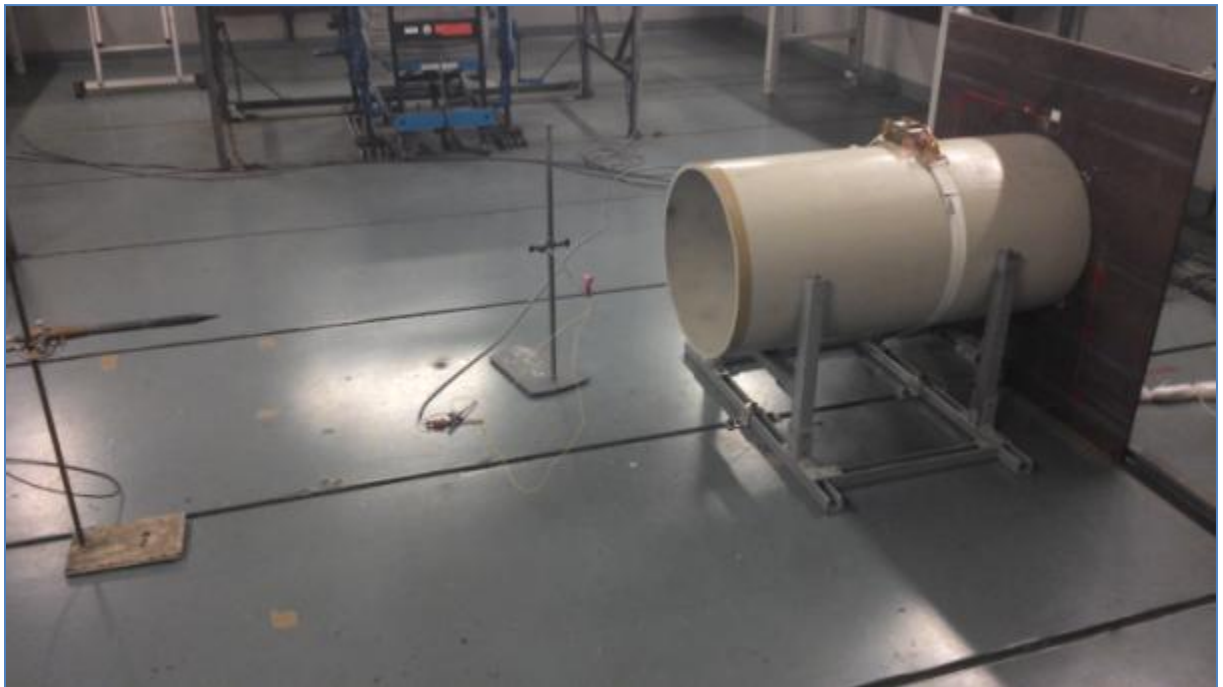

Onderzoek Blast Tube

VERSIE 2 04-03-2014



Vdg R.J.C. Christis
Brussel 2014

Onderzoek Blast Tube

VERSIE 2 04-03-2014



Vdg R.J.C. Christis
Brussel januari, 2014

Begeleider Koninklijke Militaire School:
Begeleider Nederlandse Defensie Academie:

Maj. Dr. Ir. Lecompte
Ir. Borgers

Voorwoord

Met trots bied ik u dit rapport aan dat de afsluiting vormt van mijn eindonderzoek voor de bachelorstudie Civiele Techniek aan de NLDA.

Deze opdracht bestaat uit het grotendeels zelfstandig uitvoeren van een onderzoek. De Geniecadetten van de NLDA volgen een deel van de studie in Breda en een ander deel in Enschede. Ik ben erg blij dat ik mijn eindonderzoek aan de Koninklijke Militaire School (KMS) in Brussel mocht uitvoeren.

De kennis van zaken en de professionaliteit binnen het departement Bouwkunde en Constructie (BoCo) zijn buitengewoon inspirerend en het was een buitengewoon genoegen om hier deel van te mogen uitmaken. Het internationale karakter en de collegiale sfeer binnen het departement hebben er voor gezorgd dat de tijd in Brussel leerzaam en aangenaam was. Hier wil ik alle medewerkers van BoCo hartelijk voor bedanken.

Tijdens de studie Civiele Techniek die door de Nederlandse Defensie Academie (NLDA) in samenwerking met de Universiteit Twente wordt verzorgd wordt veel kennis aan de studenten aangeboden. Een groot deel van het onderwijs wordt verzorgd op de klassieke manier. De studenten krijgen kennis aangereikt en laten in een toets zien dat ze deze kennis beheersen. Een klein deel vindt plaats in projectvorm waarbij het gaat om het toepassen van kennis en vaardigheden en samenwerking. Het eindonderzoek vormt in mijn ogen het hoogtepunt van de studie; het toepassen van de eerder aangeleerde kennis en vaardigheden en het fulltime bezig zijn met een werk is een verademing na al die jaren in de collegebanken.

Dat ik heb genoten van dit werk is allereerst te danken aan mijn begeleiders in België, namelijk majoor David Lecompte en dhr. Bruno Reymen. Hen wil ik bijzonder bedanken voor de prettige samenwerking en het feit dat ik zelfstandig aan deze opdracht heb mogen werken. De feedback en de begeleiding die ik van hen heb gehad was geweldig. In Nederland stond dhr. Jody Borgers altijd voor me klaar. Hij stelde me gerust als ik het even niet meer zag zitten en daagde me uit als het op rolletjes liep. Ook wil ik u, en alle docenten van de vakgroep in Breda bedanken, voor de steun en het vertrouwen die ik tijdens de hele opleiding van u heb gehad.

De onderzoekers van de vakgroep BoCo waren altijd bereid om te helpen en daar wil ze dan ook voor bedanken. Hamsah, Raouf en Bachir in het bijzonder, voor de tijd die ze hebben gestoken in het zoeken naar oplossingen en wanneer nodig voor de zet in de goede richting. Uiteraard ben ik ook mijn collega Bart van Vroenhoven waarmee ik de periode in Brussel samen heb beleefd dank verschuldigd. Ons gemeenschappelijk gevoel voor humor en de uitjes in Brussel maar vooral ook de periodieke "pint" in de pub hebben de tijd doen vliegen.

Tot slot wil ik mijn vader, Nicolien en mijn broer en zijn gezin bedanken voor alle steun die zij mij hebben gegeven gedurende de hele studie. De periode waarin mam wegviel en de vervelende tijd die daarop volgde heeft zijn wissel getrokken. Vaak was ik er niet voor jullie omdat ik in de boeken zat of omdat mijn batterij weer in het rood stond. Jullie zijn me blijven steunen en hebben altijd begrip gehad voor mijn situatie en mijn keuzes.

Ik draag dit werk op aan mijn moeder, ze maakt het niet meer mee maar ik weet dat ze trots op me is. Door haar en voor haar heb ik de motivatie vast kunnen houden en ben ik doorgegaan.

Samenvatting

Bij het ontwerp van kampementen en andere voorzieningen voor uitgezonden eenheden worden hoge eisen gesteld aan de toegepaste constructies. Deze constructies moeten zorgen voor een zo hoog mogelijke veiligheid van het eigen personeel en materieel. Om deze constructies veilig te kunnen uitvoeren is er kennis nodig van de bouwmaterialen en componenten waaruit deze constructies worden gemaakt. Een van de mogelijk toegepaste bouwelementen is plaatmateriaal.

Van dit plaatmateriaal is kennis nodig, om de reactie van deze platen op een schokgolf ten gevolge van een detonatie te kunnen voorspellen. Om hier onderzoek naar te doen is er op de Koninklijke Militaire School een proefopstelling aanwezig. Deze proefopstelling maakt het mogelijk plaatmateriaal te beproeven met een verschaalde explosie. Om de reactie van deze platen in de toekomst beter te kunnen onderzoeken, wordt onderzocht hoe een grotere druk en impuls kan worden bereikt met een klein ladinggewicht.

Door een tunnelconstructie toe te passen wordt onderzocht hoe de druk en impuls beïnvloed worden. Door de Equivalent Volume Approach toe te passen wordt onderzocht of hiermee een voorspelling kan worden gedaan voor de optredende waarden. Door een experimenteel onderzoek uit te voeren wordt beproefd hoe de lengte van de tunnel, de afstand van de tunnel tot de te testen plaat en de plaats van de lading invloed uitoefen op de druk en impuls.

Voor dit experimenteel onderzoek is een proefopstelling ontworpen waarbij de bestaande opstelling van de KMS als uitgangspunt is genomen. Door de overige uitgangspunten uit te werken en een analyse te doen naar de parameters die invloed hebben op de druk en impuls, wordt een ontwerp gemaakt voor een proefopstelling. Deze proefopstelling wordt geconstrueerd en met deze opstelling worden veertig proeven uitgevoerd. Behalve de invloed op druk en impuls wordt ook onderzocht welke belasting de tunnelbuis maximaal aankan.

De meetresultaten worden met behulp van een Matlab script bewerkt en gereed gemaakt voor analyse. Hiermee worden tabellen en grafieken geproduceerd die een antwoord moeten geven op de onderzoeksvragen.

De resultaten van de experimenten worden geanalyseerd waarna er meerdere vergelijkingen worden opgesteld. Een vergelijking die wordt gemaakt bekijkt de versterking die de buis heeft op de druk en impuls. Deze versterking wordt uitgedrukt in een versterkingsfactor. Bij deze vergelijking wordt de gereflecteerde druk die optreedt met en zonder tunnel in het centrum van de testplaat met elkaar vergeleken. Een andere vergelijking is de vergelijking tussen de met de EVA berekende waarden en de gemeten waarden. Hierdoor wordt onderzocht of in de toekomst de EVA gebruikt kan worden bij het opzetten van nieuwe proeven. Naast de vergelijkingen die zich beperken tot het centrum van de testplaat wordt de schokgolf geëvalueerd door de sensoren buiten het hart van de testplaat met elkaar te vergelijken en door deze sensoren met de sensoren in het hart te vergelijken. Door deze vergelijking kan de symmetrie en in geringe mate de vlakheid van de schokgolf worden onderzocht.

De conclusies die uit deze vergelijkingen volgen worden gebruikt om enkele aanbevelingen te doen. Deze aanbevelingen kunnen worden gebruikt bij het geplande toekomstige onderzoek van de KMS.

Inhoud

Voorwoord	5
Samenvatting	6
1. Inleiding.....	9
1.1. Aanleiding	9
1.2. Probleemanalyse.....	9
1.3. Doelstelling	10
1.4. Vraagstelling	10
1.5. Afbakening	11
1.6. Structuur	11
2. Theorie	13
2.1. Explosies en schokgolven.....	13
2.1.1. Blastgolf	13
2.1.2. Blastgolf parameters.....	14
2.1.3. Reflectie	15
2.2. Tunnels.....	16
2.2.1. Equivalent Volume Approach	17
2.2.2. Lading in de tunnelingang.....	17
2.2.3. Lading voor de tunnelingang	18
2.2.4. Impuls.....	19
3. Experimenteel onderzoek	20
3.1. De testopstelling.	20
3.1.1. Analyse van de bestaande testopstelling.	20
3.1.2. Uitgangspunten bij het ontwerp van de nieuwe testopstelling	22
3.1.3. Analyse van de variabelen die invloed uitoefenen op de blastparameters.	22
3.1.4. Ontwerp van de proefopstelling.....	25
3.1.5. De gebruikte opstelling	27
3.1.6. Toegepaste meetapparatuur	29
3.2. Voorspelling van de proefresultaten	31
3.2.1. Proefprogramma.....	31
3.2.2. Sferische lading zonder tunnel.....	32
3.2.3. Sferische lading in de tunnelingang	33
3.2.4. Sferische lading voor de tunnelingang.....	34
3.2.5. Voorspelling proefresultaten	35
3.3. Uitvoering van het onderzoek	36
3.3.1. Algemene beschrijving van de proeven.....	36
3.3.2. Eerste proefdag.....	38
3.3.3. Tweede proefdag	39

3.3.4. Derde proefdag	40
3.3.5. Geconstateerde onnauwkeurigheden en afwijkingen.....	41
3.4. Verwerking van de meetgegevens.....	42
3.4.1. Opslaan en hernoemen van de proeven	42
3.4.2. Kalibreren van de sensoren	42
3.4.3. Filteren van de ruis.	43
3.4.4. Bepalen van de juiste piek voor de gegevensverwerking.....	45
4. Analyse van de gemeten resultaten	47
4.1. Resultaten in het centrum van de testplaat	47
4.2. Gevoeligheidsanalyse van de afstand tussen de tunnel en de testplaat.....	50
4.3. Vergelijking van de gemeten waarden met de voorspelde waarden.....	51
4.3. Symmetrie van de schokgolf	53
4.4. Vlakheid van de schokgolf	54
4.6 Reproduceerbaarheid	56
5. Conclusie en aanbevelingen	58
5.1 Conclusie	58
5.2 Aanbevelingen	59
Literatuurlijst.....	60
Bijlage 1 Proefopstellingen.....	61
Bijlage 2 Grafieken sensor 1-sensor 8 (geconverteerd)	65
Bijlage 3 Grafieken sensor 3-sensor 6	75
Bijlage 4 Grafieken sensor 1-sensor 6	80
Bijlage 5 Specificaties Meetapparatuur	85
Bijlage 6 Matlab script.....	86
Bijlage 7 Klimatologische omstandigheden	100

1. Inleiding

De Nederlandse Defensie Academie (NLDA) en de Koninklijke Militaire School (KMS) hebben de afgelopen jaren samengewerkt bij een aantal onderzoeken naar de gevolgen van detonaties op constructies en constructiematerialen. Het departement Bouwkunde en Constructie van de KMS heeft de beschikking over een laboratorium voor onderzoek naar de eigenschappen van materialen. In dit laboratorium kunnen pyrotechnische, elektrische of hydraulische proeven worden uitgevoerd. De KMS heeft veel ervaring in het onderzoeken van componenten en modellen op schaal. Een aantal van deze onderzoeken richt zich op het beproeven van plaatmateriaal. Tijdens deze beproevingen wordt de reactie van een plaat ten gevolge van een detonatie onderzocht. Bij het uitvoeren van deze onderzoeken wordt gebruik gemaakt van een testopstelling in het laboratorium van de KMS in Brussel. De KMS wil onderzoeken hoe de testopstelling aangepast kan worden zodat deze voor toekomstig onderzoek kan worden gebruikt [17].

1.1. Aanleiding

Bij het uitvoeren van expeditionaire missies hebben de uitgezonden eenheden behoefte aan kampen, die als uitvalsbasis dienen voor het uitvoeren van hun missie. Een belangrijke eis die aan deze kampen wordt gesteld is het bieden van bescherming aan het personeel, het materieel en de infrastructuur van deze eenheden. De maatregelen die worden toegepast om deze kampen te beschermen kunnen worden opgedeeld in passieve en actieve beschermingsmaatregelen. Het onderscheid tussen deze maatregelen is het al dan niet inzetten van personeel en middelen om de dreiging te weerstaan. Een onderdeel van de passieve beschermingsmaatregelen zijn beschermende constructies.

Beschermende constructies zijn bouwkundige constructies die zo ontworpen en gedimensioneerd zijn dat ze de veiligheid van het personeel, het materieel en de infrastructuur vergroten. Dit houdt in dat ze bestand zijn tegen een vooraf vastgestelde dreiging. Enkele mogelijke dreigingen zijn de uitwerkingen van een detonatie. Deze detonatie kan verschillende oorzaken hebben zoals direct of indirect vijandelijk vuur, Improvised Explosive Devices of ongelukken met transport of opslag van munitie.

De beschermende constructies dienen bestand te zijn tegen de uitwerkingen van een detonatie, dit geldt zowel voor de structurele integriteit van de constructie als voor de afzonderlijke constructieonderdelen. Een van de onderdelen waaruit een constructie kan worden opgebouwd is plaatmateriaal. Om plaatmateriaal zo efficiënt mogelijk te kunnen toepassen in beschermingsconstructies is onderzoek nodig naar de materiaaleigenschappen van diverse plaatmaterialen. De meest ideale manier om dit onderzoek uit te kunnen voeren is het betreffende plaatmateriaal bloot te stellen aan de dreiging. Dit brengt in de praktijk een aantal bezwaren met zich mee.

Een van deze bezwaren is het toepassen van een groot ladinggewicht. De dreigingen bestaan uit springstofgewichten die oplopen van enkele grammen van bijvoorbeeld handgranaten tot duizenden kilo's van bijvoorbeeld Vehicle Born IED's en afgeworpen (vliegtuig-)munitie. Een test met grote ladinggewichten is duur, gevaarlijk voor de omgeving, slecht voor het milieu en wordt beperkt door de regelgeving op de testlocaties. Een ander bezwaar is dat het uitvoeren van testen met de plaatmaterialen op ware grootte eveneens duur is. Bovendien is het tijdrovend en duur om een constructie opnieuw op te bouwen om de test te kunnen herhalen.

1.2. Probleemanalyse

Om deze redenen is het noodzakelijk de plaatmaterialen te testen onder gecontroleerde omstandigheden in een verschaalde testopstelling. Hiermee wordt bedoeld dat een kleinere lading wordt gebruikt met een mogelijk kleinere constructie en eventueel aangepaste materialen. Bij het

uitvoeren van deze testen op schaal worden doorgaans schalingswetten toegepast. Deze worden gebruikt om met een lager springstofgewicht een zelfde effect te bereiken op het geteste materiaal. Hierbij wordt naast het springstofgewicht ook de afstand verkleind. Bovendien kunnen de geteste constructies verschaald worden.

Een veel gebruikte schalingswet is de Hopkinson-Cranz schalingswet. Deze wet stelt dat gelijkblijvende schokgolven worden gegenereerd op dezelfde geschaalde afstanden wanneer twee explosieven van dezelfde springstof maar van verschillende afmeting detoneren onder dezelfde atmosferische condities [3]. Een nadeel van deze schalingswet is dat de drukken van de beide detonaties overeenkomen maar dat de impuls anders zal zijn. Dit is een groot nadeel bij het beproeven van constructies en materialen omdat in sommige situaties de schade aan een constructie meer wordt bepaald door de impuls dan door de piekoverdruk. Om deze reden is het noodzakelijk om bij het onderzoeken van plaatmateriaal zowel de piekoverdruk als de impuls bij beide detonaties gelijk te krijgen.

Met behulp van een relatief nieuwe schalingswet, de zogenaamde Equivalent Volume Approach (EVA) [5] is het mogelijk deze twee parameters gelijk te houden bij het uitvoeren van proeven op schaal. Door het toepassen van een tunnelconstructie, waarbij de schokgolf door de tunnel wordt geleid richting het testobject, is aangetoond dat de druk en de impuls gelijktijdig in een test benaderd kunnen worden. Door het toepassen van deze schalingsmethode en de genoemde tunnelconstructie in een testopstelling, is het mogelijk om de eigenschappen van plaatmaterialen op kleine schaal te testen onder gecontroleerde omstandigheden.

1.3. Doelstelling

Het doel van dit onderzoek is:

Het bepalen van de verschillen in de gereflecteerde piekoverdruk en impuls, veroorzaakt door de schokgolf van een detonatie die opgesloten is door een tunnelconstructie, op een massieve plaat.

Om in de toekomst plaatmateriaal te beproeven met een gecontroleerde piekoverdruk en impuls is inzicht nodig in de mogelijkheden om deze parameters te beïnvloeden. Om dit inzicht te verwerven, wordt in dit onderzoek de toepassing van een tunnelconstructie, om de schokgolf van een detonatie op te sluiten, onderzocht. De gegevens die uit dit onderzoek voortkomen kunnen voor meerdere doeleinden worden gebruikt, namelijk:

- Het opzetten van een testopstelling ten behoeve van het beproeven van de reactie van componenten op een schokgolf.
- Ter validatie van numerieke studies naar het gedrag van schokgolven in tunnels.
- Als bijdrage aan de validatie van de EVA [5].

1.4. Vraagstelling

Om de doelstelling te bereiken worden onderzoeksvragen opgesteld. Allereerst de centrale vraag. Deze is als volgt gedefinieerd:

Hoe worden de piekoverdruk, de belastingduur en de hiermee te bepalen impuls beïnvloed door het toepassen van een tunnelconstructie in vergelijking met een open veld detonatie?

Bij het onderzoeken van deze vraag worden deelvragen geformuleerd. Het beantwoorden van deze deelvragen draagt bij aan de beantwoording van de centrale vraag.

1. Hoe is onderzoek naar de uitwerking van schokgolven op plaatmateriaal in het verleden uitgevoerd?

- a. Welke parameters worden onderzocht?
 - b. Waaruit bestaat de oude testopstelling?
 - c. Zijn er onderzoeksgegevens die als vergelijkingsmateriaal kunnen dienen voor dit onderzoek?
 - d. Hoe wordt met verscaling in deze onderzoeken omgegaan?
 - e. Welke elementen uit deze onderzoeken kunnen (als referentie of validatie) binnen het op te zetten onderzoek gebruikt worden?
2. Hoe gedraagt een schokgolf zich in een opgesloten ruimte (tunnel)?
 3. Hoe wordt de tunnelconstructie ontworpen?
 - a. Welke grootheden moeten worden gemeten?
 - b. Wat zijn hierbij de uitgangspunten?
 - c. Waarmee gaat dit gemeten worden?
 - d. Hoe gaat de constructie er uit zien (het ontwerp)?
 4. Hoe wordt de testopstelling gevalideerd?
 - a. Hoe kan de optredende piekoverdruk en impuls vooraf worden bepaald?
 - b. Kunnen de resultaten uit de proeven vergeleken worden met vergelijkbare onderzoeken uit het verleden?
 - c. Kunnen de resultaten uit de proeven worden vergeleken met numerieke onderzoeken die overeenkomen met dit onderzoek?

1.5. Afbakening

Om te voorkomen dat het onderzoek te breed wordt, wordt er een grens gesteld aan de stof die onderzocht gaat worden. Tot dit onderzoek behoort niet:

- De gevolgen van fragmentatiewerking op het plaatmateriaal.
- Het beschrijven van materiaaleigenschappen van beproefd plaatmateriaal.
- De respons van de belaste plaat ten gevolge van de wijze van oplegging.
- Het analyseren van het gedrag van de tunnel onder invloed van de schokgolf en de hieruit voortkomende invloed op de schokgolf.

1.6. Structuur

De opzet van dit onderzoek is experimenteel. Hiermee wordt bedoeld dat getracht wordt, door het testen van de invloed van verschillende parameters op de resultaten, inzicht te krijgen in de uitwerking van de schokgolf. De stappen die moeten worden doorlopen worden hier zoveel mogelijk chronologisch beschreven. Hierbij worden twee parallel aan elkaar lopende sporen beschreven. Het eerste spoor richt zich op het literatuuronderzoek. Het tweede spoor richt zich op de testopstelling en de praktische uitvoering van de proeven. Uiteindelijk komen beide sporen bij elkaar in de vergelijking van de resultaten en de conclusie.

Allereerst wordt onderzocht welke parameters van belang zijn voor het onderzoek. Hierna wordt de bestaande opstelling onderzocht. Hiermee zal een vergelijking moeten worden gemaakt en deze opstelling vormt zo de basis voor de nieuwe testopstelling. Voor de nieuwe opstelling moeten de uitgangspunten worden vastgelegd. Met de uitgangspunten worden de zaken bedoeld die door het project heen als basis worden meegenomen. Een uitgangspunt is een vertrekpunt waar het project niet omheen kan. Ook moeten de parameters worden onderzocht die kunnen worden gevarieerd. De gegevens die hier uit volgen moeten worden geanalyseerd.

Parallel aan de voorgaande stappen wordt het literatuuronderzoek uitgevoerd. Dit literatuuronderzoek wordt verdeeld in het schrijven van het theoretisch kader en het zoeken naar,

selecteren van en analyseren van gegevens uit eerdere onderzoeken. Het bepalen hoe de optredende parameters kunnen worden voorspeld vormt hier ook een onderdeel van, evenals de uitvoering hiervan.

Uiteindelijk worden de resultaten van beide stromen samengevoegd en kan een vergelijking worden gemaakt tussen de voorspelde waarden en de gemeten waarden. Dit leidt tot een vergelijking van de oude opstelling met de nieuwe opstelling waarmee de invloed van de tunnel op de druk en de impuls wordt onderzocht.

2. Theorie

Bij de beschrijving van een onderzoek is een eenduidige opvatting van de gebruikte terminologie noodzakelijk. Om dit te bereiken en om een lezer die onbekend is met het vakgebied wegwijs te maken, worden in dit hoofdstuk de begrippen en termen uitgelegd die van toepassing zijn bij dit onderzoek.

Het hoofdstuk is verdeeld in drie delen; het eerste deel behandelt de algemene theorie over explosies en schokgolven, het tweede deel gaat in op reflecties en het gedrag van een schokgolf in een tunnel en in het derde deel komen de verschalingswetten aan de orde.

2.1. Explosies en schokgolven

Een explosie is het gevolg van een fenomeen waarbij plotseling energie vrij komt. Het vrijkomen van deze energie moet zo snel gaan dat er een lokale accumulatie van energie plaats vindt. Het plotseling vrijkomen van de energie kan worden vergeleken met een autoband, in de band heerst een overdruk. Bij het leeglaten van de band door het ventiel komt de druk langzaam vrij zonder dat er bijkomende effecten zijn. In het geval van een klapband komt de opgeslagen energie in de band plotseling vrij waarbij er bijkomende effecten optreden [9].

Deze accumulatie van energie komt vervolgens vrij op een aantal manieren. Enkele manieren waarop deze energie vrij kan komen zijn; een schokgolf, het uitwerpen van fragmenten en hittestraling. De schokgolf is in dit onderzoek de belangrijkste van deze fenomenen en zal nader worden beschouwd in de volgende paragraaf.

Bij het uitvoeren van dit onderzoek worden (militaire) springstoffen gebruikt. Dit zijn stoffen die als ze tot ontbranding worden gebracht, de ontbranding zelf kunnen voortzetten [3]. De elementen die ontbranden zijn opgenomen in het explosieve materiaal waardoor er geen toevoer van warmte of zuurstof van buitenaf nodig is.

De kracht van een explosie wordt vastgesteld door de hoeveelheid energie die vrijkomt. Een in de literatuur algemeen geaccepteerde standaard is de 'TNT equivalentie'. Hierbij wordt de energie die vrijkomt bij de explosie van TNT (symmetrische trinitrotuleen) als standaard genomen. De reden om TNT te nemen als standaard is omdat TNT een chemisch puur materiaal is en vanwege de beschikbaarheid van TNT voor kalibratiedoeleinden (Kinney, 1962). De TNT equivalentie waarmee in dit onderzoek is gewerkt is afgebeeld in tabel 1, die afkomstig is uit de AASTP-4 [12].

Tabel 1: Gemiddelde equivalenties voor druk en impuls [AASTP-4, 2008].

EXPLOSIVE	AVERAGE EQUIVALENT WEIGHT (pressure)	AVERAGE EQUIVALENT WEIGHT (impulse)	PRESSURE RANGE (kPa)
ANFO	0.83	0.81	5-1000
Composition A3	1.09	1.08	34-345
Composition B	1.16	1.14	34-6895
Composition C4	1.37	1.19	69-690
Cyclotol (70/30)	1.14	1.09	34-345

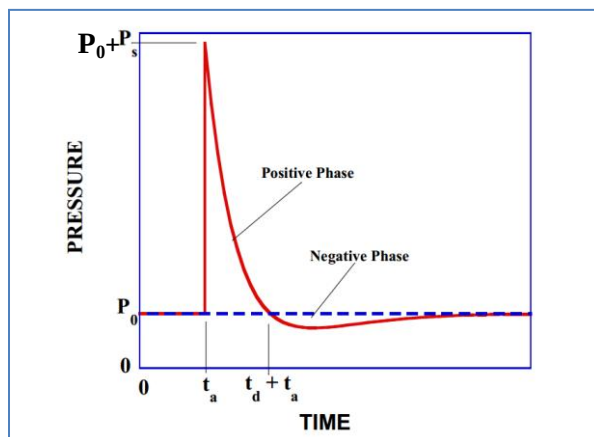
In dit onderzoek is gebruik gemaakt van kneedspringstof die op de verpakking wordt aangeduid als "Charge Demolition M112". Het type springstof betreft C4 en hiermee wordt uit de tabel de waarde voor de TNT equivalenten afgelezen. Voor de druk is deze 1,37 en voor de impuls 1,19.

2.1.1. Blastgolf

Bij een detonatie komen in een zeer korte tijd (bijna instantaan) reactieproducten vrij. Deze reactieproducten zijn vrijwel allen in gasvorm, waardoor er een uitdijende gaswolk ontstaat met zeer hoge temperatuur en druk. Bij het uitdijen van deze gassen wordt de omringende lucht verdrongen. Dit leidt tot een luchtschok, ook wel de blastgolf genoemd[3].

De luchtdruk in de blastgolf is extreem hoog omdat de lucht door de snelle expansie van de explosiegassen wordt samengedrukt. Naar mate de blastgolf zich verwijdt van de bron (het explosief) zal de luchtdruk van zowel de explosiegassen als de blastgolf afnemen tot de atmosferische druk. De tijd waarin dit gebeurt wordt aangeduid met de term positieve fase. Door het afkoelen van de explosiegassen kan er een onderdruk ontstaan. De tijdsfase waarin dit gebeurt wordt de negatieve fase genoemd.

In figuur 1 is een typische druk-tijd verloop van een schokgolf weergegeven. In deze figuur is het kenmerkende abrupte karakter van een explosie te zien. De rechte lijn die de stijging van de luchtdruk weergeeft geeft aan dat dit fenomeen instantaan plaats vindt. Dit in tegenstelling tot een drukgolf die gedurende een bepaalde tijd zijn druk opbouwt.



Figuur 1: Typische druk ($p(t)$) versus tijd profiel voor een explosie schokgolf [12].

2.1.2. Blastgolf parameters

In figuur 1 zijn enkele parameters afgebeeld die van belang zijn bij het bestuderen van detonatie effecten. Het verschil tussen de atmosferische druk p_0 en de statische overdruk $p_0 + p_s$ is de druktoename of piekoverdruk (p_s). De piekoverdruk karakteriseert het destructieve vermogen van de blastgolf [3].

De tijd die de blastgolf nodig heeft om vanaf het detonatiecentrum een bepaalde plaats te bereiken wordt aangeduid met de aankomsttijd t_a . De tijd na het passeren van het schokfront dat er overdruk heerst, heet de positieve faseduur t_d . De positieve faseduur bepaalt de tijdsduur dat de blastgolf een object belast. De tijd na de positieve faseduur dat er onderdruk heerst wordt de negatieve faseduur genoemd. Deze negatieve faseduur heeft een minder grote uitwerking, dit komt omdat deze in tegenstelling tot de positieve faseduur geleidelijk wordt opgebouwd en omdat de maximale onderdruk vaak veel kleiner is dan de piekoverdruk. Er zijn meerdere manieren om de schokgolfparameters te bepalen, analytisch en grafisch, handmatig of met behulp van computersoftware.

De statische overdruk kan analytisch worden bepaald met de benadering van Brode (1955) [2]:

$$p_s = \begin{cases} \frac{6,7}{Z^3} + 1 & [\text{bar}] \text{ als } p_s > 10 \text{ bar} \\ \frac{0,975}{Z} + \frac{1,455}{Z^2} + \frac{5,85}{Z^3} - 0,019 & [\text{bar}] \text{ als } 0,1 < p_s < 10 \text{ bar} \end{cases} \quad (1)$$

Hierin is Z de geschaalde afstand die is gedefinieerd als:

$$Z = \frac{R}{\sqrt[3]{W}} \left[\frac{\text{m}}{\text{kg}^{1/3}} \right] \quad (2)$$

Hierin is R de afstand tot het explosiecentrum en W is de ladingmassa in TNT equivalenten.

De grafische manier wordt uitgevoerd door de parameters af te lezen uit grafieken zoals de grafieken uit [2], bij deze grafieken worden de parameters afgelezen met behulp van de geschaalde afstand.

Het oppervlak onder de druk-tijd curve tijdens de positieve fase is gedefinieerd als de positieve specifieke impuls. Omdat de tijdsduur waarin een object blootgesteld wordt aan een druk zeer bepalend kan zijn voor de reactie van het belaste object is de impuls net als de piekoverdruk een belangrijke karakteristiek. Analytisch kan deze specifieke positieve impuls worden beschreven als:

$$i = \int_{t_a}^{t_a+t_+} p_s(t) dt \text{ [Pa} \cdot \text{s]} \quad (3)$$

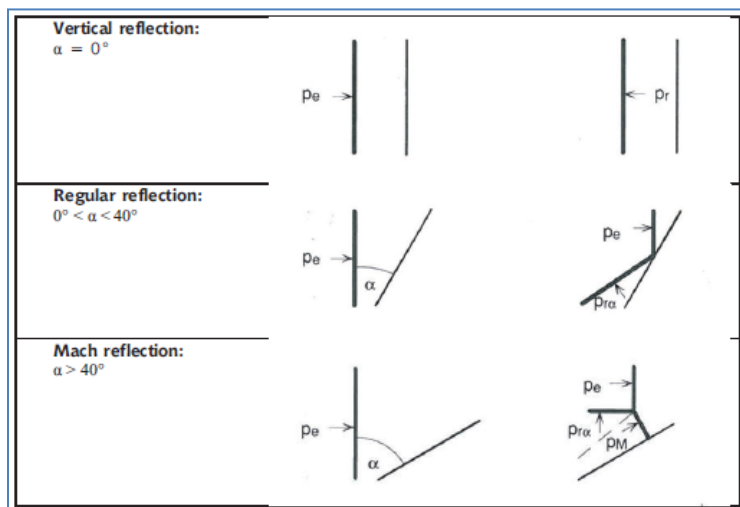
Een softwaretoepassing voor het bepalen van schokgolfparameters is ConWep. Het programma maakt gebruik van het model van Kingery Bulmash. Dit programma wordt in dit onderzoek gebruikt om de druk en impuls te bepalen.

2.1.3. Reflectie

Als een schokgolf een object raakt is het van belang om de richting te bekijken onder welke hoek de schokgolf het object raakt. In de literatuur worden er doorgaans drie mogelijkheden beschouwd, namelijk:

- Reflectie loodrecht op het object.
- Reflectie waarbij de hoek waaronder de schokgolf op het object invalt kleiner is dan 40° .
- Reflectie waarbij de hoek van inval groter is dan 40° , de zogenaamde Mach reflectie.

Deze vormen van reflectie zijn opgenomen in figuur 2 en worden hieronder beschreven.

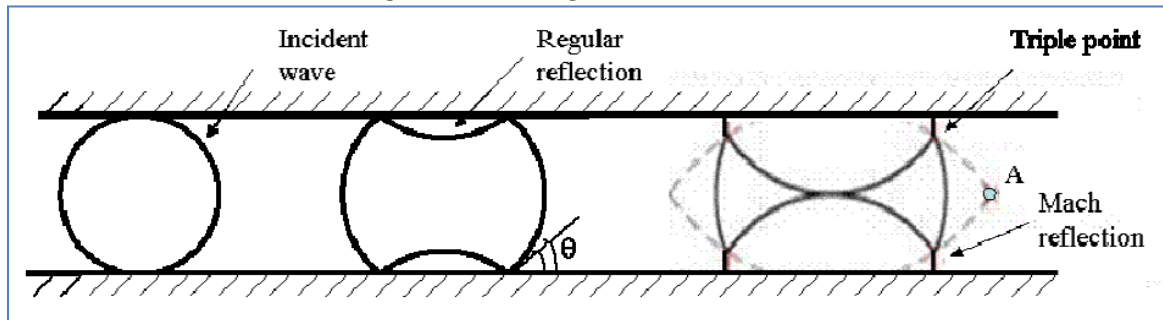


Figuur 2: Reflectiehoeken bij detonatiegolven [11].

Bij de eerste vorm van bovengenoemde reflecties valt de schokgolf loodrecht op het object. De schokgolf, die na de piekoverdruk nog steeds blijft invallen, drukt zich dan als het ware samen tegen het object waardoor een nog grotere druk ontstaat. Dit wordt aangeduid als de gereflecteerde piekoverdruk (p_r).

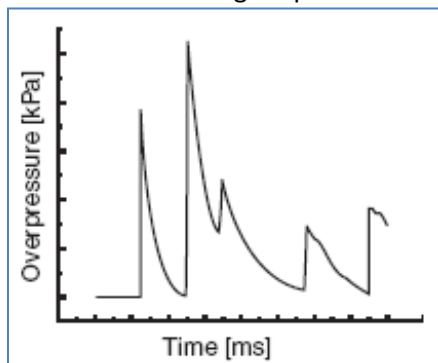
De tweede vorm van reflectie beschrijft de reflectie waarbij de schokgolf onder een hoek invalt die kleiner is dan 40° . Bij deze zogenaamde reguliere reflectie wordt de schokgolf gereflecteerd waarbij een gereflecteerde schokgolf ontstaat. Deze zal gescheiden blijven van de invallende schokgolf, beide zullen zich zelfstandig voortbewegen.

Bij een schokgolf die onder een hoek invalt van 40° of meer, waarbij de schokgolf dus als het ware steeds meer evenwijdig aan het object verplaatst zal er Mach reflectie plaatsvinden [11]. Figuur 3 toont de theoretische ontwikkeling van een schokgolf in een tunnel.



Figuur 3: Theoretische ontwikkeling van een schokgolf in een tunnel [14].

Bij Mach reflectie wordt de invallende schokgolf weerkaatst waarna de gereflecteerde schokgolf achter de invallende schokgolf aan zal bewegen. Omdat de lucht waardoor deze gereflecteerde schokgolf zich voortbeweegt al is opgewarmd en samengedrukt door de invallende schokgolf, zal deze zich sneller voortbewegen en onder bepaalde omstandigheden overgaan in het schokfront. Het punt waar deze golven samenkomen, zal zich van het object af verplaatsen en wordt het Triple Point genoemd. Het gecombineerde schokfront wordt aangeduid als de Mach stam. Dit samengesteld schokfront kent een hogere piekoverdruk dan de invallende schokgolf [3], zoals afgebeeld in figuur 4.



Figuur 4: Typische druk - tijd profiel voor een gereflecteerde schokgolf in gesloten ruimtes [13].

Voor de relatie tussen invallende piekoverdruk en gereflecteerde piekoverdruk is door Rankine en Hugoniot de volgende vergelijking afgeleid:

$$p_r = 2 \cdot p_s + (\gamma + 1) \cdot q_s = 2 \cdot p_s \cdot \left(\frac{7 \cdot p_0 + 4 \cdot p_s}{7 \cdot p_0 + p_s} \right) \quad (4)$$

Bij gebruikmaking van deze vergelijking worden bij het bepalen van de ratio tussen de gereflecteerde en de invallende overdruk waarden gevonden tussen de 2 en 8. In de praktijk zijn echter waarden gevonden tot 20, dit wordt toegeschreven aan het feit dat door dissociatie effecten het gas zich niet meer volgens de ideale gaswet gedraagt.

2.2. Tunnels

Bij een detonatie in of voor een tunnel verplaatst de schokgolf zich door een afgesloten ruimte. Dit heeft gevolgen voor de richting waarin de schokgolf zich kan uitbreiden en voor de overige optredende effecten zoals de luchtdruk, gasvorming en temperatuurstijging. Een ander effect van een tunnel is dat de reflectie, zoals beschreven in de vorige paragraaf, zeer moeilijk te voorspellen is. Dit kan alleen nog gedaan worden met uitgebreide numerieke rekenprogramma's.

In het geval dat een schokgolf wordt opgesloten in een ruimte ontstaat er een zeer complexe situatie. De schokgolf kan zich in een dergelijke situatie slechts over één as uitbreiden. Dit wordt daarom een 1D situatie genoemd. Een 3D situatie is een detonatie in het vrij veld waarbij de

schokgolf over drie assen kan uitbreiden. Een voorbeeld van een 2D situatie is een detonatie in een smalle straat, hierbij kan de schokgolf slechts in de lengte van de straat en omhoog uitbreiden. Een manier om de schokgolfparameters te berekenen, bij een situatie waarbij een schokgolf door een tunnel verplaatst, is de Equivalent Volume Approach (EVA).

2.2.1. Equivalent Volume Approach

In het voorgaande deel is telkens gekeken naar een sferische of hemisferische detonatie in het open veld. Hiermee wordt bedoeld dat de schokgolf ongehinderd het doel bereikt. In de paragraaf over reflecties is behandeld wat er gebeurt als de schokgolf geheel of gedeeltelijk reflecteert. Wanneer de schokgolf zich door een ronde tunnel verplaatst is er sprake van een bijzondere situatie. Ten eerste zorgt een tunnel in het algemeen voor een versterking van de schokgolf doordat de schokgolf zich nog maar over een as kan verplaatsen. Dit wordt de 1D situatie genoemd. Ten tweede is het reflecterende oppervlak niet vlak. Dit heeft tot gevolg dat de reflecties alle kanten op breken [14]. Dit maakt het moeilijk om berekeningen uit te voeren aan detonaties die (gedeeltelijk) door een tunnel gaan.

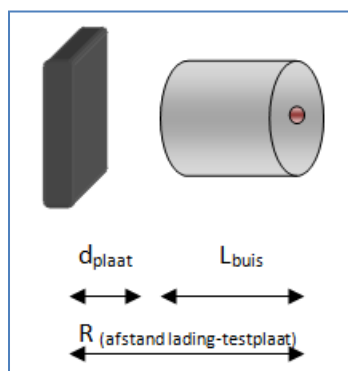
Een manier om berekeningen uit te voeren aan detonaties waarvan de schokgolf door een tunnel gaat komt uit het werk van Borgers [3,4,5,6 en 7]. De methode wordt aangeduid als de Equivalent Volume Approach (EVA) en is uitgebreid beschreven in [5]. In de navolgende paragraaf wordt uitgelegd hoe deze methode in dit onderzoek wordt toegepast.

Als eerste wordt beschreven hoe de parameters van een lading die in de tunnelingang is geplaatst worden berekend. Vervolgens worden de schokgolfparameters van een lading die voor de tunnelingang wordt geplaatst berekend. De EVA methode wordt gebruikt om de resultaten van de proeven te voorspellen en als theoretisch kader om de resultaten te evalueren.

Een tweede manier om de schokgolfparameters te kunnen voorspellen van een schokgolf die zich door een tunnel verplaatst is het programma ConWep. In deze softwaretoepassing is een module opgenomen die de schokgolfparameters van een dergelijke detonatie kan voorspellen. Deze module is niet gebruikt in het onderzoek omdat deze module van het programma als onnauwkeurig wordt aangemerkt [4]. Bovendien geeft deze module alleen een waarde voor de druk en niet voor de impuls.

2.2.2. Lading in de tunnelingang

Indien de lading in de tunnelingang is geplaatst zal de helft van de energie van de lading zich van de tunnel af bewegen. De andere helft van de energie die als bol wordt geschematiseerd zal de tunnel in gaan. Dit betekent dat de helft van het volume van de bol door het volume van de tunnel gaat. De schematisering hiervan is weergegeven in figuur 5, hierin zijn ook de gebruikte symbolen aangegeven.



Figuur 5: Lading in de tunnelingang

Belangrijk voor de bepaling van de schokgolffparameters in het EVA model zijn:

- R_{1D} = de lengte van de tunnel, hier $d_{\text{plaat}} + L_{\text{buis}}$.
- W = Het ladinggewicht in TNT equivalent.
- A_{tun} = De oppervlakte van de tunneldoorsnede.

Omdat het model geen rekening houdt met een afstand tussen de tunnel en de plaat worden deze hier samen als tunnallengte aangehouden.

In de EVA methode wordt de equivalente straal (R_{eq}) bepaald met:

$$R_{eq} = \sqrt[3]{\frac{3}{2\pi} \cdot R_{1D} \cdot A_{tun}} [m] \quad (5)$$

Om de lading om te schalen naar een situatie in de tunnel wordt het ladinggewicht in 1D berekend, dit kan worden uitgelegd als het ladinggewicht per oppervlak van de tunneldoorsnede:

$$W_{1D} = \frac{W}{A} [kg/m^2] \quad (6)$$

Met deze equivalente straal en het ladinggewicht in 1D wordt de geschaalde afstand (Z_{eq}) bepaald.

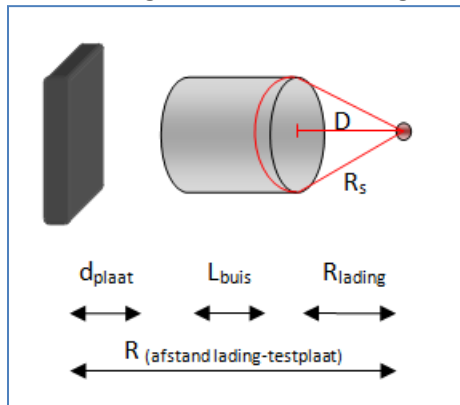
$$Z_{eq} = \frac{R_{eq}}{W_{eq}^{1/3}} = \sqrt[3]{\frac{3R_{1D}}{2\pi W_{1D}}} [m^3/kg] \quad (7)$$

Dit moet apart worden gedaan voor de druk en voor de impuls omdat voor beiden een andere waarde voor de TNT equivalentie is aangehouden.

De equivalente straal en het ladinggewicht kunnen worden ingevoerd in het programma ConWep om de piekoverdruk te vinden.

2.2.3. Lading voor de tunnelingang

Bij een lading die voor de tunnelingang en dus buiten de tunnel wordt geplaatst gaat slechts een bepaald deel van de energie van de lading de tunnel in. Dit deel kan worden geschematiseerd met een kegel. De basis van deze kegel bestaat uit het deel van de bol dat de tunnel ingaat. De basis van de kegel is hierdoor bolvormig. De schematisering is afgebeeld in figuur 6 met de hierbij horende symbolen. De dimensies van de kegel kunnen worden bepaald en hiermee kan het volume van de kegel worden berekend. Door het ladinggewicht van dit volume te bepalen is er een lading gevonden die de tunnel ingaat. Deze benadering wordt het gereduceerd ladinggewicht genoemd.



Figuur 6: Lading voor de tunnelingang.

De belangrijkste parameters voor de bepaling van de schokgolffparameters in deze situatie zijn:

- D = afstand van de lading tot de tunnelingang, hier gelijk aan R_{lading} .
- R_s = afstand van de lading tot de tunnelrand (de lengte van de zijde van de kegel).
- R_t = radius van de tunnel.

Als eerste wordt de lengte van R_s bepaald.

$$R_s = \sqrt{R_t^2 + D^2} [m] \quad (8)$$

Door het volume van de kegel te bepalen en hiervoor een ratio te bepalen ten opzichte van het originele ladinggewicht wordt het gereduceerde gewicht gevonden. Hiervoor wordt de volgende vergelijking toegepast:

$$W_r = W_{3D} \cdot \left(1 - \frac{D}{R_S}\right) = W_{3D} \cdot \left(1 - \frac{D}{\sqrt{R_t^2 + D^2}}\right) [\text{kg}] \quad (9)$$

Dit gereduceerd ladinggewicht kan nu worden gebruikt als lading in de tunnelingang zoals deze in de vorige paragraaf behandeld is. Belangrijk is hierbij dat het gereduceerde ladinggewicht nog omgerekend moet worden naar W_{1D} .

Het gereduceerde ladinggewicht moet, voordat deze wordt ingevoerd in vergelijking (7), worden gedeeld door de oppervlakte van de tunneldoorsnede. Hiermee wordt de geschaalde afstand berekend die bijvoorbeeld in de grafieken van Baker [2] kan worden gebruikt om de schokgolffparameters op te zoeken.

Met het invoeren van het gereduceerd ladinggewicht in vergelijking (6) wordt het ladinggewicht gevonden dat samen met equivalente straal gebruikt kan worden om de piekoverdruk op te zoeken in bijvoorbeeld ConWep.

2.2.4. Impuls

Na het doorlopen van de voorgaande paragrafen is de geschaalde afstand bekend. Hiermee kan de piekoverdruk worden opgezocht met behulp van de grafieken van Baker. Ook de impuls kan op deze manier worden opgezocht. Deze geschaalde impuls geldt echter in een 3D situatie, om deze toe te kunnen passen in dit onderzoek moet deze impuls omgeschaald worden naar de 1D situatie.

Bij het gebruik van ConWep moet er een aanvullende stap worden gemaakt om de impuls te vinden. Bij de geschaalde afstand in Baker vindt men namelijk een geschaalde impuls. Deze wordt vermenigvuldigd met het ladinggewicht om de optredende impuls te vinden. Bij het gebruiken van ConWep wordt de equivalente afstand ingevoerd in combinatie met het ladinggewicht. Dit is een optredende impuls in de fictieve 3D situatie. ConWep heeft deze intern al omgeschaald waardoor er teruggeschaald moet worden voordat de EVA schaalfactor kan worden toegepast. Om de met ConWep bepaalde impuls terug te schalen naar de 'scaled impulse' volgt:

$$\hat{i} = \frac{i}{\sqrt[3]{W}} \left[\frac{\text{Pa} \cdot \text{s}}{\text{kg}^{1/3}} \right] \quad (10)$$

Hiermee kan de geschaalde impuls in 1D worden bepaald met behulp van de EVA methode. De geschaalde impuls wordt vermenigvuldigd met de EVA schaalfactor. De EVA schaalfactor voor de 1D situatie wordt bepaald door:

$$\Gamma_{EVA,1D} = \frac{A_{sph}}{2 \cdot A_{tun}} \cdot \frac{W_{sph}^{1/3}}{W_{1D}} = 2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{\frac{3}{2\pi} R_{1D}}{W_{1D}} \right)^{2/3} [-] \quad (11)$$

De geschaalde impuls wordt dan:

$$\hat{i}_s^{EVA} = \hat{i} \cdot \Gamma_{EVA} \left[\frac{\text{Pa} \cdot \text{s}}{\text{kg}^{1/3}} \right] \quad (8)$$

De optredende impuls wordt dan:

$$i_s = \hat{i}_s^{EVA} \cdot W_{1D} [\text{Pa} \cdot \text{s}] \quad (9)$$

3. Experimenteel onderzoek

Om een onderzoek te kunnen doen naar de wijze waarop een tunnel de druk en impuls ten gevolge van een detonatie kan beïnvloeden is een proefopstelling nodig. De gebruikte opstelling en de totstandkoming hiervan worden beschreven in de eerste paragraaf. In de tweede paragraaf wordt een prognose gemaakt van de resultaten. Deze prognose is gebruikt om te voorspellen aan welke belastingen de constructie en meetapparatuur wordt blootgesteld en zal in het volgende hoofdstuk in de analyse worden gebruikt. In de derde paragraaf wordt de uitvoering van de proeven beschreven en de bijzonderheden die hierbij zijn geconstateerd. Uiteindelijk wordt in de laatste paragraaf de verwerking van de meetgegevens beschreven en verantwoord.

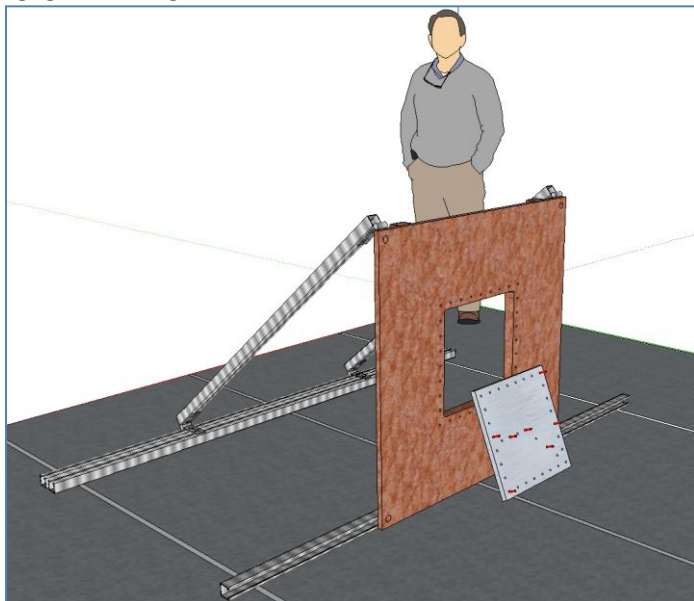
3.1. De testopstelling.

Een belangrijke vraag in dit onderzoek is de vraag of, en hoe, een tunnelconstructie geïntegreerd kan worden in de bestaande opstelling. Om de toepassing van een tunnel in de bestaande opstelling en de gevolgen hiervan voor de optredende schokgolfparameters te onderzoeken wordt in de komende paragrafen beschreven hoe het ontwerp van de nieuwe testopstelling tot stand is gekomen. Het ontwerp van de opstelling begint met een analyse van de testopstelling die al in het laboratorium aanwezig is. Vervolgens worden de uitgangspunten en de te beproeven variabelen vastgelegd. Met deze informatie kan een ontwerp worden gemaakt voor een proefopstelling en kan de meetapparatuur worden geselecteerd.

3.1.1. Analyse van de bestaande testopstelling.

De bestaande opstelling is in het verleden gebruikt om de vervorming van plaatmateriaal te onderzoeken en vast te leggen. Parallel aan het huidige onderzoek loopt een onderzoek van de Universiteit Gent waarbij de opstelling gebruikt wordt voor de beproeving van glazen panelen. Voor dit onderzoek zijn op 1 oktober 2013 testen gedaan op een massieve plaat. Deze testen vormen een goede basis voor het onderzoek naar de blast tube en zijn daarom geanalyseerd. Allereerst wordt de opstelling zoals deze aanwezig is in het laboratorium beschreven. Vervolgens wordt beschreven hoe de testdata is geanalyseerd en tot slot worden de resultaten geëvalueerd.

De bestaande opstelling in het Laboratorium voor het Onderzoek naar Explosie Effecten is weergegeven in figuur 7.



Figuur 7: Impressie van de bestaande opstelling.

Figuur 9: Achteraanzicht testplaat

Figuur 10: Dimensies testplaat.

Bachelor Eindonderzoek "Blast Tube", NLDA/KMS

3.1.2. Uitgangspunten bij het ontwerp van de nieuwe testopstelling

Om de nieuwe testopstelling te kunnen bouwen moet er een ontwerp gemaakt worden. Aan de hand van dit ontwerp kunnen materialen worden verworven en kan de testopstelling in elkaar worden gezet. Bij het maken van het ontwerp wordt rekening gehouden met de uitgangspunten waaraan de opstelling moet voldoen. Uitgangspunten worden hier beschouwd als zaken die door het project als basis moeten worden meegenomen. Bij dit ontwerp liggen een aantal zaken vooraf vast, hierdoor wordt het ontwerp beperkt omdat bepaalde ontwerpmogelijkheden niet toegepast kunnen worden. Een voordeel hiervan is dat het ontwerpen van de testopstelling snel kan verlopen. Om te voorkomen dat door deze snelheid belangrijke zaken over het hoofd worden gezien, worden de uitgangspunten voor de testopstelling opgesomd in tabel 2. In de linker kolom worden hierbij de uitgangspunten opgesomd en in de rechter kolom de hierbij onderkende aandachtspunten.

Tabel 2: Uitgangspunten bij het ontwerp van de proefopstelling.

Uitgangspunten	Aandachtspunten
De testopstelling wordt gemaakt met de op het departement beschikbare buis.	Controleren materiaal op consistentie. Buis is een PP buis, inwendige diameter 500mm, wanddikte 12,3mm
De nieuwe opstelling is een module die voor de bestaande opstelling kan worden geplaatst.	Tunnel moet eenvoudig aan te brengen en te verwijderen zijn voor de oude opstelling. Tunnel moet eventueel zonder de opstelling te gebruiken zijn.
De ondersteunende constructie wordt gemaakt met behulp van de al eerder in het lab toegepaste componenten.	Bouwelementen worden uit de UNISTRUT-catalogus gekozen om de interoperabiliteit met de overige testopstelling te bevorderen.
Onderzoek sluit aan bij lopende (numerieke) onderzoeken op de KMS.	Testen zo opzetten dat data uitwisseling mogelijk is. Dezelfde sensoren toepassen.

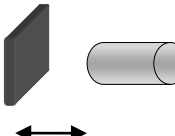
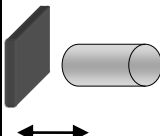
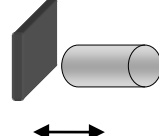
3.1.3. Analyse van de variabelen die invloed uitoefenen op de blastparameters.

Om de proefopstelling zo te ontwerpen dat de invloed van variabelen kan worden onderzocht moeten deze variabelen onderkend worden. Na het onderkennen en vastleggen van deze variabelen kan de proefopstelling zo worden ontworpen dat de invloed van buitenaf geminimaliseerd wordt.

De variabelen die mogelijk invloed hebben op de schokgolfparameters zijn:

- Soort lading;
- Gewicht lading;
- Vorm van de lading;
- Plaats van de lading;
- Achterzijde tunnel;
- Lengte buis;
- Afstand t.o.v. plaat.
- De oriëntatie van de ontsteker.

Deze opsomming is weergegeven in figuur 11 in de vorm van een morfologische kaart. Deze kaart is ingevuld met mogelijkheden die in de proefopstelling kunnen worden toegepast. De donker gearceerde vlakken zijn mogelijkheden die zijn afgevalen tijdens de voorbereiding van de proeven. De variabelen in de lichte vlakken zullen worden uitgewerkt binnen dit onderzoek.

Variaties in de testopstelling				
Morfologische kaart voor het bepalen van de optimale testconfiguratie	Soort lading			
		slagsnoer		C-4
	Gewicht lading			
		Gewicht lading		
	Vorm van de lading			
		sferisch		lijnvormig
	Plaats van de lading			
		buiten buis	in ingang	in buis
	Oriëntatie ontsteker			
		Naar plaat	Van plaat	Evenwijdig aan plaat
	Achterzijde buis			
		open		gesloten
	Lengte buis			
		L/D=0.5		L/D=1.0
	Afstand t.o.v. plaat			
		R = 0,10m	R = 0,05m	R = 0,02m
				(R = 0)

Figuur 11: Parameters proefopstelling (morfologisch).

Het type lading dat wordt gebruikt heeft invloed op de schokgolffparameters omdat elk type springstof zijn eigen eigenschappen heeft. De invloed kan worden gecontroleerd door het toepassen van TNT equivalentie waardoor elke soort springstof dezelfde resultaten moet geven. Andere typen springstof dan slagsnoer en kneedspringstof worden buiten beschouwing gelaten omdat deze niet beschikbaar zijn voor dit onderzoek. De reden om kneedspringstof te gebruiken is dat het onderzoeken van de vlakheid van de schokgolf geen hoofddoel is van dit onderzoek. Kneedspringstof is makkelijker te gebruiken in kleine hoeveelheden en de exacte lading kan makkelijker worden gecontroleerd dan bij slagsnoer. Bij slagsnoer kan na het snijden altijd lading verloren gaan nadat de uiteinden open zijn gesneden. Daarbij is er behalve springstof een relatief grote hoeveelheid

verpakkingsmateriaal aanwezig dat de uitwerking kan beïnvloeden. Om deze redenen wordt bij dit onderzoek gebruik gemaakt van composite 4, kneedbare explosieven.

Het gewicht van de lading heeft invloed omdat bij een te grote lading de drukken en de impulsen die op de plaat werken mogelijk te groot worden en de testplaat kunnen beschadigen. Daarbij komt het gevaar dat de tunnel beschadigd of vernietigd wordt waardoor er niet meer mee getest kan worden. Het ladinggewicht waarmee binnen dit onderzoek wordt gewerkt is 5 gram springstof exclusief ontsteker. Ladingen van 20 en 40 gram zullen worden gebruikt om de sterkte van de buis te beproeven.

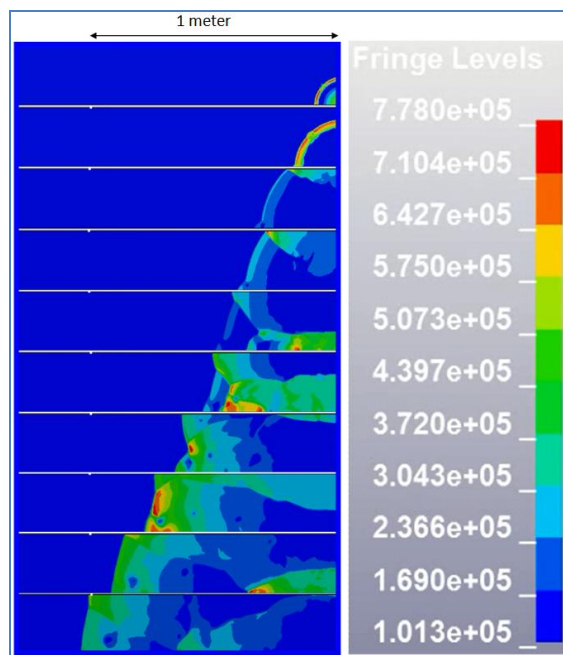
De vorm van de lading is van invloed omdat de uitwerking van een lijnvormige lading maar over twee assen kan uitbreiden, terwijl een sferische lading bolvormig (over drie assen) uitbreidt. Een sferische lading is makkelijker in lijn met het hart van de tunnel op te stellen waardoor de opstelling symmetrisch is. Bij een lijnvormige lading is het praktisch moeilijker om de lading in lijn met het hart van de tunnel en de middelste sensor te brengen. Bij dit onderzoek worden daarom alleen sferische ladingen toegepast.

De plaats van de lading kan oneindig worden gevarieerd. Ladingen in de tunnel worden niet beschouwd omdat aangenomen wordt dat de tunnallengte achter de lading weinig invloed en daardoor meerwaarde zal hebben op de resultaten. Er wordt in dit onderzoek gewerkt met ladingen in de tunnelingang en ladingen die 0,30meter voor de tunnelingang worden geplaatst.

De achterzijde van de buis kan open worden gelaten of kan worden afgesloten. Omdat bij het afsluiten van de buis de detonatiegassen nergens naar toe kunnen zal deze optie niet worden onderzocht in dit onderzoek. Er worden te grote drukken verwacht aan de achterzijde van de tunnel met schade aan de constructie tot gevolg. Bovendien kan de invallende piekoverdruk niet worden gemeten als de achterzijde van de tunnel wordt gesloten. De achterzijde van de buis wordt open gelaten bij alle proeven.

De lengte van de buis wordt onder andere bepaald door de lengte van de buis die voorradig is. Verder is onderzocht of de lengte van de tunnel bepaald kan worden door een afstand te berekenen waarbij de Machstamvorming in de tunnel in alle richtingen volledig is [1]. Door dit te simuleren in LS-Dyna is aangetoond dat de situatie in een ronde tunnel niet gelijk is aan datgene dat beschreven is in de onderzochte literatuur. Onderzoeker lt. Louar van het departement BOCO heeft hiervoor een simulatie gemaakt. Deze simulatie toont aan dat de relaties voor het optreden van een vlakke schokgolf voor de 2D situatie (nauwe straat) niet opgaan voor een situatie in 1D (tunnelbuis).

Van de simulatie zijn enkele fragmenten weergegeven in figuur 12. Hierin staan de fragmenten onder elkaar waarbij het blauwe vlak de bovenste helft van de tunnel voorstelt. De buis heeft een diameter die gelijk is aan buis die gebruikt moet worden in het onderzoek. In het bovenste fragment is te zien dat een lading detoneert in het midden van de tunnel (rechtsonder in de figuur). In de volgende fragmenten is gesimuleerd hoe de schokgolf zich in de tunnel voortplant. Dit toont aan dat de schokgolf in deze specifieke situatie na ongeveer één meter vlak zal zijn. De lengte van de buis wordt op basis hiervan bepaald op één meter en zal voor een aantal proeven worden ingekort tot de helft van deze lengte.



Figuur 12: Simulatie met LS-DYNA t.b.v. bepalen van de buislengte.

De afstand van de uitgang van de tunnel tot de testplaat zal als variabele worden behandeld. De reden hiervoor is dat de uitgangspunten dat de bestaande testopstelling en de beschikbare buis moeten worden gebruikt ervoor zorgen dat er een kier zal ontstaan tussen deze elementen. Indien deze elementen van hetzelfde materiaal waren gemaakt kon deze kier eenvoudig worden gedicht. Bij het berekenen van de voorspellingen wordt de aanname gedaan dat de buis doorloopt tot aan de testplaat. Deze aanname is noodzakelijk omdat de methode waarmee wordt gerekend geen rekening houdt met een tussenafstand. Om de berekeningen goed te kunnen verifiëren zijn proeven nodig zonder tussenafstand. In dit onderzoek wordt gewerkt met kieren van 2 centimeter, 5 centimeter en 10 centimeter. Ter controle van de voorspelde resultaten zullen proeven worden uitgevoerd waarbij de tussenafstand zo minimaal mogelijk wordt gemaakt.

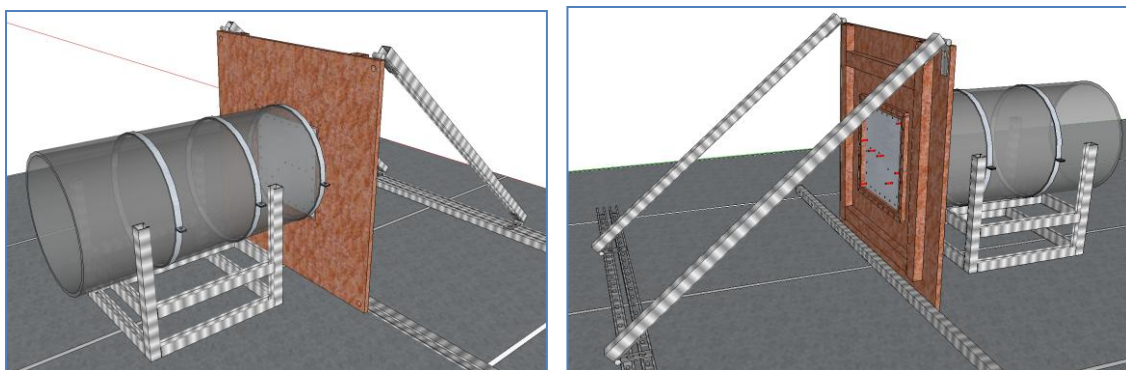
De oriëntatie van de ontsteker is van belang omdat de lading een puntvorm moet benaderen. De ontsteker steekt echter uit de lading. Dit is te zien in figuur 30 van paragraaf 3.3.1. De springstof in de ontsteker is hierdoor voor een deel buiten de springstofbol geplaatst. Hierdoor wordt de puntvormige bron en zelfs de bolvormige bron niet helemaal benaderd. Tijdens het onderzoek is hier geen oplossing voor gevonden en is de ontsteker consequent naar boven gericht. Een ander gevolg van de uitstekende ontsteker is dat de expanderende schokgolf niet volledig bolvormig is.

De variabelen waar dit onderzoek zich op zal richten zijn:

- De plaats van de lading;
- De lengte van de buis;
- De afstand tussen de uitgang van de buis en de testplaat.

3.1.4. Ontwerp van de proefopstelling

Door de uitgangspunten en de morfologische kaart uit te werken is bekend waar de opstelling aan moet voldoen. De informatie uit bovenstaande hulpmiddelen wordt gebruikt om een tekening van de proefopstelling te maken. Omdat een uitgangspunt is dat het materiaal uit de productcatalogus van UNISTRUT moet kunnen worden gemaakt wordt een materiaalstaat gemaakt op basis van deze producten. Het ontwerp van de proefopstelling is weergegeven in de figuren 13 en 14. De nieuwe opstelling is hierbij geïntegreerd in de oude opstelling.

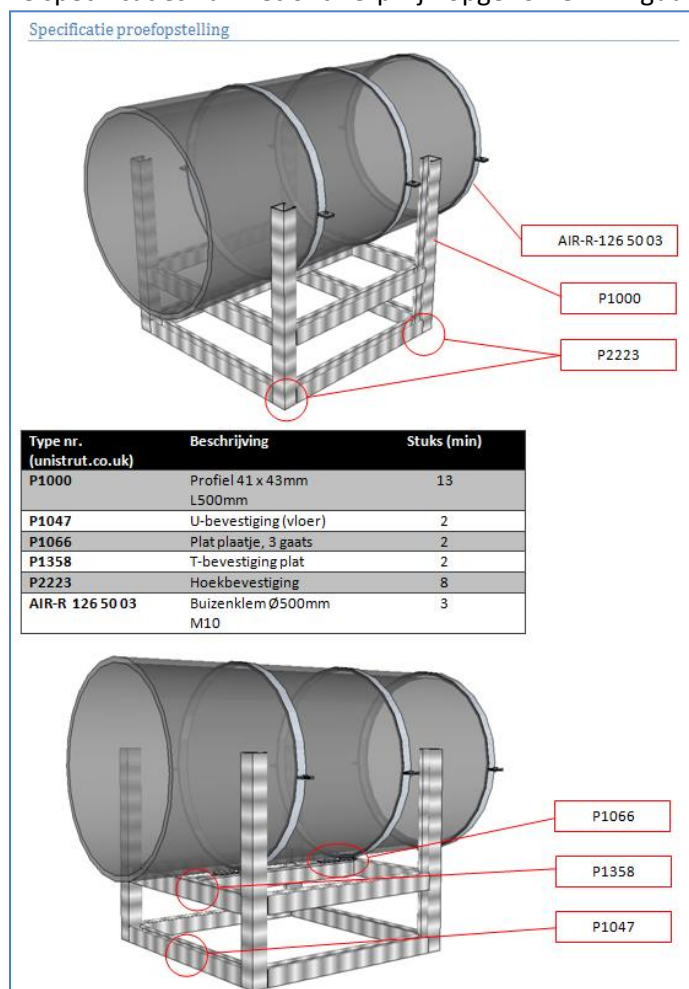


Figuur 13: Ontwerp proefopstelling, vooraanzicht. Figuur 14: Ontwerp proefopstelling, achteraanzicht.

De opstelling bestaat uit een frame dat er voor zorgt dat de tunnel met de hartlijn voor de middelste sensor van de testplaat is geplaatst. Dit frame dient voldoende stijf te zijn zodat er geen verplaatsing van de tunnel ten opzichte van de testplaat wordt toegelaten. De buis wordt aan het frame bevestigd door middel van buizenklemmen.

De tunnel is een polipropyleen buis met een diameter van 500 millimeter en een wanddikte van 12 millimeter. Dit materiaal is een thermoplastisch polymeer. De eigenschappen van dit materiaal zijn dat het goed bestand is tegen chemische inwerking en het goed bestand is tegen hitte in vergelijking met andere kunststoffen.

De specificaties van het ontwerp zijn opgenomen in figuur 15.



Figuur 15: Specificaties van de ontworpen proefopstelling.

3.1.5. De gebruikte opstelling

De proefopstelling die tijdens het onderzoek is toegepast wijkt af van de proefopstelling zoals deze ontworpen is in de vorige paragraaf. Door het ontbreken van onderdelen is besloten de opstelling te maken met de op dat moment aanwezige materialen. Het ontwerp van de proefopstelling is hierbij zo veel mogelijk aangehouden. Dat de opstelling met andere middelen gebouwd kan worden draagt bij aan de reproduceerbaarheid van de proeven.

Het frame is gebouwd met universele onderdelen. De balken zijn allen 0,5 meter lang en de bevestigingsmaterialen zijn standaard artikelen uit het assortiment van bovengenoemde firma. De bevestigingswijze van de balken onderling bestaat uit boutverbindingen. De bevestigingsmaterialen zijn gemaakt van stalen plaatjes waarin sparingen zijn aangebracht. Door middel van deze sparingen en standaard M10 bouten is het geheel aan elkaar te bevestigen.

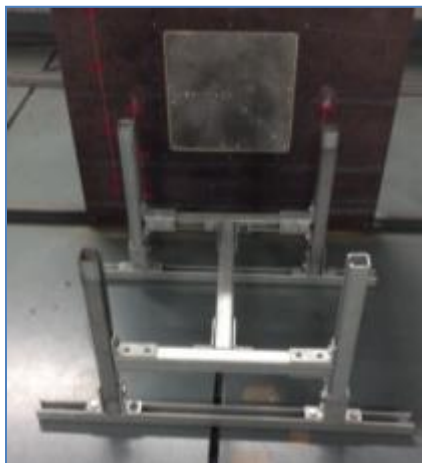
De polipropyleen buis, die als tunnel gaat dienen, is bevestigd met behulp van een spanband. Dit benadert de buizenklemmen die waren voorzien maar heeft twee nadelen:

1. De buis wordt door het aanspannen van de band vervormd tot een ovaal. Dit nadeel is niet opgelost tijdens de proefnemingen en heeft mogelijk invloed gehad op de resultaten.
2. Er is slechts een band geplaatst waardoor rotatie in het platte vlak mogelijk is. Het grootste deel van deze rotatiemogelijkheid wordt tegengegaan door de verticale balken die de buis inklemmen.

De opstelling is in twee fasen gebouwd waarbij na de eerste fase een test is uitgevoerd. Vervolgens is in de tweede fase de opstelling verbeterd en vormt zo de definitieve proefopstelling.

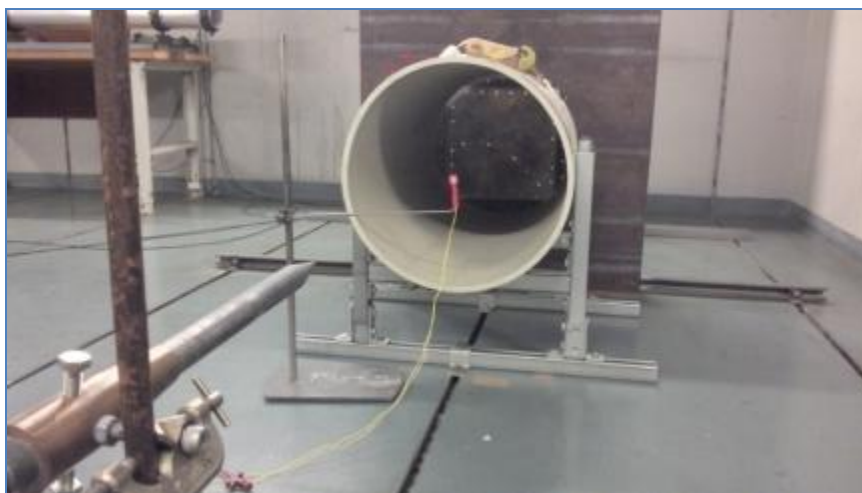
Eerste constructiefase

Bij het uitvoeren van experimenteel onderzoek is de betrouwbaarheid van de resultaten van groot belang. Om dit te garanderen is er naar gestreefd de proefopstelling dusdanig stijf te bouwen dat er geen speling op de buis kan ontstaan. De eerste constructie die is gebouwd bestaat uit twee poten die zijn verbonden met een balk. De balk ligt precies onder de hartlijn van de buis waardoor de constructie de krachten symmetrisch kan verwerken.



Figuur 16: Frame van de proefopstelling voor de test. Figuur 17: Frame van de proefopstelling voor de test.

In figuur 16 en figuur 17 zijn twee foto's afgebeeld waarin het frame van de proefopstelling voorafgaand aan de test is te zien. In deze foto's is de buis die als tunnel gaat dienen nog niet geplaatst en is de constructie nog niet aan de vloer bevestigd. Om de lading op de gewenste positie te plaatsen is een statief gebruikt met een ijzeren staafje als arm. Eenzelfde statief is toegepast om de blastpencil te plaatsen. Figuur 18 toont de volledige opstelling voor de uitvoering van de test.



Figuur 18: Proefopstelling voor de test.

Er is een test uitgevoerd voordat met de proeven is begonnen. Bij de test is een lading van 5 gram C-4 aangebracht op dezelfde manier zoals de ladingen bij de proeven worden aangebracht.

De belangrijkste observatie na het uitvoeren van de test is dat de buis relatief onbeschadigd is. Er is een hele kleine fragmentatieschade te zien in de onderzijde van de tunnelingang. De constructie is verschoven ten opzichte van de oorspronkelijke situatie. Na onderzoek van de opstelling wordt dit geweten aan de bevestigingspunten in de vloer en een mogelijke speling in het frame. Deze worden in de tweede constructiefase daarom verbeterd.

Tweede constructiefase

Na het testen van de proefopstelling is de bevestiging in de vloer vervangen omdat er beweging mogelijk was bij de bevestigingspunten. Aan het frame zijn twee balken toegevoegd in het grondvlak om het frame nog stijver te maken. Deze balken zijn goed te zien in figuur 19. Met deze opstelling wordt aan de proeven begonnen, na elke proef wordt de uitlijning van de buis gecontroleerd en er worden geen grote afwijkingen meer geconstateerd.



Figuur 19: Definitieve proefopstelling, zij aanzicht.

De opstelling zoals deze in de figuren 19 en 20 is afgebeeld is daarom in het verdere verloop van de proeven gebruikt. Wel is de buislengte tijdens de proefnemingen aangepast omdat enkele proeven met een halve buislengte worden uitgevoerd. Dit heeft geen gevolgen voor het frame.



Figuur 20: Definitieve proefopstelling, vooraanzicht.

3.1.6. Toegepaste meetapparatuur

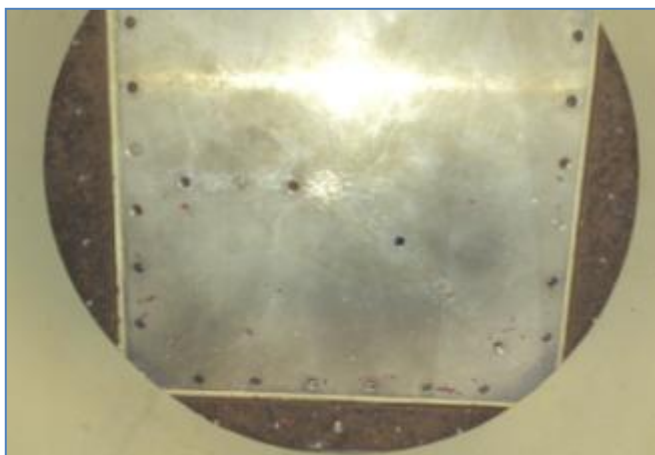
De proeven die worden uitgevoerd hebben als doel een onderzoeksvraag te beantwoorden. Hiervoor moeten enkele grootheden worden gemeten die als gevolg van de proef optreden. Om dit te bereiken wordt meetapparatuur gebruikt die de betreffende grootheden vastlegt. In dit deel van het rapport wordt de toegepaste apparatuur beschreven.

Gereflecteerde druk

De optredende gereflecteerde piekoverdruk wordt gemeten met druksensoren die in de plaat worden aangebracht. Er worden twee verschillende type druksensoren aangebracht omdat er niet genoeg sensoren van hetzelfde type voorhanden zijn. De toegepaste druksensoren zijn ICP dynamische druksensoren van de firma PCB Piezotronics. De twee toegepaste modellen zijn de 102B15 en de 102B04. De sensoren hebben beiden een maximaal bereik van 6895kPa. Een van deze sensoren is afgebeeld in figuur 21. De specificaties van de gebruikte sensoren zijn opgenomen in bijlage 5.



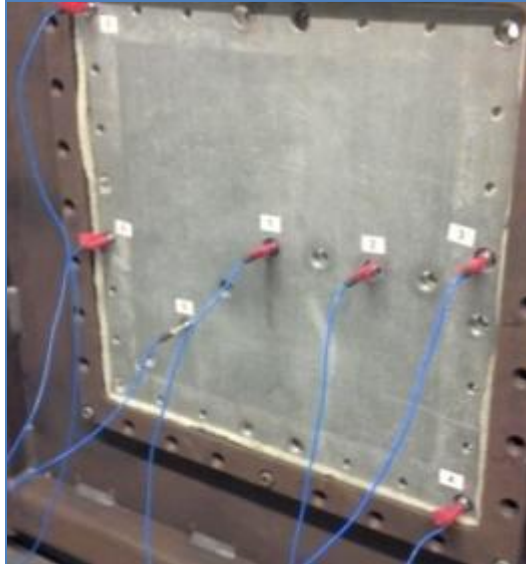
Figuur 21: Druksensor.



Figuur 22: Sensoren geplaatst in de plaat gezien vanuit de buis.

De twee toegepaste type sensoren hebben een verschillende gevoeligheid. De meest gevoelige sensoren zijn in het centrum van de plaat aangebracht. De sensoren 1t/m 5 zijn de gevoelige sensoren. De sensoren 6 en 7 zijn de minder gevoelige sensoren. In de beschrijving van de proeven is aangegeven wanneer de sensoren zijn gewisseld. De geplaatste sensoren zijn afgebeeld in figuur 22 en 23.

Omdat er is gestreefd naar dezelfde plaats van de sensoren als bij de eerdere proeven en de proeven van Sam van Dam in het bijzonder zijn twee sensoren niet effectief geplaatst. De sensoren 4 en 7 vallen net buiten de diameter van de buis. Voor sensor 7 is dit te zien in figuur 24. Omdat de gegevens van deze sensor mogelijk gebruikt kunnen worden bij een ander (bijvoorbeeld aanvullend of numeriek) onderzoek wordt besloten de sensoren niet te verplaatsen.



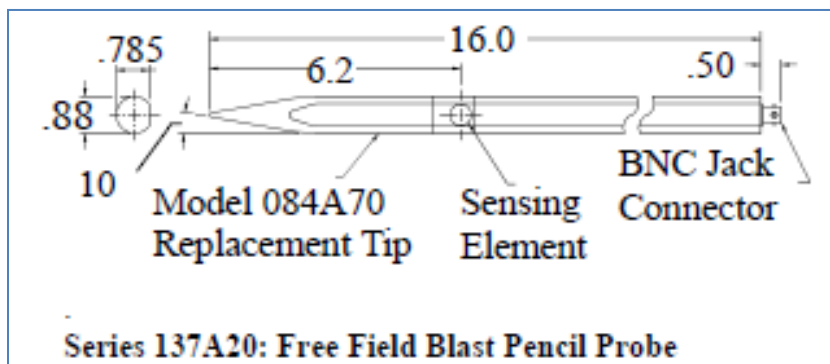
Figuur 23: Sensoren in de testplaat



Figuur 24: Sensor 7 buiten de tunnel diameter.

Invallende piekoverdruk

De invallende piekoverdruk wordt gemeten door in het hart van de proefopstelling een blastpencil te plaatsen op dezelfde afstand tot de lading als de middelste sensor in de testplaat. Een blastpencil is een stalen pen waar een druksensor in is geplaatst die haaks op de verwachte verplaatsingsrichting van de schokgolf de druk meet. Op deze manier wordt de druk gemeten van de passerende schokgolf. Een tekening van de gebruikte blastpencil is opgenomen in figuur 25.



Figuur 25: Schematische weergave van de gebruikte blastpencil.

De gebruikte blastpencil is model 137A23 van PCB Piezotronics. De maximale druk is eveneens 6895 kPa. De specificaties van deze sensor zijn opgenomen in Bijlage 5.

Versterker en signaal versterker

Door een versterker wordt een stroom naar de sensoren gestuurd en weer opgevangen. De sensor vervormt dit signaal waarna het wordt opgevangen en verwerkt door een signaalverwerker. De gebruikte apparatuur is afgebeeld in figuur 26.



Figuur 26: Meetapparatuur.

Nadat het signaal is verwerkt wordt het in een .txt file opgeslagen dat wordt gebruikt bij de analyse van de proeven. Een beschrijving van deze analyse volgt in paragraaf 3.4.

3.2. Voorspelling van de proefresultaten

Om een aantal redenen zijn de verwachte schokgolfparameters van de uitgevoerde proeven vooraf analytisch berekend. Eén reden is om na te gaan hoe groot de drukken zijn die zullen optreden bij de proeven. Met deze gegevens kan worden nagegaan of de testopzet bestand is tegen de drukken en of de proeven veilig op de testlocatie kunnen worden uitgevoerd onder de lokale omstandigheden. De tweede reden is dat de toegepaste sensoren worden geselecteerd op basis van hun gevoeligheid en de verwachte drukken. Een derde reden om de schokgolfparameters vooraf te berekenen is de mogelijkheid deze te vergelijken met de testresultaten, hetgeen zal worden gedaan in het volgende hoofdstuk. In deze paragraaf wordt beschreven hoe de schokgolfparameters vooraf zijn berekend en welke resultaten dit oplevert. Bij alle berekeningen wordt aangenomen dat de tunnel doorloopt tot aan de testplaat. De afstand tussen de tunnel en de testplaat wordt hierdoor aangenomen als tunnel.

3.2.1. Proefprogramma

Het proefprogramma is opgenomen in tabel 3 op de volgende pagina. Dit programma geeft aan in welke volgorde en hoe vaak de proeven worden uitgevoerd. In de tabel staan hierbij de relevante maten voor de berekeningen vermeld. Een beschrijving van de proefopstelling van alle proeven is opgenomen in Bijlage 1.

Tabel 3: Proefprogramma

Proef	$W_{(TNT)}$	d_{plaat}	L_{buis}	d_{lading}	R	aantal	totaal configuratie
nr	kg	m	m	m	m	-	-
1,2,3	0,006	0,05	1,00	0,00	1,05	3	24
4,5,6	0,006	0,05	1,00	0,30	1,35	3	
7,8,9	0,006	0,02	1,00	0,00	1,02	3	
10,11,12	0,006	0,02	1,00	0,30	1,32	3	
13,14,15	0,006	0,10	1,00	0,00	1,10	3	
16,17,18	0,006	0,10	1,00	0,30	1,40	3	
19,20,21	0,006	0,00	1,00	0,00	1,00	3	
22,23,24	0,006	0,00	1,00	0,30	1,30	3	
25,26,27	0,006	0,10	0,50	0,00	0,60	3	12
28,29,30	0,006	0,10	0,50	0,30	0,90	3	
31,32,33	0,006	0,00	0,50	0,00	0,50	3	
34,35,36	0,006	0,00	0,50	0,30	0,80	3	
37	0,005	0,00	0,00	0,00	1,10	1	4
38	0,005	0,00	0,00	0,00	1,40	1	
39	0,020	0,00	0,50	0,00	0,50	1	
40	0,040	0,00	0,50	0,00	0,50	1	
totaal aantal proeven:							40

Binnen het proefprogramma zijn drie verschillende categorieën proeven te onderscheiden waarvoor de schokgolffparameters worden bepaald. Deze drie categorieën zijn opgenomen in tabel 4. Hierin is ook aangegeven welke proeven tot welke categorie worden gerekend.

Tabel 4: Categorie indeling proeven

Categorie:	Proeven:
Sferische lading zonder tunnel	37,38
Sferische lading in tunnelingang	1-3,7-9,13-15,19-21,25-27,31-33,39,40
Sferische lading voor de tunnelingang	4-6,10-12,16-18,22-24,28-30,34-36

In de volgende drie paragrafen zal voor elke categorie worden uitgelegd hoe de schokgolffparameters worden bepaald aan de hand van een voorbeeld van een van de proeven uit de desbetreffende categorie.

3.2.2. Sferische lading zonder tunnel

De proeven 37 en 38 worden zonder tunnel uitgevoerd. Deze proefresultaten zijn relatief eenvoudig te voorspellen. De voorspelling van de overige proeven is gecompliceerder omdat bij deze proeven de tunnel wordt gebruikt. Deze worden in de volgende paragrafen uitgevoerd. In de navolgende stappen wordt de voorspelling voor proef 37 uitgewerkt.

Proef 37 wordt uitgevoerd met een sferische lading van 0,005 kg C-4. De afstand van het explosiecentrum tot de testplaat bedraagt 1,10 meter.

Allereerst wordt de TNT equivalentie van de springstof bepaald:

$$W_p = 0,005 * 1,37 = 0,00685 \text{ kg}$$

$$W_i = 0,005 * 1,19 = 0,00595 \text{ kg}$$

Omdat een elektrische ontsteker springstof bevat moet dit ladinggewicht in TNT-equivalentie worden opgeteld bij het ladinggewicht. Er wordt aangenomen dat voor een elektrische ontsteker een ladinggewicht kan worden aangenomen van 1 gram TNT equivalentie.

De TNT equivalentie van de gebruikte lading wordt dan:

$$W_p = 0,00685 + 0,001 = 0,00785 \text{ kg}$$

$$W_i = 0,00595 + 0,001 = 0,00695 \text{ kg}$$

Hiermee kan de geschaalde afstand worden uitgerekend:

$$Z_{3D,p} = \frac{R}{\sqrt[3]{W}} = \frac{1,1}{\sqrt[3]{0,00785}} = 5,54 \text{ m/kg}^{1/3}$$

$$Z_{3D,i} = \frac{R}{\sqrt[3]{W}} = \frac{1,1}{\sqrt[3]{0,00695}} = 5,76 \text{ m/kg}^{1/3}$$

Met het ladinggewicht en de afstand kunnen de druk en impuls worden bepaald met ConWep voor de 3D situatie zoals opgenomen in tabel 5:

Tabel 5: Voorspelling 3D.

Afstand	Ladinggewicht	Sensor 1				Sensor 8
		P _s	P _r	I _s	I _r	P _s
R _{eq}	W _{druk}	kPa	kPa	kPa msec	kPa msec	[kPa]
m	kg					
1,10	0,00785	26	58	7	14	26

3.2.3. Sferische lading in de tunnelingang

De berekening voor de proeven waarbij de tunnel wordt toegepast wordt uitgevoerd met de Equivalent Volume Approach. In deze paragraaf wordt de berekening uitgevoerd voor proef 13.

Proef 13 wordt uitgevoerd met een sferische lading in de ingang van de tunnel die 1,00 meter lang is. De lading is 0,005 kg C-4 exclusief de elektrische ontsteker. De afstand van het explosiecentrum tot de testplaat bedraagt 1,10 meter.

Om het ladinggewicht in de tunnel te kunnen toepassen moet dit ladinggewicht worden aangepast aan de 1D situatie, hiervoor wordt vergelijking (6) gebruikt:

$$W_{1D,p} = \frac{W}{A} = \frac{0,00785}{0,19635} = 0,0400 \text{ kg/m}^2$$

$$W_{1D,i} = \frac{W}{A} = \frac{0,00695}{0,19635} = 0,0354 \text{ kg/m}^2$$

Met behulp van vergelijking (5) wordt de equivalente straal bepaald:

$$R_{eq} = \sqrt[3]{\frac{3}{2\pi} \cdot R_{1D} \cdot A_{tun}} = \sqrt[3]{\frac{3}{2\pi} \cdot 1,1 \cdot 0,786} = 0,469 \text{ m}$$

De geschaalde afstand wordt vervolgens met vergelijking (7) bepaald:

$$Z_{eq,p} = \frac{R_{eq}}{W_{eq}^{1/3}} = \sqrt[3]{\frac{3R_{1D}}{2\pi W_{1D}}} = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot 1,1}{2 \cdot \pi \cdot 0,0400}} = 2,36 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$Z_{eq,i} = \frac{R_{eq}}{W_{eq}^{1/3}} = \sqrt[3]{\frac{3R_{1D}}{2\pi W_{1D}}} = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot 1,1}{2 \cdot \pi \cdot 0,0354}} = 2,46 \text{ m}^3/\text{kg}$$

In tabel 6 zijn de druk en impuls met het aangepaste ladinggewicht en de equivalente straal door middel van ConWep bepaald.

De impuls die in ConWep wordt gevonden wordt teruggeschaald met vergelijking (10):

$$\hat{i}_r = \frac{i_r}{\sqrt[3]{W}} = \frac{35,31}{\sqrt[3]{0,00695}} = 185,027 \frac{Pa \cdot s}{kg^{1/3}}$$

Om de gereflecteerde impuls te kunnen berekenen wordt met vergelijking (11) de EVA schaalfactor bepaald:

$$\Gamma_{EVA,1D} = 2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{\frac{3}{2\pi} \cdot R_{1D}}{W_{1D,i}} \right)^{2/3} = 2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{\frac{3}{2\pi} \cdot 1,02}{0,0354} \right)^{2/3} = 37,940$$

Nu kan de geschaalde impuls worden berekend met vergelijking (8):

$$\hat{i}_r^{EVA} = \hat{i}_r \cdot \Gamma_{EVA} = 185,027 \cdot 37,940 = 7019,93 \left[\frac{Pa \cdot s}{kg^{1/3}} \right]$$

De verwachte gereflecteerde impuls volgt dan uit vergelijking (10):

$$i_r = \hat{i}_r^{EVA} \cdot W_{1D} = 7019,93 \cdot 0,03540 = 249 [Pa \cdot s]$$

Tabel 6: Voorspelling 1D met lading in tunnelingang. EVA [5]

Afstand	Ladinggewicht	sensor 1				sensor 8
R _{eq}	W _{druk}	P _s	P _r	I _s	I _r	P _s
m	kg	kPa	kPa	kPa msec	kPa msec	[kPa]
0,469	0,00785	135	406	103	249	26

3.2.4. Sferische lading voor de tunnelingang

Een aantal proeven wordt uitgevoerd met ladingen die voor de tunnelingang worden geplaatst. De druk en impuls kunnen met de Equivalent Volume Approach [5] worden voorspeld indien een gereduceerd ladinggewicht wordt toegepast. In deze paragraaf zal proef 16 worden uitgewerkt. Proef 16 wordt uitgevoerd met een sferische lading 0,3 meter voor de ingang van de tunnel die 1,00 meter lang is. De lading is 0,005 kg C-4. De afstand van het explosiecentrum tot de testplaat bedraagt 1,40 meter.

Het gereduceerde gewicht wordt bepaald met vergelijking (9):

$$W_{r,p} = W_{3D} \cdot \left(1 - \frac{D}{R_S} \right) = W_{3D} \cdot \left(1 - \frac{D}{\sqrt{R_t^2 + D^2}} \right) = 0,00785 \cdot \left(1 - \frac{0,3}{\sqrt{0,5^2 + 0,3^2}} \right) = 0,0038 kg$$

$$W_{r,i} = W_{3D} \cdot \left(1 - \frac{D}{R_S} \right) = W_{3D} \cdot \left(1 - \frac{D}{\sqrt{R_t^2 + D^2}} \right) = 0,00695 \cdot \left(1 - \frac{0,3}{\sqrt{0,5^2 + 0,3^2}} \right) = 0,0034 kg$$

Met behulp van vergelijking (3) wordt dit ladinggewicht omgeschaald naar de 3D situatie:

$$W_{1D,p} = \frac{W}{A} = \frac{0,0038}{0,19635} = 0,0194 \frac{kg}{m^2}$$

$$W_{1D,i} = \frac{W}{A} = \frac{0,0034}{0,19635} = 0,0172 \frac{kg}{m^2}$$

Dit is het ladinggewicht dat de tunnel binnengaat. Nu kan de equivalente geschaalde afstand worden bepaald voor dit ladinggewicht in de tunnel:

$$Z_{eq,p} = \frac{R_{eq}}{W_{eq}^{1/3}} = \sqrt[3]{\frac{3R_{1D}}{2\pi W_{1D}}} = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot 1,1}{2 \cdot \pi \cdot 0,0194}} = 3,002 m^3/kg$$

$$Z_{eq,i} = \frac{R_{eq}}{W_{eq}^{1/3}} = \sqrt[3]{\frac{3R_{1D}}{2\pi W_{1D}}} = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot 1,1}{2 \cdot \pi \cdot 0,0148}} = 3,127 m^3/kg$$

Dit leidt tot de voorspelling in tabel 7. Hierin is met de equivalente straal en het gereduceerde ladinggewicht de bijbehorende druk en impuls bepaald met behulp van ConWep.

Tabel 7: Voorspelling 1D met lading buiten de tunnel. Equivalent Weight / EVA [5]

Afstand	Ladinggewicht	sensor 1				sensor 8
R_{eq}	W_{druk}		P_r	I_s	I_r	P_s
m	kg	kPa	kPa	kPa msec	kPa msec	[kPa]
0,469	0,00381	81	215	60	137	18

3.2.5. Voorspelling proefresultaten

In tabel 8 zijn alle voorspellingen opgenomen, deze zijn berekend met de methoden die in de vorige paragrafen zijn beschreven.

Tabel 8: Voorspelling van de proefresultaten

Proefspecificaties						sensor 1		sensor 8	
Proef	d_{plaat}	L_{buis}	d_{lading}	R	R_{eq}	P_r	I_r	$P_{s;controle}$	I_s
nr	m	m	m	m	m	kPa	kPa msec	kPa	kPa msec
1,2,3	0,05	1,00	0,00	1,05	0,462	423	245	29	7
4,5,6	0,05	1,00	0,30	1,35	0,462	224	136	19	11
7,8,9	0,02	1,00	0,00	1,02	0,457	435	243	30	15
10,11,12	0,02	1,00	0,30	1,32	0,457	229	135	20	6
13,14,15	0,10	1,00	0,00	1,10	0,469	406	248	26	7
16,17,18	0,10	1,00	0,30	1,40	0,469	215	137	18	5
19,20,21	0,00	1,00	0,00	1,00	0,454	443	242	31	7
22,23,24	0,00	1,00	0,30	1,30	0,454	233	135	14	6
25,26,27	0,10	0,50	0,00	0,60	0,383	718	210	81	12
28,29,30	0,10	0,50	0,30	0,90	0,383	365	128	37	8
31,32,33	0,00	0,50	0,00	0,50	0,361	857	200	118	14
34,35,36	0,00	0,50	0,30	0,80	0,361	431	127	30	9
37	0,00	0,00	0,00	1,10	1,100	58	14	26	7
38	0,00	0,00	0,00	1,40	1,400	39	11	18	5
39	0,00	0,50	0,00	0,50	0,500	1.157	83	305	31
40	0,00	0,50	0,00	0,50	0,500	2.265	136	510	48

De verwachting is dat de drukken die tijdens de proeven worden gemeten lager liggen dan de hierboven vermelde drukken omdat er een afstand wordt gelaten tussen de uitgang van de tunnel en de testplaat.

Voor de volledigheid zijn de gemaakte aannames opgesomd:

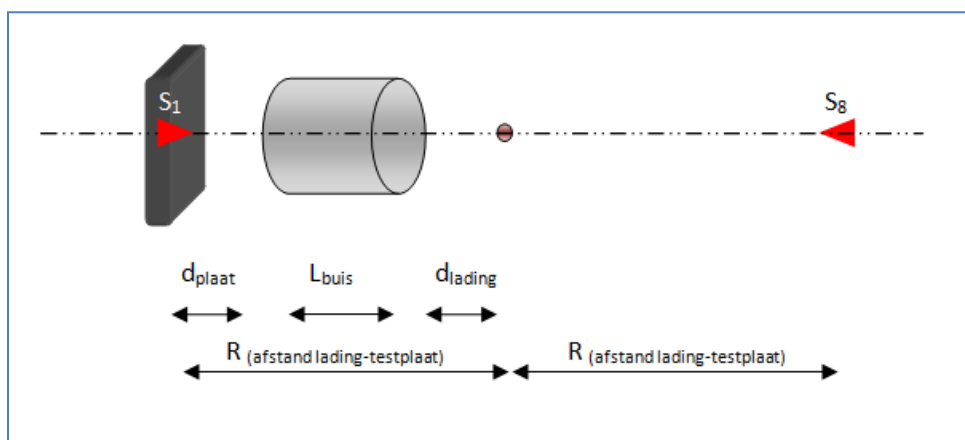
- Voor de bepaling van het ladinggewicht is voor de ontsteker een ladinggewicht van 1 gram TNT equivalentie aangenomen.
- De afstand van de uitgang van de tunnel tot de testplaat is genegeerd. Voor de berekeningen is aangenomen dat de tunnel doorloopt.

3.3. Uitvoering van het onderzoek

Tijdens de uitvoering van het onderzoek zijn de omstandigheden, waarnemingen en bijzonderheden vastgelegd. Deze paragraaf beschrijft de algemene uitvoering van de proeven en geeft een beeld van het verloop van de proeven.

3.3.1. Algemene beschrijving van de proeven

Er is een testprogramma opgesteld om de proeven op een efficiënte wijze te kunnen uitvoeren. Hierin zijn alle proeven in de volgorde van uitvoering opgenomen. Figuur 27 geeft de proefopstelling schematisch weer waarbij met behulp van symbolen de afstanden zijn aangegeven. De specifieke afstanden per proef waar in deze figuur naar wordt verwezen zijn opgenomen in tabel 8. In deze tabel staat tevens de volgorde van de proeven waarbij rekening is gehouden met een efficiënte uitvoering van de proeven. Een volledige beschrijving per proef is opgenomen in bijlage 1. Hierin is elke proef apart getekend en beschreven.



Figuur 27: Schematische weergave van de proefopstelling.

De lading bestaat uit een bolletje van 5 gram C-4 springstof zoals afgebeeld in figuur 28. Figuur 29 laat de gebruikte springstof in de verpakking zien. Als ontsteking wordt een elektrische ontsteker gebruikt waarvan geen verpakkingsmateriaal beschikbaar is. Hierdoor zijn geen verdere specificaties bekend, de TNT equivalent van de ontsteker wordt op 1 gram veronderstelt. De ontsteker wordt in de springstof geplaatst waarbij zoveel mogelijk wordt geprobeerd de bolvorm te behouden. Door de geringe hoeveelheid springstof is dit niet helemaal mogelijk. De ontsteker en de springstof worden aan elkaar getapet om te voorkomen dat ze uit elkaar vallen.



Figuur 28: Afgewogen bolletje C-4.



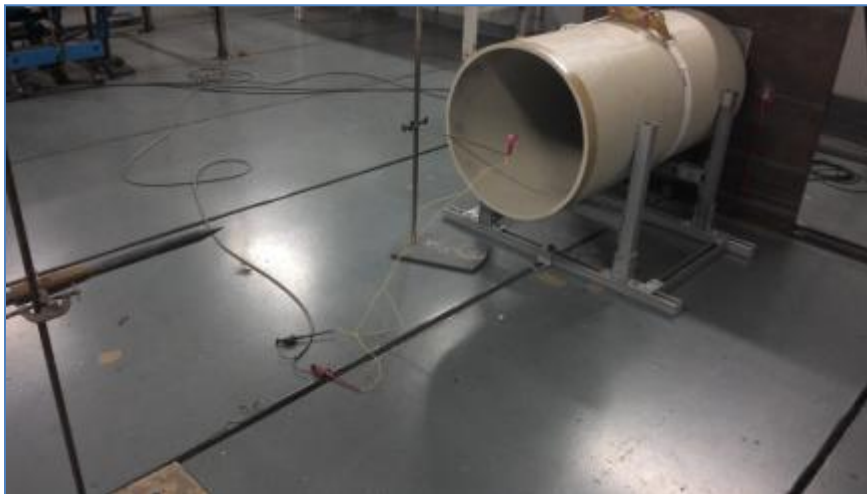
Figuur 29: Gebruikte springstof.

De samengestelde lading wordt bevestigd aan een statief en midden in de tunnelingang gehangen of midden voor de tunnelingang op 30 cm afstand geplaatst. De samengestelde lading is afgebeeld in figuur 30.

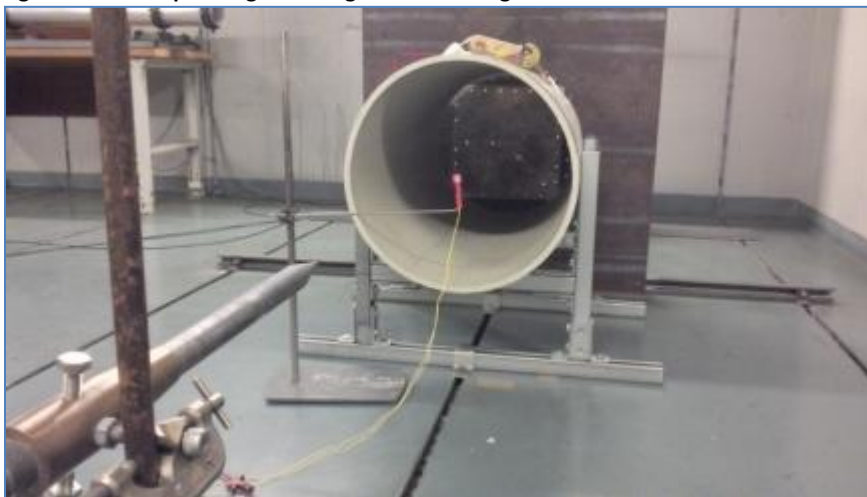


Figuur 30: Samengestelde lading voor het tapen.

Bij het bevestigen van de lading aan het statief is eveneens tape gebruikt om de lading te fixeren. De ontsteker is naar boven gericht om schade aan de sensoren te voorkomen, deze zouden getroffen kunnen worden indien de ontsteker richting de testplaat wordt gericht. De tunnel is op de voor de betreffende proef vereiste afstand van de testplaat geplaatst (2, 5 of 10 cm). De lading is bij een deel van de testen in de tunnelingang geplaatst zoals te zien is in de figuren 31 en 32. Voor de overige testen is de lading 30 cm voor de tunnelingang geplaatst. Vervolgens is de ontsteker aangesloten op het ontsteekcircuit zoals dit aanwezig is in het laboratorium.



Figuur 31: Proefopstelling met aangebrachte lading.



Figuur 32: Proefopstelling met aangebrachte lading.

3.3.2. Eerste proefdag

Tijdens de eerste proefdag op 4 december 2013 zijn er 18 proeven uitgevoerd. De lokale weersomstandigheden voorafgaand en na uitvoering van de proef zijn toegevoegd in bijlage 7. Een samenvatting van deze omstandigheden zijn opgenomen in tabel 9. Alhoewel de gegevens van een lokaal weerstation en dus van buiten zijn, geven deze gegevens een indicatie van de heersende omstandigheden ten tijde van de proefuitvoering. Het laboratorium heeft een open verbinding met de buitenlucht doordat een luik open stond dat het laboratorium via een luchtkanaal met de buitenlucht verbindt. Met het oog op de reproduceerbaarheid kunnen deze gegevens worden gebruikt indien de proeven op een andere locatie worden overgedaan.

Tabel 9: Klimatologische omstandigheden.

Tijdstip raadplegen	09:30	15:30
Temperatuur	5°C	7°C
Luchtdruk	1027 hPa	1028 hPa
Relatieve luchtvochtigheid	89%	82%

De volgende bijzonderheden zijn op de eerste proefdag waargenomen:

- Bij het wisselen van de lading tussen de proeven is de opstelling telkens nagemeten. Er zijn geen verschuivingen geconstateerd in de opstelling of de plaat.
- Bij het wisselen van de ladingen zijn telkens fragmentatieresten en resten tape uit de buis verwijderd om obstakels in de buis te vermijden.
- Opvallend was dat er veel fragmentatie van de ontsteker in de buis achterbleef bij de proeven 1t/m 3 en 7 t/m 8 en dat dit bij proef 13,14 en 15 veel minder was.
- Voorafgaand aan proef 7 is het statief waarin de testplaat is bevestigd licht gekanteld. Deze bleek namelijk onder een heel kleine hoek te staan wat opviel bij de tunnelafstand van 0,02 meter (zie figuren 33 en 34).



Figuur 33: Scheefstand statief ($d_{pl} = 5\text{cm}$)



Figuur 34: Scheefstand statief ($d_{pl} = 2\text{cm}$)



Figuur 35: Tunneldiameter (verticale as)



Figuur 36: Tunneldiameter (horizontale as)



Figuur 37: Grootste waargenomen afwijking in gewicht bij het samenstellen van de lading.

3.3.3. Tweede proefdag

Tijdens de tweede proefdag op 5 december 2013 zijn er 12 proeven uitgevoerd. De lokale weersomstandigheden voorafgaand en na uitvoering van de proef zijn toegevoegd in bijlage 7. Een samenvatting van deze omstandigheden zijn opgenomen in tabel 10.

Tabel 10: Klimatologische omstandigheden.

Tijdstip raadplegen	09:30	15:30
Temperatuur	1°C	5°C
Luchtdruk	1026 hPa	1019 hPa
Relatieve luchtvochtigheid	96%	78%

Naar aanleiding van de resultaten op dag één is besloten een aantal aanvullende testen uit te voeren. De proeven zonder tussenafstand tussen de tunnel en de testplaat zijn op deze dag toegevoegd vanwege de geringe verschillen in piekoverdruk in de eerdere testen. Verder blijkt de opstelling de gevolgen van de detonatie goed te weerstaan waardoor deze proeven uitvoerbaar blijken. Eerder werd hieraan getwijfeld.

Voor het uitvoeren van de eerder geplande proeven is de tunnellenge aangepast. De tunnel is ingekort van 1 naar 0,5 meter zoals is te zien figuur 38.



Figuur 38: Opstelling met tunnellenge 0,5 meter.

De volgende bijzonderheden zijn op de tweede proefdag waargenomen:

- Bij het wisselen van de lading tussen de proeven is de opstelling telkens nagemeten. Er zijn geen verschuivingen geconstateerd in de opstelling of de plaat.
- Bij het wisselen van de ladingen zijn telkens fragmentatieresten en resten tape uit de buis verwijderd om obstakels in de buis te vermijden.
- Bij het uitvoeren van proef 9a overschrijdt het signaal het ideale bereik van sensor 1. Ondanks dat de overschrijding minimaal is wordt besloten deze sensor te wisselen voor een sensor met een ander ideaal meetbereik. Sensor 1 heeft nu dezelfde specificaties als de sensoren 6 en 7.
- Bij test 9b is de stalen pen waaraan de lading is bevestigd weggeslagen, dit is bij geen enkele andere test gebeurd.

3.3.4. Derde proefdag

Tijdens de derde proefdag op 6 december 2013 zijn er 10 proeven uitgevoerd. De lokale weersomstandigheden voorafgaand en na uitvoering van de proef zijn toegevoegd in bijlage 7. Een samenvatting van deze omstandigheden zijn opgenomen in tabel 11.

Tabel 11: Klimatologische omstandigheden.

Tijdstip raadplegen	09:30	14:00
Temperatuur	3°C	5°C
Luchtdruk	1024 hPa	1026 hPa
Relatieve luchtvochtigheid	71%	55%

Deze dag is het proefprogramma afgerond. Aan het einde zijn, met de buis van 0,5 meter, twee aanvullende proeven gedaan om de weerstand van de buis te testen. De buis heeft voor aanvang van de 39e proef al 38 proeven doorstaan met ladingen van 5 gram. In proef 39 is de lading verhoogd tot 20 gram waarna er nog steeds geen visuele schade aan de buis optreedt. Voor proef 40 wordt daarom een lading van 40 gram gebruikt waarbij de buis bezwijkt.

De volgende bijzonderheden zijn op de derde proefdag waargenomen:

- Bij het wisselen van de lading tussen de proeven is de opstelling telkens nagemeten. Er zijn geen verschuivingen geconstateerd in de opstelling of de plaat.
- Bij het wisselen van de ladingen zijn telkens fragmentatieresten en resten tape uit de buis verwijderd om obstakels in de buis te vermijden.
- Na test 38 zijn alle sensoren, met uitzondering van sensor 1, verwijderd uit de plaat.
- Test 39 is uitgevoerd om de weerstand van de buis te testen, geen visuele schade.
- Test 40 is uitgevoerd om de weerstand van de buis te testen, buis bezwijkt (zie figuur 39).



Figuur 39: Bezweken tunnel na uitvoering van proef 40.

3.3.5. Geconstateerde onnauwkeurigheden en afwijkingen

Bij het uitvoeren van de proeven is gestreefd naar een eenduidige uitvoering waarbij alle omstandigheden tijdens de diverse proeven zoveel mogelijk gelijk zijn. In tabel 12 staan de geconstateerde afwijkingen die tijdens de proefnemingen zijn geconstateerd.

Tabel 12: Meetafwijkingen

Afwijking:	Bijzonderheden:	Marge:
Ladingvorm	Er wordt getracht een bolvorm te benaderen, door de ontsteker en de geringe springstofhoeveelheid is dit niet mogelijk.	Schatting 2-3mm met uitzondering van de uitstekende ontsteker.
Ladinggewicht	Bij het afwegen is een afwijking ontstaan.	+/- 0,07gr
Ladinggewicht	Afwijking van de gebruikte weegschaal.	+/- 0,01gr
Afstand lading	Gemeten met een rolmaat, de lading 30 cm voor de tunnelingang m.b.v. Pythagoras.	+/- 2mm
Uitgang tunnel	Niet volledig vlak afgezaagd.	+/- 2mm
Schuinstand statief	Figuren 33&34.	n.t.b.
Afstand tunneluitgang - testplaat	Deze afstand is gemeten met een rolmaat, het niet vlak zijn van de tunneluitgang werkt hier door (is gesommeerd).	5mm (inclusief vorige afwijking)
Vorm tunnel	De tunnel is niet rond (figuren 35&36).	10mm
Afstand blastpencil	Gemeten met een rolmaat. Afstand door de lucht lastig te meten.	+/- 10mm
Lengte buis	Door het halveren van de buis is materiaal verloren gegaan.	5mm
Gladheid buis	Door de fragmentatie verhoogt de wandruwheid van de tunnel (figuur 40).	n.t.b.



Figuur 40: Fragmentatieschade tunnelbuis.

Een andere factor die is geconstateerd is dat enkele gemeten drukken buiten het bereik van de TNT-equivalentie vallen uit figuur 1. Hierdoor wijken de analytische voorspellingen mogelijk af.

De TNT equivalentie voor de ontsteker is aangenomen als 1 gram, uit eerder onderzoek [15], blijkt dit ongeveer de helft minder te zijn.

In paragraaf 3.1.3. is de afwijking die ontstaat in de bolvormige expansie van de schokgolf door het uitsteken en de oriëntatie van de ontsteker al aangehaald.

3.4. Verwerking van de meetgegevens.

De ruwe data die tijdens de uitvoering van de proeven is opgeslagen kan niet zonder meer worden gebruikt. Om de gemeten waarden te kunnen interpreteren en analyseren zijn een aantal handelingen verricht met het programma Matlab. Deze handelingen worden in deze paragraaf uitgelegd en verantwoord. Om de proeven valideerbaar en reproduceerbaar te maken is het Matlab script-m bestand waarmee deze handelingen zijn uitgevoerd opgenomen in bijlage 6. Bij de analyse en presentatie van de gegevens zijn twee script-m bestanden gebruikt. Een script-m bestand is gebruikt om een matrix te genereren met de data uit de proeven. In het tweede bestand wordt de data uit de meetgegevens bewerkt. Deze bewerkingen worden in de navolgende paragrafen uitgewerkt.

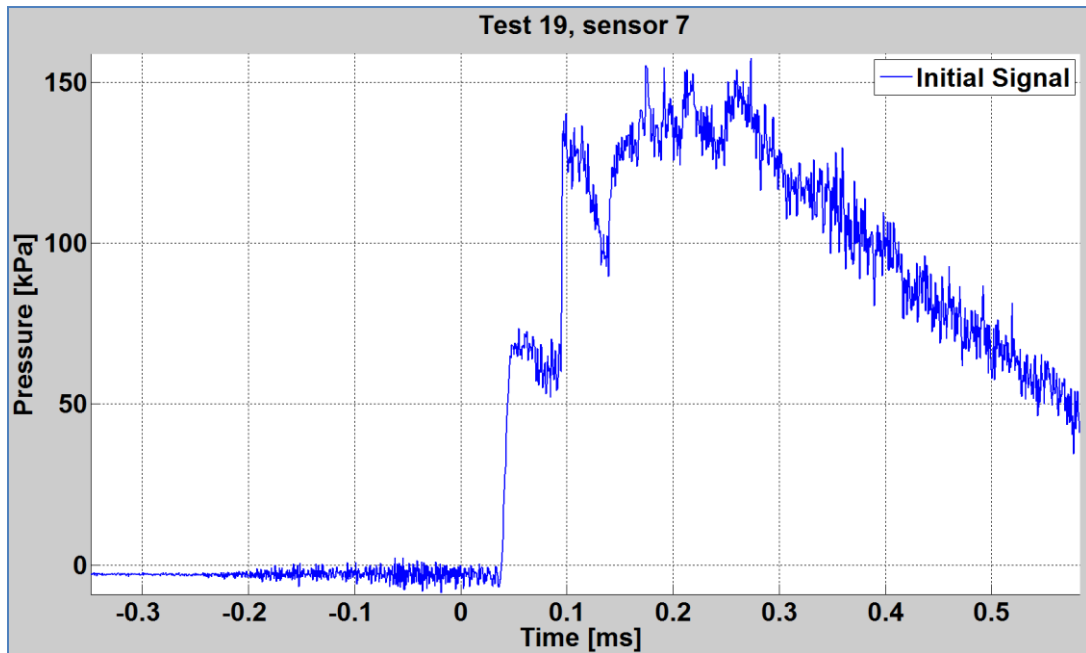
3.4.1. Opslaan en hernummeren van de proeven

De data van de sensoren wordt opgeslagen in een.txt bestand. Binnen dit bestand zijn negen kolommen opgenomen. De eerste kolom is de tijd, dit zijn 32.768 metingen met een onderling verschil van $5 \cdot 10^{-7}$ seconde. De tweede tot en met de achtste kolom zijn de meetgegevens van de druksensoren waarbij de nummering gelijk is aan die van de getekende sensoren in de testplaat van figuur 10 in paragraaf 3.1.1. In de negende kolom zijn de gemeten waarden van de blastpencil opgeslagen.

Alle 40 proeven worden afzonderlijk in een bestand opgeslagen. De bestandsnaam moet worden aangepast om de gegevens te kunnen verwerken met Matlab. Tijdens de uitvoering van de proeven zijn de bestanden opgeslagen in de vorm "Test-001a.txt". De proeven die vaker zijn uitgevoerd in dezelfde configuratie krijgen een a, b en c bestand. De nieuwe benaming is in de vorm "Test_001.txt". In deze indeling zijn de proeven doorgenummerd van 1 tot en met 40.

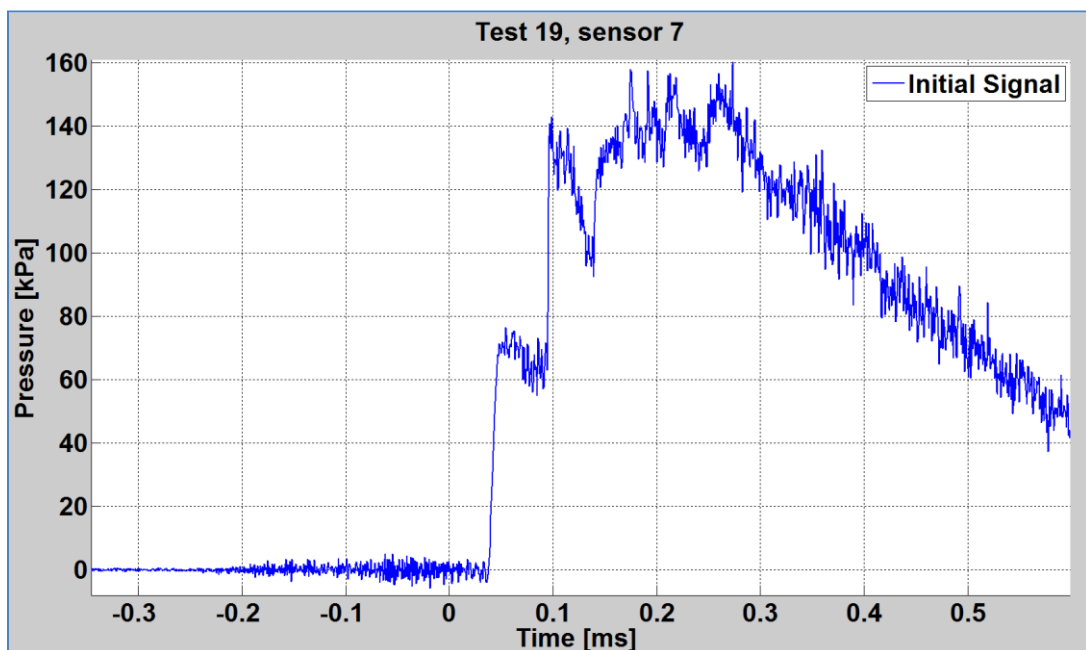
3.4.2. Kalibreren van de sensoren

Bij een eerste analyse van de data valt op dat enkele sensoren een afwijkende begindruk registreren. De meting begint hierdoor niet bij nul. Als voorbeeld zijn geplotte resultaten van sensor 7 uit proef 19 opgenomen in figuur 41. In de figuur is te zien dat de gemeten waarde voordat de piek wordt waargenomen bij deze sensor onder de x-as ligt. Dit maakt het lastig om de resultaten van verschillende sensoren met elkaar te vergelijken.



Figuur 41: Resultaten proef 19, niet bewerkt.

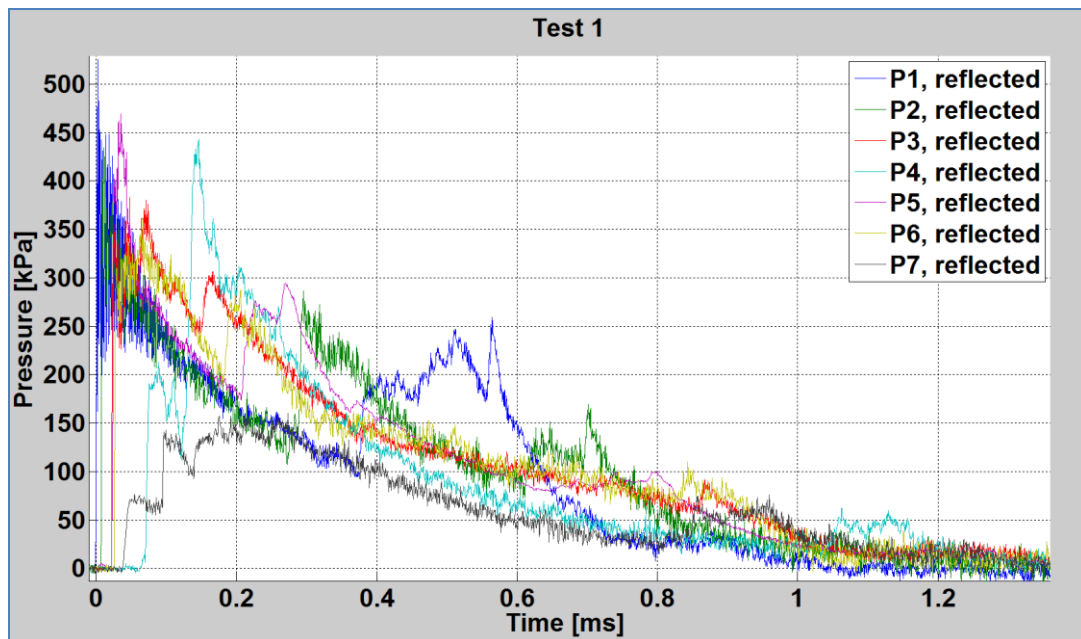
Om een vergelijking beter mogelijk te maken wordt het gemiddelde van de eerste 2000 meetpunten bepaald. Dit gemiddelde wordt vervolgens van alle waarden afgetrokken. De meting begint hierdoor bij nul waardoor het vergelijken van de resultaten onderling mogelijk wordt. Het resultaat van deze bewerking is afgebeeld in figuur 42.



Figuur 42: Resultaten proef 19, gekalibreerd naar nul.

3.4.3. Filteren van de ruis.

Omdat de gemeten drukken veel ruis vertonen door het trillen van de sensoren in de plaat worden de gemeten drukken gefilterd. Het trillen van de sensoren en/of de plaat zorgt voor een verstoord signaal, dit is goed te zien aan de signalen in figuur 43. Deze figuur toont de signalen van de druksensoren 1 t/m 7 in proef 1. Deze sensoren meten de gereflecteerde druk waarbij de sensoren mee gaan trillen.

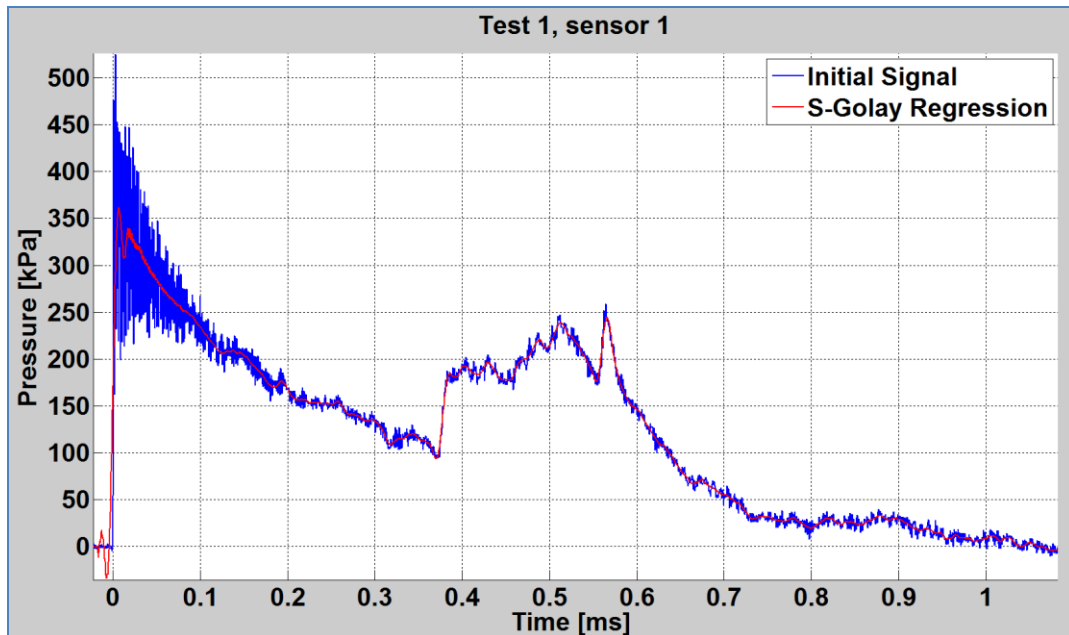


Figuur 43: Signalen met ruis; druksensoren proef 1

Een reden waarom de plaat gaat trillen is dat de schokgolf niet volledig reflecteert nadat deze de plaat heeft geraakt maar deels door de plaat gaat. Deze schokgolf, die zich door het materiaal verplaatst, zorgt voor de trillingen waardoor de druksensoren een verstoord signaal tonen. Een tweede reden hiervoor is dat de plaat in zijn bevestiging gaat trillen of dat de sensoren in de bevestigingsgaten gaan trillen.

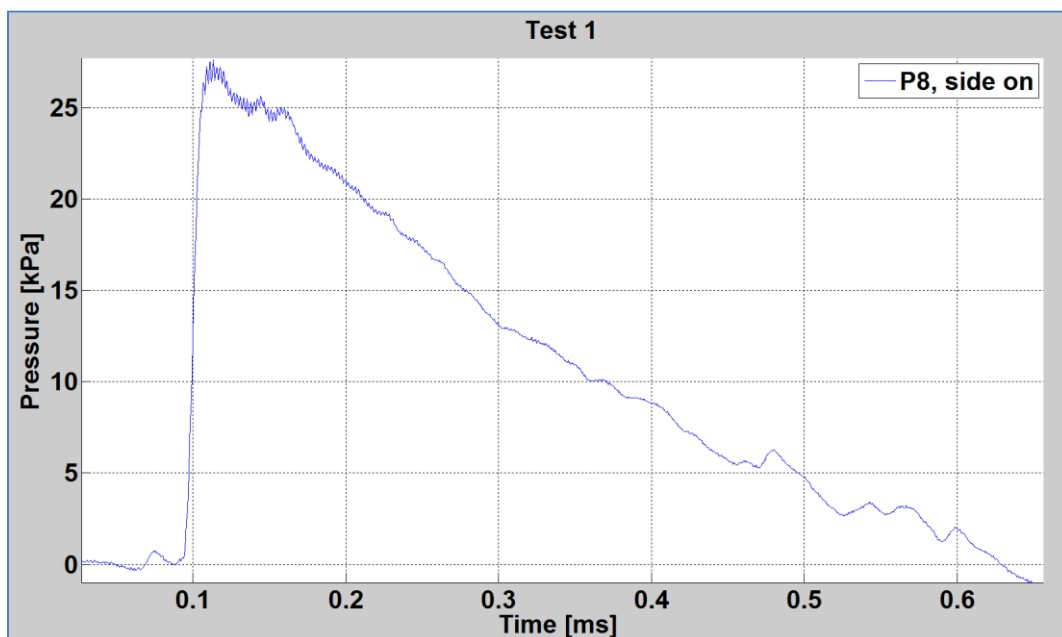
De meeste manieren van filteren elimineren de uitschieters (pieken en dalen) in de curve. In dit geval is dit niet wenselijk omdat de optredende reflecterende drukken wel degelijk pieken en dalen vertonen. Door het toepassen van een Sazitzky-Golay regression [13] blijven de pieken van de curve behouden maar wordt het signaal wel gefilterd. Hierdoor wordt de verstoring door de trilling in de plaat verminderd. De uitkomst van de regressie is te zien aan de rode curve in figuur 44. In deze figuur is het signaal van sensor 1 met en zonder regressie filter afgebeeld. Het filter haalt de uitschieters uit de metingen. Dit filter zal bij de navolgende analyses voor de sensoren 1 t/m 7 worden toegepast. Indien hiervan wordt afgeweken zal dit expliciet worden vermeld.

Het toepassen van het filter zorgt er ook voor dat de piekoverdrukken digitaal kunnen worden afgelezen. Bij het aflezen van een gereflecteerde piekoverdruk mag volgens een ISO normblad [8] een maatlat langs de rechte helling van de drukgolf worden gelegd om zo te kunnen bepalen wat de waarde is van de optredende gereflecteerde piekoverdruk. Het gefilterde signaal doet dit ook doordat het de helling van de curve volgt en de trilling die in de top optreedt middelt. De waarde van de top van het gefilterde signaal komt hierdoor overeen met de waarde die met de hand zou worden afgelezen. Het toepassen van dit filter betekent dat de geïnterpreteerde piekoverdruk lager is dan de piekoverdruk van het originele signaal.



Figuur 44: Toepassing van Savitzky-Golay regressie filter.

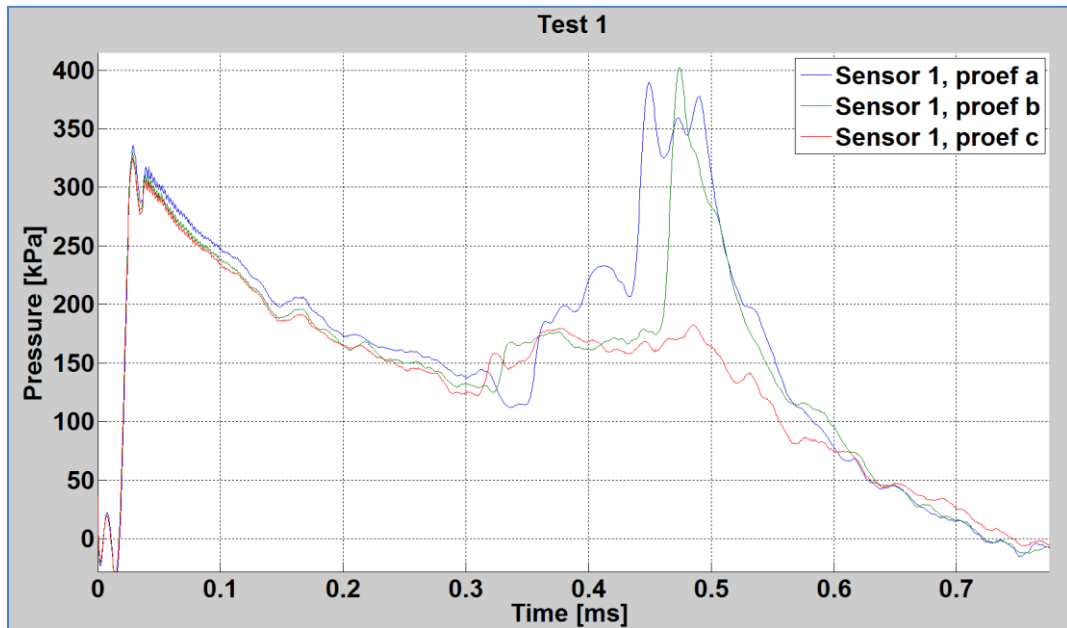
Figuur 45 laat zien dat de gemeten druk bij de blastpencil minder last heeft van trillingen. Dit komt omdat deze druk een invallende piekoverdruk is. Er treedt hierdoor geen reflectie op waardoor de sensor veel minder trilt. Voor het signaal van de blastpencil wordt daarom geen filter toegepast.



Figuur 45: Signaal van de blastpencil zonder ruis.

3.4.4. Bepalen van de juiste piek voor de gegevensverwerking

Een uitdaging bij het automatisch verwerken van de gegevens is het selecteren van de juiste piek. Doordat enkele signalen veel pieken kort achter elkaar vertonen wordt er een drempel ingesteld. Deze drempel zorgt ervoor dat de piekoverdruk juist wordt geselecteerd. Op deze manier worden pieken die veel later in het signaal voorkomen door bijvoorbeeld reflecties van wand of vloer genegeerd. De signalen a en b uit figuur 46 zijn een voorbeeld van dergelijke late pieken die niet tot de piekoverdruk worden gerekend.



Figuur 46: Signaal van de proeven 1a, 1b en 1c.

De optredende late pieken kunnen het gevolg zijn van het niet vlakke karakter van de schokgolf of door reflectie van de omgeving. Om hier een onderscheid in te kunnen maken (indien dit al mogelijk is) moeten de signalen visueel gecontroleerd worden.

4. Analyse van de gemeten resultaten

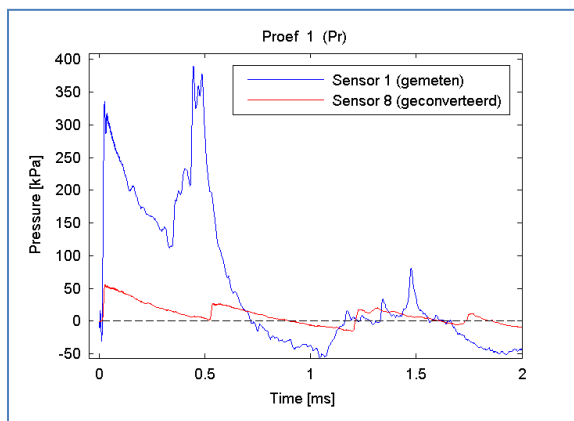
In dit hoofdstuk worden de gemeten resultaten met elkaar vergeleken. In de tweede alinea wordt een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd naar de afstand tussen de tunnel en de testplaat. Daarna volgt een vergelijking van de voorspelde resultaten uit het vorige paragraaf 3.2 met de gemeten resultaten uit paragraaf 3.3. In de laatste twee paragrafen van dit hoofdstuk worden de foutanalyse en de reproduceerbaarheid van het onderzoek behandeld.

Bij alle vergelijkingen zal eerst de toegepaste methode worden uitgelegd, vervolgens wordt de vergelijking gemaakt. Indien dit mogelijk is wordt aan het einde van de paragraaf een controle gepresenteerd waarmee de vergelijking wordt gevalideerd.

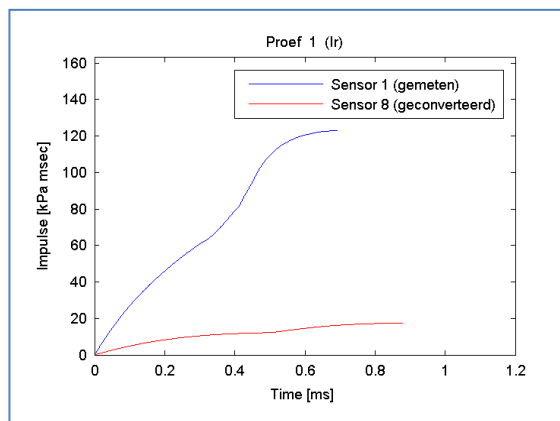
4.1. Resultaten in het centrum van de testplaat

De resultaten in het centrum van de testplaat geven een beeld van de optredende gereflecteerde druk en impuls in het hart van de tunnel. Deze waarden worden vergeleken met de waarden van de sensor achter de lading waardoor een kwantitatieve uitspraak kan worden gedaan over de invloed van de tunnel. Bij de proeven waar geen tunnel is toegepast moeten de gereflecteerde waarden in het centrum van de plaat en de geconverteerde waarden van de blastpencil (sensor 8) overeenkomen.

Op het gemeten signaal van sensor 8 is de vergelijking van Rankine en Hugoniot (4) toegepast. Dit wordt gedaan om een uitspraak te kunnen doen over de mate waarin de schokgolffparameters worden versterkt. Hiermee wordt de piekoverdruk van sensor 8, die is gemeten als invallende piekoverdruk, omgerekend naar gereflecteerde piekoverdruk. Omdat er tussen sensor 8 en de lading geen tunnel zit, geeft dit de gereflecteerde piekoverdruk die zonder tunnel zou optreden. De afstand tussen de lading en beide sensoren is immers even lang. Het resultaat hiervan is voor proef 1 afgebeeld in figuur 47.



Figuur 47: Lbuis 1m, dplaat 0,05m, dlading 0m.



Figuur 48: Lbuis 1m, dplaat 0,05m, dlading 0m.

Doordat het hele signaal wordt omgerekend kan ook de impuls worden geconverteerd van invallend naar geconverteerd zoals is afgebeeld in figuur 48.

De reden dat de druk en impuls worden geconverteerd op de beschreven wijze, in tegenstelling tot het aflezen in een programma als bijvoorbeeld ConWep, is dat op deze manier de waarden eerlijker zijn te vergelijken. De gemeten waarden zijn daadwerkelijk opgetreden drukken en ConWep daarentegen geeft een benadering die is gebaseerd op de vergelijkingen van Kingery-Bulmash. Dit blijft een theoretische benadering die dan vervolgens met gemeten waarden moet worden

vergeleken. Binnen dit onderzoek is gekozen om de gemeten waarden met elkaar te vergelijken. De waarden zijn afkomstig van dezelfde detonatie waardoor een mogelijke afwijking in TNT-equivalentie wordt genegeerd.

De resultaten van alle proeven zijn voor de sensoren 1 en 8 afgebeeld in tabel 13. De tabel geeft het proefnummer en de daaraan verbonden proefspecificaties weer. Daarnaast wordt het gemeten signaal van sensor 8 afgebeeld met de berekende impuls. In de volgende kolom staat de geconverteerde waarde van sensor 8. Daarnaast staat het gemeten signaal van sensor 1 en de daarbij horende impuls. Als laatste is de versterkingsfactor afgebeeld. Dit is de ratio tussen de gemeten en geconverteerde druk of impuls. Op deze manier kan het effect van de tunnel worden uitgedrukt in waarden die onderling zijn te vergelijken.

Tabel 13: vergelijking sensor 1 en geconverteerde sensor 8.

Proef nr	proefspecificaties					Sensor 8 gemeten		Sensor 8 conversie		Sensor 1 gemeten		versterkings- factor	
	lading W	afstanden				P_s kPa	I_s kPa msec	P_r kPa	I_r kPa msec	P_r kPa	I_r kPa msec	$P_{r,tun}/P_{r,vrij}$	$I_{r,tun}/I_{r,vrij}$
		d_{plaat} m	L_{buis} m	d_{lading} m	R m								
01 02 03	0,005	0,05	1,0	-	1,05	23,9	6,6	52	14	330,0	113,2	6,3	8,1
04 05 06	0,005	0,05	1,0	0,30	1,35	17,5	4,7	38	10	155,8	44,5	4,2	4,5
07 08 09	0,005	0,02	1,0	-	1,02	25,5	6,7	56	14	348,1	119,1	6,2	8,3
10 11 12	0,005	0,02	1,0	0,30	1,32	17,9	4,7	38	10	162,5	48,0	4,2	4,9
13 14 15	0,005	0,10	1,0	-	1,10	23,4	6,9	51	15	291,2	99,9	5,7	6,9
16 17 18	0,005	0,10	1,0	0,30	1,40	15,4	4,1	33	9	137,1	33,4	4,2	3,9
19 20 21	0,005	-	1,0	-	1,00	25,0	5,9	55	13	347,6	125,5	6,3	10,0
22 23 24	0,005	-	1,0	0,30	1,30	27,7	6,4	62	14	165,1	51,2	2,7	3,8
25 26 27	0,005	0,10	0,5	-	0,60	73,3	10,1	187	24	1144,8	115,3	6,1	4,9
28 29 30	0,005	0,10	0,5	0,30	0,90	33,2	7,0	75	15	434,8	42,6	5,8	2,8
31 32 33	0,005	-	0,5	-	0,50	103,6	11,7	285	29	1187,0	127,4	4,2	4,5
34 35 36	0,005	-	0,5	0,30	0,80	41,4	7,8	96	17	382,2	29,5	4,0	1,7
37	0,005	-	-	-	1,10	22,8	5,4	50	11	57,9	11,2	1,2	1,0
38	0,005	-	-	-	1,40	14,6	4,2	31	9	42,7	8,1	1,4	0,9
39	0,020	-	0,5	-	0,50	228,9	40,2	787	112	4295,0	284,3	5,5	2,5
40	0,040	-	0,5	-	0,50	326,7	123,7	1467	353	10161,5	554,3	6,9	1,6

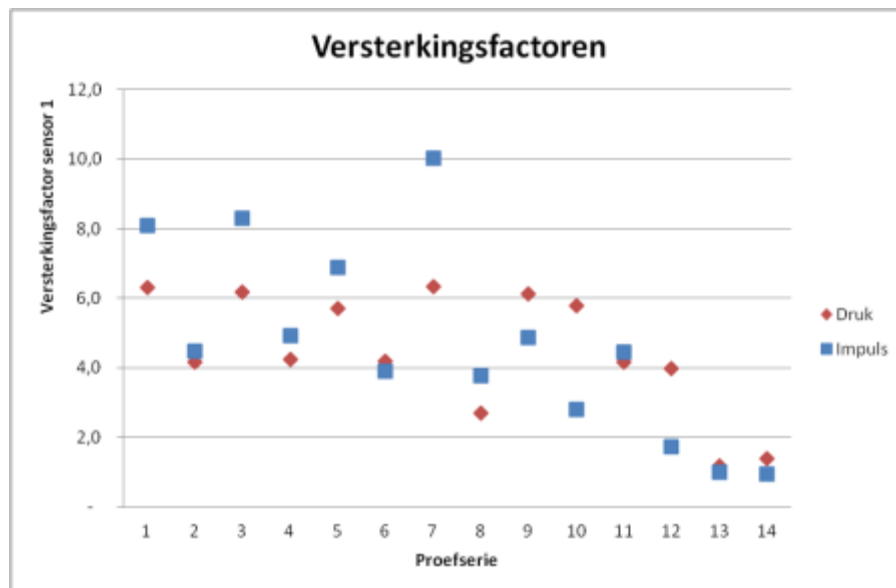
De versterkingsfactor bij de proeven met een lading in de tunnelingang is 6. Dit geldt bij alle proeven met een lengte van 1 meter. Bij de lading buiten de tunnelingang is deze 4 bij de tunnel van 1 meter. De tunnel van 0,5 meter laat wisselende resultaten zien.

Ook de impuls laat wisselende resultaten zien. Wel kan worden afgeleid dat de versterkingsfactor voor de impuls bij een lading buiten de tunnelingang ongeveer gelijk is aan de versterkingsfactor voor de druk bij een buis van 1 meter.

Over de invloed van de tunnallengte kan in deze vergelijking geen goede uitspraak worden gedaan omdat bij een andere tunnallengte ook de afstand tot de lading mee verandert. Er wijzigen dan teveel variabelen.

In het spreidingsdiagram in figuur 49 is voor bijna alle proefseries te zien dat de druk en impuls, bij een lading die 30 centimeter buiten de tunnelingang is geplaatst, een vergroting laten zien in dezelfde orde grootte. De proeven 8 en 10 zijn hier een uitzondering op. Dit kan betekenen dat de bovenstaande conclusie niet opgaat voor een buis van 0,5 meter. Het kan ook een toevallige afwijking zijn. Dit kan met aanvullende proeven op een buis van 0,5 meter worden aangetoond.

Opvallend in de figuur is de grotere versterking van de druk bij de buislengte van 1 meter in de eerste 8 proefseries (proeven 1 t/m 24) en de grotere versterking van de impuls in de proefseries 9 tot en met 12 (proeven 25 t/m 36). Dit zijn de proeven met de buis van 0,5 meter. Proefserie 13 en 14 zijn de proeven waarbij geen tunnel was geplaatst, deze zijn opgenomen als referentie.

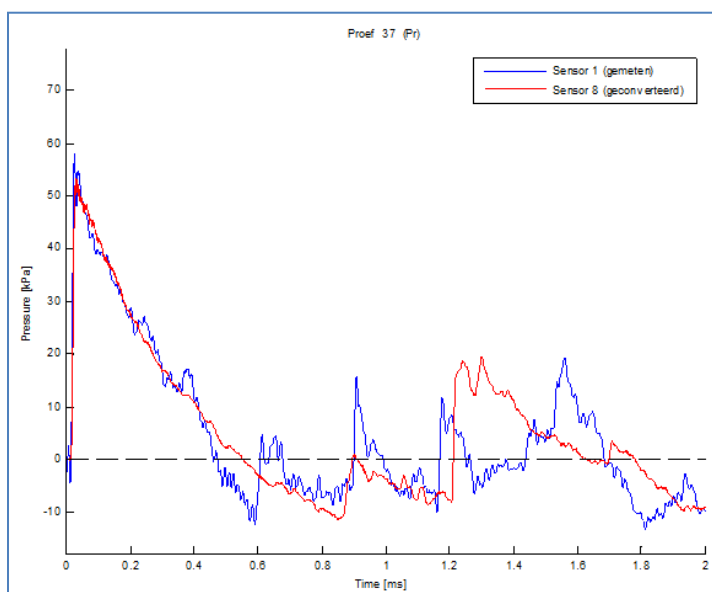


Figuur 49: Versterkingsfactoren per proefserie

De invloed van de afstand tussen de tunnelingang en de testplaat is terug te zien in de versterkingsfactor maar wordt in de volgende paragraaf beter beschreven door dit uit te zetten in een aparte grafiek.

De versterkingsfactor voor proef 40 is in ieder geval voor de impuls onbetrouwbaar omdat de tunnel is bezweken bij deze proef. De druk kan hierdoor voor deze proef eveneens niet kloppen.

De versterkingsfactor van de proeven 37 en 38 moet 1 zijn. Dit is niet geheel het geval. Een mogelijke verklaring hiervoor wordt gevonden in het signaal dat is afgebeeld in figuur 50. Hierin is te zien dat de beide grafieken de y-as op nagenoeg dezelfde plaats zouden kruisen als een meetlat langs het laatste deel van de curve wordt gelegd. De piek van sensor 1 is door de software afgelezen in de absolute piek en dit verklaart de te hoge waarde. De reflectiefactor zal hierdoor hoger uitvallen.



Figuur 50: Lbuis 0m, dplaat 0m, dlading 0m.

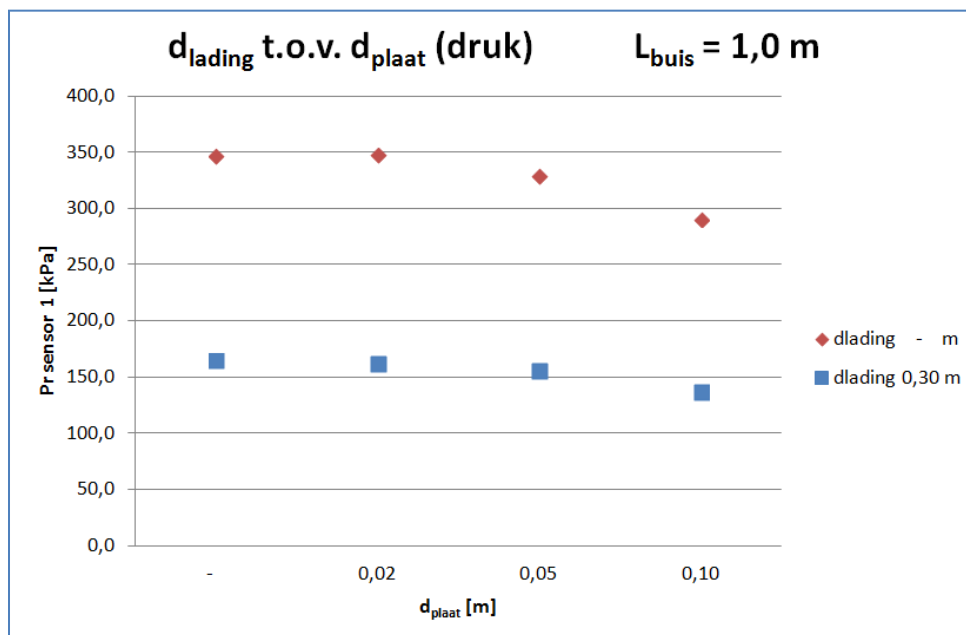
Uiteraard kan bij de proeven 1 t/m 36 bij het aflezen van het signaal een zelfde fout optreden . De kans dat deze doorwerkt in de versterkingsfactor is hierbij wel kleiner dan bij proef 38 omdat de eerste 36 proeven in series van drie zijn uitgevoerd.

4.2. Gevoeligheidsanalyse van de afstand tussen de tunnel en de testplaat

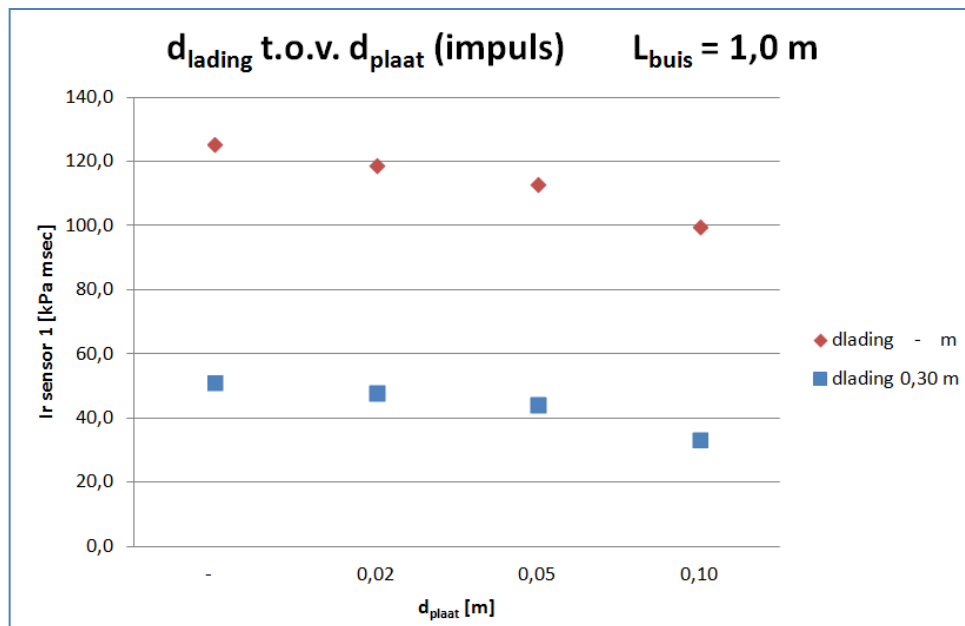
Een van de voornaamste doelen van dit onderzoek is een uitspraak te doen over de mate waarin de schokgolfparameters druk en impuls worden beïnvloed door een schokgolf die door een tunnel wordt versterkt. In hoofdstuk 3 zijn drie variabelen geselecteerd die worden onderzocht. In deze paragraaf worden de resultaten uit paragraaf 1 voor de afstand tussen de tunnel en de testplaat geanalyseerd.

De resultaten van tabel 13 zijn uitgezet in een grafiek. Er wordt enkel naar sensor 1 gekeken die zich in het centrum van de testplaat bevindt. De waarden die in de grafiek zijn afgebeeld zijn de gemiddelde waarden van sensor 1 van drie identieke proeven.

In de figuren 51 en 52 worden de plaats van de lading en de afstand tussen de tunnel en de testplaat met elkaar vergeleken. De tunnallengte is bij alle proeven in deze vergelijking constant en heeft een lengte van 1 meter. In de grafiek voor de druk is te zien dat de afstand van de tunnel tot de testplaat geen invloed heeft tot deze 2 centimeter wordt. Bij een afstand boven de 2 centimeter wordt de invloed zichtbaar, maar vergeleken met de invloed van de plaats van de lading is deze marginaal. Voor de impuls geldt hetzelfde.



Figuur 51: Gevoeligheidsanalyse d_{plaat} , druk ($L_{\text{buis}} 1\text{m}$).



Figuur 52 : Gevoeligheidsanalyse dplaat, impuls (Lbuis 1m).

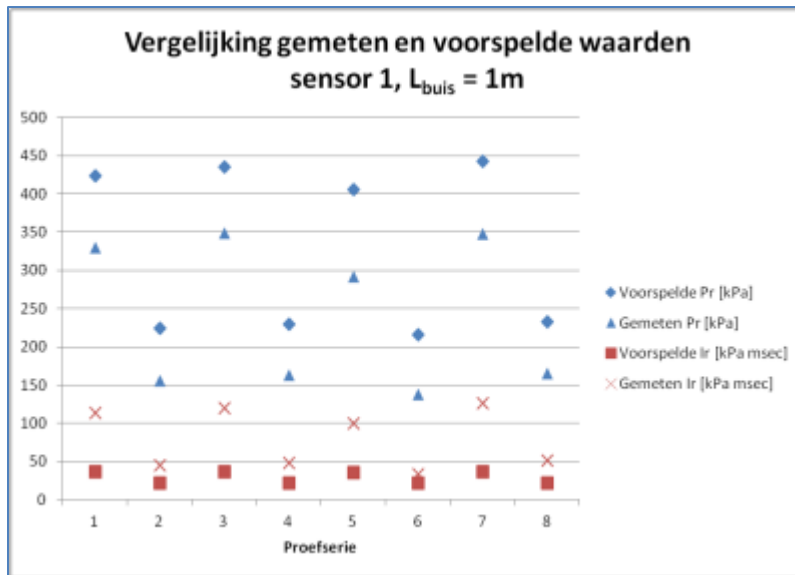
De figuren laten zien dat de druk pas bij een afstand van 5 centimeter gaat afnemen. De impuls neemt wel direct af bij een afstand van 2 centimeter.

4.3. Vergelijking van de gemeten waarden met de voorspelde waarden

De gemeten resultaten worden in deze paragraaf vergeleken met de eerder berekende resultaten. Het doel van deze vergelijking is een beeld te geven van de nauwkeurigheid van de toegepaste rekenmethode.

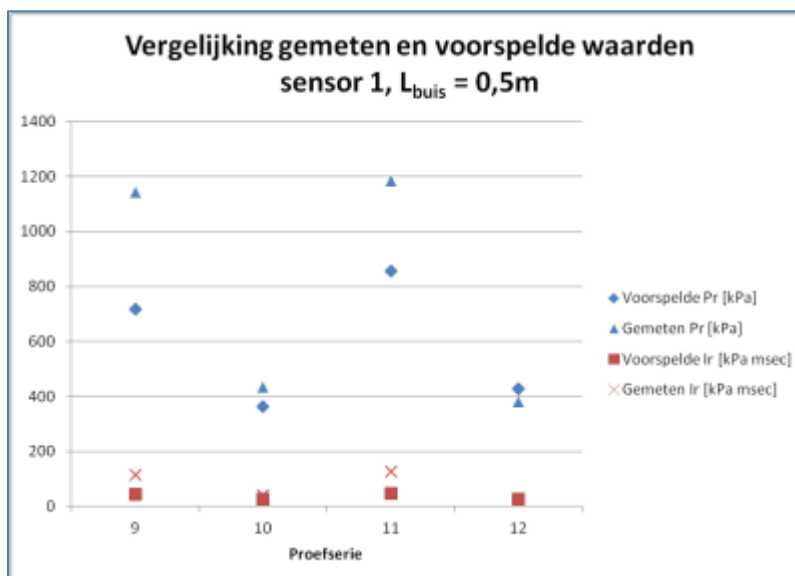
De vergelijking wordt gemaakt door de voorspelde resultaten en de gemeten resultaten in een grafiek uit te zetten. In de grafiek in figuren 53 en 54 zijn de verschillen tussen de voorspelling en de meting af te lezen. Op de horizontale as van de grafieken zijn de 12 proefseries uitgezet. De gemeten waarden die in de grafiek zijn gebruikt zijn de gemiddelde waarden van drie metingen.

Bij het maken van de vergelijking wordt onderscheid gemaakt tussen de tunnel van 1 meter en de tunnel van 0,5 meter. Figuur 53 laat de vergelijking zien voor de buis tunnellenlengte van 1 meter. De grafiek laat zien dat de voorspelde waarden afwijken van de gemeten waarden. Duidelijk zichtbaar is dat deze afwijking redelijk constant is voor zowel de druk als de impuls. Er is een duidelijke trend zichtbaar. Bij de impuls liggen de voorspelde waarden bij de proefseries waar de lading 30 centimeter voor de tunnelingang was geplaatst dichter bij de gemeten waarde dan de proefseries waarbij de lading in de tunnelingang was geplaatst.



Figuur 53: Voorspelde versus gemeten waarden, L_{buis} 1m.

Figuur 54 laat de vergelijking zien bij de tunnel van 0,5 meter. Hier is het resultaat minder consequent dan bij de tunnel van 1 meter. In de 10e proefserie is een voorspelling gedaan die lager uitvalt dan de gemeten waarde, dit is een uitzondering. Bij deze vergelijking valt op dat de verschillen tussen de voorspelling en de meting kleiner zijn bij de proefseries waarbij de lading buiten de tunnelingang is geplaatst.



Figuur 54: Voorspelde versus gemeten waarden, L_{buis} 0,5m.

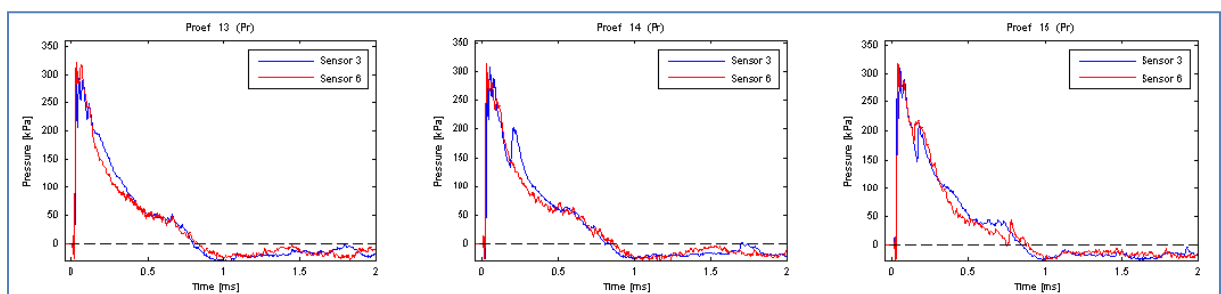
De beide tabellen laten een afwijking zien tussen de berekende en de gemeten waarden. De druk wordt bij de voorspelling overschat terwijl de impuls wordt onderschat. De verwachting dat de waarden overschat zouden worden blijkt dus maar deels uit te komen. Een verklaring voor de overschatting van de druk is dat in de berekening uit hoofdstuk 3 de ruimte tussen de tunnel en de testplaat niet meegenomen kan worden.

Uit het bovenstaande kan worden afgeleid dat het toepassen van de EVA in de onderzochte situaties niet werkt. Een mogelijke oorzaak kan de vlakheid van de schokgolf zijn, dit wordt behandeld in paragraaf 4.4.

4.3. Symmetrie van de schokgolf

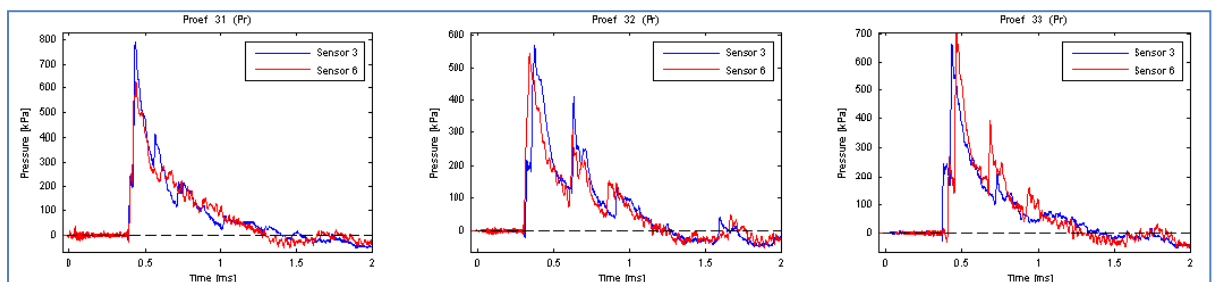
Door de sensoren 3 en 6 te vergelijken, die beiden op gelijke afstand van het midden en symmetrisch ten opzichte van elkaar zijn geplaatst, kan de symmetrie van de schokgolf worden bekeken. Hiertoe worden beide signalen in een figuur geplot. Om een goed beeld te krijgen wordt de hele meetserie, die wordt vergeleken, afgebeeld. De signalen van de sensoren 3 en 6 van alle proeven zijn opgenomen in bijlage 3.

Om deze vergelijking te maken is de bewerking, waarbij de grafieken naar elkaar toe worden gebracht, uitgezet om een eerlijk vergelijking tussen de aankomsttijden mogelijk te maken. Hierdoor worden enkele grafieken over een korter tijdsinterval afgebeeld doordat de sensoren met de hand en daardoor niet gelijktijdig zijn ingeschakeld bij alle proeven. De vergelijking tussen de verschillen in aankomsttijd kan hierdoor slechts tussen de sensoren en niet tussen twee proeven worden uitgevoerd.



Figuur 55: Lbuis 1m, dplaat 0,005m, dlading 0m.

Figuur 55 toont een voorbeeld van de vergelijking tussen sensor 3 en 6 voor een proefserie. Hierin is te zien dat de zowel de hoogte van de piek als de aankomsttijd voor beide sensoren gelijk is. Dit betekent dat de lading goed in het midden is geplaatst en dat de opstelling symmetrisch is. Dit is voor nagenoeg alle proeven met een buislengte van 1 meter het geval. De enkele uitzonderingen hierop zijnde proeven 11 en 21 maar dit zijn uitzonderingen binnen een serie en worden daarom genegeerd.

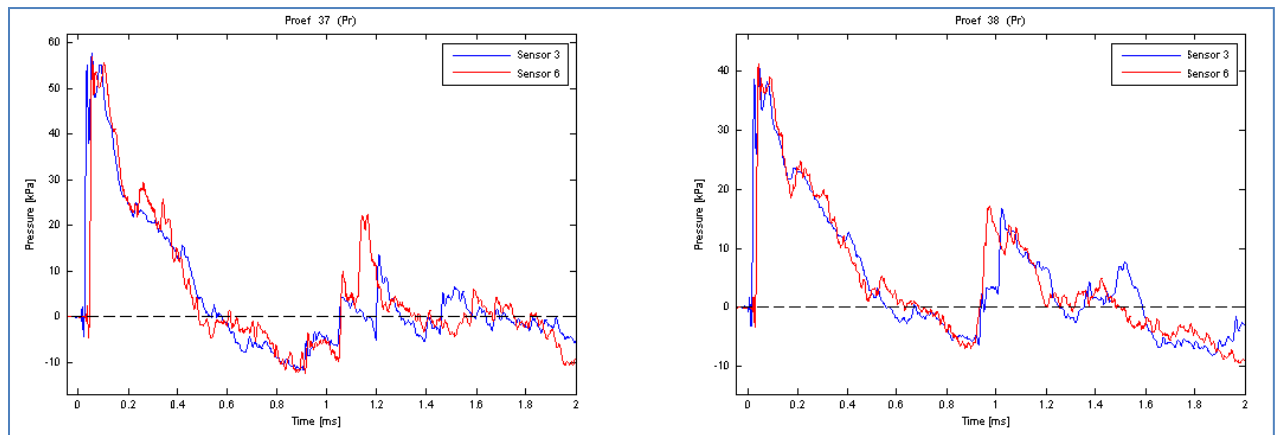


Figuur 56: Lbuis 0,5m, dplaat 0,005m, dlading 0m.

In figuur 56 is een proefserie afgebeeld waarbij een buislengte van 0,5 meter is gebruikt. Deze proefseries laten meer onderlinge verschillen zien dan de proeven waarbij de buislengte 1 meter is. Over het algemeen laten de proeven met een buislengte van 0,5 meter vergelijkbare pieken zien, maar treedt er wel een verschil in aankomsttijd op. De afgebeelde serie in figuur 56 laat een afwijkende piek zien in de eerste proef binnen de serie en een verschil in aankomsttijd in de laatste.

De impulsen die ook zijn opgenomen in bijlage 3 laten hetzelfde beeld zien. De impulsen bij de buis van 1 meter zijn nagenoeg gelijk terwijl de impulsen bij de buis van 0,5 meter binnen de proeven een kleine afwijking ten opzichte van elkaar vertonen.

Ter controle zijn de grafieken voor de proeven 37 en 38 opgenomen in figuur 57. Deze proeven zijn beide uitgevoerd zonder tunnelconstructie. De grafieken zouden hierdoor een gelijke piek en aankomsttijd moeten laten zien. De pieken zijn inderdaad vergelijkbaar maar er is een klein verschil in aankomsttijd. Een mogelijke reden voor deze afwijking is dat de lading geen puntbron is. De bolvorm van de lading wordt verstoord door de ontsteker. Door de ontsteker naar boven te richten is de "focus" van de schokgolf naar boven gericht wat de eerder aankomst van de schokgolf bij sensor 3 kan verklaren. Een andere reden voor de afwijking kan zijn dat de lading niet helemaal in de hartlijn van de opstelling is geplaatst waardoor de afstand naar de sensoren verschillend is. Deze afwijking kan ook optreden bij een proef uit de testserie waardoor de proeven binnen een serie goed met elkaar worden vergeleken voordat er een uitspraak wordt gedaan.



Figuur 57: Lbuis 0m, dplaat 0m, dlading 0m.

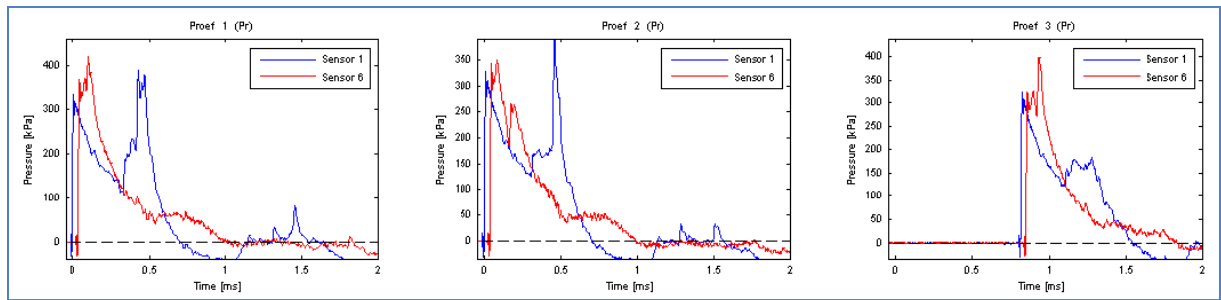
De proeven met een buislengte van 1 meter blijken uit bovenstaande analyse een constanter beeld op te leveren, voor de sensoren 3 en 6, dan de buis van 0,5 meter.

4.4. Vlakheid van de schokgolf

Een uitspraak over de vlakheid van de schokgolf is niet eenvoudig te doen bij deze proeven. Een manier om de vlakheid van de schokgolf te beschouwen is door de sensoren 1 en 6 met elkaar te vergelijken. De sensoren zijn niet symmetrisch in de testplaat geplaatst en de afstand van de lading naar de sensoren is hierdoor verschillend. Dit geeft bij een detonatie in het open veld een verschil in aankomsttijd en bovendien een verschillende piekoverdruk. Bij een tunnel die lang genoeg is om het schokfront zich te laten ontwikkelen tot een vlak schokfront zouden de sensoren geen verschil in aankomsttijd mogen laten zien. Ook de piekoverdruk zal dan gelijk moeten zijn.

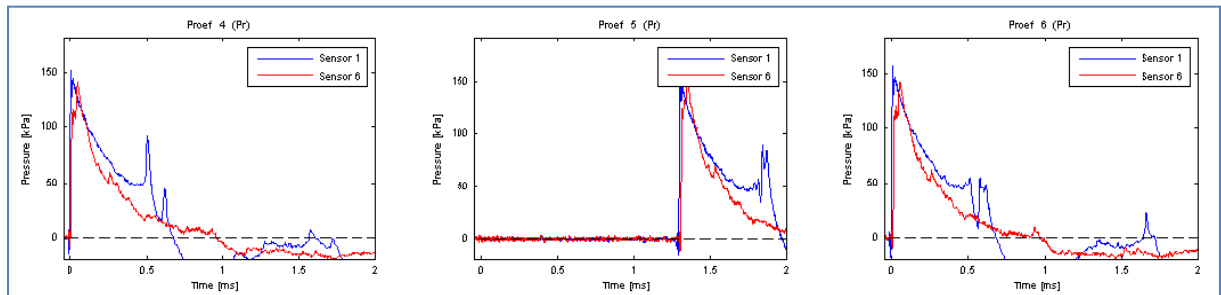
Voor deze vergelijking zijn de sensoren 1 en 6 bij alle proeven in een grafiek afgebeeld en opgenomen in bijlage 4. Wederom is hierbij de bewerking die was geprogrammeerd om de grafieken gelijk af te beelden uitgezet.

In figuur 58 wordt deze vergelijking voor proefserie 1 afgebeeld. Hierin is te zien dat sensor 1 een tweede piek vertoont en sensor 6 niet. Deze tweede piek kan het gevolg zijn van een nog niet volledig vlakke schokgolf. De tweede piek is dan de reflectie die optreedt. De plaats van de lading heeft geen zichtbare invloed op het wel of niet optreden van deze tweede piek. De tweede piek komt overeen met een typische tijd-druk profiel voor een gereflecteerde schokgolf in een gesloten ruimte zoals deze is opgenomen in figuur 4 uit hoofdstuk 2.



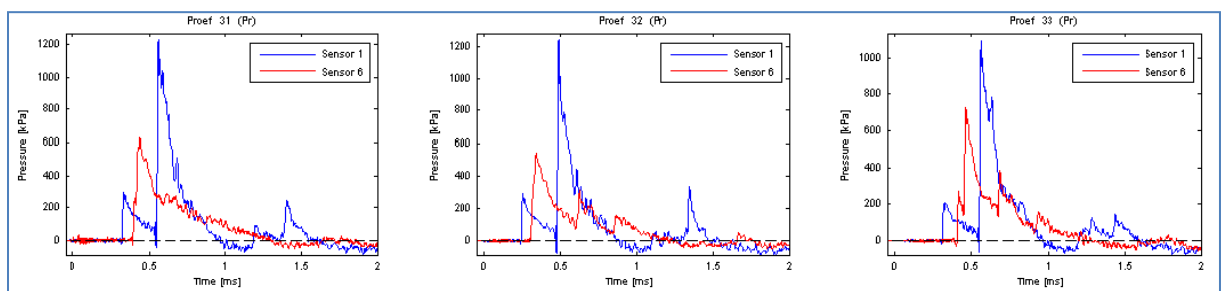
Figuur 58: Lbuis 1m, dplaat 0,005m, dlading 0m.

In tegenstelling tot de invloed op de piek heeft de plaats van de lading wel een invloed op de aankomsttijd. Hiertoe is in afbeelding 59 de tweede proefserie afgebeeld. De aankomsttijden bij deze proeven verschillen veel minder dan die in afbeelding 58. Bij deze vergelijking is opvallend dat de verschillen in aankomsttijden duidelijk zijn te onderscheiden voor de proeven waarbij de lading voor de tunnelingang is geplaatst en de proeven waarbij de lading in de tunnelingang is geplaatst. De proeven waarbij de lading voor de tunnelingang zijn geplaatst laten een kleiner verschil in aankomsttijd zien. Dit is te verklaren doordat de schokgolf bij het binnengaan van de tunnel al min of meer vlak is.



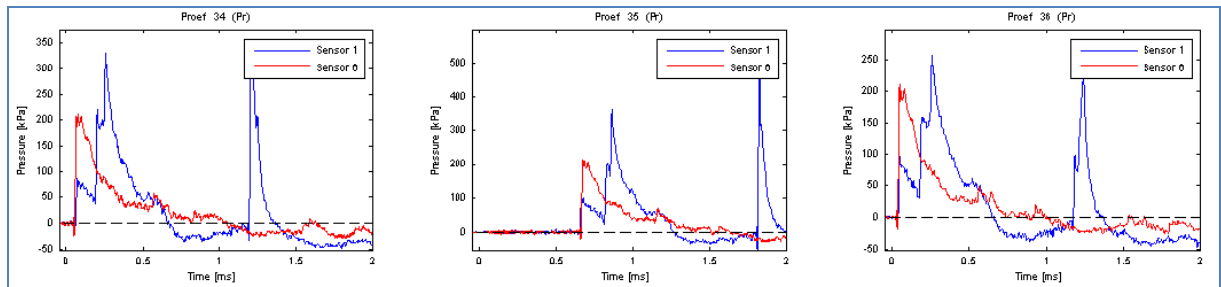
Figuur 59: Lbuis 1m, dplaat 0,005m, dlading 0,30m.

Als de tunnallengtes onderling worden vergeleken zijn grotere verschillen zichtbaar bij de buis van 0,5 meter. Een voorbeeld hiervan is opgenomen in figuur 60. Zowel de pieken als de aankomsttijden zijn hier heel verschillend. Sensor 6 laat bij deze proeven ook een tweede piek zien.



Figuur 60: Lbuis 0,5m, dplaat 0,005m, dlading 0m.

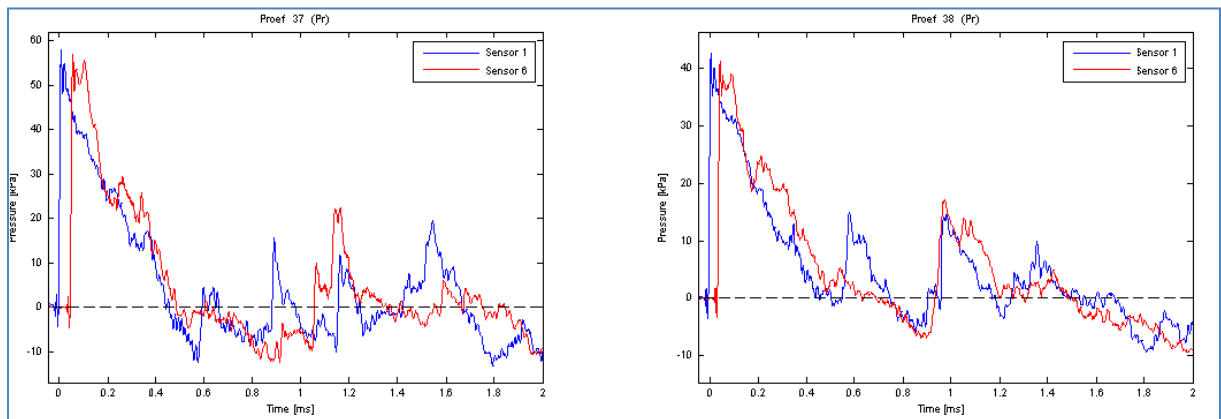
Als de proefseries bij deze buis lengte onderling worden vergeleken met betrekking tot de plaats van de lading valt weer op dat de plaats van de lading een invloed heeft op de aankomsttijd. De proeven met de lading buiten de tunnelingang hebben een aankomsttijd die voor beide sensoren nagenoeg gelijk is.



Figuur 61: Lbuis 0,5m, dplaat 0,005m, dlading 0,30m.

De lading voor de buisingang plaatsen leidt in alle gevallen tot nagenoeg gelijke aankomsttijden in tegenstelling tot een lading die in de tunnelingang is geplaatst.

Ter controle is in figuur 62 de vergelijking opgenomen van de proeven zonder tunnel. Hierbij kan worden opgemerkt dat de aankomsttijden, zoals te verwachten, een verschil laten zien. Dit verschil is aanzienlijk groter dan in figuur 57 uit de vorige paragraaf. Dit kan worden verklaard doordat de sensoren niet meer op dezelfde afstand van de lading zijn geplaatst waardoor de schokgolf er langer over doet om de sensor buiten het centrum van de plaat te bereiken. Deze controle laat zien dat de tunnel het verschil in aankomsttijd verkleint.

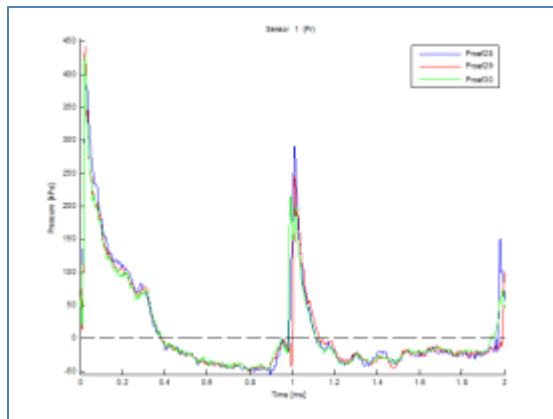


Figuur 62: Lbuis 0m, dplaat 0m, dlading 0m.

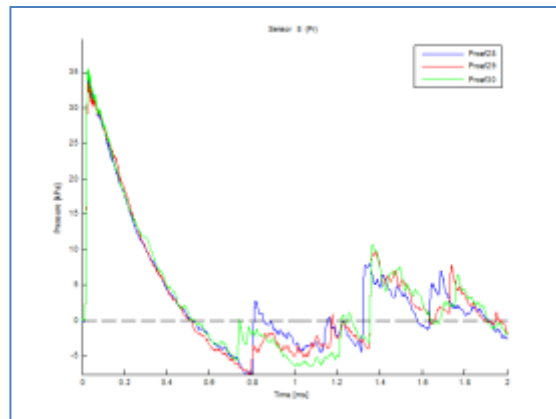
4.6 Reproduceerbaarheid

De reproduceerbaarheid van het onderzoek geeft aan of de procedure die wordt gevolgd om tot de resultaten van de proeven te komen nauwkeurig is. De resultaten moeten door anderen in een andere omgeving met vergelijkbare materialen en vergelijkbare omstandigheden te reproduceren zijn.

Om een uitspraak te kunnen doen over de reproduceerbaarheid worden de meetsignalen van de sensoren binnen een serie met elkaar vergeleken. De proeven die in serie zijn uitgevoerd moeten vergelijkbare metingen opleveren. Als voorbeeld zijn in figuur 63 de signalen van sensor 1 uit de proeven 28,29 en 30 afgebeeld. In figuur 64 staan voor dezelfde proeven de signalen van sensor 8. De signalen zijn hierbij over elkaar heen geplaatst waardoor een goede vergelijking mogelijk is.



Figuur 63: Lbuis 0,5m, dplaat 0,005m, dlading 0,3m.



Figuur 64: Lbuis 0,5m, dplaat 0,005m, dlading 0,3m.

De figuren laten een duidelijke overlap zien tussen de signalen. Hiermee is de reproduceerbaarheid van de proeven binnen dit onderzoek aangetoond.

5. Conclusie en aanbevelingen

Het voorgaande rapport beschrijft het onderzoek dat is uitgevoerd om de onderzoeksvraag te beantwoorden. De onderzoeksvraag die in hoofdstuk 1 is opgesteld luidt: Hoe worden de piekoverdruk, de belastingduur en de hiermee te bepalen impuls beïnvloed door het toepassen van een tunnelconstructie in vergelijking met een open veld detonatie?

In de analyse in hoofdstuk 4 zijn een aantal constatering gedaan met betrekking tot de parameters die worden onderzocht. De parameters waar dit onderzoek zich op heeft gericht zijn: De plaats van de lading, de lengte van de buis en de afstand tussen de uitgang van de buis en de testplaat. In de conclusie zullen de bevindingen die voor deze parameters zijn gedaan worden beschreven.

De KMS is in de nabije toekomst van plan nader onderzoek uit te voeren naar het gebruik van tunnels om de schokgolf te versterken. In de aanbevelingen zijn de conclusies verwerkt tot punten die bij het uitvoeren van een dergelijk onderzoek kunnen worden meegenomen.

5.1 Conclusie

Door de gemeten gereflecteerde piekoverdruk in het centrum van de plaat te vergelijken met de omgerekende piekoverdruk in het open veld kan een uitspraak worden gedaan over de versterking die de tunnel levert.

Voor de plaats van de lading is aangetoond dat deze invloed heeft op de versterking van de piekoverdruk. Een lading in de tunnelingang levert een grotere versterking op. Voor de lading buiten de tunnelingang geldt dat deze een nagenoeg gelijke aankomsttijd oplevert over de oppervlakte van de plaat. De versterkingsfactor is voor de druk en impuls ongeveer gelijk als deze buiten de tunnelingang wordt geplaatst.

Hieruit wordt geconcludeerd dat er voor versterking van alleen de druk het beste gewerkt kan worden met een lading in de tunnelingang. Als de druk en impuls beide in gelijke mate versterkt moeten worden kan de lading het beste buiten de tunnel worden geplaatst.

De aankomsttijd wordt duidelijk beïnvloed door de plaats van de lading. Bij de lading die buiten de tunnelingang is geplaatst treedt een kleiner verschil in aankomsttijd op verdeeld over de plaat.

Het verschil in buislengte kan niet goed worden onderzocht vanwege de verandering van de afstand tot de lading. Wel wordt vastgesteld dat de langere tunnel een constanter beeld oplevert. In paragraaf 4.4. wordt afgeleid dat de tunnallengte van 1 meter een vlakke schokgolf oplevert dan de tunnel van 0,5 meter. Deze conclusie wordt onderbouwd door de grote verschillen die zichtbaar zijn in druk en impuls bij een buislengte van 0,5 meter.

De afstand van de uitgang van de tunnel tot de testplaat zorgt voor een afname van de druk en van de impuls. Deze afname is echter pas duidelijk zichtbaar als deze afstand groter is dan 5 cm. Hierbij moet worden opgemerkt dat bij de proeven zonder afstand in de praktijk altijd een kier aanwezig was. Ondanks deze onnauwkeurigheid wordt vastgesteld dat de afstand tussen de tunnel en de testplaat een toenemende invloed heeft naarmate de afstand groter wordt.

Het toepassen van de EVA methode bij toepassing op de onderzochte situaties leid niet tot het gewenste resultaat. De voorspelde waarden komen niet exact overeen met de gemeten waarden maar deze geven wel een goede indicatie van de te verwachten druk en impuls.

De gebruikte tunnel is prima in staat gebleken om de detonaties van de toegepaste ladingen te weerstaan. Er zijn achtereenvolgens 38 proeven met 5 gram en 1 proef met 20 gram uitgevoerd

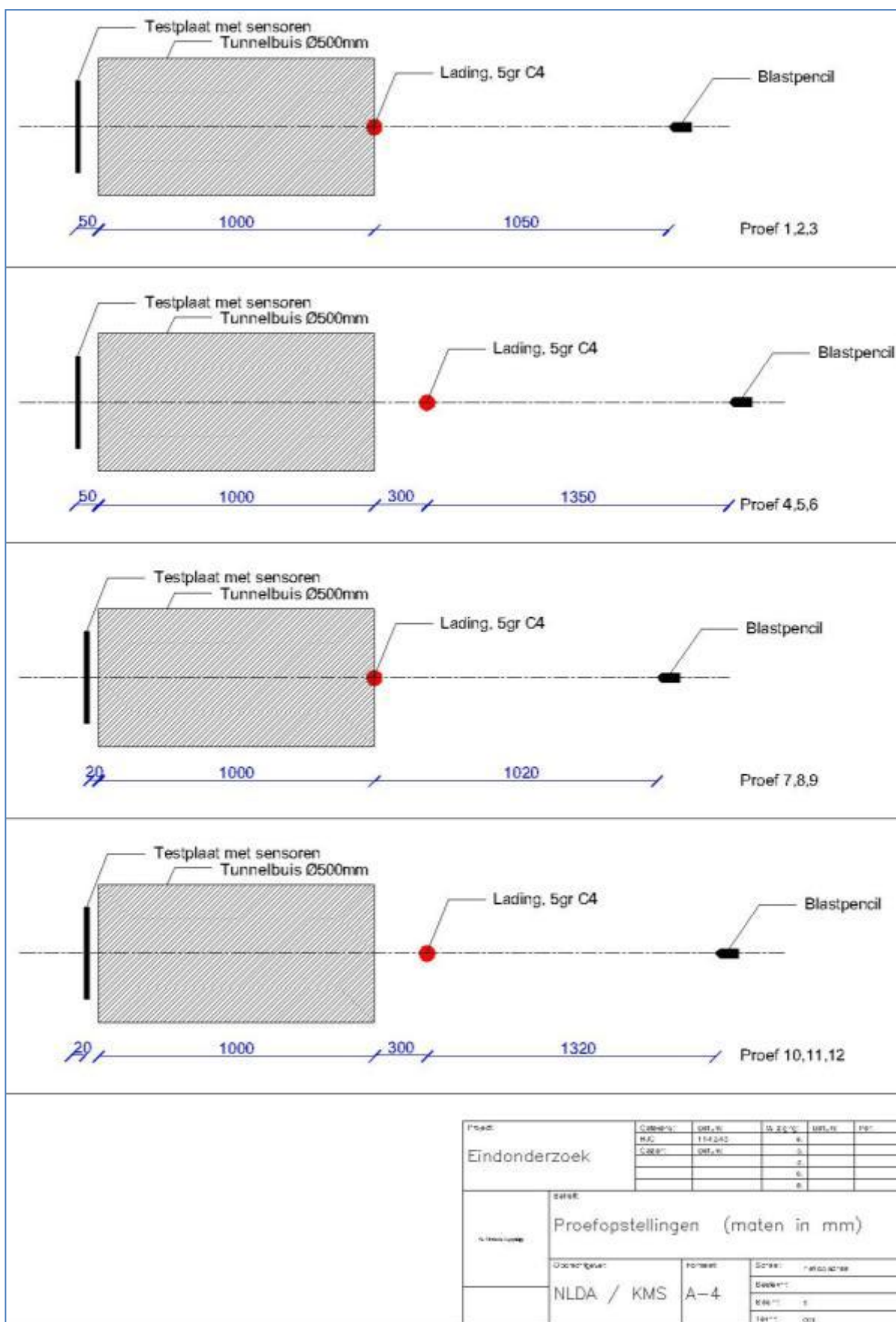
zonder dat de buis bezwijkt. De lading waarbij de buis bezwijkt in de 40e proef is 40 gram. Doordat er geen ruimte is gelaten tussen de tunnel en de plaat zorgt de reflecterende druk waarschijnlijk voor het bezwijken van de buis.

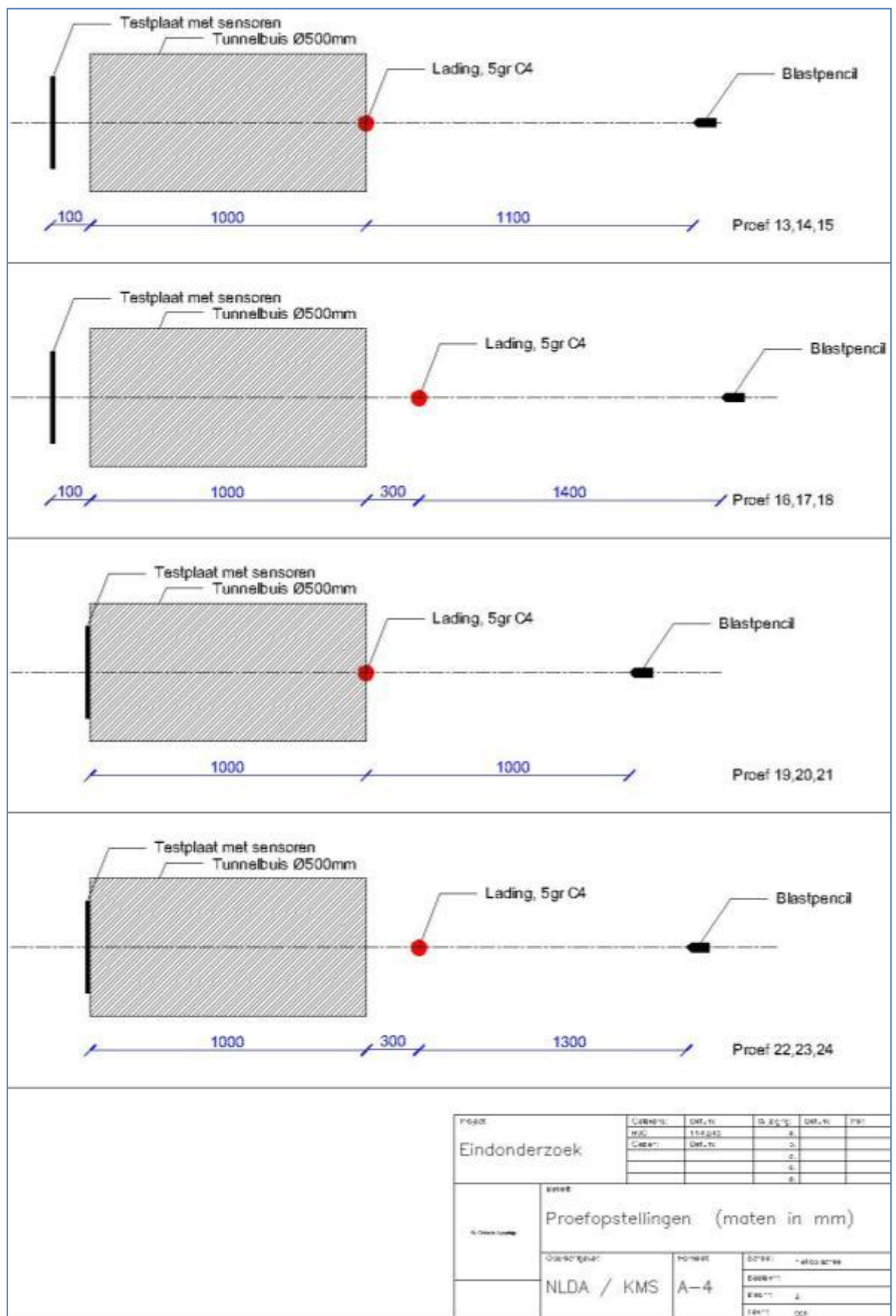
5.2 Aanbevelingen

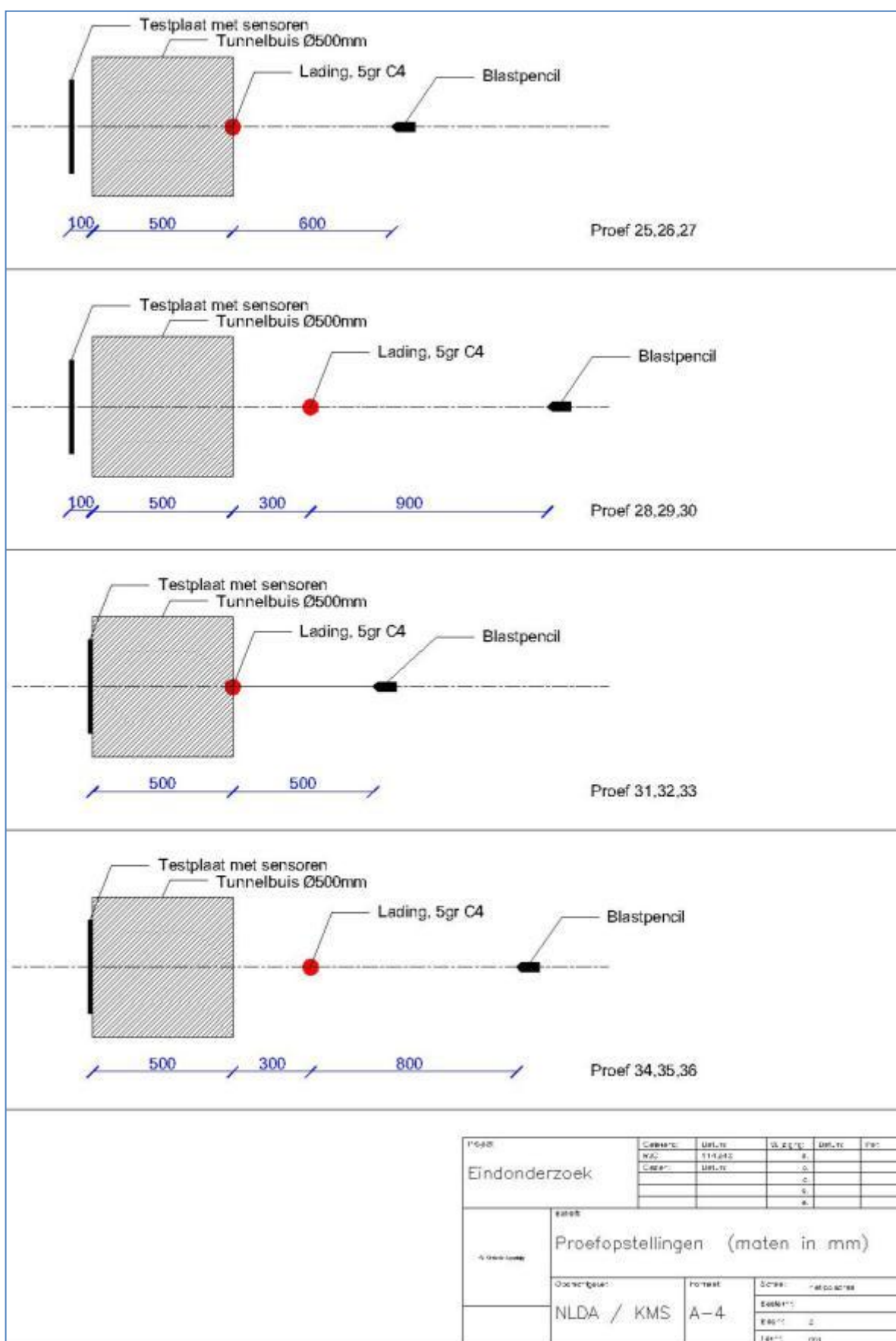
Uit het uitgevoerde onderzoek kunnen de volgende aanbevelingen worden gedaan:

- Een tunnel is een uitstekend middel om de druk en de impuls te vergroten. De plaats van de lading is zeer belangrijk voor de mate waarin de tunnel deze schokgolfparameters versterkt. Als er alleen een grote drukverhoging wordt verlangd, kan de lading in de tunnelingang worden geplaatst. Als de druk en impuls een vergelijkbare vergroting moeten krijgen kan de lading het beste buiten de tunnelingang worden geplaatst.
- Bij een vervolgonderzoek is het verstandig om slechts een enkele variabele tegelijk te onderzoeken. Als van deze variabele de invloed is vastgesteld, kan worden vervolgd met een volgende. Het tegelijk onderzoeken van meerdere variabelen vormt een probleem als de variabelen die onderzocht worden allemaal een invloed hebben op de grootheden die worden gemeten.
- Een vergelijkbaar onderzoek kan numeriek worden uitgevoerd. In dit onderzoek zijn slechts de drukken aan het einde van de tunnel gemeten waardoor er geen beeld ontstaat over de ontwikkeling van de schokgolf in de tunnel. Een numerieke analyse kan hier inzicht in verschaffen en de resultaten kunnen gecombineerd worden.
- De lading die buiten de tunnelingang is geplaatst laat een even grote vergrotingsfactor zien voor de druk en de impuls. Bij de lengte van 0,5 meter treden hierbij afwijkingen op. Aanvullend onderzoek kan uitwijzen of dit toevalligheden zijn of dat dit structureel is.
- Er is geconcludeerd dat er een afwijking optreedt tot de analytisch berekende resultaten. Het is niet duidelijk waarom deze afwijkingen optreden. Een vergelijkbaar onderzoek met grotere ladinggewichten kan leiden tot betere resultaten. Bij een groter ladinggewicht is de invloed van de ontsteker kleiner. Hiermee wordt bedoeld dat de hoeveelheid springstof in de ontsteker in dit onderzoek relatief groot was. Als er een groter ladinggewicht wordt toegepast heeft de TNT-equivalentie van de ontsteker ook minder invloed.
- Om de invloed van de ontsteker te kennen en de invloed die deze op de onderzoeksresultaten heeft is het nodig om de invloed van een ontsteker op de uitwerking van kleine ladingen te onderzoeken. Hiermee wordt bedoeld dat de exacte TNT equivalentie van de ontsteker moet worden onderzocht en dat de plaatsing van de ontsteker en de invloed die deze plaatsing heeft op de schokgolf moet worden onderzocht.

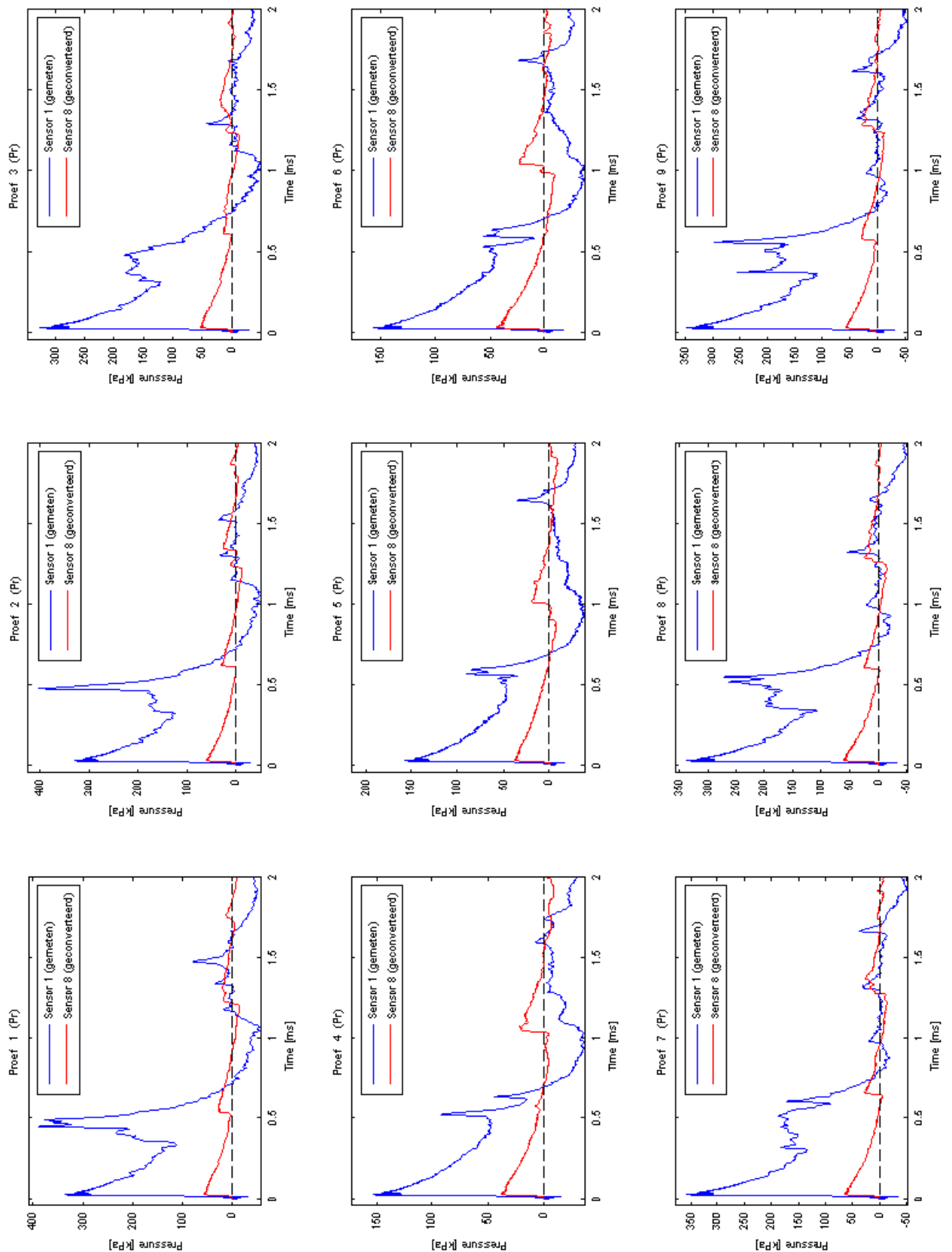
- [1] Ambrossini, D. (onbekend). *Channeling effects due to explosions in urban environments*. Conicet, Arg.
- [2] Baker, W. E., Cox, P. A., Westine, P. S., Kulesz, J. J., & Strehlow, R. A. (1983). *Explosion Hazards and Evaluation*. Amsterdam - Oxford - New York: Elsevier Scientific Publishing Company.
- [3] Borgers. (2012). *Pyrotechniek en beschermingsconstructies*. Breda: Nederlandse Defensie Academie.
- [4] Borgers, J., Ndambi, J., & Vantomme, J. (2008). *A Volume Approach to Predict Airblast Parameters*. Presented at the 20th MABS symposium.
- [5] Borgers, J., Vantomme, J., & Stoel van der, A. (2013). *The Equivalent Volume Approach*. Breda.
- [6] Borgers, J., Vantomme, J., & van der Stoel, A. (2013). (proposed) Scaling rules for tunnel testing. *International Journal of Protective Structures*.
- [7] Borgers, J., Vantomme, J., & van der Stoel, A. (2013). 15th ISIEMS. *Validation of new blast scaling rules for structural testing*. Potsdam.
- [8] International Organization for Standardization. (2007). *ISO 16933 - Glass in building - Explosion-resistant security glazing - Test and classification for arena air-blast loading*. Switzerland: ISO copyright office.
- [9] Kinney, G. F. (1962). *Explosive Shocks in Air*. New York: The Macmillan Company.
- [10] Mazek, S. A., Wahab, M. M., & Osman, R. A. (2009). Effect of Internal Core Structure Systems on Blast Resistance of Armored Doors inside Tunnels. *13th International Conference on AEROSPACE SCIENCES & AVIATION TECHNOLOGY, ASAT-13*. Cairo: Military Technical College.
- [11] Meyer, G., & Janzon, B. (2011). *Fire and explosion tests in underground structures*. Vasteras: Malardalen University.
- [12] NATO, Group of Experts. (2008). *AASTP-4 Allied Ammunition Storage and Transport Publication 4; Manual on Explosives Safety Risk Analysis*.
- [13] Orfanidis, S. (1996). *Introduction to Signal Processing*. Englewood Cliffs: Prentice-Hall.
- [14] Pennetier, O., Langlet, A., & William-Louis, M. (2012). *Numerical and experimental study of blast wave shape in tunnels*. Bourges, Fr.
- [15] Prins, V. (2011). *Explosies in metrostations; metingen op schaal*. Breda.
- [16] Spranghers, K., Vasilakos, I., Lecompte, D., Sol, H., & Vantomme, J. (2012). Numerical simulation and experimental validation of the dynamic response of aluminium plates under free air explosions. *International Journal of Impact Engineering*, 83-95.
- [17] Vantomme, J. (n.d.). New study proposal WTOD/RSTD. *Resilience of corrugated steel panel structures to blast loading: a combined experimental and numerical approach applied to the evaluation of the compound survival container*. Brussel, Belgie: Koninklijke Militaire School.
- [18] Verschuren, P., & Doorewaard, H. (2007). *Het ontwerpen van een onderzoek*. Den Haag: Uitgeverij LEMMA.

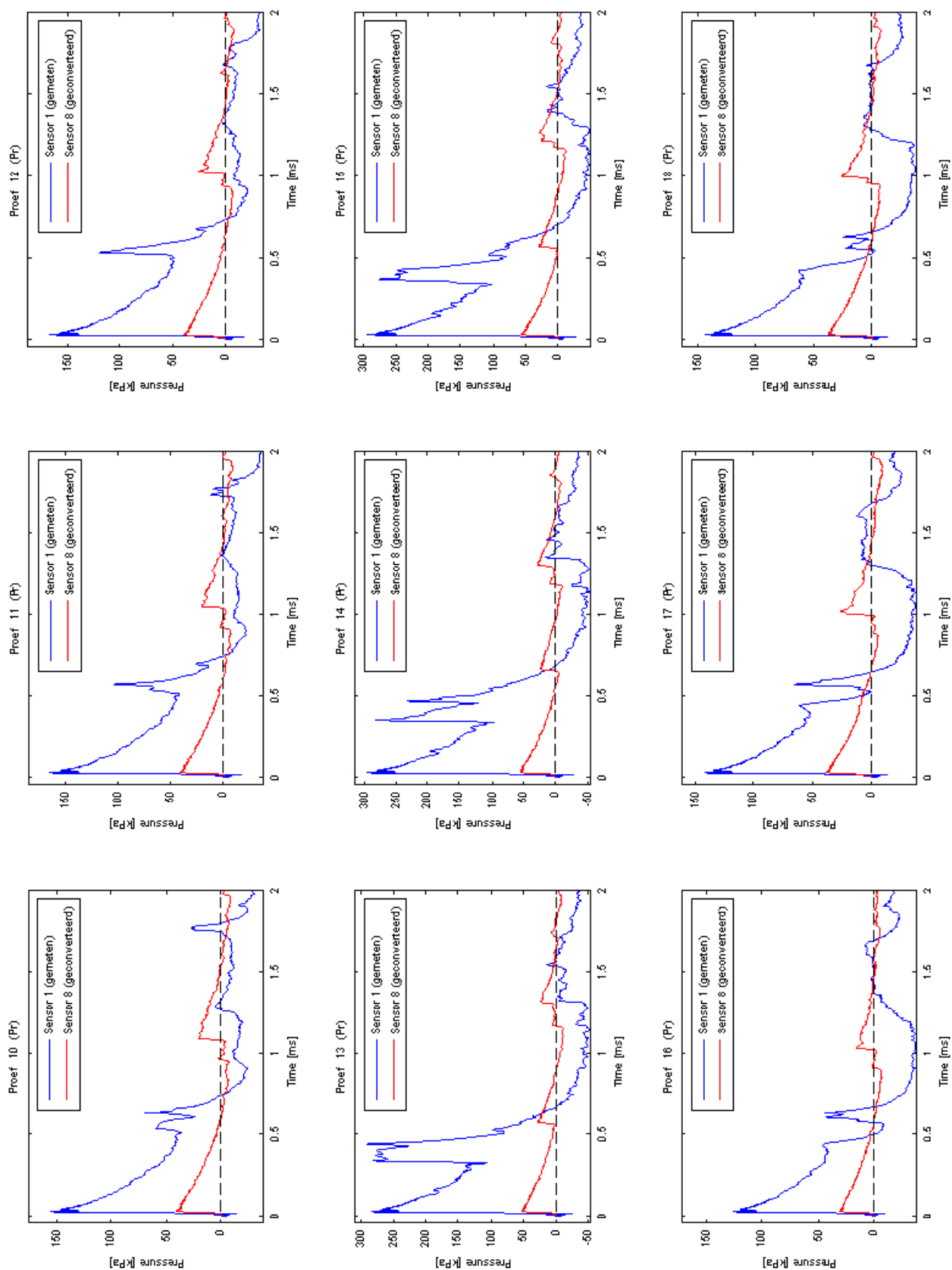


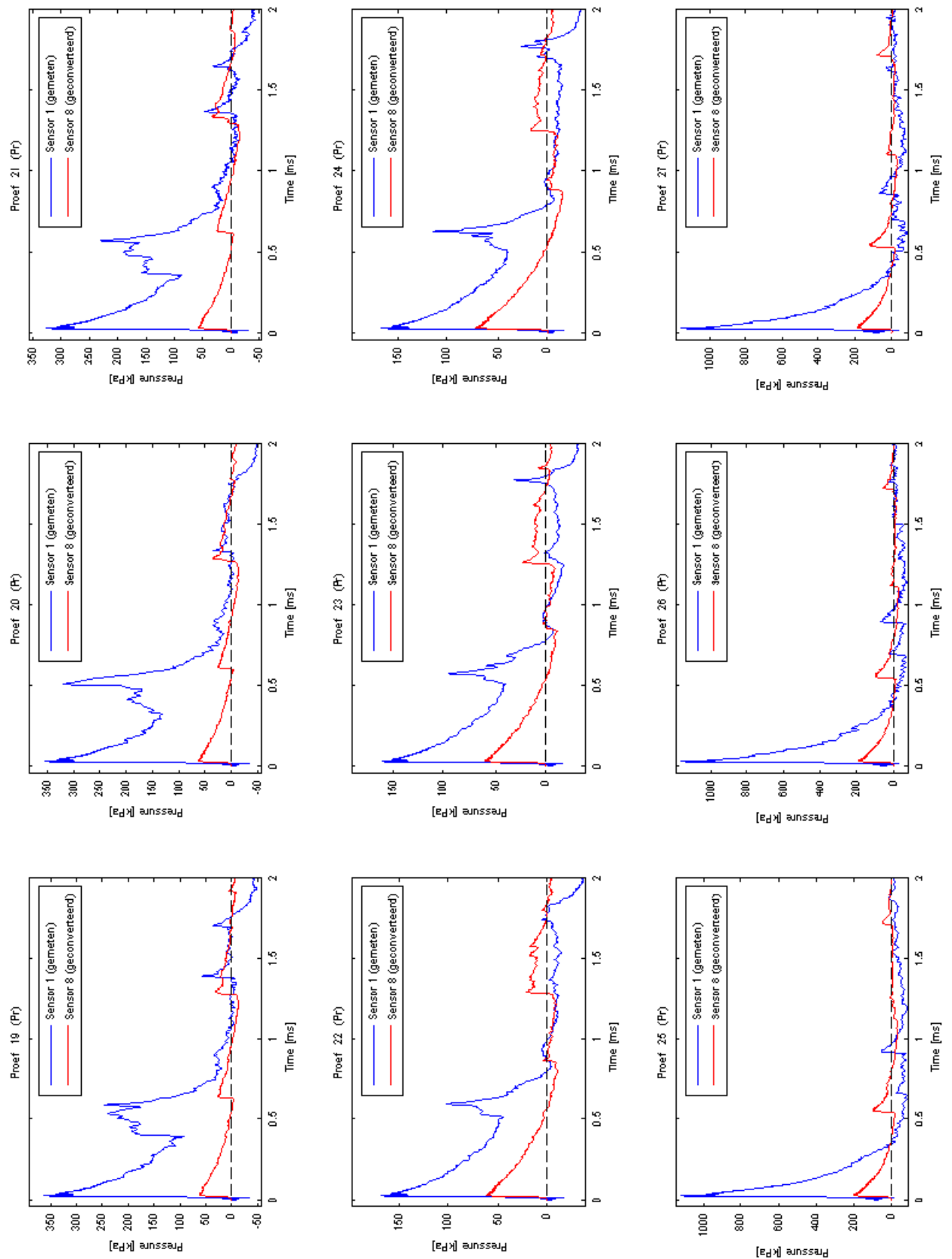


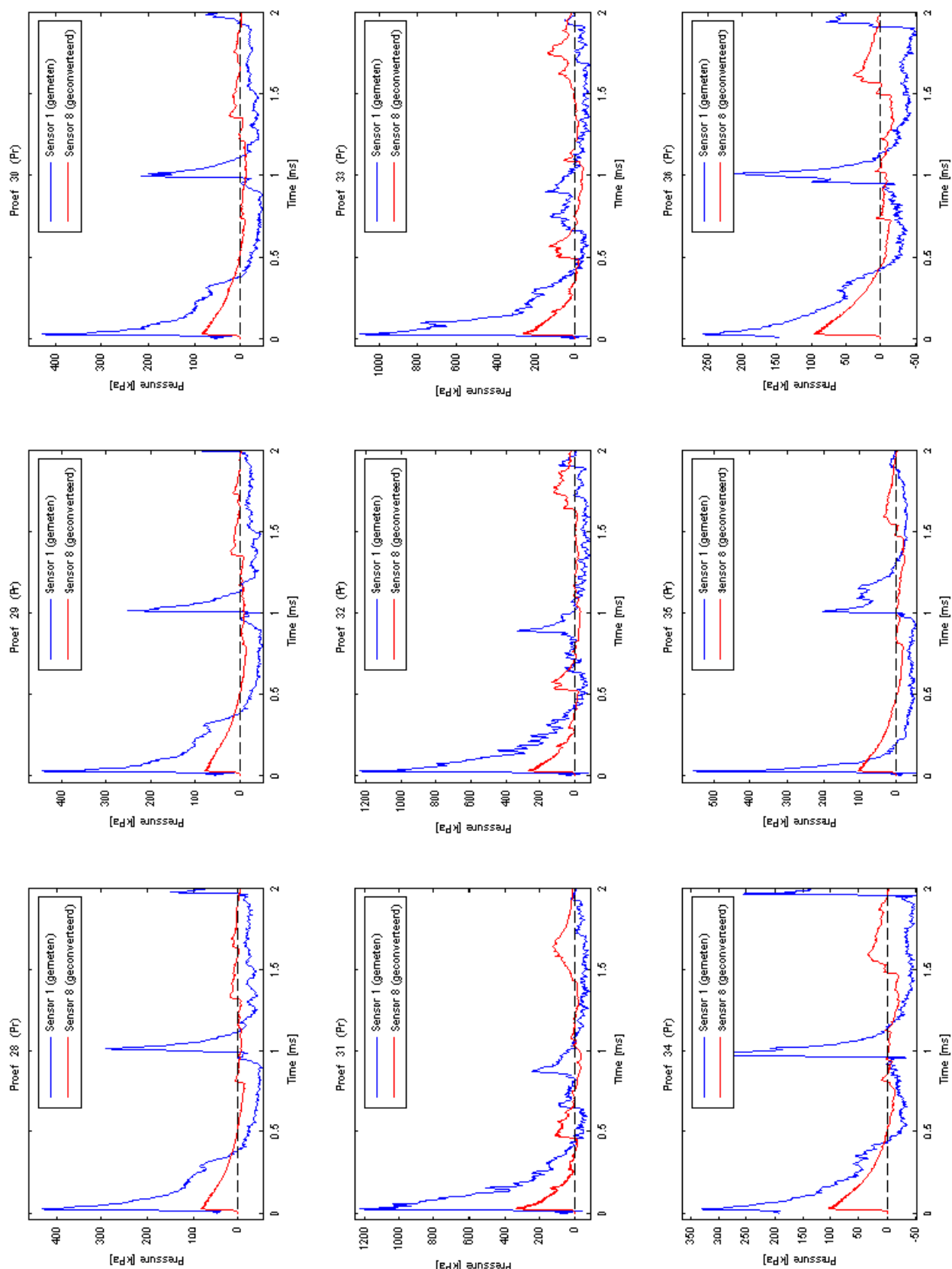


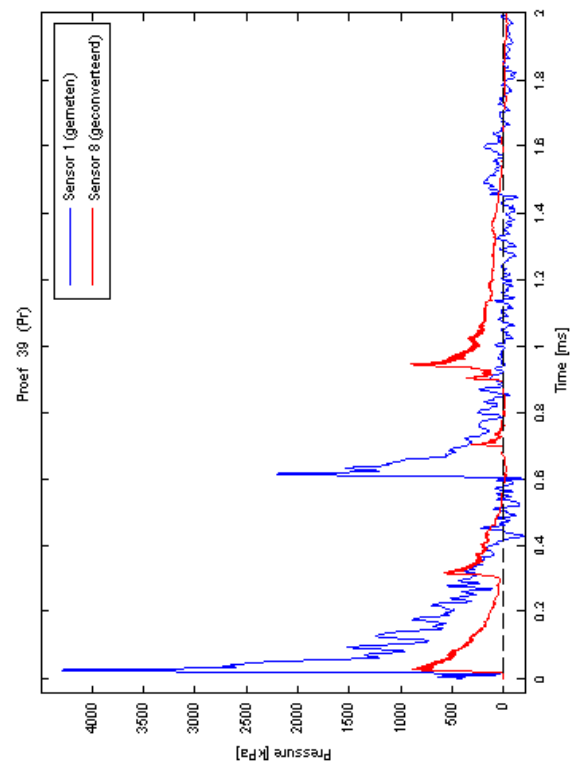
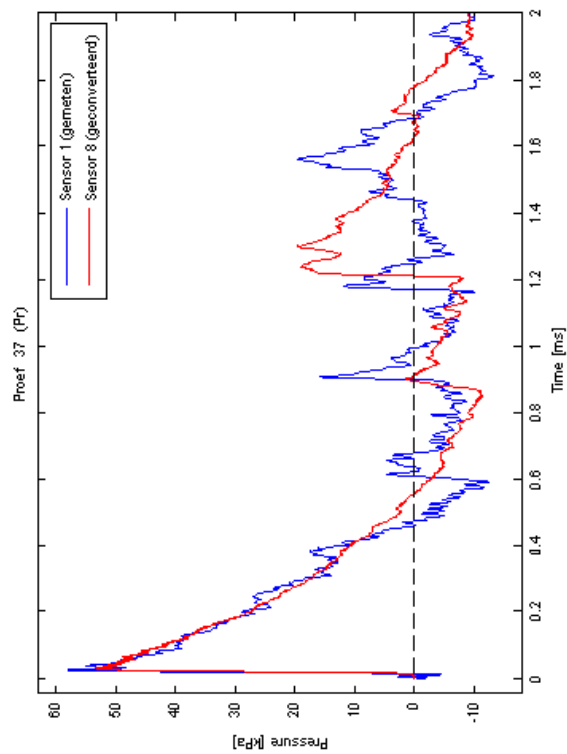
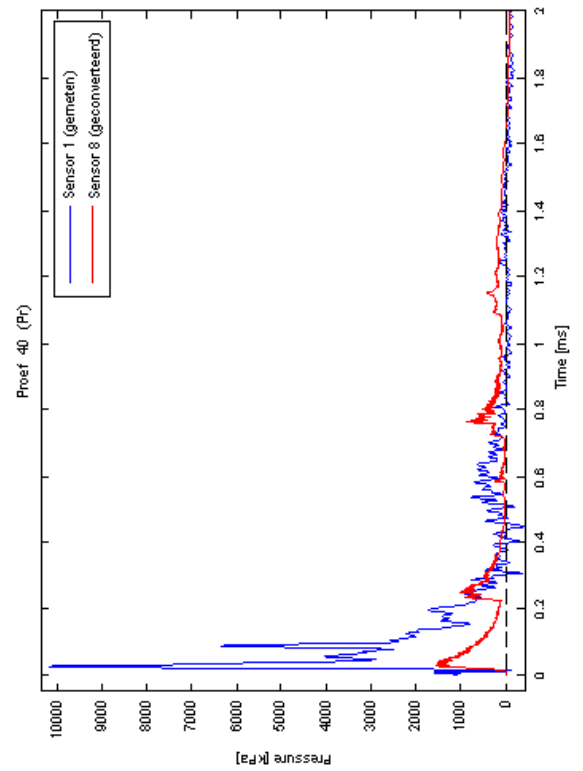
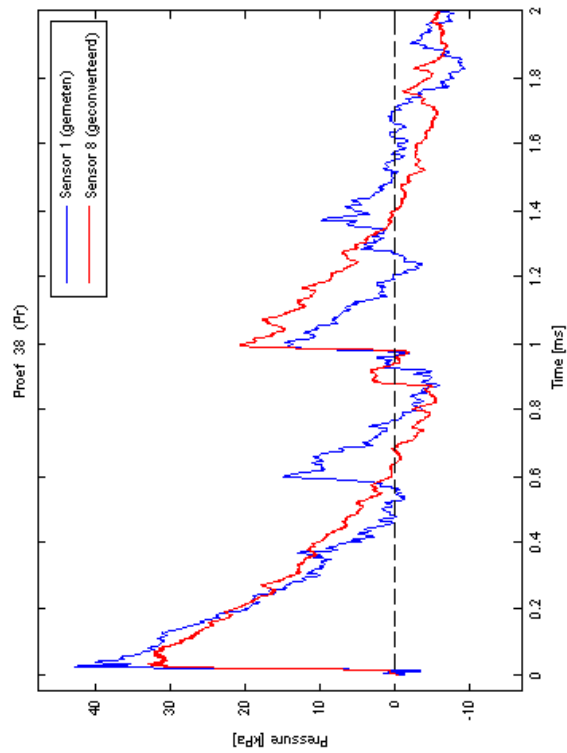


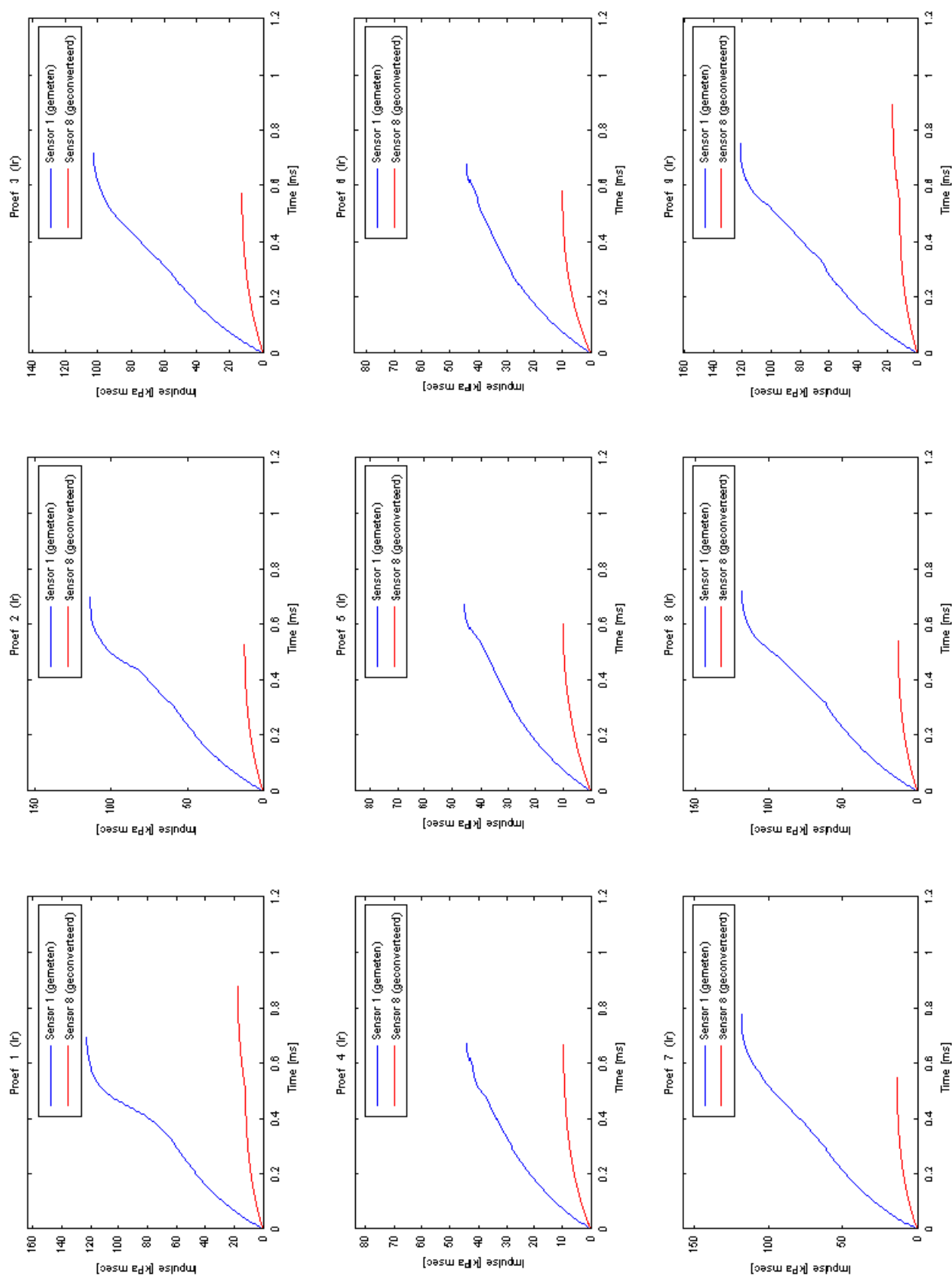


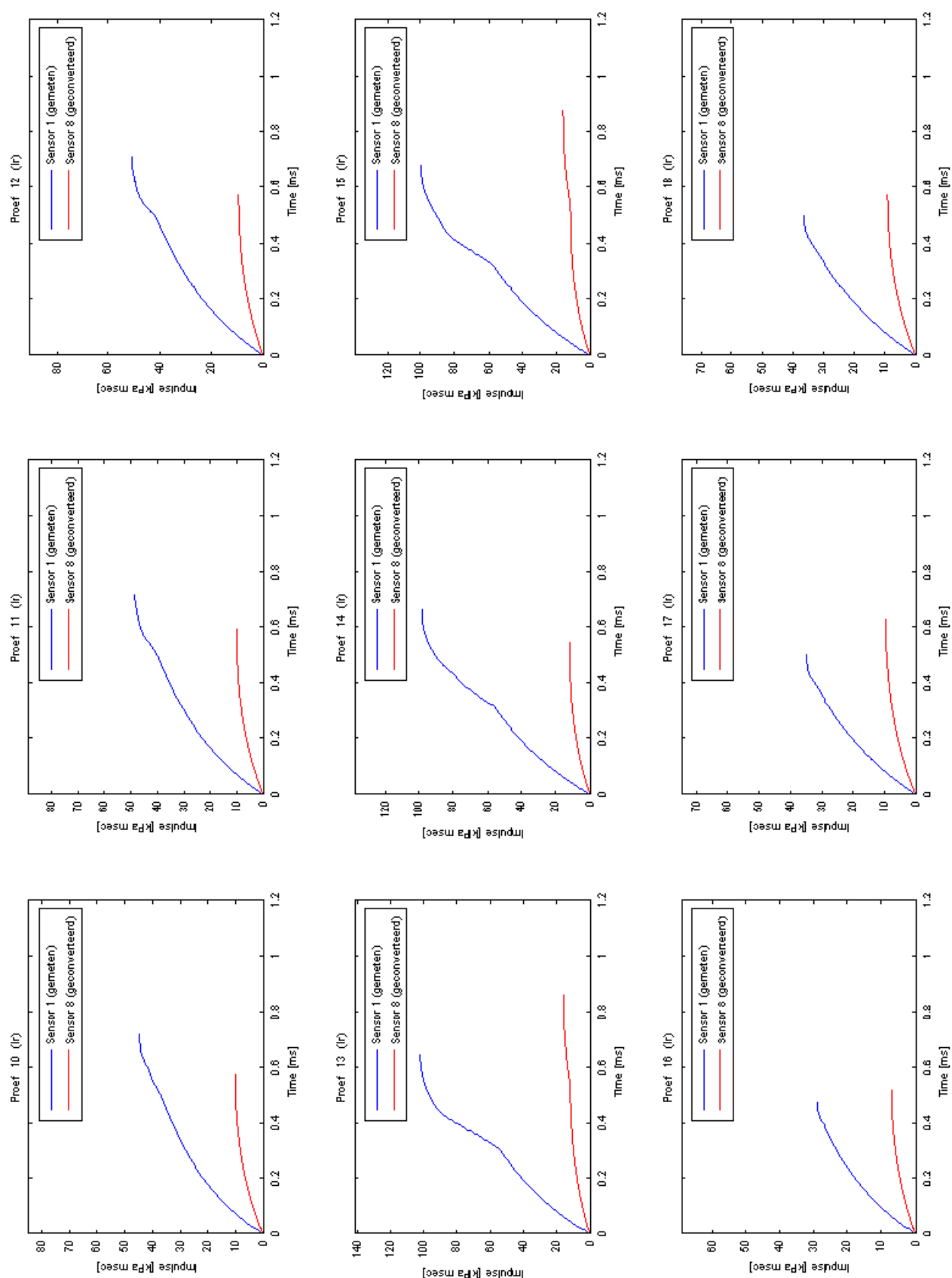


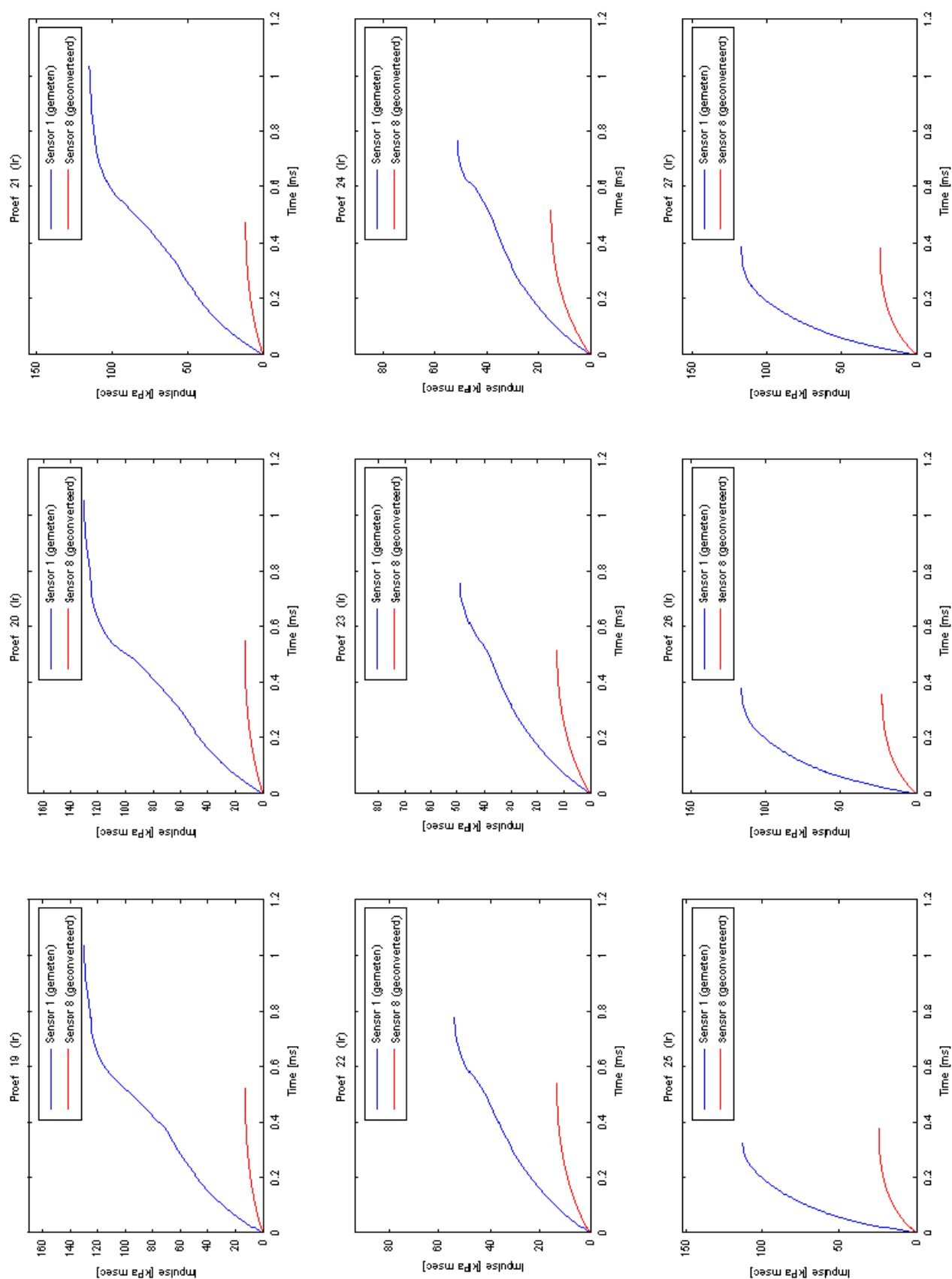


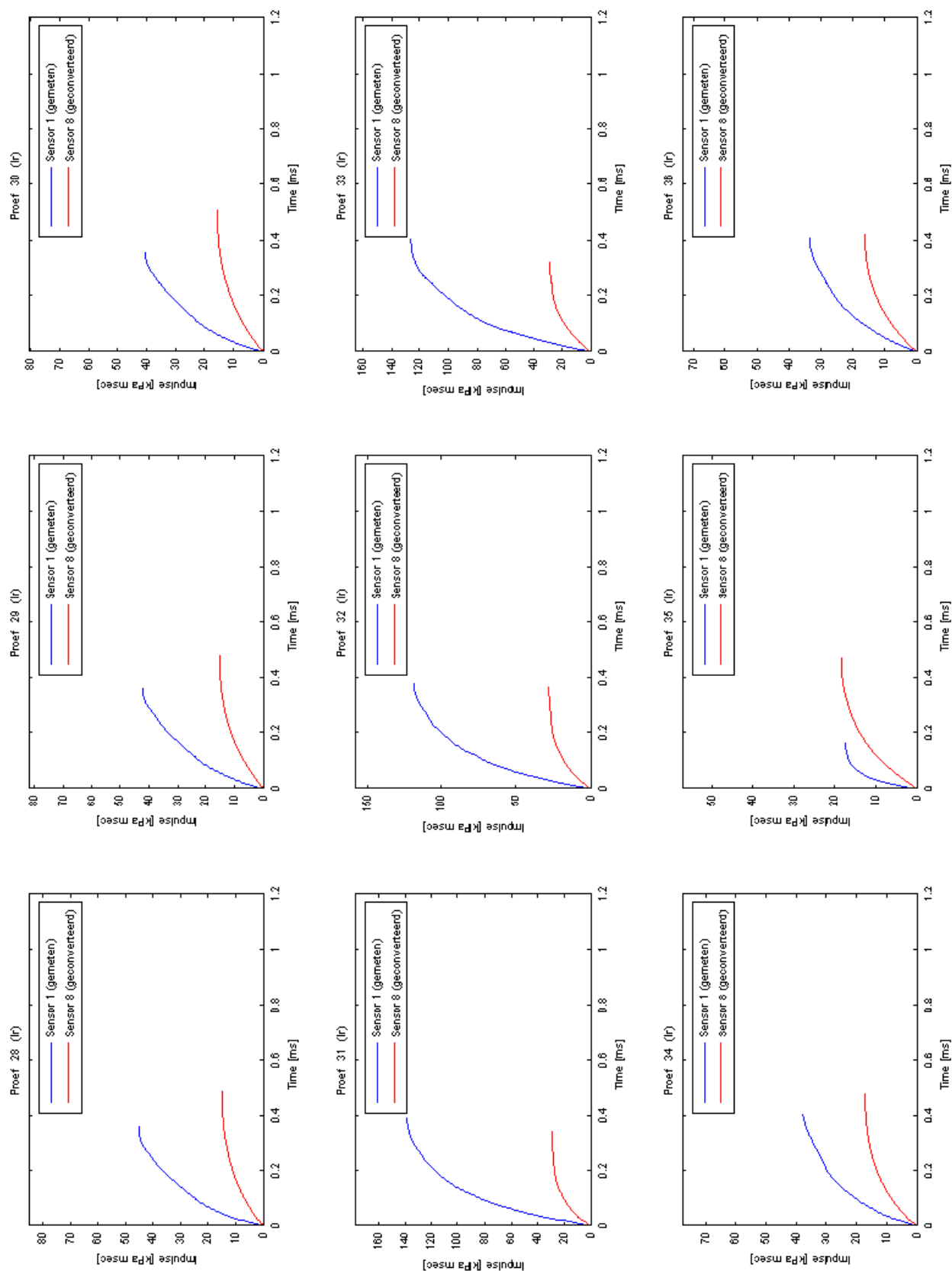


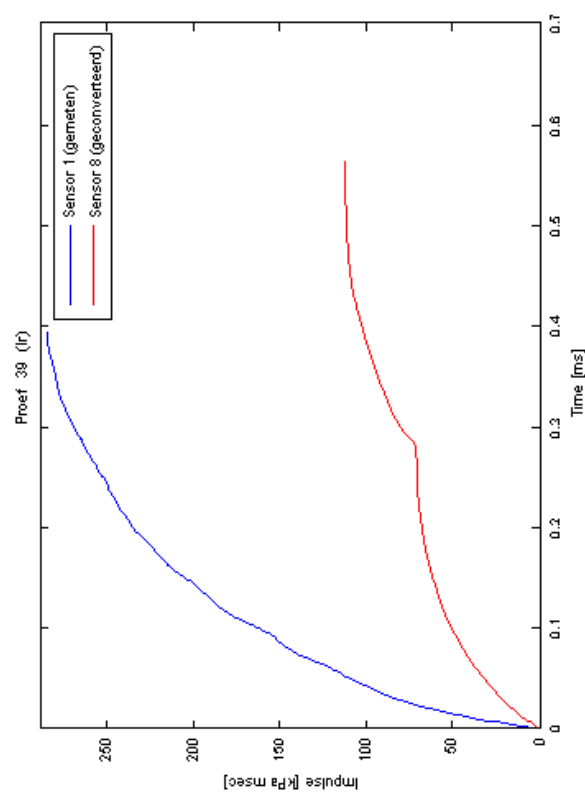
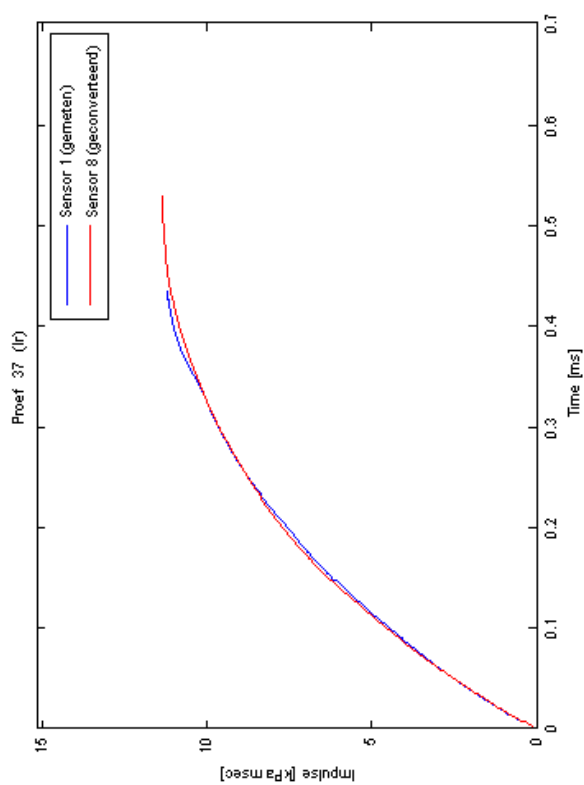
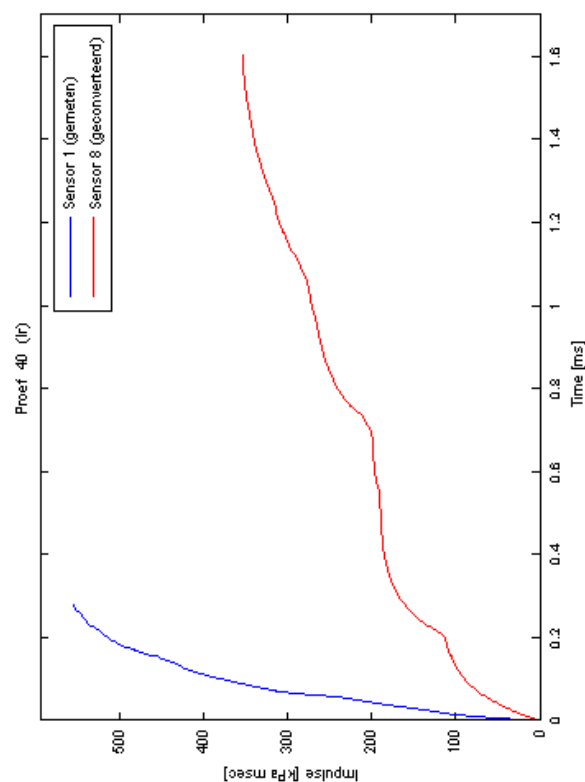
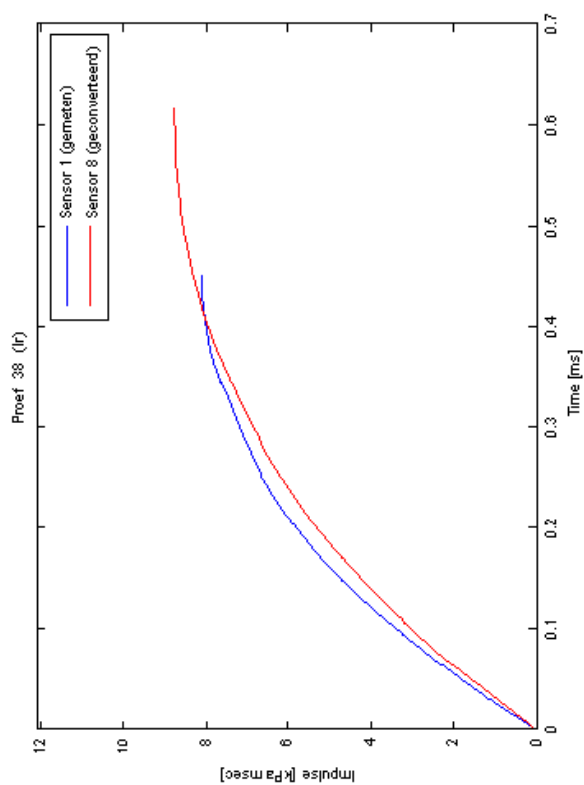


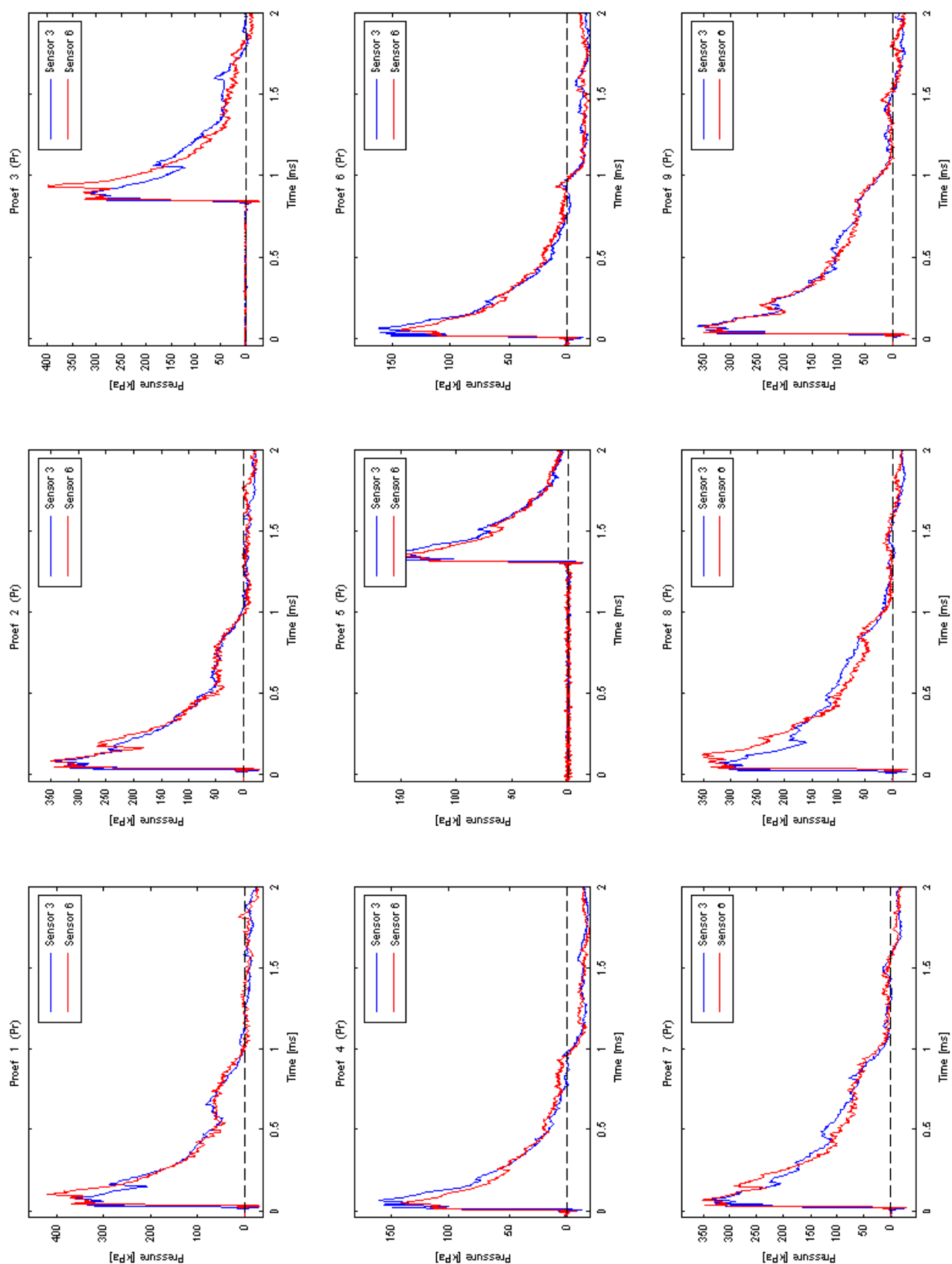


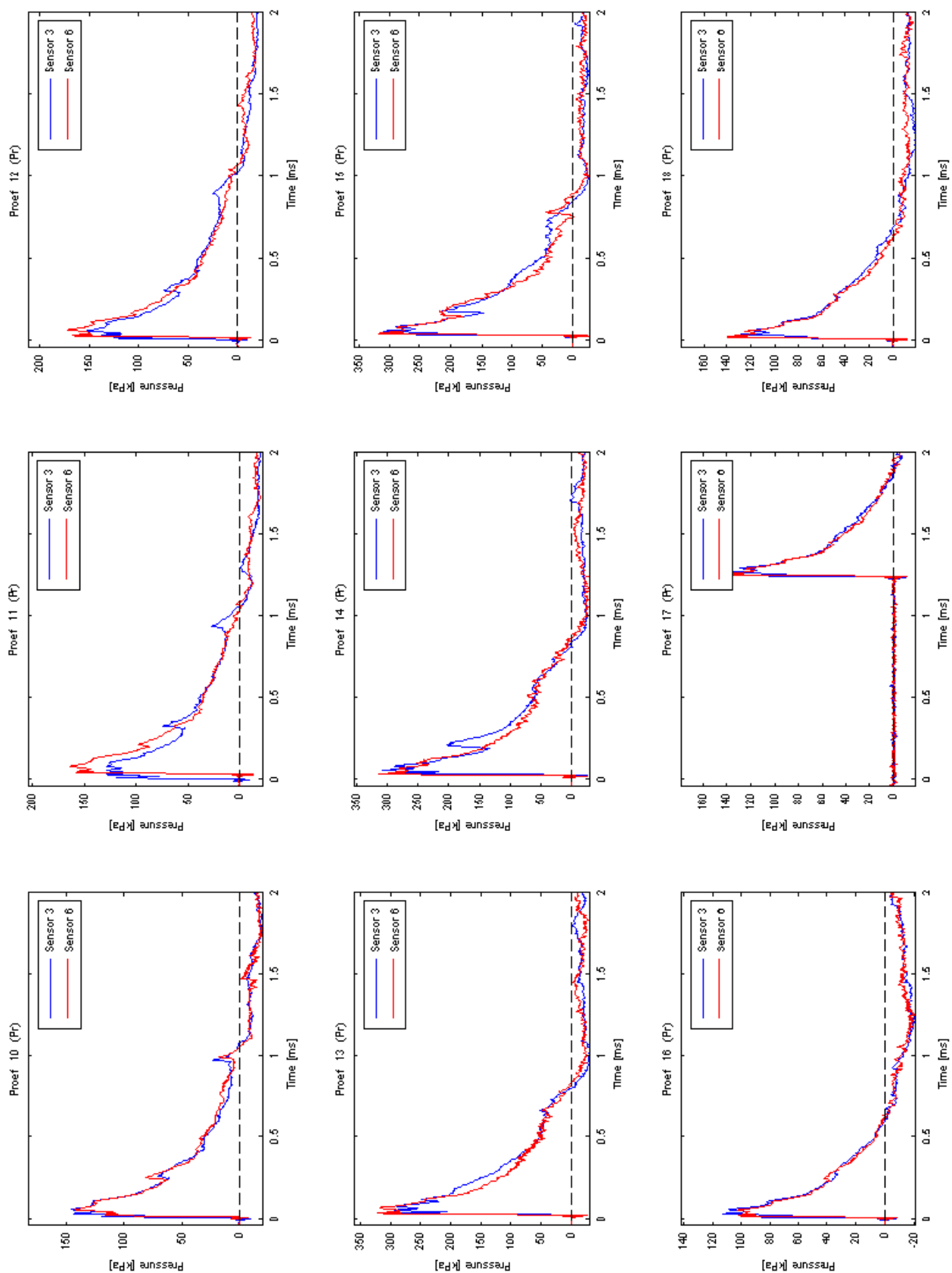


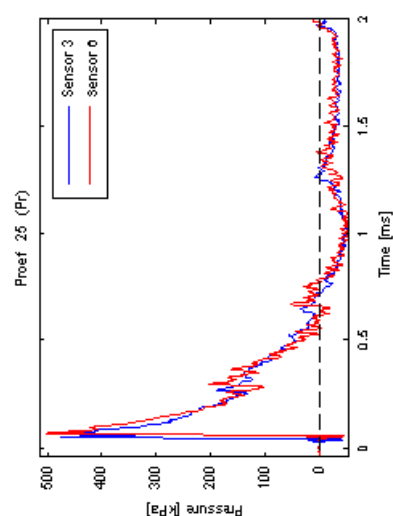
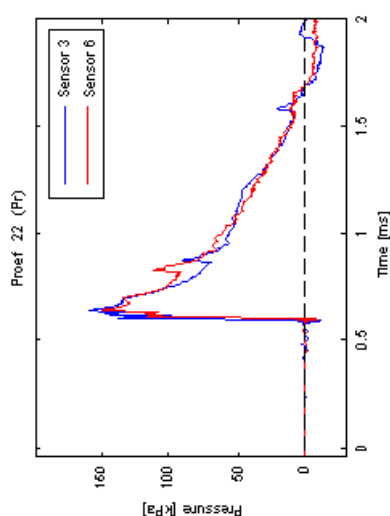
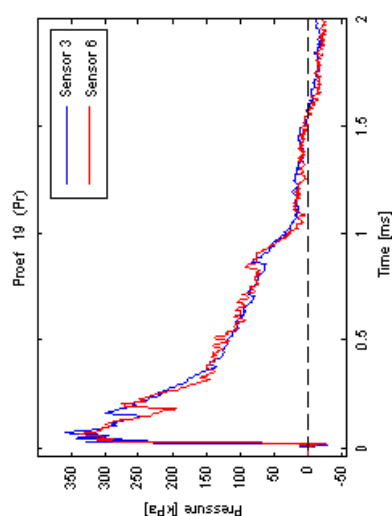
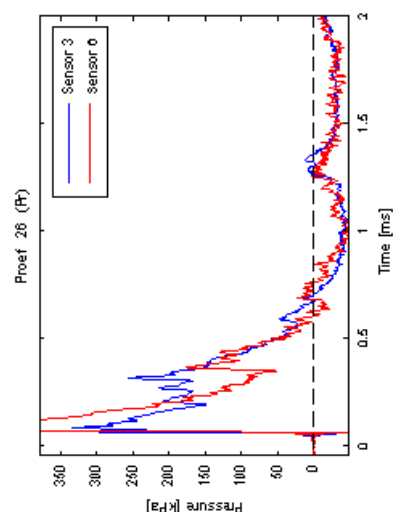
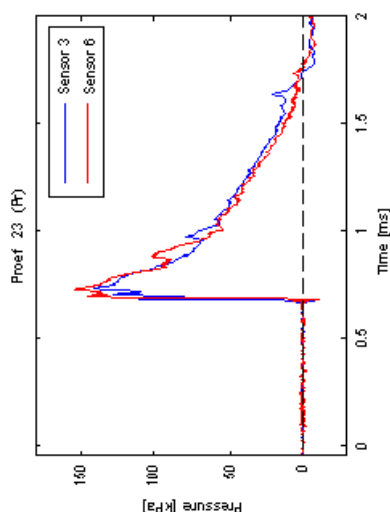
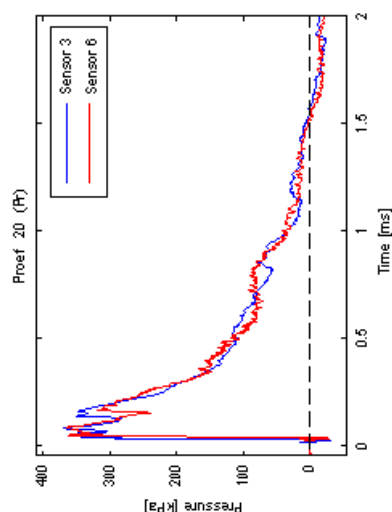
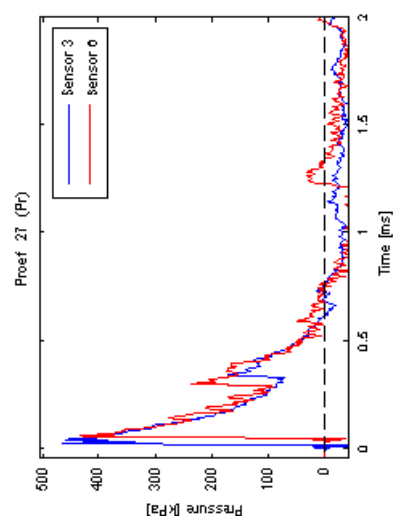
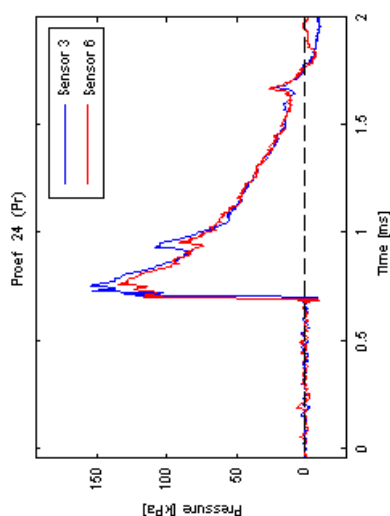
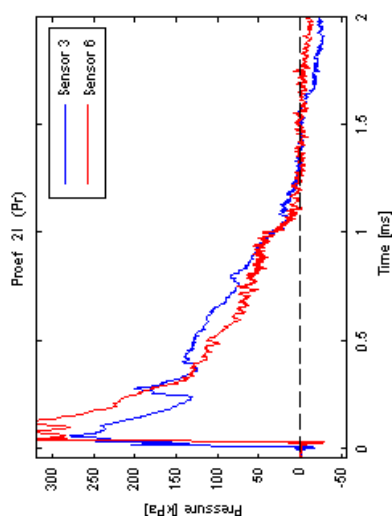


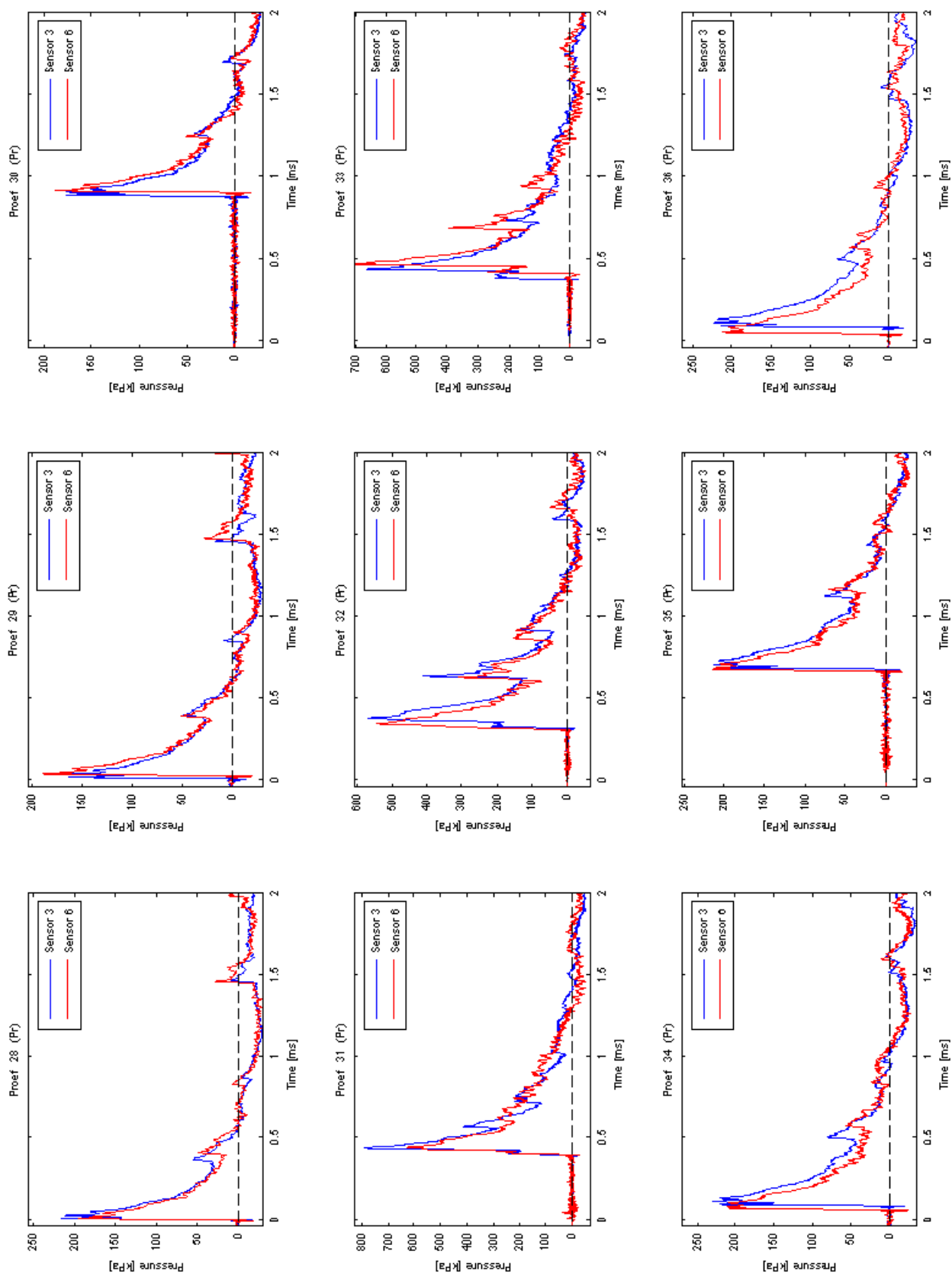


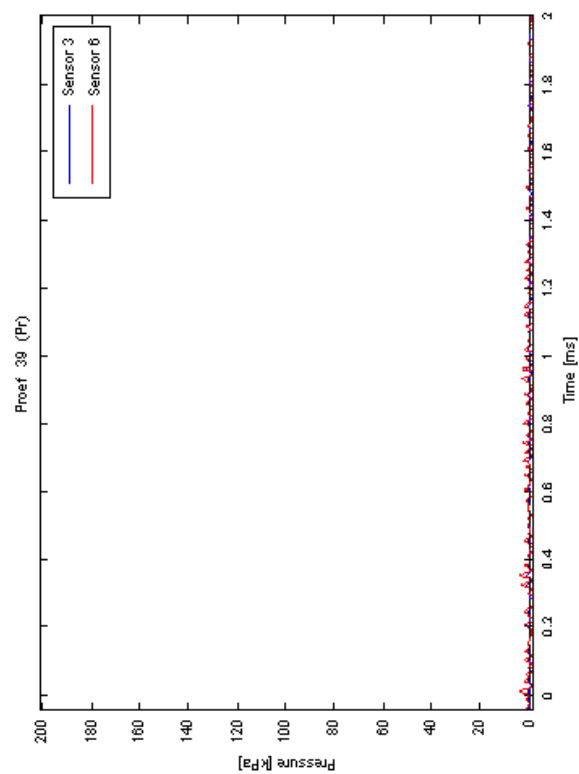
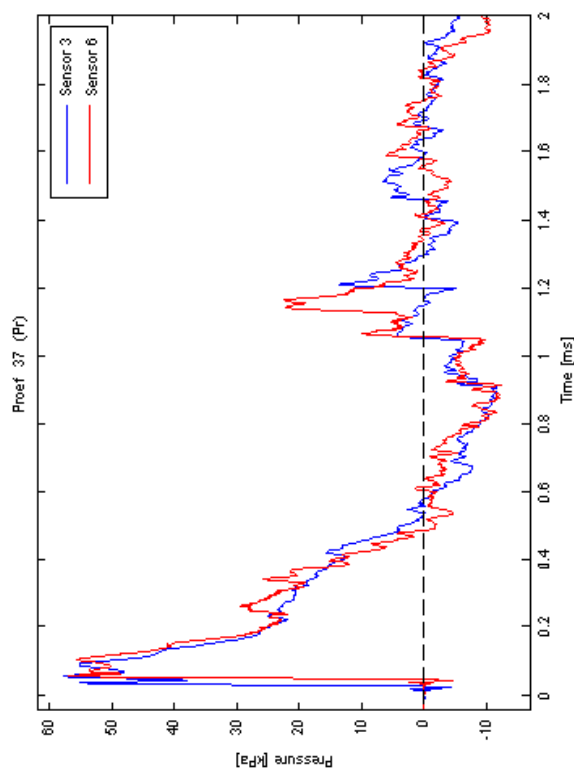
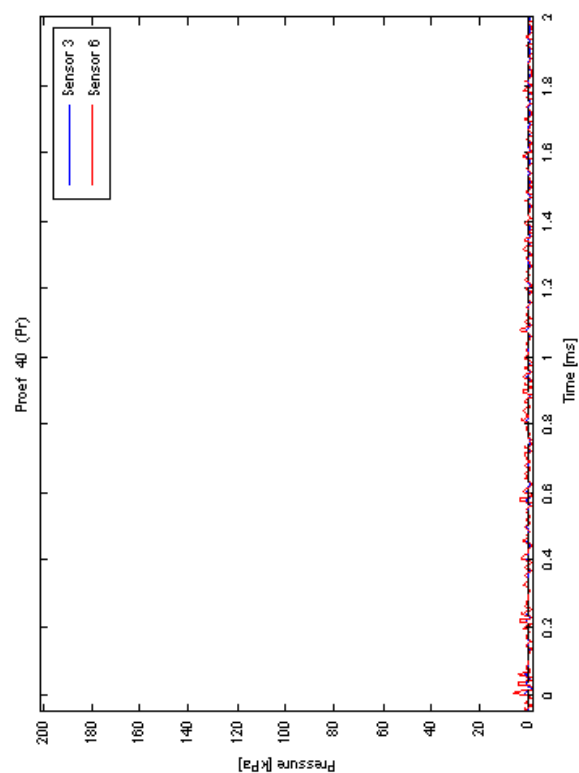
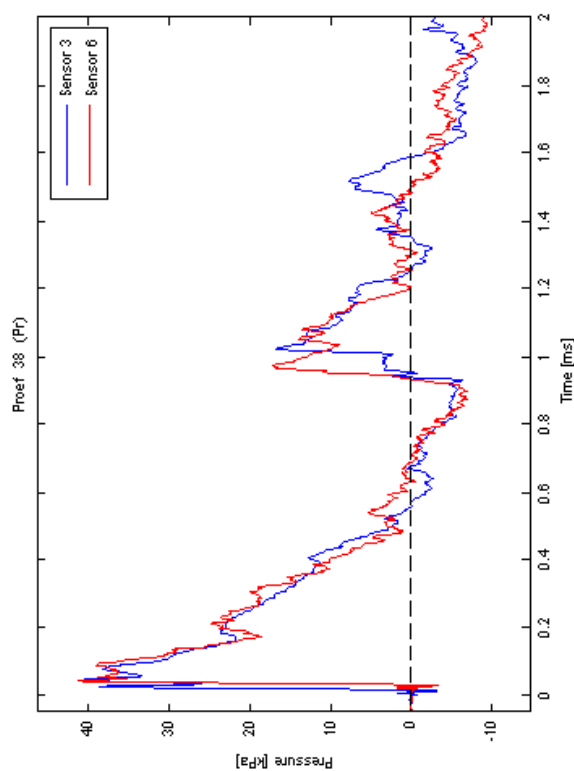


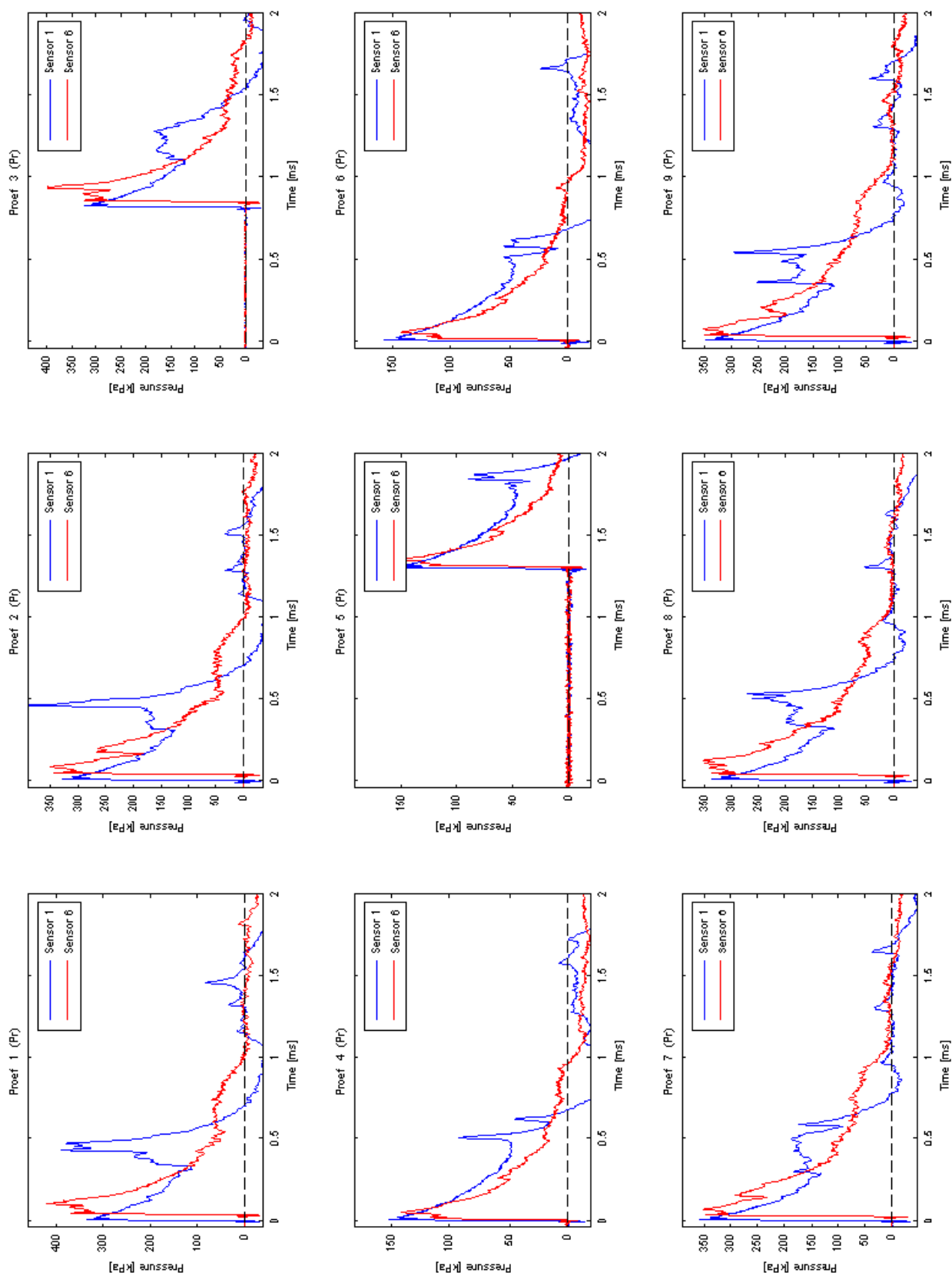


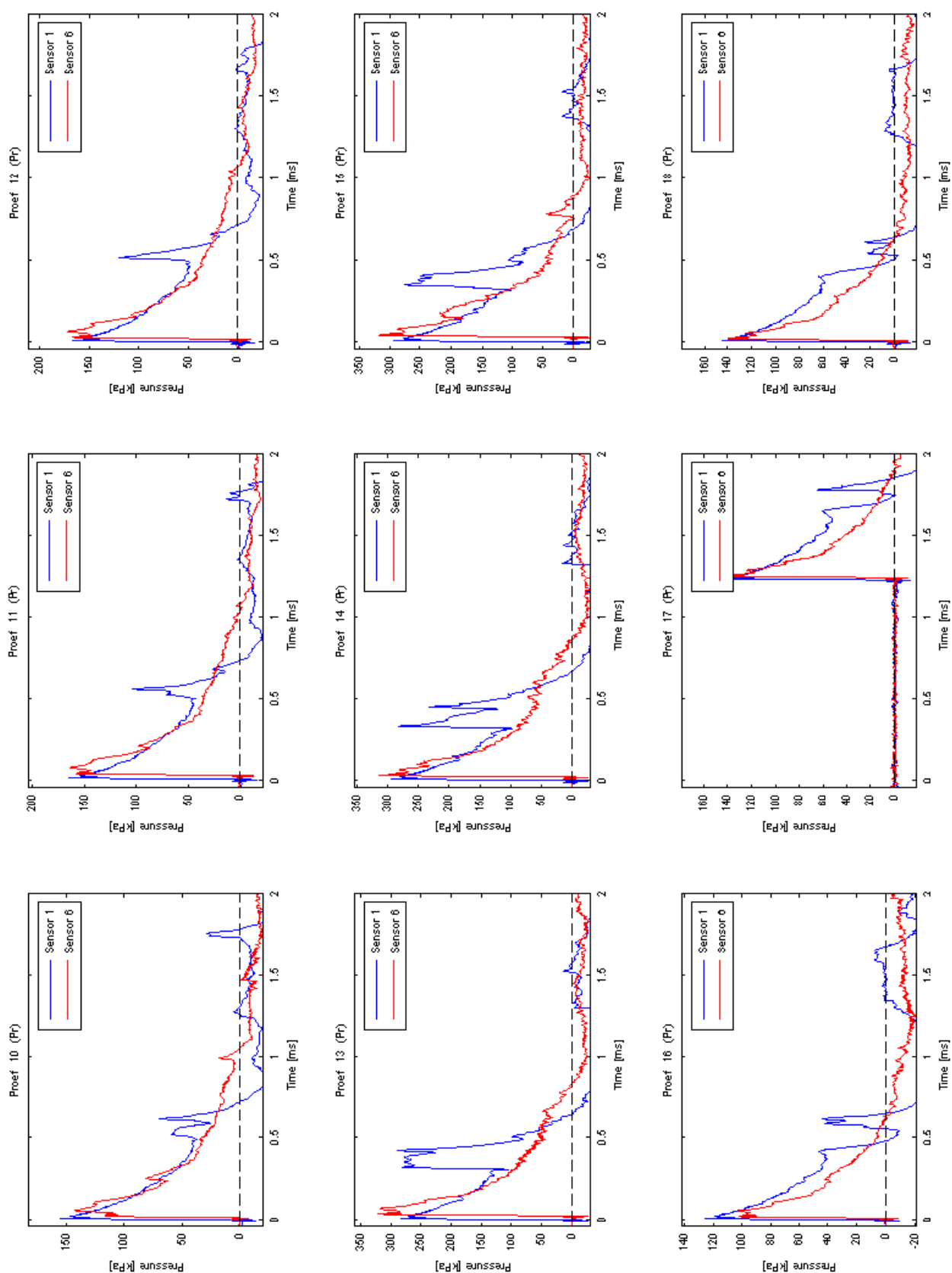


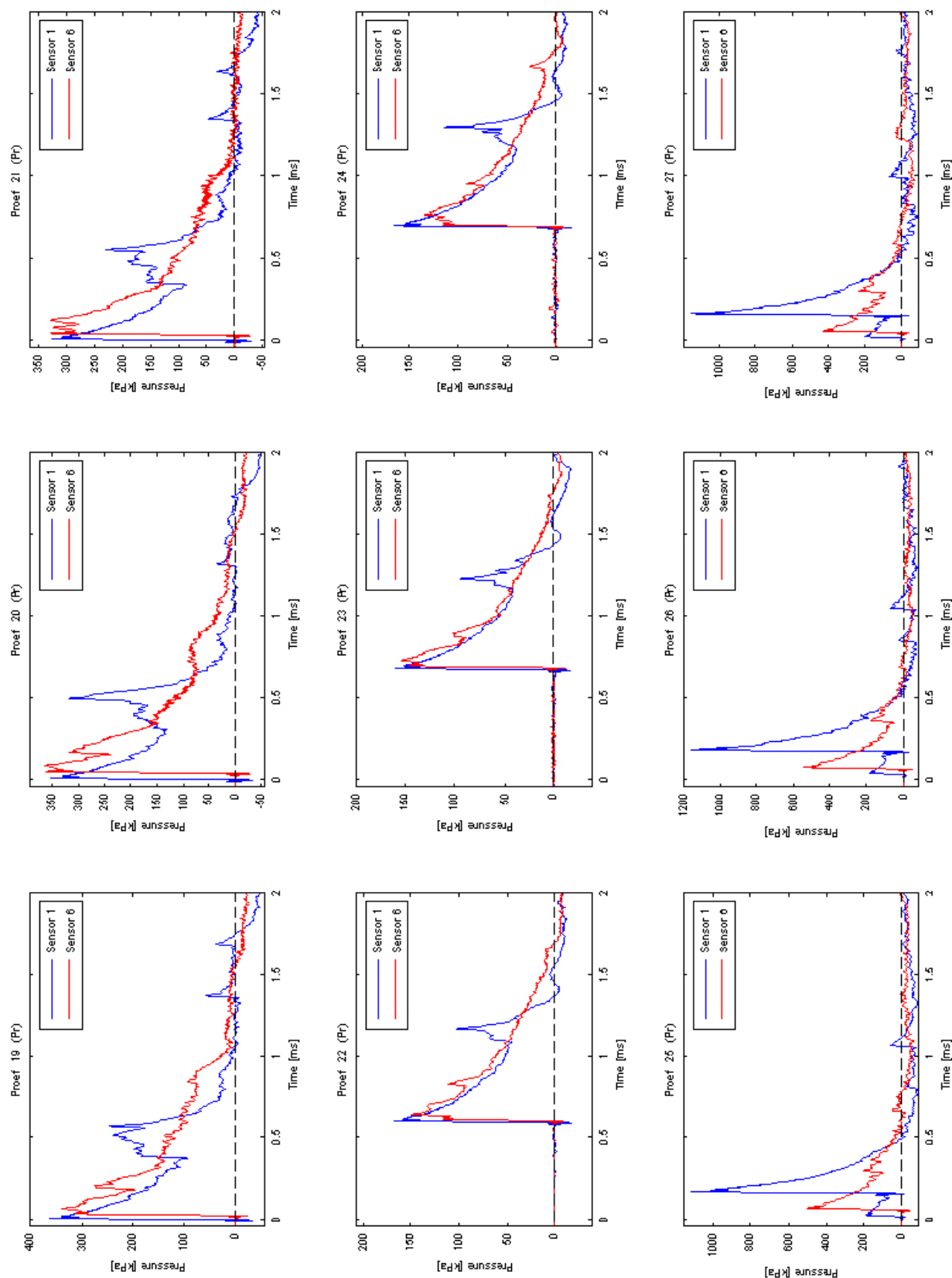


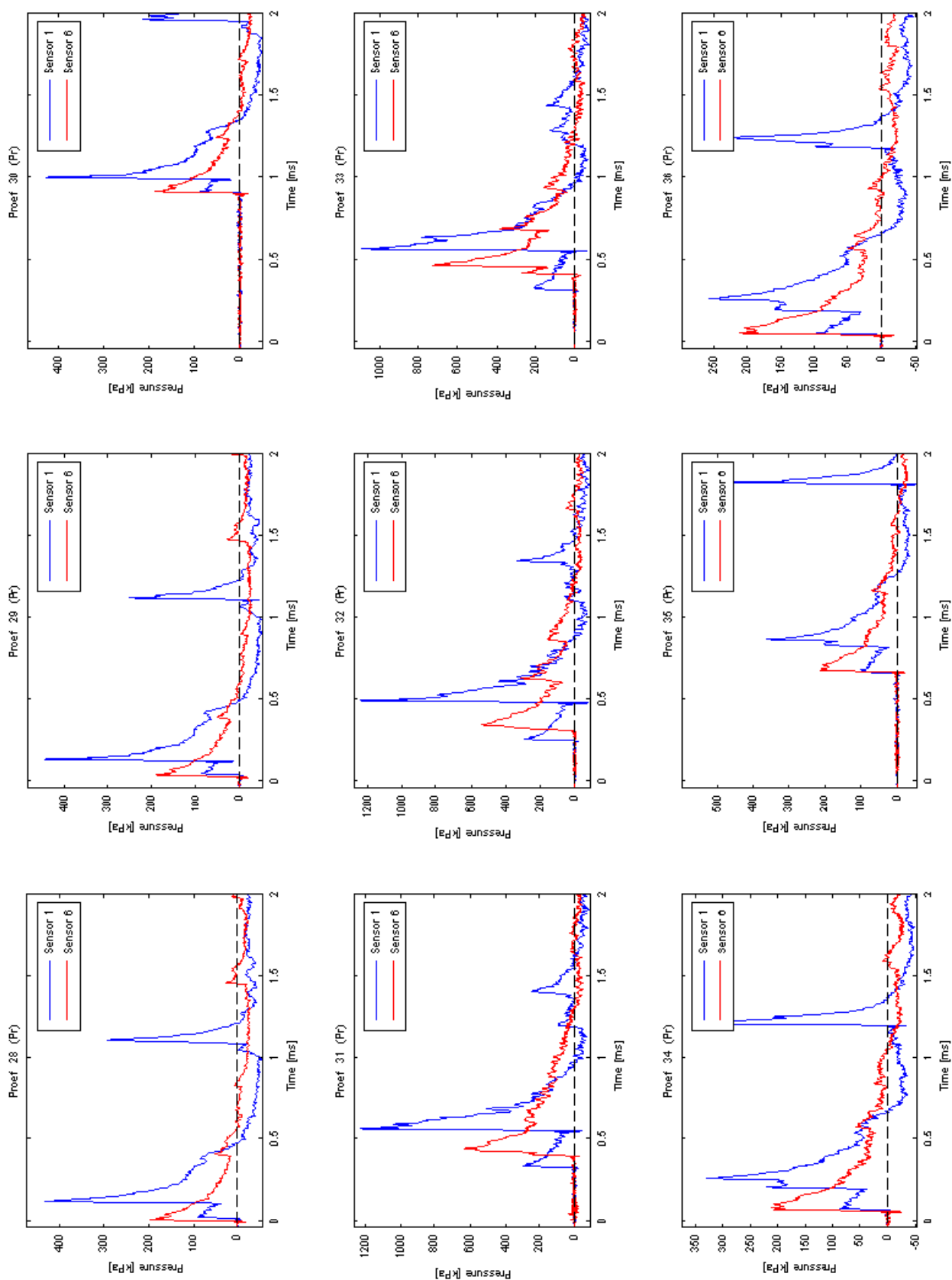


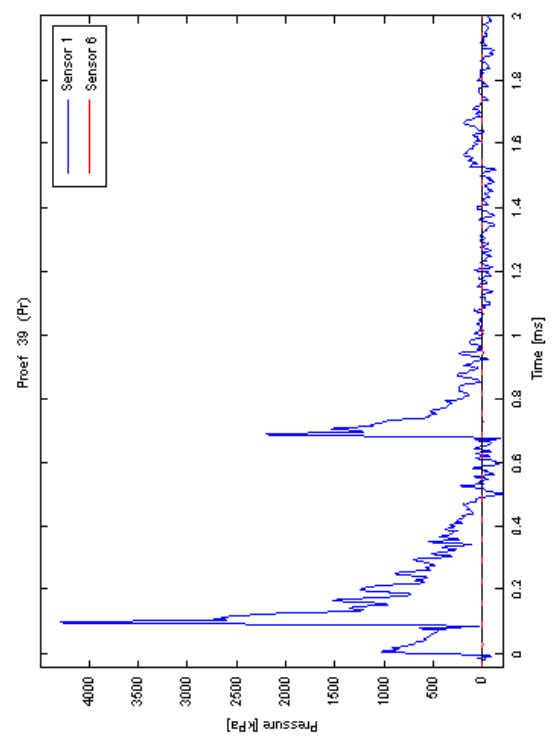
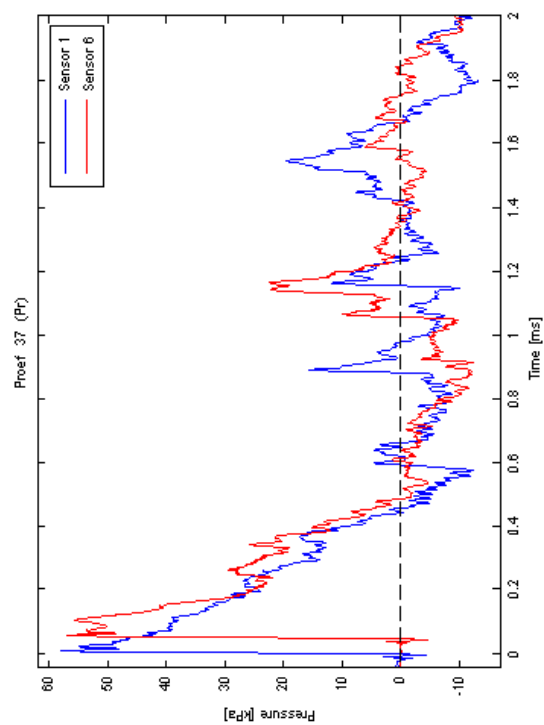
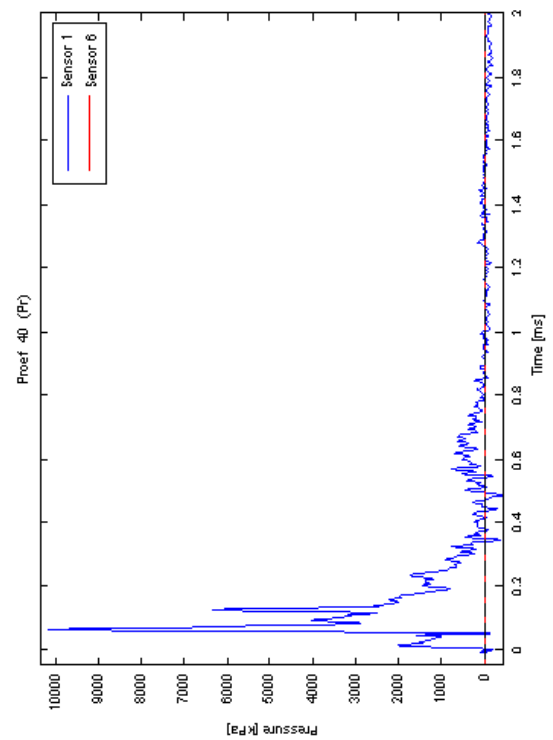
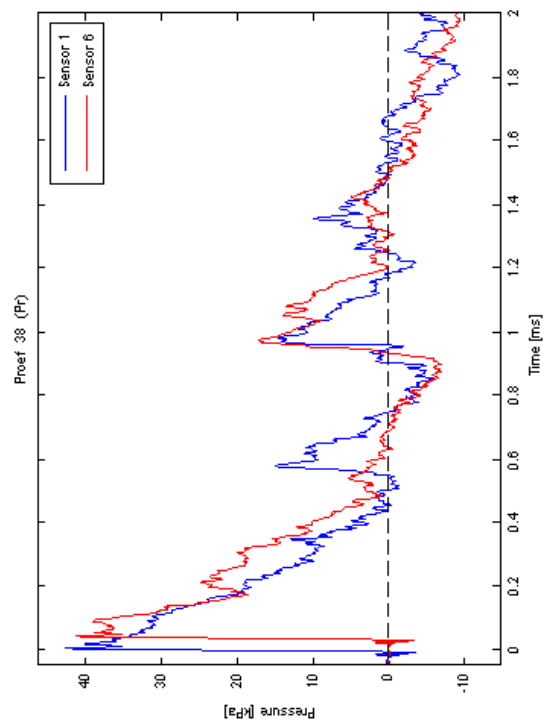












Model Number 102B04	ICP® PRESSURE SENSOR		Revision: B ECN #: 31258		
Performance	ENGLISH	SI	OPTIONAL VERSIONS		
Measurement Range (for ±5V output)	1 kpsi	6900 kPa	Optional versions have identical specifications and accessories as listed for the standard model except where noted below. More than one option may be used.		
Useful Overrange (for ±10V output)	2 kpsi	13,790 kPa			
Sensitivity (±10%)	5.0 mV/psi	0.7 mV/kPa	CA - Ablative Coating		
Maximum Pressure (static)	10 kpsi	69 000 kPa			
Resolution	20 mpsi	0.14 kPa	H - Hermetic Seal		
Resonant Frequency	≥ 500 kHz	≥ 500 kHz			
Rise Time (Reflected)	≤ 1.0 μsec	≤ 1.0 μsec	Sealing	Welded Hermetic	Welded Hermetic
Low Frequency Response (-5%)	0.005 Hz	0.005 Hz			
Non-Linearity	≤ 1.0 % FS	≤ 1.0 % FS	M - Metric Mount		
Environmental					
Acceleration Sensitivity	≤ 0.002 psi/g	≤ 0.0014 kPa/(m/s²)	Supplied Accessories: Model 065A40 Seal ring 0.435" OD x 0.397" ID x 0.030" thick brass (3) replaces Model 065A03		
Temperature Range (Operating)	-100 to +275 °F	-73 to +135 °C			
Temperature Coefficient of Sensitivity	≤ 0.03 %/°F	≤ 0.054 %/°C	N - Negative Output Polarity		
Maximum Flash Temperature	3000 °F	5400 °C			
Maximum Shock	20,000 g pk	196,140 m/s² pk	S - Stainless Steel Diaphragm		
Electrical					
Output Polarity (Positive Pressure)	Positive	Positive	Diaphragm	316L Stainless Steel	316L Stainless Steel
Discharge Time Constant (at room temp)	≥ 100 sec	≥ 100 sec	W - Water Resistant Cable		
Excitation Voltage	20 to 30 VDC	20 to 30 VDC			
Constant Current Excitation	2 to 20 mA	2 to 20 mA	NOTES: [1] Typical. [2] For +10 volt output, minimum 24 VDC supply voltage required. Negative 10 volt output may be limited by output bias. [3] Zero-based, least-squares, straight line method. [4] See PCB Declaration of Conformance PS023 for details.		
Output Impedance	<100 ohm	<100 ohm			
Output Bias Voltage	8 to 14 VDC	8 to 14 VDC			
Electrical Isolation	10 ⁹ ohm	10 ⁹ ohm			
Physical					
Sensing Geometry	Compression	Compression			
Sensing Element	Quartz	Quartz			
Housing Material	Stainless Steel	Stainless Steel			
Diaphragm	Invar	Invar			
Sealing	Welded Hermetic	Welded Hermetic			
Electrical Connector	10-32 Coaxial Jack	10-32 Coaxial Jack			
Weight	0.41 oz	11.6 gm			
SUPPLIED ACCESSORIES: Model 065A03 Seal ring 0.435" OD x 0.377" ID x 0.030" thick brass (3)					
Entered: <u>PLS</u> Engineer: <u>WJL</u> Sales: <u>RWJ</u> Approved: <u>RF</u> Spec Number: <u>40730</u> Date: <u>9-9-09</u> Date: <u>8-25-09</u> Date: <u>9-1-09</u> Date: <u>9-2-09</u>					
PCB PIEZOTRONICS™ Phone: 716-684-0001 PRESSURE DIVISION Fax: 716-686-9129 3425 Walden Avenue, Depew, NY 14043 E-Mail: pressure@pcb.com					



All specifications are at room temperature unless otherwise specified.
 In the interest of constant product improvement, we reserve the right to change specifications without notice.
 ICP® is a registered trademark of PCB Group, Inc.

Model Number 102B15		ICP® PRESSURE SENSOR		Revision: A ECN #: 29363	
Performance		ENGLISH	SI	OPTIONAL VERSIONS	
Measurement Range (for ±5V output)		200 psi	1379 kPa	Optional versions have identical specifications and accessories as listed for the standard model except where noted below. More than one option may be used.	
Useful Overrange (for ±10V output)		400 psi	2758 kPa		
Sensitivity (±5 mV/psi)		25 mV/psi	3.6 mV/kPa	CA - Ablative Coating	
Maximum Pressure (static)		1 kpsi	6895 kPa	H - Hermetic Seal Sealing Welded Hermetic Welded Hermetic	
Resolution		1 mpsi	0.007 kPa		
Resonant Frequency		≥ 500 kHz	≥ 500 kHz	M - Metric Mount Supplied Accessory : Model 065A40 Seal ring 0.435" OD x 0.397" ID x 0.030" thk brass (3) replaces Model 065A03	
Rise Time (Reflected)		≤ 1.0 μsec	≤ 1.0 μsec		
Low Frequency Response (-5%)		0.5 Hz	0.5 Hz	N - Negative Output Polarity	
Non-Linearity		≤ 1.0 % FS	≤ 1.0 % FS		
Environmental				S - Stainless Steel Diaphragm Diaphragm 316L Stainless Steel 316L Stainless Steel	
Acceleration Sensitivity		≤ 0.002 psi/g	≤ 0.0014 kPa/(m/s²)		
Temperature Range (Operating)		-100 to +275 °F	-73 to +135 °C	W - Water Resistant Cable	
Temperature Coefficient of Sensitivity		≤ 0.03 %/°F	≤ 0.054 %/°C		
Maximum Flash Temperature		3000 °F	5400 °C	NOTES: [1] Typical. [2] For +10 volt output, minimum 24 VDC supply voltage required. Negative 10 volt output may be limited by output bias. [3] Zero-based, least-squares, straight line method. [4] See PCB Declaration of Conformance PS023 for details.	
Maximum Shock		20,000 g pk	196,000 m/s² pk		
Electrical				SUPPLIED ACCESSORIES: Model 065A03 Seal ring 0.435" OD x 0.377" ID x 0.030" thk brass (3)	
Output Polarity (Positive Pressure)		Positive	Positive		
Discharge Time Constant (at room temp)		≥ 1.0 sec	≥ 1.0 sec	Entered: <u>PLS</u> Engineer: <u>WJL</u> Sales: <u>RWJ</u> Approved: <u>RF</u> Spec Number: <u>40738</u> Date: <u>9/8/08</u> Date: <u>9/5/08</u> Date: <u>9/8/08</u> Date: <u>9/8/08</u>	
Excitation Voltage		20 to 30 VDC	20 to 30 VDC		
Constant Current Excitation		2 to 20 mA	2 to 20 mA	PCB PIEZOTRONICS™ Phone: 716-684-0001 Fax: 716-686-9129 E-Mail: pressure@pcb.com	
Output Impedance		<100 ohm	<100 ohm		
Output Bias Voltage		8 to 14 VDC	8 to 14 VDC	3425 Walden Avenue, Depew, NY 14043	
Electrical Isolation		10 ⁹ ohm	10 ⁹ ohm		
Physical					
Sensing Geometry		Compression	Compression		
Sensing Element		Quartz	Quartz		
Housing Material		Stainless Steel	Stainless Steel		
Diaphragm		Invar	Invar		
Sealing		Welded Hermetic	Welded Hermetic		
Electrical Connector		10-32 Coaxial Jack	10-32 Coaxial Jack		
Weight		0.41 oz	11.6 gm		
 [4] All specifications are at room temperature unless otherwise specified. In the interest of constant product improvement, we reserve the right to change specifications without notice. ICP® is a registered trademark of PCB Group, Inc.					



All specifications are at room temperature unless otherwise specified.
 In the interest of constant product improvement, we reserve the right to change specifications without notice.
 ICP® is a registered trademark of PCB Group, Inc.

Model Number 137A23		ICP® PRESSURE SENSOR		Revision: L ECN #: 22892	
Performance		ENGLISH	SI	OPTIONAL VERSIONS	
Measurement Range (for ± 5V output)		50 psi	345 kPa	Optional versions have identical specifications and accessories as listed for the standard model except where noted below. More than one option may be used.	
Useful Overrange (for ± 10V output)		100 psi	690 kPa		
Sensitivity		100 mV/psi	14.5 mV/kPa		
Maximum Pressure		1 kpsi	6895 kPa		
Resolution		10 mpsi	0.069 kPa		
Resonant Frequency		≥ 500 kHz	≥ 500 kHz		
Rise Time (Incident)		≤ 4.0 μ sec	≤ 4.0 μ sec		
Non-Linearity		≤ 1.0 % FS	≤ 1.0 % FS		
Environmental					
Temperature Range (Operating)		-100 to +275 °F	-73 to +135 °C		
Temperature Coefficient of Sensitivity		≤ 0.03 %/°F	≤ 0.054 %/°C		
Electrical				NOTES: [1] For +10 volt output, minimum 24 VDC supply voltage required. Negative 10 volt output may be limited by output bias. [2] Zero-based, least-squares, straight line method. [3] See PCB Declaration of Conformance PS023 for details.	
Output Polarity (Positive Pressure)		Positive	Positive		
Discharge Time Constant (at room temp)		≥ 0.2 sec	≥ 0.2 sec		
Excitation Voltage		22 to 30 VDC	22 to 30 VDC		
Constant Current Excitation		2 to 20 mA	2 to 20 mA		
Output Impedance		≤ 100 ohm	≤ 100 ohm		
Output Bias Voltage		10 to 15 VDC	10 to 15 VDC		
Physical					
Sensing Geometry		Compression	Compression		
Sensing Element		Quartz	Quartz		
Housing Material		Aluminum	Aluminum		
Diaphragm		Invar	Invar		
Sealing		Epoxy	Epoxy		
Electrical Connector		BNC Jack	BNC Jack		
Weight		12.7 oz	360 gm		
 [3] All specifications are at room temperature unless otherwise specified. In the interest of constant product improvement, we reserve the right to change specifications without notice. ICP® is a registered trademark of PCB Group, Inc.					



All specifications are at room temperature unless otherwise specified.
 In the interest of constant product improvement, we reserve the right to change specifications without notice.
 ICP® is a registered trademark of PCB Group, Inc.

```
% Dit script geeft de gereflecteerde druk en impuls voor de 8 sensoren van
% de 40 proeven. Hierbij wordt sensor 8 geconverteerd waardoor deze
% gereflecteerde druk weergeeft ipv invallende druk.
%
% Hiervoor dienen de bestanden Data.mat en impulse.m in dezelfde map te
% staan.
%
% Voer proef en sensor nummers in tbv plot voor Pn,.. S1,... bij
% initialisatie.
```

```
clc
clear all
close all
tic
%
% INITIALISATIE
p1 = 1; %Proef tbv vergelijking.
s1 = 2; %1e sensor tbv vergelijking (+1).
s2 = 7; %2e sensor tbv vergelijking (+1).
%sensor 10 is sensor 8 geconv.
Patm = 103.67; %Invoeren heersende luchtdruk [kPa].

%
% START SCRIPT
load('Data.mat', 'Data'); % 1. Ophalen ruwe data.

Gem = mean (Data(1:2000,:,:)); % 2. kalibratie van de signalen.
Kal(:,2:9,:) = bsxfun(@minus,... %Gemiddelde van de eerste 2000
Data(:,2:9,:),Gem(:,2:9,:)); %metingen van signaal aftrekken.
Kal(:,1,:) = Data(:,1,:); %De tijd (col 1) blijft ongewijzigd.

Golay = Kal; % 3. Toepassen Golay-Savitzky filter.
Golay (:,2:8,:) = sgolayfilt... %Filteren van signalen 2 t/m 8.
(Golay(:,2:8,:),6,71);... %(druksensoren).

RanHug = Golay; % 4. Toepassen Rankine-Hugoniot op
RanHug (:,10,:) = 2.*RanHug(:,9,:)...%signaal 9(blastpencil).
.*(7.*Patm+4.*RanHug(:,9,:))./(7.*Patm+RanHug(:,9,:));

% 5. Druk en Impuls.
Piek = max (RanHug); %Vastleggen absolute piek.
ThresA = Piek./5; %Threshold voor proef 1t/m 27.
ThresB = Piek./4; %Threshold voor proef 28t/m 33.
ThresC = Piek./1.2; %Threshold voor proef 33t/m 36.
for n = 1:40 %Bepalen eerste piek mbv threshold.
    for s = 2:10 %Hiermee wordt de piekoverdruk [Pr]
        if n<=27; %en de impuls [Ir] bepaald.
            [Pr(s,n),loc(s,n)] = findpeaks(RanHug(:,s,n),'minpeakheight',...
            (ThresA(:,s,n)),'npeaks',1);
        elseif n<=33;
            [Pr(s,n),loc(s,n)] = findpeaks(RanHug(:,s,n),'minpeakheight',...
            (ThresB(:,s,n)),'npeaks',1);
```



```

elseif n<=36;
[Pr(s,n),loc(s,n)] = findpeaks(RanHug(:,s,n),'minpeakheight',...
    (ThresC(:,s,n)),'npeaks',1);
elseif n<=38;
[Pr(s,n),loc(s,n)] = findpeaks(RanHug(:,s,n),'minpeakheight',...
    (ThresC(:,s,n)),'npeaks',1);
else n<=40;
[Pr(s,n),loc(s,n)] = findpeaks(RanHug(:,s,n),'minpeakheight',...
    (ThresC(:,s,n)),'npeaks',1);
end

% 5.1 Impuls.
ind(s,n) = find(RanHug(loc(s,n):end,s,n) <= 0,1) + loc(s,n);
CumI = impulse(RanHug(loc(s,n):ind(s,n),1,n),...
    RanHug(loc(s,n):ind(s,n),s,n)).*1000;
Imp(1:length(CumI),s,n)=... %Impuls (cumulatief, signaal).
    CumI';
Ir = max(Imp); %Impuls (optredend, maximum).
end

end

for i=1:12 % 6. Gemiddelden proef 1t/m12.
    j=(i.*3)-2; % Proef 1-36 omzetten 1-12.
    GemPr(i,:) = mean(Pr(2:10,j:j+2),2); % Gemiddelde drukken.
    GemIr(i,:) = mean(Ir(1,2:10,j:j+2),3); % Gemiddelde impulsen.
end

GemPr(13:16,1:9) = Pr(2:10,37:40)'; %Toevoegen druk p.en 37 t/m 40.
GemIr(13,:) = mean(Ir(1,2:10,37),3);%Impuls toevoegen proeven 37 t/m 40
GemIr(14,:) = mean(Ir(1,2:10,38),3);
GemIr(15,:) = mean(Ir(1,2:10,39),3);
GemIr(16,:) = mean(Ir(1,2:10,40),3);

% PRESENTATIE
VERGPr(:,1) = GemPr(:,1);
VERGPr(:,2:3) = GemPr(:,8:9); % Tabel tbv 5.2 druk.
VERGIr(:,1) = GemIr(:,1);
VERGIr(:,2:3) = GemIr(:,8:9); % Tabel tbv 5.2 impuls.

% Voorbereiden voor plotten
Opt = loc - 50; % Lokatie van de piek - 50indices.
Imp(Imp==0)=NaN; % Nullen aan eind weghalen tbv plotten.
RanHug(:,11,40)=zeros; % Tbv y=0.
for k=1:40 % Vector en tijd afsnijden tbv plotten.
    for l=2:10
        Pplot(1:length(RanHug(Opt(l,k):end,l,k)),l,k) = ...
            RanHug(Opt(l,k):end,l,k);
        tplot(1:length(RanHug(Opt(l,k):end,l,k)),l,k) = ...
            RanHug(Opt(l,k):end,l,k)-RanHug(Opt(l,k),1,k);
        Imp(1,l,k)=0; %1e nul terugplaatsen.
    end
    Imp(1,1,k)=0; %1e nul terugplaatsen.
end

% Plotten een enkel signaal

```

```

%
figure(1),clf(1),hold on;
plot(tplot(1:length(RanHug(Opt(s1,p1):end,s1,p1)),s1,p1).*1000,...
      Pplot(1:length(RanHug(Opt(s1,p1):end,s1,p1)),s1,p1),...
      tplot(1:length(RanHug(Opt(s2,p1):end,s2,p1)),s2,p1).*1000,...
      Pplot(1:length(RanHug(Opt(s2,p1):end,s2,p1)),s2,p1),'r',...
      tplot(1:length(RanHug(Opt(s2,p1):end,s2,p1)),s2,p1).*1000,...
      RanHug(1:length(RanHug(Opt(s2,p1):end,s2,p1)),11,p1),'--k');
set(gca,'FontSize',6);
set(gcf,'papertype','A4','PaperOrientation','landscape',...
      'paperPosition',[0.63 0.63 28.41 19.72]);
title(['Proef ',num2str(p1),' (Pr)']);
legend(['Sensor 1 (gemeten) ','Sensor 8 (geconverteerd) '],...
      'Location','NorthEast');
xlabel('Time [ms] ');ylabel('Pressure [kPa]');
axis ([0 2 min(RanHug(:,s1,p1)) max(RanHug(:,s1,p1))+20]);
hold off;
%}
%
%           Plotten vergelijking S1 - S8(conv)Pr
%{
figure (2), clf(2), hold on;
for m=1:9
    subplot(3,3,m)
    plot(tplot(1:length(RanHug(Opt(s1,m):end,s1,m)),s1,m).*1000,...
          Pplot(1:length(RanHug(Opt(s1,m):end,s1,m)),s1,m),...
          tplot(1:length(RanHug(Opt(s2,m):end,s2,m)),s2,m).*1000,...
          Pplot(1:length(RanHug(Opt(s2,m):end,s2,m)),s2,m),'r',...
          tplot(1:length(RanHug(Opt(s2,p1):end,s2,p1)),s2,p1).*1000,...
          RanHug(1:length(RanHug(Opt(s2,p1):end,s2,p1)),11,p1),'--k');
set(gca,'FontSize',6);
set(gcf,'papertype','A4','PaperOrientation','landscape',...
      'paperPosition',[0.63 0.63 28.41 19.72]);
title(['Proef ',num2str(m),' (Pr)']);
legend(['Sensor 1 (gemeten) ','Sensor 8 (geconverteerd) '],...
      'Location','NorthEast');
xlabel('Time [ms] ');ylabel('Pressure [kPa]');
axis ([-0.05 2 min(RanHug(:,s1,m)) max(RanHug(:,s1,m))+20]);
end
hold off;

figure (3), clf(3), hold on;
for m=10:18
    subplot(3,3,m-9)
    plot(tplot(1:length(RanHug(Opt(s1,m):end,s1,m)),s1,m).*1000,...
          Pplot(1:length(RanHug(Opt(s1,m):end,s1,m)),s1,m),...
          tplot(1:length(RanHug(Opt(s2,m):end,s2,m)),s2,m).*1000,...
          Pplot(1:length(RanHug(Opt(s2,m):end,s2,m)),s2,m),'r',...
          tplot(1:length(RanHug(Opt(s2,p1):end,s2,p1)),s2,p1).*1000,...
          RanHug(1:length(RanHug(Opt(s2,p1):end,s2,p1)),11,p1),'--k');
set(gca,'FontSize',6);
set(gcf,'papertype','A4','PaperOrientation','landscape',...
      'paperPosition',[0.63 0.63 28.41 19.72]);
title(['Proef ',num2str(m),' (Pr)']);
legend(['Sensor 1 (gemeten) ','Sensor 8 (geconverteerd) '],...
      'Location','NorthEast');
xlabel('Time [ms] ');ylabel('Pressure [kPa]');
axis ([-0.05 2 min(RanHug(:,s1,m)) max(RanHug(:,s1,m))+20]);

```

```

    end
    hold off;

figure (4), clf(4), hold on;
for m=19:27
    subplot(3,3,m-18)
    plot(tplot(1:length(RanHug(Opt(s1,m):end,s1,m)),s1,m).*1000,...
        Pplot(1:length(RanHug(Opt(s1,m):end,s1,m)),s1,m),...
        tplot(1:length(RanHug(Opt(s2,m):end,s2,m)),s2,m).*1000,...
        Pplot(1:length(RanHug(Opt(s2,m):end,s2,m)),s2,m),'r',...
        tplot(1:length(RanHug(Opt(s2,p1):end,s2,p1)),s2,p1).*1000,...
        RanHug(1:length(RanHug(Opt(s2,p1):end,s2,p1)),11,p1),'--k');
    set(gca,'FontSize',6);
    set(gcf,'papertype','A4','PaperOrientation','landscape',...
        'paperPosition',[0.63 0.63 28.41 19.72]);
    title(['Proef ',num2str(m), ' (Pr)']);
    legend(['Sensor 1 (gemeten) ','Sensor 8 (geconverteerd) ','...
        'Location','NorthEast']);
    xlabel('Time [ms] ');ylabel('Pressure [kPa]');
    axis ([-0.05 2 min(RanHug(:,s1,m)) max(RanHug(:,s1,m))+30]);
    end
    hold off;

figure (5), clf(5), hold on;
for m=28:36
    subplot(3,3,m-27)
    plot(tplot(1:length(RanHug(Opt(s1,m):end,s1,m)),s1,m).*1000,...
        Pplot(1:length(RanHug(Opt(s1,m):end,s1,m)),s1,m),...
        tplot(1:length(RanHug(Opt(s2,m):end,s2,m)),s2,m).*1000,...
        Pplot(1:length(RanHug(Opt(s2,m):end,s2,m)),s2,m),'r',...
        tplot(1:length(RanHug(Opt(s2,p1):end,s2,p1)),s2,p1).*1000,...
        RanHug(1:length(RanHug(Opt(s2,p1):end,s2,p1)),11,p1),'--k');
    set(gca,'FontSize',6);
    set(gcf,'papertype','A4','PaperOrientation','landscape',...
        'paperPosition',[0.63 0.63 28.41 19.72]);
    title(['Proef ',num2str(m), ' (Pr)']);
    legend(['Sensor 1 (gemeten) ','Sensor 8 (geconverteerd) ','...
        'Location','NorthEast']);
    xlabel('Time [ms] ');ylabel('Pressure [kPa]');
    axis ([-0.05 2 min(RanHug(:,s1,m)) max(RanHug(:,s1,m))+30]);
    end
    hold off;

figure (6), clf(6), hold on;
for m=37:40
    subplot(2,2,m-36)
    plot(tplot(1:length(RanHug(Opt(s1,m):end,s1,m)),s1,m).*1000,...
        Pplot(1:length(RanHug(Opt(s1,m):end,s1,m)),s1,m),...
        tplot(1:length(RanHug(Opt(s2,m):end,s2,m)),s2,m).*1000,...
        Pplot(1:length(RanHug(Opt(s2,m):end,s2,m)),s2,m),'r',...
        tplot(1:length(RanHug(Opt(s2,p1):end,s2,p1)),s2,p1).*1000,...
        RanHug(1:length(RanHug(Opt(s2,p1):end,s2,p1)),11,p1),'--k');
    set(gca,'FontSize',6);
    set(gcf,'papertype','A4','PaperOrientation','landscape',...
        'paperPosition',[0.63 0.63 28.41 19.72]);
    title(['Proef ',num2str(m), ' (Pr)']);

```

```

    legend(['Sensor 1 (gemeten) '],['Sensor 8 (geconverteerd) '],...
           'Location','NorthEast');
    xlabel('Time [ms] ');ylabel('Pressure [kPa]');
    if m<=38
        axis ([-0.05 2 min(RanHug(:,s1,m)) max(RanHug(:,s1,m))+5]);
    else
        axis ([-0.05 2 min(RanHug(:,s1,m)) max(RanHug(:,s1,m))+200]);
    end
end
hold off;
%}

%
%           Plotten vergelijking s1 - s8(conv)Ir
%{
figure (7), clf(7), hold on;
for m=1:9
    subplot(3,3,m)
        plot(tpplot(1:length(Imp(:,s1,m)),s1,m).*1000,Imp(:,s1,m),...
              tpplot(1:length(Imp(:,s2,m)),s2,m).*1000,Imp(:,s2,m),'r'));
        set(gca,'FontSize',6);
        set(gcf,'papertype','A4','PaperOrientation','landscape',...
              'paperPosition', [0.63 0.63 28.41 19.72]);
        title(['Proef ',num2str(m), ' (Ir)']);
        legend(['Sensor 1 (gemeten) '],['Sensor 8 (geconverteerd) '],...
              'Location','NorthEast');
        xlabel('Time [ms] ');ylabel('Impulse [kPa msec]');
        axis ([0 1.2 min(Imp(:,s1,m)) max(Imp(:,s1,m))+40]);
    end
end
hold off;

figure (8), clf(8), hold on;
for m=10:18
    subplot(3,3,m-9)
        plot(tpplot(1:length(Imp(:,s1,m)),s1,m).*1000,Imp(:,s1,m),...
              tpplot(1:length(Imp(:,s2,m)),s2,m).*1000,Imp(:,s2,m),'r'));
        set(gca,'FontSize',6);
        set(gcf,'papertype','A4','PaperOrientation','landscape',...
              'paperPosition', [0.63 0.63 28.41 19.72]);
        title(['Proef ',num2str(m), ' (Ir)']);
        legend(['Sensor 1 (gemeten) '],['Sensor 8 (geconverteerd) '],...
              'Location','NorthEast');
        xlabel('Time [ms] ');ylabel('Impulse [kPa msec]');
        axis ([0 1.2 min(Imp(:,s1,m)) max(Imp(:,s1,m))+40]);
    end
end
hold off;

figure (9), clf(9), hold on;
for m=19:27
    subplot(3,3,m-18)
        plot(tpplot(1:length(Imp(:,s1,m)),s1,m).*1000,Imp(:,s1,m),...
              tpplot(1:length(Imp(:,s2,m)),s2,m).*1000,Imp(:,s2,m),'r'));
        set(gca,'FontSize',6);
        set(gcf,'papertype','A4','PaperOrientation','landscape',...
              'paperPosition', [0.63 0.63 28.41 19.72]);
        title(['Proef ',num2str(m), ' (Ir)']);
        legend(['Sensor 1 (gemeten) '],['Sensor 8 (geconverteerd) '],...
              'Location','NorthEast');

```

```

        xlabel('Time [ms] ');ylabel('Impulse [kPa msec]');
        axis ([0 1.2 min(Imp(:,s1,m)) max(Imp(:,s1,m))+40]);
    end
    hold off;

figure (10), clf(10), hold on;
for m=28:36
    subplot(3,3,m-27)
        plot(tplot(1:length(Imp(:,s1,m)),s1,m).*1000,Imp(:,s1,m),...
            tplot(1:length(Imp(:,s2,m)),s2,m).*1000,Imp(:,s2,m),'r');
        set(gca,'FontSize',6);
        set(gcf,'papertype','A4','PaperOrientation','landscape',...
            'paperPosition', [0.63 0.63 28.41 19.72]);
        title(['Proef ',num2str(m), ' (Ir)']);
        legend(['Sensor 1 (gemeten) ','Sensor 8 (geconverteerd) ','...
            'Location','NorthEast']);
        xlabel('Time [ms] ');ylabel('Impulse [kPa msec]');
        axis ([0 1.2 min(Imp(:,s1,m)) max(Imp(:,s1,m))+40]);
    end
    hold off;

figure (11), clf(11), hold on;
for m=37:40
    subplot(2,2,m-36)
        plot(tplot(1:length(Imp(:,s1,m)),s1,m).*1000,Imp(:,s1,m),...
            tplot(1:length(Imp(:,s2,m)),s2,m).*1000,Imp(:,s2,m),'r');
        set(gca,'FontSize',6);
        set(gcf,'papertype','A4','PaperOrientation','landscape',...
            'paperPosition', [0.63 0.63 28.41 19.72]);
        title(['Proef ',num2str(m), ' (Ir)']);
        legend(['Sensor 1 (gemeten) ','Sensor 8 (geconverteerd) ','...
            'Location','NorthEast']);
        if m<=39
            xlabel('Time [ms] ');ylabel('Impulse [kPa msec]');
            axis ([0 0.7 min(Imp(:,s1,m)) max(Imp(:,s1,m))+4]);
        else
            xlabel('Time [ms] ');ylabel('Impulse [kPa msec]');
            axis ([0 1.7 min(Imp(:,s1,m)) max(Imp(:,s1,m))+40]);
        end
    end
    hold off;
%}
%
%           Plotten vergelijking S3 - S6 Pr
%{
figure (2), clf(2), hold on;
for m=1:9
    subplot(3,3,m)
        plot(tplot(1:length(RanHug(Opt(s1,m):end,s1,m)),s1,m).*1000,...
            Pplot(1:length(RanHug(Opt(s1,m):end,s1,m)),s1,m),...
            tplot(1:length(RanHug(Opt(s2,m):end,s2,m)),s2,m).*1000,...
            Pplot(1:length(RanHug(Opt(s2,m):end,s2,m)),s2,m),'r',...
            tplot(1:length(RanHug(Opt(s2,p1):end,s2,p1)),s2,p1).*1000,...
            RanHug(1:length(RanHug(Opt(s2,p1):end,s2,p1)),11,p1),'--k');
        set(gca,'FontSize',6);
        set(gcf,'papertype','A4','PaperOrientation','landscape',...
            'paperPosition', [0.63 0.63 28.41 19.72]);
        title(['Proef ',num2str(m), ' (Pr)']);
    end
end

```

```

        legend(['Sensor 3'], ['Sensor 6'], ...
               'Location', 'NorthEast');
        xlabel('Time [ms] '); ylabel('Pressure [kPa]');
        axis ([-0.05 2 min(RanHug(:,s2,m)) max(RanHug(:,s2,m))+40]);
        end
    hold off;

figure (3), clf(3), hold on;
for m=10:18
    subplot(3,3,m-9)
    plot(tpplot(1:length(RanHug(Opt(s1,m):end,s1,m)),s1,m).*1000,...
         Pplot(1:length(RanHug(Opt(s1,m):end,s1,m)),s1,m),...
         tpplot(1:length(RanHug(Opt(s2,m):end,s2,m)),s2,m).*1000,...
         Pplot(1:length(RanHug(Opt(s2,m):end,s2,m)),s2,m), 'r',...
         tpplot(1:length(RanHug(Opt(s2,p1):end,s2,p1)),s2,p1).*1000,...
         RanHug(1:length(RanHug(Opt(s2,p1):end,s2,p1)),11,p1), '--k');
    set(gca, 'FontSize', 6);
    set(gcf, 'papertype', 'A4', 'PaperOrientation', 'landscape', ...
            'paperPosition', [0.63 0.63 28.41 19.72]);
    title(['Proef ', num2str(m), ' (Pr)']);
    legend(['Sensor 3'], ['Sensor 6'], ...
           'Location', 'NorthEast');
    xlabel('Time [ms] '); ylabel('Pressure [kPa]');
    axis ([-0.05 2 min(RanHug(:,s2,m)) max(RanHug(:,s2,m))+40]);
    end
    hold off;

figure (4), clf(4), hold on;
for m=19:27
    subplot(3,3,m-18)
    plot(tpplot(1:length(RanHug(Opt(s1,m):end,s1,m)),s1,m).*1000,...
         Pplot(1:length(RanHug(Opt(s1,m):end,s1,m)),s1,m),...
         tpplot(1:length(RanHug(Opt(s2,m):end,s2,m)),s2,m).*1000,...
         Pplot(1:length(RanHug(Opt(s2,m):end,s2,m)),s2,m), 'r',...
         tpplot(1:length(RanHug(Opt(s2,p1):end,s2,p1)),s2,p1).*1000,...
         RanHug(1:length(RanHug(Opt(s2,p1):end,s2,p1)),11,p1), '--k');
    set(gca, 'FontSize', 6);
    set(gcf, 'papertype', 'A4', 'PaperOrientation', 'landscape', ...
            'paperPosition', [0.63 0.63 28.41 19.72]);
    title(['Proef ', num2str(m), ' (Pr)']);
    legend(['Sensor 1'], ['Sensor 6'], ...
           'Location', 'NorthEast');
    xlabel('Time [ms] '); ylabel('Pressure [kPa]');
    axis ([-0.05 2 min(RanHug(:,s1,m)) max(RanHug(:,s1,m))+40]);
    end
    hold off;

figure (5), clf(5), hold on;
for m=28:36
    subplot(3,3,m-27)
    plot(tpplot(1:length(RanHug(Opt(s1,m):end,s1,m)),s1,m).*1000,...
         Pplot(1:length(RanHug(Opt(s1,m):end,s1,m)),s1,m),...
         tpplot(1:length(RanHug(Opt(s2,m):end,s2,m)),s2,m).*1000,...
         Pplot(1:length(RanHug(Opt(s2,m):end,s2,m)),s2,m), 'r',...
         tpplot(1:length(RanHug(Opt(s2,p1):end,s2,p1)),s2,p1).*1000,...
         RanHug(1:length(RanHug(Opt(s2,p1):end,s2,p1)),11,p1), '--k');
    set(gca, 'FontSize', 6);

```

```

set(gcf,'papertype','A4','PaperOrientation','landscape',...
    'paperPosition', [0.63 0.63 28.41 19.72]);
title(['Proef ',num2str(m), ' (Pr)']);
legend(['Sensor 1'],['Sensor 3'],...
    'Location','NorthEast');
xlabel('Time [ms] ');ylabel('Pressure [kPa]');
axis ([-0.05 2 min(RanHug(:,s1,m)) max(RanHug(:,s1,m))+40]);
end
hold off;

figure (6), clf(6), hold on;
for m=37:40
    subplot(2,2,m-36)
    plot(tplot(1:length(RanHug(Opt(s1,m):end,s1,m)),s1,m).*1000,...
        Pplot(1:length(RanHug(Opt(s1,m):end,s1,m)),s1,m),...
        tplot(1:length(RanHug(Opt(s2,m):end,s2,m)),s2,m).*1000,...
        Pplot(1:length(RanHug(Opt(s2,m):end,s2,m)),s2,m),'r',...
        tplot(1:length(RanHug(Opt(s2,p1):end,s2,p1)),s2,p1).*1000,...
        RanHug(1:length(RanHug(Opt(s2,p1):end,s2,p1)),11,p1),'--k');
    set(gca,'FontSize',6);
    set(gcf,'papertype','A4','PaperOrientation','landscape',...
        'paperPosition', [0.63 0.63 28.41 19.72]);
    title(['Proef ',num2str(m), ' (Pr)']);
    legend(['Sensor 1'],['Sensor 6'],...
        'Location','NorthEast');
    xlabel('Time [ms] ');ylabel('Pressure [kPa]');
    if m<=38
        axis ([-0.05 2 min(RanHug(:,s2,m)) max(RanHug(:,s2,m))+5]);
    else
        axis ([-0.05 2 min(RanHug(:,s1,m)) max(RanHug(:,s1,m))+200]);
    end
end
hold off;
%}

%
%          Plotten vergelijking S1 - S8(conv)Ir
%{
figure (7), clf(7), hold on;
for m=1:9
    subplot(3,3,m)
    plot(tplot(1:length(Imp(:,s1,m)),s1,m).*1000,Imp(:,s1,m),...
        tplot(1:length(Imp(:,s2,m)),s2,m).*1000,Imp(:,s2,m),'r');
    set(gca,'FontSize',6);
    set(gcf,'papertype','A4','PaperOrientation','landscape',...
        'paperPosition', [0.63 0.63 28.41 19.72]);
    title(['Proef ',num2str(m), ' (Ir)']);
    legend(['Sensor 1'],['Sensor 6'],...
        'Location','NorthEast');
    xlabel('Time [ms] ');ylabel('Impulse [kPa msec]');
    axis ([0 1.2 min(Imp(:,s1,m)) max(Imp(:,s1,m))+40]);
    end
hold off;

figure (8), clf(8), hold on;
for m=10:18
    subplot(3,3,m-9)

```

```

        plot(tplot(1:length(Imp(:,s1,m)),s1,m).*1000,Imp(:,s1,m),...
            tplot(1:length(Imp(:,s2,m)),s2,m).*1000,Imp(:,s2,m),'r'));
        set(gca,'FontSize',6);
        set(gcf,'papertype','A4','PaperOrientation','landscape',...
            'paperPosition',[0.63 0.63 28.41 19.72]);
        title(['Proef ',num2str(m), ' (Ir)']);
        legend(['Sensor 1'],['Sensor 6'],...
            'Location','NorthEast');
        xlabel('Time [ms] ');ylabel('Impulse [kPa msec]');
        axis ([0 1.2 min(Imp(:,s1,m)) max(Imp(:,s1,m))+40]);
        end
    hold off;

figure (9), clf(9), hold on;
for m=19:27
    subplot(3,3,m-18)
        plot(tplot(1:length(Imp(:,s1,m)),s1,m).*1000,Imp(:,s1,m),...
            tplot(1:length(Imp(:,s2,m)),s2,m).*1000,Imp(:,s2,m),'r'));
        set(gca,'FontSize',6);
        set(gcf,'papertype','A4','PaperOrientation','landscape',...
            'paperPosition',[0.63 0.63 28.41 19.72]);
        title(['Proef ',num2str(m), ' (Ir)']);
        legend(['Sensor 1'],['Sensor 6'],...
            'Location','NorthEast');
        xlabel('Time [ms] ');ylabel('Impulse [kPa msec]');
        axis ([0 1.2 min(Imp(:,s1,m)) max(Imp(:,s1,m))+40]);
    end
    hold off;

figure (10), clf(10), hold on;
for m=28:36
    subplot(3,3,m-27)
        plot(tplot(1:length(Imp(:,s1,m)),s1,m).*1000,Imp(:,s1,m),...
            tplot(1:length(Imp(:,s2,m)),s2,m).*1000,Imp(:,s2,m),'r'));
        set(gca,'FontSize',6);
        set(gcf,'papertype','A4','PaperOrientation','landscape',...
            'paperPosition',[0.63 0.63 28.41 19.72]);
        title(['Proef ',num2str(m), ' (Ir)']);
        legend(['Sensor 1'],['Sensor 6'],...
            'Location','NorthEast');
        xlabel('Time [ms] ');ylabel('Impulse [kPa msec]');
        axis ([0 1.2 min(Imp(:,s1,m)) max(Imp(:,s1,m))+40]);
    end
    hold off;

figure (11), clf(11), hold on;
for m=37:40
    subplot(2,2,m-36)
        plot(tplot(1:length(Imp(:,s1,m)),s1,m).*1000,Imp(:,s1,m),...
            tplot(1:length(Imp(:,s2,m)),s2,m).*1000,Imp(:,s2,m),'r'));
        set(gca,'FontSize',6);
        set(gcf,'papertype','A4','PaperOrientation','landscape',...
            'paperPosition',[0.63 0.63 28.41 19.72]);
        title(['Proef ',num2str(m), ' (Ir)']);
        legend(['Sensor 1'],['Sensor 6'],...
            'Location','NorthEast');
        if m<=39

```



```

        xlabel('Time [ms] ');ylabel('Impulse [kPa msec]');
        axis ([0 0.7 min(Imp(:,s1,m)) max(Imp(:,s1,m))+4]);
    else
        xlabel('Time [ms] ');ylabel('Impulse [kPa msec]');
        axis ([0 1.7 min(Imp(:,s1,m)) max(Imp(:,s1,m))+40]);
    end
end
hold off;
%}

%                               Plotten aankomsttijd S1-S6

figure (2), clf(2), hold on;
for m=1:9
    subplot(3,3,m)
    plot(RanHug(:,1,m).*1000,RanHug(:,s1,m),...
        RanHug(:,1,m).*1000,RanHug(:,s2,m), 'r',...
        RanHug(:,1,m).*1000,RanHug(:,11,p1), '--k');
    set(gca,'FontSize',6);
    set(gcf,'papertype','A4','PaperOrientation','landscape',...
        'paperPosition', [0.63 0.63 28.41 19.72]);
    title(['Proef ',num2str(m), ' (Pr)']);
    legend(['Sensor 1'], ['Sensor 6'],...
        'Location','NorthEast');
    xlabel('Time [ms] ');ylabel('Pressure [kPa]');
    axis ([-0.05 2 min(RanHug(:,s2,m)) max(RanHug(:,s2,m))+40]);
end
hold off;
figure (3), clf(3), hold on;
for m=10:18
    subplot(3,3,m-9)
    plot(RanHug(:,1,m).*1000,RanHug(:,s1,m),...
        RanHug(:,1,m).*1000,RanHug(:,s2,m), 'r',...
        RanHug(:,1,m).*1000,RanHug(:,11,p1), '--k');
    set(gca,'FontSize',6);
    set(gcf,'papertype','A4','PaperOrientation','landscape',...
        'paperPosition', [0.63 0.63 28.41 19.72]);
    title(['Proef ',num2str(m), ' (Pr)']);
    legend(['Sensor 1'], ['Sensor 6'],...
        'Location','NorthEast');
    xlabel('Time [ms] ');ylabel('Pressure [kPa]');
    axis ([-0.05 2 min(RanHug(:,s2,m)) max(RanHug(:,s2,m))+40]);
end
hold off;

figure (4), clf(4), hold on;
for m=19:27
    subplot(3,3,m-18)
    plot(RanHug(:,1,m).*1000,RanHug(:,s1,m),...
        RanHug(:,1,m).*1000,RanHug(:,s2,m), 'r',...
        RanHug(:,1,m).*1000,RanHug(:,11,p1), '--k');
    set(gca,'FontSize',6);
    set(gcf,'papertype','A4','PaperOrientation','landscape',...
        'paperPosition', [0.63 0.63 28.41 19.72]);
    title(['Proef ',num2str(m), ' (Pr)']);
    legend(['Sensor 1'], ['Sensor 6'],...
        'Location','NorthEast');

```

```

xlabel('Time [ms] ');ylabel('Pressure [kPa]');
axis ([-0.05 2 min(RanHug(:,s1,m)) max(RanHug(:,s1,m))+40]);
end
hold off;

figure (5), clf(5), hold on;
for m=28:36
    subplot(3,3,m-27)
    plot(RanHug(:,1,m).*1000,RanHug(:,s1,m),...
        RanHug(:,1,m).*1000,RanHug(:,s2,m),'r',...
        RanHug(:,1,m).*1000,RanHug(:,11,p1),'--k');
    set(gca,'FontSize',6);
    set(gcf,'papertype','A4','PaperOrientation','landscape',...
        'paperPosition',[0.63 0.63 28.41 19.72]);
    title(['Proef ',num2str(m),' (Pr)']);
    legend(['Sensor 1'],['Sensor 6'],...
        'Location','NorthEast');
    xlabel('Time [ms] ');ylabel('Pressure [kPa]');
    axis ([-0.05 2 min(RanHug(:,s1,m)) max(RanHug(:,s1,m))+40]);
    end
    hold off;

figure (6), clf(6), hold on;
for m=37:40
    subplot(2,2,m-36)
    plot(RanHug(:,1,m).*1000,RanHug(:,s1,m),...
        RanHug(:,1,m).*1000,RanHug(:,s2,m),'r',...
        RanHug(:,1,m).*1000,RanHug(:,11,p1),'--k');
    set(gca,'FontSize',6);
    set(gcf,'papertype','A4','PaperOrientation','landscape',...
        'paperPosition',[0.63 0.63 28.41 19.72]);
    title(['Proef ',num2str(m),' (Pr)']);
    legend(['Sensor 1'],['Sensor 6'],...
        'Location','NorthEast');
    xlabel('Time [ms] ');ylabel('Pressure [kPa]');
    if m<=38
        axis ([-0.05 2 min(RanHug(:,s2,m)) max(RanHug(:,s2,m))+5]);
    else
        axis ([-0.05 2 min(RanHug(:,s1,m)) max(RanHug(:,s1,m))+200]);
    end
end
hold off;
%}

%
%           Plotten reproduceerbaarheid proeven 1t/m 36
%{
figure (12), clf(12), hold on;
for t=1:12
    m=t.*3-2;
    subplot(3,4,t)
    plot(tpplot(1:length(RanHug(Opt(s1,m):end,s1,m)),s1,m).*1000,...
        Pplot(1:length(RanHug(Opt(s1,m):end,s1,m)),s1,m),...
        tpplot(1:length(RanHug(Opt(s1,m+1):end,s1,m+1)),s1,m+1).*1000,...
        Pplot(1:length(RanHug(Opt(s1,m+1):end,s1,m+1)),s1,m+1),'r',...
        tpplot(1:length(RanHug(Opt(s1,m+2):end,s1,m+2)),s1,m+2).*1000,...
        Pplot(1:length(RanHug(Opt(s1,m+2):end,s1,m+2)),s1,m+2),'g',...

```

```

        tplot(1:length(RanHug(Opt(s2,p1):end,s2,p1)),s2,p1).*1000,...
        RanHug(1:length(RanHug(Opt(s2,p1):end,s2,p1)),11,p1),'--k');
set(gca,'FontSize',6);
set(gcf,'papertype','A4','PaperOrientation','landscape',...
        'paperPosition',[0.63 0.63 28.41 19.72]);
title(['Sensor ',num2str(s1-1),' (Pr)']);
legend(['Proef',num2str(m)],['Proef',num2str(m+1)],...
        ['Proef',num2str(m+2)],'Location','NorthEast');
xlabel('Time [ms] ');ylabel('Pressure [kPa]');
axis ([0 2 min(RanHug(:,s1,m)) max(RanHug(:,s1,m))+20]);
end
hold off;

figure(13), clf(13), hold on;
for t=1:12
    m=t.*3-2;
    subplot(3,4,t)
    plot(tplot(1:length(RanHug(Opt(s2-1,m):end,s2-1,m)),s2-1,m).*1000,...
        Pplot(1:length(RanHug(Opt(s2-1,m):end,s2-1,m)),s2-1,m),...
        tplot(1:length(RanHug(Opt(s2-1,m+1):end,s2-1,m+1)),s2-1,m+1).*1000,...
        Pplot(1:length(RanHug(Opt(s2-1,m+1):end,s2-1,m+1)),s2-1,m+1),'r',...
        tplot(1:length(RanHug(Opt(s2-1,m+2):end,s2-1,m+2)),s2-1,m+2).*1000,...
        Pplot(1:length(RanHug(Opt(s2-1,m+2):end,s2-1,m+2)),s2-1,m+2),'g',...
        tplot(1:length(RanHug(Opt(s2-1,p1):end,s2-1,p1)),s2-1,p1).*1000,...
        RanHug(1:length(RanHug(Opt(s2-1,p1):end,s2-1,p1)),11,p1),'--k');
set(gca,'FontSize',6);
set(gcf,'papertype','A4','PaperOrientation','landscape',...
        'paperPosition',[0.63 0.63 28.41 19.72]);
title(['Sensor ',num2str(s2-2),' (Pr)']);
legend(['Proef',num2str(m)],['Proef',num2str(m+1)],...
        ['Proef',num2str(m+2)],'Location','NorthEast');
xlabel('Time [ms] ');ylabel('Pressure [kPa]');
axis ([0 2 min(RanHug(:,s2-1,m)) max(RanHug(:,s2-1,m))+5]);
end
hold off;
%}
%
%           Plotten reproduceerbaarheid proeven 28t/m 30
%{
figure (14), clf(14), hold on;
for t=10
    m=t.*3-2;
    plot(tplot(1:length(RanHug(Opt(s1,m):end,s1,m)),s1,m).*1000,...
        Pplot(1:length(RanHug(Opt(s1,m):end,s1,m)),s1,m),...
        tplot(1:length(RanHug(Opt(s1,m+1):end,s1,m+1)),s1,m+1).*1000,...
        Pplot(1:length(RanHug(Opt(s1,m+1):end,s1,m+1)),s1,m+1),'r',...
        tplot(1:length(RanHug(Opt(s1,m+2):end,s1,m+2)),s1,m+2).*1000,...
        Pplot(1:length(RanHug(Opt(s1,m+2):end,s1,m+2)),s1,m+2),'g',...
        tplot(1:length(RanHug(Opt(s2,p1):end,s2,p1)),s2,p1).*1000,...
        RanHug(1:length(RanHug(Opt(s2,p1):end,s2,p1)),11,p1),'--k');
set(gca,'FontSize',6);
set(gcf,'papertype','A4','PaperOrientation','landscape',...
        'paperPosition',[0.63 0.63 28.41 19.72]);
title(['Sensor ',num2str(s1-1),' (Pr)']);
legend(['Proef',num2str(m)],['Proef',num2str(m+1)],...
        ['Proef',num2str(m+2)],'Location','NorthEast');
xlabel('Time [ms] ');ylabel('Pressure [kPa]');
axis ([0 2 min(RanHug(:,s1,m)) max(RanHug(:,s1,m))+20]);

```

```

end
hold off;

figure(15), clf(15), hold on;
for t=10
    m=t.*3-2;
    plot(tplot(1:length(RanHug(Opt(s2-1,m):end,s2-1,m)),s2-1,m).*1000,...
        Pplot(1:length(RanHug(Opt(s2-1,m):end,s2-1,m)),s2-1,m),...
        tplot(1:length(RanHug(Opt(s2-1,m+1):end,s2-1,m+1)),s2-1,m+1).*1000,...
        Pplot(1:length(RanHug(Opt(s2-1,m+1):end,s2-1,m+1)),s2-1,m+1),'r',...
        tplot(1:length(RanHug(Opt(s2-1,m+2):end,s2-1,m+2)),s2-1,m+2).*1000,...
        Pplot(1:length(RanHug(Opt(s2-1,m+2):end,s2-1,m+2)),s2-1,m+2),'g',...
        tplot(1:length(RanHug(Opt(s2-1,p1):end,s2-1,p1)),s2-1,p1).*1000,...
        RanHug(1:length(RanHug(Opt(s2-1,p1):end,s2-1,p1)),11,p1),'--k');
    set(gca,'FontSize',6);
    set(gcf,'papertype','A4','PaperOrientation','landscape',...
        'paperPosition',[0.63 0.63 28.41 19.72]);
    title(['Sensor ',num2str(s2-2),' (Pr)']);
    legend(['Proef',num2str(m)],['Proef',num2str(m+1)],...
        ['Proef',num2str(m+2)],'Location','NorthEast');
    xlabel('Time [ms] ');ylabel('Pressure [kPa]');
    axis ([0 2 min(RanHug(:,s2-1,m)) max(RanHug(:,s2-1,m))+5]);
end
hold off;
%}

%
%           Plotten toepassing Rankine Hugoniot op sensor 8
%{
figure(16),clf(16),hold on;
plot(tplot(1:length(RanHug(Opt(s1,p1):end,s1,p1)),s1,p1).*1000,...
    Pplot(1:length(RanHug(Opt(s1,p1):end,s1,p1)),s1,p1),...
    tplot(1:length(RanHug(Opt(s2,p1):end,s2,p1)),s2,p1).*1000,...
    Pplot(1:length(RanHug(Opt(s2,p1):end,s2,p1)),s2,p1),'r',...
    tplot(1:length(RanHug(Opt(s2,p1):end,s2,p1)),s2,p1).*1000,...
    RanHug(1:length(RanHug(Opt(s2,p1):end,s2,p1)),11,p1),'--k');
set(gca,'FontSize',6);
set(gcf,'papertype','A4','PaperOrientation','landscape',...
    'paperPosition',[0.63 0.63 28.41 19.72]);
title(['Proef ',num2str(p1),' (Pr)']);
legend(['Sensor 8 (gemeten) '],['Sensor 8 (geconverteerd) '],...
    'Location','NorthEast');
xlabel('Time [ms] ');ylabel('Pressure [kPa]');
axis ([0 2 min(RanHug(:,s2,p1)) max(RanHug(:,s2,p1))+20]);
hold off;

figure (17), clf(17), hold on;
plot(tplot(1:length(Imp(:,s1,p1)),s1,p1).*1000,Imp(:,s1,p1),...
    tplot(1:length(Imp(:,s2,p1)),s2,p1).*1000,Imp(:,s2,p1),'r');
set(gca,'FontSize',6);
set(gcf,'papertype','A4','PaperOrientation','landscape',...
    'paperPosition',[0.63 0.63 28.41 19.72]);
title(['Proef ',num2str(p1),' (Ir)']);
legend(['Sensor 8 (gemeten) '],['Sensor 8 (geconverteerd) '],...
    'Location','NorthEast');
xlabel('Time [ms] ');ylabel('Impulse [kPa msec]');
axis ([0 1.2 min(Imp(:,s2,p1)) max(Imp(:,s2,01))+40]);
hold off;
%}

```

```
%{  
for m=1:17  
naam = sprintf('Figuur%d', m);  
print (['-f',num2str(m)], '-dmeta', naam);  
end  
%}  
  
toc  
whos
```

Weer in Brussel, BE

Brussel
Belgie

Neerslag -
Gem. wind: **15 km/h**
Rel. luchtvochtigheid: **89 %**



4°C

Vandaag	Donderdag	Vrijdag	Zaterdag	Zondag	Trend		
Uur (CET)	10:00 -13:00	13:00 -16:00	16:00 -19:00	19:00 -22:00	22:00 -01:00	01:00 -04:00	04:00 -07:00
							
Temperatuur	5 °C	6 °C	7 °C	7 °C	5 °C	3 °C	3 °C
Neerslag			0.7 l/m²		0 l/m²		0 l/m²
Rukwinden	-	28 km/h	27 km/h	-	-	-	-
Windrichting	↗	↗	→	↘	→	→	↗
Gem. wind	13 km/h	16 km/h	14 km/h	11 km/h	9 km/h	10 km/h	12 km/h
Rel. luchtvochtigheid	90 %	85 %	88 %	91 %	90 %	90 %	90 %
Gevoelstemperatuur	1 °C	3 °C	4 °C	5 °C	3 °C	1 °C	-1 °C
Dauwpunt	3 °C	4 °C	5 °C	5 °C	3 °C	2 °C	1 °C
Luchtdruk	1027 hPa	1027 hPa	1027 hPa	1029 hPa	1031 hPa	1032 hPa	1030 hPa
Verse sneeuw		0 cm		0 cm		0 cm	
Sneeuwhoogte		0 cm		0 cm		0 cm	

meer ↗

Gegevens van het weerstation Bruxelles, 50m (15.9 km)

Andere stations in de buurt:

+3.9 km - Uccle

+32 km - Beauvechain

+39 km - Gembloux-Ernage

+42 km - Charleroi

Zon

Zonsopgang
08:31

Zonsondergang
16:32

Maan

Fase
Nieuwe maan



Weer in Brussel, BE

Brussel
Belgie

Neerslag -
Gem. wind: **11 km/h**
Rel. luchtvochtigheid: **82 %**



7°C

Vandaag	Donderdag	Vrijdag	Zaterdag	Zondag	Trend		
Uur (CET)	16:00 -19:00	19:00 -22:00	22:00 -01:00	01:00 -04:00	04:00 -07:00	07:00 -10:00	10:00 -13:00
							
Temperatuur	7 °C	7 °C	5 °C	4 °C	3 °C	2 °C	3 °C
Neerslag			0 l/m²		0 l/m²		0 l/m²
Rukwinden	21 km/h	21 km/h	18 km/h	16 km/h	16 km/h	21 km/h	28 km/h
Windrichting	→	↘	↘	→	↗	↗	↗
Gem. wind	10 km/h	8 km/h	6 km/h	6 km/h	7 km/h	10 km/h	17 km/h
Rel. luchtvochtigheid	85 %	87 %	87 %	88 %	92 %	93 %	92 %
Gevoelstemperatuur	5 °C	5 °C	4 °C	2 °C	1 °C	-1 °C	-1 °C
Dauwpunt	5 °C	5 °C	3 °C	2 °C	1 °C	1 °C	2 °C
Luchtdruk	1028 hPa	1030 hPa	1031 hPa	1032 hPa	1030 hPa	1029 hPa	1026 hPa
Verse sneeuw		0 cm		0 cm		0 cm	

meer ↗

Gegevens van het weerstation Uccle, 104m (3.9 km)

Andere stations in de buurt:

+16 km - Bruxelles

+32 km - Beauvechain

+39 km - Gembloux-Ernage

+42 km - Charleroi

Zon

Zonsopgang
08:32

Zonsondergang
16:34

Maan

Fase
Nieuwe maan



Het weer in Brussel, 04.12.2013

Uccle
Belgie

Neerslag -
Gem. wind: **11 km/h**
Rel. luchtvochtigheid: **96 %**



1°C

Vandaag	Vrijdag	Zaterdag	Zondag	Maandag	Trend		
Uur (CET)	10:00 -13:00	13:00 -16:00	16:00 -19:00	19:00 -22:00	22:00 -01:00	01:00 -04:00	04:00 -07:00
							
Temperatuur	2 °C	5 °C	7 °C	7 °C	6 °C	4 °C	3 °C
Neerslag			0 l/m²		0.1 l/m²		0 l/m²
Rukwinden	32 km/h	43 km/h	49 km/h	48 km/h	50 km/h	44 km/h	41 km/h
Windrichting	↗	↗	→	→	→	→	→
Gem. wind	19 km/h	25 km/h	23 km/h	21 km/h	14 km/h	13 km/h	11 km/h
Rel. luchtvochtigheid	92 %	84 %	80 %	81 %	69 %	66 %	66 %
Gevoelstemperatuur	-2 °C	0 °C	3 °C	4 °C	3 °C	1 °C	0 °C
Dauwpunt	1 °C	2 °C	4 °C	4 °C	1 °C	-2 °C	-3 °C
Luchtdruk	1028 hPa	1021 hPa	1017 hPa	1017 hPa	1019 hPa	1021 hPa	1023 hPa
Verse sneeuw			0 cm		0 cm		0 cm

meer ↗

Gegevens van het weerstation Uccle, 104m

Andere stations in de buurt:

+17 km - Bruxelles

+30 km - Beauvechain

+35 km - Gembloux-Ernage

+38 km - Charleroi

Zon

Zonsopgang
08:33

Zonsondergang
16:33

Maan

Fase
wassend



Het weer in Uccle, 05.12.2013

Uccle
Belgie

Neerslag -
Gem. wind: **15 km/h**
Rel. luchtvochtigheid: **71 %**



3°C

Vandaag	Zaterdag	Zondag	Maandag	Dinsdag	Trend		
Uur (CET)	10:00 -13:00	13:00 -16:00	16:00 -19:00	19:00 -22:00	22:00 -01:00	01:00 -04:00	04:00 -07:00
							
Temperatuur	3 °C	4 °C	4 °C	3 °C	2 °C	1 °C	1 °C
Neerslag			0 l/m²		0 l/m²		0 l/m²
Rukwinden	30 km/h	35 km/h	35 km/h	31 km/h	27 km/h	23 km/h	20 km/h
Windrichting	→	↘	↘	→	→	→	↗
Gem. wind	16 km/h	18 km/h	16 km/h	12 km/h	9 km/h	7 km/h	7 km/h
Rel. luchtvochtigheid	71 %	83 %	81 %	65 %	71 %	78 %	83 %
Gevoelstemperatuur	-1 °C	0 °C	0 °C	0 °C	-1 °C	-1 °C	-1 °C
Dauwpunt	-2 °C	-2 °C	-3 °C	-3 °C	-3 °C	-3 °C	-2 °C
Luchtdruk	1024 hPa	1025 hPa	1027 hPa	1028 hPa	1029 hPa	1030 hPa	1030 hPa
Verse sneeuw			0 cm		0 cm		0 cm

meer ↗

Gegevens van het weerstation Uccle, 104m

Andere stations in de buurt:

+17 km - Bruxelles

+30 km - Beauvechain

+35 km - Gembloux-Ernage

+38 km - Charleroi

Zon

Zonsopgang
08:34

Zonsondergang
16:33

Maan

Fase
wassend



Het weer in Uccle, 06.12.2013

Het weer in Brussel, 04.12.2013

Uccle
Belgie

Neerslag -
Gem. wind: **33 km/h**
Rel. luchtvochtigheid: **78 %**



5°C

Vandaag	Vrijdag	Zaterdag	Zondag	Maandag	Trend		
Uur (CET)	16:00 -19:00	19:00 -22:00	22:00 -01:00	01:00 -04:00	04:00 -07:00	07:00 -10:00	10:00 -13:00
							
Temperatuur	7 °C	7 °C	6 °C	4 °C	3 °C	3 °C	3 °C
Neerslag			0 l/m²		0 l/m²		0 l/m²
Rukwinden	57 km/h	54 km/h	52 km/h	45 km/h	42 km/h	39 km/h	38 km/h
Windrichting	→	→	→	→	→	→	→
Gem. wind	29 km/h	21 km/h	14 km/h	12 km/h	12 km/h	12 km/h	14 km/h
Rel. luchtvochtigheid	78 %	78 %	69 %	68 %	70 %	69 %	65 %
Gevoelstemperatuur	2 °C	4 °C	3 °C	1 °C	0 °C	-1 °C	-1 °C
Dauwpunt	3 °C	4 °C	1 °C	-1 °C	-2 °C	-3 °C	-3 °C
Luchtdruk	1019 hPa	1018 hPa	1019 hPa	1021 hPa	1022 hPa	1023 hPa	1025 hPa
Verse sneeuw			0 cm		0 cm		0 cm

meer ↗

Gegevens van het weerstation Uccle, 104m

Andere stations in de buurt:

+17 km - Bruxelles

+30 km - Beauvechain

+35 km - Gembloux-Ernage

+38 km - Charleroi

Zon

Zonsopgang
08:33

Zonsondergang
16:33

Maan

Fase
wassend



Het weer in Uccle, 05.12.2013

Uccle
Belgie

Neerslag -
Gem. wind: **22 km/h**
Rel. luchtvochtigheid: **55 %**



5°C

Vandaag	Zaterdag	Zondag	Maandag	Dinsdag	Trend		
Uur (CET)	16:00 -19:00	19:00 -22:00	22:00 -01:00	01:00 -04:00	04:00 -07:00	07:00 -10:00	10:00 -13:00
							
Temperatuur	4 °C	3 °C	2 °C	2 °C	2 °C	3 °C	4 °C
Neerslag			0 l/m²		0 l/m²		0 l/m²
Rukwinden	32 km/h	31 km/h	26 km/h	23 km/h	19 km/h	19 km/h	21 km/h
Windrichting	↘	↘	→	→	↗	↗	↗
Gem. wind	16 km/h	12 km/h	8 km/h	7 km/h	7 km/h	8 km/h	10 km/h
Rel. luchtvochtigheid	61 %	63 %	61 %	71 %	76 %	79 %	84 %
Gevoelstemperatuur	0 °C	0 °C	0 °C	0 °C	-1 °C	0 °C	2 °C
Dauwpunt	-3 °C	-3 °C	-3 °C	-2 °C	-2 °C	0 °C	3 °C
Luchtdruk	1026 hPa	1028 hPa	1029 hPa	1029 hPa	1029 hPa	1028 hPa	1028 hPa
Verse sneeuw			0 cm		0 cm		0 cm

meer ↗

Gegevens van het weerstation Uccle, 104m

Andere stations in de buurt:

+17 km - Bruxelles

+30 km - Beauvechain

+35 km - Gembloux-Ernage

+38 km - Charleroi

Zon

Zonsopgang
08:34

Zonsondergang
16:33

Maan

Fase
wassend



Het weer in Uccle, 06.12.2013