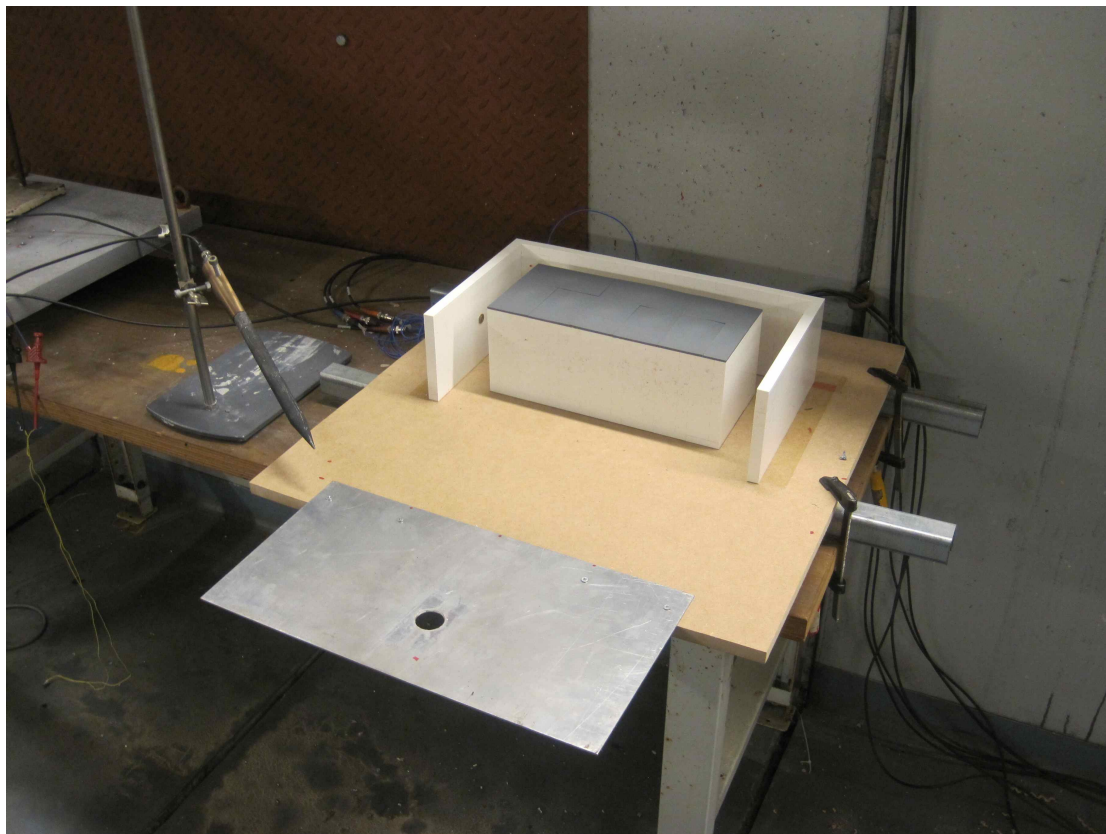


Explosies in stedelijke omgevingen: experimentele studie op schaal



Auteur:
Cadet-Vaandrig C.V. Blondeel Timmerman

Explosies in stedelijke omgevingen: experimentele studie op schaal

Bachelor eindopdracht voor de studie Civiele Techniek

Auteur:

Cadet-Vaandrig C.V. Blondeel Timmerman

Nederlandse Defensie Academie, Breda

Universiteit Twente, Enschede

Begeleiders:

Ir. J.B.W. Borgers

Nederlandse Defensie Academie, Breda

Universiteit Twente, Enschede

Majoor. Dr. Ir. Lecompte

Koninklijke Militaire School, Brussel

Voorwoord

De afsluiting van de Bachelor Civiele Techniek aan de Koninklijke Militaire Academie (KMA) bestaat uit het schrijven van een scriptie. De geniecadetten krijgen een aantal werkplaatsen voorgelegd waar zij het onderzoek kunnen uitvoeren. Ook de Koninklijke Militaire School (KMS) te Brussel behoort tot de opties. Al jaren bestaat er een samenwerkingsverband tussen de KMA in Breda en de KMS in Brussel, veelal op het gebied van explosieven. Op basis van dit samenwerkingsverband is dit onderzoek uitgevoerd.

Gedurende mijn tijd in Brussel heb ik met verschillende personen op de KMS samengewerkt. In het bijzonder wil ik mijn begeleider Majoor Dr. Ir. Lecompte bedanken die ondanks zijn functiewisseling toch bereid was om mij te begeleiden. Naast zijn drukke schema heeft hij vrijwillig tijd voor mij weten vrij te maken en op basis van de wekelijkse gesprekken mij in de juiste banen weten te leiden.

Tijdens mijn verblijf in Brussel heb ik enthousiast gebruik gemaakt van de explosiebunker in de kelder van het Bouwkunde gebouw. Hier heeft dhr. IR. B. Reymen mij zorgvuldig geholpen met het bouwen van de constructie en het uitvoeren van de proeven. Voor zijn tijd en het advies dat hij mij heeft gegeven wil ik hem hartelijk danken.

Daarnaast wil ik mijn begeleider uit Breda dhr. Ir. J. Borgers bedanken voor zijn kritische en nuchtere blik op mijn werk. Voor vragen en terugkoppeling kon ik altijd bij hem terecht.

Tot slot zijn er nog een aantal personen die ik in het kader van mijn eindwerk kort wil bedanken. De Prof. Dr. Ir. Vantomme die ons hartelijk heeft ontvangen op zijn departement. Bert von Rosen en Robert Ripley die mij hebben geïnspireerd dit onderzoek uit te voeren, hun onderzoeksresultaten beschikbaar voor mij hebben gesteld en al mijn vragen wilden beantwoorden. Mijn moeder Margreet Blondeel Timmerman die altijd bereid was mijn stukken op stijl en taalfouten na te kijken en mijn collega, Sven Weijnschenk, die mij naast het onderzoek ook heeft geholpen met het nodige vertier in Brussel.

Het verblijf in Brussel is een leerzame periode geweest en een mooie afsluiting van de studie. Op de KMS heerst een fijne Belgische gezelligheid die wij in Nederland niet kunnen evenaren. Ook van de interactie tussen de vele nationaliteiten op de KMS heb ik veel geleerd en dat zal ik meenemen als ervaring voor mijn latere carrière.

Breda, februari 2012

Chris Blondeel Timmerman

Cadet-Vaandrig bestemd voor het Wapen der Genie

Samenvatting

Tegenwoordig is er veel vraag naar onderzoek op het gebied van explosies. Explosies in stedelijke omgevingen is een specifieke onderwerp binnen dit onderzoeksgebied. In deze eindstudie wordt een stedelijke omgeving aangeduid met de Engelse term Urban Environment. In samenwerking met de Koninklijke Militaire School in Brussel wordt er een bachelor eindscriptie geschreven over explosies in Urban Environments.

Met behulp van een schaalmodel, kan een configuratie van een stedelijke omgeving worden nagebootst. Vervolgens kan met dit schaalmodel experimenteel onderzoek worden gedaan. De explosieven die hierbij gebruikt worden, hebben een kleiner ladinggewicht dan de explosieven die in de praktijk, bijvoorbeeld bij aanslagen, worden gebruikt. Hierbij moet er worden gezocht naar de juiste schaalfactor tussen constructie en ladinggewicht. Door druksensoren in het model te integreren, kunnen de drukken van de explosie worden gemeten. Op basis van deze meetgegevens kan men conclusies trekken over de voortplanting van de schokgolf door dit schaalmodel.

Vooraf aan de experimenten is er een literatuurstudie uitgevoerd in het kader van dit onderwerp. Uit deze literatuur stukken is er één studie naar voren gekomen waarop het schaalmodel in dit onderzoek wordt gebaseerd. Deze studie van auteur R.C. Ripley et al, werd als geschikt bevonden door de vorm van de constructie en de lading die in het onderzoek is gebruikt. Schaling van zowel de constructie als lading, kan eenvoudig worden toegepast. Met behulp van deze literatuur studie, kunnen de resultaten worden vergeleken met de resultaten die in de experimenten van deze scriptie worden gekregen.

Vooraf aan de proeven die worden uitgevoerd binnen het model, moet het juiste ladinggewicht worden bepaald. Dit wordt gedaan door het ladinggewicht wat gebruikt is in het onderzoek van Ripley terug te schalen naar een ladinggewicht geschikt voor de afmetingen van de constructie in deze eindstudie. Om de kracht van de lading te valideren, worden er een aantal proeven gedaan met het berekende ladinggewicht. Daarnaast is tijdens deze proeven het materiaal Lego getest op geschiktheid voor de constructie van het schaalmodel.

Nadat de kracht van de lading is bepaald, kan het model worden geconstrueerd. In dit onderzoek is er gekozen om te bouwen met Lego blokjes. Deze Lego blokjes zijn relatief goedkoop en het geheel is zeer modulair, waardoor andere stedelijke configuraties snel zijn te realiseren. Door de vaste afmeting van het Lego blokje moet de opstelling uit de literatuur worden geschaald. Het geheel is op een plaat van samengeperst hout (MDF) geplaatst en de lading is geplaatst op een aluminium plaat, die aan de MDF plaat wordt vastgeschroefd.

Naast het experimentele onderzoek en het literatuur onderzoek, wordt er ook een Numeriek onderzoek gedaan. Numeriek onderzoek houdt in, het simuleren van een detonatie met behulp van software. Deze drie onderzoeken samen, worden onderling vergeleken. Hierbij wordt gekeken naar de overeenkomsten en de verschillen in de onderzoeken. Op basis van deze resultaten kunnen er conclusies en aanbevelingen worden gedaan.

Inhoudsopgave

Voorwoord	5
Samenvatting	7
Inhoudsopgave	9
1. Inleiding	11
1.1 Aanleiding.....	11
1.2 Probleemstelling.....	12
1.3 Vraagstelling.....	12
1.4 Doelstelling	13
1.5 Afbakening van het onderzoek.....	13
1.6 Structuur	14
2. Literatuurstudie	15
2.1 Theorie open veld	15
2.1.1 Explosie	15
2.1.2 TNT equivalentie	15
2.1.3 Schokgolf.....	16
2.1.4 Impuls	18
2.1.5 Sferische en Hemisferische explosies	18
2.1.6 Mach-stam.....	19
2.1.7 Schaal wetten.....	19
2.2 Theorie Interactie	20
2.2.1 Reflectie.....	20
2.2.2 Diffractie	21
2.3 Model van Ripley	22
2.3.1 Constructie.....	22
2.3.2 Lading.....	22
3. TNT equivalentie proefopstelling	24
3.1 Proefopstelling en resultaten Literatuur.....	24
3.1.1 Proefopstelling en resultaten van Prins.....	24
3.1.2 Proefopstelling en resultaten Balumé.....	25
3.1.3 Conclusie.....	26
3.2 Slagpijpje.....	26
3.2.1 Berekening TNT equivalent.....	27
3.2.2 Elektrisch slagpijpje.....	27
3.2.3 Opstelling Detonatiepunt.....	28
3.2.4 Opstelling constructie	29
3.2.5 Resultaten experiment slagpijpje	31
3.2.6 Ladinggewicht CONWEP	33
3.2.7 Conclusies en aanbeveling proefopstelling slagpijpje	35
3.3 Composition 4	35
3.3.1 Opstelling C4	36
3.3.2 Resultaten experiment C4	37
3.3.3 Ladinggewicht CONWEP	37
3.3.4 Conclusies en aanbevelingen proefopstelling C4	38
4. Proefopstelling	39
4.1 Model op ware grootte en model Ripley	40
4.1.1 Model op ware grootte.....	40
4.1.2 Geschaald model uit de literatuur	40
4.2 Materiaalkeuze	41

4.3 Constructie proefopstelling.....	43
4.4 Lading.....	43
4.4.1 Lading gewicht.....	44
4.4.2 Lading afstand	44
4.5 Meetapparatuur	44
4.5.1 Blastpencils.....	45
4.5.2 Druksensoren	45
4.5.3 Verwerking	45
4.6 Proefopstelling met meetapparatuur	46
4.6.1 Literatuur Sensoren	46
4.6.2 Sensor 1, 2 en 3	46
4.6.3 Sensor 4 en 5	47
4.6.4 Blastpencil.....	48
4.6.5 Testprogramma	48
5. Resultaten en Bespreking	49
5.1 Resultaten experiment.....	49
5.1.1 Sensor 1	49
5.1.2 Sensor 2	50
5.1.3 Sensor 3	51
5.1.4 Sensor 4.....	52
5.1.5 Sensor 5.....	53
5.1.6 Blast pencil.....	54
5.1.7 Reproduceerbaarheid	55
5.2 Numerieke simulatie	55
5.2.1 Voortplanting Schokgolf	55
5.3 Vergelijking experiment, literatuur en numerieke simulatie	59
5.4.1 Sensor 1	60
5.4.2 Sensor 2	62
5.4.3 Sensor 3	63
5.4.4 Sensor 4.....	63
5.4.5 Sensor 5	64
6. Conclusie en aanbevelingen	66
6.1 Conclusie	66
6.1.1 Deelvragen	66
6.1.2 Hoofdvraag	67
6.2 Meetfouten en onnauwkeurigheden	68
6.3 Aanbevelingen	68
Bibliografie	70
7 Appendices.....	71
Appendix A: meetrapport TNT equivalentie	72
Appendix B: Computersoftware ConWep.....	83

1. Inleiding

Door de jaren heen is er een nauwe samenwerking ontstaan tussen de Faculteit Militaire Wetenschappen en de Koninklijke Militaire School te Brussel op het onderzoeksgebied van explosieven. Ook dit jaar is er een voorstel gekomen vanuit de KMS voor een eindstudie op dit gebied. Het betreft hier een onderzoek naar Schokgolfvoortplantingen in een Urban Environment ofwel stedelijke omgeving. De faciliteiten op de KMS lenen zich er ideaal voor om dit onderzoek te realiseren.

1.1 Aanleiding

Conventionele oorlogvoering komt tegenwoordig zelden voor, het evenwicht verschuift steeds vaker naar het asymmetrische oorlog voeren. De kans op terroristische aanslagen wordt hierdoor overal ter wereld groter. Omdat deze terroristen vaak zoveel mogelijk slachtoffers willen maken en veel schade willen aanrichten, is het vanzelfsprekend dat zij dit in een stad willen doen. Voorbeelden van dit soort aanslagen in het verleden zijn de aanslagen op de metrostations in Madrid op 11 maart 2004, waarbij 191 mensen werden gedood. Ook in Londen vonden er op 7 juli 2005 een aantal bomaanslagen plaats waarvan er één in een bus. Misschien wel het beste voorbeeld: Anders Breivik die op 22 juli 2011 met een autobom een aanslag pleegde in de regeringswijk in Oslo.

Een manier van optreden van deze terroristen is het gebruik van de “Vehicle Born IED”. Een explosief dat in een auto wordt gemonteerd en vervolgens op iedere willekeurige plaats tot ontploffing kan worden gebracht. Het soort explosieven in deze situatie zijn nogal verschillend, vandaar de naam IED oftewel Improvised Explosive Device. Een explosief bestaat hoofdzakelijk uit een inleidende lading die de hoofdlading afzet. Op het moment dat het explosief wordt afgezet ontstaan er verschillende effecten. Ten eerste ontstaat er een schokgolf oftewel blast die zich in de omgeving zal voortplanten. Deze schokgolf is te vergelijken met geluidsgolven die zich in een omgeving verspreiden, echter de druk van een schokgolf is vele malen hoger (Borgers, Pyrotechniek en Beschermingsconstructies, 2012).

Ten tweede zal er fragmentatie ontstaan van het explosief zelf of van omliggende materialen. Fragmentatie betekent: het in het rond vliegen van materialen, ook wel brokstukken genoemd. In dit onderzoek wordt er gefocust op de eerste uitwerking van een explosief, de schokgolf.

Een bedrijf of instantie die van plan is een voorziening te bouwen of te kopen in een riskante omgeving, waar de kans op terroristische aanslagen groter is dan op andere locaties, zal voorzorgsmaatregelen moeten nemen. Voorbeelden van riskante omgevingen zijn: in de buurt van een grote overheidsinstantie, zoals een gebouw van de Europese Unie of dichtbij het NAVO¹ hoofdkwartier, die beiden in de binnenstad van Brussel zijn gevestigd. Deze nieuwe bedrijven of instanties moeten weten wat de effecten van zo’n explosie op het gebouw zijn. Zij moeten weten wat voor soort beschermend glas zij kunnen aanschaffen en wat voor

¹ Noord Atlantische Verdragsorganisatie

soort gevels er geplaatst kunnen worden. Hierdoor kunnen slachtoffers en schade worden beperkt.

Op dit moment wordt er door verschillende internationale (overheids) instanties onderzoek gedaan naar explosies in stedelijke omgevingen. Dit kan op verschillende manieren: door numeriek onderzoek en door praktijk onderzoek. Praktijk onderzoek is vaak onderverdeeld in onderzoek op werkelijke schaal en onderzoek op gereduceerde schaal. Onder numeriek onderzoek wordt verstaan: het onderzoek doen door middel van computersimulaties.

De accommodatie op de Koninklijke Militaire School in Brussel leent zich er goed voor om onderzoek te doen op gereduceerde schaal. Er is een springbunker aanwezig die speciaal gemaakt is voor onderzoek met behulp van kleine schaalmodellen. Vandaar dat het doen van onderzoek op deze kleine schaal hier ook een unieke kans is. Daarvoor moet er een schaal model van een Urban Environment worden gemaakt, waarbij het systeem modulair is om zo verschillende configuraties te kunnen aannemen. Zo kunnen er ook in de toekomst andere stedelijke configuraties worden gemoduleerd waarmee onderzoek kan worden gedaan.

1.2 Probleemstelling

In de aanleiding is al naar voren gekomen dat men meer inzicht wil krijgen in de schokgolfgedragingen in een Urban Environment. De probleemstelling luidt dan ook:

Hoe plant een schokgolf zich voort in een bepaalde configuratie van een Urban Environment en op welke manier kan dit worden onderzocht?

1.3 Vraagstelling

Centrale vraag: Hoe plant een schokgolf zich voort in een Urban Environment en hoe kan dit worden onderzocht in een modulair systeem op kleine schaal?

Om de Centrale vraag te beantwoorden, moet deze worden onderverdeeld in deelvragen. De antwoorden op de deelvragen, zullen de centrale vraag beantwoorden.

- 1) Hoe ga ik experimenteel onderzoek doen op kleine schaal?
 - a) Op welke manier kan er een modulair systeem op kleine schaal worden nagebootst?
 - i) Hoe kunnen detonaties in dit model worden gerealiseerd?
 - ii) Hoe ga ik schaling toepassen binnen het model?
- 2) Hoe kan deze schokgolf in beeld worden gebracht en op welke manier?
 - a) Op welke manier kunnen de resultaten in kaart worden gebracht?
 - i) Hoe kunnen de resultaten van de Piekoeverdruk uiteen worden gezet?
 - ii) Hoe kunnen de resultaten van de Impuls uiteen worden gezet?
 - b) Hoe kunnen deze resultaten worden vergeleken en gevalideerd?
 - i) Wat zijn de vergelijkingen van de resultaten met numerieke simulatie?
 - ii) Wat zijn de vergelijkingen van de resultaten met bestaande Literatuur?

1.4 Doelstelling

Het doel van dit onderzoek is het ontwikkelen van een modulaair systeem op schaal, waarmee de gedragingen van schokgolven in een Urban Environment kunnen worden onderzocht.

1.5 Afbakening van het onderzoek

Zoals in de aanleiding al kort naar voren is gekomen kan men dit probleem op diverse manieren benaderen. Aan iedere mogelijkheid zitten een aantal voor en nadelen. Hieronder wordt beschreven voor welke mogelijkheden er in dit onderzoek wordt gekozen.

Het onderzoek kan zowel numeriek als experimenteel worden benaderd. In deze eindstudie wordt er gekozen om beide te kiezen, zo kan het experiment met behulp van het numerieke onderzoek worden gevalideerd en eventueel geldig worden verklaard. De numerieke benadering wordt gedaan door een collega op de Koninklijke Militaire School met de simulatiesoftware LS_DYNA. Met behulp van deze software kunnen verschillende waarden voor piekoverdruk en impuls worden gevonden op basis van eindige elementen simulatie.

Naast numerieke simulatie wordt het onderzoek ook experimenteel benaderd. Dit kan op verschillende manieren worden gedaan. Men kan het op werkelijke schaal beproeven, wat een direct vergelijkbaar resultaat oplevert. Het nadeel aan deze methode is dat het veel tijd in beslag neemt en vaak veel geld kost.

Daarnaast kan er ook onderzoek op gereduceerde schaal worden gedaan. Een voordeel hieraan is dat het minder tijd en geld kost om dit te realiseren. Er moeten een aantal schaalfactoren worden toegepast, maar men kan hiermee ook goed de realiteit nabootsen. De faciliteiten op de Koninklijke Militaire School lenen zich hier ideaal voor. In de kelder van één van de gebouwen is een bunker aanwezig die is gemaakt om proeven te doen met explosieven op kleine schaal.

Tevens wordt er vanuit de KMS een eis gesteld dat het systeem van het model dat wordt gebruikt modulaair moet zijn. Om zo meerdere configuraties binnen een korte tijd te kunnen realiseren, moet het model snel kunnen worden omgeschakeld van de ene configuratie, naar een andere configuratie.

In dit onderzoek wordt er dan ook gekozen om het experiment te doen op schaal en met name op kleine schaal. Nadat de resultaten van dit experiment zijn verkregen, wordt dit vergeleken met de resultaten uit de literatuur en met de numerieke analyse. Hiermee wordt het experiment gevalideerd en kunnen conclusies worden getrokken.

1.6 Structuur

Het totale verslag bestaat uit 6 hoofdstukken. In deze paragraaf wordt er beschreven hoe het verslag is ingedeeld.

Nadat in hoofdstuk 1 het probleem is ingeleid, wordt in hoofdstuk 2 de algemene theorie van pyrotechniek beschreven, hierin wordt kort uitgelegd welke factoren van invloed zijn bij dit onderzoek, op het gebied van pyrotechniek. Ook wordt de specifieke theorie uiteengezet die kenmerkend is voor dit onderzoek. Tot slot is dit onderzoek deels gebaseerd op onderwerpen in de literatuur, daarom wordt de literatuurstudie die in dit onderzoek van toepassing is besproken.

In hoofdstuk 3 wordt het TNT equivalent van de lading bepaald. Middels een aantal proeven en met behulp van het computerprogramma CONWEP wordt dit berekend. Deze proeven zijn essentieel om het TNT equivalent van de geschaalde lading te kunnen bepalen.

Hoofdstuk 4 bestaat uit de beschrijving van het model dat wordt gebruikt tijdens de experimenten. In dit hoofdstuk worden de afmetingen en schematische opstellingen beschreven. Ook wordt de meetapparatuur die in het model is geïntegreerd toegelicht.

Hoofdstuk 5 bestaat uit de resultaten die tijdens de proeven met het model zijn gevonden. Deze resultaten worden uiteengezet en tevens beproefd op reproduceerbaarheid. Vervolgens worden deze vergeleken met de resultaten uit de numerieke analyse en de experimenten uit de literatuurstudie.

Het afsluitende hoofdstuk, hoofdstuk 6 bestaat uit de conclusies en de meetfouten die in dit onderzoek zijn gemaakt. De conclusie wordt gedaan door het geven van antwoorden op de deelvragen waarna er antwoord kan worden gegeven op de hoofdvraag. Tevens worden er een aantal aanbevelingen gedaan die in de toekomst toepasbaar zijn.

2. Literatuurstudie

Dit hoofdstuk is onderverdeeld in twee delen, één deel met uitleg van een aantal basisbegrippen in de pyrotechniek die veelal plaats vinden in het open veld en één deel met specifieke theorie waarbij deze karakteriserend is voor interactie met objecten.

2.1 Theorie open veld

De theorie in het open veld bestaat uit een aantal inleidende onderwerpen op het gebied van pyrotechniek. De onderwerpen die hier aan bod komen zijn: het begrip explosie, TNT equivalentie, schokgolf, impuls en tot slot sferische en hemisferische explosies. Deze theorie kan geschaard worden onder de algemene theorie die van toepassing is als een explosief detoneert in een open veld zonder obstakels.

2.1.1 Explosie

Een explosie kan gedefinieerd worden als een proces waarbij energie in zeer korte tijd en in een beperkt volume vrijkomt, hierdoor ontstaat een drukgolf met een eindige amplitude die zich van het detonatiepunt af beweegt. Explosies kan men onderverdelen in 3 groepen (Ir.J.Borgers 2011);

- Chemische explosie; een snelle verbranding van brandstof elementen, zoals koolstof en waterstof dat is opgenomen in het explosief, de zuurstof die voor de detonatie wordt gebruikt is ook opgenomen in het explosief.
- Nucleaire explosie; een explosie waarbij de vrijgekomen energie door een nucleaire reactie wordt gevormd.
- Fysische explosie; het bezwijken van een vat door inwendige onderdruk of overdruk.

In dit onderzoek wordt er gebruik gemaakt van springstoffen. Het detoneren van deze springstoffen valt onder de categorie chemische explosie. De kracht van deze springstoffen kan worden gekarakteriseerd met behulp van het begrip TNT equivalentie.

2.1.2 TNT equivalentie

Elke soort springstof kan worden uitgedrukt in een bepaalde hoeveelheid TNT equivalent. TNT equivalent wordt gebruikt om een schatting te maken van de piekoverdruk en impuls bij een ander soort springstof dan TNT.

In tabel 2.1 zijn verschillende springstoffen uiteengezet met hun bijbehorende TNT equivalenties. Wordt de massa van bijvoorbeeld een explosief van C-4 vermenigvuldigd met 1,35, dan geeft de uitkomst een inschatting van de hoeveelheid TNT die nodig is om dezelfde kracht van explosie te kunnen verkrijgen.

Explosief	Massa specifieke energie (kJ/kg)	TNT equivalentie Q/Q_{TNT}
TNT	4520	1,000
Compositie B	5190	1,148
RDX	5360	1,185
HMX	5680	1,256
Nitroglycerine	6700	1,481
60% Nitroglycerine dynamiet	2710	0,600
Semtex	5660	1,250

Tabel 2.1: TNT equivalentie (Borgers 2012)

Tabel 2.1 is echter niet nauwkeurig, elke soort springstof verdeelt zich verschillend over de parameters piekoverdruk en impuls. Men maakt daarom ook wel gebruik van 2 verschillende conversiefactoren, één voor piekoverdruk en één voor impuls, deze staan in tabel 2.2.

Explosief	TNT equivalentie druk	TNT equivalentie impuls	Druk bereik [kPa]
TNT	1,00	1,00	Standaard
Composite B	1,16	1,14	34-6895
RDX	1,46	1,30	14-345
HMX	1,56	1,36	14-345
C-4	1,35	1,19	69-690
PETN	1,27	-	69-690
Pentolite (50/50)	1,38	1,14	34-4130
Tritonal (80/20 TNT/AL)	1,07	0,96	34-690
ANFO (94,6 AmNi/Fuel Oil)	0,83	0,81	5-1000

Tabel 2.2: Piekoverdruk (Borgers 2012)

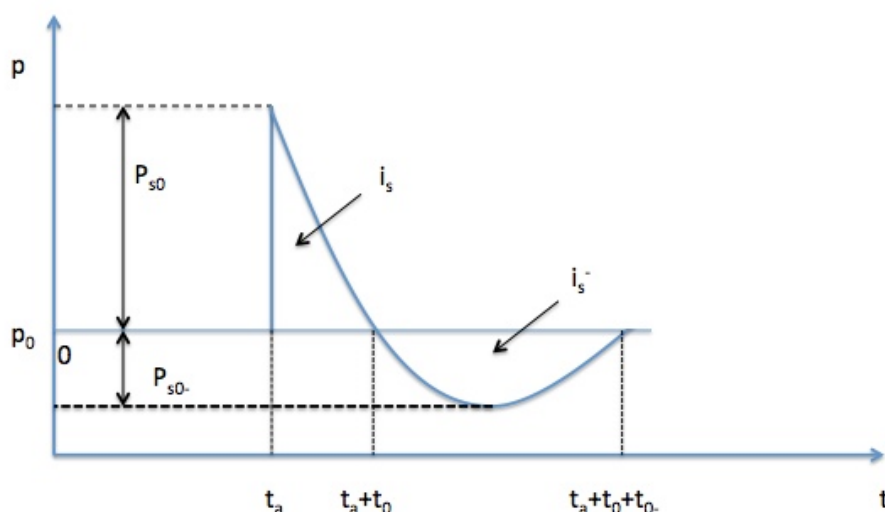
De waarden in tabel 2.2 geven de gemiddelde waarden aan over het gegeven drukdomein, hierbij moet worden vermeld dat het gaat om een benadering. TNT equivalentie is een complex begrip en verschillende factoren hebben invloed op de waarden. Factoren van invloed kunnen zijn, de vorm van de lading, het omhulsel van de lading, de manier van meten van de druk en de afstand van het meetpunt tot de lading. Al met al maakt dit het TNT equivalent een onnauwkeurig en complex begrip. Om toch een aanduiding te gebruiken wordt dit wereldwijd als standaard genomen.

2.1.3 Schokgolf

Een explosief dat detoneert, doet een drukgolf ontstaan, ook wel schokgolf genoemd. Deze schokgolf ontstaat in de springstof en wordt vervolgens overgedragen aan de omringende lucht. Bij zo'n detonatie komen er detonatiegassen en warmte vrij. De schokgolf ofwel blast kan grafisch worden weergegeven door de druk te meten over een bepaald tijdsdomein en deze in een grafiek te plotten. Vaak is er een patroon te zien in de drukgolf, eerst zal er een

verhoging van de druk worden gemeten. Vervolgens als dit schokfront is gepasseerd, vindt er een verlaging van de druk plaats, welke doorgaat in een negatieve drukgolf. Dit patroon is weergegeven in figuur 2.1, het betreft hier een vloeiend voorbeeld van een schokgolf. Aan de schokgolf uit figuur 2.1 zijn een aantal voorwaarden verbonden. De schokgolf vindt plaats in een vrij veld zonder objecten en zonder enige ondergronden die onregelmatigheden veroorzaken. In een meting komen er in deze curve vaak onregelmatigheden voor en zal deze daarom niet zo perfect zijn als in figuur 2.1.

Het verschil tussen de statische druk en de atmosferische druk (p_0), heet de piekoverdruk (p_{s0}). Piekoverdruk is een veelgebruikte eenheid waarin doorgaans de kracht van een explosie wordt uitgedrukt. Deze piekoverdruk wordt samen met impuls, wat in de volgende paragraaf wordt uitgelegd, gezien als de 2 belangrijkste karakteristieken van een detonatiegolf. Ook zijn in figuur 2.1 de tijden weergegeven. Het tijdstip t_a is de aankomst tijd, ook wel het begin van de positieve fase duur van de schokgolf, deze positieve fase duur eindigt op het punt t_a+t_0 . Tevens begint op dit punt de negatieve fase, waarbij de schokgolf onder de atmosferische druk duikt.



Figuur 2.1: Schokgolf

Met behulp van de afstand en het ladinggewicht, kan de piekoverdruk worden voorspeld. Dit kan worden gedaan met onderstaande vergelijking voor de geschaalde afstand.

$$Z = R/W^{1/3} [m/kg^{1/3}] \quad (2.1)$$

Waarin:

R = afstand tot centrum explosie [m]

W = ladinggewicht TNT [kg]

De berekende Z kan worden geplot in de grafiek van BAKER (Baker 1983). Met behulp van deze grafiek kan de bijbehorende piekoverdruk en impuls worden gevonden. Zo kan er een voorspelling van de piekoverdruk worden gedaan.

Natuurlijk is het mogelijk deze formule ook omgekeerd te gebruiken en kan er middels de piekoverdruk en de afstand een ladinggewicht worden berekend.

2.1.4 Impuls

Piekoverdruk is niet de enige parameter die de eigenschappen van een schokgolf weergeeft. Een andere karakterisering is de impuls, de impuls is te definiëren als het oppervlak onder de druk-tijd curve tijdens de positieve fase. In formule ziet dit er als volgt uit:

$$I_s = \int_{t_a}^{t_a+t_0} P_s(t) dt \quad (2.2)$$

De positieve en negatieve impuls, zoals in figuur 2.1 weergegeven vormen karakteristieken van de schokgolf.

Als men de oppervlakte van het gebied onder de kromme uitrekent zoals hierboven is beschreven, krijgt men de geschaalde impuls. Om de daadwerkelijke impuls uit te rekenen moet de geschaalde impuls worden ingevuld in vergelijking 2.3.

$$I_{scaled} = \frac{I_s}{(W)^{\frac{1}{3}}} \quad (2.3)$$

Waarin:

I_s = geschaalde impuls [kPa.ms]

W = ladinggewicht TNT [kg]

2.1.5 Sferische en Hemisferische explosies

Er kan nog een onderscheid worden gemaakt in explosies, namelijk tussen een sferische en een hemisferische explosie. Een sferische explosie is een explosie in de lucht boven de grond en een explosie op grondniveau heet een hemisferische explosie. In figuur 2.2 zijn deze twee detonaties schematisch weergegeven.



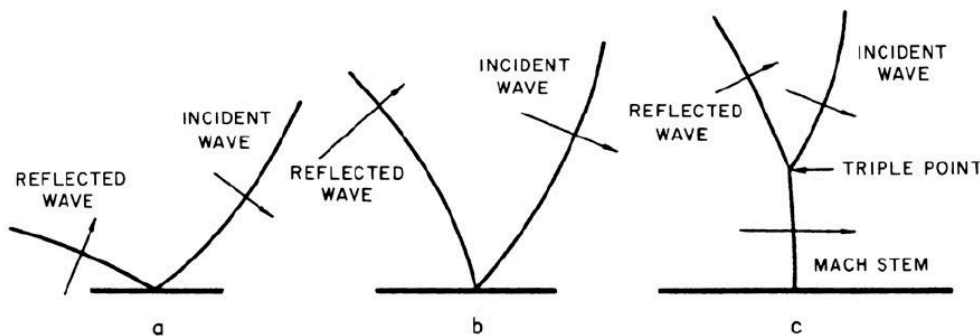
Figuur 2.2: Sferisch en Hemisferisch

Zoals te zien is in figuur 2.2 zal bij een sferische detonatie de blast zich in een bolvorm voortplanten. Terwijl bij een hemisferische detonatie, de blast zich in een halve bolvorm door het medium zal voortplanten. De blast wordt hier dus enigszins beperkt door de grond. Echter is de energie bij een hemisferische

explosie soms wel dubbel zo groot omdat de energie niet of nauwelijks weg kan vloeien aan de onderzijde van de explosie. Vandaar dat het ladinggewicht bij een hemisferische explosie wordt vermenigvuldigd met 1,8 à 2.

2.1.6 Mach-stam

Op het moment dat er een sferische explosie plaatsvindt, zal de schokgolf wanneer deze de grond raakt, weerkaatsen. Dit proces is weergegeven in figuur 2.3a en figuur 2.3b. Door de warmere en samengedrukte lucht achter de incidentele schokgolf, zal de weerkaatste schokgolf zichzelf sneller door het medium verplaatsen en de initiële schokgolf inhalen.



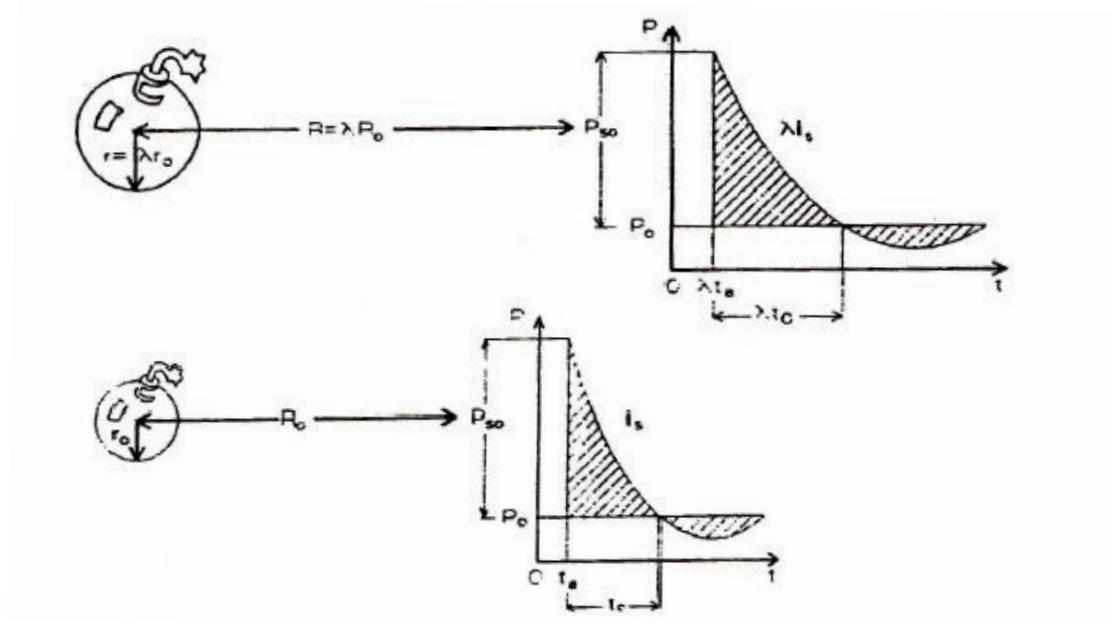
Figuur 2.3: Mach stam

Uiteindelijk zullen de initiële schokgolf en de gereflecteerde schokgolf samenkomen en een front vormen. Dit fenomeen wordt Mach stam genoemd, hierbij is de piekoverdruk hoger dan de piekoverdruk van de initiële schokgolf, specifiek wordt het punt waar de initiële schokgolf en de gereflecteerde golf samenkomen, het "triple point" genoemd. Het samenkomen van deze schokgolven is aangeduid in figuur 2.3c.

2.1.7 Schaal wetten

In dit onderzoek wordt er gebruik gemaakt van schaling. Zowel schaling in de constructie als schaling van het ladinggewicht. Zoals al is weergegeven in vergelijking 2.1, behoudt de detonatie van de lading dezelfde Z en dus dezelfde piekoverdruk. Echter de aankomsttijd en de impuls zullen veranderen. Om dit te ondervangen, wordt er gebruik gemaakt van schaalwetten (Bourgeois 1999).

In figuur 2.4 wordt deze schalingswet grafisch weergegeven. Vervolgens wordt dit middels een aantal formules toegelicht.



Figuur 2.4: Schaalwetten Bourgois (Bourgois 1999)

De schaal voor de lengte wordt gesteld volgens:

$$\lambda_R = r/r_0 \quad (2.4)$$

Waarin r en r_0 de stralen zijn van de twee bolvormige ladingen.

Aangenomen mag worden dat geldt

$$\lambda_R = \lambda_R^3 \quad (2.5)$$

Hieruit volgt dat:

$$\lambda = \lambda_R = (\lambda_W)^{1/3} = (W/W_0)^{1/3} \quad (2.6)$$

De gevonden waarde voor λ is de factor waarmee de aankomsttijd en de impuls moeten worden vermenigvuldigd.

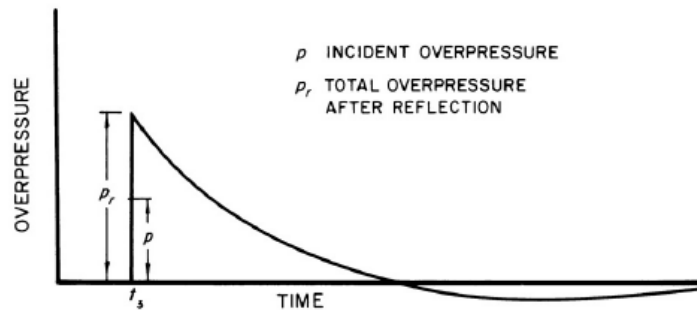
2.2 Theorie Interactie

In deze paragraaf worden begrippen toegelicht die zich specifiek voordoen wanneer een schokgolf in aanraking komt met een object.

2.2.1 Reflectie

In een stedelijke omgeving heeft de schokgolf veel te maken met reflectie door het in aanraking komen met objecten. De objecten die in zo'n omgeving voorkomen hebben de mogelijkheid om de schokgolf te reflecteren. Reflectie vindt plaats wanneer een schokgolf invalt op een vast oppervlak, of een medium met een hogere dichtheid. De bewegende luchtdeeltjes worden geremd tot rustconditie en worden samengedrukt. Het oppervlak wordt hierbij belast met een gereflecteerde druk die hoger is dan de invallende schokgolf.

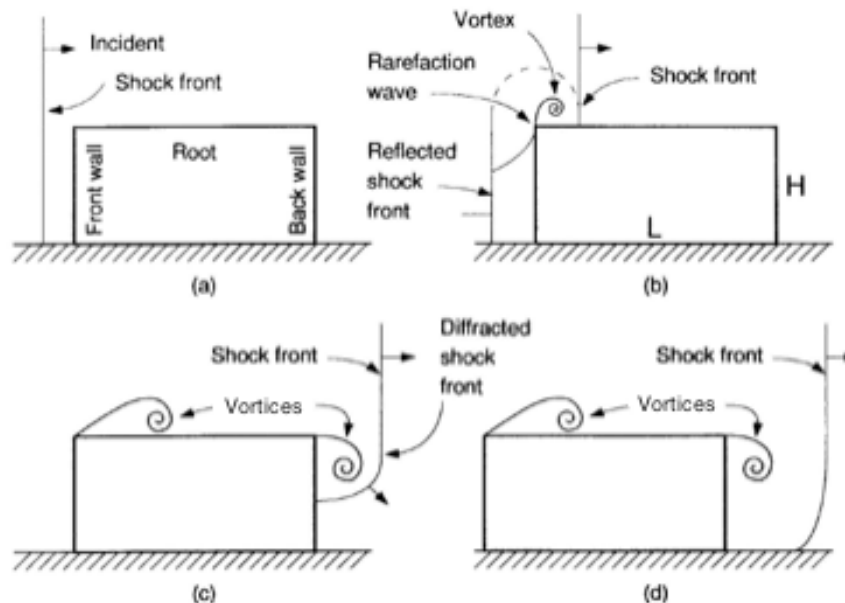
De hoogte van deze gereflecteerde druk kan waardes aannemen van 2 tot 8 keer de invallende schokgolf. Echter in experimenten zijn er ook wel waardes van 20 keer de invallende schokgolf gemeten. Dit is mogelijk doordat het gas zich niet meer volgens de ideale gaswet gedraagt. De grafische weergave van een reflecterende schokgolf is aangeduid in figuur 2.5.



Figuur 2.5: Reflectie

2.2.2 Diffractie

Naast reflectie treden er bij aanraking met een object meerdere fenomenen op. Ten eerste buigt de schokgolf af, het afbuigen van een schokgolf aan de achterkant van een constructie, bijvoorbeeld een kubus, wordt diffractie genoemd. Diffractie en de andere effecten zijn weergegeven in figuur 2.6



Figuur 2.6: Blastgolf in aanraking met constructie

Als de blast de voorzijde van de constructie raakt, zal er zoals in paragraaf 2.2.1 is omschreven reflectie optreden. Deze kan waardes aannemen die 2 tot 8 maal hoger zijn dan de invallende schokgolf. Aan de rand van de constructie zal de schokgolf zich ombuigen, dit proces is weergegeven in figuur 2.6b. De bovenzijde van de constructie, wordt belast met de invallende piekoverdruk. Door het drukverschil in het gebied tussen de reflecterende en de invallende schokgolf, zullen er cirkelvormige ontlastingsgolven ontstaan, druk wil immers van hoog naar laag stromen. Deze ontlastingsgolven zijn aangeduid in figuur 2.6b.

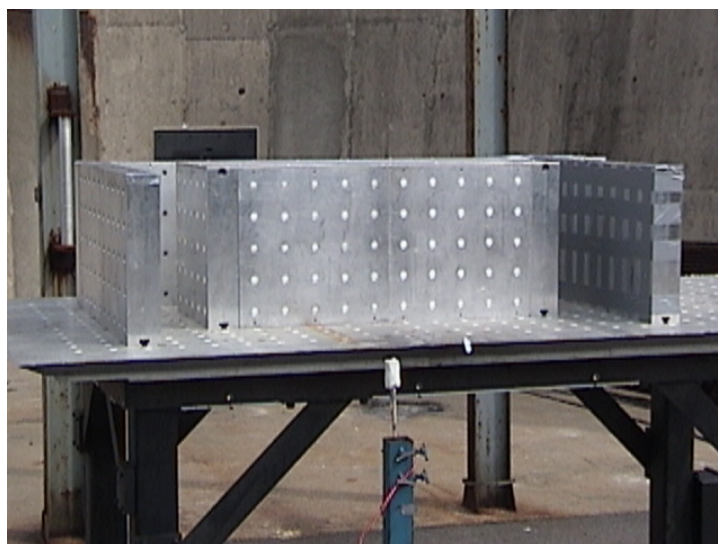
Vervolgens komt de initiële schokgolf aan bij de achterzijde van de constructie, hier zal de blastgolf weer afbuigen om de rand. Gevolg hiervan is dat er een compressiegolf wordt gevormd die over de achterkant van het gebouw loopt, weergegeven in figuur 2.6c. Tot slot zullen de wervelingen in figuur 2.6d lang aanhouden nadat de initiële schokgolf is gepasseerd.

2.3 Model van Ripley

Voorafgaand aan de uitvoering van de experimenten, is er een literatuurstudie gedaan. In de literatuur is specifiek gezocht naar blast in een stedelijke omgeving of binnen een structuur. Uiteindelijk is er in samenspraak met de begeleider één onderzoek uit de literatuur gekozen. Het onderzoek heeft de titel: “Small-scale Modeling of Explosive Blasts in Urban Scenarios” en is geschreven door R.C. Ripley et al (Ripley 2004). Besloten is om de configuratie die gebruikt is in het onderzoek van Ripley na te bootsen. Deze configuratie is simpel op schaal te construeren. Ook de specificaties van de lading zijn in dit onderzoek goed beschreven, waardoor er nauwkeurige schaling kan plaatsvinden. De resultaten die worden verkregen in dit experiment kunnen worden vergeleken met de resultaten van Ripley. Om duidelijk te maken hoe de constructie in elkaar zit en welke lading er is gebruikt, wordt in deze paragraaf het onderzoek kort toegelicht.

2.3.1 Constructie

De constructie die in het onderzoek van Ripley is gebruikt, bestaat uit een gebouw met daar omheen een wand. De tussenruimte tussen deze twee objecten bootst een straat na. De constructie is gemaakt van aluminium blokken en is al een schaling van een originele casus. De afmetingen van deze constructie en de originele casus worden in hoofdstuk 4 verder toegelicht. In figuur 2.7 wordt de opstelling van Ripley weergegeven.



Figuur 2.7: constructie Ripley schaal 1:24 (Ripley 2004)

2.3.2 Lading

In figuur 2.7 wordt de lading weergegeven vóór de constructie. In de originele casus wordt gebruik gemaakt van een ladinggewicht van 345 kg TNT equivalent, die een autobom moet voorstellen. Deze heeft een afstand van 32,9 m tot het

gebouw. Naast de schaling van de constructie, is ook de lading in dit onderzoek terug geschaald door middel van vergelijking 2.1. De dimensies van deze schaling worden in hoofdstuk 3 uiteengezet. In dit onderzoek wordt gebruik gemaakt van een hemisferische detonatie, terwijl er in het onderzoek van Ripley een sferische detonatie wordt gebruikt, ook dit wordt in hoofdstuk 3 verder toegelicht.

3. TNT equivalentie proefopstelling

In dit onderzoek wordt gebruik gemaakt van een model op kleine schaal. Omdat dit model een kleinere schaal heeft dan het originele model, moet ook de lading worden geschaald. Door gebruik te maken van TNT equivalentie kan er een goede schaalfactor worden gegarandeerd.

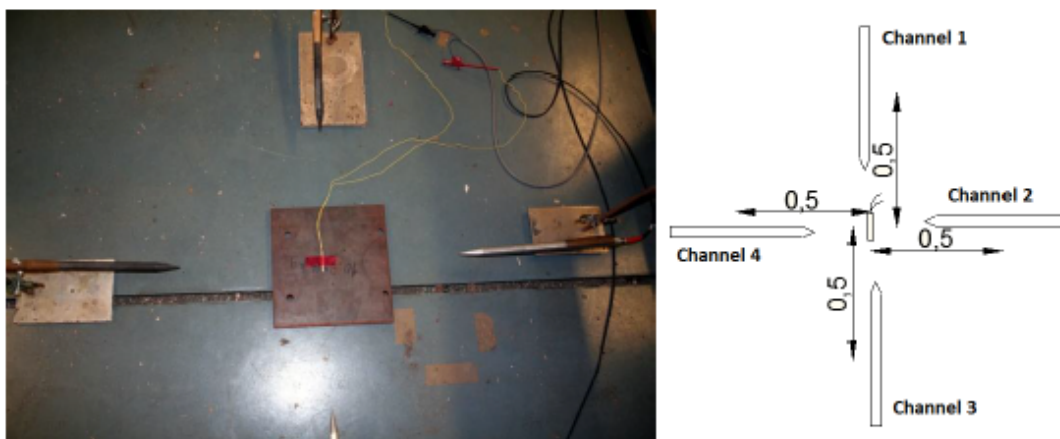
Dit hoofdstuk bestaat uit 3 delen. Ten eerste zullen de verschillende onderzoeken die zijn gedaan op het gebied van TNT equivalentie op de KMS worden besproken. Vervolgens wordt de TNT equivalentie van de opstelling van het slagpijpje in dit onderzoek bepaald. Dit zal nog moeten worden aangevuld met C4 om een geschikt TNT equivalent te krijgen, wat het laatste deel van het hoofdstuk vormt.

3.1 Proefopstelling en resultaten Literatuur

Op de KMS in Brussel is er door de studenten Vincent Prins (Prins 2012) en Bonheur Balumé (Balume 2012) onderzoek gedaan naar de TNT equivalentie van een slagpijpje. Hieronder worden de resultaten en conclusies die zij hebben gevonden kort besproken om een inleiding te geven op de proefopstelling die in dit onderzoek gaat worden gebruikt.

3.1.1 Proefopstelling en resultaten van Prins

Uit voorgaande onderzoeken, over explosies in Metro stations van Prins en Balumé aan de Koninklijke Militaire School te Brussel, is er al gezocht naar een stabiele en ideale opstelling om de TNT equivalentie van een elektrisch slagpijpje te bepalen. Hierbij is gezocht naar een ideale opstelling om een perfecte hemisferische bolvorm te creëren bij detonatie. De verschillende opstellingen die zij gebruikt hebben komen hieronder kort aan bod. Aangezien er in dit onderzoek alleen gebruik wordt gemaakt van hemisferische explosies, zullen alleen de hemisferische opstellingen worden weergegeven.



Figuur 3.1: Hemisferische proefopstelling V. Prins

In figuur 3.1 is de hemisferische proefopstelling van Prins weergegeven. Naast deze afbeelding is nogmaals schematisch weergegeven hoe deze proefopstelling is opgezet. Het slagpijpje is op een stalen plaat op de grond gemonteerd, daaromheen staan 4 blastpencils om de drukken van deze explosie te meten, tevens is er nog een variatie aangebracht in de proeven door gebruik te maken

van verschillende afstanden. De resultaten die hieruit voortkomen zijn hieronder in tabel 3.1 weergegeven.

Opstelling	Afstand [m]	Gemiddelde piekoverdruk sferisch [kPa]	Lading TNT hemisferisch [gram]
1	0,5	35,249	0,7
2	0,5	31,883	0,6006
3	1,0	12,629	0,7032
		Gemiddelde lading	0,6679

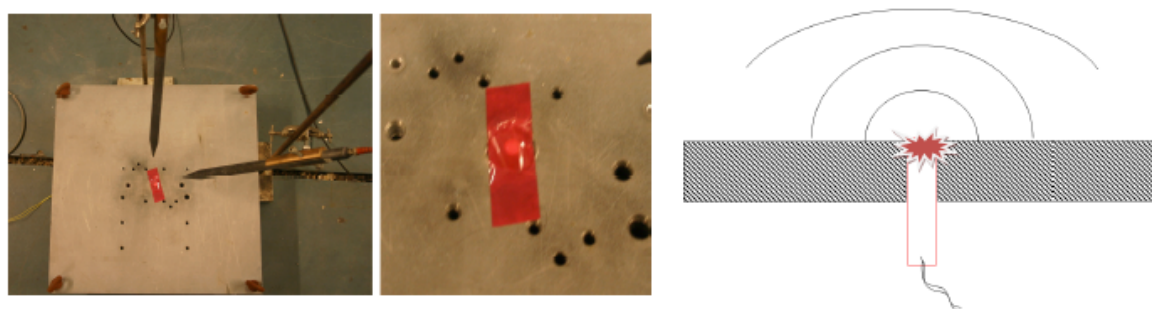
Tabel 3.1: Resultaten hemisferische opstelling Prins

Opstelling 1 uit tabel 3.1 is weergegeven in figuur 3.1, hierbij staan de blastpencils op een afstand van 0,5 m van het detonatiepunt. Opstelling 2 is hetzelfde als opstelling 1 met het verschil dat de bedrading richting Pencil 2 is gericht in plaats van Pencil 1. Opstelling 3 is gelijk aan opstelling 2, echter is hier gekozen voor een afstand van 1 meter tussen de blastpencils en het detonatiepunt.

Zoals in tabel 3.1 wordt weergegeven, is hier een TNT equivalent gevonden van 0,67 gram voor deze opstelling. Dit TNT equivalent is bepaald met behulp van het programma CONWEP. De werking van het programma CONWEP, wordt uitgelegd in Appendix B. Bij de resultaten in tabel 3.1 moet worden vermeld dat de blastpencil die op de kop van het slagpijpje gericht stond, hogere waarden gaf dan bijvoorbeeld de blastpencil aan de kant van de bedrading van het slagpijpje.

3.1.2 Proefopstelling en resultaten Balumé

Nadat Prins zijn onderzoek naar explosies in metrostations had afgerond, is Bonheur Balumé hiermee verder gegaan. Hij heeft verschillende aanpassingen doorgevoerd, waaronder de hemisferische opstelling om het TNT equivalent van het slagpijpje te bepalen.



Figuur 3.2: Schematische hemisferische opstelling slagpijpje Balume

In figuur 3.2 wordt de opstelling weergegeven van een verbeterde positionering die Balumé heeft gebruikt. Het slagpijpje is daar in een Aluminium plaat geïntegreerd. Met behulp van deze opstelling wordt een hemisferische detonatie nagebootst die niet wordt belemmerd door obstakels, daardoor kan de schokgolf zich in een vrij veld voortplanten. De blastpencils in de opstelling, zijn geplaatst op een afstand van 25 cm

en 35 cm van het detonatiepunt. In tabel 3.2 worden de resultaten van de verschillende proeven weergegeven.

Input	Propagation	m[g]	I [$kPa \cdot ms$]	ta [ms]
122.1kPa à 25cm	Sphérique	1.031	7.7	0.288
	Hemisphérique	0.6249	8.1	0.289
70kPa à 35cm	Sphérique	1.266	6.5	0.490
	Hemisphérique	0.7538	6.8	0.493

Tabel 3.2: Resultaten opstelling Balumé

Tabel 3.2 geeft zowel de resultaten van de hemisferische opstelling als de resultaten van de sferische opstelling weer. In dit onderzoek worden alleen de resultaten van de hemisferische opstelling besproken. De gemiddelde TNT equivalentie die wordt gevonden is 0,69 gram. Deze waarde benadert goed de waarde die Prins heeft gevonden.

Wel moet worden vermeld dat de blastpencils boven het explosief werden geplaatst, waardoor er waarschijnlijk hogere waarden werden gevonden dan wanneer deze niet boven het explosief waren geplaatst. Dit komt door de focus van het slagpijpje. De schokgolf wordt bij de detonatie omhoog gefocust door de bouw van het slagpijpje. Ook zit er een nadeel aan het integreren van het slagpijpje in de Aluminium plaat; er moet na een aantal detonaties een nieuw gat worden geboord, omdat het bestaande gat alsmaar meer wordt uitgehold door de kracht van de explosie.

3.1.3 Conclusie

Uit bovenstaande onderzoeken kunnen een aantal conclusies en aanbevelingen worden gedaan die ook beide onderzoekers hebben gevonden.

- Beiden komen uit op een TNT equivalent van ongeveer 0,65 gram;
- Prins heeft ondervonden dat metingen aan de kop van het slagpijpje hoger uitvallen dan metingen bij de bedrading. Dit betekent dat de lading van een slagpijpje redelijk gefocust is, wat ook was voorspeld;
- TNT equivalentie van het slagpijpje is moeilijk te bepalen door verschillende factoren die meespelen;
- Vanwege deze bevindingen wordt er in dit onderzoek daarom niet gesproken van het TNT equivalent van het slagpijpje, maar van het TNT equivalent van de opstelling.

3.2 Slagpijpje

In hoofdstuk 2 is het een en ander uiteengezet over TNT equivalentie. Elk soort explosief heeft zijn eigen TNT equivalentie, zo ook het elektrische slagpijpje dat wordt gebruikt. Dit elektrische slagpijpje bestaat uit 2 soorten explosieven en is bedoeld om de hoofdlading in te leiden. Het slagpijpje als daadwerkelijke hoofdlading gebruiken komt weinig voor.

De TNT equivalentie van het slagpijpje is lastig te bepalen. Het is een ingewikkeld explosief omdat de schokgolf bij detonatie naar boven wordt gefocust.

3.2.1 Berekening TNT equivalent

Zoals in Hoofdstuk 2 al is besproken, wordt er in het onderzoek van R.C. Ripley (Ripley 2004) gebruik gemaakt van een casus waarin een ladinggewicht van 345 kg C4 op een afstand van 32,9 meter tot detonatie wordt gebracht, wat bijvoorbeeld een autobom in een Urban environment nabootst. In het model dat in dit onderzoek gebruikt wordt, wordt de lading teruggeschaald met behulp van de formule in vergelijking 3.1. De lading afstand wordt samen met de schaalfactor (1:24) van de constructie terug gebracht naar 1,37m.

$$Z = \frac{R}{\sqrt[3]{W}} \quad (3.1)$$

$$\frac{32,9m}{\sqrt[3]{2x \cdot 472.650 \text{ gram}}} = \frac{1,37m}{\sqrt[3]{68,5 \text{ gram}}} \quad (3.2)$$

Om in een standaard hoeveelheid te kunnen rekenen, wordt deze waarde omgerekend naar TNT equivalent. In vergelijking 3.2 wordt de terugschaling van de lading voor het onderzoek van Ripley gedaan. Voor C4 staat een omrekenwaarde van 1,35 om uiteindelijk TNT equivalent te krijgen, 345.000 gram x 1,35 is 472.650 gram TNT equivalent. Ook wordt deze waarde vermenigvuldigd met 2 omdat het hier een hemisferische explosie betreft zoals in hoofdstuk 2 is uitgelegd. Het uiteindelijke ladinggewicht, wat in het onderzoek van Ripley wordt gebruikt, is dus 68,5/1,35 = 50 gram C4.

Om naar de lading in dit onderzoek te schalen, wordt vergelijking 3.2 nogmaals toegepast. De afstand wordt in dit onderzoek met een factor 3 kleiner geschaald. Zo komt men op een ladingafstand van 0,46 meter. Het ladinggewicht kan dan berekend worden, zoals in vergelijking 3.3 is weergegeven. Wordt vergelijking 3.3 opgelost, dan komt men uit op een x van 1,29 gram TNT equivalent. Dit TNT equivalent moet worden gebruikt om een vergelijking te kunnen trekken met het onderzoek R.C. Ripley.

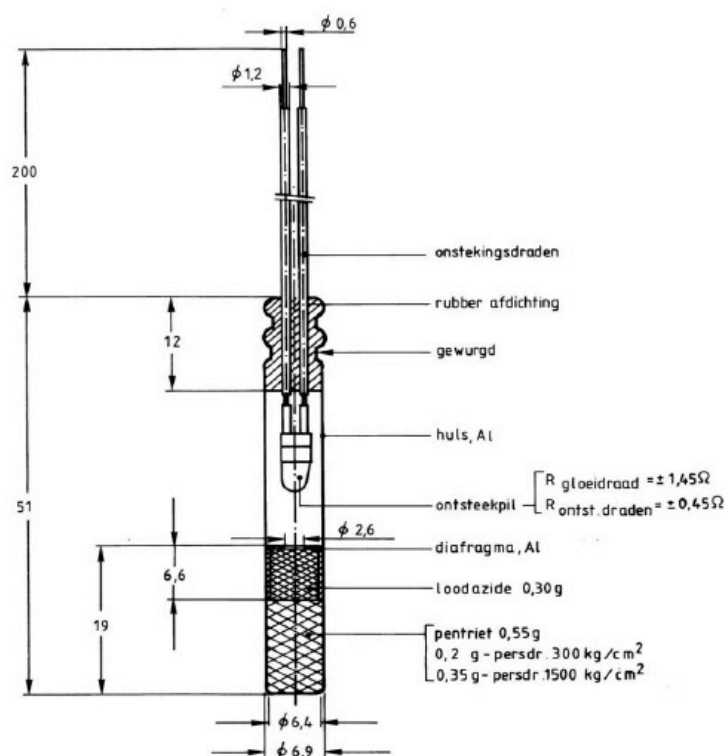
$$\frac{0,46 \text{ m}}{\sqrt[3]{2 \cdot x}} = \frac{1,37m}{\sqrt[3]{68,5 \text{ gram}}} \rightarrow x = 1,29 \text{ gram TNT equivalent} \quad (3.3)$$

Om te weten te komen of er nog lading moet worden toegevoegd aan het slagpijpje dat wordt gebruikt, moet eerst het TNT equivalent van de opstelling met het slagpijpje worden bepaald.

3.2.2 Elektrisch slagpijpje

In deze proefopstelling wordt er gebruik gemaakt van een slagpijpje. Een slagpijpje is de kleinst mogelijke hoeveelheid springstof dat in de bunker op de Koninklijke Militaire School tot detonatie kan worden gebracht. Een slagpijpje tot detonatie brengen is dus essentieel voor het onderzoek. Om een goed beeld te krijgen van de eigenschappen van een elektrisch slagpijpje, zullen deze eerst

worden besproken. In figuur 3.3 is schematisch weergegeven hoe deze in elkaar zit.



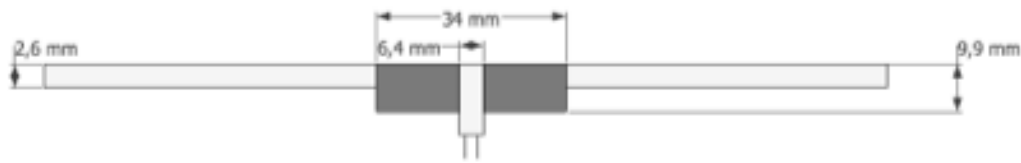
Figuur 3.3: Schematische weergave elektrisch slagpijpje

Grofweg bestaat een slagpijpje uit 3 delen; de ontsteekpil, de inleidspringstof en de bodemlading. Als er een detonatie plaatsvindt, werkt de ontsteekpil als thermische initiator voor de inleidspringstof die op zijn beurt weer de bodemlading afzet. In dit onderzoek wordt er gebruik gemaakt van militair elektrisch slagpijpje nummer 2, waarin de inleidspringstof bestaat uit 0,30 gram loodazide en de bodemlading uit 0,55 gram pentriet. Zoals al is aangehaald, is de schokgolf van een slagpijpje redelijk gefocust naar boven. Dit komt doordat de lading bovenin is geplaatst, wat ook weergegeven is in figuur 3.3 (slagpijpje is hier omgekeerd).

3.2.3 Opstelling Detonatiepunt

Na analyse van de resultaten van Prins en Balumé en de verschillende opstellingen, is het niet evident om de TNT equivalentie van het slagpijpje te bepalen. Verschillende opstellingen hebben verschillende resultaten en aangezien de lading gefocust is, is het moeilijk om hier een uitspraak over te doen. Vandaar dat het TNT equivalent van de opstelling wordt bepaald en dit niet kan worden gedefinieerd als het TNT equivalent van het slagpijpje.

Na analyse van de verschillende opstellingen die al zijn gebruikt om een hemisferische explosie na te bootsen, is er een verbeterde opstelling gemaakt. Deze opstelling is grotendeels bedacht door Bruno Reymen, een ingenieur aan de KMS in Brussel. Door zoveel mogelijk nadelen uit voorgaande onderzoeken uit te filteren is de volgende opstelling aan de orde gekomen.

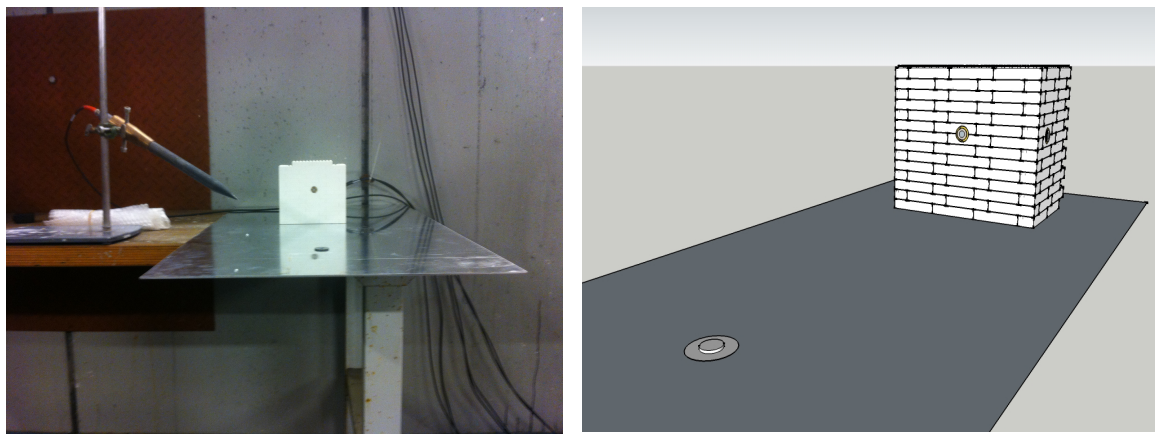


Figuur 3.4: Ladingopstelling

Zoals in figuur 3.4 is weergegeven, is het slagpijpje bevestigd in een PVC omhulsel die in een aluminium plaat wordt bevestigd. Het slagpijpje heeft zo een gelijke hoogte met de aluminium plaat. Door bescherming van het PVC omhulsel worden er nauwelijks gaten geslagen in het aluminium, zo kan hetzelfde gat voor meerdere detonaties worden gebruikt. Voorspeld wordt, dat een deel van de schokgolf zich boven de aluminium plaat zal expanderen en een hemisferische bol zal vormen aangezien het slagpijpje met de lading naar boven is geplaatst in het PVC omhulsel. Ook zal een deel van de schokgolf onder de aluminium plaat door verplaatsen. Tot slot gaat het PVC omhulsel ook voor opsluiting van het slagpijpje zorgen, waardoor de piekoverdrukken lager zullen uitvallen omdat hier energie verloren gaat.

3.2.4 Opstelling constructie

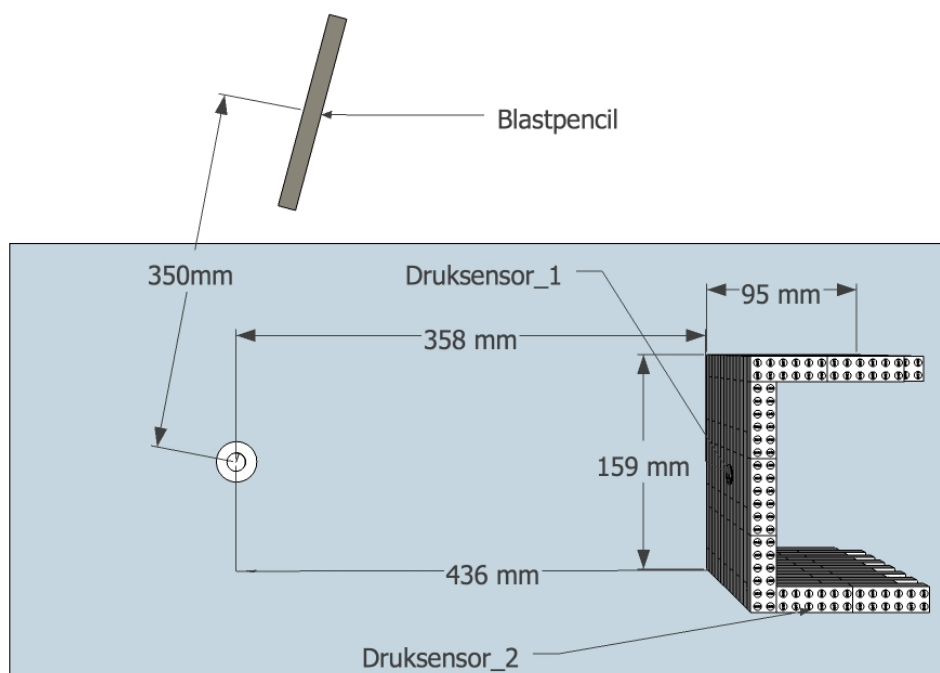
Naast de bepaling van het TNT equivalent van de proefopstelling wordt er nog een test gedaan. Gekozen wordt om gebruik te maken van het materiaal Lego voor de constructie. Dit materiaal is zeer modulair, goedkoop en men kan er allerlei verschillende constructies mee bouwen. In hoofdstuk 4 wordt verder op deze keuze ingegaan. Na aanschaf van een aantal proefblokjes wordt de volgende constructie gemaakt en worden hierin druksensoren geïntegreerd. Naast het bepalen van het TNT equivalent wordt ook de betrouwbaarheid van Lego als bouw materiaal voor een testopstelling met explosieven beproefd.



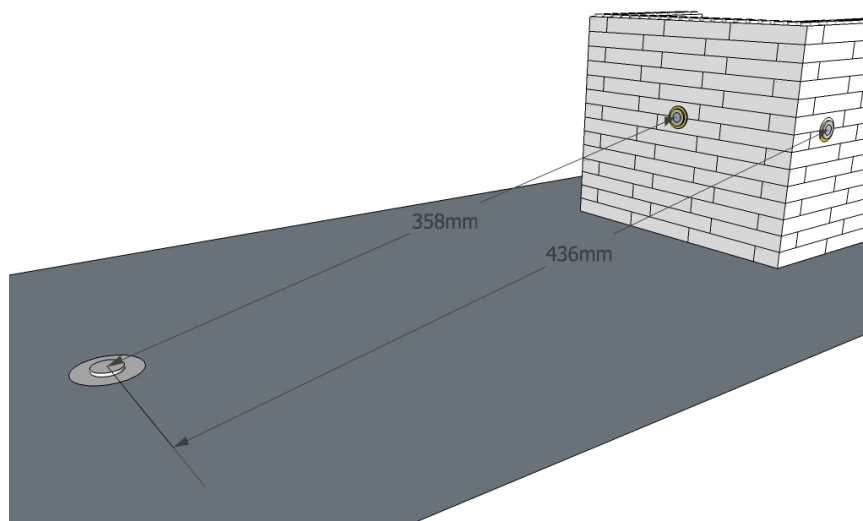
Figuur 3.5 Proefopstelling slagpijpje

In figuur 3.5 is de opstelling weergegeven, hierbij krijgt men een goed beeld van de constructie en van de geïmplementeerde sensoren. Er bevindt zich een

druksensor op de voorkant van de constructie die de reflecterende schokgolf meet. De invallende schokgolf wordt aan de zijkant van het gebouw gemeten met een druksensor, tevens is er een blastpencil aan de zijkant van de lading geplaatst die ook de invallende schokgolf meet. De lading wordt geplaatst voor de constructie, zoals in figuur 3.6 weergegeven. Deze lading zal bestaan uit een slagpijpje dat van onder de aluminium bodemplaat wordt aangebracht en een hemisferische detonatie zal nabootsen.



Figuur 3.6: Schematisch bovenaanzicht



Figuur 3.7: Zuid-Oost aanzicht

De schematische weergave in figuur 3.6 en figuur 3.7 geeft de afmetingen van de constructie tot de lading en van de lading tot de sensoren goed weer. De afstand van de blastpencil tot de lading bedraagt 350 mm. De afstand van de lading tot druksensor 1 bedraagt 358 mm. Druksensor 2 van de invallende schokgolf op de zijkant van de constructie, heeft een afstand van 436 mm tot de lading. In eerste instantie is voor druksensor 1 350 mm berekend en voor druksensor 2 430 mm

berekend, maar door een meetfout moet dit 358 mm respectievelijk 436 mm zijn. De invloed van deze meetfout zal worden verwerkt in Hoofdstuk 6.

3.2.5 Resultaten experiment slagpijpje

In de opstelling van paragraaf 3.2.4 zijn 12 metingen verricht. Er is 12 keer een slagpijpje tot detonatie gebracht om eventuele meeton nauwkeurigheden uit te sluiten. De eerste 6 metingen zijn gedaan zoals in figuur 3.5 is weergegeven. Bij het monteren van de structuur werden een aantal spleten van ongeveer 0,5 mm tussen de Legoblokken ontdekt. Onderkend werd dat er door deze spleten luchtverplaatsing mogelijk was. Om te analyseren of deze luchtverplaatsing kan worden verwaarloosd, zijn deze gaten in de laatste 6 proeven dichtgeplakt met tape. Zo ontstond er 1 vlak waarbij de structuur één solide geheel werd.

Piekoverdruk [kPa]	350 mm	358 mm	436 mm
<u>Proefnummer</u>	Sensor		
	Pencil	Druk_01	Druk_02
Proef_01	23,1	-	20,7
Proef_02	25,6	70,8	20,1
Proef_03	25,9	65,3	19,8
Proef_04	24,8	73,9	21,5
Proef_05	22,0	68,6	20,3
Proef_06	24,3	69,7	18,9
P_s gemiddeld	24,3	69,7	20,2
StDev	1,5	3,1	0,9

Tabel 3.3: Resultaten proeven “zonder tape” 1-6 piekoverdruk

Piekoverdruk [kPa]	350 mm	358 mm	436 mm
<u>Proefnummer</u>	Sensor		
	Pencil	Druk_01	Druk_02
Proef_07	24,1	73,4	21,2
Proef_08	25,2	70,1	20,9
Proef_09	25,5	71,0	19,7
Proef_10	23,7	68,2	20,5
Proef_11	24,4	69,5	19,3
Proef_12	25,7	74,9	21,1
P_s gemiddeld	24,8	71,2	20,5
StDev	0,8	2,5	0,8

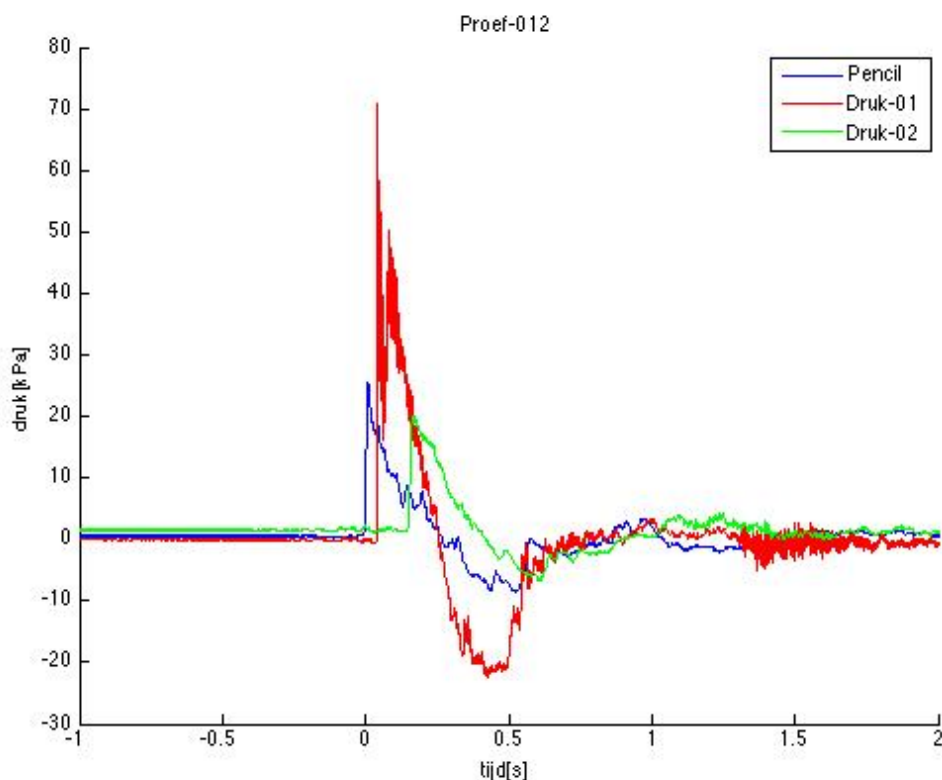
Tabel 3.4: Resultaten proeven “met tape” 7-12 piekoverdruk

In tabel 3.3 en 3.4 worden de resultaten van de proeven weergegeven. Tabel 3.3 geeft de piekoverdrukken zonder tape weer, in tabel 3.4 zijn de resultaten van de proeven met de tape weergegeven. Ook zijn in beide tabellen de gemiddeldes en de standaard deviatie van de piekoverdrukken berekend.

Aan de hand van de resultaten, de gemiddelden en de standaarddeviatie, kan worden geconcludeerd dat de tape geen invloed heeft op de druk. De gemiddelden van proef_07 tot en met proef_12 vallen binnen de

standaarddeviaties van de eerste 6 proeven. Bijvoorbeeld, het gemiddelde van Druk_01 = $69,7 - 3,1 = 66,6$ kPa en $69,7 + 3,1 = 72,8$ kPa. Het gemiddelde van Proef_07 tot en met Proef_12 = 71,2 kPa ligt hier ruim tussen. Ook bij de andere sensoren is dit het geval. Hieruit kan worden geconcludeerd dat er geen lucht lekt door de spleten.

In figuur 3.7 zijn de piekoverdrukken van de 3 sensoren van proef_12 grafisch weergegeven. De positieve schokgolf met aansluitend de negatieve drukgolf is goed te zien. De rest van de grafieken zijn bijgevoegd in Appendix A.



Figuur 3.8: Piekoverdruk proef_012

Zoals te zien is in figuur 3.8 is de piekoverdruk van de 1^e drukmeter veel hoger dan de andere piekoverdrukken. Dit komt doordat de 1^e drukmeter de reflecterende schokgolf meet en de overige sensoren de invallende schokgolven. Ook is de invallende schokgolf van de 2^e drukmeter lager dan die van de blastpencil. Dit komt doordat deze sensor op een grotere afstand van de lading was gepositioneerd dan de blastpencil.

Impuls [Pa·s]	350 mm	358 mm	436 mm
	Sensor		
Proefnummer	Pencil	Druk_01	Druk_02
Proef_01	2,3		2,0
Proef_02	2,4	5,0	2,1
Proef_03	2,3	4,8	2,1
Proef_04	2,3	4,8	2,2
Proef_05	2,2	4,7	2,0
Proef_06	2,4	4,7	2,0
gemiddeld	2,3	4,8	2,1
StDev	0,1	0,1	0,1

Tabel 3.5: Resultaten proeven 1-6 Impuls

Naast de piekoverdrukken, zijn ook de positieve impulsen van de verschillende proeven uitgerekend. Zoals besproken is in hoofdstuk 2, vormt de oppervlakte onder de grafiek van de piekoverdruk de geschaalde impuls. Met behulp van vergelijking 2.3 kan deze worden omgerekend naar de daadwerkelijke impuls. Naast piekoverdruk is dit een waarde die veel zegt over de kracht van de explosie. Echter is het lastig om de impuls te schalen, impuls is namelijk een factor die ook afstand- en tijdsgebonden is. Vandaar dat er in dit deel van het onderzoek geen conclusies worden getrokken uit de uitkomsten van de impuls die zijn verkregen. In tabel 3.5 en 3.6 zijn de impulsen van de proeven weergegeven.

Impuls [Pa·s]	350 mm	358 mm	436 mm
	Sensor		
Proefnummer	Pencil	Druk_01	Druk_02
Proef_07	2,4	5,2	2,2
Proef_08	2,4	4,1	2,1
Proef_09	2,4	4,8	2,1
Proef_10	2,3	5,0	2,0
Proef_11	2,3	4,9	2,0
Proef_12	2,5	5,1	2,2
gemiddeld	2,4	4,9	2,1
StDev	0,08	0,4	0,09

Tabel 3.6: Resultaten proeven 7-12 Impuls

3.2.6 Ladinggewicht CONWEP

Het TNT equivalent van het slagpijpje kan worden gevonden met behulp van het programma CONWEP. De werking van het programma CONWEP wordt uitgelegd in Appendix B. CONWEP is een programma waarmee met behulp van verschillende parameters, zoals piekoverdruk en afstand, de overige bijbehorende parameters kunnen bepalen.

Piekoverdruk hemisferische opstelling [kPa]		350 mm	358 mm	436 mm
Proef gemiddeld	1-6	Pencil (invallend) 24,3	Druk_01 (reflecterend) 69,7	Druk_02 (invallend) 20,2
	7-12	24,8	71,2	20,5
	CONWEP 1-6	0,119 gram	0,204 gram	0,160 gram
	CONWEP 7-12	0,124 gram	0,212 gram	0,164 gram

Tabel 3.7: Ladinggewicht proeven Piekoverdruk

In tabel 3.7 zijn de ladinggewichten bij de afstand en piekoverdrukken uiteengezet. Op basis van de invallende drukken is het TNT equivalent bepaald middels het invoeren van 2 parameters, afstand en piekoverdruk. Zo kan het ladinggewicht in CONWEP worden bepaald. Het ladinggewicht bepalen op basis van de reflecterende piekoverdruk is lastiger. Als men een ladinggewicht en afstand invoert dan kan in CONWEP ook de “reflected pressure ” worden bepaald. Echter is dit proces niet omkeerbaar, men moet dus met behulp van iteratie het juiste ladinggewicht zien te krijgen en daarbij de corresponderende gereflecteerde druk. Op deze manier zijn de uitkomsten van het ladinggewicht bij de gereflecteerde piekoverdrukken gevonden.

Door deze ladinggewichten bij elkaar op te tellen en vervolgens te delen kan het gemiddelde ladinggewicht van de proeven worden bepaald:

$$\frac{0,119+0,124+0,204+0,212+0,160+0,164}{6} = 0,164 \text{ gram TNT equivalent.}$$

3.2.7 Conclusies en aanbeveling proefopstelling slagpijpje

Uit de resultaten en vergelijkingen van dit hoofdstuk, kunnen een aantal conclusies worden getrokken.

- Het ladinggewicht van deze proefopstelling bedraagt 0,164 gram TNT equivalent. Door verschillende rekenfouten in een vroeger stadium van dit onderzoek, zoals de afmetingen van detonatiepunt naar de sensoren, is hier niet mee doorgerekend. Het ladinggewicht van de proefopstelling wordt dan ook aangenomen op 0,135 gram TNT equivalent waarmee wel is doorgerekend. Verdere uitleg en de invloed hiervan wordt besproken in hoofdstuk 6;
- De openingen tussen de legoblokken hebben geen invloed op de luchtverplaatsing door de schokgolf;
- De impuls worden niet meegenomen in de berekening van de TNT equivalent van de opstelling;
- Lego is een betrouwbaar en stevig materiaal waarmee in de toekomst meerdere proeven op schaal kunnen worden gedaan;
- Naast het slagpijpje is een bijkomende lading nodig om het vereiste 1,29 gram TNT equivalent voor de opstelling te realiseren;
- Een eventuele meetfout kan zijn ontstaan doordat druksensor 1 niet op 350 mm is geplaatst van het detonatiepunt maar op 358 mm.
- Een eventuele meetfout kan zijn ontstaan doordat druksensor 2 niet op 430 mm is geplaatst van het detonatiepunt maar op 436 mm.

3.3 Composition 4

Door de lage waarden van de TNT equivalentie die is gevonden bij de resultaten van de proef met het slagpijpje, moet deze worden aangevuld. Het materiaal waarmee dit wordt gedaan is C4. C4 is een springstof dat vaak wordt gebruikt voor militaire doeleinden. Het is een kneedbare springstof, welke is samengesteld uit meerdere producten. In figuur 3.9 is deze springstof weergegeven. C4 in verpakking zoals in figuur 3.9, wordt ook wel M112 genoemd.



Figuur 3.9: Een C4 product M112

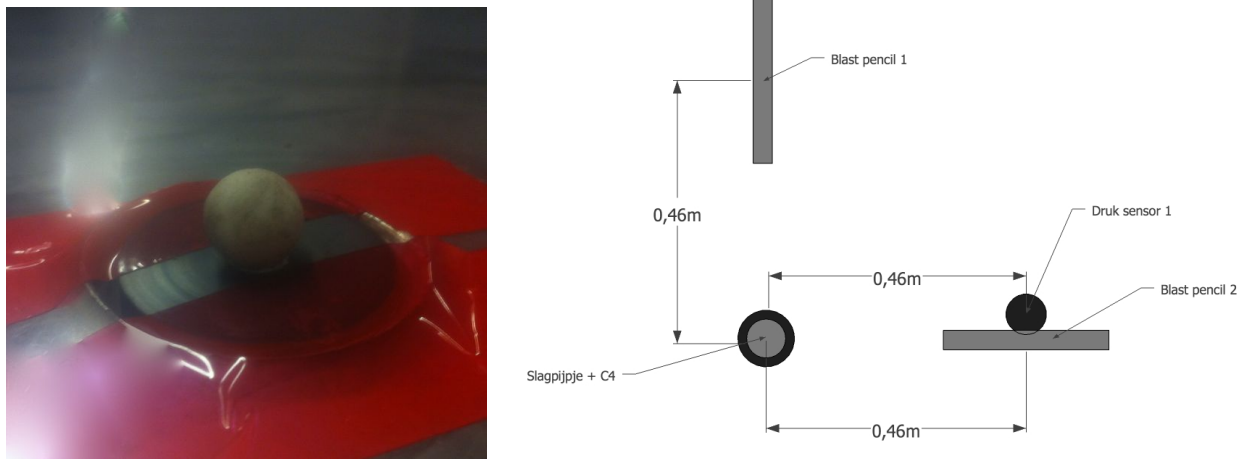
C4 bestaat meestal uit de volgende bestanddelen:

- 90% RDX, het daadwerkelijke explosief;
- 8% polyisobuteen, wat het materiaal bindt;
- 2% dioctyladipaat, wat het geheel plastificeert.

In paragraaf 3.2.2 is al berekend dat er 1,29 gram TNT equivalent benodigd is om een goede schaling te kunnen realiseren. Dit is gedaan met de schalingsfactor van C4 die 1,35 bedraagt. Het slagpijpje zoals is beproefd, levert een TNT equivalentie van 0,135 gram TNT equivalent. Er moet dus nog $1,29 - 0,135 = 1,16$ gram TNT equivalent worden toegevoegd. Dit wordt gedaan door C4 toe te voegen. In totaal moet er dus $1,16 / 1,35 = 0,86$ gram C4 worden toegevoegd aan de opstelling. In de volgende paragraaf worden er een aantal proeven gedaan om te testen of deze toevoeging voldoende is.

3.3.1 Opstelling C4

Om te testen of deze waarden de piekoverdrukken genereren die nodig zijn, moet de berekening worden gevalideerd. Dit is gedaan met de opstelling die is weergegeven in figuur 3.10.



Figuur 3.10: Opstelling C4 aanvulling en schematisch bovenaanzicht opstelling

In paragraaf 3.3 is al aangegeven dat er 0,86 gram C4 moet worden toegevoegd. Deze C4 is in bolvorm toegevoegd en geplaatst op de kop van het slagpijpje, zo zal het slagpijpje de C4 inleiden en tot detonatie brengen. Het geheel samen zal de 1,29 gram TNT equivalent moeten vormen. De rechter afbeelding van figuur 3.10 geeft de opstelling van deze proef weer. Er zijn 2 blastpencils haaks op elkaar gemonteerd met een afstand van 0,46m tot het detonatiepunt en met een hoogte van 0,11 m vanaf de bodemplaat. Deze afstand is van te voren berekend en is de teruggeschaalde afstand die overeenkomt met de stand-off die is gebruikt in het onderzoek van R.C. Ripley.

Tevens is er naast de 2 blastpencils ook een druksensor in de aluminium plaat geïntegreerd om een onvolledig naar bolvorm geëxpandeerde schokgolf te kunnen waarnemen. Uit de eerdere proeven van Prins en Balumé is naar voren gekomen dat de lading van een slagpijpje gefocussed is. Om te mogen concluderen of er op een afstand van 0,46 m een volledige bol is gevormd, moeten er druksensoren op verschillende hoogtes worden geplaatst.

3.3.2 Resultaten experiment C4

In tabel 3.8 zijn de resultaten van de twee blastpencils verwerkt. Er zijn in totaal 4 testen gedaan, ook zijn de gemiddelden bepaald en is de standaardafwijking gegeven.

Piekoverdruk [kPa]	460 mm	460 mm	460 mm
	Sensor		
<u>Proefnummer</u>	Pencil_1	Pencil_2	Druk_1
Test_01	58,9	59,4	-
Test_02	54,4	62,9	-
Test_03	51,9	55,9	-
Test_04	53,4	52,8	-
P_s gemiddeld	54,7	57,8	-
StDev	3,0	4,4	-

Tabel 3.8: Resultaten Piekoverdruk C4

Zoals weergegeven in tabel 3.8, zijn er geen resultaten genoteerd bij druksensor 1. Dit komt omdat de aluminium plaat die is gebruikt begon te trillen op het moment van de explosie. Deze trillingen werkten door in de druksensor, waardoor er geen bruikbaar druksignaal kon worden geregistreerd. In tabel 3.9 zijn tevens de impulsen van de proeven weergegeven, hier worden zoals in de vorige paragraaf, geen conclusies aan verbonden.

Impuls [Pa.s]	460 mm	460 mm	460 mm
	Sensor		
<u>Proefnummer</u>	Pencil_1	Pencil_2	Druk_1
Test_01	6,6	6,5	-
Test_02	6,8	7,1	-
Test_03	6,6	6,9	-
Test_04	6,3	6,5	-
P_s gemiddeld	6,6	6,8	-
StD	0,2	0,3	-

Tabel 3.9: Resultaten Impuls C4

3.3.3 Ladinggewicht CONWEP

In tabel 3.10 is met het programma CONWEP het ladinggewicht berekend dat correspondeert met de gemeten drukken. Zoals is af te lezen geven de gevonden piekoverdrukken een gemiddeld ladinggewicht van 1,22 gram. Deze waarde wijkt nauwelijks af van de van tevoren berekende 1,29 gram TNT equivalent. Hierdoor wordt de berekening, de test opstelling en de meetmethode valide verklaard.

Piekoverdruk	Pencil_1 [kPa]	Pencil_2 [kPa]	Druk_1 [kPa]
P_s gemiddeld	54,7	57,8	-
CONWEP gemiddeld	P_s	1,156 gram	1,264 gram
			-

Tabel 3.10: Ladinggewicht Piekoverdruk

3.3.4 Conclusies en aanbevelingen proefopstelling C4

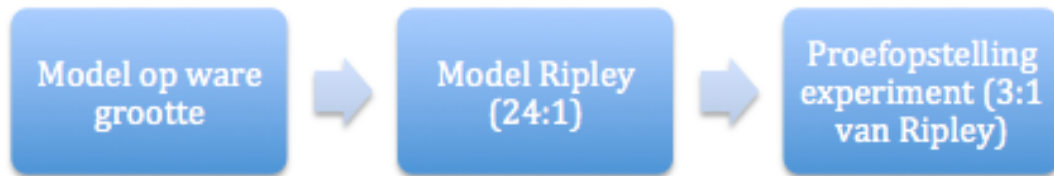
Aan de hand van de resultaten die zijn verkregen, kunnen een aantal conclusies en aanbevelingen worden gedaan:

- De druksensoren die in de plaat zijn geïntegreerd, moeten in een ander soort materiaal worden gemonteerd en/of losgekoppeld van de plaat worden om onnauwkeurigheden van de druksensor door trillingen te voorkomen;
- De voorspelde waarden van het TNT equivalent van de lading van het slagpijpje met C4 kloppen;
- Tijdens deze studie is als probleem naar voren gekomen, de hemisferische expandatie van de schokgolf. De vraag is of deze geheel symmetrisch is gevormd als deze aankomt bij de druksensoren. In de toekomst moeten er studies worden gedaan naar de hemisferische en sferische bolvorming van de detonatie van een slagpijpje. Zo kan men bepalen op welke afstand het schokfront van een detonatie van een slagpijpje een hemisferische bol heeft gevormd.

In dit hoofdstuk is de lading berekend die benodigd is voor de daadwerkelijke experimenten binnen het model, in het volgende hoofdstuk wordt de constructie die gebruikt gaat worden toegelicht.

4. Proefopstelling

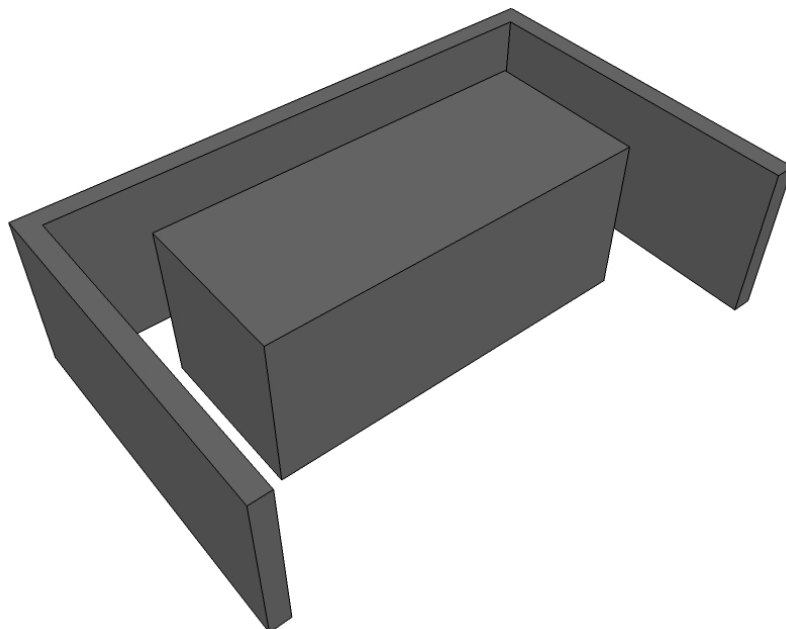
In dit hoofdstuk zal de proefopstelling, die gebruikt wordt in dit werk, worden toegelicht. Deze proefopstelling is afgeleid van een bestaande proefopstelling uit de literatuur (Ripley 2004). De proefopstelling van Ripley, welke is toegelicht in hoofdstuk 2, is weer een terugschaling van het model op ware grootte. Aan de hand van het stroomschema in figuur 4.1, wordt het geheel verduidelijkt.



Figuur 4.1: stroomschema terug schaling modellen

Het model van Ripley is in feite 24x kleiner dan het model op ware grootte. De proefopstelling in dit onderzoek is weer een verkleining van 3x ten opzichte van het model van Ripley. Deze keuze is gemaakt op basis van het ladinggewicht dat moet worden gebruikt en de materialen waarmee wordt gewerkt. Ook de faciliteiten waar de experimenten worden uitgevoerd is een factor die meeweegt in de terugschaling.

In figuur 4.2 wordt een impressie gegeven van het model dat wordt gebruikt in dit onderzoek. Het model bestaat uit een gebouw met daarachter een grote wand, de tussenruimte tussen deze twee objecten stelt een straat voor.



Figuur 4.2: Impressie model

4.1 Model op ware grootte en model Ripley

Zoals in de inleiding van dit hoofdstuk al is vermeld, wordt er eerst uitgelegd hoe het model op ware grote is gedimensioneerd. Vervolgens wordt toegelicht hoe het model van Ripley is geschematiseerd.

4.1.1 Model op ware grootte

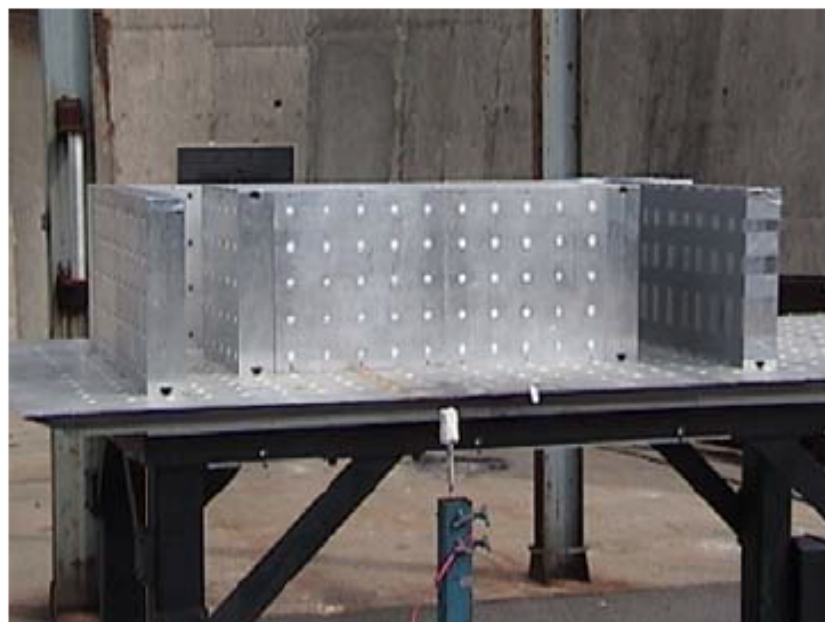
De afmetingen van het model op ware grootte zijn weergegeven in tabel 4.1. Deze afmetingen zijn gegeven als originele afmetingen van het model in het onderzoek van Ripley.

Afmetingen ware grootte	Gebouw [m]	Muur [m]
Breedte	21,9	36,6
Lengte	9,1	20,1
Hoogte	9,3	9,3
Tussenruimte gebouw/muur	3,6	

Tabel 4.1: afmetingen ware grootte

4.1.2 Geschaald model uit de literatuur

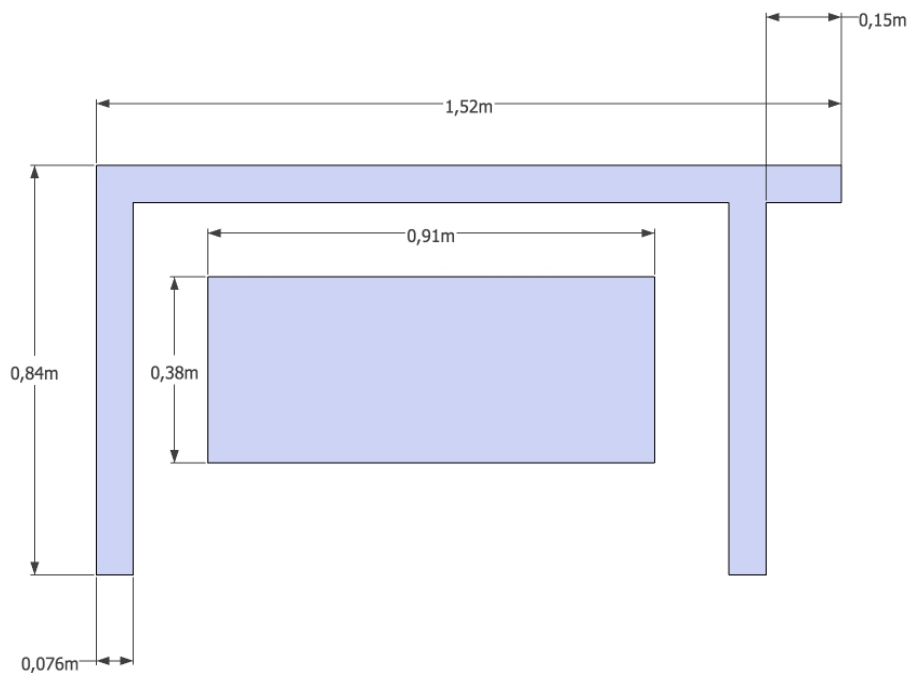
In figuur 4.3 is het geschaalde model weergegeven. Dit geschaalde model wordt gebruikt in het onderzoek van Ripley.



Figuur 4.3: geschaald model in RC- Ripley

In dit onderzoek is er gebruik gemaakt van een schaal van 24:1. Hierdoor bedraagt de hoogte van het gebouw bijvoorbeeld 38,7 cm, waarbij de hoogte van de vloer 0,6 cm is en de hoogte van het gebouw 38,1 cm. Wat op werkelijke schaal betekent dat dit gebouw een hoogte heeft van 9,3 m.

De proefopstelling uit figuur 4.3 is gemaakt met aluminium blokken van 38,1 x 38,1 x 7,6 cm. In figuur 4.4 is het schematische bovenaanzicht van de opstelling weergegeven.



Figuur 4.4: Bovenaanzicht proefopstelling R.C. Ripley

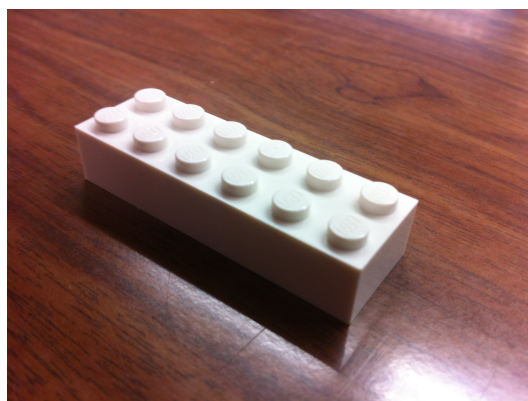
Het eerste wat opvalt aan figuur 4.4 is de overstek die aanwezig is rechtsboven in figuur 4.4. Dit komt doordat er gebruik wordt gemaakt van aluminium bouwblokken die een standaard afmeting hebben. Deze overstek heeft geen verdere invloed op de proef zelf, omdat dit stuk van de constructie niet of nauwelijks invloed heeft op de meetresultaten in de proefopstelling.

4.2 Materiaalkeuze

Zoals in hoofdstuk 1 al aan bod is gekomen, is het model dat in dit onderzoek voor experimenten wordt gebruikt, aan een aantal eisen en voorwaarden onderworpen:

- Het model moet op kleine schaal worden gemaakt;
- Het model moet modulair zijn;
- In het model moeten druksensoren worden geïntegreerd.

Na verschillende afwegingen van voor-en nadelen, is er gekozen om gebruik te maken van het materiaal Lego. Vanuit de KMS is dit ook geadviseerd door de ervaring van verschillende docenten. Een aantal alternatieven voor bouw materiaal waren; betonplex en aluminium. Het voordeel van het bouwen met Lego is, dat het relatief goedkoop is en er snel mee kan worden gebouwd. Deze eigenschappen hebben de andere materialen niet of minder, vandaar dat er uiteindelijk voor Lego is gekozen. Ook zijn er met dit materiaal allerlei soorten modellen mee te bouwen waardoor er aan de eis modulair kan worden voldaan.



Figuur 4.5: Lego Brick 2x6

De afmetingen van de Legoblokken die in dit model worden gebruikt zijn 4,78 x 1,58 x 0,96 cm. Het type Legoblokje met deze afmeting heet “Brick 2 x 6”, omdat het 2 x 6 noppen heeft aan de bovenzijde. In tabel 4.2 wordt uiteengezet hoeveel blokjes er nodig zijn voor de verschillende delen van de constructie.

Aantal blokjes	Lengte [blokjes]	Breedte [blokjes]	Hoogte [blokjes]
Gebouw	7	3	14
Totaal Gebouw	$(7 \times 14) \times 2 + (3 \times 14) \times 2 = 280$		
Wand	10	6	14
Totaal Wand	$(10 \times 14) + (6 \times 14) \times 2 = 308$		
Totaal	$280 + 308 = 516$		

Tabel 4.2 Hoeveelheid blokjes constructie

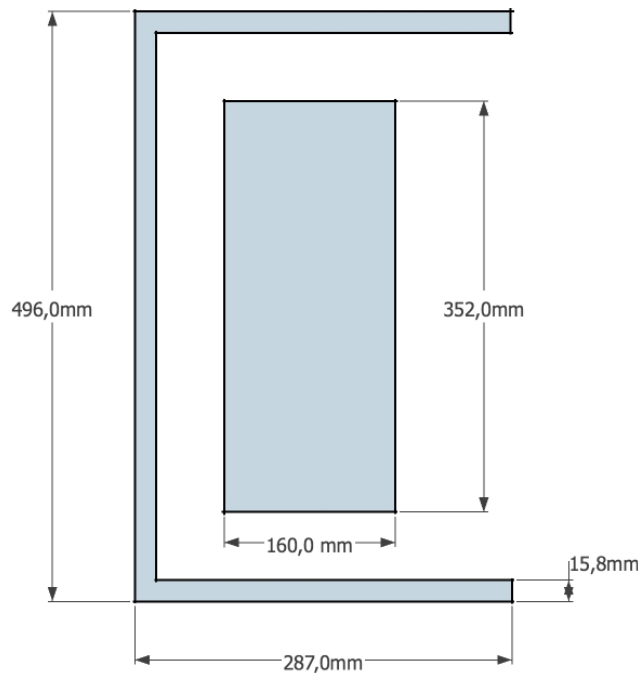
Naast de Legoblokjes uit tabel 4.2 zijn er ook nog andere bouwelementen voor de constructie gebruikt. Om het gebouw af te dekken en een glad oppervlak te creëren waar de schokgolf geen hinder van ondervindt, wordt er gebruik gemaakt van dakplaten. Deze dakplaten worden “Tile 8 x 16” genoemd en zijn na ontvangst nog op maat gezaagd om een goed afsluitbaar geheel te maken. Tot slot worden ook de bovenste Lego blokjes van de wand afgedekt om te zorgen dat het geheel een vlak oppervlak vormt. Deze blokjes zijn met afdekplaatjes van het type “Tile 2 x 4” afgedekt. In tabel 4.3 wordt een overzicht weergegeven van de totale bestelling om de constructie te realiseren. In totaal is er 126,12 euro besteedt aan Legoblokjes om het model te bouwen.

Deel	Naam	Aantal blokjes	Kosten per blokjes	Kosten per object
Gebouw	Brick 2x6	280	€ 0,18	€ 50,40
Wand	Brick 2x6	308	€ 0,18	€ 55,44
Afdekplaten gebouw	Tile 8 x 16	12	€ 0,92	€ 11,04
Afdekplaten wand	Tile 2x4	33	€ 0,28	€ 9,24
Totaal				€ 126,12

Tabel 4.3: Bestelling Lego

4.3 Constructie proefopstelling

In deze paragraaf wordt de constructie, die wordt gebruikt in dit onderzoek, besproken. Voorheen is vermeld dat het model 3x kleiner is dan het model van Ripley, dit is niet exact het geval. Er wordt gewerkt met Lego blokken die een standaard afmeting hebben, vandaar dat de schaling soms iets afwijkt van het gestelde. De exacte maten worden in deze paragraaf uiteengezet.



Figuur 4.6: Afmetingen daadwerkelijke proefopstelling

In tabel 4.4 zijn de afmetingen van de verschillende objecten weergegeven. In deze proefopstelling is gebruik gemaakt van een schaal die ongeveer 3 keer kleiner is dan de afmetingen die gebruikt zijn in het onderzoek van Ripley.

Gebouw:	factor	Muur:	factor	Ruimte tussen gebouw en Muur	factor
L : 352 mm	2,585	L: 496 mm	2,76	Zijkant: 56,2 mm	3
B: 160 mm	2,375	B: 287 mm	2,93	Achterkant: 56,2 mm	3
H: 138 mm	2,76	H: 138 mm	2,76		
		Dikte muur: 15,8 mm			

Tabel 4.4: Afmetingen objecten proefopstelling

4.4 Lading

In hoofdstuk 3 zijn proeven gedaan met de lading om het TNT equivalent te bepalen dat nodig is voor de proef. In deze paragraaf worden nogmaals de eigenschappen van de lading uiteengezet. Hier komen ladinggewicht, afstand en plaatsing aan bod.

4.4.1 Lading gewicht

Het ladinggewicht dat is berekend in hoofdstuk 3, is afgeleid uit het onderzoek van Ripley. Ter verduidelijking wordt de uitkomst hier nogmaals genoemd.

$$1,29 \text{ gram} = 0,135 \text{ gram (slagpijpje)} + 1,155 \text{ gram (C4)} \quad (4.1)$$

Er is dus 1,155 gram TNT equivalent C4 nodig, dit kan met de conversiefactor van C4 worden omgerekend naar het daadwerkelijke gewicht van C4.

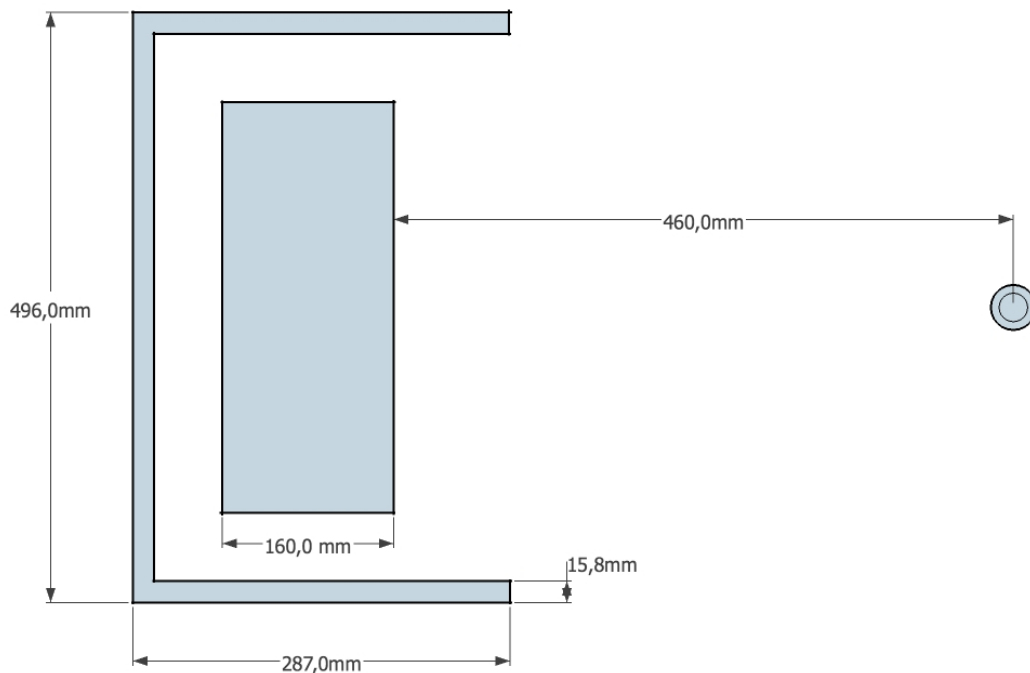
$$\frac{1,155}{1,35} = 0,86 \text{ gram C4.} \quad (4.2)$$

4.4.2 Lading afstand

Aangezien de constructie met een factor 3 is terug geschaald, moet ook de ladingafstand worden verkleind. Dit wordt ook met een factor 3 gedaan omdat afstand hier een constante factor is en behouden moet worden.

$$\frac{1,37}{3} = 0,46 \text{ m} \quad (4.3)$$

0,46 m is gemeten vanaf de voorzijde van het gebouw in het model. Om het geheel te verduidelijken, wordt deze afstand grafisch weergegeven in figuur 4.7



Figuur 4.7: Lading afstand

4.5 Meetapparatuur

Om de drukken die vrijkomen tijdens te proeven, te kunnen meten en te analyseren, is er bepaalde meetapparatuur nodig. De druk van de schokgolf wordt met 2 soorten sensoren gemeten, met behulp van de blastpencil die naast het model wordt opgesteld en met behulp van druksensoren die deels in de Lego

en de grondplaat worden geïntegreerd. Deze meetapparatuur is ook gebruikt om de proeven in hoofdstuk 3 te analyseren.

4.5.1 Blastpencils

De naam blastpencil komt door de vorm van de meetapparatuur. Het voorwerp heeft de vorm van een lange staaf waar zich op 15,75 cm vanaf de punt een druksensor bevindt. De druksensor is ingebouwd in de behuizing van de blastpencil. De blastpencil is speciaal bedoeld om invallende ofwel side-on drukken te meten. De pencil wordt in een metalen statief geplaatst en wordt met de punt richting het detonatiepunt gericht. In figuur 4.8 wordt de blastpencil zonder statief weergegeven. Dit type blastpencil kan drukken meten tot 690 kPa.



Figuur 4.8: Blastpencil

4.5.2 Druksensoren

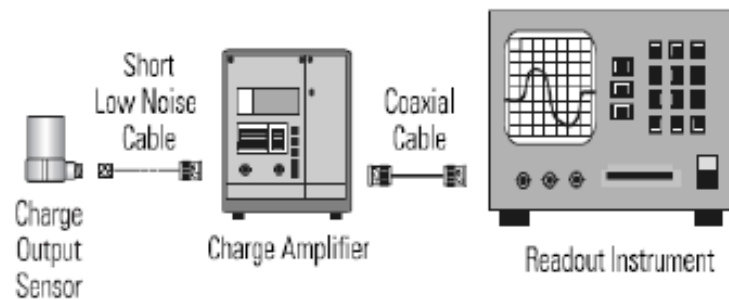
Zoals in paragraaf 4.5.1 al is besproken, zit er in de behuizing van de blastpencil een druksensor. Om explosiedrukken te meten kan zo'n druksensor ook los in een constructie worden geïntegreerd. Bijvoorbeeld in de bodemplaat of in het gebouw zelf. Zo kunnen zowel side-on drukken worden gemeten als ook reflecterende drukken. Deze druksensor kan drukken meten tot 137.540 kPa. In figuur 4.9 wordt een druksensor weergegeven.



Figuur 4.9: Druksensor

4.5.3 Verwerking

Op het moment dat de drukken van de schokgolf door de verschillende sensoren zijn opgevangen, worden de inputgegevens verstuurd naar een versterker. In figuur 4.10 wordt weergegeven hoe dit in zijn werk gaat. In principe worden de inputgegevens via een versterker, oftewel charge amplifier, naar het Readout instrument verstuurd. De verschillende apparaten zijn verbonden met een COAX kabel. Het Readout instrument is verbonden met een computer die met behulp van software de inputgegevens verwerkt. Hiermee kan bijvoorbeeld een vloeiende kromme van het drukprofiel kan worden gemaakt.



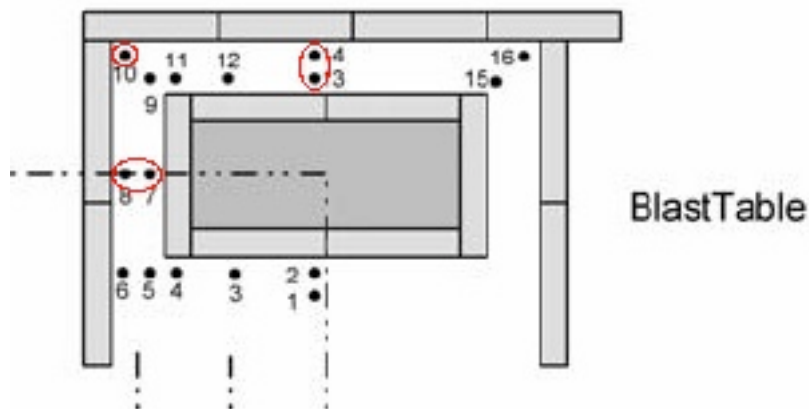
Figuur 4.10: Verwerking Input waarden

4.6 Proefopstelling met meetapparatuur

In deze paragraaf wordt uiteengezet hoe de sensoren die zijn besproken in paragraaf 4.5 in de opstelling worden verwerkt. De locaties van de sensoren zijn besloten op basis van de studie van Ripley.

4.6.1 Literatuur Sensoren

De druksensoren die zijn gebruikt in het onderzoek van Ripley worden in figuur 4.11 weergegeven en zijn allen in de vloer ingebouwd.



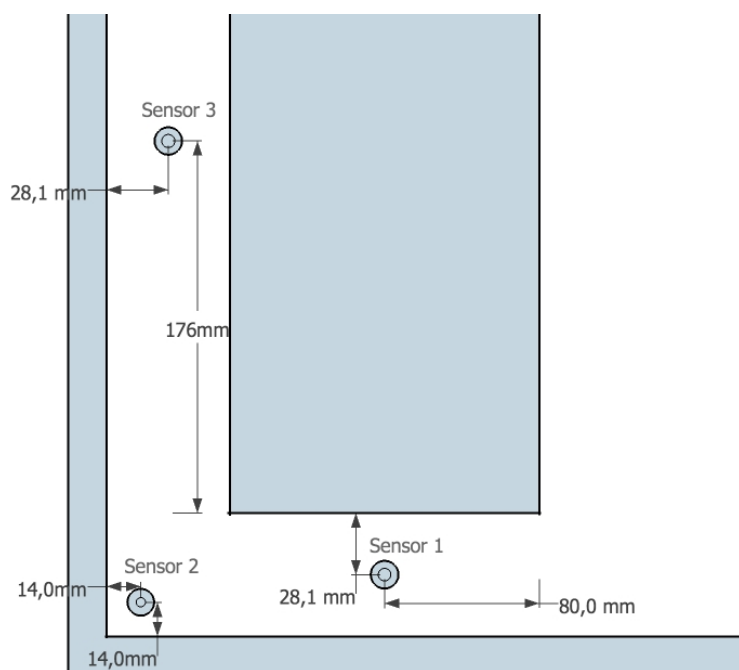
Figuur 4.11: Druksensoren onderzoek Ripley

Gekozen is om 5 druksensoren te gebruiken die ook in het onderzoek van Ripley zijn gebruikt. Zo kunnen de meetgegevens met elkaar vergeleken worden. De keuze van sensoren is gedaan op basis van een markant drukprofiel. Voorspeld wordt dat de sensoren 7, 8, 10, 13 en 14 uit figuur 4.11 drukprofielen gaan vertonen van reflectie, diffractie en het tunneleffect. De sensoren die vergeleken worden met de sensoren 7 en 8 worden in het midden van de tussenruimte, dus precies tussen 7 en 8 in. Dit zal ook gebeuren in de tussenruimte bij de sensoren 13 en 14. Daarnaast wordt er in de aanbevelingen van het onderzoek van Ripley vermeld dat het interessant is om ook een aantal sensoren in te bouwen in de muur. In de volgende paragrafen wordt verteld waar de sensoren precies worden geplaatst.

4.6.2 Sensor 1, 2 en 3

In mijn schaalmodel, zijn de sensoren 1, 2 en 3 allen in de grondplaat geïntegreerd. Uit hoofdstuk 3 is gebleken dat de aluminium plaat die werd gebruikt, niet bruikbaar is voor het inbouwen van sensoren. Door de plaat worden trillingen van de explosies overgebracht, waardoor de druksensoren

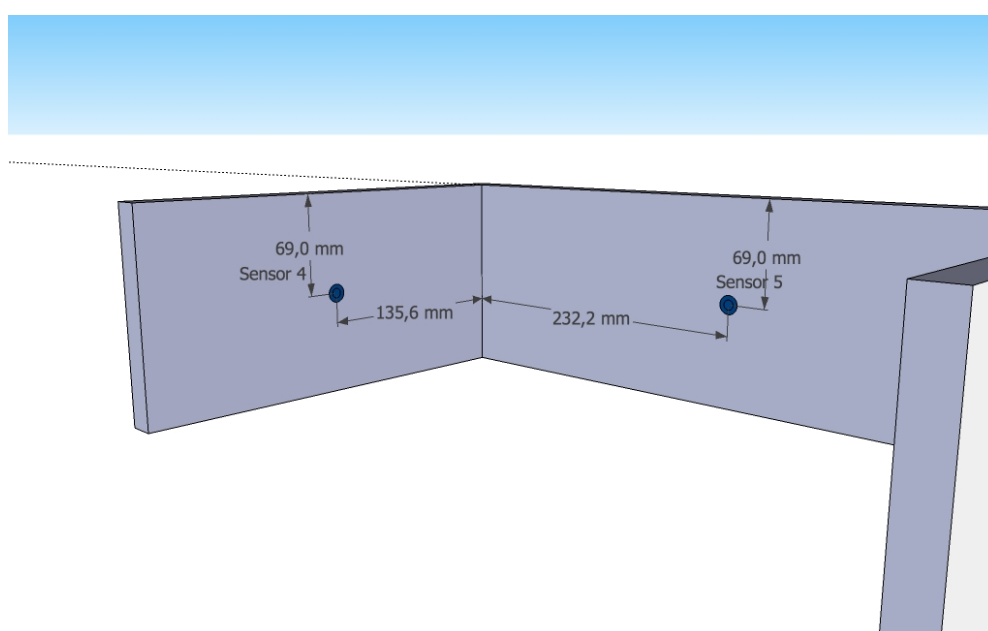
veel ruis ondervinden en de metingen niet representatief zijn. Vandaar dat er in het vervolg gebruik wordt gemaakt van een MDF plaat. Deze MDF plaat bestaat uit samengeperst hout, hierin ondervinden de sensoren geen ruis. In figuur 4.12 worden de sensoren 1, 2 en 3 weergegeven met de bijbehorende afmetingen.



Figuur 4.12: Sensoren 1,2 en 3

4.6.3 Sensor 4 en 5

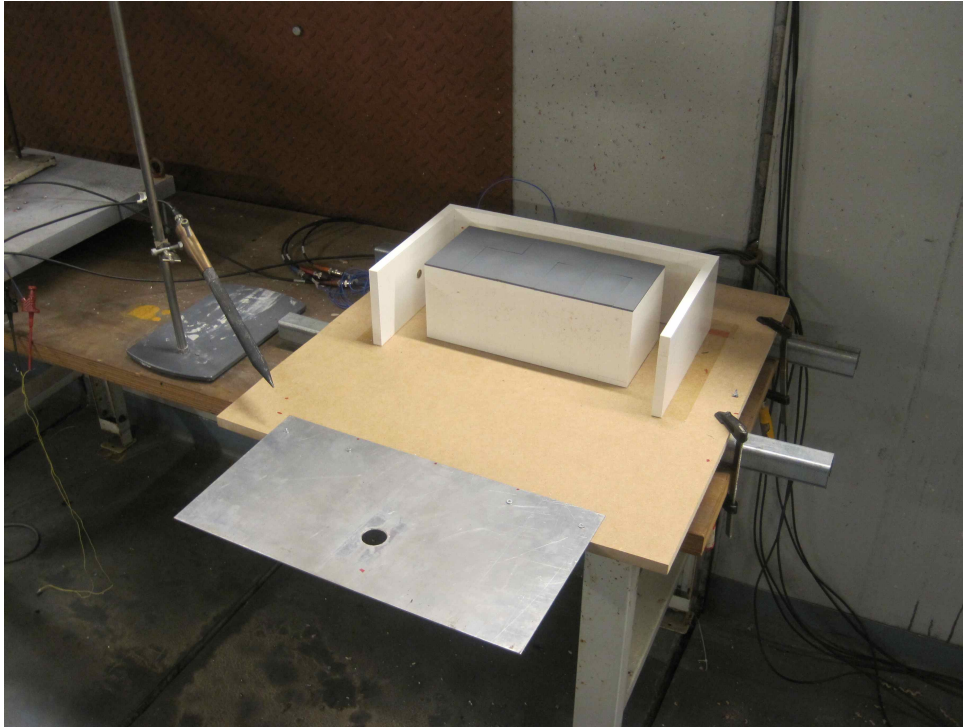
De sensoren 4 en 5 zijn beide in de Lego wand geïntegreerd en zijn naar binnen gericht zoals in figuur 4.13 wordt weergegeven. Zoals te zien is, zit sensor 4 in het midden van de zijwand, sensor 5 is geplaatst in het midden van de achterwand. Het gebouw is in figuur 4.13 weggelaten om het geheel te verduidelijken.



Figuur 4.13: Sensoren 4 en 5

4.6.4 Blastpencil

Naast de sensoren die in de constructie zijn geïntegreerd, wordt er ook een blastpencil naast het model opgesteld. Deze kan worden gebruikt als referentie voor de side-on druk van de explosie. In figuur 4.14 is deze blastpencil weergegeven. Deze bevindt zich op een afstand van 0,46 m van het detonatiepunt en op een hoogte van 0,11 m van de bovenzijde van de plaat.



Figuur 4.14: Blastpencil

Tevens krijgt men in figuur 4.14 een goede impressie van de opstelling. Zoals al eerder is besproken, is het model geplaatst op een MDF plaat en vastgemaakt met dubbelzijdige tape. Vervolgens is het geheel met balken opgehoogd, om de blastsensoren in de plaat te kunnen integreren. De bedrading kan zo onder het model worden weggewerkt. De lading wordt gemonteerd op een aluminium plaat die vastgeschroefd zit op de MDF plaat. Zo worden trillingen van de explosie naar de druksensoren uitgesloten, maar heeft men toch dezelfde omstandigheden van ladingdetonatie als voorheen.

4.6.5 Testprogramma

Het testprogramma ziet er als volgt uit: er wordt 6 keer een lading afgezet van 1,29 gram TNT equivalent die zich op 0,46 m van het gebouw bevindt. De lading is gemonteerd in de aluminium plaat waarbij een hemisferische detonatie zal ontstaan. De drukken die hierbij vrijkomen worden gemeten door 3 sensoren in de vloer en 2 sensoren in de wand. Tot slot is er nog 1 blastpencil op een afstand van 0,46 m en 0,11 m van de bodemplaat gemonteerd.

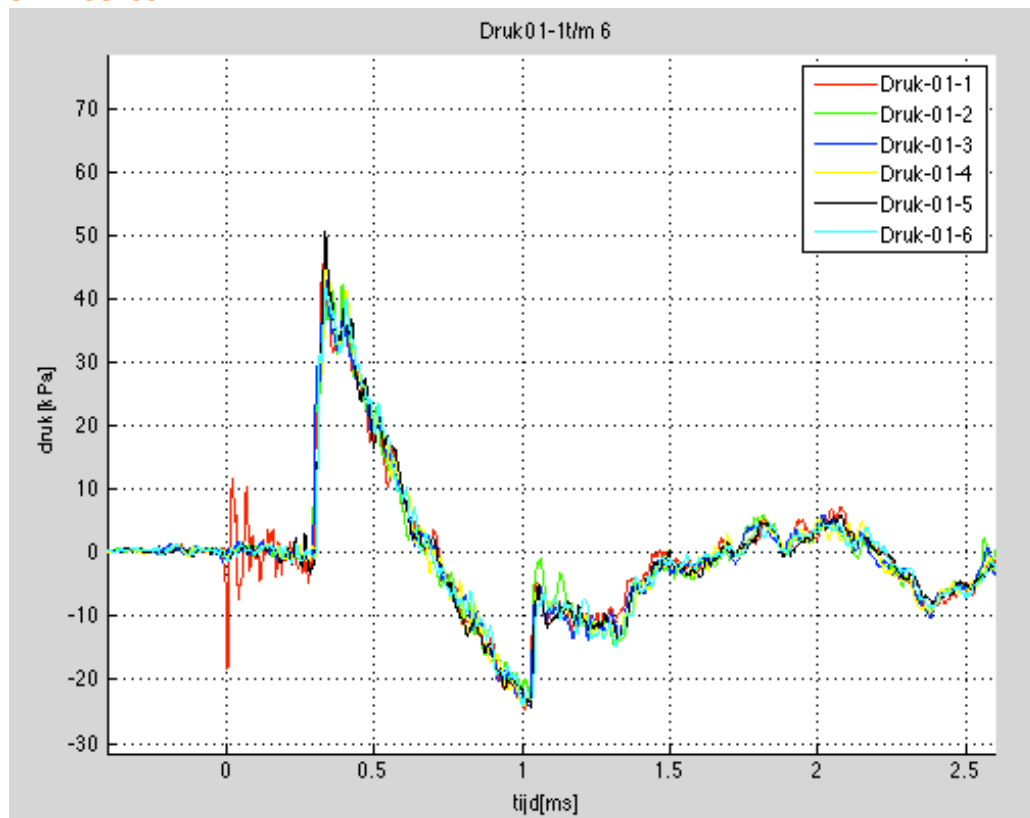
5. Resultaten en Bespreking

In dit hoofdstuk worden de resultaten van het experiment binnen het model besproken. Het testprogramma van de experimenten, is in hoofdstuk 4 toegelicht. Nadat alle resultaten zijn weergegeven, wordt de reproduceerbaarheid van deze resultaten besproken. Vervolgens wordt de Numerieke analyse die is gedaan kort toegelicht. Tot slot zullen de resultaten worden vergeleken met de resultaten van de numerieke analyse en de resultaten van het literatuur onderzoek van Ripley.

5.1 Resultaten experiment

In deze paragraaf worden de resultaten van de sensoren 1 t/m 6 besproken. De grafieken die hieruit voortkomen worden kort toegelicht. Ook zal de piekoverdruk en de impuls in tabelvorm worden weergegeven.

5.1.1 Sensor 1



Figuur 5.1: Resultaten Sensor 1 proef 1 t/m 6

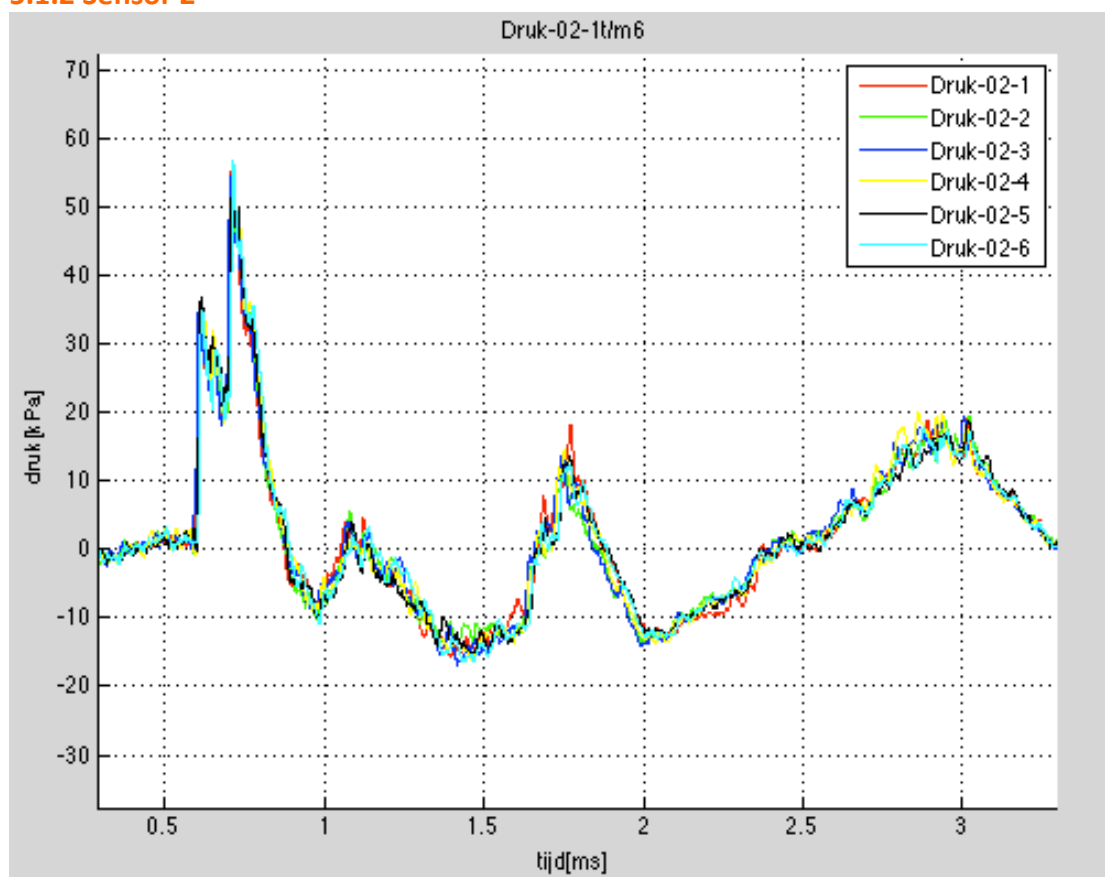
Druksensor 1 bevindt zich in het begin van de corridor, zie hoofdstuk 4 voor meer uitleg over de plaatsing van de sensoren. Zoals te zien is in figuur 5.1 vindt er al wat reflectie plaats. De schokgolf verplaatst zich hier door een tunnel waardoor geen volledige invallende schokgolf wordt gemeten, maar een samenkomst van reflecties. Dit is nog minimaal, waarschijnlijk zullen in de resultaten van verder weg gelegen sensoren nog meer reflecties en een hogere piekoverdruk worden gevonden.

Resultaten Sensor 1	Piekoverdruk [kPa]	Impuls [Pa.s]
Proef_01	45,0	7,6
Proef_02	41,7	7,5
Proef_03	43,6	7,9
Proef_04	45,6	8,0
Proef_05	50,2	7,9
Proef_06	41,1	7,9
Gemiddelde	44,5	7,8
StDev	3,3	0,2

Tabel 5.1: Piekoverdruk en Impuls druksensor 1

In Tabel 5.1 zijn de piekoverdrukken en impulsen van de verschillende metingen uiteengezet. Zoals te zien is liggen deze piekoverdrukken dicht bij elkaar.

5.1.2 Sensor 2



Figuur 5.2: Resultaten Sensor 2 proef 1 t/m 6

Wat duidelijk te zien is in figuur 5.2 is de reflecterende druk die plaats vindt. De schokgolf wordt eerst als invallende piek gemeten voor zover dit nog een invallende schokgolf betreft door het tuneleffect. Deze piek is ongeveer 35 kPa. Vervolgens wordt deze weerkaatst door de muur en wordt een deel van de reflecterende druk gemeten die hoger ligt dan de eerste piek, namelijk 55 kPa. Ook interessant is de hoge druk die wordt gemeten in vergelijking met de resultaten van druksensor 1. Deze liggen hoger terwijl de sensor zich verder weg bevindt van het detonatiepunt. Tevens kan aan de grafiek worden opgemerkt dat deze voorzien is van nog meer pieken, er bevindt zich na de eerste schokgolf nog een piek van ongeveer 15 kPa en een piek van ongeveer 20 kPa. Dit kan worden

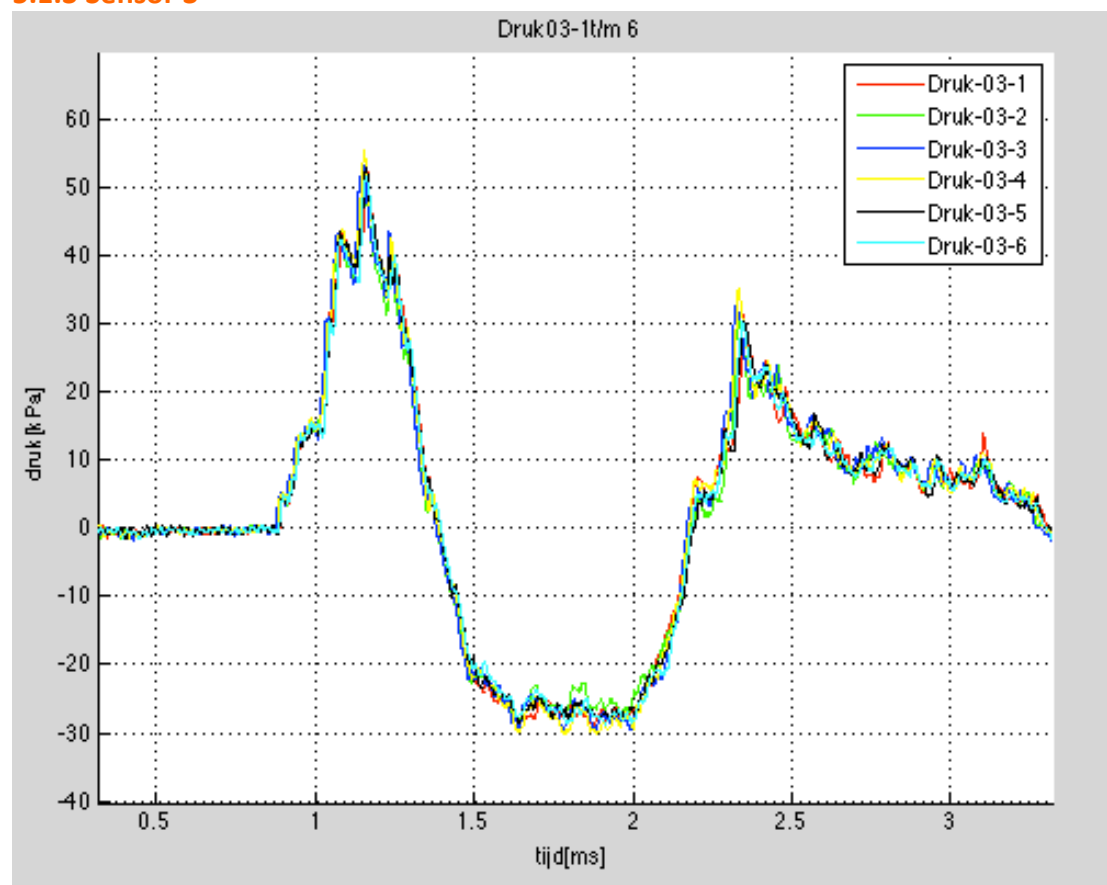
verklaard door een gevangen schokgolf die terugkaatst tegen de wanden om vervolgens door de druksensoren te worden gemeten. Deze pieken zijn niet gevaarlijker dan de piekoverdruk die wordt gemeten.

Resultaten Sensor 2	Piekoverdruk [kPa]	Impuls [Pa.s]
Proef_01	54,5	6,9
Proef_02	54,0	6,9
Proef_03	54,7	7,1
Proef_04	56,6	7,1
Proef_05	55,0	7,0
Proef_06	56,8	7,3
Gemiddelde	55,3	7,1
StDev	1,2	0,2

Tabel 5.2: Piekoverdruk en Impuls druksensor 2

In Tabel 5.2 zijn de Piekoverdrukken en Impulsen van druksensor 2 weergegeven. Deze waarden liggen ook hier dicht bij elkaar.

5.1.3 Sensor 3



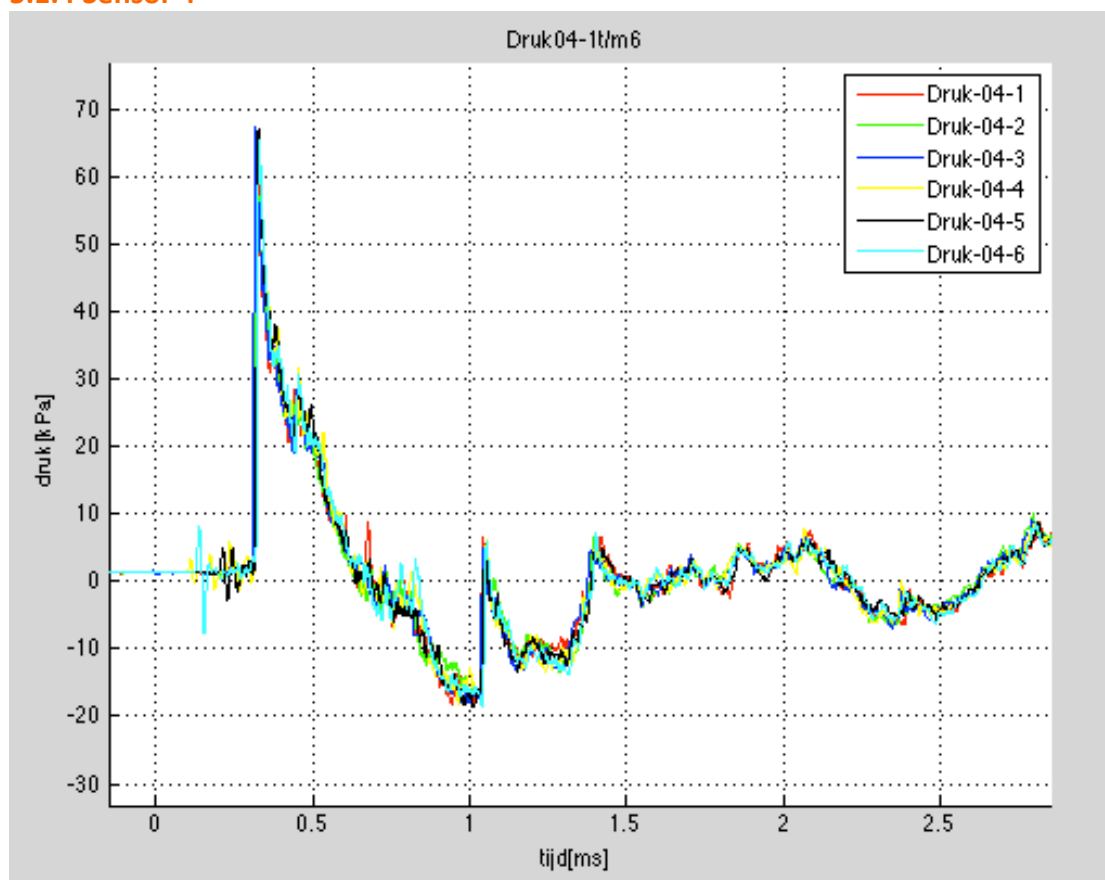
Figuur 5.3: Resultaten Sensor 3 proef 1 t/m 6

In figuur 5.3 is het drukprofiel van sensor 3 weergegeven. Sensor 3 bevindt zich tussen de achterwand en de achterkant van het gebouw. Wat opvalt aan dit drukprofiel is de lange negatieve fase die zich voordoet na de piekoverdruk. Tevens zijn in de pieken van de piekoverdrukken tekenen van reflectie te zien. In tabel 5.3 zijn de piekoverdrukken en impulsen van sensor 3 weergegeven.

Resultaten Sensor 3	Piekoverdruk [kPa]	Impuls [Pa.s]
Proef_01	54,3	13,0
Proef_02	52,5	12,6
Proef_03	53,8	13,0
Proef_04	55,7	13,3
Proef_05	53,0	12,9
Proef_06	51,7	12,4
Gemiddelde	53,5	12,9
StDev	1,4	0,3

Tabel 5.3: Piekoverdruk en Impuls druksensor 3

5.1.4 Sensor 4



Figuur 5.4: Resultaten Sensor 4 proef 1 t/m 6

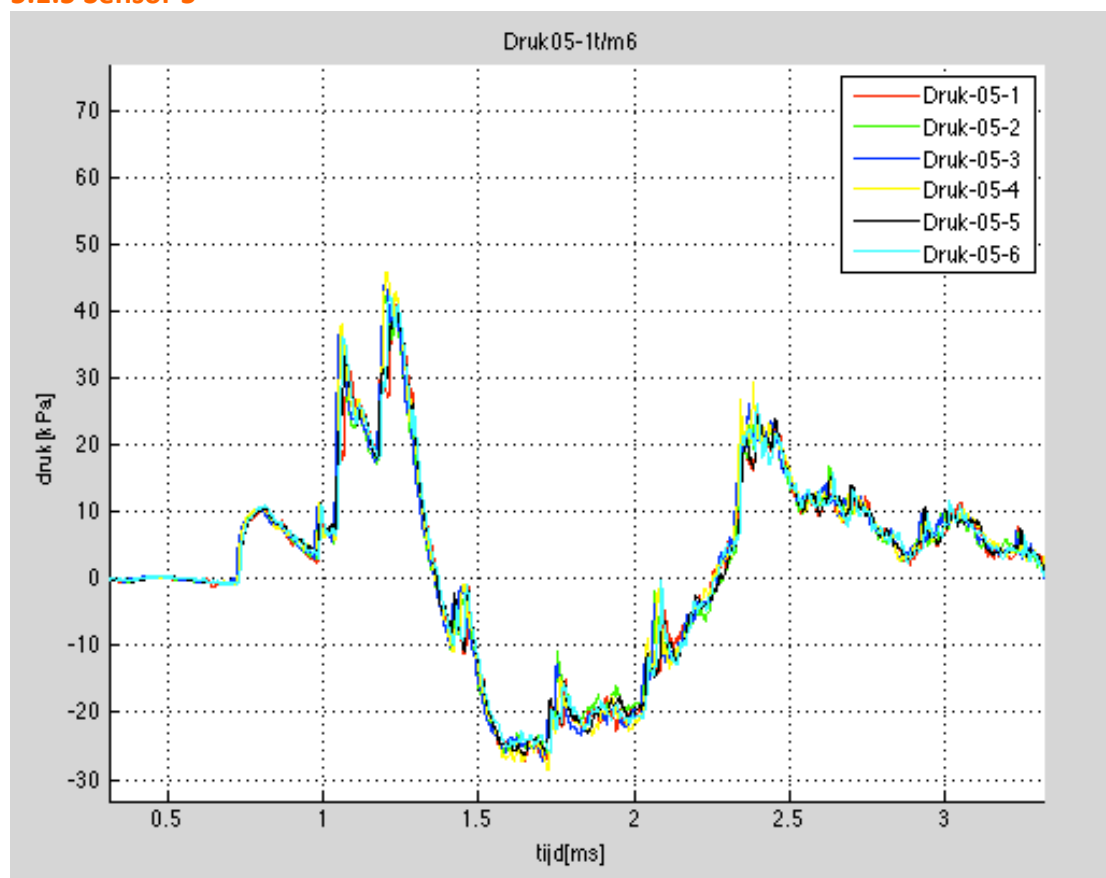
In figuur 5.4 is het drukprofiel van druksensor 4 weergegeven. Deze resultaten zijn goed te vergelijken met de resultaten van druksensor 1 aangezien deze op bijna dezelfde afstand van het detonatiepunt liggen. Echter ligt de piekoverdruk hier veel hoger, dit komt waarschijnlijk doordat de lading in een directe lijn met de sensor staat en deze niet wordt gehinderd door objecten. In sensor 1 is dit niet het geval in deze directe lijn bevinden zich objecten waardoor interactie met de schokgolf zal plaatsvinden.

In tabel 5.4 zijn de piekoverdrukken en impulsen van druksensor 4 weergegeven.

Resultaten Sensor 4	Piekoverdruk [kPa]	Impuls [Pa.s]
Proef_01	64,6	6,8
Proef_02	63,5	6,6
Proef_03	66,0	6,9
Proef_04	63,0	7,1
Proef_05	66,2	7,1
Proef_06	64,1	7,0
Gemiddelde	64,6	6,9
StDev	1,3	0,2

Tabel 5.4: Piekoverdruk en Impuls druksensor 4

5.1.5 Sensor 5



Figuur 5.5: Resultaten sensor 5 1 t/m 6

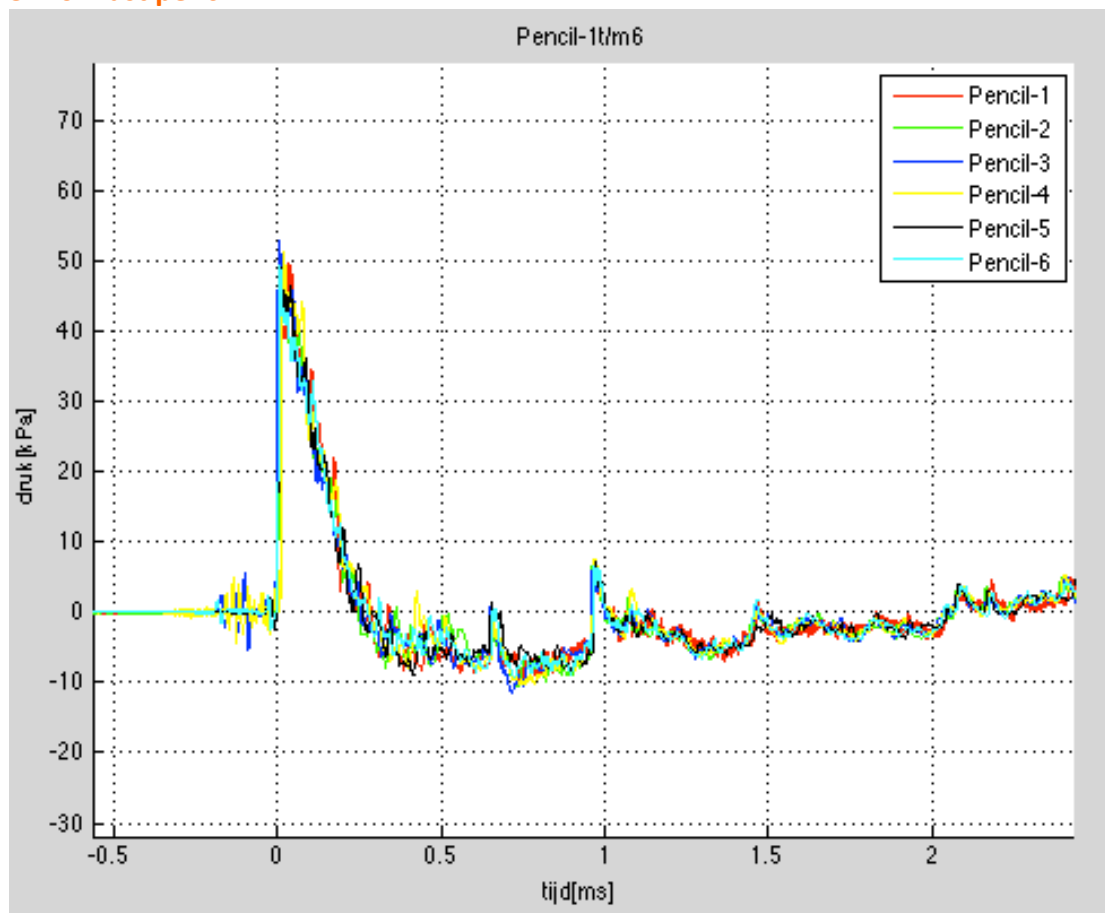
Opmerkelijk aan deze druk/tijd grafieken zijn een aantal aspecten. Ten eerste de kleine piek van 10 kPa die is weergegeven voor de grootste piek. Vervolgens ontstaat er een piek en een reflecterende piek die iets hoger ligt dan de 2^e piek. Daarnaast vindt er een zeer diepe en lange negatieve fase plaats die gevolgd wordt door nog een piek.

Resultaten Sensor 5	Piekoverdruk [kPa]	Impuls [Pa.s]
Proef_01	41,5	10,0
Proef_02	42,6	9,4
Proef_03	44,7	10,2
Proef_04	46,3	10,1
Proef_05	39,7	10,0
Proef_06	41,9	10,1
Gemiddelde	42,8	10,0
StDev	2,4	0,29

Tabel 5.5: Resultaten sensor 5

In tabel 5.5 zijn de piekoverdrukken en impuls resultaten van de verschillende metingen van sensor 5 weergegeven. Door relatief lange en reflecterende piekoverdruk, ligt de impuls vrij hoog.

5.1.6 Blast pencil



Figuur 5.6: Resultaten pencil 1 t/m 6

Figuur 5.6 geeft de resultaten van de blastpencil weer die op een afstand van 0,46 m van het detonatie punt is geplaatst. De hoogte vanaf de MDF plaat tot de sensor bedraagt 0,11 m. In het drukprofiel is goed de invallende schokgolf te zien met een gemiddelde piekoverdruk van 50,1 kPa. De piekoverdrukken en impulsen zijn weergegeven in tabel 5.6.

Resultaten blast Pencil	Piekoverdruk [kPa]	Impuls [Pa.s]
Proef_01	49,7	5,9
Proef_02	48,7	5,6
Proef_03	52,7	5,9
Proef_04	51,2	5,7
Proef_05	48,9	5,8
Proef_06	49,2	5,8
Gemiddelde	50,1	5,8
StDev	1,6	0,1

Tabel 5.6: Piekoverdruk en Impuls blastpencil

5.1.7 Reproduceerbaarheid

Om conclusies te mogen trekken uit de meetresultaten, moeten deze eerst met elkaar worden vergeleken. Middels een vergelijking van de grafieken kijkt men of de drukprofielen enigszins met elkaar overeen komen.

Zoals is weergegeven in de grafieken van paragraaf 5.1, liggen alle drukprofielen dicht bij elkaar. Afgezien van een paar kleine ruis afwijkingen zijn er geen grote verschillen in druk.

Uit de resultaten van paragraaf 5.1 valt te concluderen dat de verkregen resultaten reproduceerbaar zijn en kunnen worden gebruikt voor vergelijking met de resultaten van de numerieke analyse en de resultaten uit het onderzoek van Ripley.

5.2 Numerieke simulatie

Een numerieke simulatie is een benadering van het experiment met computersoftware. In dit geval het programma LS DYNA dat gebruik maakt van de eindige elementen techniek. Het werken met dit programma is gedaan door een aantal collega's op de KMS, Dr. Ir. Dimitrios en Ir. Baghir.

Het proces dat in deze software wordt doorlopen bestaat uit 3 fasen. Men begint met het "préproces", in deze fase wordt de structuur van de constructie en de verschillende inputwaarden in het programma geprogrammeerd. Inputwaarden bestaan uit de locatie van de lading, het ladinggewicht, de locatie van de sensoren en de constructie. Als dit is geprogrammeerd kan het programma gestart worden, dit heet de "proces". Het programma gaat een detonatie nabootsen wat uiteindelijk de numerieke simulatie vormt. Tot slot moeten de verschillende uitkomsten worden geanalyseerd, wat de fase van het "post processing" wordt genoemd. Dit hele proces samen vormt de numerieke simulatie.

5.2.1 Voortplanting Schokgolf

Door middel van de volgende figuren, wordt er getracht een schokgolf patroon te beschrijven. De afbeeldingen worden op chronologische tijdsvolgorde weergegeven. De eerste 2 afbeeldingen zijn genomen vanuit het zij/vooraanzicht voor het gebouw en de wand. De rest van de afbeeldingen zijn genomen vanaf het zij/achteraanzicht.

LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost
Time = 0.54913
Isosurfaces of Pressure
min=0.74592e-05, at elem# 156937
max=0.000176447, at elem# 161214



Fringe Levels
1.764e-04
1.675e-04
1.586e-04
1.498e-04
1.409e-04
1.320e-04
1.231e-04
1.142e-04
1.053e-04
9.636e-05
8.746e-05

Figuur 5.7: Druk op 0,54 ms

In figuur 5.7 vindt de detonatie plaats. De druk is hemisferisch aan het expanderen. De druk die aan de bovenzijde wordt gemeten is te verwaarlozen aangezien dit een meetfout betreft.

LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost
Time = 0.90007
Isosurfaces of Pressure
min=7.94054e-06, at elem# 160352
max=0.000192703, at elem# 100255



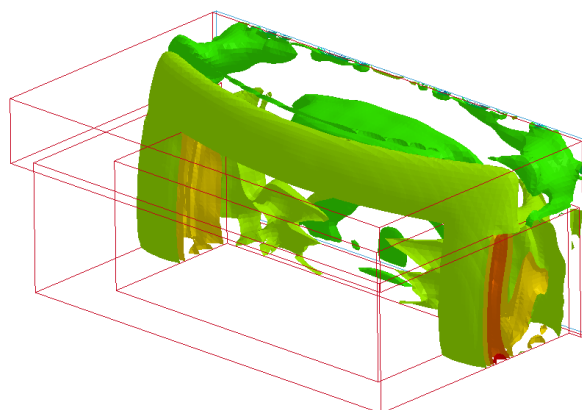
Fringe Levels
1.927e-04
1.742e-04
1.558e-04
1.373e-04
1.188e-04
1.003e-04
8.185e-05
6.337e-05
4.489e-05
2.642e-05
7.941e-06

Figuur 5.8: Druk op 0,9 ms

Vervolgens zal de schokgolf zich richting het gebouw verplaatsen. Hier zal een deel van de schokgolf weerkaatsen tegen het gebouw. Een deel zal de corridors in verdwijnen tussen het gebouw en de zijwanden. Tot slot zal nog een deel over het gebouw verplaatsen.

“In figuur 5.8 tot 5.10 kan men duidelijk zien dat de druk in de corridors hoger is dan elders (bij. boven het gebouw). Dit is eerder in dit verslag al beschreven en ‘tunneleffect’ genoemd.”

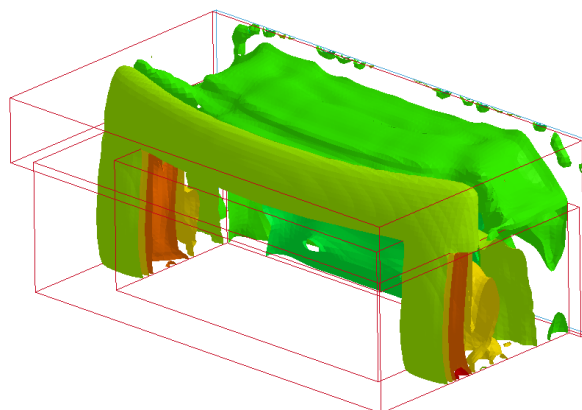
LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost
Time = 0.99587
Isosurfaces of Pressure
min=6.81339e-06, at elem# 155952
max=0.000186643, at elem# 97791



Fringe Levels
1.866e-04
1.687e-04
1.507e-04
1.327e-04
1.147e-04
9.673e-05
7.875e-05
6.076e-05
4.278e-05
2.480e-05
6.813e-06

Figuur 5.9: Druk op 0,99 ms

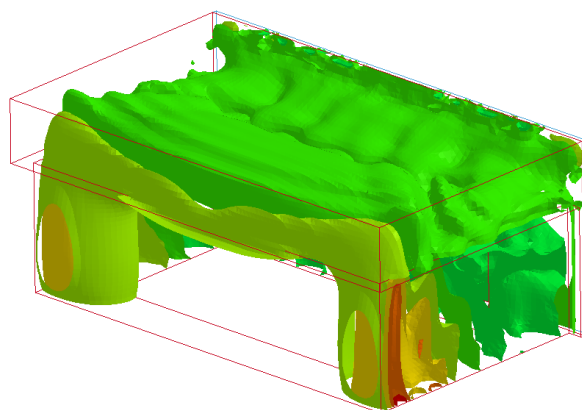
LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost
Time = 1.1373
Isosurfaces of Pressure
min=1.01772e-05, at elem# 160158
max=0.000172269, at elem# 95187



Fringe Levels
1.723e-04
1.561e-04
1.399e-04
1.236e-04
1.074e-04
9.122e-05
7.501e-05
5.880e-05
4.260e-05
2.639e-05
1.018e-05

Figuur 5.10: Druk op 1,14 ms

LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost
Time = 1.3801
Isosurfaces of Pressure
min=3.09553e-05, at elem# 157758
max=0.000163186, at elem# 25005

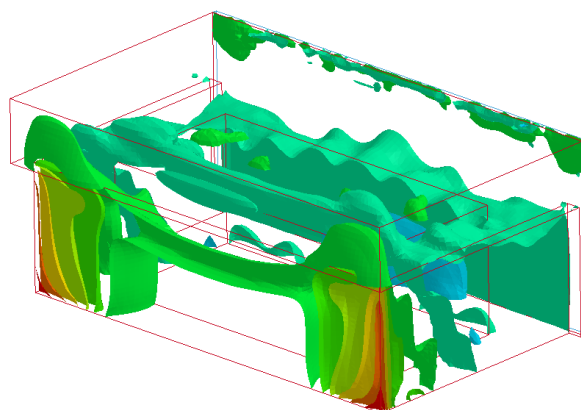


Fringe Levels
1.632e-04
1.500e-04
1.367e-04
1.235e-04
1.103e-04
9.707e-05
8.385e-05
7.062e-05
5.740e-05
4.418e-05
3.096e-05

Figuur 5.11: Druk op 1,38 ms

In figuur 5.11 ziet men de schokgolf tegen de achterwand in de hoeken weerkaatsen. Ondertussen is er al een deel de corridors ingevloeid achter het gebouw.

LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost
Time = 1.4546
Isosurfaces of Pressure
min=3.74151e-05, at elem# 157758
max=0.000212886, at elem# 24641

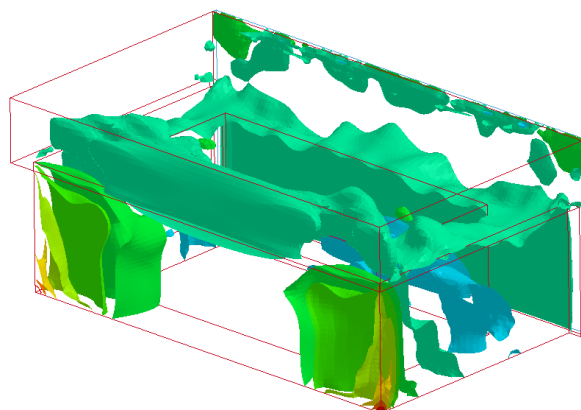


Fringe Levels
2.129e-04
1.953e-04
1.778e-04
1.602e-04
1.427e-04
1.252e-04
1.076e-04
9.006e-05
7.251e-05
5.496e-05
3.742e-05

Figuur 5.12: Druk op 1,45 ms

In figuur 5.12 is de weerkaatsing in de hoek nog steeds van toepassing. De schokgolf die over het gebouw is verplaatst, is inmiddels achter het gebouw belandt.

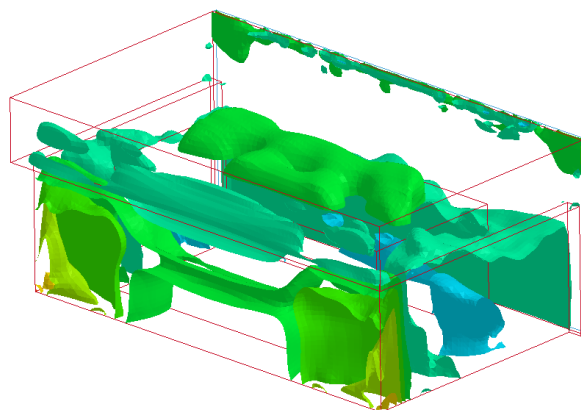
LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost
Time = 1.4868
Isosurfaces of Pressure
min=4.05197e-05, at elem# 157758
max=0.000218373, at elem# 24567



Fringe Levels
2.184e-04
2.006e-04
1.828e-04
1.650e-04
1.472e-04
1.294e-04
1.117e-04
9.388e-05
7.609e-05
5.831e-05
4.052e-05

Figuur 5.13: Druk op 1,48 ms

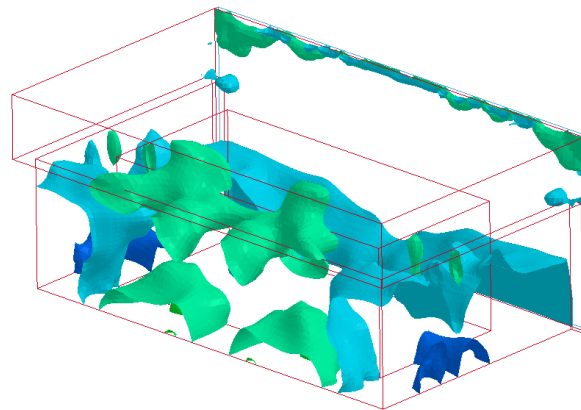
LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost
Time = 1.5163
Isosurfaces of Pressure
min=4.26211e-05, at elem# 157758
max=0.000203187, at elem# 156628



Fringe Levels
2.032e-04
1.871e-04
1.711e-04
1.550e-04
1.390e-04
1.229e-04
1.068e-04
9.079e-05
7.473e-05
5.868e-05
4.262e-05

Figuur 5.14: Druk op 1,51 ms

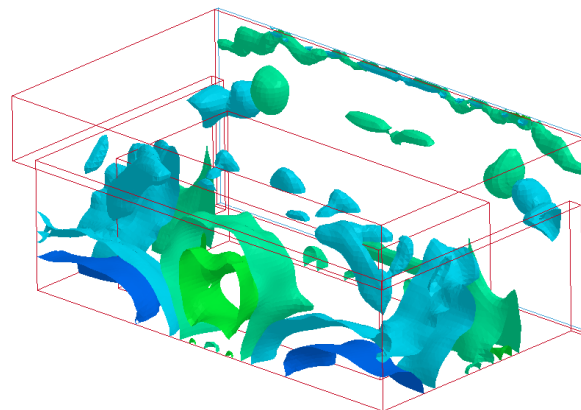
LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost
Time = 1.7571
Isosurfaces of Pressure
min=4.82703e-05, at elem# 150962
max=0.000264524, at elem# 159512



Fringe Levels
2.645e-04
2.429e-04
2.213e-04
1.996e-04
1.780e-04
1.564e-04
1.348e-04
1.131e-04
9.152e-05
6.990e-05
4.827e-05

Figuur 5.15 Druk op 1,76 ms

LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost
Time = 1.9917
Isosurfaces of Pressure
min=4.988e-05, at elem# 14981
max=0.000245037, at elem# 157618



Fringe Levels
2.450e-04
2.255e-04
2.060e-04
1.865e-04
1.670e-04
1.475e-04
1.279e-04
1.084e-04
8.891e-05
6.940e-05
4.988e-05

Figuur 5.16: Druk op 1,99 ms

Wat er vervolgens achter de wand gebeurt is een heel complex gebeuren. De drukgrafieken laten zien dat er een continue weerkaatsing van de schokgolf plaatsvindt. Een soort “gevangenschap van de schokgolf” die continue aan het reflecteren is in de achterwand en uiteindelijk zal uitdoven.

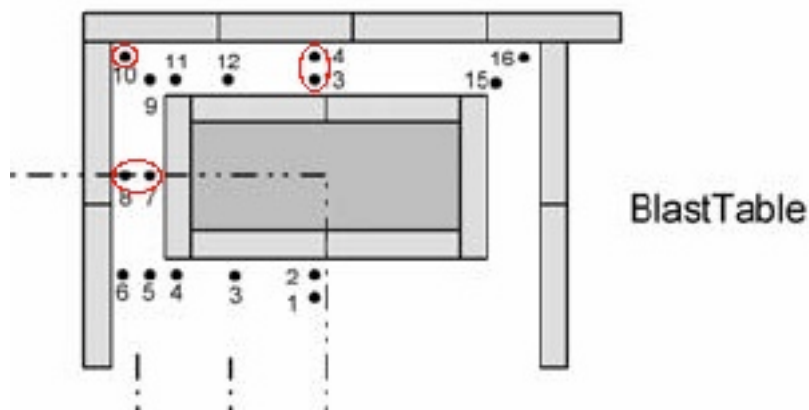
5.3 Vergelijking experiment, literatuur en numerieke simulatie

De vergelijking zal worden uitgevoerd door de resultaten van de verschillende onderzoeken te vergelijken. Deze onderzoeken zijn de experimentele studie, de numerieke simulatie en de literatuurstudie. De piekoverdruk, de impuls en de druk grafieken van de gekozen sensoren worden in deze paragraaf weergegeven. Om het vergelijkingsmateriaal te verduidelijken, wordt hier nogmaals een overzicht gegeven van de plaatsing van de sensoren.

Experimentele studie	Numerieke studie	Literatuur studie
Sensor 1	Sensor 1	Sensor 7 en Sensor 8
Sensor 2	Sensor 2	Sensor 10
Sensor 3	Sensor 3	Sensor 13 en Sensor 14
Sensor 4 (muursensor)	Sensor 4	-
Sensor 5 (muursensor)	Sensor 5	-

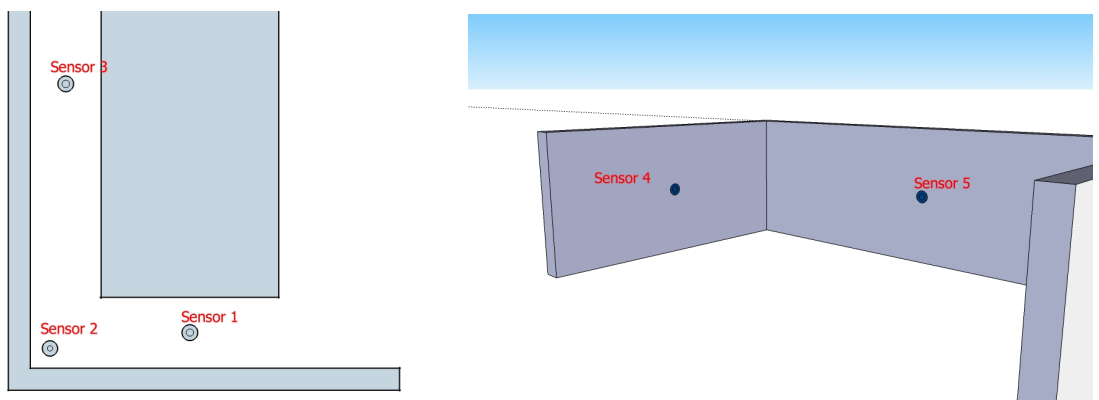
Tabel 5.7: Vergelijking Sensoren

Zoals is weergegeven in tabel 5.7 zijn de benamingen voor de sensoren van de experimentele en de numerieke studie gelijk. Deze sensoren hebben tevens dezelfde locatie in het model. De naamgeving voor de sensoren in de literatuurstudie ligt anders. Sensor 1 zal worden vergeleken met Sensor 7 en 8 van de literatuur studie. Sensor 2 zal worden vergeleken met Sensor 10 uit het onderzoek van Ripley en tot slot zal Sensor 3 vergeleken worden met Sensor 13 en 14 uit de literatuur. De muursensoren worden alleen vergeleken met de numerieke studie omdat hiervan geen data beschikbaar is in de literatuurstudie.



Figuur 5.17: Overzicht Sensoren Literatuur Studie

In figuur 5.17 en 5.18 is herhaald wat in hoofdstuk 4 al uiteen is gezet. Dit is gedaan om een duidelijk beeld te creëren bij de vergelijking die in de volgende paragrafen aan bod komt.



Figuur 5.18: Overzicht Sensoren Experimentele studie

5.4.1 Sensor 1

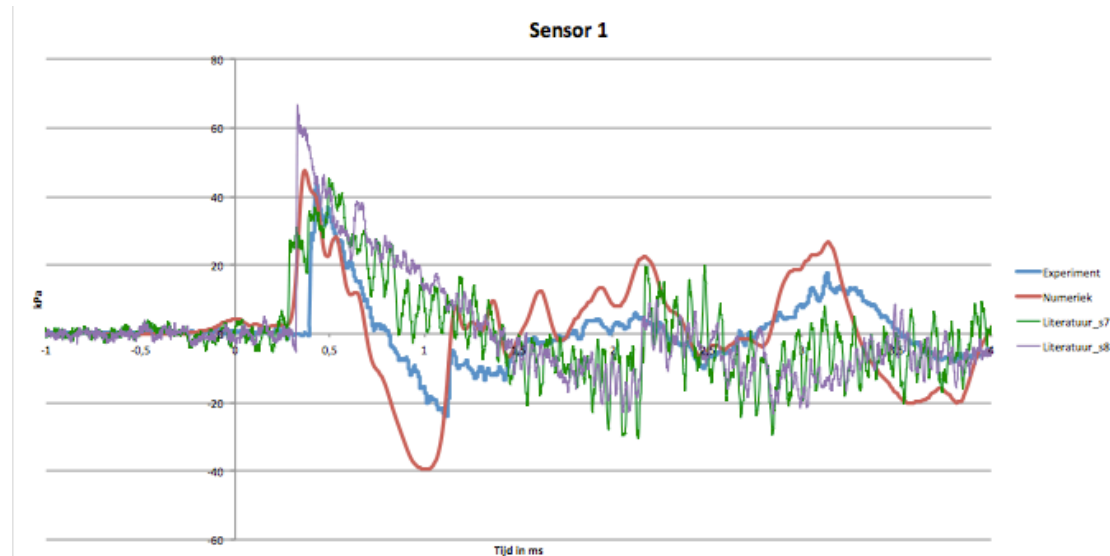
In tabel 5.8 zijn de verschillende waarden van de onderzoeken verwerkt. Zoals te zien is komen alle piekoverdrukken van sensor 1 goed overeen. Voor de

resultaten van de literatuur zijn de waarden van sensor 7 en 8 gebruikt voor vergelijkingsmateriaal. Wat hier opvalt is het grote verschil in drukprofiel. Dat dit experimenteel en numeriek overeen komt laat zien dat het experiment nauwkeurig is uitgevoerd. Maar ook het resultaat van sensor 7 uit de literatuur laat zien dat schaling hier goed is toegepast. De Impulsen van het experimentele onderzoek en het numerieke onderzoek komen goed overeen. De geschaalde impuls van het literatuur onderzoek van sensoren 7 en 8 wijkt af van de eerste 2, wat te wijten is aan de schaling, beschreven in paragraaf 2.1.7. Echter na de geschaalde impuls om te rekenen naar de daadwerkelijke impuls met vergelijking (2.3) liggen deze waarden dicht bij elkaar. Dit komt door het ladinggewicht wat in deze berekening wordt meegenomen.

Piekoverdruk	Experimenteel	Numeriek	Literatuur sensor 7	Literatuur sensor 8
Piekoverdruk	44,5 kPa	47,6 kPa	45,3 kPa	66,6 kPa
Impuls	7,8 kPa.ms	7,1 kPa.ms	18,9 kPa.ms	24,3 kPa.ms
Geschaalde Impuls (I_{scaled})	56,9 kPa.ms/kg ^{1/3}	51,8 kPa.ms/kg ^{1/3}	46,2 kPa.ms/kg ^{1/3}	59,4 kPa.ms/kg ^{1/3}
Gemiddelde Piekoverdruk	51 kPa	Gemiddelde	53,6	
StDev	10,5	I_{scaled} StDev	kPa.ms/kg ^{1/3} 5,9	

Tabel 5.8: Vergelijking Sensor 1

Figuur 5.19 is een samenvoeging van de verschillende grafieken, er is een overeenkomst in het drukpatroon. De grafiek van de resultaten uit de literatuur geeft veel trillingen weer, dit is waarschijnlijk te wijten aan het gebruik van de aluminium constructie elementen. Deze geven veel trillingen over van de explosie op de druksensoren in het materiaal. Dit fenomeen werd ook in hoofdstuk 3 onderkend, vandaar dat er toen voor is gekozen om het materiaal te veranderen.



Figuur 5.19: Grafiek sensor 1

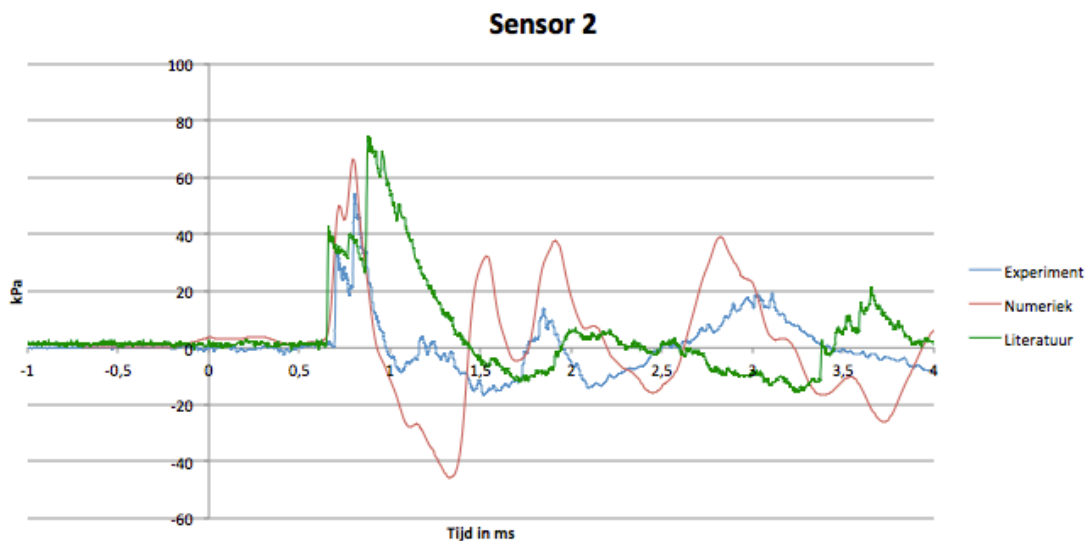
5.4.2 Sensor 2

Voor de vergelijkingen van sensor 2 is gekozen de resultaten van sensor 10 uit het literatuur onderzoek weer te geven. De resultaten van het experimenteel onderzoek liggen voor sensor 2 lager dan die van het numerieke onderzoek die daarop weer lager zijn dan de resultaten van het literatuur onderzoek, in tabel 5.9 weergegeven. Dit kan komen doordat hier sprake is van een reflecterende piekoverdruk die kwetsbaarder is voor kleine veranderingen dan een invallende piekoverdruk. Dit kan onder andere te maken hebben met het type materiaal. De impuls van het experimentele en het numerieke onderzoek in vergelijking met het literatuur onderzoek verschilt ongeveer evenveel als de piekoverdrukken die worden gemeten. Naast het verschil van waarde wijst dit weer op een goede toegepaste schaling binnen het model.

Piekoverdruk	Experimenteel	Numeriek	Literatuur
Piekoverdruk	55,3 kPa	66,5 kPa	74,7 kPa
Impuls	7,1 kPa.ms	8,2 kPa.ms	33,2 kPa.ms
Geschaalde Impuls (I_{scaled})	51,8 kPa.ms/kg ^{1/3}	59,8 kPa.ms/kg ^{1/3}	81,1 kPa.ms/kg ^{1/3}
Gemiddelde Piekoverdruk	65,5 kPa	Gemiddelde I_{scaled}	64,2 kPa.ms/kg ^{1/3}
StDev	9,7	StDev	15,1

Tabel 5.9: Vergelijking Sensor 2

Figuur 5.20 laat de drukprofielen van de verschillende onderzoeken zien. In elke grafiek komt de reflecterende piek voor als gevolg van de schokgolf die in de hoek weerkaatst. In de resultaten van het literatuur onderzoek vindt veel minder ruis plaats dan bij sensor 1. Een mogelijke verklaring voor dit feit is, dat deze sensor verder weg is geplaatst van de detonatie en deze sensor geen trillingen via het aluminium ondervindt.



Figuur 5.20: grafiek sensor 2

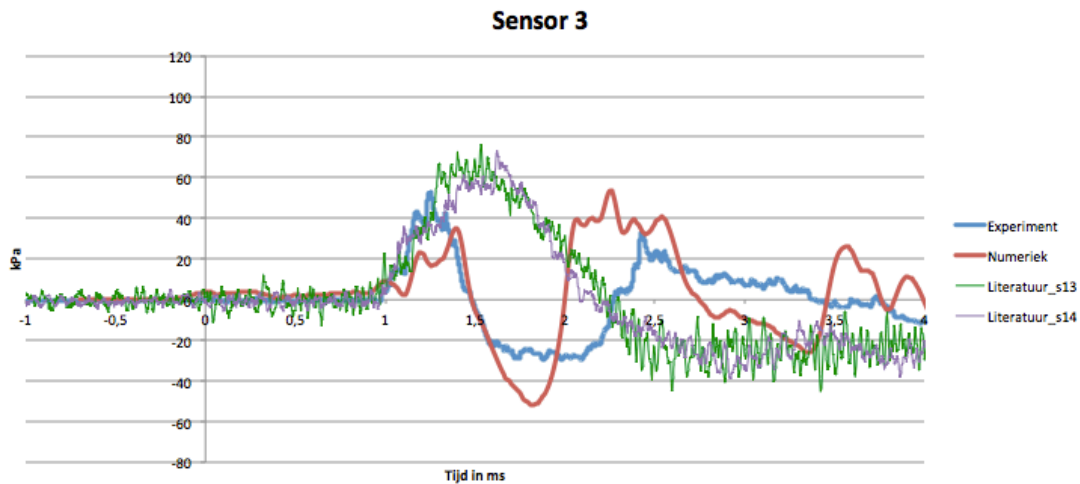
5.4.3 Sensor 3

Voor de vergelijking van sensor 3 is gebruik gemaakt van Sensor 13 en 14 uit het literatuur onderzoek. De piekoverdrukken en impulsen van het experimenteel onderzoek en het numerieke onderzoek komen goed overeen zoals is weergegeven in tabel 5.10.

Piekoverdruk	Experimenteel	Numeriek	Literatuur sensor 13	Literatuur sensor 14
Piekoverdruk	53,9 kPa	53,5 kPa	77,7 kPa	73,5 kPa
Impuls	12,9 kPa.ms	8,9 kPa.ms	63,5 kPa.ms	40,4 kPa.ms
Geschaalde Impuls (I_{scaled})	94,1 kPa.ms/kg ^{1/3}	64,9 kPa.ms/kg ^{1/3}	155,2 kPa.ms	98,7 kPa.ms/kg ^{1/3}
Gemiddelde Piekoverdruk	64,7 kPa	Gemiddelde	103,2	
StDev	12,8	I_{scaled} StDev	kPa.ms/kg ^{1/3} 37,7	

Tabel 5.10: Piekoverdruk en impuls sensor 3

Sensor 3 komt in alle drie de onderzoeken voor en bevindt zich in de bodem plaat tussen de achterwand en de achterkant van het gebouw. In figuur 5.21 is het drukprofiel van alle drie de onderzoeken weergegeven. Het drukprofiel verschilt hier nogal in alle drie de onderzoeken. De langzame afname van de sensoren 13 en 14 uit het literatuur onderzoek is te wijten aan de schaalwetten die uitgelegd staan in paragraaf 2.1.7.



Figuur 5.21: grafiek sensor 3

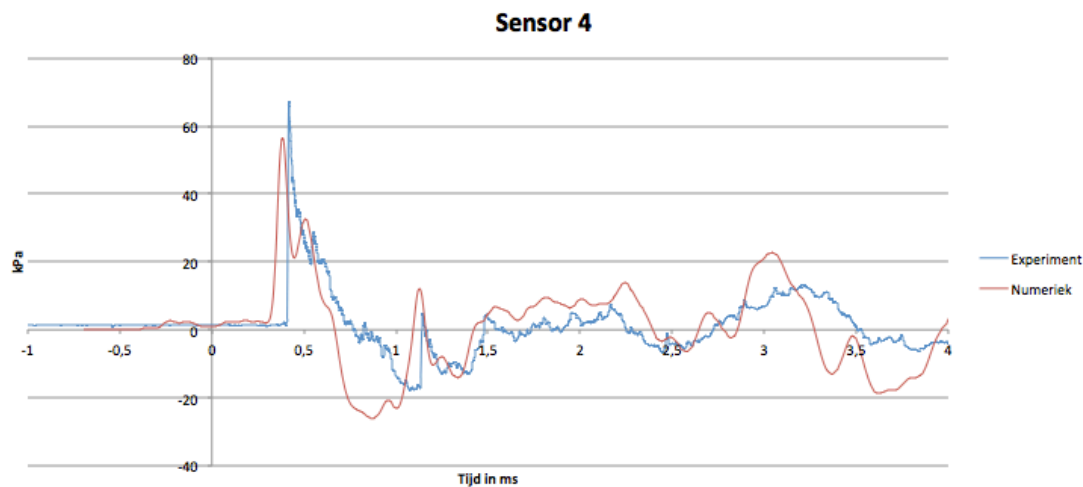
5.4.4 Sensor 4

In tabel 5.11 zijn de piekoverdrukken en impulsen van sensor 4 weergegeven. In dit onderzoek wordt alleen het numerieke onderzoek met het experimentele onderzoek vergeleken. Het literatuuronderzoek geeft geen relevante sensor die als vergelijkingsmateriaal kan dienen. De waarden in de tabel geven de piekoverdrukken weer die in de corridor terecht komt.

Piekoverdruk	Experimenteel	Numeriek	
Piekoverdruk	64,6 kPa	56,4 kPa	
Impuls	6,9 kPa.ms	5,6 kPa.ms	
Geschaalde Impuls (I_{scaled})	50,3 kPa.ms/kg ^{1/3}	40,8 kPa.ms/kg ^{1/3}	
Gemiddelde Piekoverdruk	60,5 kPa	Gemiddelde	45,6
StDev	5,8	I_{scaled}	kPa.ms/kg ^{1/3}
		StDev	6,7

Tabel 5.11: Piekoverdruk en impuls sensor 4

In figuur 5.22 zijn de verschillende drukprofielen weergegeven. De piekoverdrukken liggen dicht bij elkaar.



Figuur 5.22: grafiek sensor 4

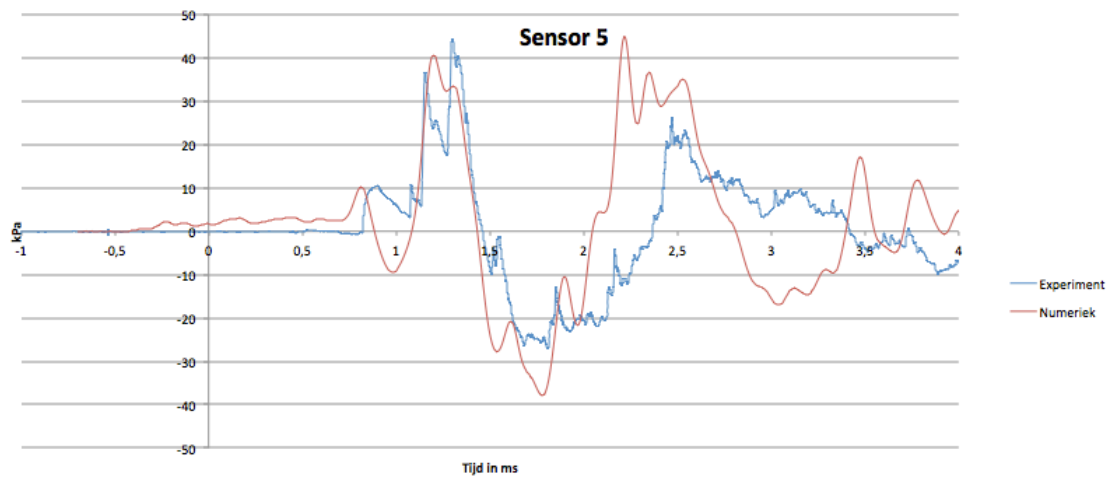
5.4.5 Sensor 5

Sensor 5 is niet in de constructie van Ripley geïntegreerd, daarom wordt er ook hier alleen een vergelijking gemaakt tussen de experimentele studie en de numerieke studie. In figuur 5.21 zijn de drukprofielen van de twee onderzoeken uiteengezet.

Resultaten	Experimenteel	Numeriek	
Piekoverdruk	42,8 kPa	44,9 kPa	
Impuls	10,1 kPa.ms	6,6 kPa.ms	
Geschaalde Impuls (I_{scaled})	73,6 kPa.ms/kg ^{1/3}	48,1 kPa.ms/kg ^{1/3}	
Gemiddelde Piekoverdruk	87,7 kPa	Gemiddelde	60,9
StDev	1,5	I_{scaled}	kPa.ms/kg ^{1/3}
		StDev	18,0

Tabel 5.12: Piekoverdruk en impuls sensor 5

Wat opvalt aan figuur 5.23 is de grote negatieve fase, deze komt zowel in de experimentele als in het numerieke onderzoek voor. Ook de 2^e piek die bij de numerieke simulatie zelfs hoger ligt dan de eerste piek is interessant.



Figuur 5.23: grafiek sensor 5

6. Conclusie en aanbevelingen

In dit hoofdstuk worden er conclusies uit het onderzoek getrokken en op basis hiervan verschillende aanbevelingen gedaan. De deelvragen en hoofdvragen die in hoofdstuk 1 zijn opgesteld, komen in dit hoofdstuk weer terug om beantwoord te worden. Tot slot worden er in dit hoofdstuk een aantal meetfouten besproken en de gevolgen hiervan.

6.1 Conclusie

Allereerst zullen de deelvragen worden beantwoord. Op basis van deze antwoorden kan de hoofdvraag van dit onderzoek worden beantwoord.

6.1.1 Deelvragen

1) Hoe ga ik experimenteel onderzoek doen op kleine schaal?

a) Op welke manier kan er een modulair systeem op kleine schaal worden gerealiseerd?

i) Hoe kunnen detonaties in dit model worden gerealiseerd?

Voordat het schaalmodel is gebouwd, zijn er een aantal manieren bedacht om een model te construeren en deze modulair te maken. Door de ervaring op de KMS in Brussel werd er al snel gekozen om met Lego blokken te werken. Dit materiaal is ideaal voor proeven op kleine schaal en er zijn allerlei verschillende constructies mee te bouwen. Door de proeven die zijn gedaan in hoofdstuk 3 bleek het materiaal geschikt om verder mee te modeleren. Het geheel moet wel op een houten MDF plaat worden geplaatst om goede resultaten te krijgen zonder ruis.

ii) Hoe ga ik schaling toepassen binnen het model?

Omdat de Lego blokjes een standaard afmeting hebben is er gekozen om realistische afmetingen te gebruiken, die rekening houden met de grootte van de blokken. Het model van Ripley is 3x verkleind om vervolgens op deze schaal de constructie te bouwen.

De lading kan niet zomaar worden teruggeschaald met een factor, dit moet worden gedaan met de formule voor “geschaalde afstand”. Nadat dit is gedaan komt men op een benodigd lading gewicht van 1,29 gram TNT equivalent. Door een aantal testen uit te voeren wordt er uiteindelijk gekozen voor lading van een slagpijpje waaraan een kleine hoeveelheid C4 wordt toegevoegd.

2) Hoe kan deze schokgolf in beeld worden gebracht en op welke manier?

a) Op welke manier kunnen de resultaten in kaart worden gebracht?

i) Hoe kunnen de resultaten van de Piekoverdruk uiteen worden gezet?

Door gebruik van druksensoren, worden er een aantal datareeksen verkregen. Deze datareeksen worden geanalyseerd en verwerkt. Met behulp van software wordt hieruit de piekoverdruk en het bijkomstig drukprofiel verkregen.

ii) Hoe kunnen de resultaten van de Impuls uiteen worden gezet?

Ook de Impuls kan worden berekend met behulp van software. Samen met de piekoverdruk, vormt de impuls goed vergelijkingsmateriaal met het numeriek onderzoek en het literatuur onderzoek.

b) Hoe kunnen deze resultaten vergeleken worden?**i) Wat zijn de vergelijkingen van de resultaten met numerieke simulatie?**

In de resultaten van het numerieke en het experimentele onderzoek is veel vergelijking in piekoverdruk, impuls en reflectie. De capaciteit van de computer was wel beperkt waardoor er geen scherpe drukprofielen zijn verkregen, maar vloeiende grafieken. Dit wordt niet gezien als beperking in de vergelijking van de resultaten. Grote overeenkomsten worden gevonden doordat er vergelijkbare input waarden zijn gebruikt in beide onderzoeken. Hieruit kan opnieuw worden geconcludeerd dat Lego een geschikt materiaal is om configuraties van een stedelijke omgeving na te bootsen en hierin metingen te verrichten met explosies.

ii) Wat zijn de vergelijkingen van de resultaten met bestaande Literatuur?

De vergelijking van het experiment met het onderzoek uit de literatuur is ingewikkelder omdat er hier gebruik is gemaakt van verschillende input waarden. De materialen uit beide onderzoeken zijn verschillend, de schaal van de constructie is anders, de lading wordt anders afgezet, in het literatuur onderzoek wordt er gebruik gemaakt van een sferische detonatie, in dit onderzoek van een hemisferische detonatie en het ladinggewicht is verschillend in beide onderzoeken. Toch is er goed geschaald met zowel de constructie als de lading. Dit leidt toch tot een vergelijkbare piekoverdruk in de sensoren 1 en 2. Ook de beelden van reflectie in sensor 2 in de hoek van de constructie is goed te zien. Tot slot heeft de vergelijking van de impuls bijna dezelfde vergelijkingsfactor als de vergelijkingsfactor van de piekoverdruk.

6.1.2 Hoofdvraag

Na beantwoording van de verschillende deelvragen, kan de hoofdvraag worden beantwoord. Deze hoofdvraag luidt als volgt:

Hoe plant een schokgolf zich voort in een bepaalde configuratie van een Urban Environment en op welke manier kan dit worden onderzocht?

Om hierop een duidelijk antwoord te geven wordt de hoofdvraag in 2 delen ontleedt. Het eerste deel bestaat uit op welke manier deze schokgolf voortplanting kan worden onderzocht. Er zullen waarschijnlijk meerdere methodes zijn om dit te onderzoeken, maar een zeer geschikte methode is in dit onderzoek gevonden. Door het gebruik van Lego wordt er tijd en geld bespaard. Lego is een geschikt materiaal om druksensoren in te integreren en de gehele constructie geeft goede resultaten betreffende schokgolven.

Het tweede deel van de beantwoording van de hoofdvraag luidt: hoe plant een schokgolf zich voort binnen een bepaalde configuratie. In dit onderzoek is er gekozen voor een bepaalde configuratie die bestaat uit een gebouw en een wand. Zodra de lading wordt afgezet verplaatst de schokgolf zich richting deze constructies. Hier reflecteert een deel van de schokgolf tegen het gebouw en een deel zal zich over het gebouw heen verplaatsen. Tevens zal de druk via de corridor de nagebootste straat binnen. Hier zal een wat reflectie plaatsvinden

door de insluiting van de schokgolf, waardoor de drukgolf minder sterk wordt afgezwakt. Als de drukgolf uiteindelijk bij de hoek van de straat aankomt zal daar een reflectie plaatsvinden, waarbij druk zich verder de corridor in zal verplaatsen in de tussenruimte achter het gebouw. De druk die zich over het gebouw heen verplaatst, komt ook achter het gebouw in de tussenruimte terecht. Wat hier plaats vindt is een zeer complex gebeuren en is bij de verschillende onderzoeken die hier worden vergeleken verschillend. Hier worden dan ook geen conclusies aan verbonden.

6.2 Meetfouten en onnauwkeurigheden

In dit onderzoek zitten een aantal meetfouten en onnauwkeurigheden. Hieronder wordt vermeld wat dit is en wordt er een voorspelling gedaan in hoeverre dit invloed zal hebben op de uiteindelijke resultaten:

- In hoofdstuk 3.2 is er een fout gemaakt met het meten van de afstand tussen druksensor 1 en het detonatiepunt. Deze zelfde fout is gemaakt tussen druksensor 2 en het punt waar de lading wordt afgezet. Deze meetfout werkt door in het TNT equivalent van de opstelling waardoor het TNT equivalent neerkomt op 0,164 gram. In het verdere onderzoek is er doorgerekend met 0,135 gram. De afwijking bedraagt hier 17,7% van het benodigde ladinggewicht wat toch een behoorlijke marge is. Echter heeft dit vrijwel geen negatieve gevolgen in het verloop van het onderzoek. Het slagpijpje inclusief de C4 resulteerde in een TNT equivalent lager dan 1,29 gram. Als men 0,164 gram had gebruikt was men op een nog lager TNT equivalent uitgekomen, aangezien er dan nog minder C4 moest worden toegevoegd aan de opstelling;
- Ook de gereflecteerde piekoverdruk uit hoofdstuk 3 van de eerste 12 testen is niet meegenomen in de berekening van het uiteindelijke TNT equivalent waardoor deze dus hoger uitvalt dan waar mee is verder gerekend.
- De terugschaling van het model van Ripley is niet exact 3. Door de afmetingen van de Lego blokjes kunnen deze afmetingen niet precies worden behaald. Geprobeerd is om de factor 3 te benaderen. De grootste afwijking die in deze berekening zit is een terugschaling met een factor 2,38 in plaats van 3. Deze waarde heeft een afwijking van 20,8% ten opzichte van de afmeting die zou moeten worden gebruikt, wat toch een behoorlijke marge is. Of dit een grote invloed heeft gehad op de meetresultaten, kan niet worden geconcludeerd. Men zou hiervoor het model nog een keer exact moeten bouwen met de juiste schaalfactor.
- Door capaciteitsbeperking van de computer is er geen nauwkeurige numerieke simulatie uitgevoerd. De scherpe drukprofielen die kenmerkend zijn voor een piekoverdruk komen in de grafieken niet voor. Dit heeft een kleine invloed op het drukprofiel dat wordt verkregen.

6.3 Aanbevelingen

Door dit onderzoek kunnen er verschillende aanbevelingen en verbeteringen worden gedaan, welke hieronder worden opgesomd.

- In de toekomst moet er onderzoek worden gedaan naar de hemisferische bolvorming van de opstelling van het slagpijpje. De lading van het slagpijpje is

voorzien van een focus en men moet onderzoeken op welke afstand dit leidt tot een volledige hemisferische bolvorming;

- De opstelling door het slagpijpje te integreren in een PVC omhulsel en vervolgens in een aluminium plaat, vormt een goede detonatiemethode. Ook door het toevoegen van C4 kan hier een goede en precieze terugschaling worden gerealiseerd. Als men in de toekomst gebruik maakt van schaalmodellen dan kan men deze detonatiemethode goed gebruiken ;
- Lego is een geschikt materiaal voor het bouwen van een constructie op schaal. Hierin kan zeer goed onderzoek worden gedaan naar explosies die interactie met bijvoorbeeld gebouwen ondergaan. Nut voor defensie kan hier bijvoorbeeld zijn, onderzoek naar drukverplaatsing binnen een bepaalde configuraties met containers. Hierbij kan men veel te weten komen over eventuele mortieraanslagen op compounds in uitzendgebieden;
- Om de geschiktheid van Lego verder te valideren, moet er worden gekozen voor een andere configuraties en met behulp van vergelijkend onderzoeksmateriaal het geheel te valideren;
- Aluminium is geen geschikt materiaal om druksensoren in te integreren, zoals in het literaire onderzoek ook wordt gevonden leidt dit tot zeer veel ruis in de druksensoren;.

Bibliografie

Walter, P.L. *Introduction to Air Blast Measurements - Part I*. New York: PCB group, 2004.

Verschuren, Piet. *Het ontwerpen van een onderzoek*. Den Haag: Lemma, 2007.

Absil, J.C.A.M. van Doormaal & L.H.J. *Consequence assesment of large bomb explosions in urban areas*. Lisse: Bedford & van Gelder, 2003.

Baker, W.E. *Explosion hazards and evaluation*. Elseviers scientific publishing company, 1983.

Balume, B. *Numerical and experimental study of the blast-wave path and pressure distribution in the case of a small scale subway explosion test*. Brussel: KMS, 2012.

Bourgois, R. *Constructions soumises à des sollicitations d'explosions*. Brussel: Koninklijke Militaire School, 1999.

Borgers, Ir. J. *Pyrotechniek en Beschermingsconstructies*. Breda: Nederlandse Defensie Academie, 2012.

Fairlie, Greg E. *Efficient analysis of high explosive air blast in complex urban geometries*. West Sussex: Century Dynamics Limited.

Lee, C.K.B. *Application of scaling to explosions in a model city*. Weidlinger Associates Inc, 2006.

Peugeot, Frederic. *TNT equivalency: misconceptions and reality*. Bruxelles, 2006.

Prins, V. *Explosies in metrostations*. Brussel: KMA, 2012.

Ripley, R.C. *small scale modeling of explosive blasts in urban scenarios*. Combustion Dynamic Groups, 2004.

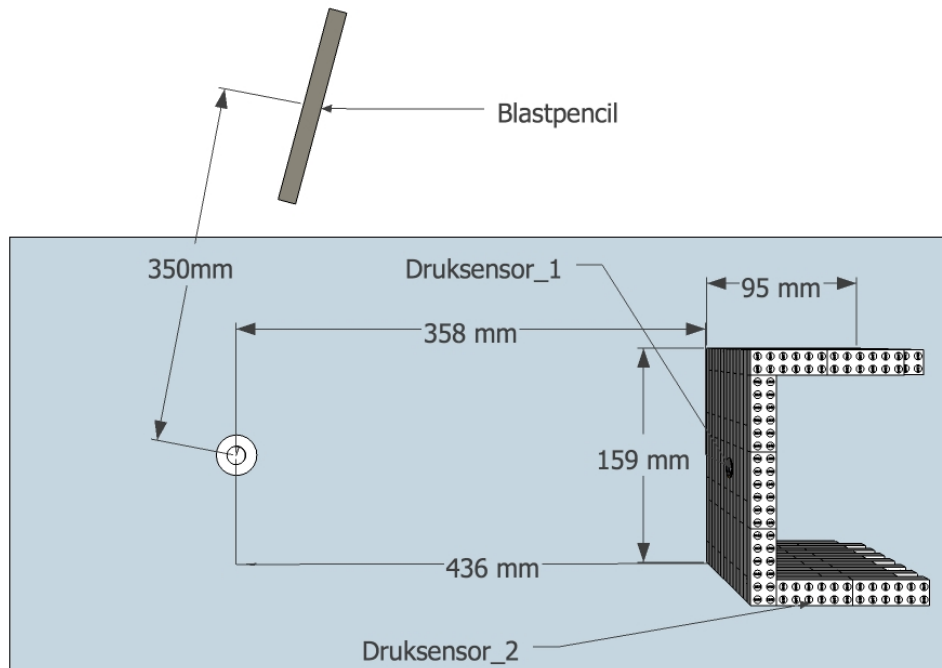
7 Appendices

Appendix A: Meetrapport TNT equivalentie;

Appendix B: Computersoftware ConWep;

Appendix A: meetrapport TNT equivalentie

In deze bijlage worden alle resultaten van hoofdstuk 3 uiteengezet, om toch een totaal beeld te geven van alle verkregen resultaten. De belangrijkste resultaten staan in het hoofdstuk zelf. Ter verduidelijking wordt de proefopstelling nogmaals toegelicht.



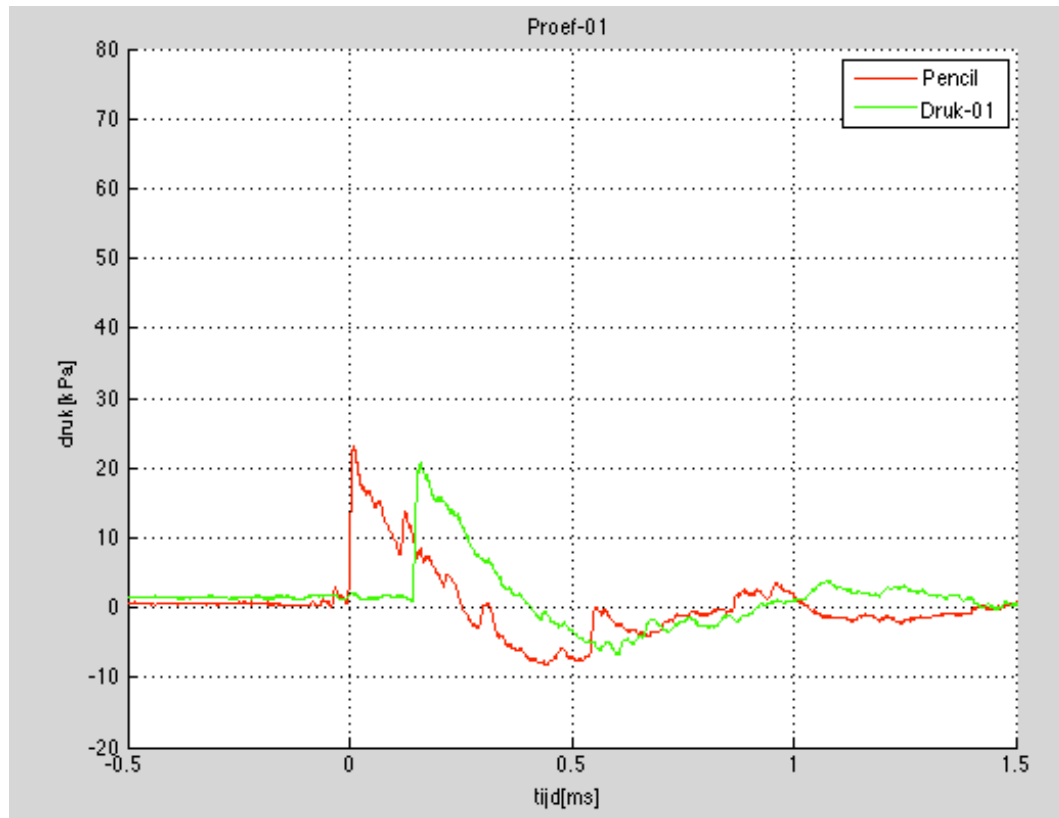
Figuur A.1: Proefopstelling

De lading die hier is gebruikt, bedraagt 1 slagpijpje. In totaal zijn er 12 testen gedaan. De eerste 6 testen zonder tape voor de tussenruimtes en test 7 t/m 12 is gedaan met tape voor de tussenruimtes. De afstand van druksensor 1 naar het detonatiepunt is 350 mm. De afstand van het detonatiepunt naar druksensor 2 bedraagt 436 mm. Tot slot is de afstand naar de blastpencil 350 mm.

A.1 Grafieken proef 1 t/m 12 slagpijpje

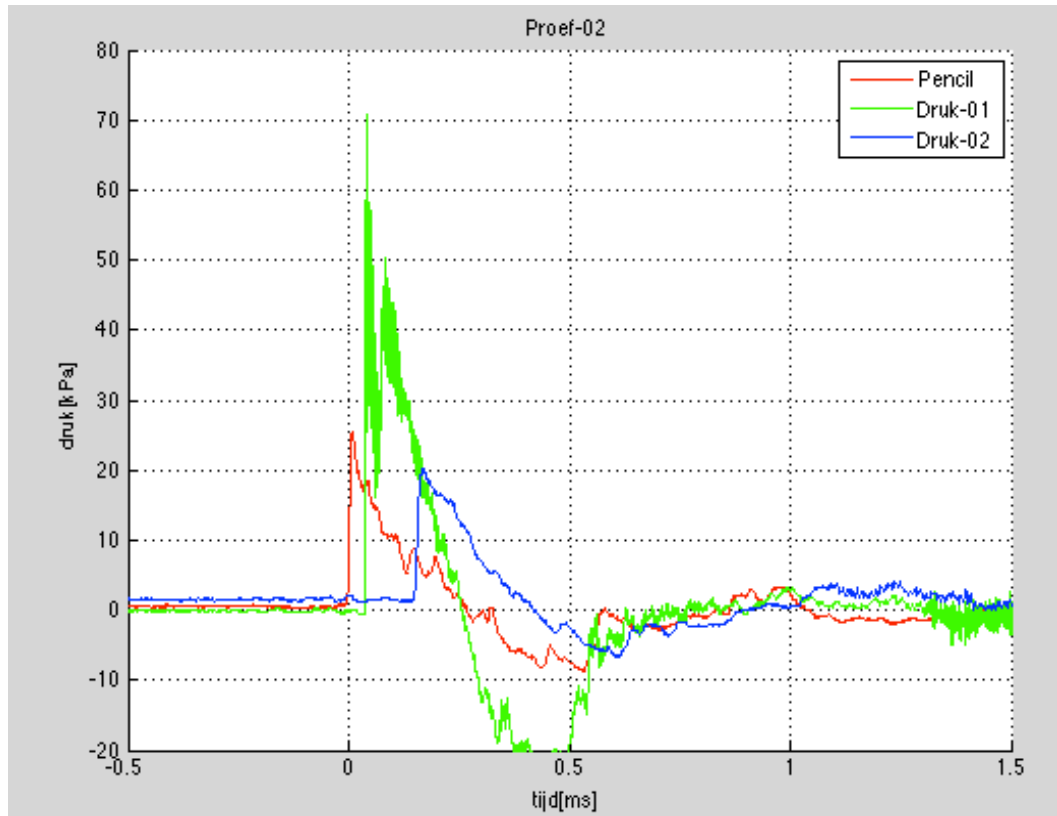
Deze paragraaf geeft alle druk/tijd grafieken weer van de experimenten waarbij het TNT equivalent van het slagpijpje is bepaald.

A.1.1 Proef 1



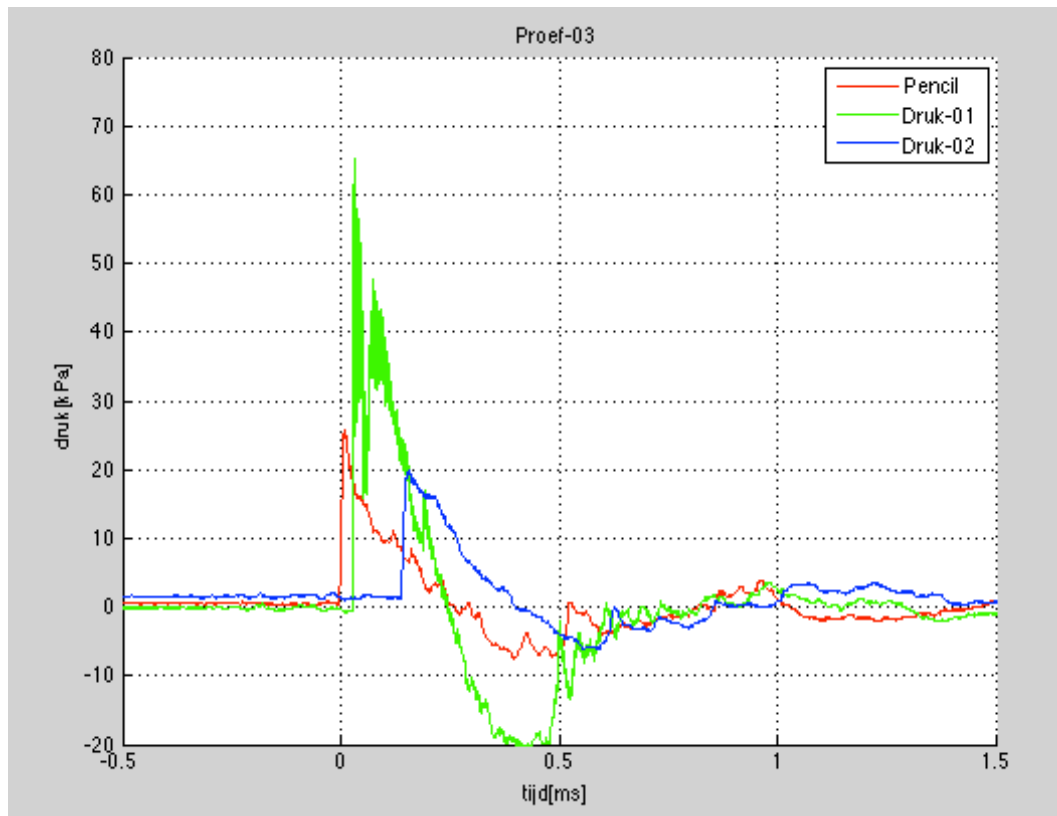
Figuur A.1: Proef_01

A.1.2 Proef 2



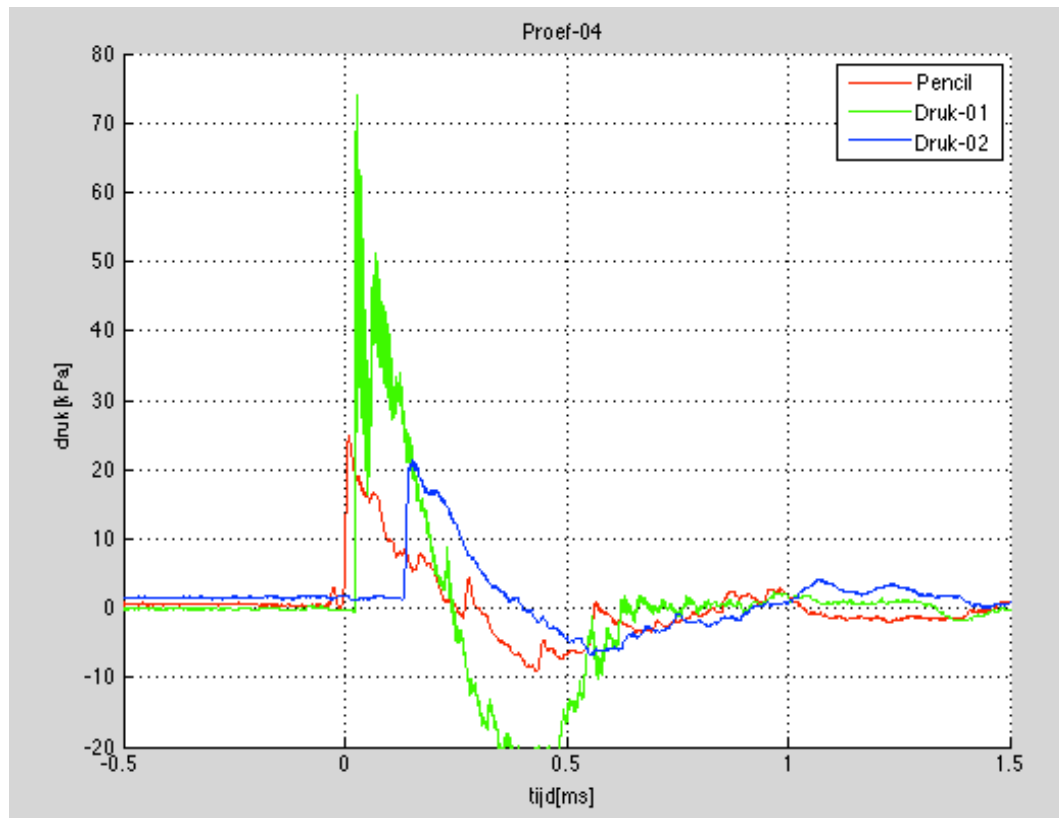
Figuur A.2: Proef_02

A.1.3 Proef 3



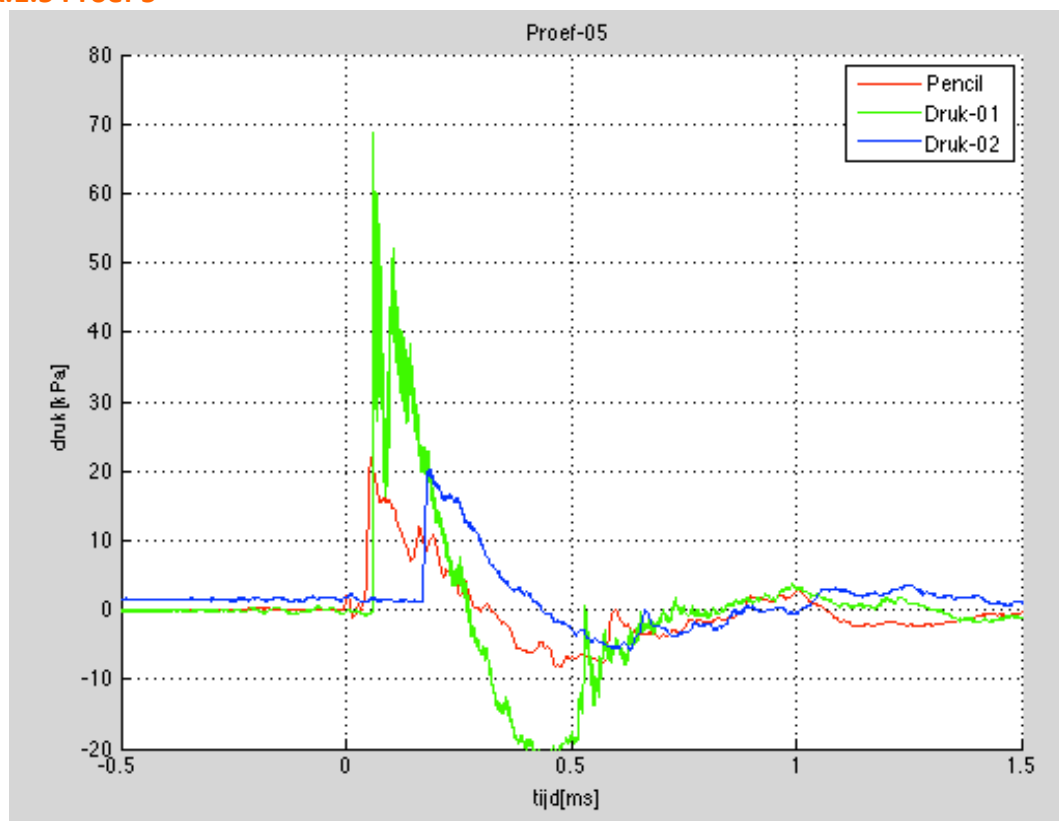
Figuur A.3: Proef_03

A.1.4 Proef 4



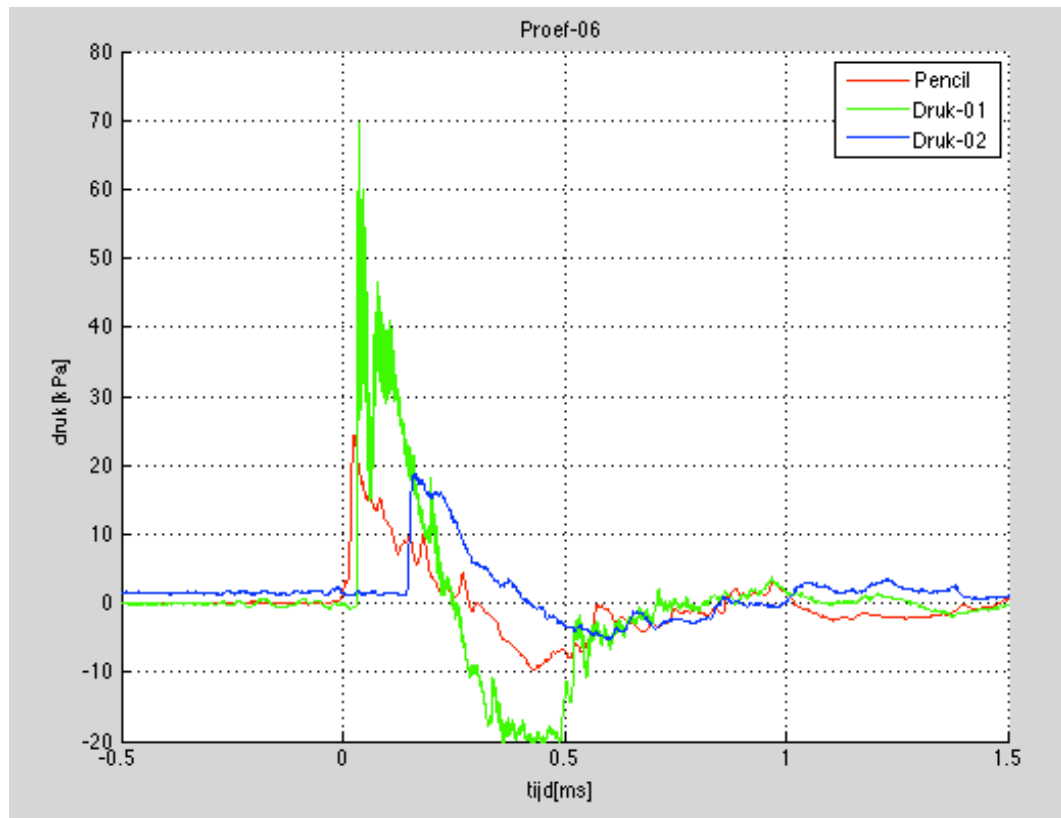
Figuur A.4: Proef_04

A.1.5 Proef 5



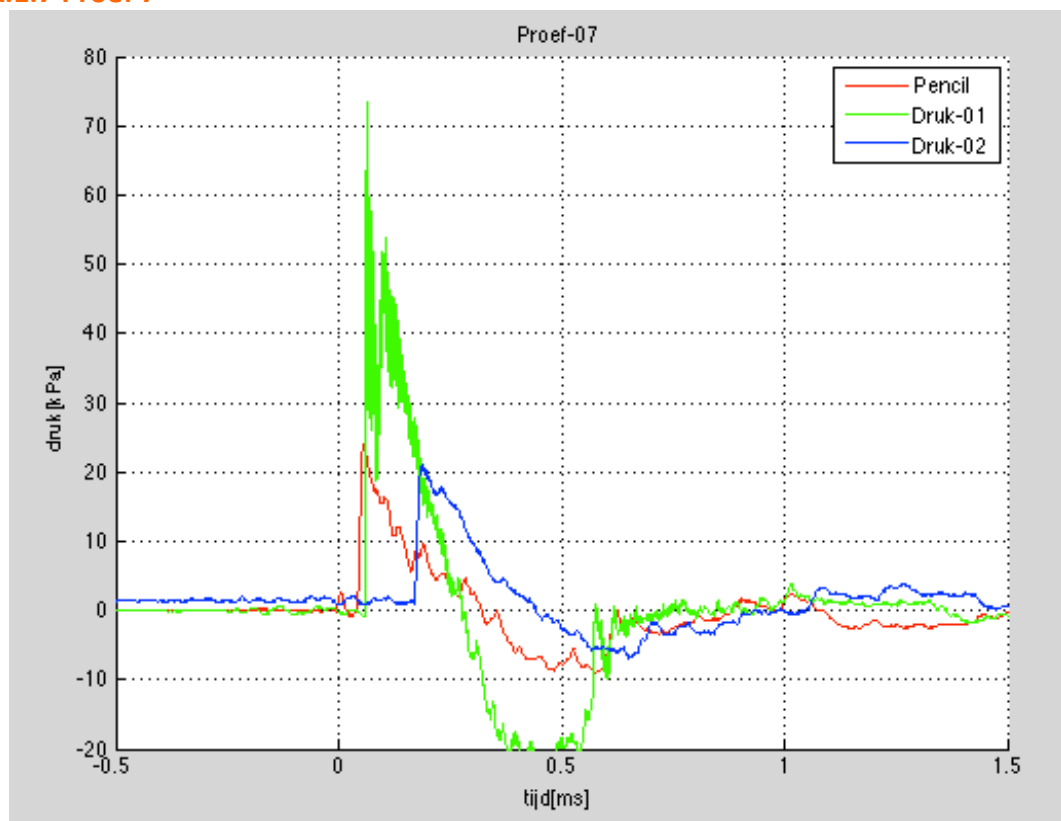
Figuur A.5: Proef_05

A.1.6 Proef 6



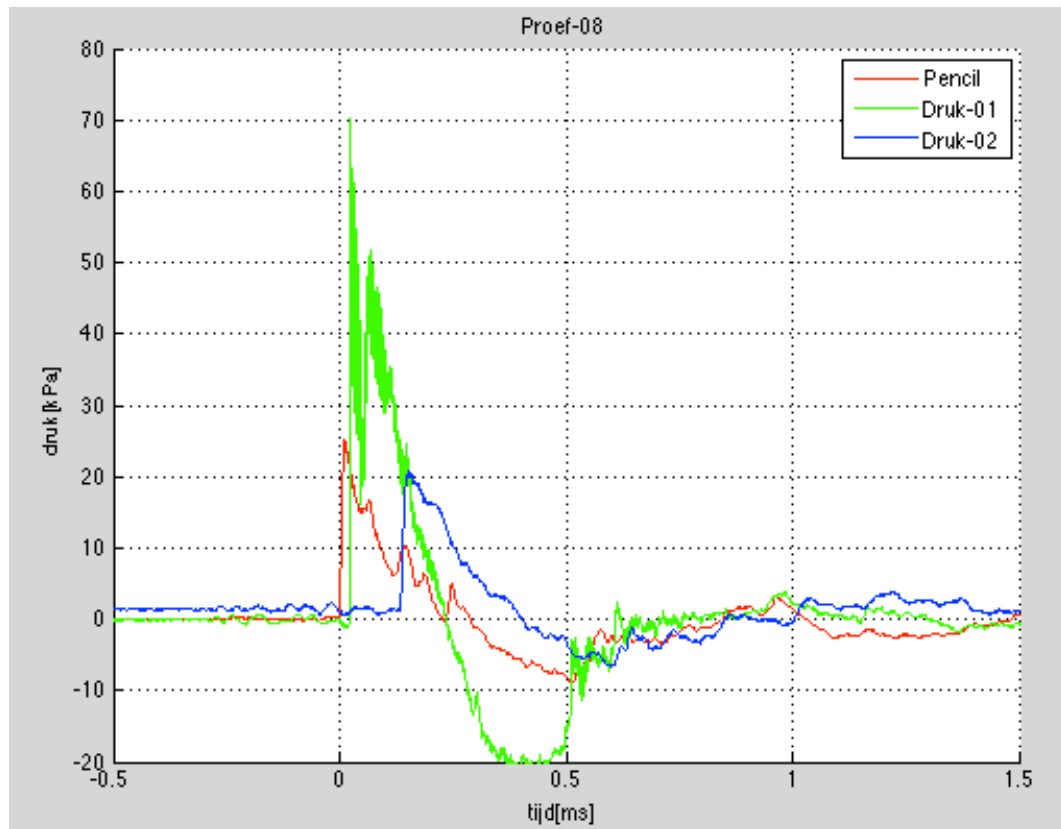
Figuur A.6: Proef_06

A.1.7 Proef 7



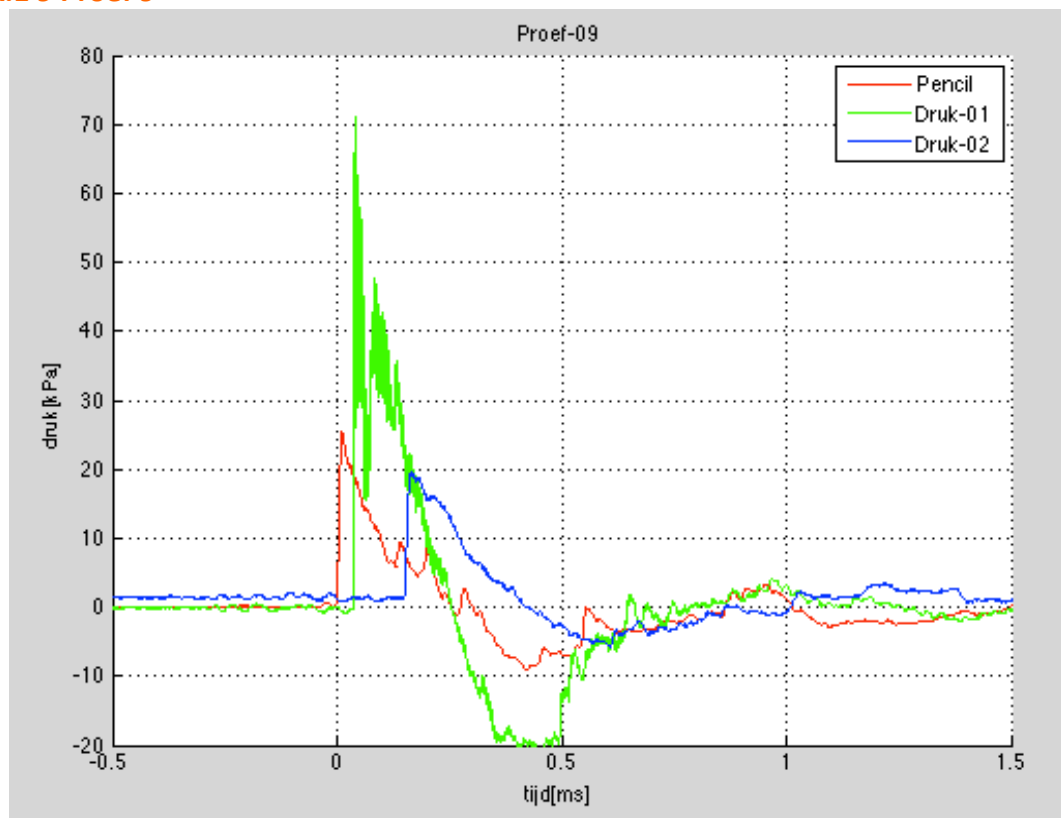
Figuur A.7: Proef_07

A.1.8 Proef 8



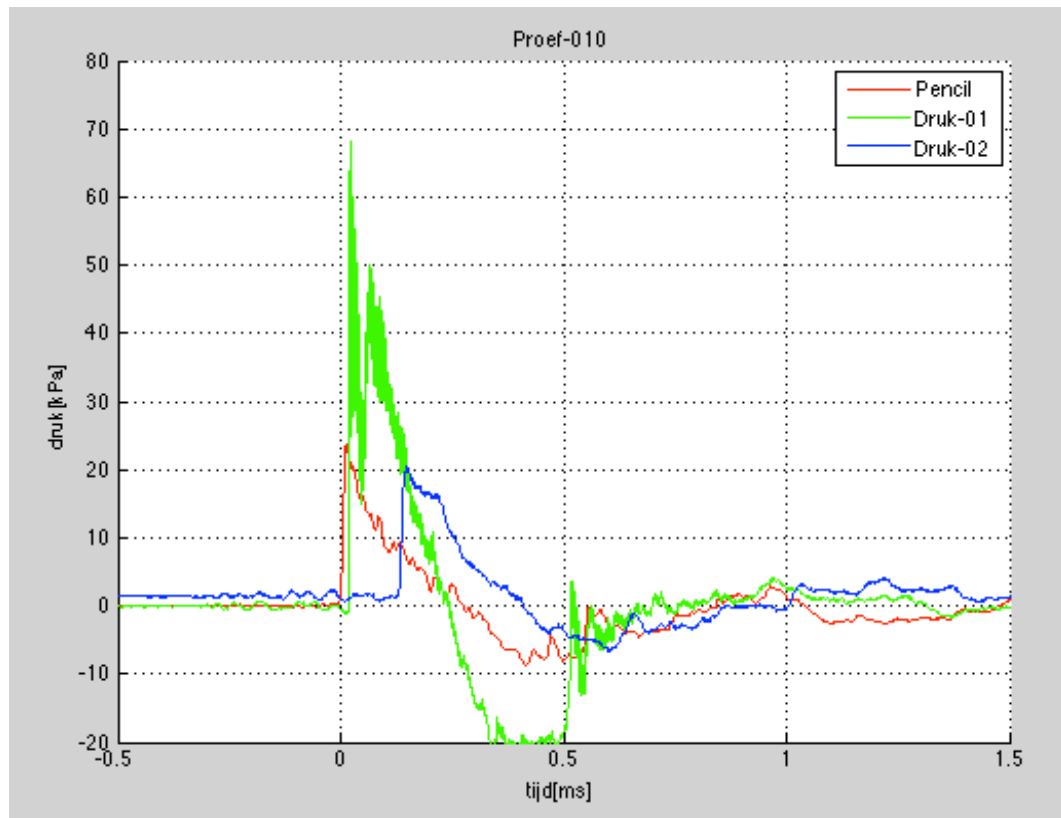
Figuur A.8: Proef_08

A.1.9 Proef 9



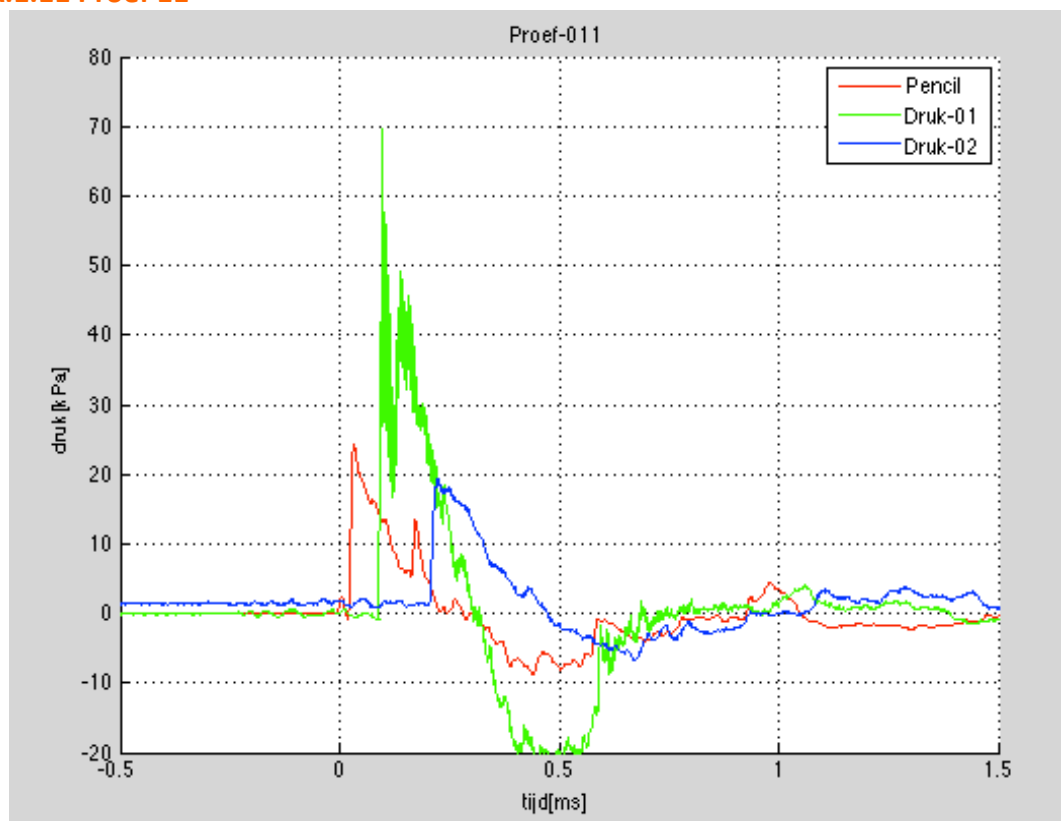
Figuur A.9: Proef_09

A.1.10 Proef 10



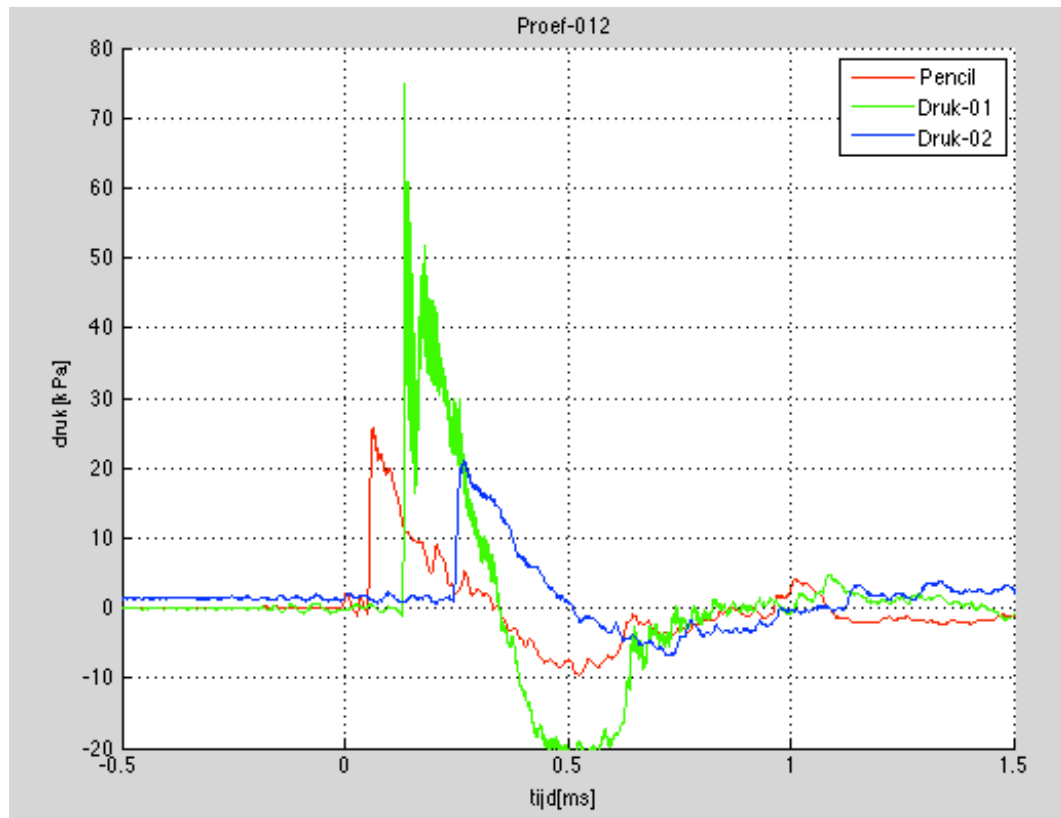
Figuur A.10: Proef_010

A.1.11 Proef 11



Figuur A.11: Proef_011

A.1.12 Proef 12

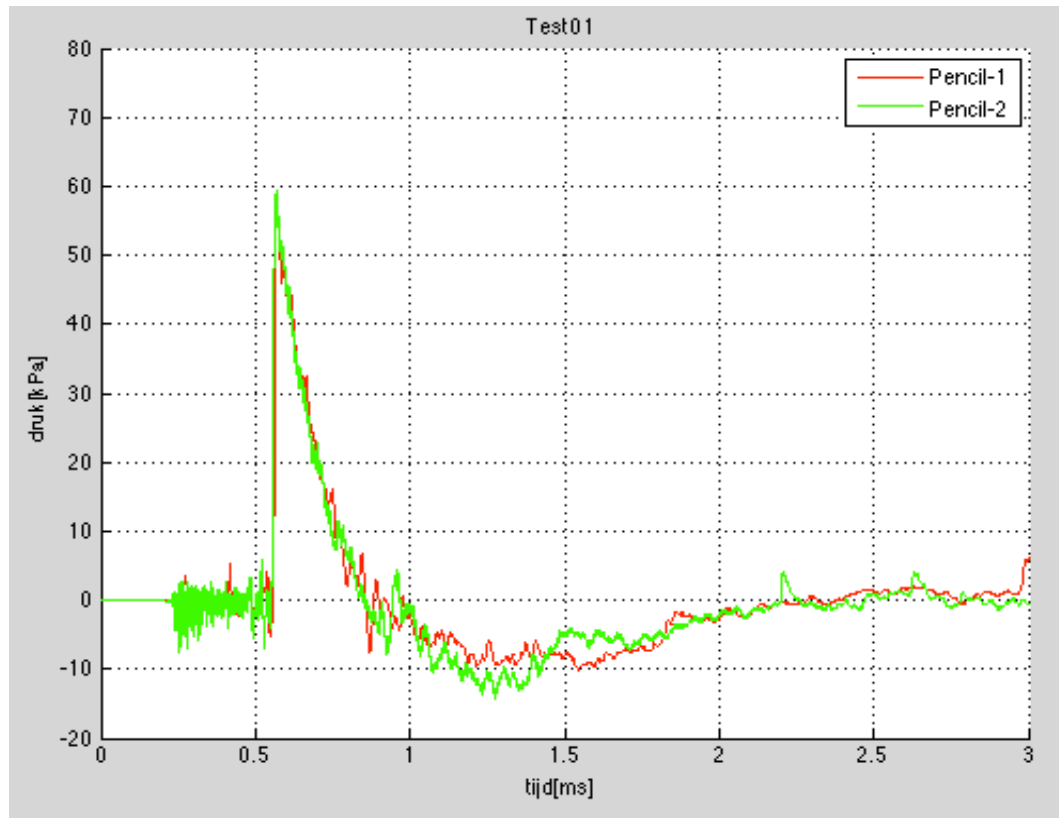


Figuur A.12: Proef_012

A.2 Resultaten C4 Test 1 t/m 4

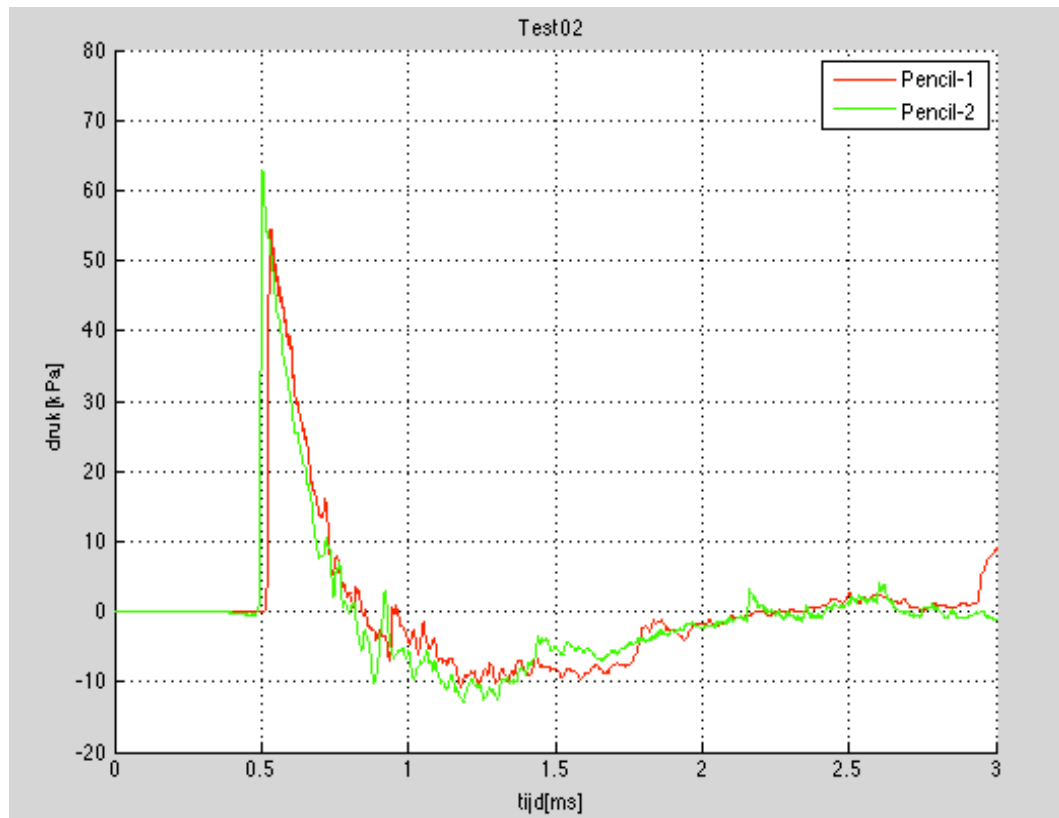
Hieronder worden de druk/tijd grafieken van de proeven van het TNT equivalent van het slagpijpje met toegevoegd C4.

A.2.1 Test 1



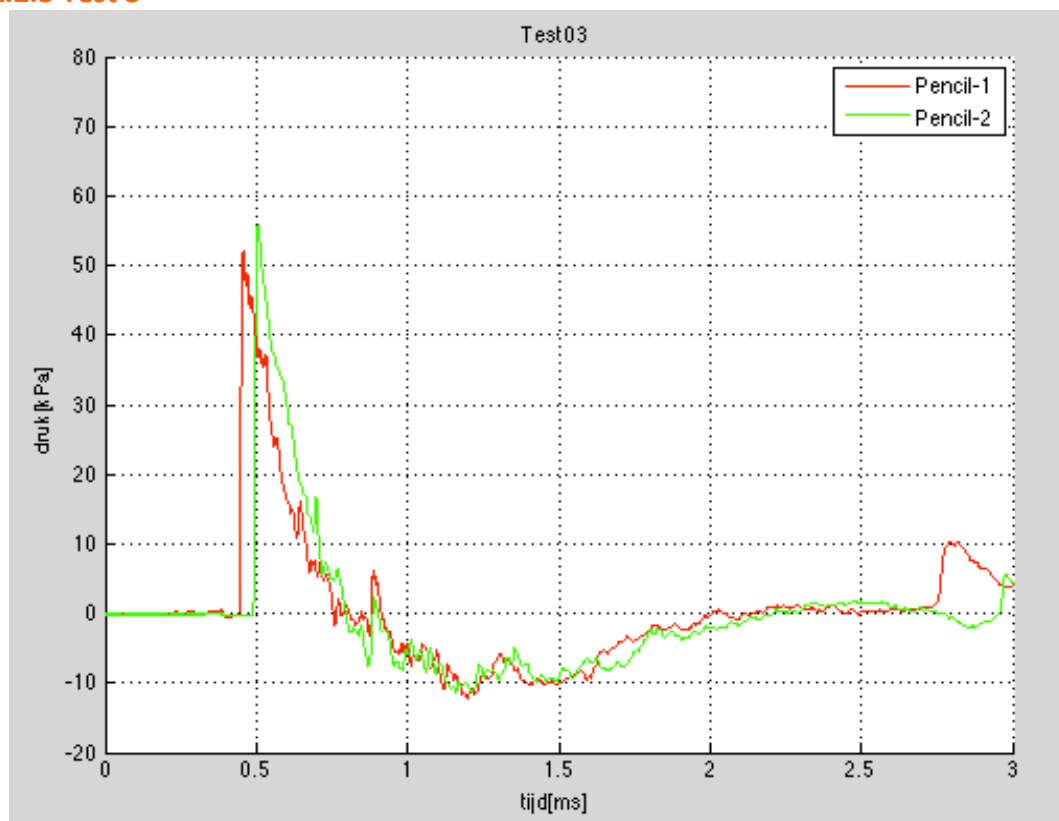
Figuur A.13: Test 1

A.2.2 Test 2



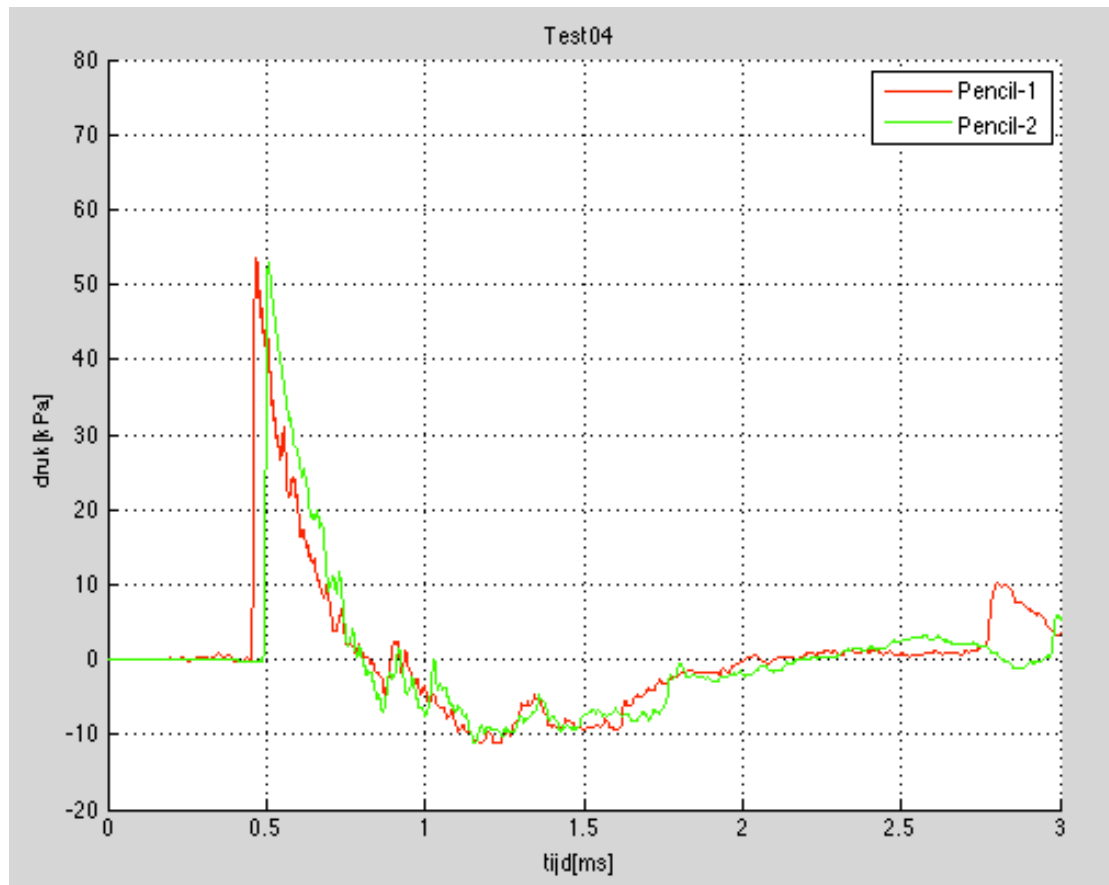
Figuur A.14: Test 2

A.2.3 Test 3



Figuur A.15: Test 3

A.2.4 Test 4



Figuur A.16: Test 4

Appendix B: Computersoftware ConWep

Dit hoofdstuk licht het programma ConWep toe. ConWep staat voor “Conventional Weapons effects calculations” en is een computerprogramma van het Amerikaanse Engineer Corps dat valt onder de US Army. Met behulp van dit programma zijn meerdere berekeningen in dit onderzoek gedaan. Zo kan er bij een detonatie, door de afstand en de piekoverdruk een ladinggewicht worden berekend. Deze manier van rekenen werkt alle kanten op, als men 2 factoren weet, dan kan de andere onbekende worden berekend. Deze waarden worden de inputwaarden genoemd, de waarden die ConWep berekent heten de outputwaarden.

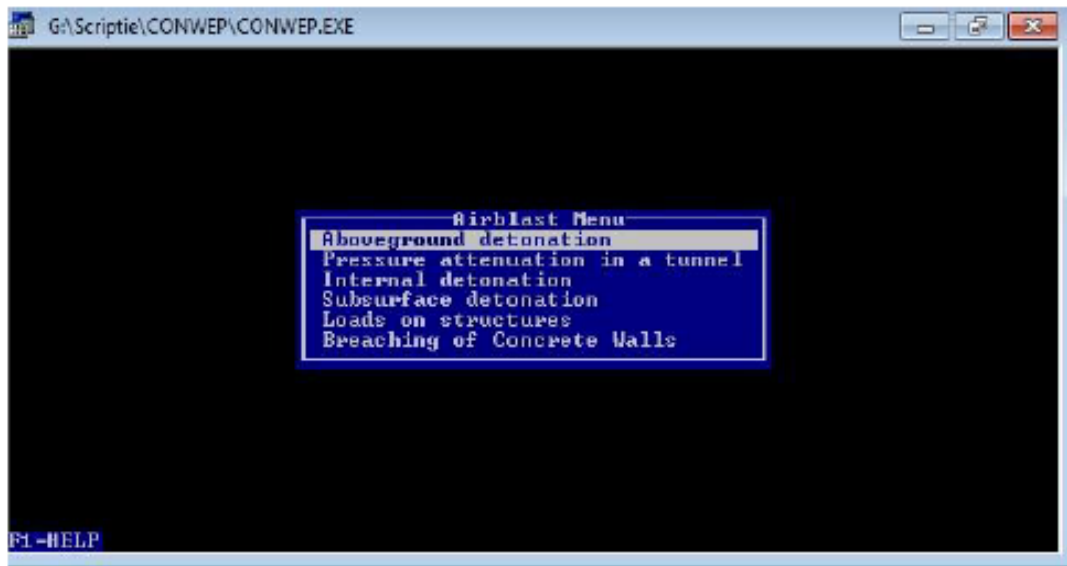
B.1 CONWEP

Als het programma wordt opgestart, krijgt men het scherm uit figuur B.1 te zien. Eerst moet het programma worden ingesteld op het metrisch stelsel.



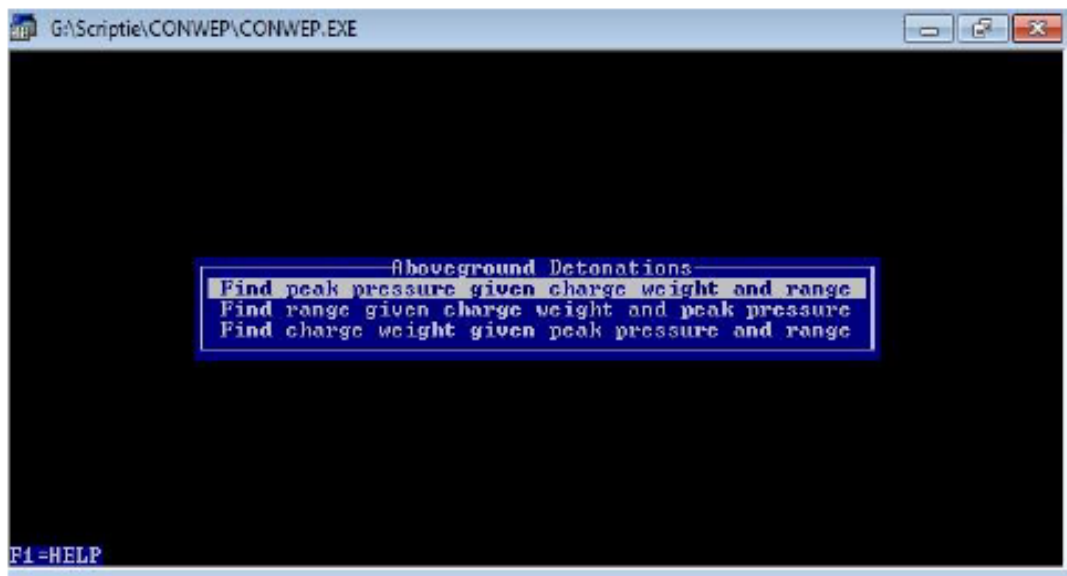
Figuur B.1: Instellen Metrisch stelsel

Nadat het metrische eenheidstelsel is geselecteerd, wordt er gekozen voor de optie “Airblast”. Figuur B.2 geeft het volgende keuze scherm weer.



Figuur B.2: Aboveground detonation

Van de verschillende opties wordt de "Aboveground detonation" geselecteerd. Nadat deze keuze is gemaakt komt men in een volgend menu waar de inputwaarden kunnen worden geselecteerd.



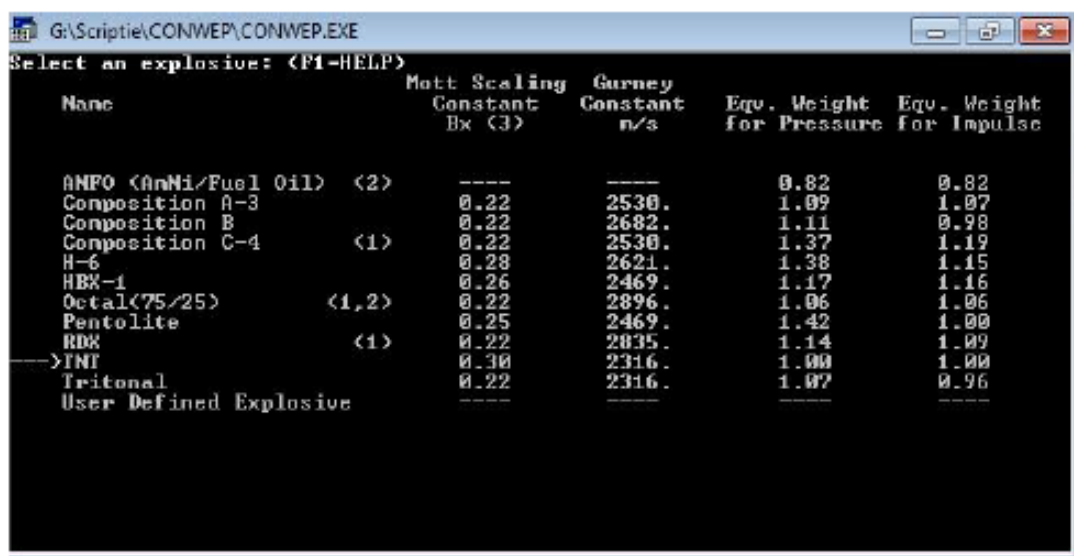
Figuur B.3: Aboveground Detonations menu

De afstand kan in dit programma berekend worden met behulp van de piekoverdruk en het ladinggewicht. Dit werkt ook andersom, zolang er maar 2 factoren bekend zijn, kan de derde factor worden berekend.



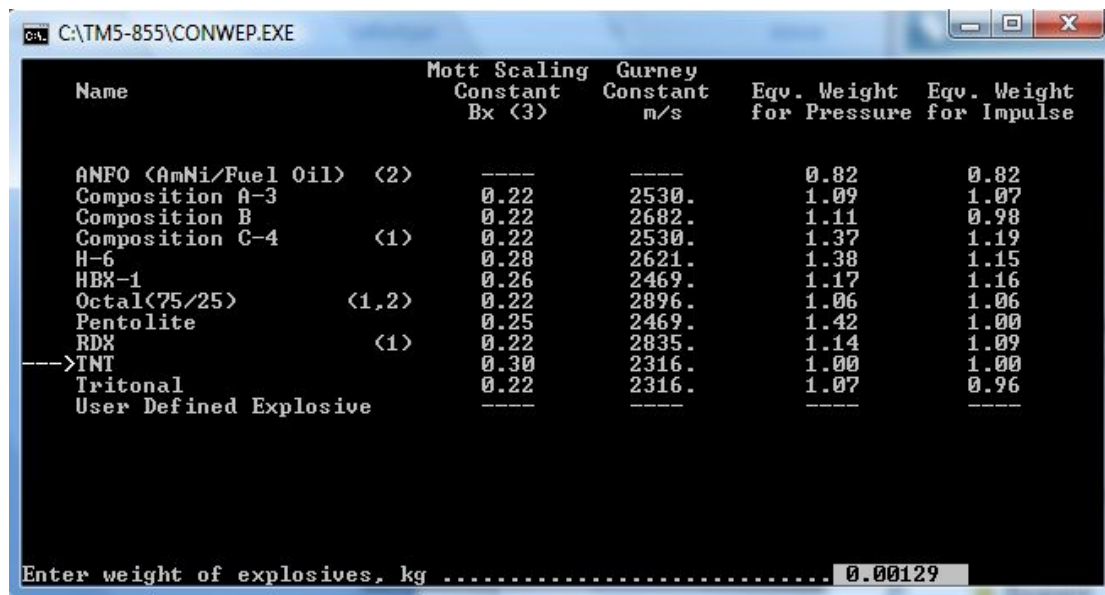
Figuur B.4: Bare HE

Vervolgens kiest men voor het type wapen, in het geval van dit onderzoek is dat “normale High explosive”, in ConWep “Bare HE”. Na deze keuze moet het explosief verder worden gespecificeerd. In figuur B.5 wordt een keuze weergegeven van alle typen “High explosives”.

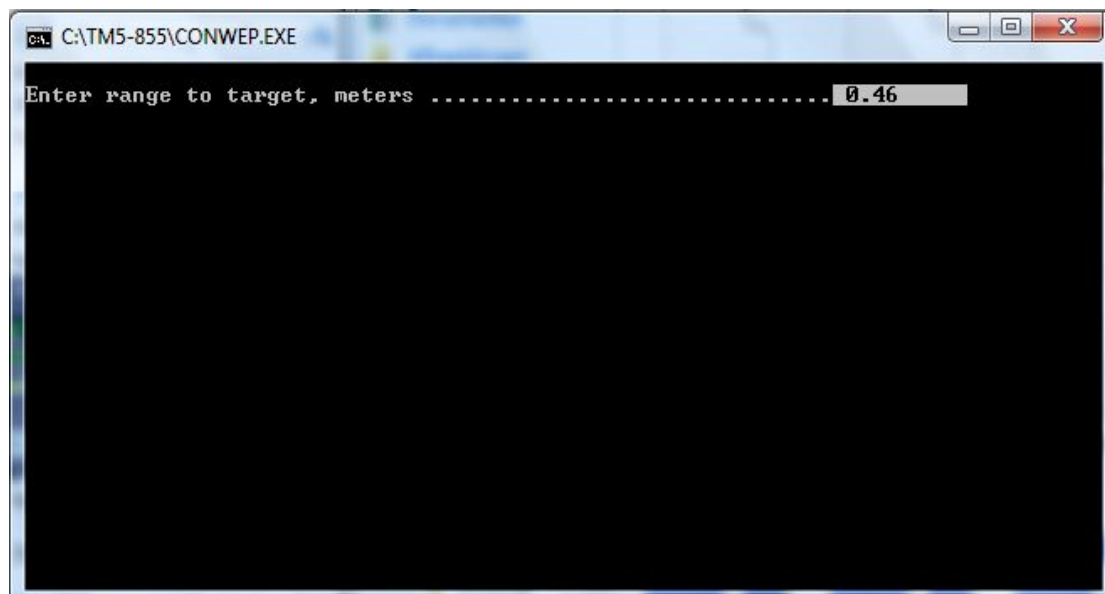


Figuur B.5: Soorten explosieven

Zoals al in hoofdstuk 3 al is verteld, wordt er gerekend met TNT equivalent. Daarom wordt “TNT” geselecteerd en het volgende menu wordt geopend. In figuur B.6 en B.7 komt er een scherm tevoorschijn waar het ladinggewicht en de afstand van de lading moet worden ingevoerd, zoals eerder is vermeld wordt dit gedaan in meters.



Figuur B.6: invoeren ladinggewicht



Figuur B.7: invoeren afstand

Tot slot leiden deze inputwaarden tot een laatste scherm in figuur B.8, waar de resultaten worden getoond. Hier worden alle inputwaarden nog eens samengevat, ook de theoretische piekoverdruk wordt hier weergegeven. Verder zijn alle outputwaarden uiteengezet, met als hoofdresultaat de piekoverdruk.

```

C:\TM5-855\CONWEP.EXE
Enter range to target, meters ..... 0.46

INPUT
Hemispherical Surface Burst
Equivalent weight of TNT ..... 0.1290E-02 kg
Range to target ..... 0.4600 meters

OUTPUT
Peak incident overpressure ..... 58.52 kPa
Normally reflected pressure ..... 143.4 kPa
Time of arrival ..... 0.6884 msec
Positive phase duration ..... 0.3831 msec
Incident impulse ..... 7.478 kPa-msec
Reflected impulse ..... 16.50 kPa-msec
Shock front velocity ..... 416.4 m/s
Peak dynamic pressure ..... 11.11 kPa
Peak particle velocity ..... 114.6 m/s
Shock density ..... 1.691 kg/m**3
Specific heat ratio ..... 1.401
Decay coefficient  $\bar{U}$  (msec), where
 $P(t) = P_{so} * [1 - (t - t_a) / t_o] * \exp[-(t - t_a) / \bar{U}]$  . 0.2820
Press <Enter> to continue ...

```

Figuur B.8: Output