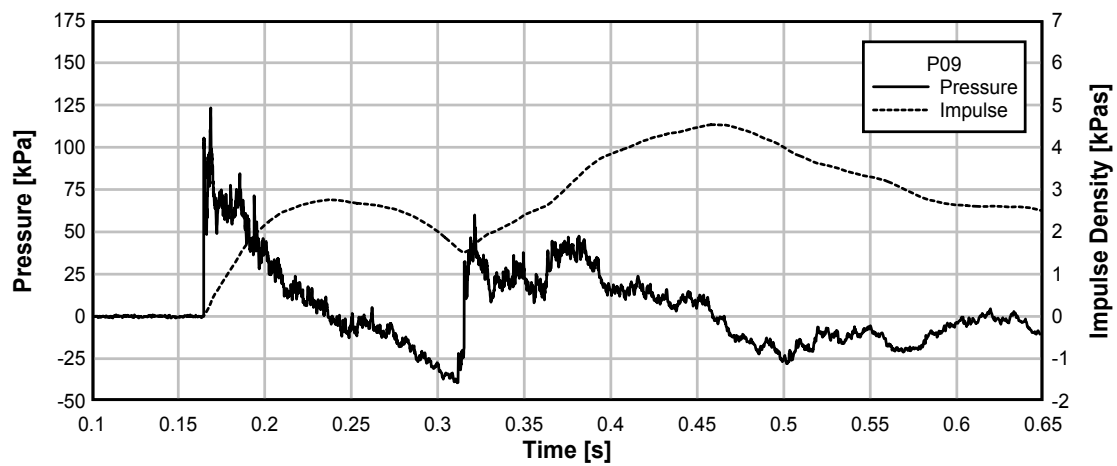
TE-8 818



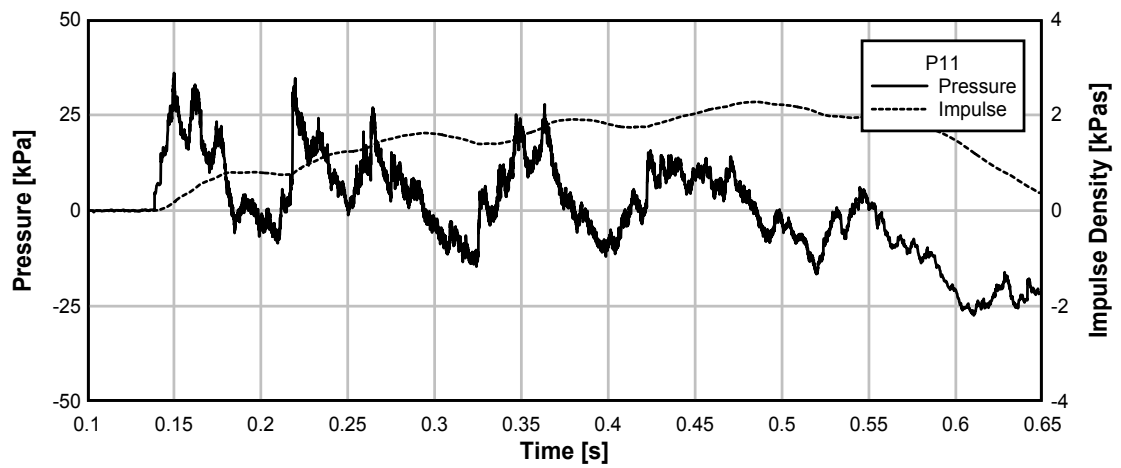
TE-8 818



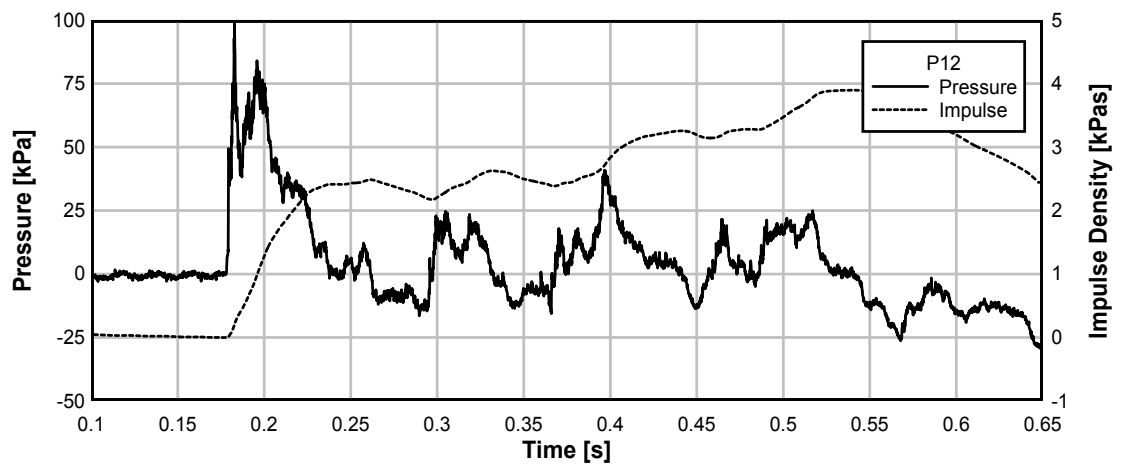
TE-8 818



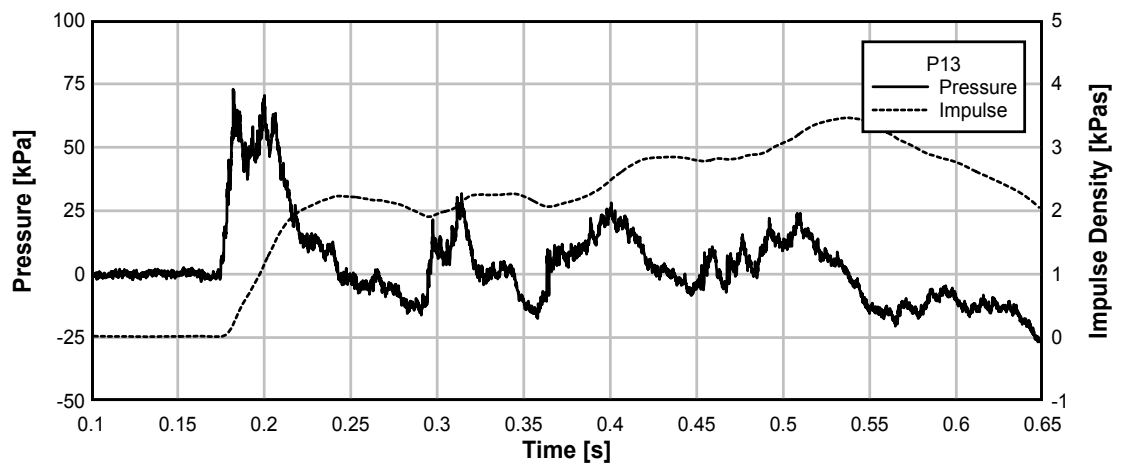
TE-8 818

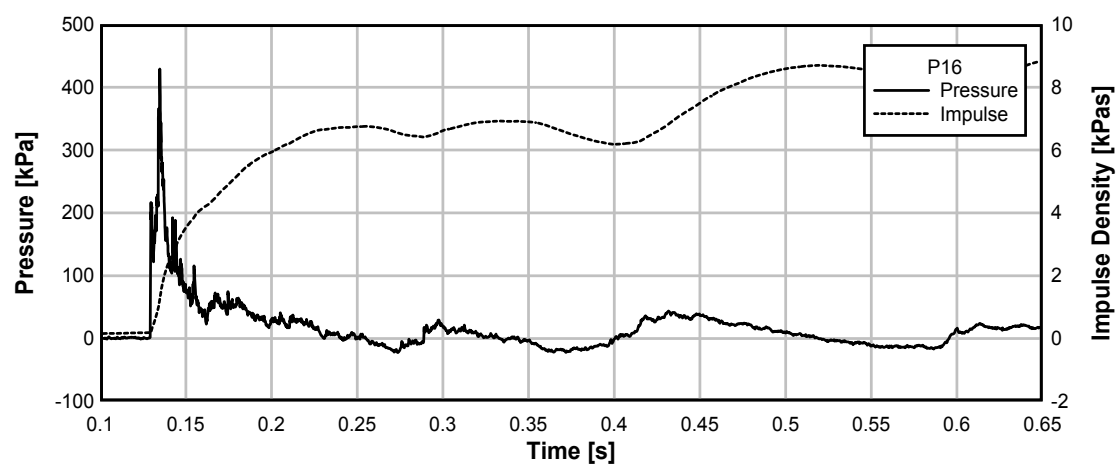


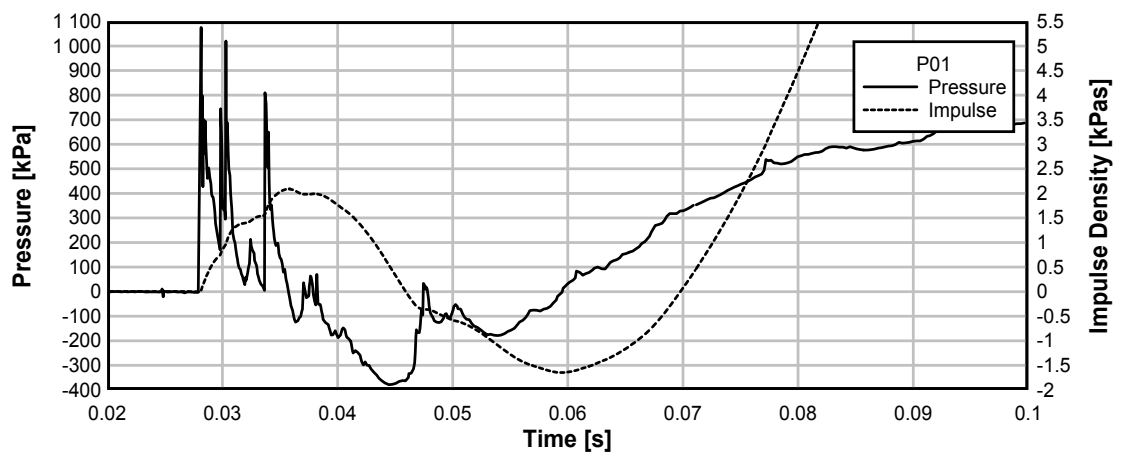
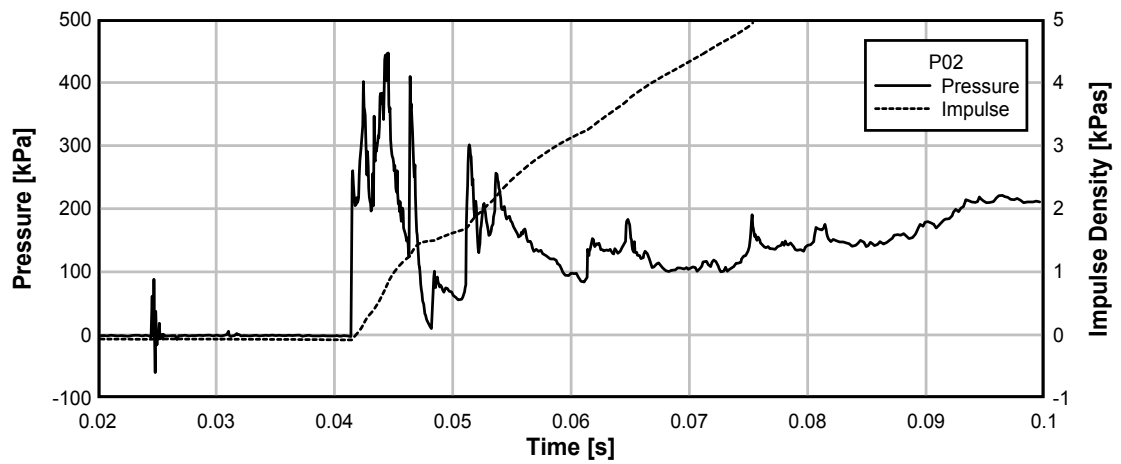
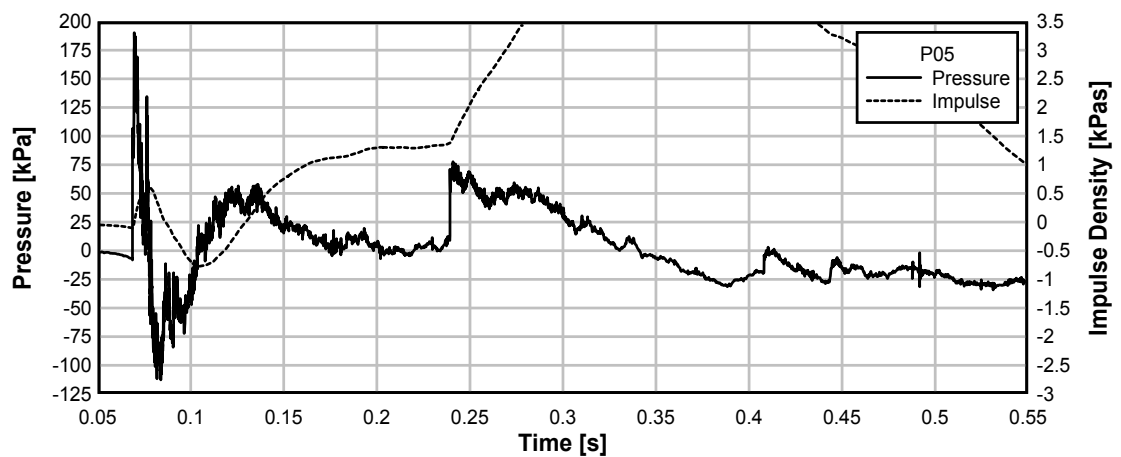
TE-8 818



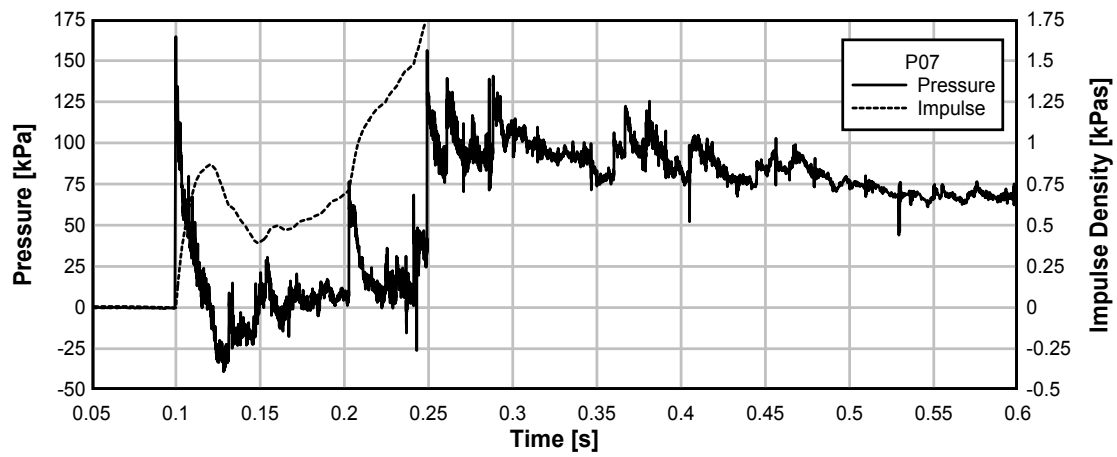
TE-8 818



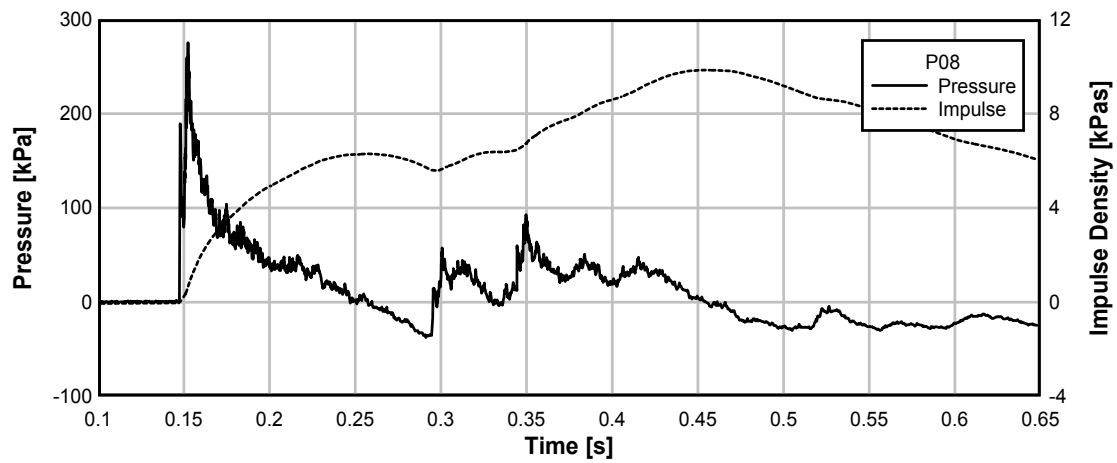
TE-8 818

Test 819: avstånd -2 m, 114 kg Hexotonal, stående cylinder.**TE-8 819****TE-8 819****TE-8 819**

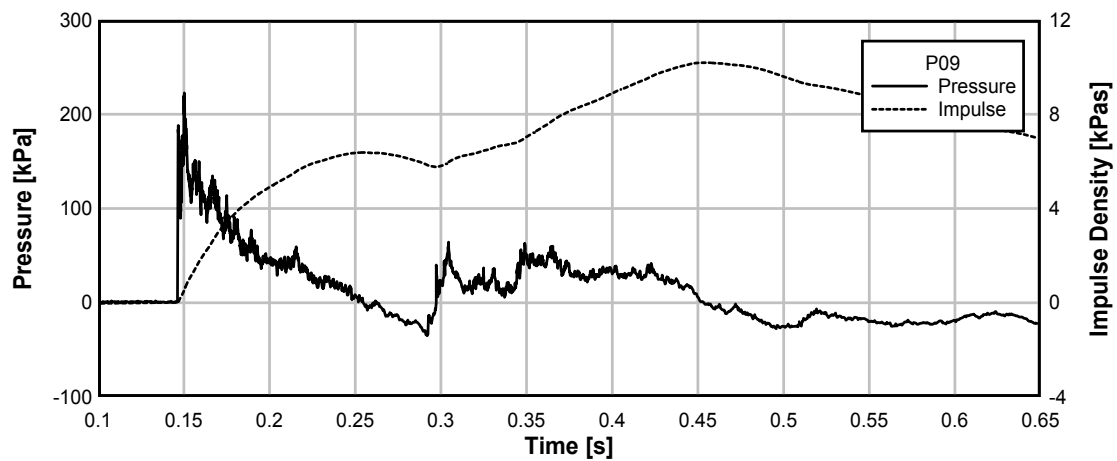
TE-8 819



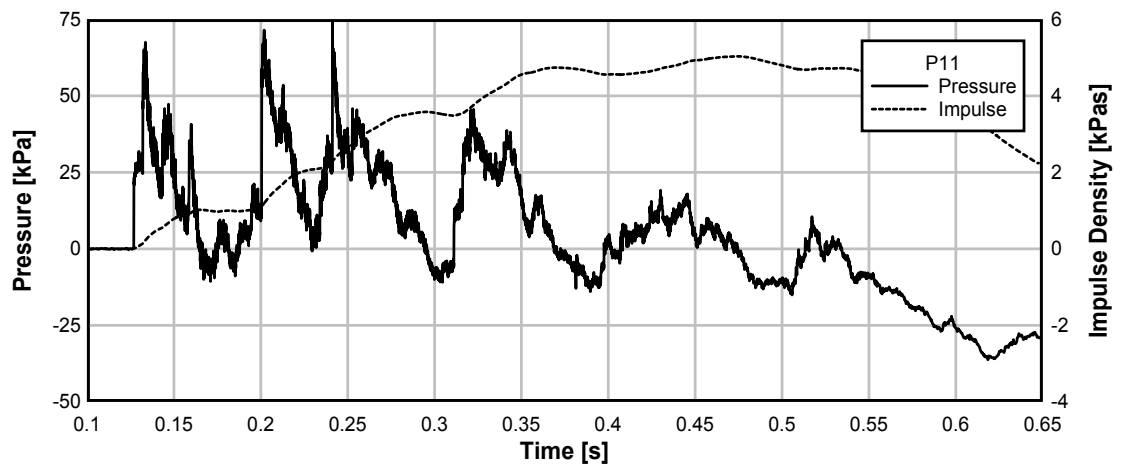
TE-8 819



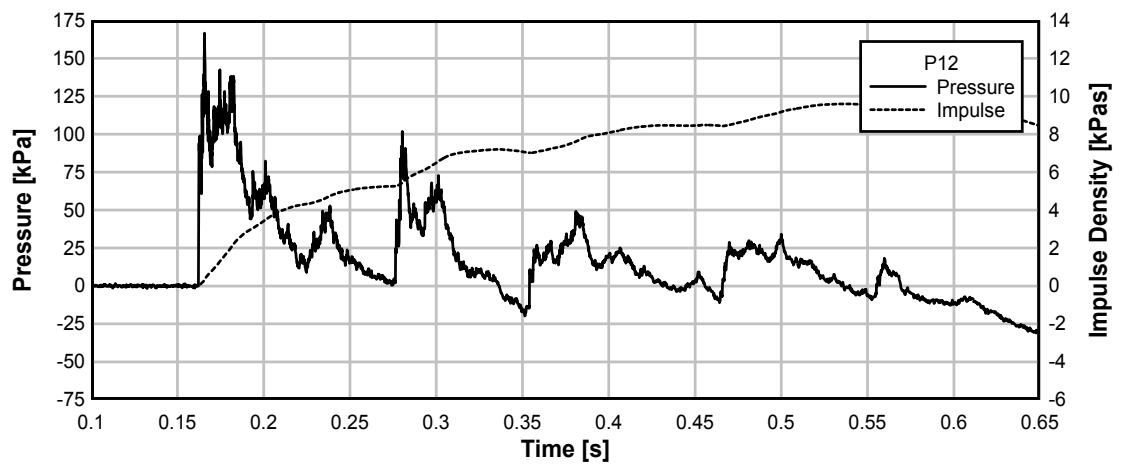
TE-8 819



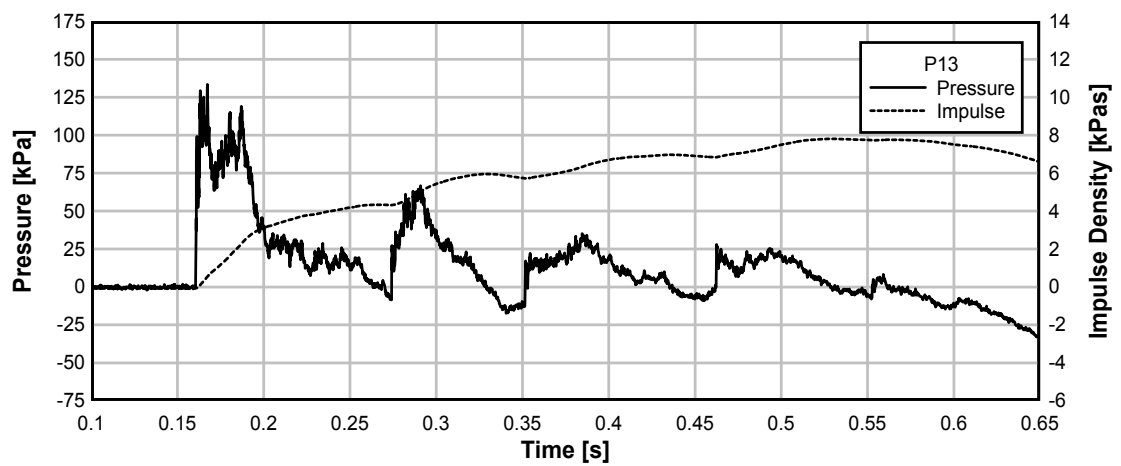
TE-8 819

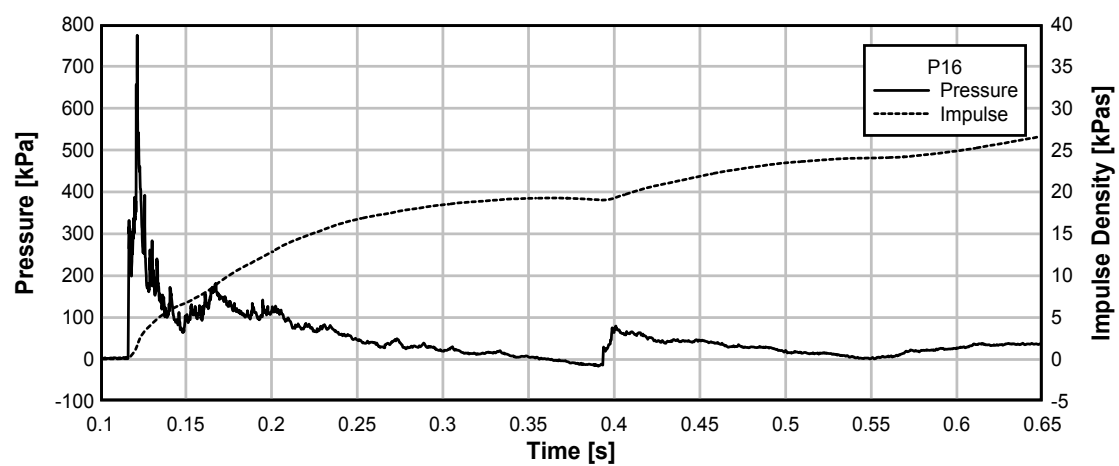


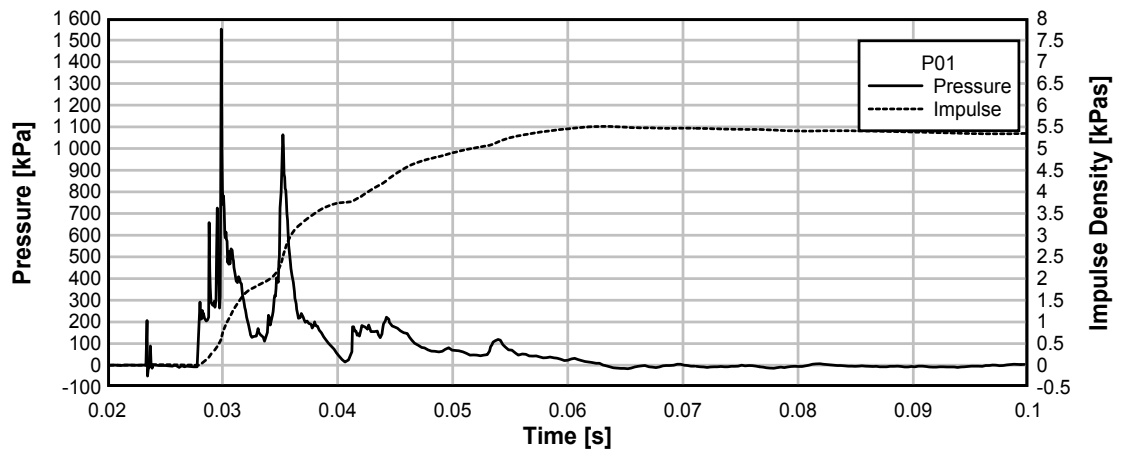
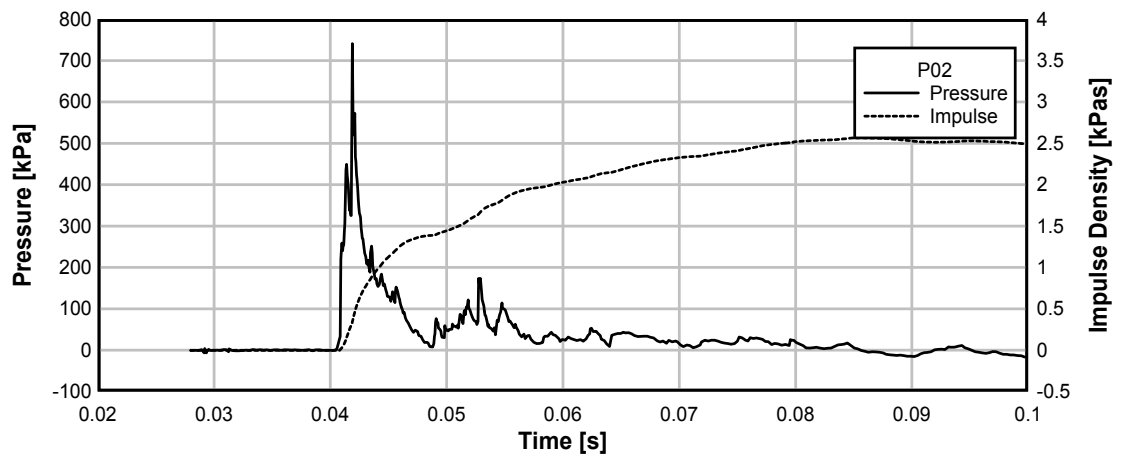
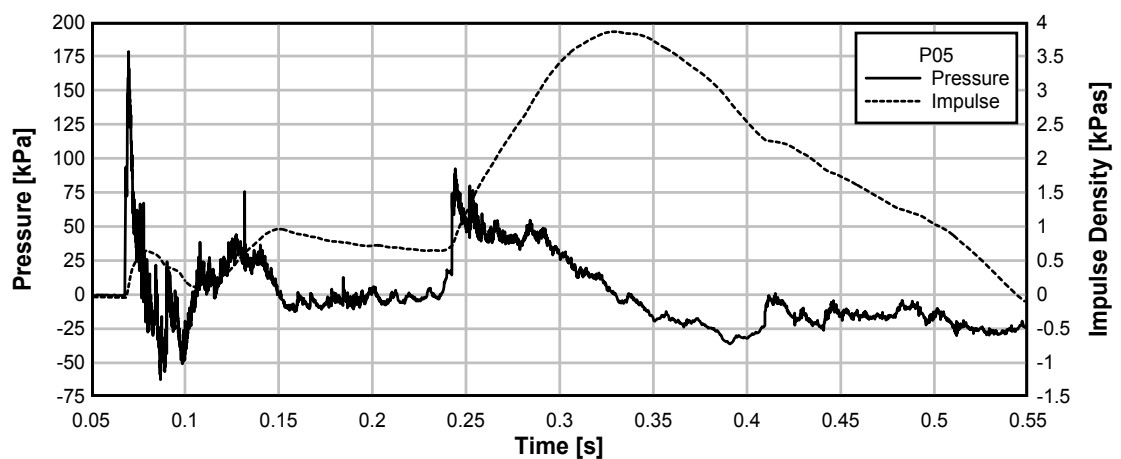
TE-8 819



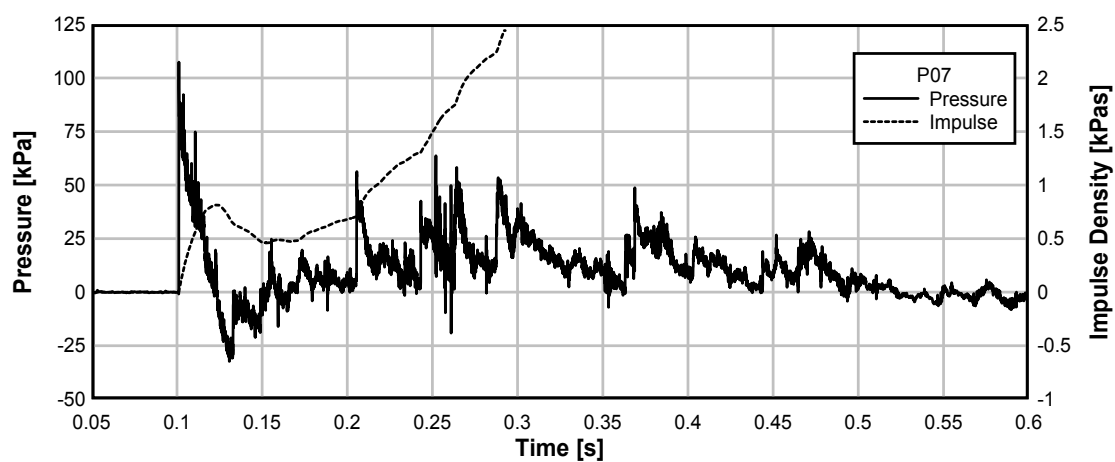
TE-8 819



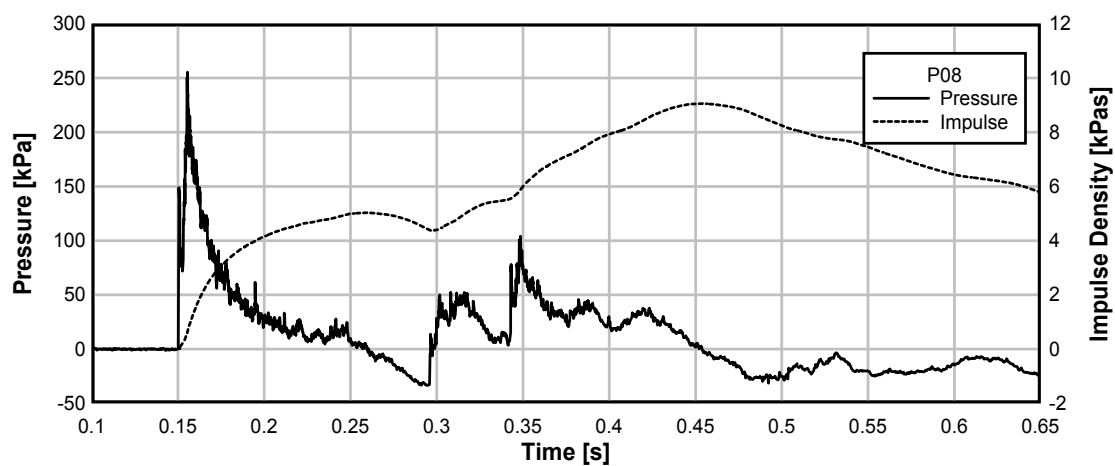
TE-8 819

Test 820: avstånd 5 m, 114 kg Hexotonal, 150° cylinder.**TE-8 820****TE-8 820****TE-8 820**

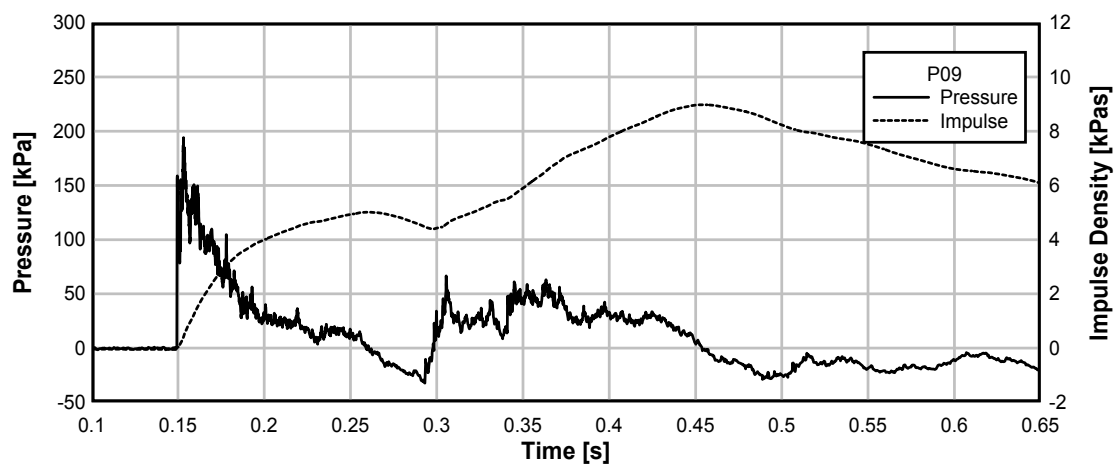
TE-8 820



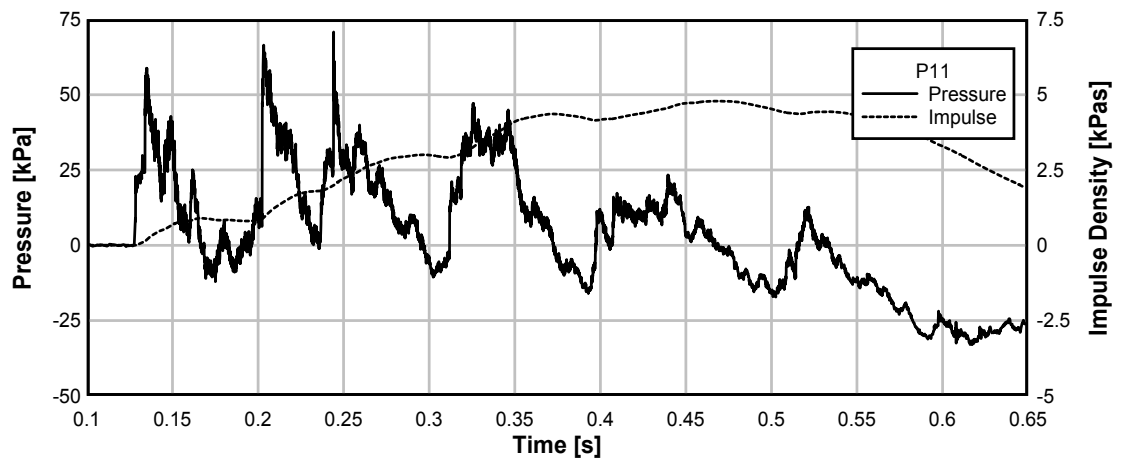
TE-8 820



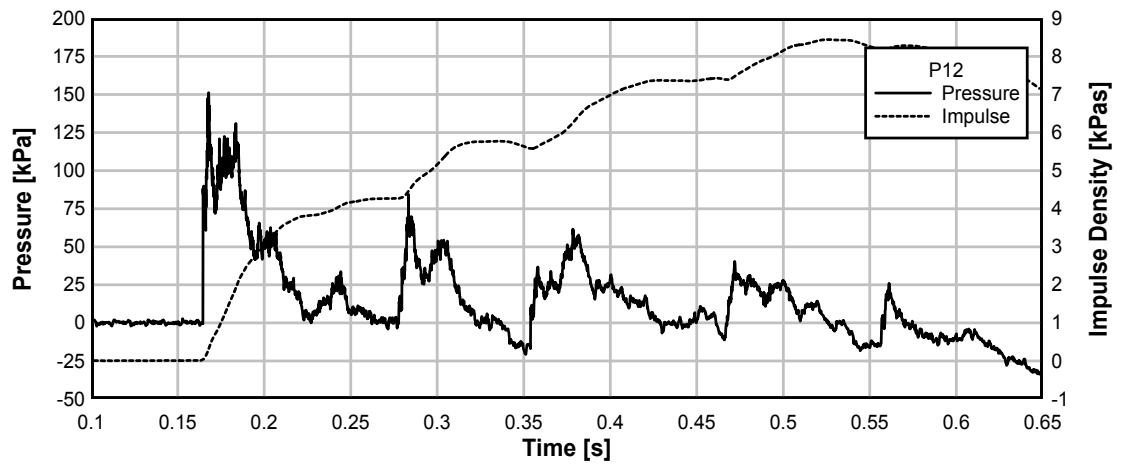
TE-8 820



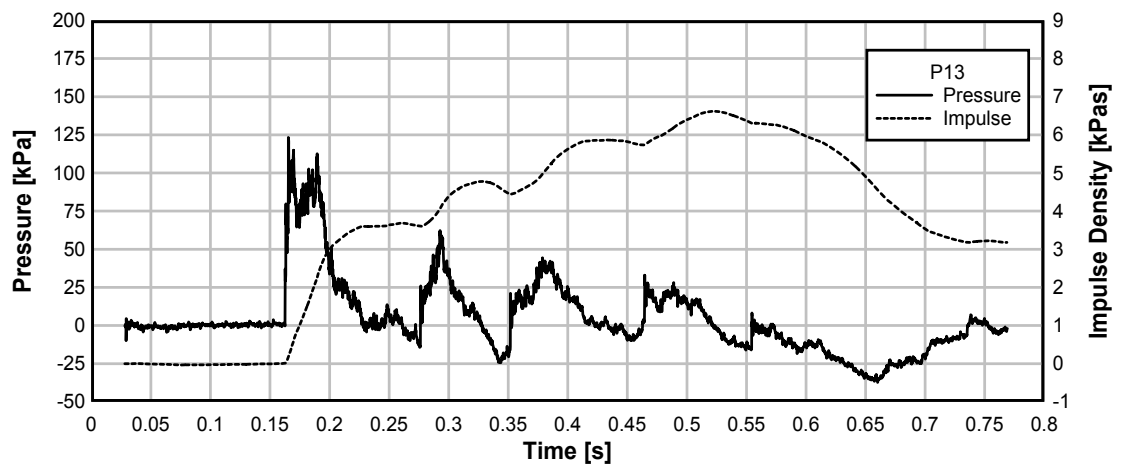
TE-8 820



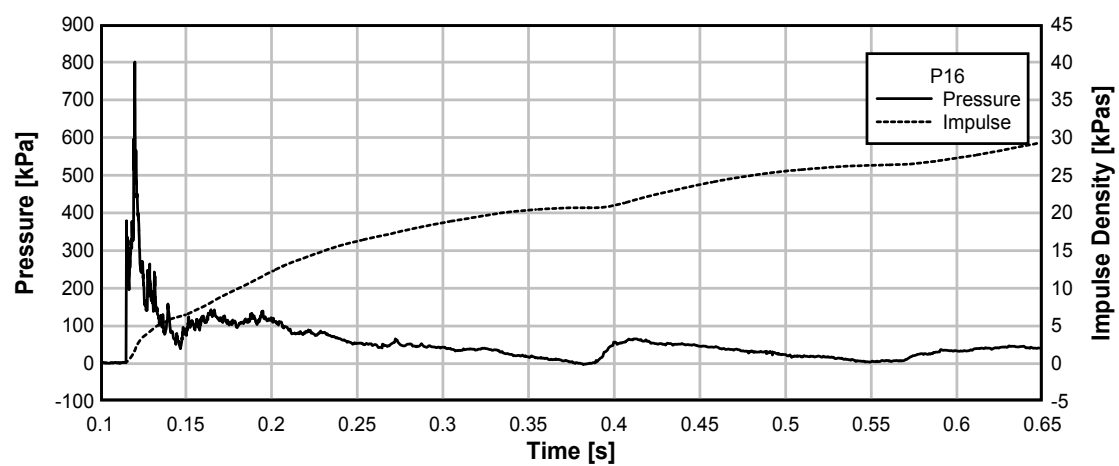
TE-8 820

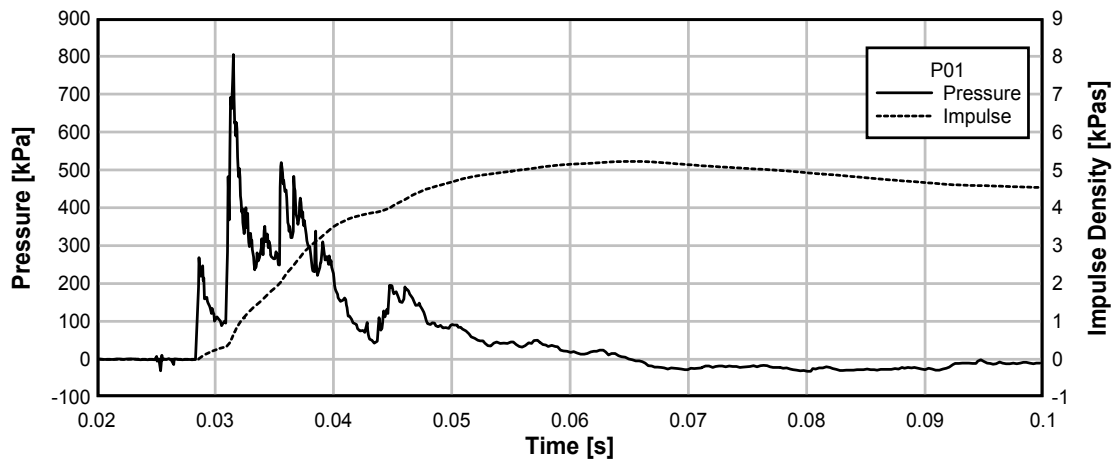
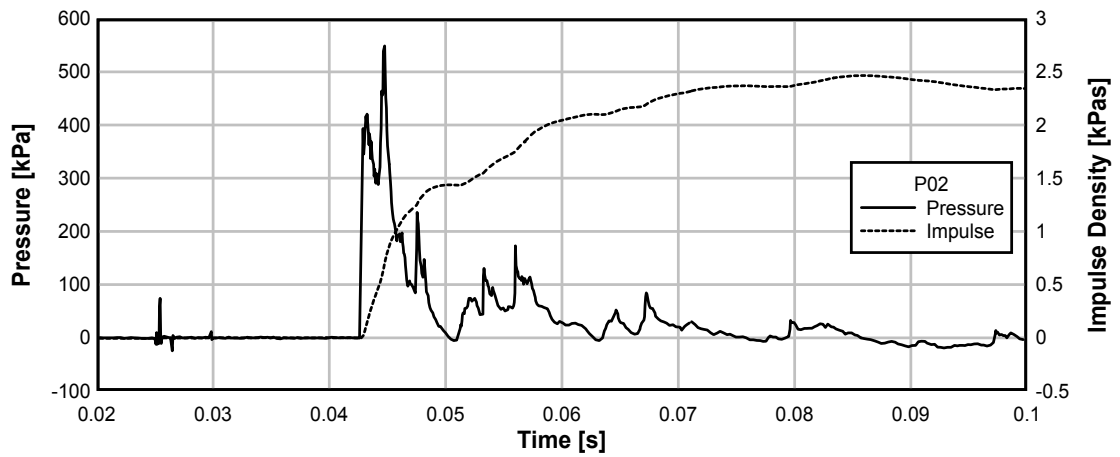
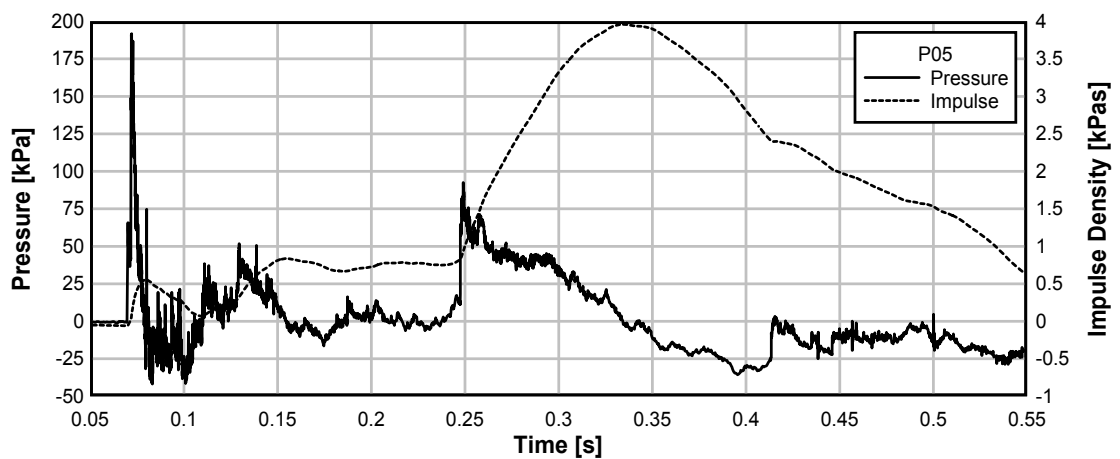


TE-8 820

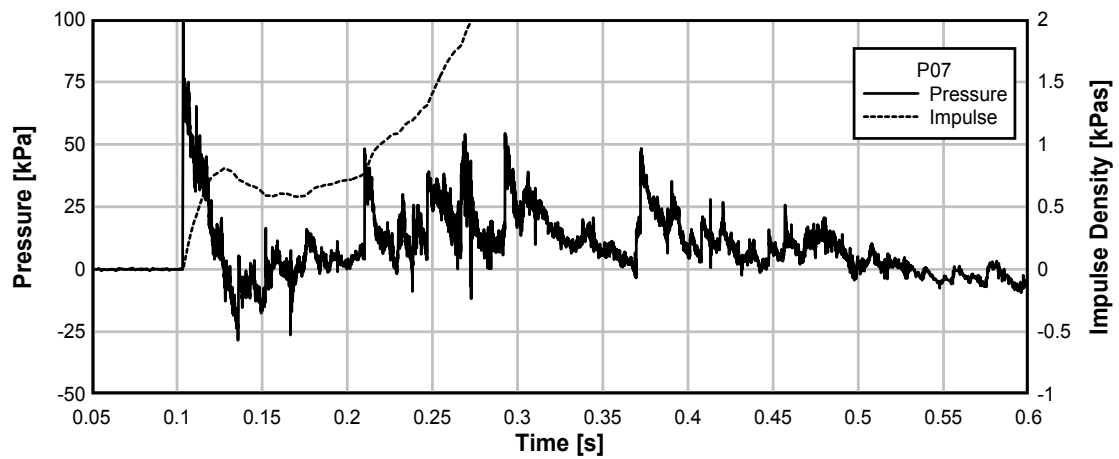


TE-8 820

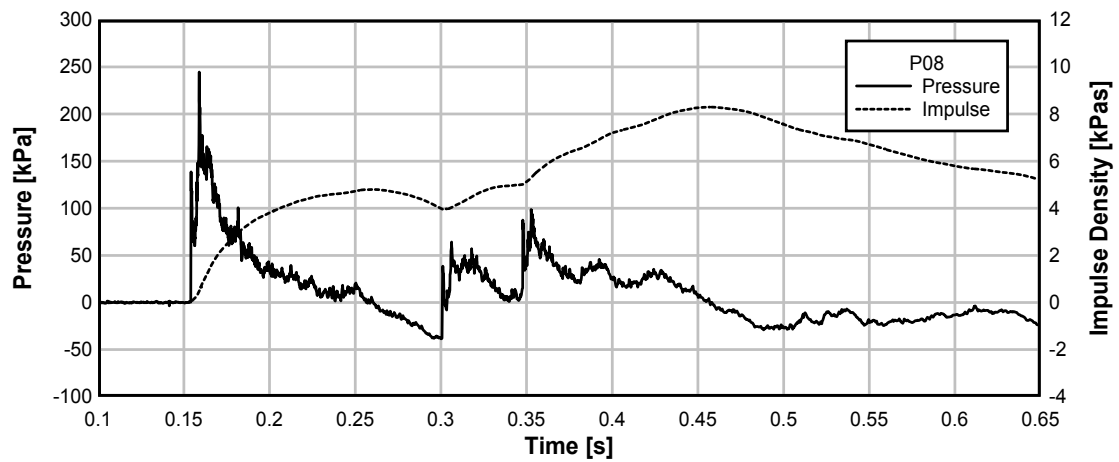


Test 821: avstånd -2 m, 114 kg Hexotonal, liggande cylinder.**TE-8 821****TE-8 821****TE-8 821**

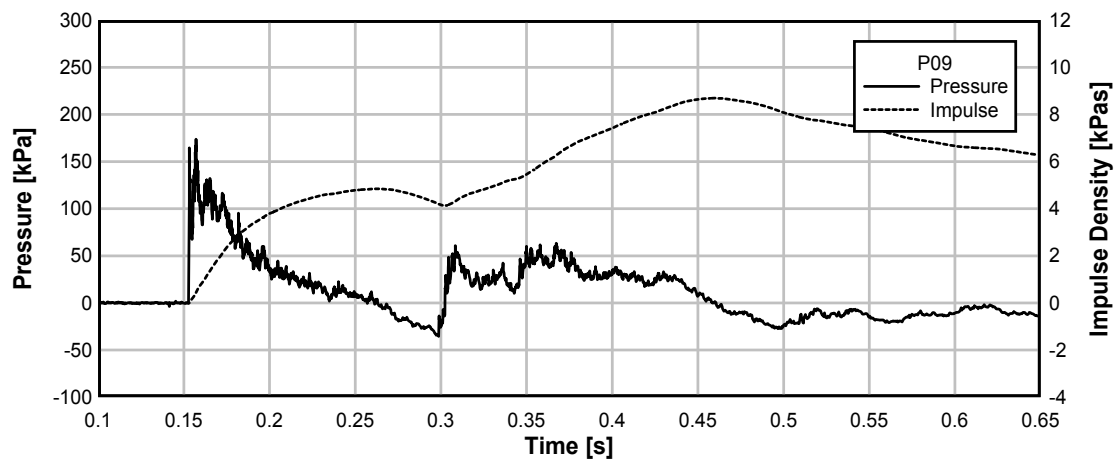
TE-8 821



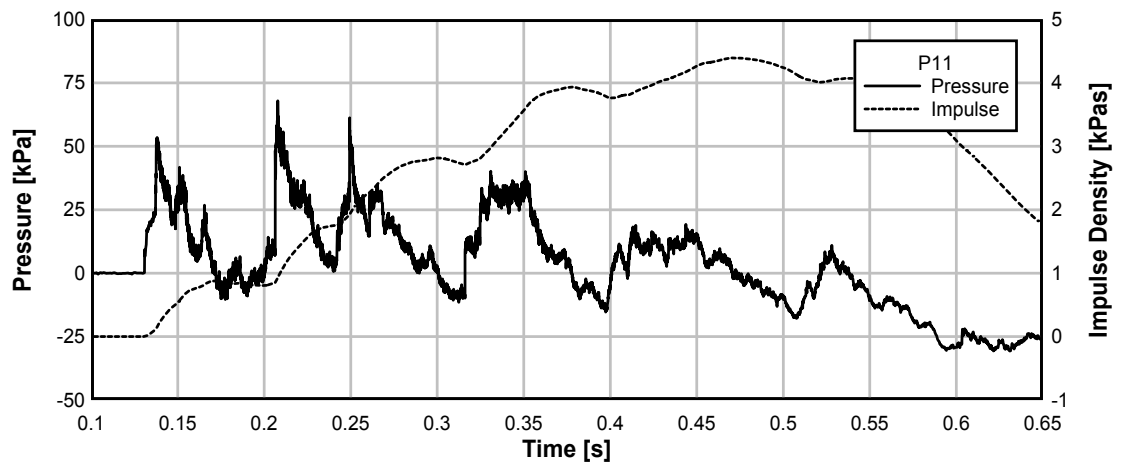
TE-8 821



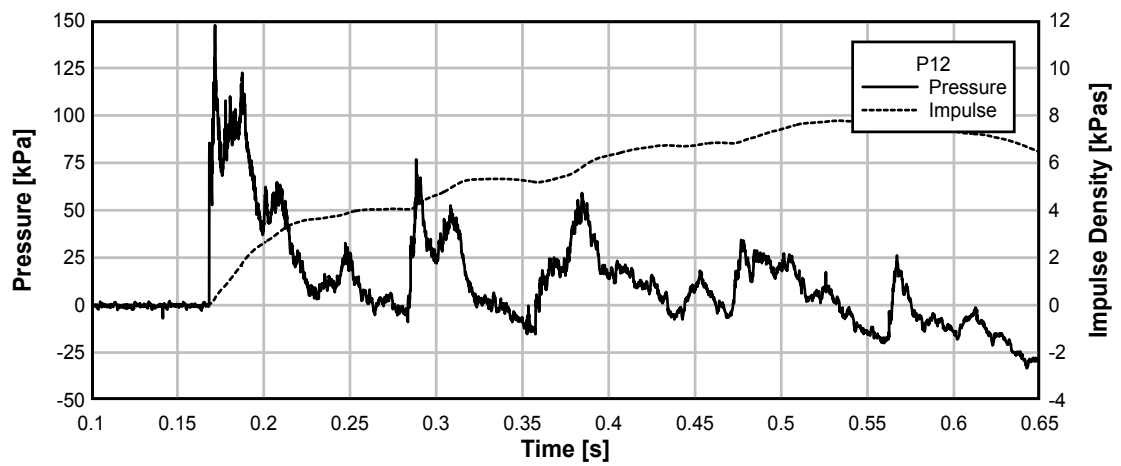
TE-8 821



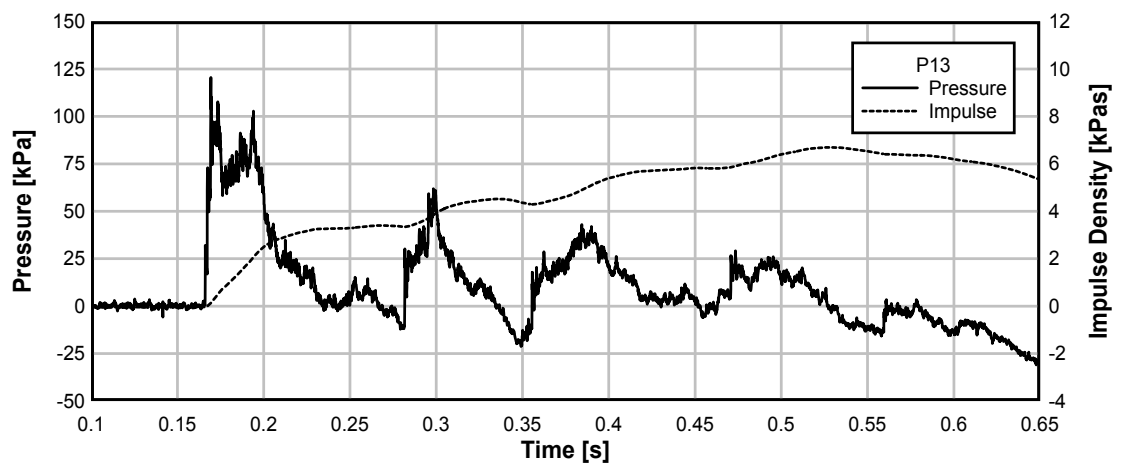
TE-8 821

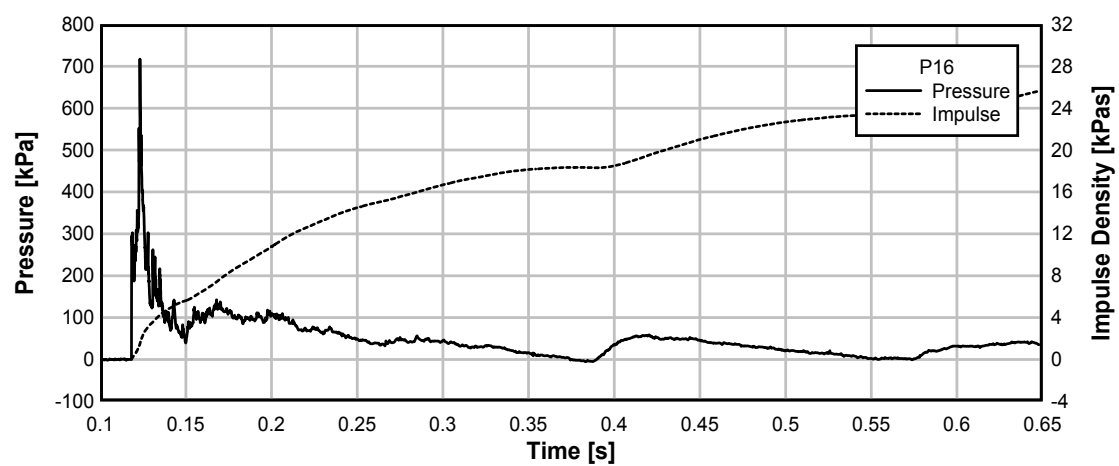


TE-8 821



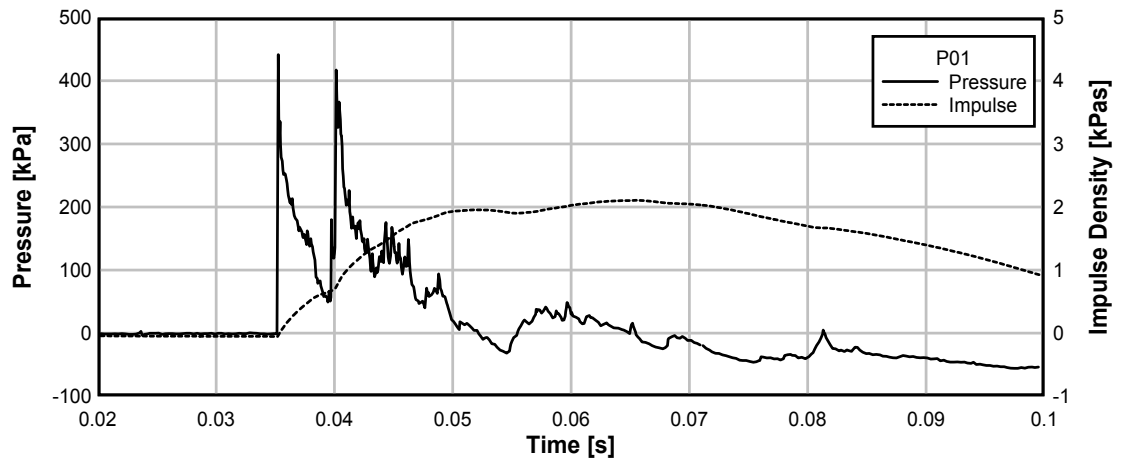
TE-8 821



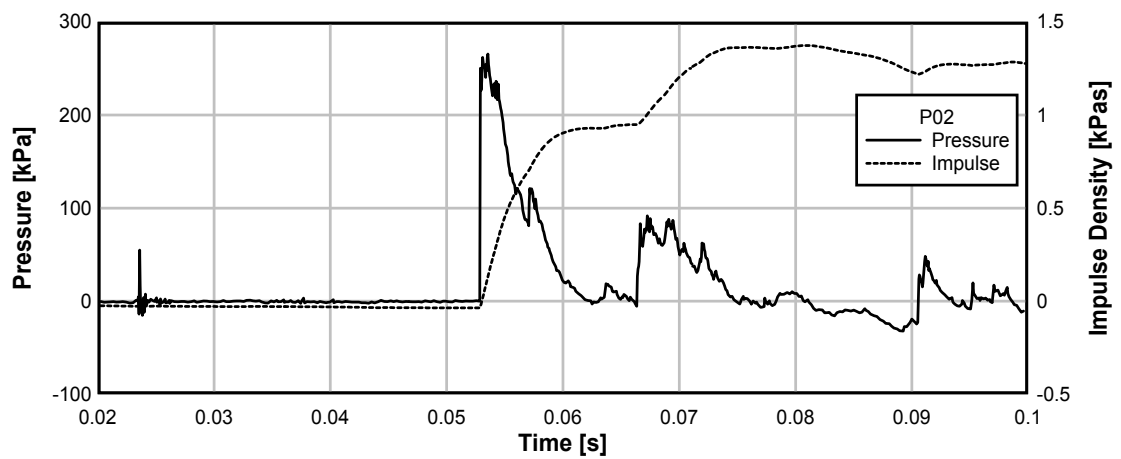
TE-8 821

Test 822: avstånd 5 m, 114 kg Hexotonal, stående cylinder på mark.

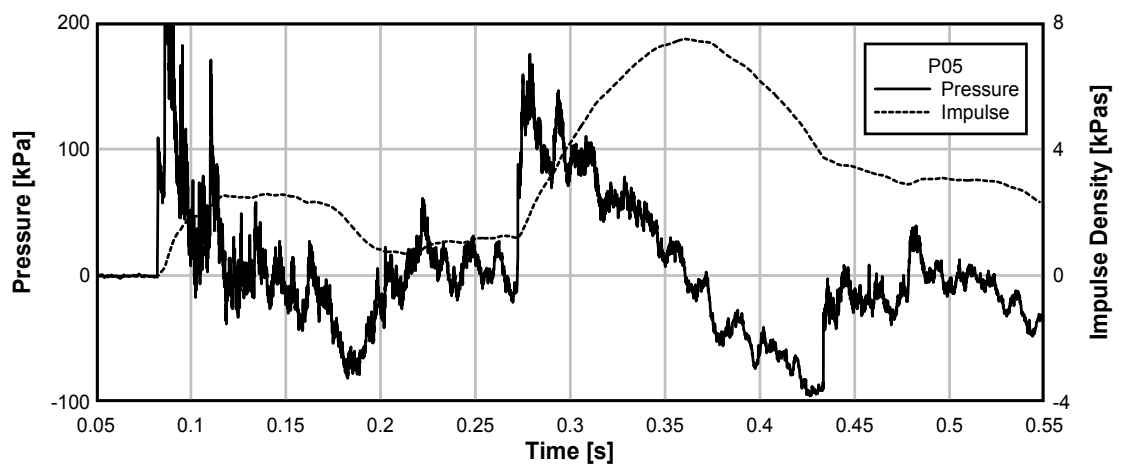
TE-8 822



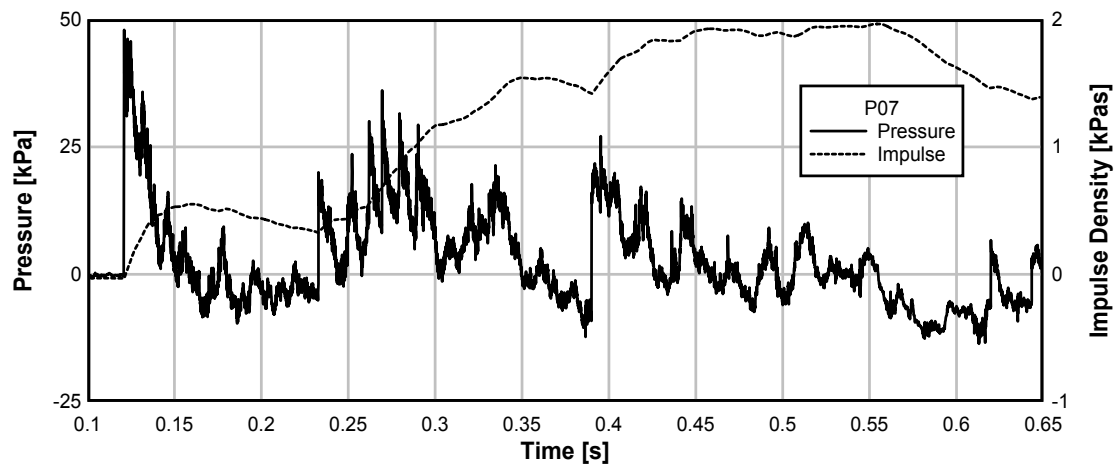
TE-8 822



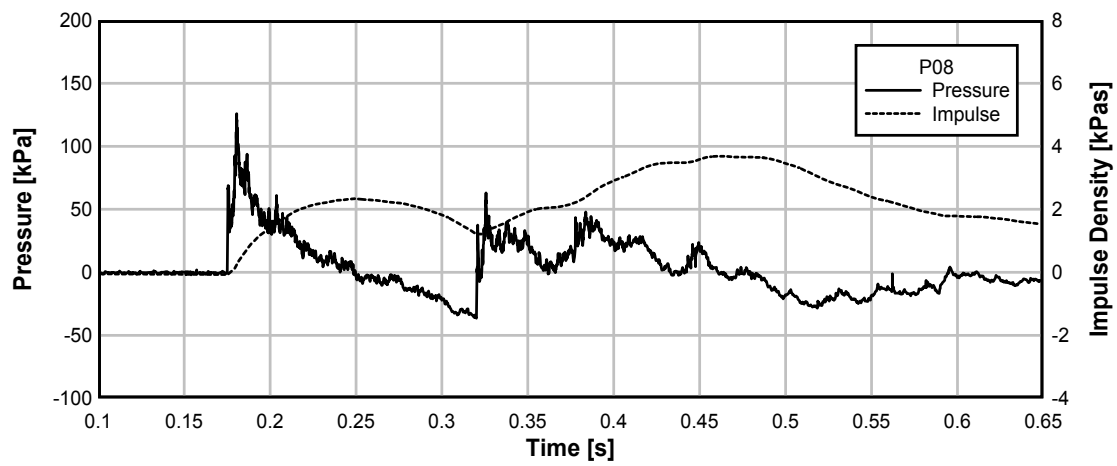
TE-8 822



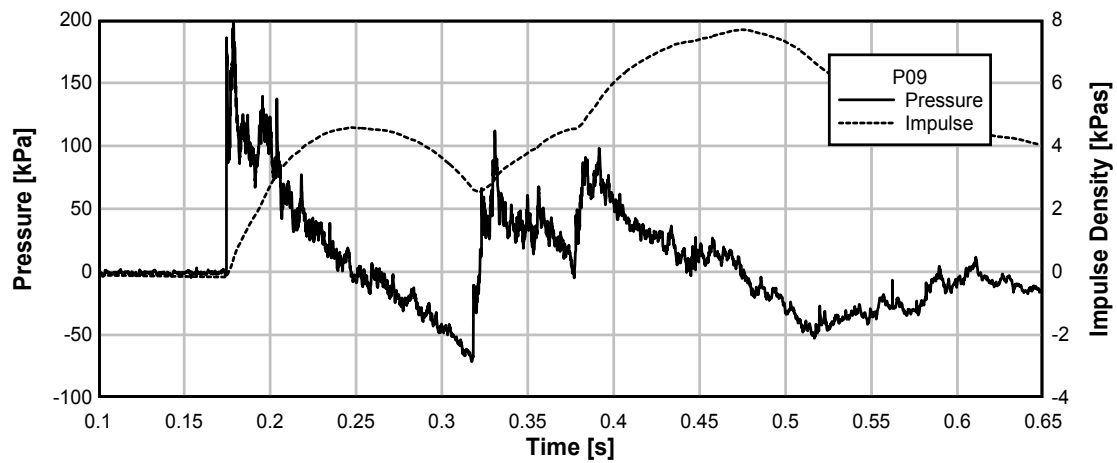
TE-8 822



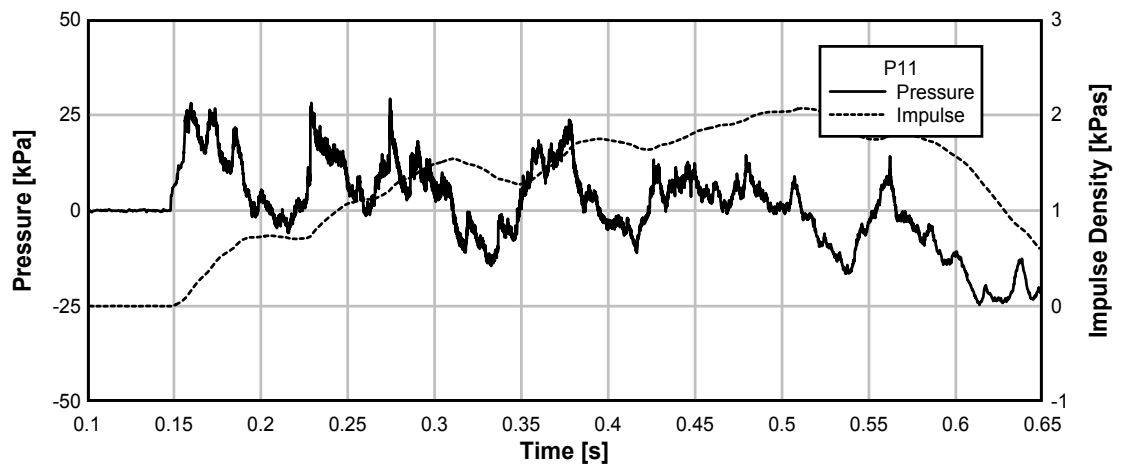
TE-8 822



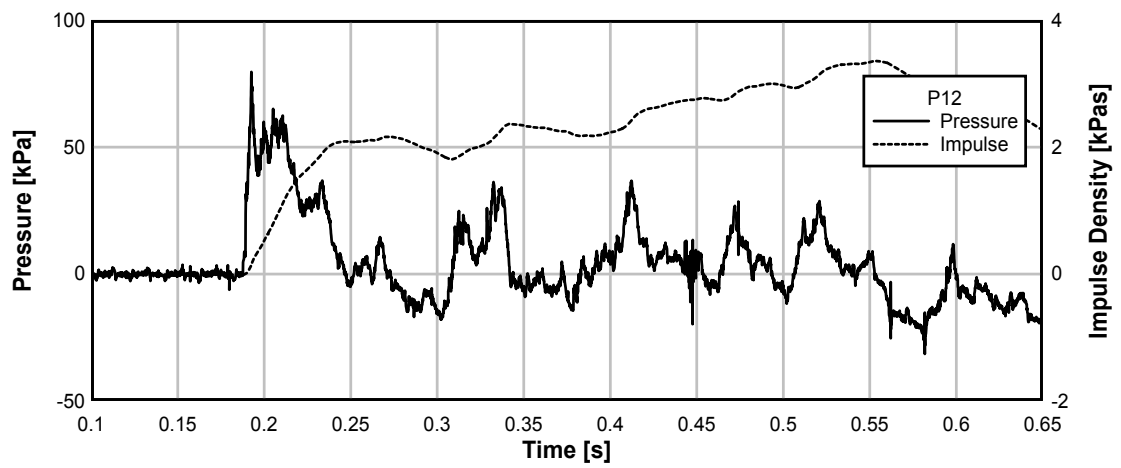
TE-8 822



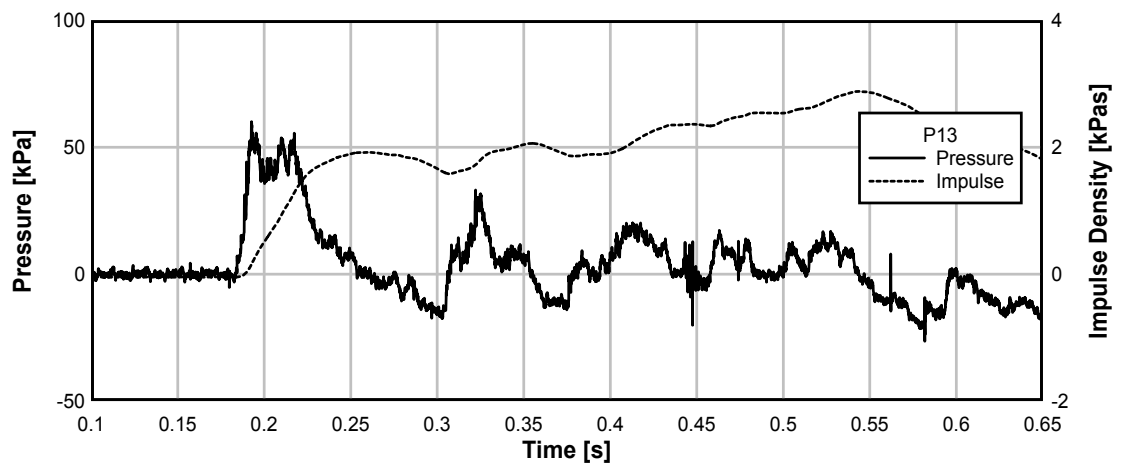
TE-8 822



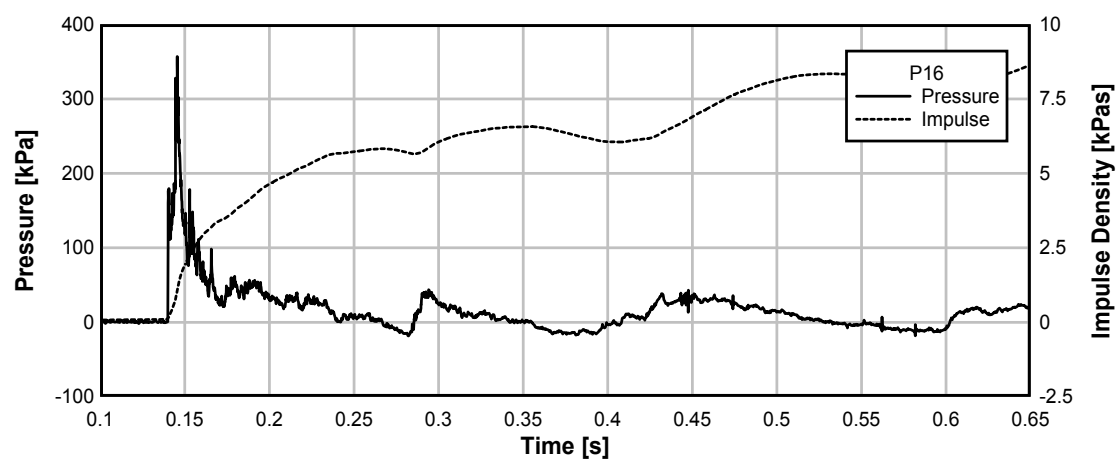
TE-8 822



TE-8 822

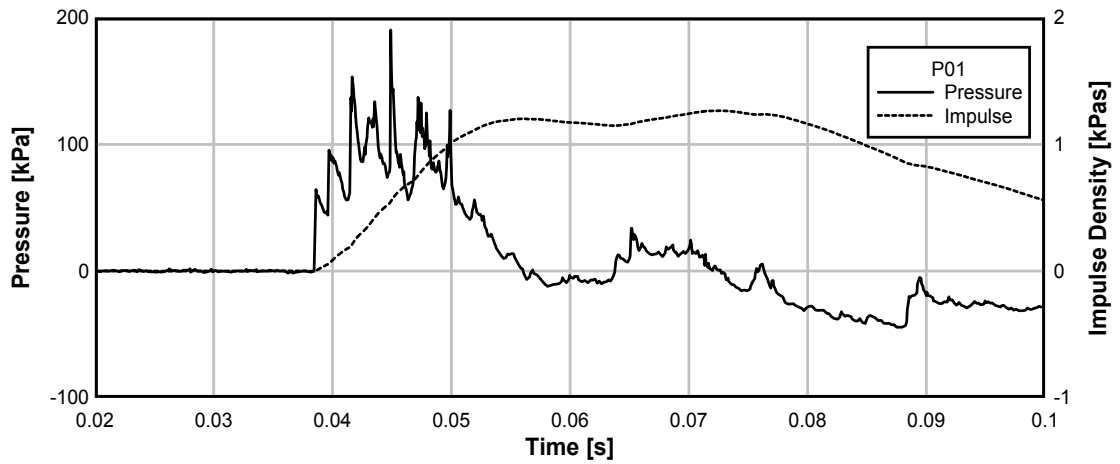


TE-8 822

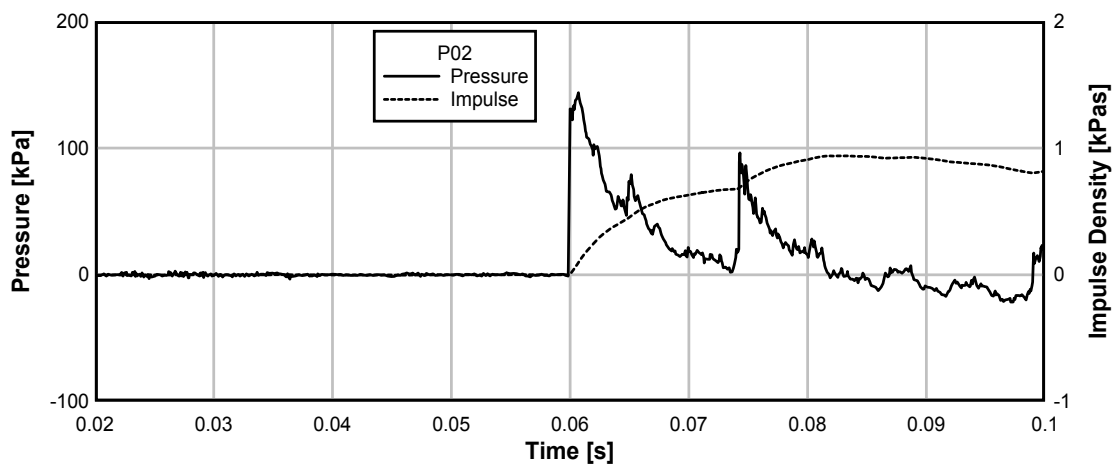


**Test 823: avstånd 5 m, 114 kg Hexotonal, liggande cylinder
längs med på mark.**

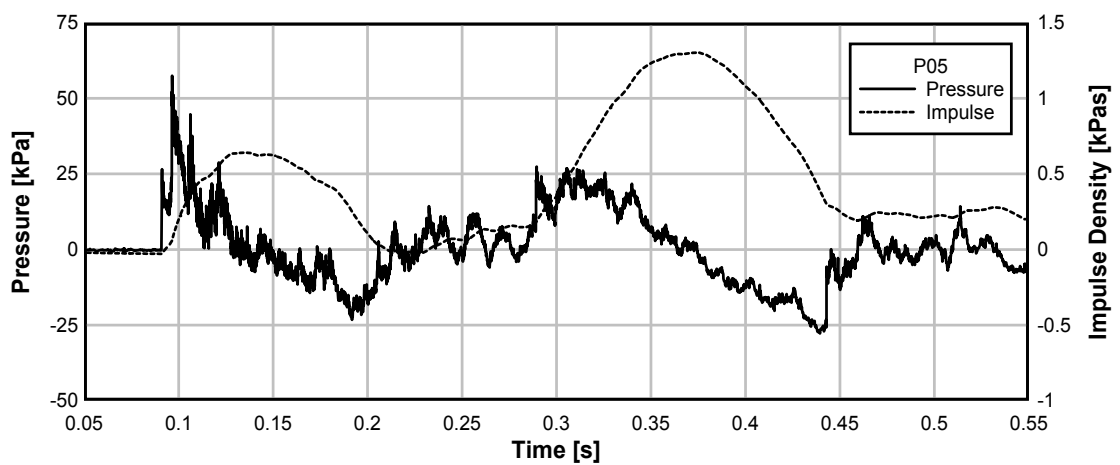
TE-8 823



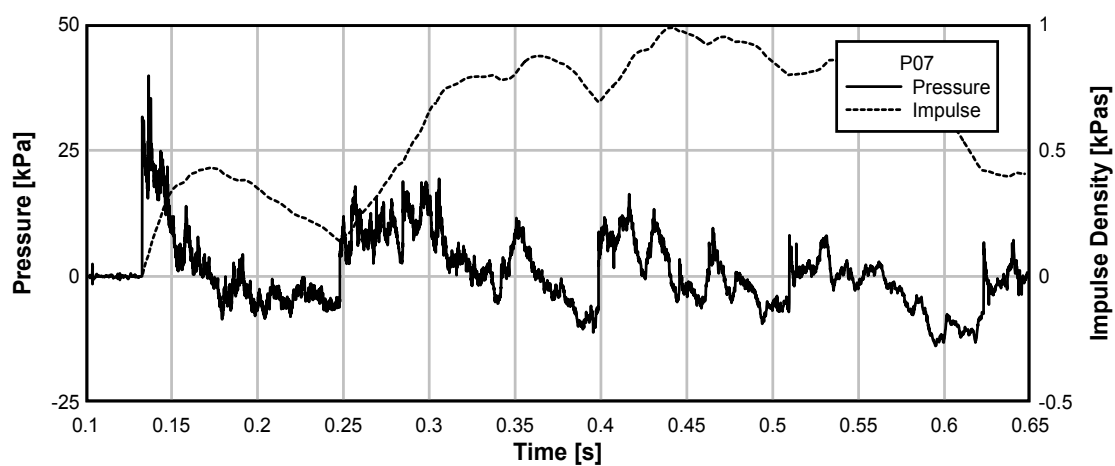
TE-8 823



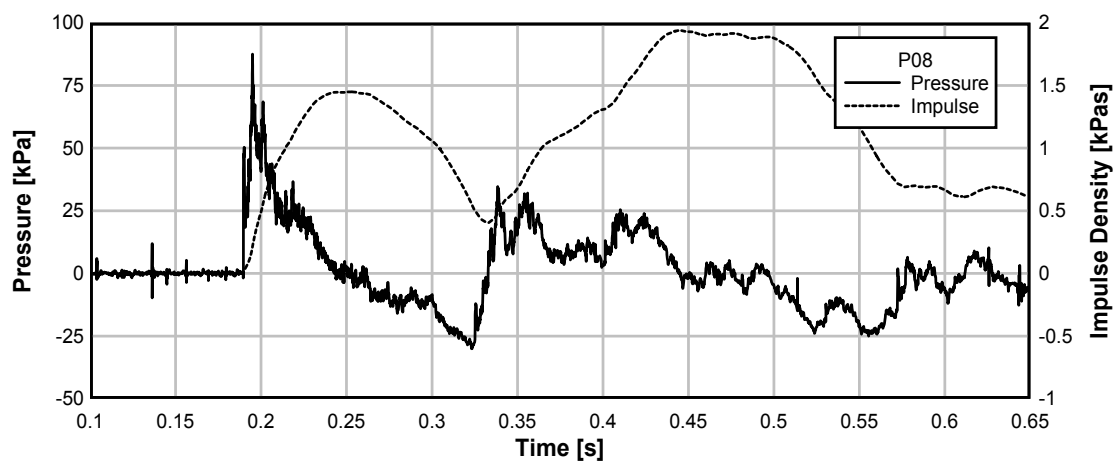
TE-8 823



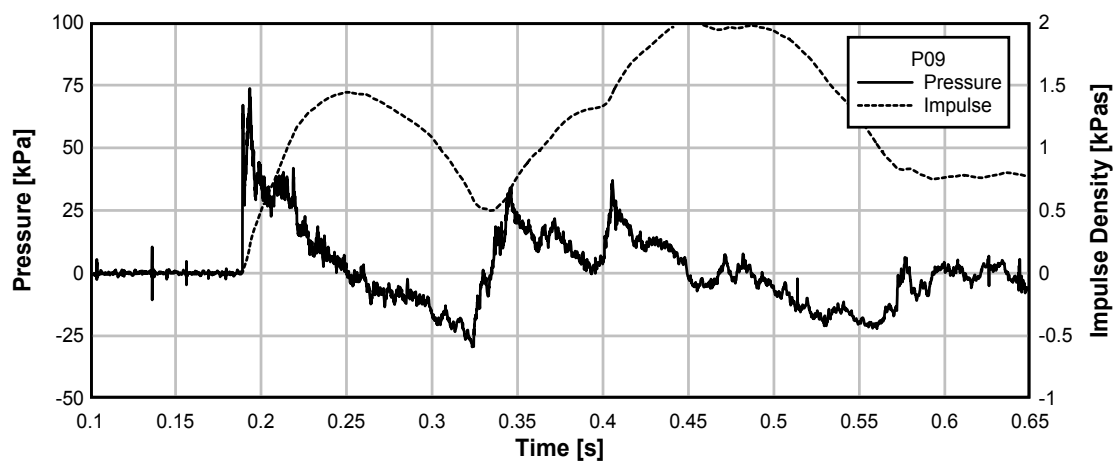
TE-8 823



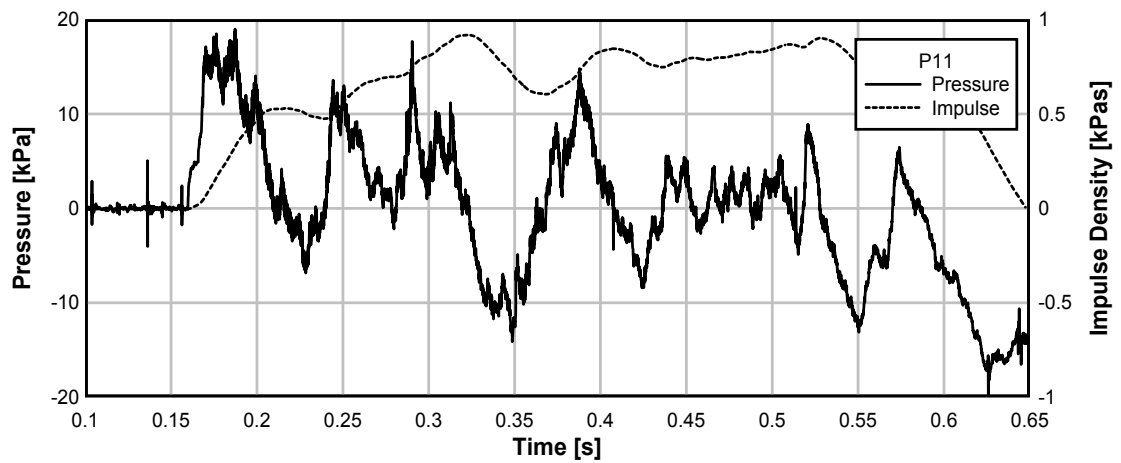
TE-8 823



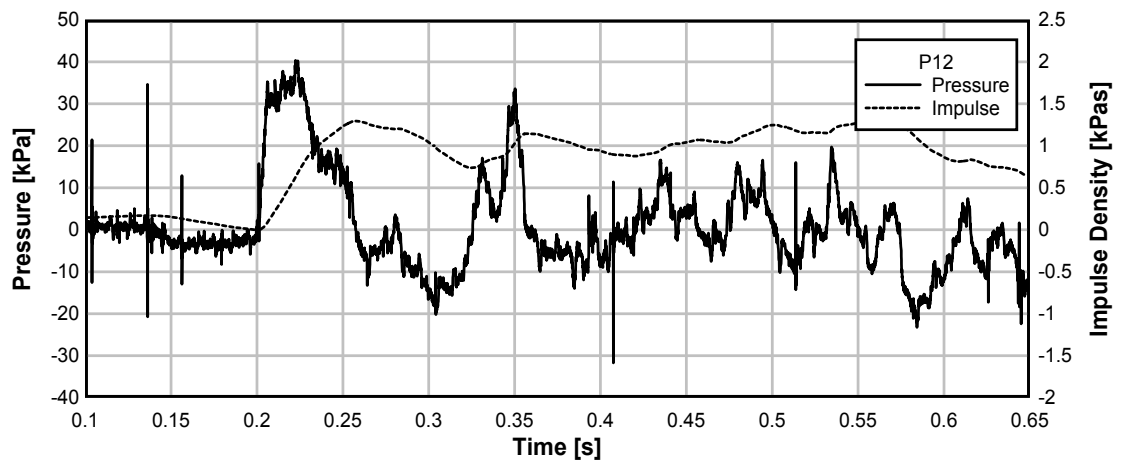
TE-8 823



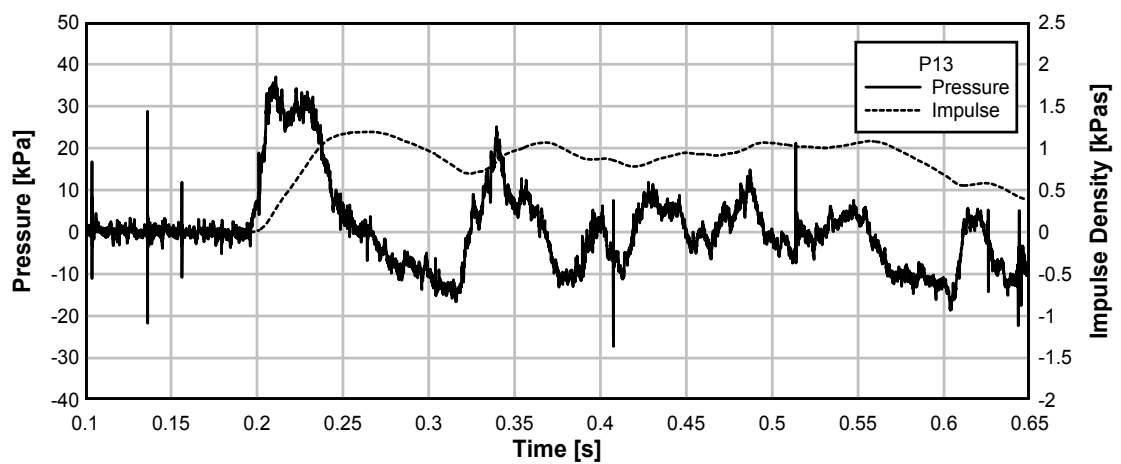
TE-8 823



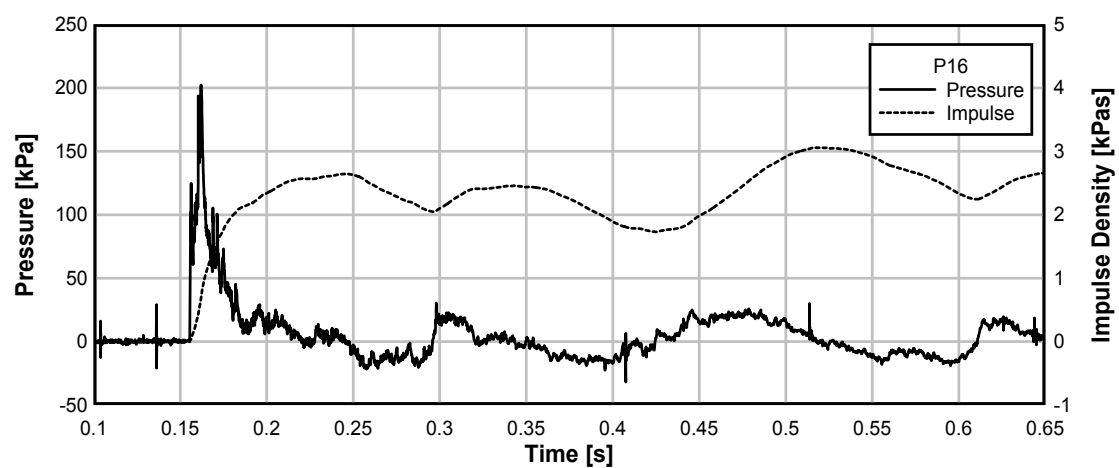
TE-8 823



TE-8 823

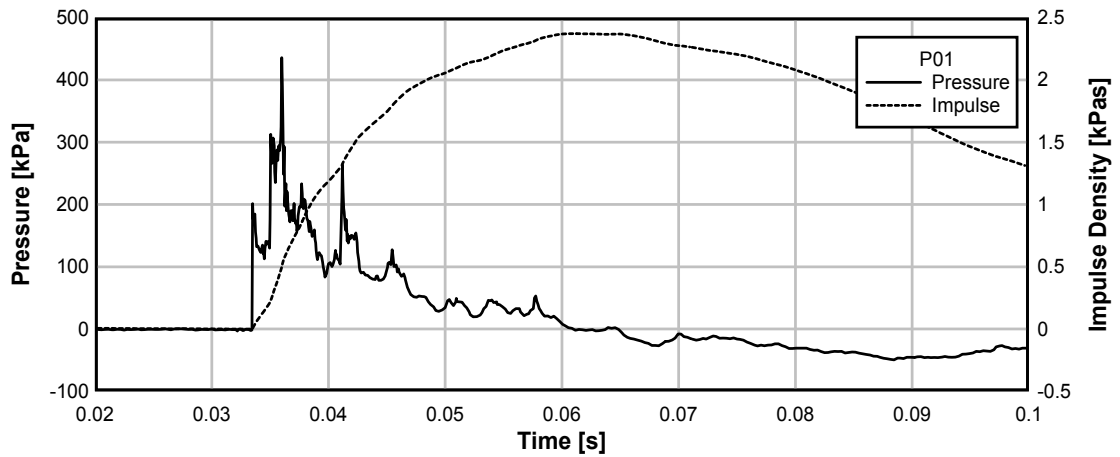


TE-8 823

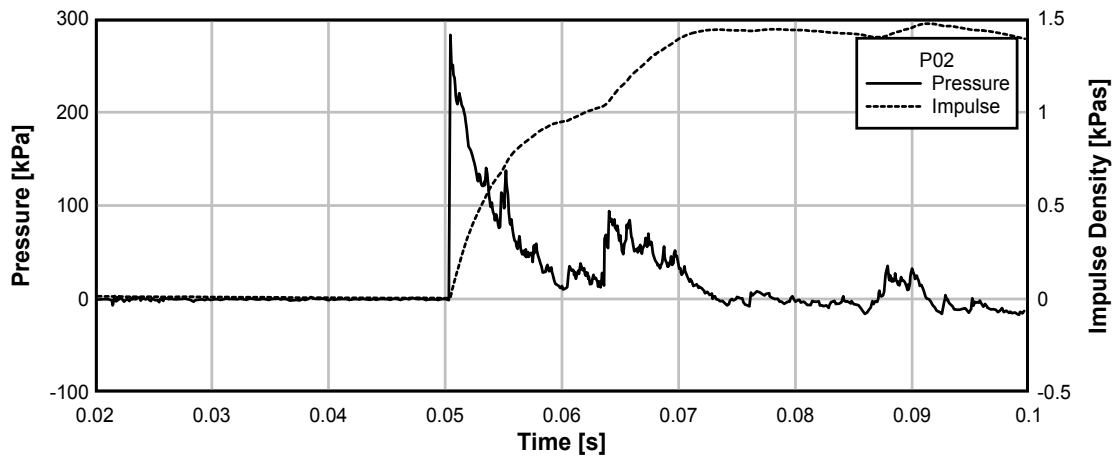


Test 824: avstånd 5 m, 114 kg Hexotonal, liggande cylinder tvärs på mark.

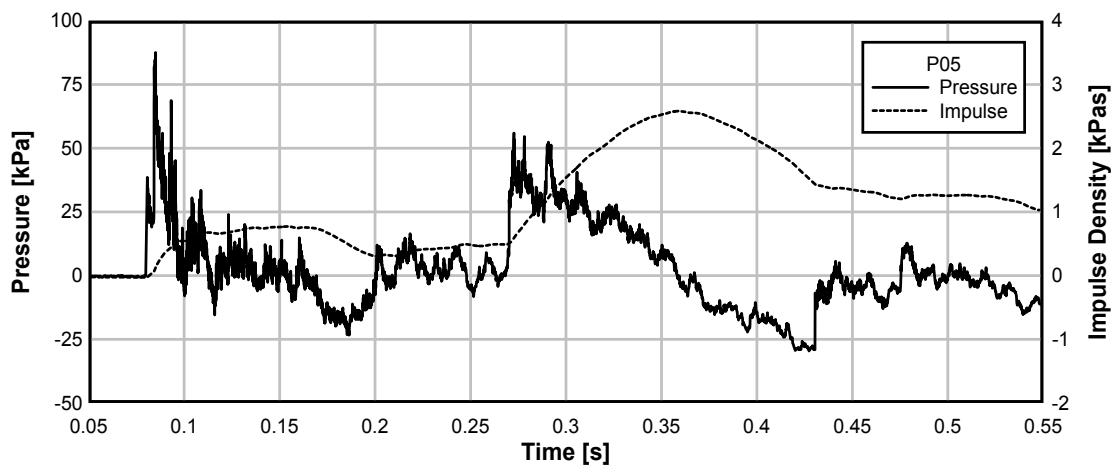
TE-8 824



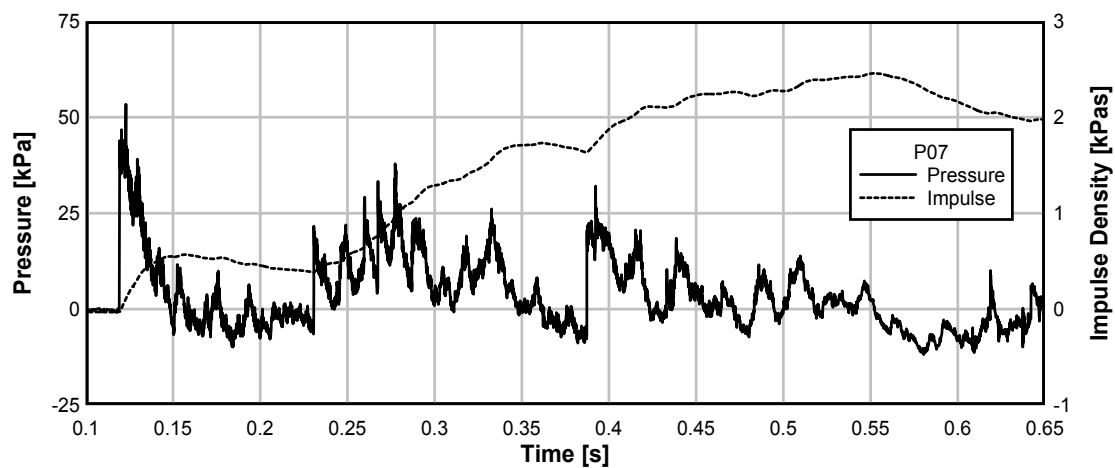
TE-8 824



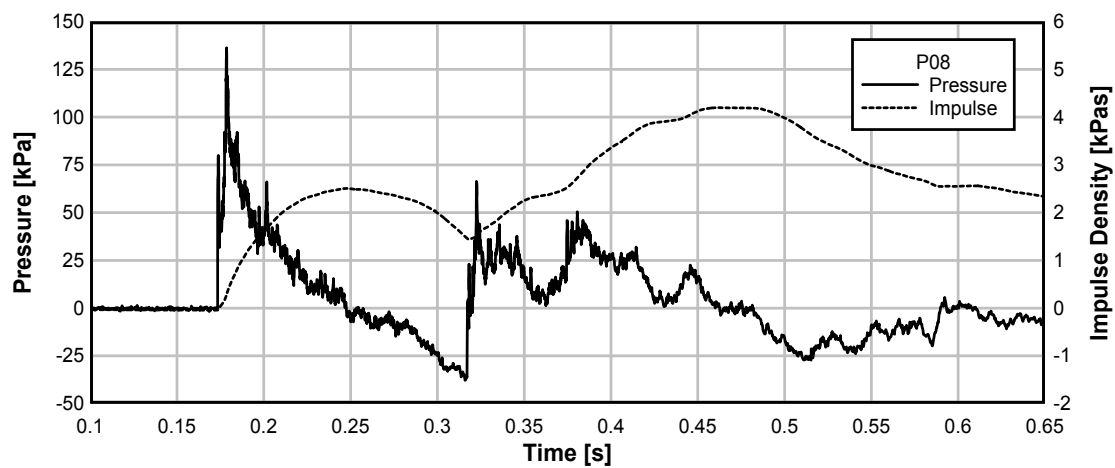
TE-8 824



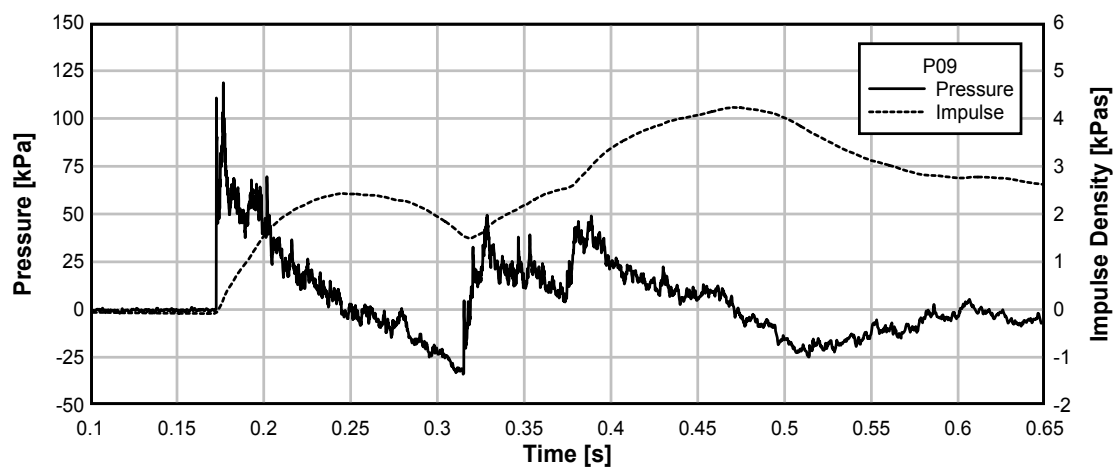
TE-8 824



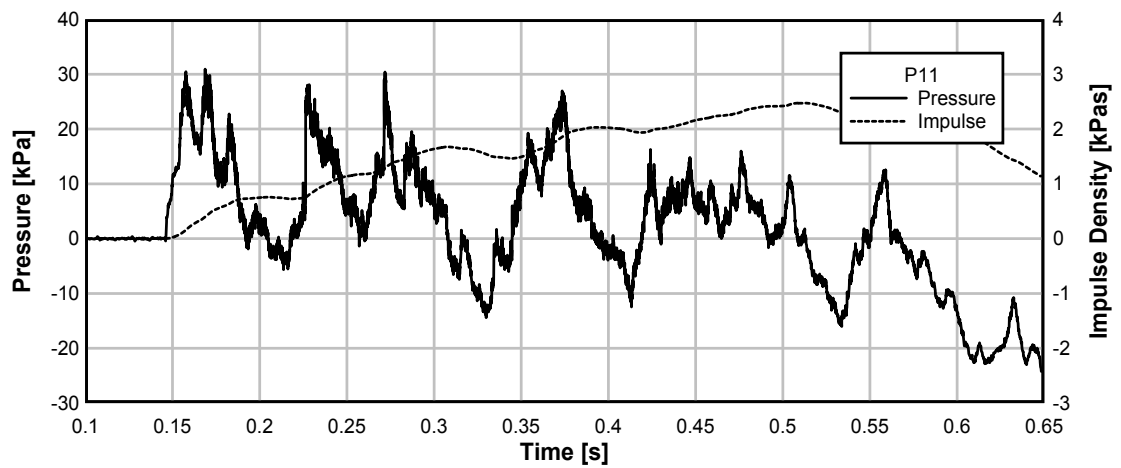
TE-8 824



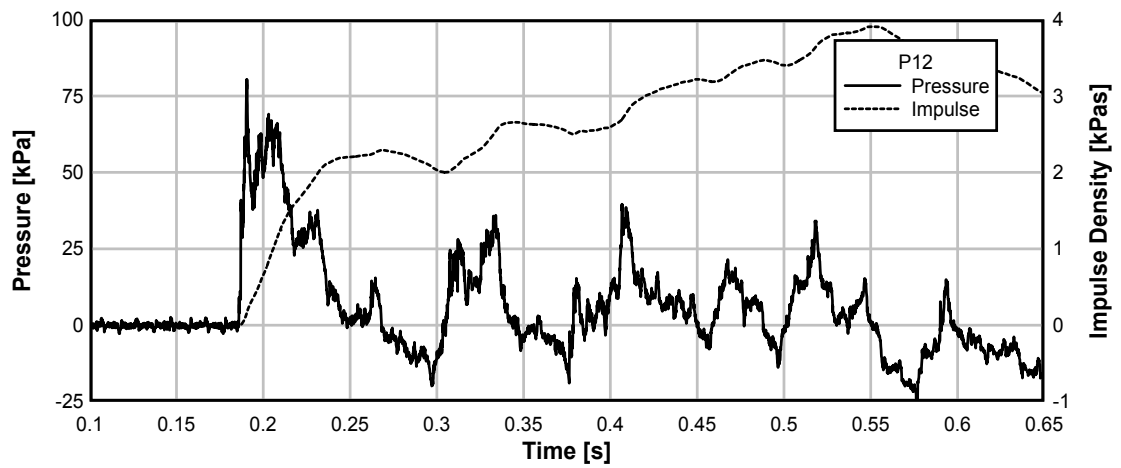
TE-8 824



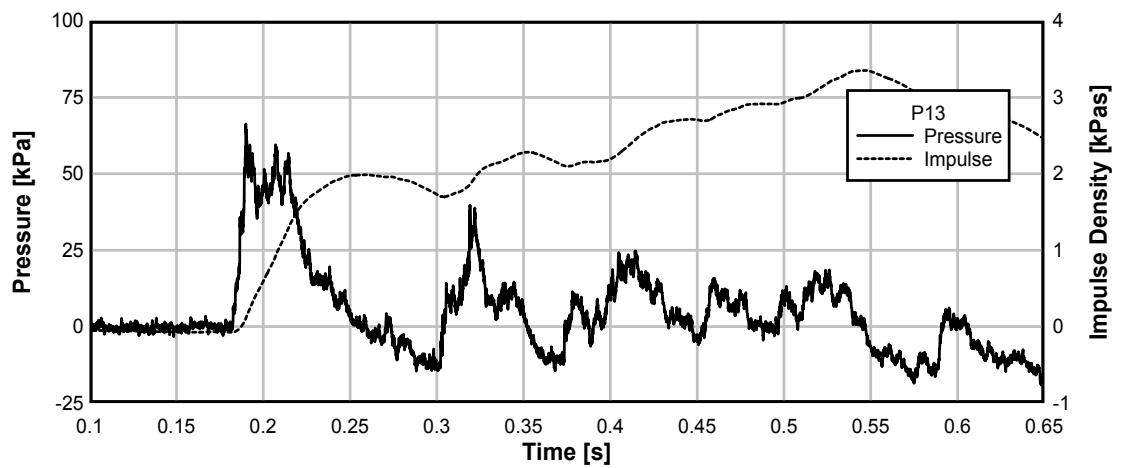
TE-8 824

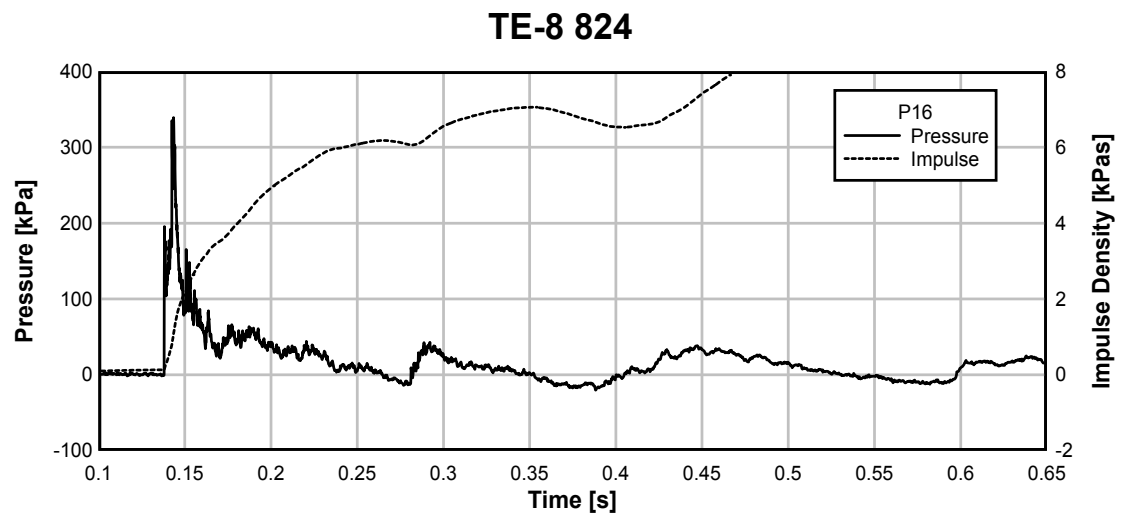


TE-8 824



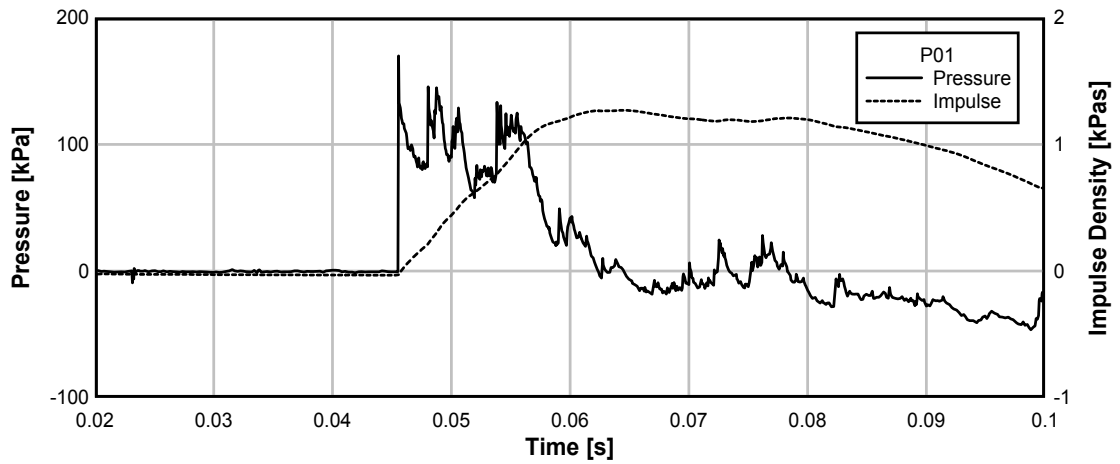
TE-8 824



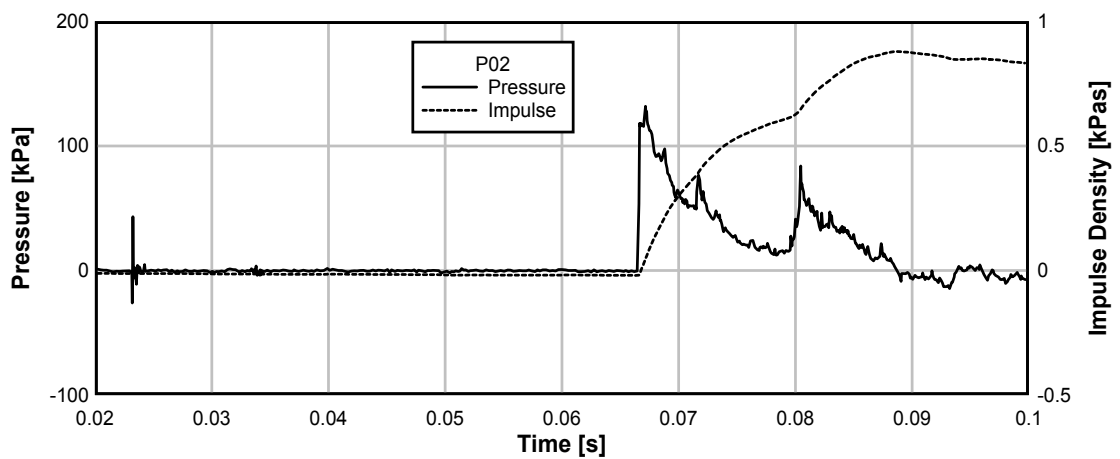


Test 825: avstånd 10 m, 114 kg Hexotonal, stående cylinder på mark.

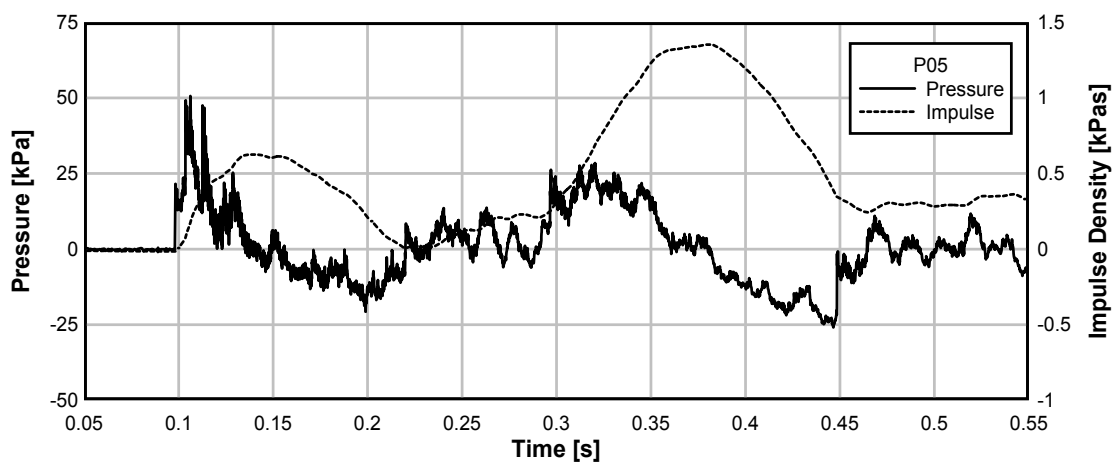
TE-8 825



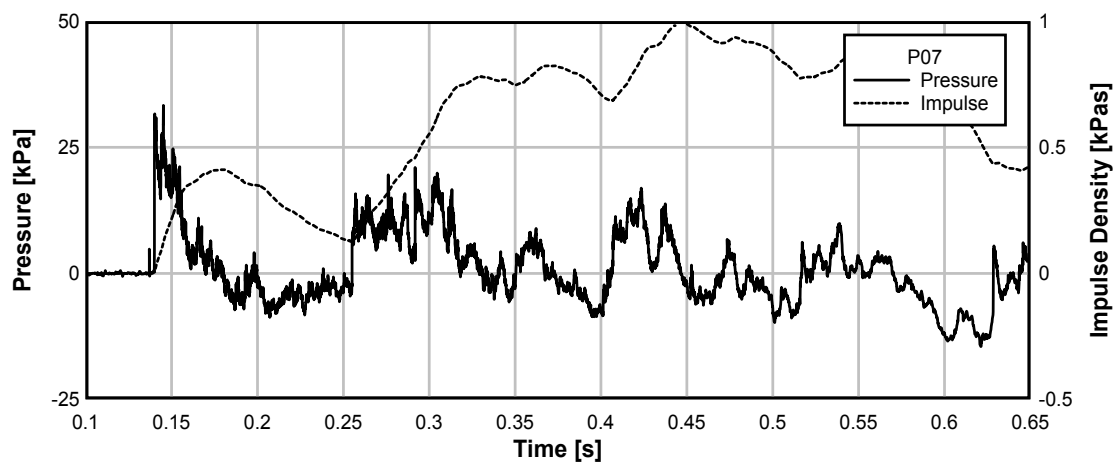
TE-8 825



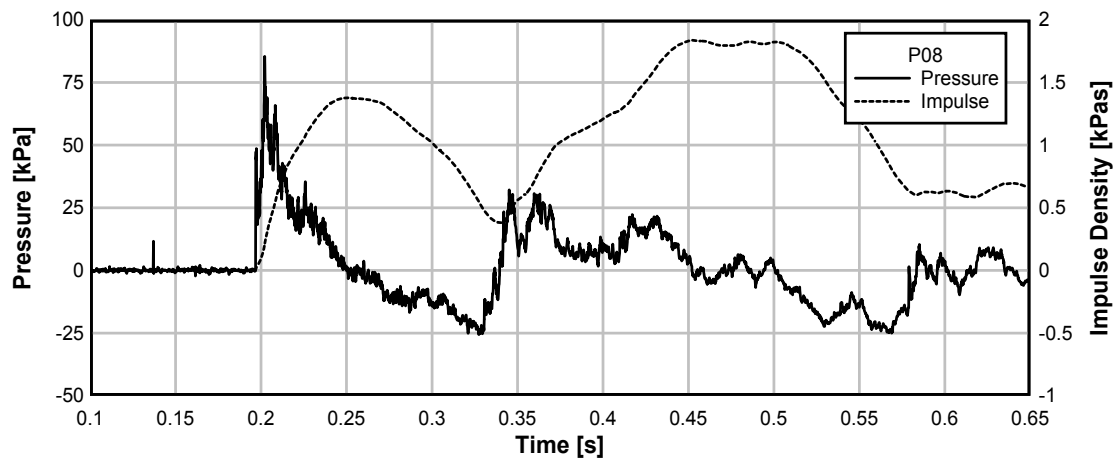
TE-8 825



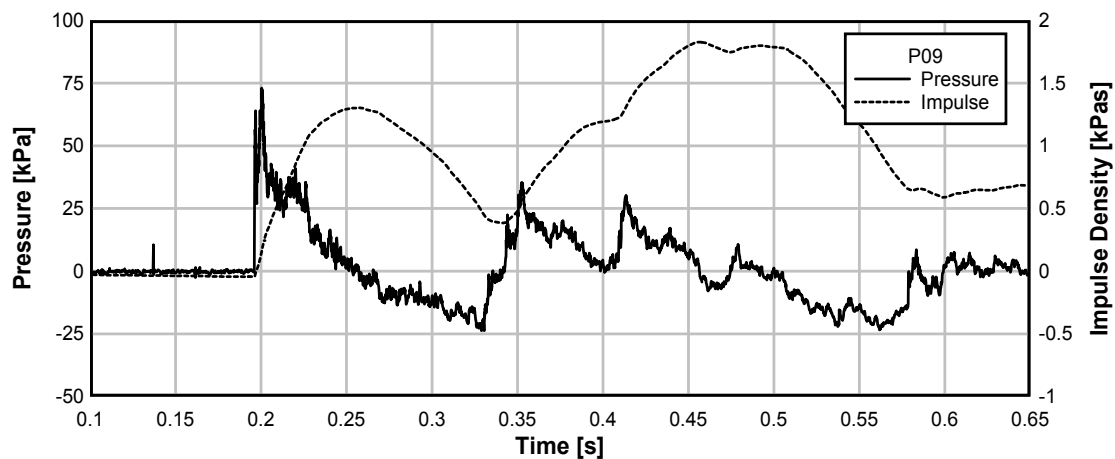
TE-8 825



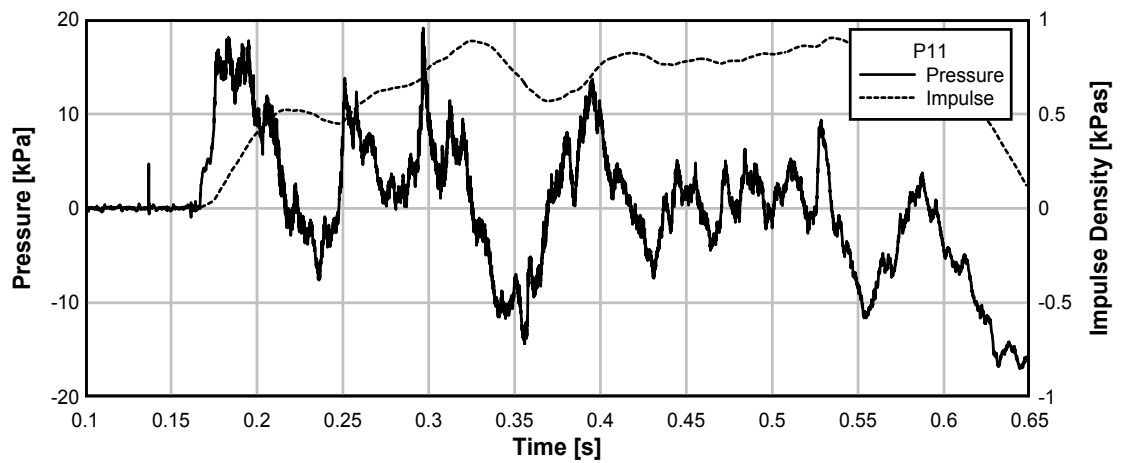
TE-8 825



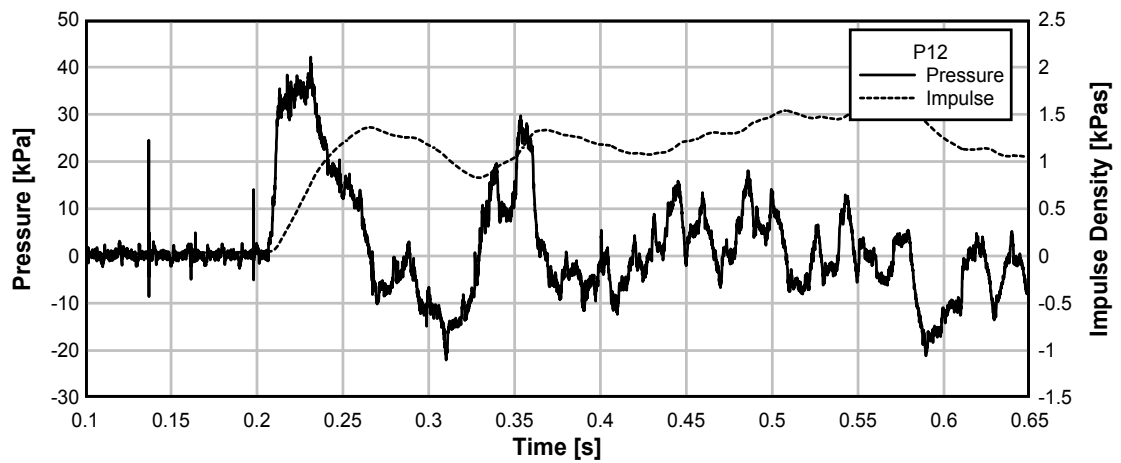
TE-8 825



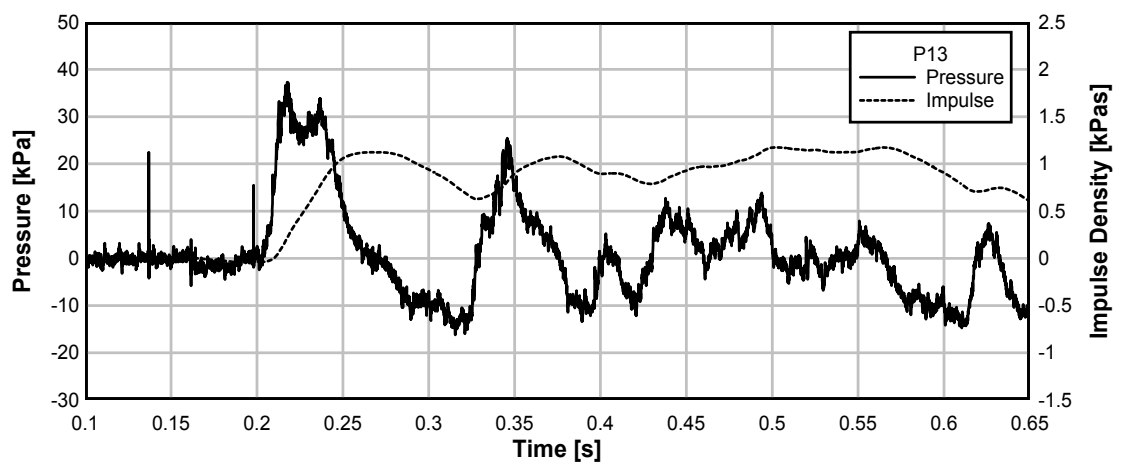
TE-8 825

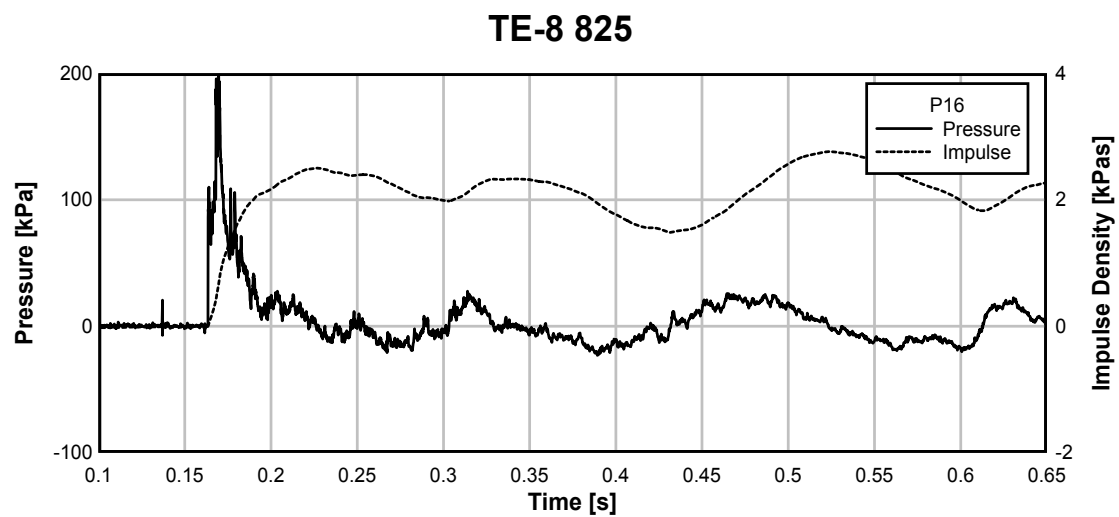


TE-8 825



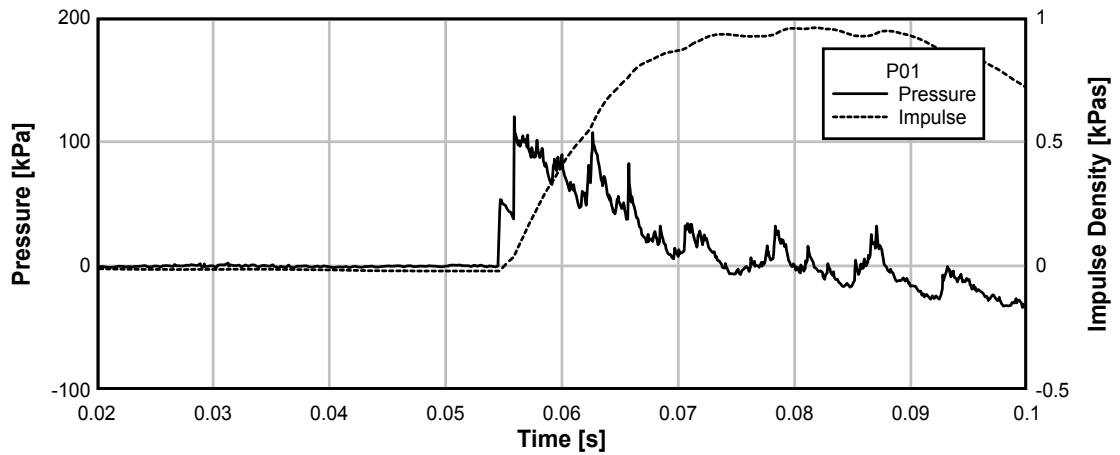
TE-8 825



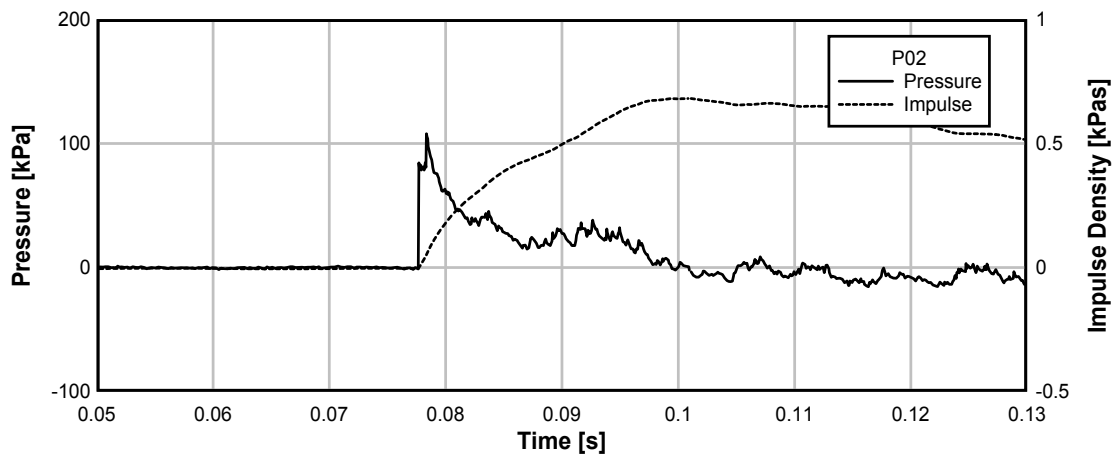


**Test 826: avstånd 10 m, 114 kg Hexotonal, liggande cylinder
längs med på mark.**

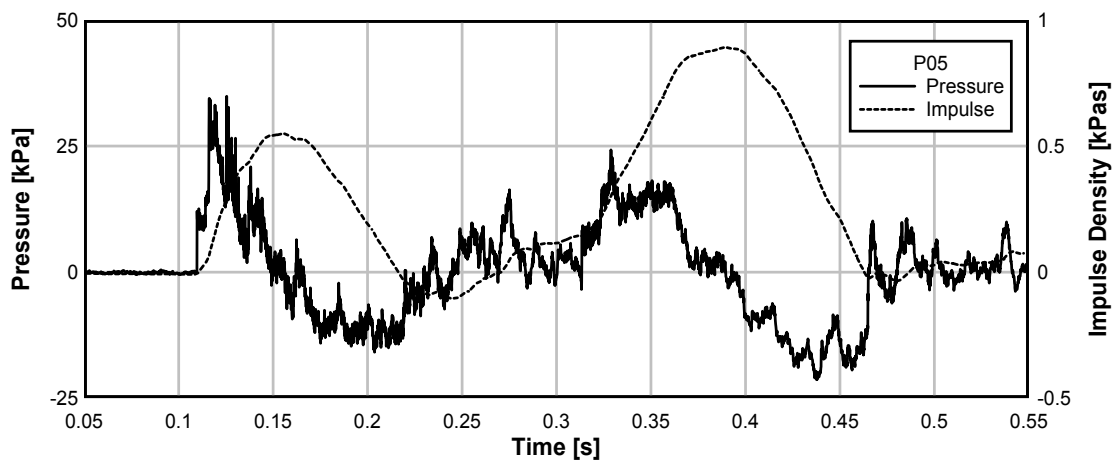
TE-8 826



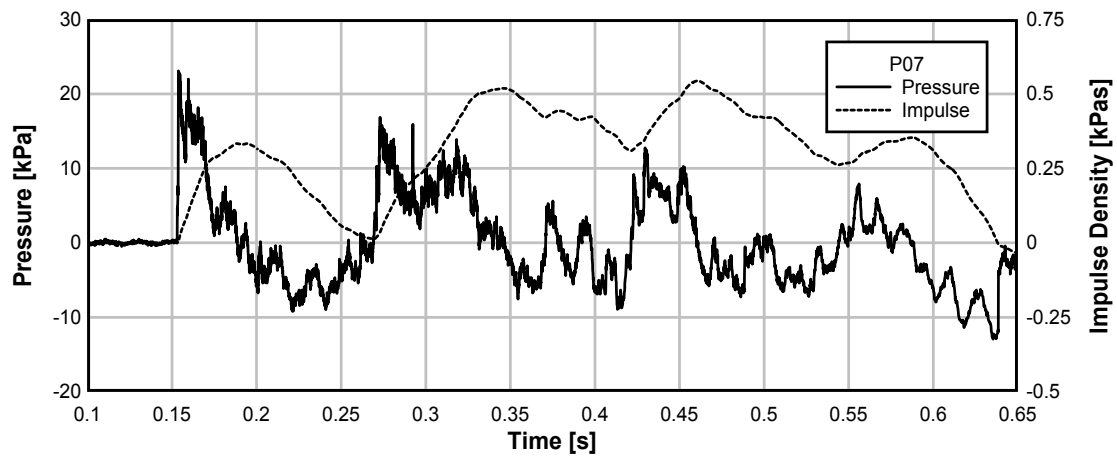
TE-8 826



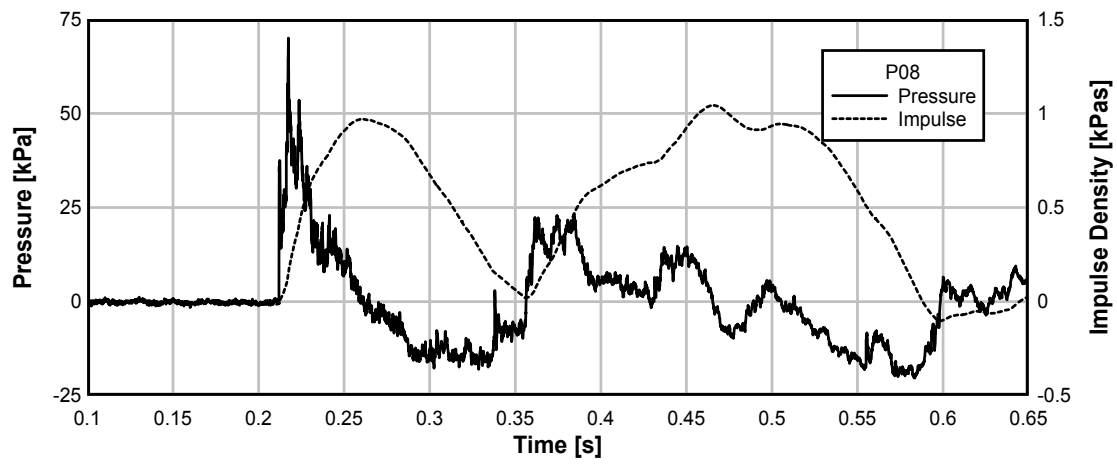
TE-8 826



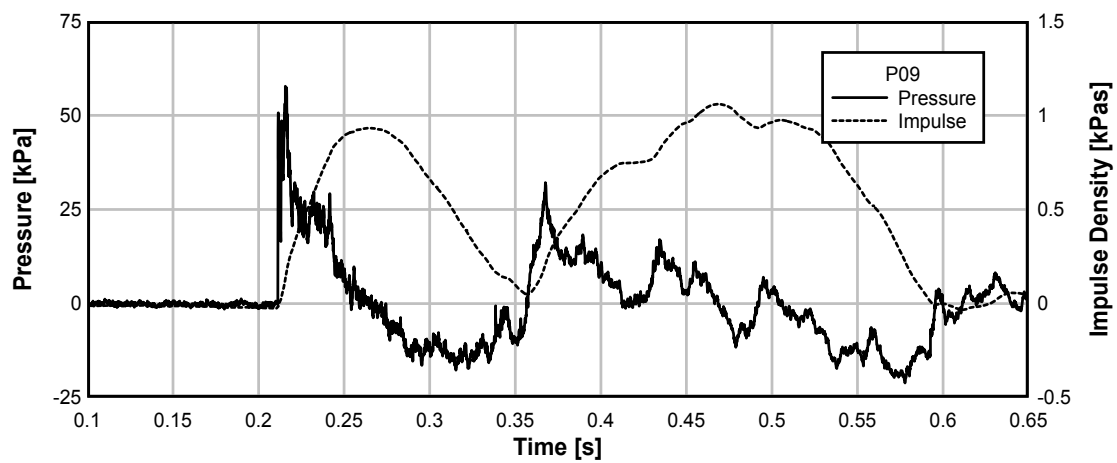
TE-8 826



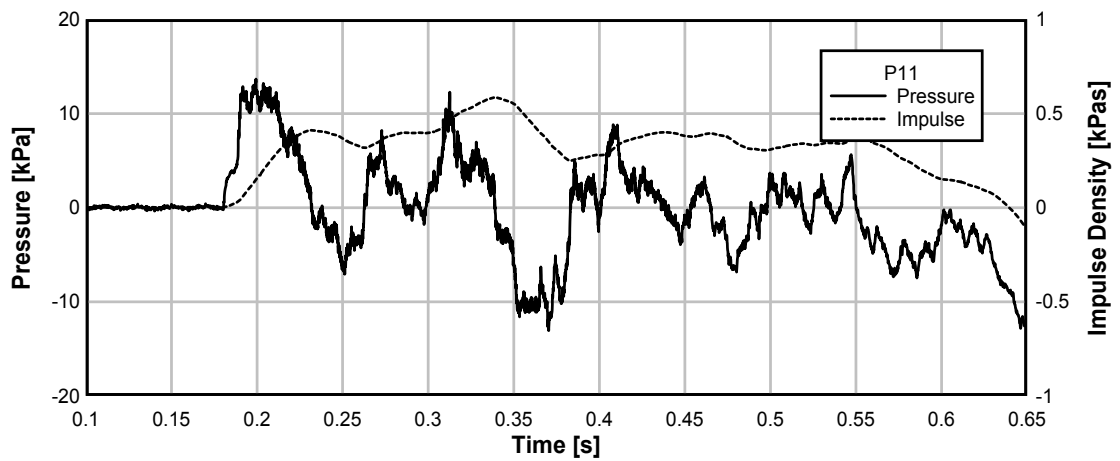
TE-8 826



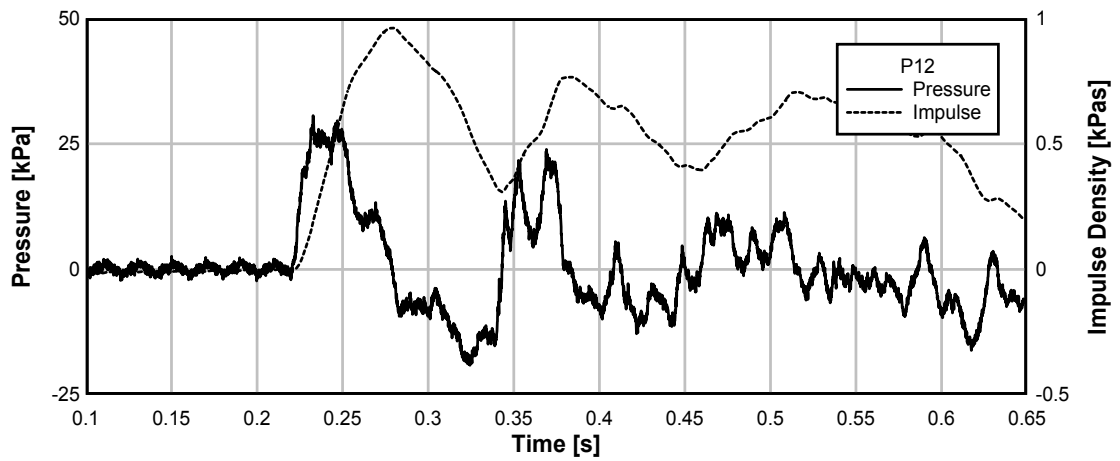
TE-8 826



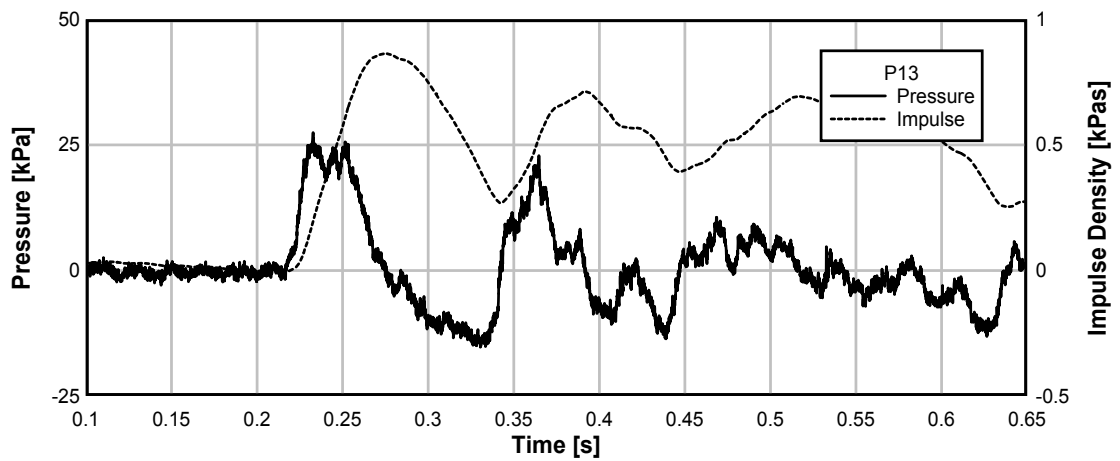
TE-8 826

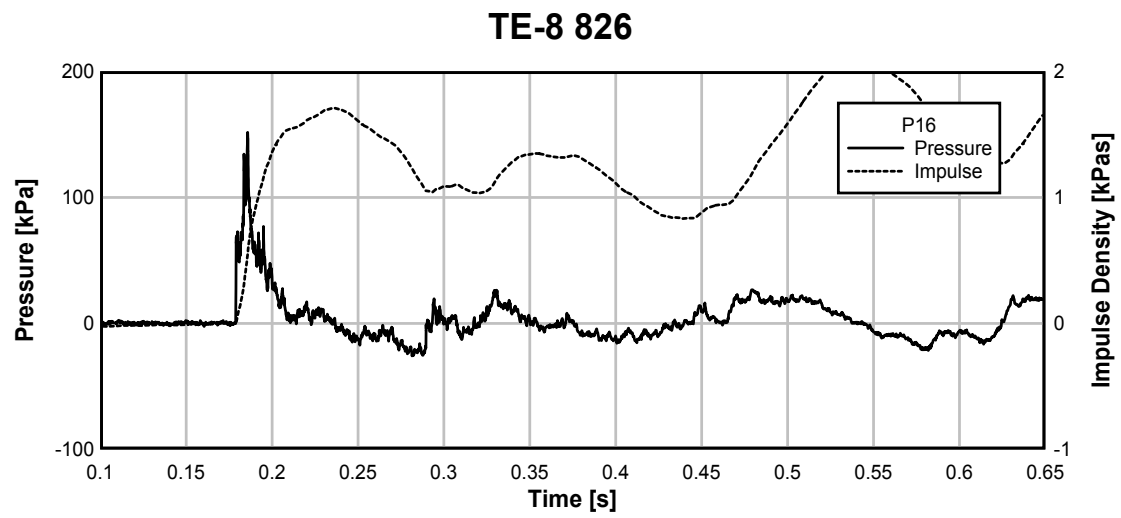


TE-8 826



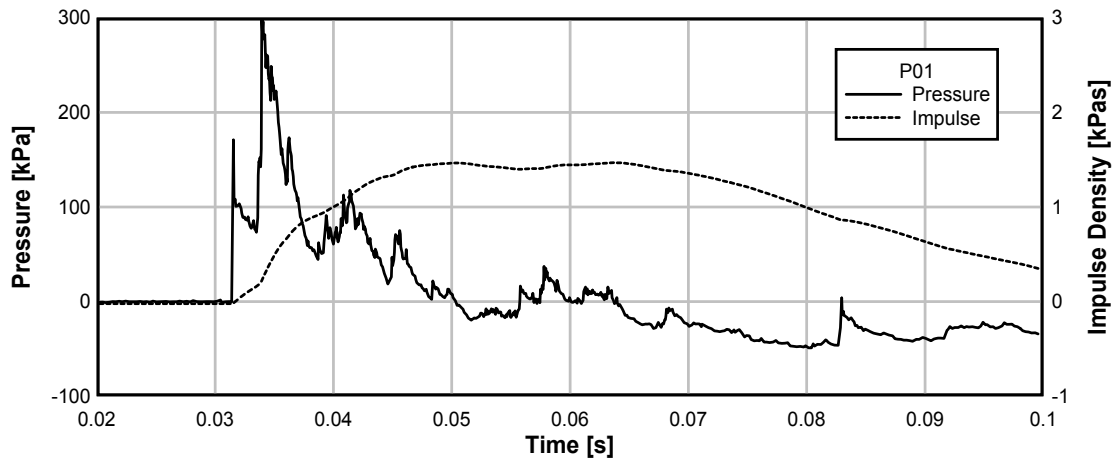
TE-8 826



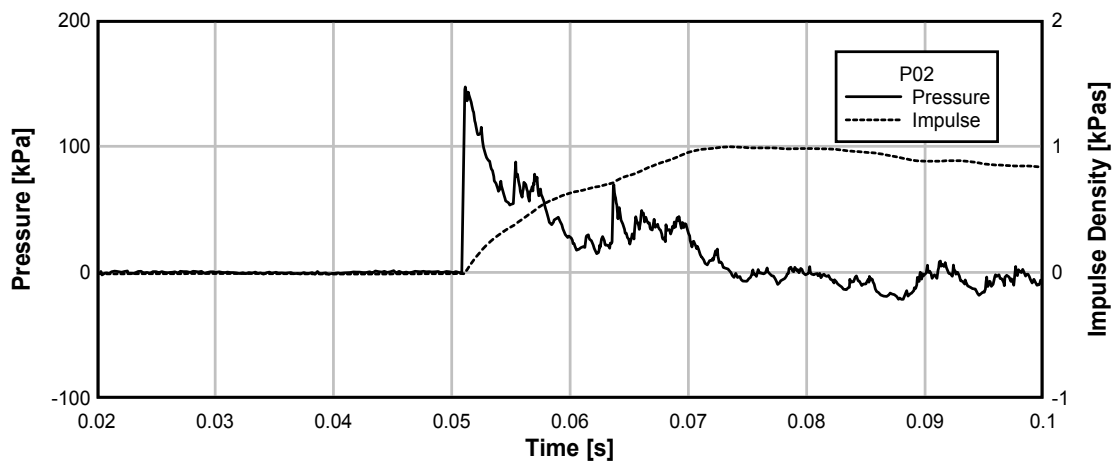


Test 827: avstånd 10 m, 114 kg Hexotonal, liggande cylinder tvärs på mark.

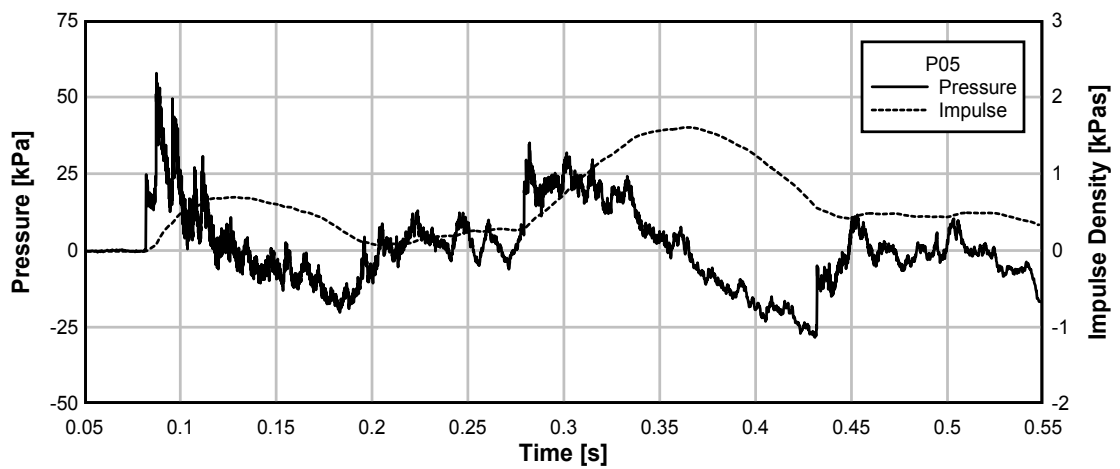
TE-8 827



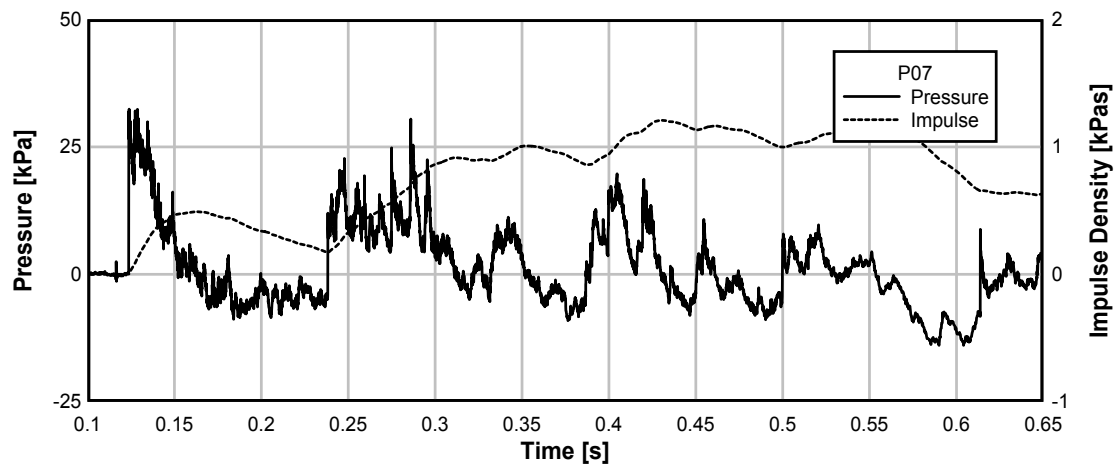
TE-8 827



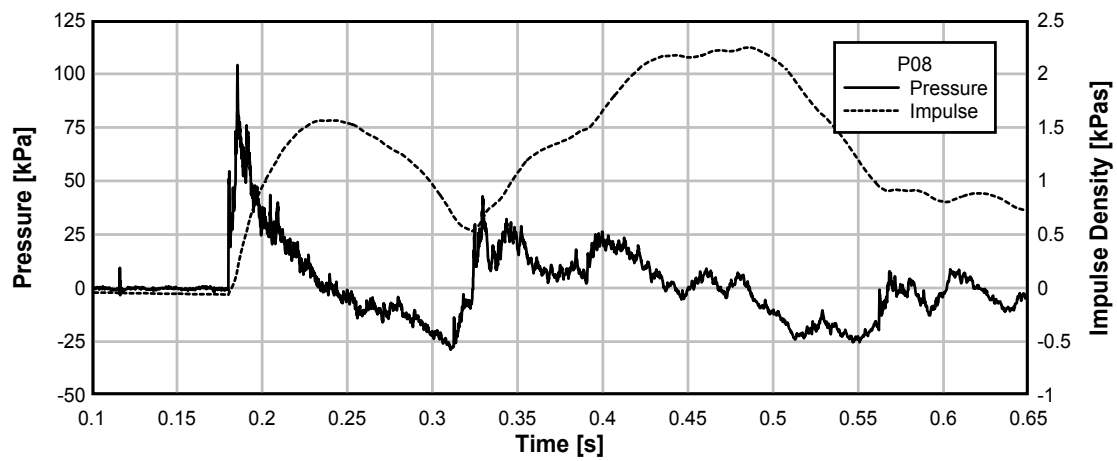
TE-8 827



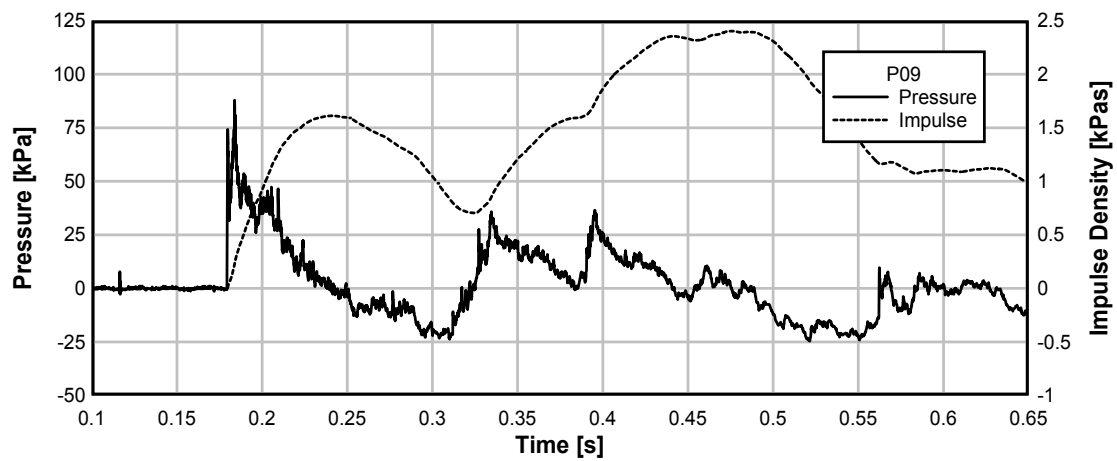
TE-8 827



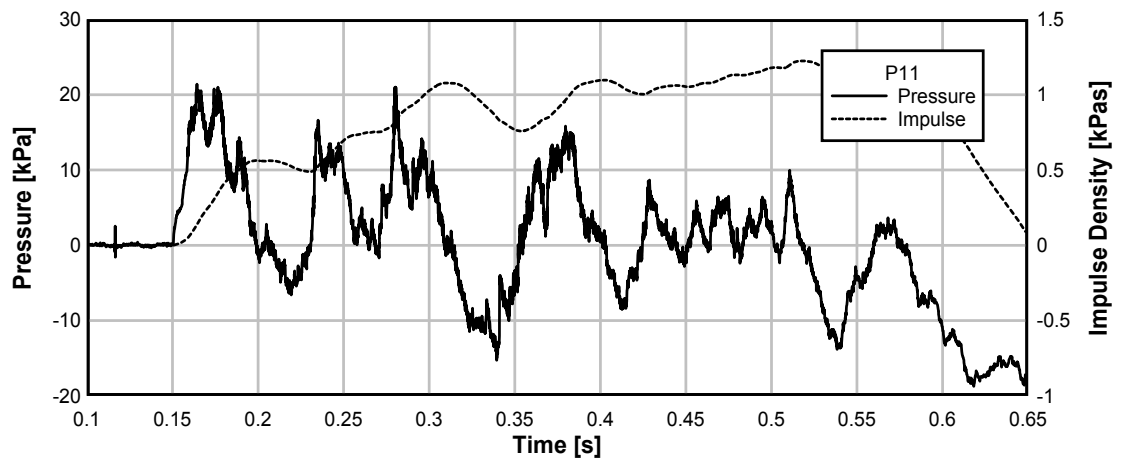
TE-8 827



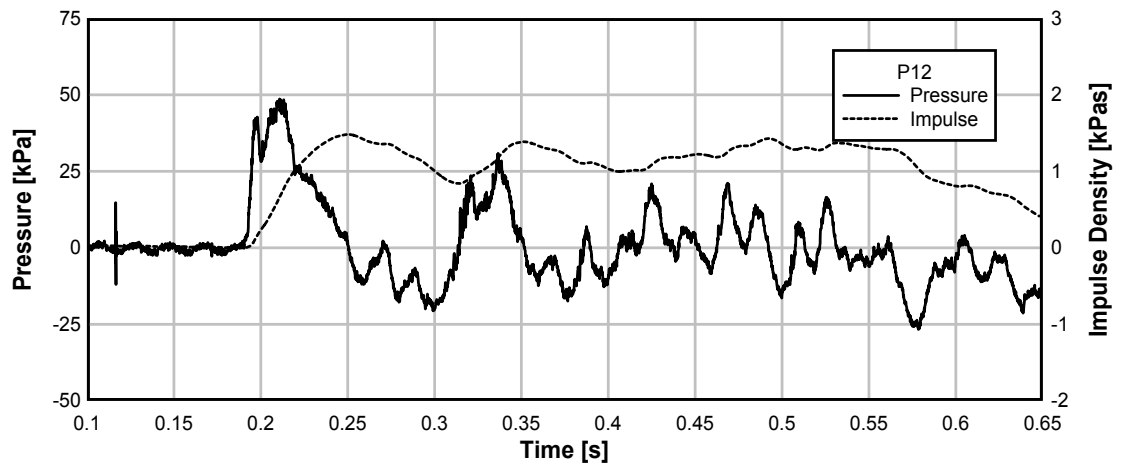
TE-8 827



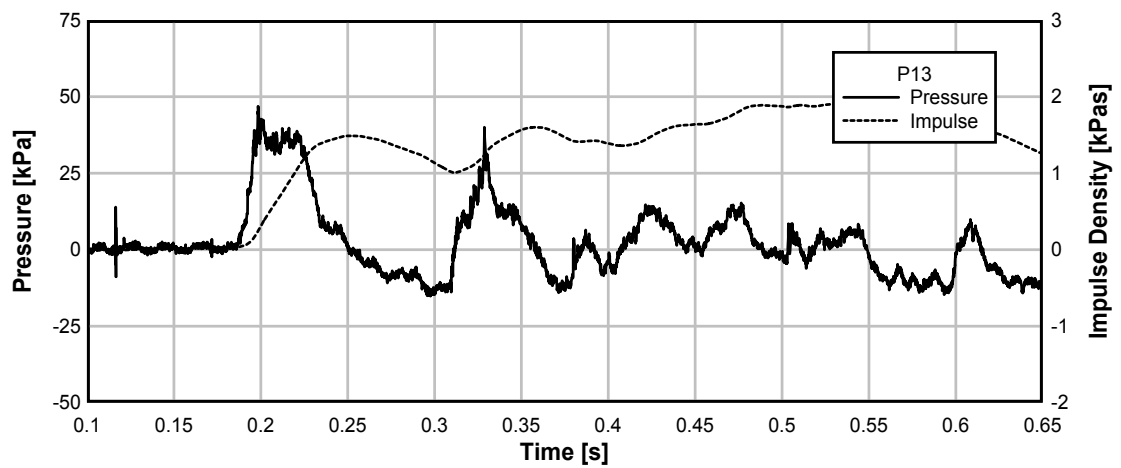
TE-8 827

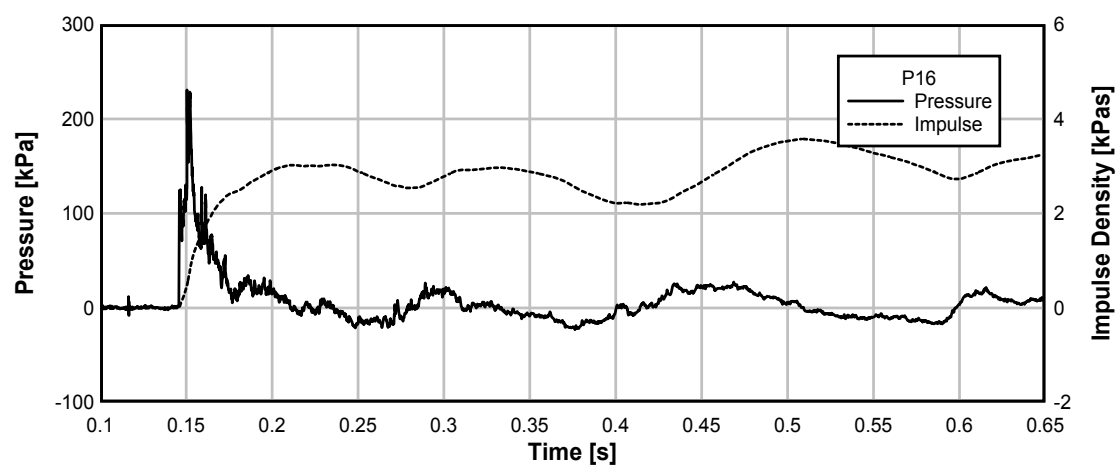


TE-8 827



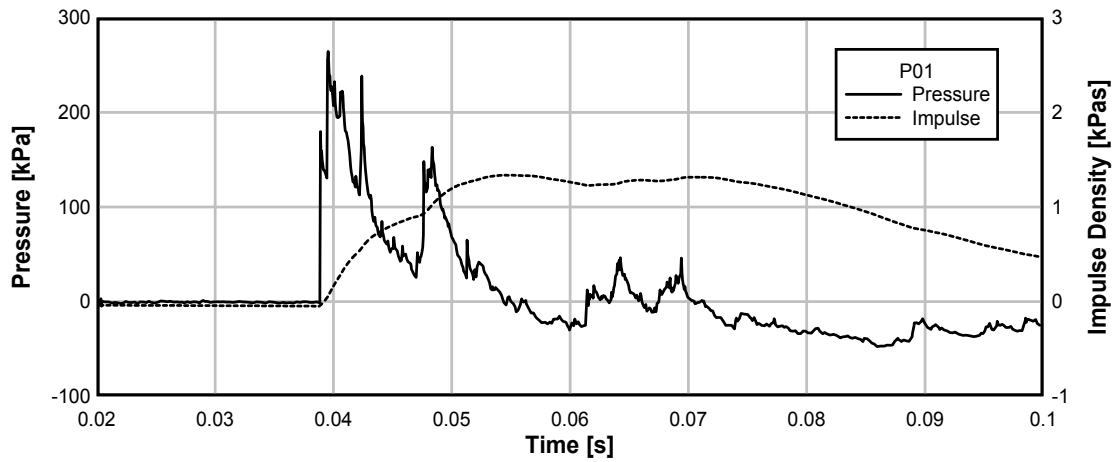
TE-8 827



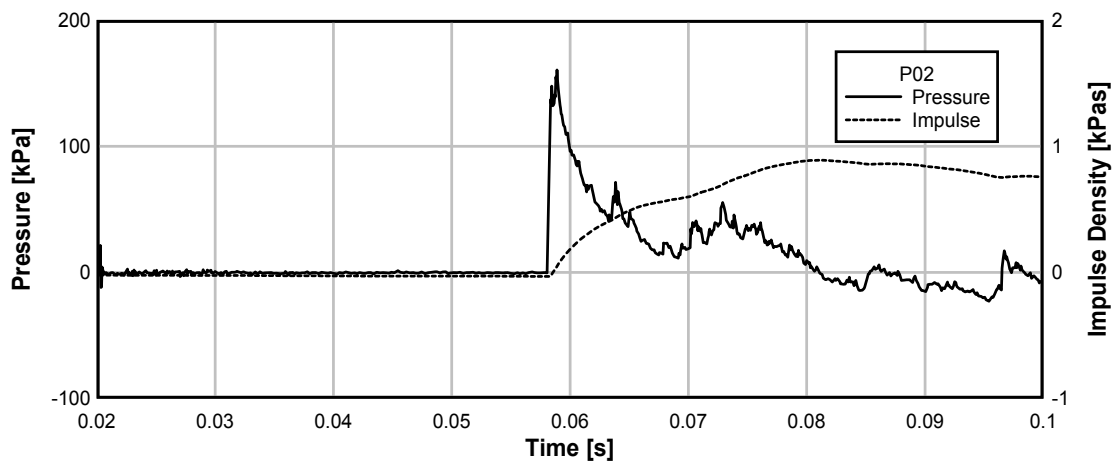
TE-8 827

**Test 828: avstånd 5 m, 114 kg Hexotonal, liggande cylinder
längs med på mark. Tänd i motsatt ände.**

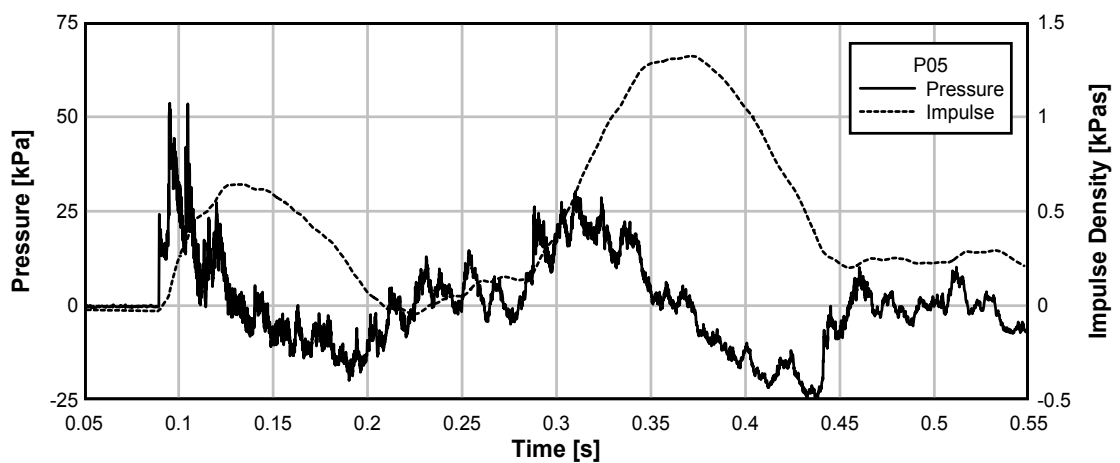
TE-8 828



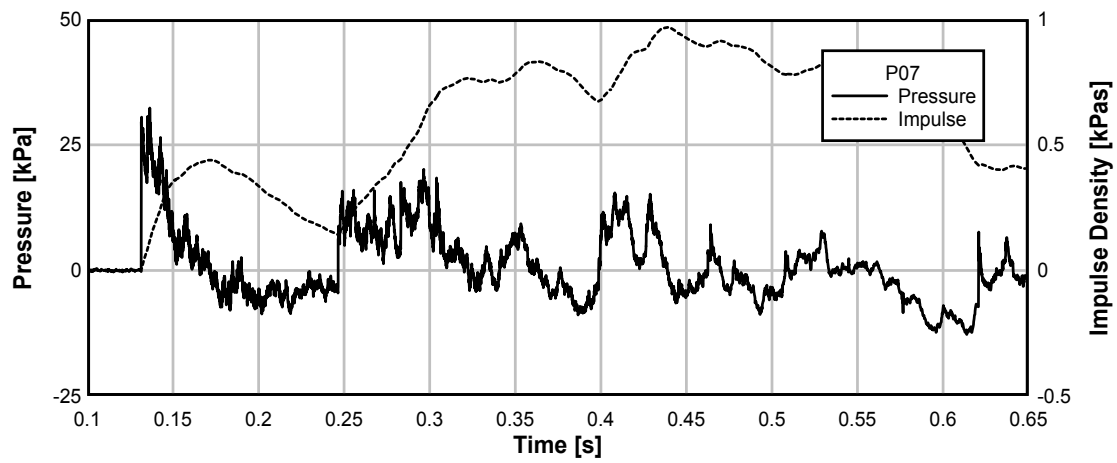
TE-8 828



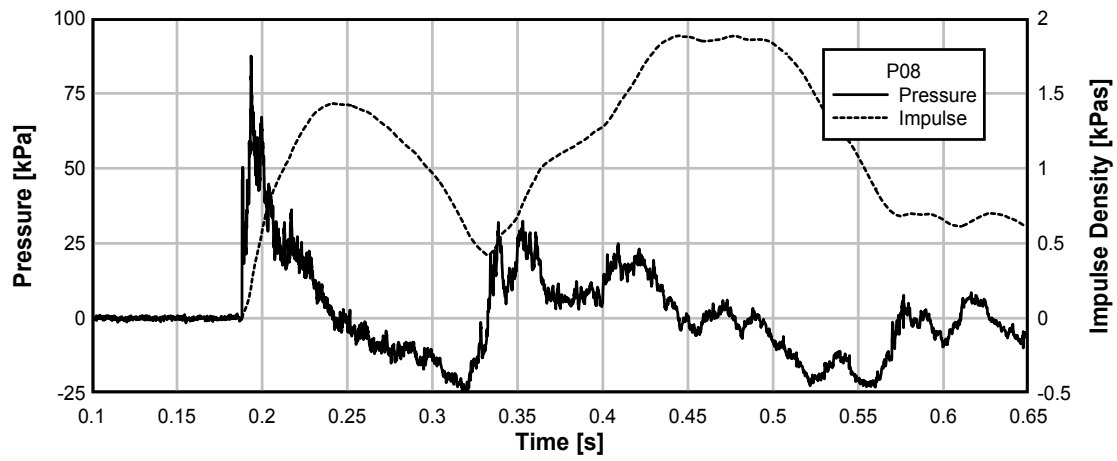
TE-8 828



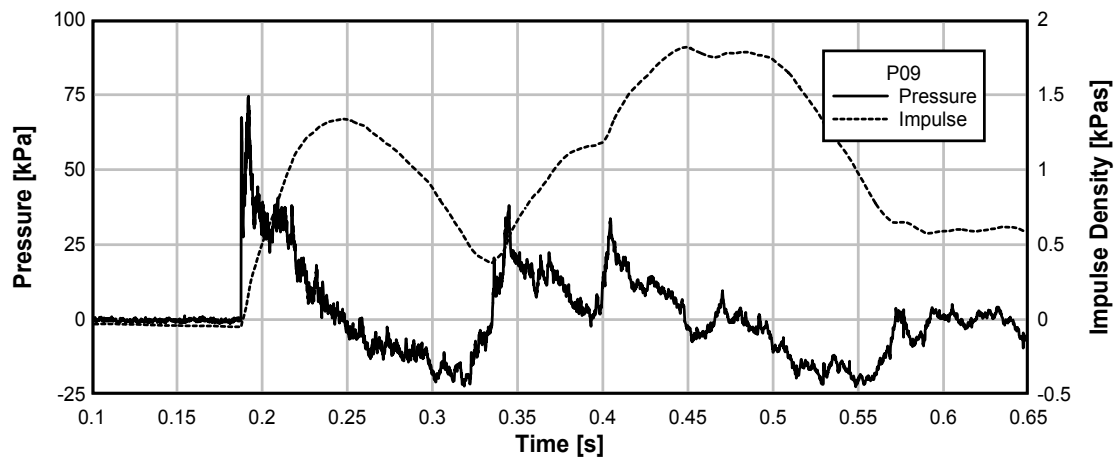
TE-8 828



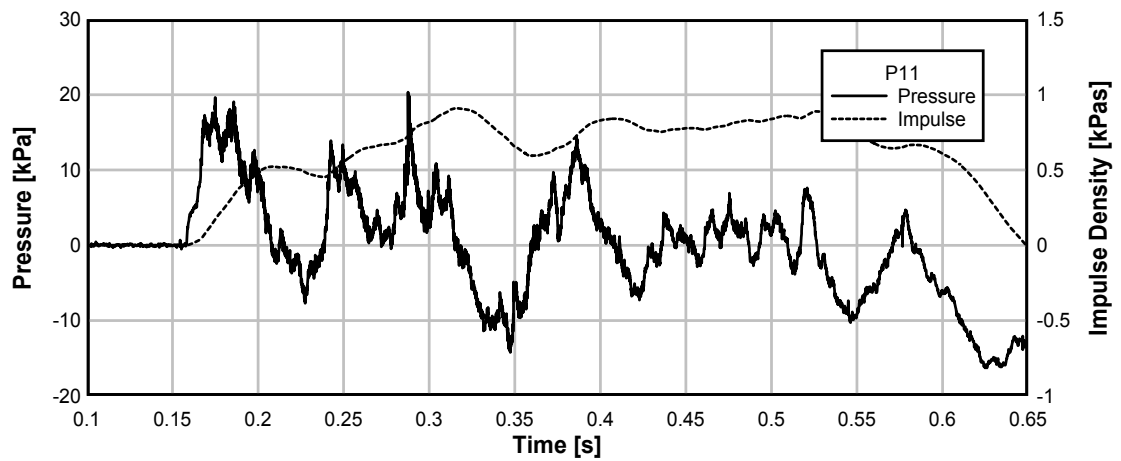
TE-8 828



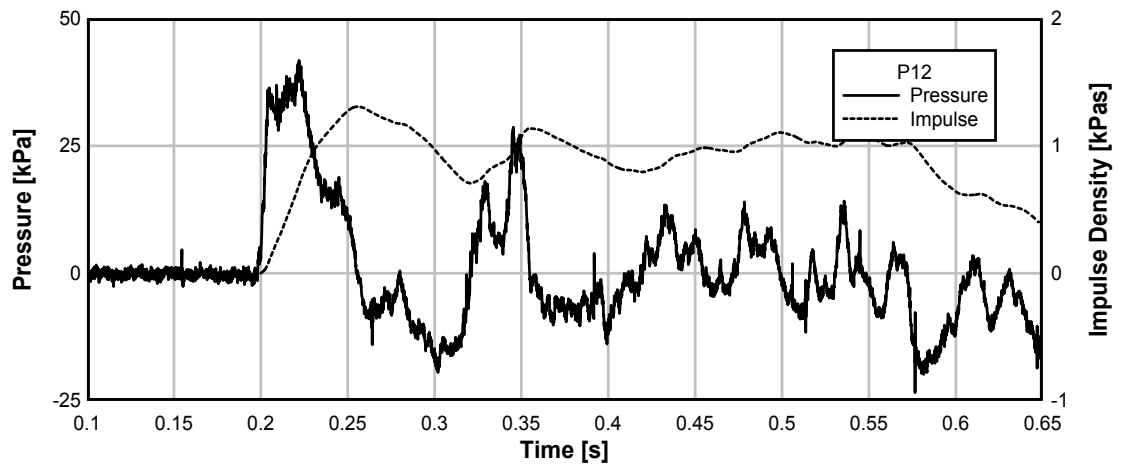
TE-8 828



TE-8 828



TE-8 828



TE-8 828

