Validatie van een schalingsmethode

Een onderzoek naar een vernieuwende methode op het gebied van het terugschalen van explosies.



Tweede Luitenant der Mariniers R. In de Braekt

Validatie van een schalingsmethode

Een onderzoek naar een vernieuwende methode op het gebied van het terugschalen van explosies.

Bachelor eindopdracht voor de studie Civiele Techniek

Schrijver: Tweede Luitenant der Mariniers R. In de Braekt

Registratie nummer:900810314Peoplesoft nummer:305977Student nummer:1122312

Begeleiders: Ir. J.B.W. Borgers

Prof. Dr. Ir. J. Vantomme

Nederlandse Defensie Academie, Breda Universiteit Twente, Enschede

Nederlandse Defensie Academie, Breda Universiteit Twente, Enschede

Koninklijke Militaire School, Brussel

KMA, Breda, 2013

3

Voorwoord

Voor u ligt mijn thesis ter afsluiting van de bachelor Civiele techniek aan de Universiteit van Twente en de Nederlandse Defensie Academie. Ik heb mijn afstudeeronderzoek mogen schrijven in het kader van het vak pyrotechniek, ik hoop dat mijn onderzoek op dit vakgebied een nuttige bijdrage zal leveren. Ik moet toegeven dat het schrijven van dit onderzoek niet is meegevallen, maar met de tussenkomst van zowel de twee praktijkdagen in Reek als verschillende onderbrekingen, bijvoorbeeld twee maanden Noorwegen, kan ik terugkijken op een zeer enerverende periode. Dit onderzoek heb ik uiteraard niet alleen kunnen doen en daarom wil ik enkele personen die mij de afgelopen periode hebben ondersteund bedanken.

Allereerst wil ik graag mijn begeleider van de faculteit van de KMA, Dhr. ir. Jody Borgers zeer hartelijk danken voor zijn sturing en advies bij het schrijven van mijn scriptie. Zijn kennis en ervaring bij zowel de theoretische als de praktische facetten van dit onderzoek hebben mij geholpen het eindresultaat naar een hoger niveau te brengen.

Verder wil ik Dhr. Dennis Krabbenborg bedanken voor zijn hulp bij het vervaardigen van de proefopstellingen. Samen met hem is het gelukt om in een week tijd een solide proefopstelling te maken die aan alle verwachtingen voldeed. Zonder zijn ervaring en materiaalkennis, en uiteraard de beschikbare middelen in het Genielab, was dit niet mogelijk geweest.

Gedurende de practicumdagen in Reek ben ik goed ondersteund door de aanwezige heren van de Mineursschool, daarnaast heeft mijn collega en vriend Tim van den Broek ook geassisteerd bij de practica. Allen dank hiervoor.

Breda, juni 2013

Rick In de Braekt Tweede Luitenant der Mariniers

Samenvatting

Tegenwoordig is de dreiging van aanslagen overal ter wereld aanwezig. Veelal bestaat de hoofdlading hierbij uit een grote hoeveelheid explosief materiaal, met een gewicht tot wel duizenden kilo's. De gevolgen hiervan zijn vernietigend, naast het grote gevaar voor personen, worden bouwwerken vernield of raken beschadigd. Om een inschatting te kunnen maken van de gevolgen van een dergelijke aanslag is er reeds onderzoek gedaan naar effecten van een explosie en de uitwerking ervan op constructie elementen.

Een grootschalig onderzoek naar de gevolgen van een explosie op constructies is echter zeer duur en is maar op beperkte locaties in de wereld mogelijk, in Nederland gelden vele beperkingen waardoor men gedwongen is de experimenten op kleine schaal uit te voeren. Het terugschalen van een grote explosie is echter niet eenvoudig, hiervoor was dan ook tot voorkort geen juiste methode voorhanden. Er is een nieuwe schalingsmethode ontwikkeld, welke uit gaat van een eendimensionale explosie, beter bekend als de equivalente volume approach, hierbij wordt gebruik gemaakt van een tunnel waarin de blastgolf zich voortplant.

Deze scriptie gaat over de bovengenoemde methode, middels experimenten wordt de validiteit van de schalingsmethode gecontroleerd. Hierbij wordt gebruik gemaakt van een referentieproef, een hemisferische explosie van 1kg, en overeenkomende geschaalde tunneltesten. De resultaten van zowel de referentieproef als de tunneltesten worden vooraf voorspeld en berekend, waarna de gemeten waarden ermee worden vergeleken. Als de schalingsmethode correct is dan zouden de resultaten overeen moeten komen. Naast het meten van de druk worden bij elk van de experimenten stalen strips beproefd, de optredende vervorming als gevolg van de explosie wordt daarbij vooraf bepaald en gemeten. Zodoende kunnen de resultaten van zowel de drukmetingen als de vervormde staalplaatjes vergeleken worden om de methode te valideren.

Een tweede experiment in dit onderzoek is de controle van de grafiek waarmee de geschaalde impuls bepaald kan worden. Deze grafiek is onderdeel van de schalingsmethode, en hier bestond nog onduidelijkheid over de praktische toepasbaarheid. Zodoende is besloten een reeks experimenten uit te voeren met een tunneltest opstelling waarbij verschillende ladinggewichten voor de tunnel tot ontploffing worden gebracht. Daarbij zijn op gezette afstanden de optredende druk gemeten, waarna vervolgens de impuls en geschaalde impuls bepaald konden worden. Na deze te plotten in de betreffende grafiek bleek dat deze redelijk overeenkomt met de waarden die de schalingsmethode voorschrijft.

De resultaten van de referentieproef en bijbehorende tunneltesten kwamen helaas niet in alle gevallen overeen, voor een deel kwam dit door slechte meetresultaten. Daarnaast was het gebruikte materiaal in sommige gevallen niet opgewassen tegen de vrijkomende krachten. Geconcludeerd kan worden dat de schalingsmethode toepasbaar is om experimenten in de toekomst met minder springstof uit te voeren, mits een goede tunnelconstructie gebruikt wordt. Enig vervolgonderzoek naar de juiste tunnel en opstelling is wel benodigd.

6

Inhoudsopgave

Voorwoord	5
Samenvatting	6
1. Inleiding	8
1.1. Aanleiding	8
1.2. Doelstelling	8
1.3. Onderzoeksmodel	9
1.4. Vraagstelling	9
1.5. Onderzoeksstrategie	10
1.6. Structuur van het rapport	10
2. De theorie	11
2.1 Piekoverdruk en Impuls	11
2.2 De oude schalingsmethode	13
2.3 De nieuwe schalingsmethode	18
2.4 Het massa-veer systeem	19
3. De proefopstellingen	22
3.1 Het constructie-element	22
3.2 De referentieproef	25
3.3 De tunneltesten	27
3.4 Controle grafiek 2.5	30
4. De resultaten	36
4.1 De referentieproef	36
4.2 Tunneltesten	38
4.3 Controle grafiek 2.5	41
5. Conclusie / Aanbeveling	49
5.1 Conclusie: referentieproef en de tunneltesten	49
5.2 Conclusie: validatie van 'grafiek 2.5'	49
5.3 De hoofdvraag	50
5.4 Aanbevelingen	50
Bibliografie	52
Appendices	53
Appendix A: Matlab-script voor plastische vervormingen	54
Appendix B: Meetgegevens validatie grafiek 2.5	56
Appendix C: Het meetrapport	59

1. Inleiding

1.1. Aanleiding

Bij het militair optreden in met name Afghanistan en Irak was er een grote dreiging van Improvised Explosive Divices, ook is de dreiging van aanslagen met explosieven op overheidsgebouwen waar ook ter wereld nog altijd aanwezig. Deze dreiging was, en is, van dien aard dat er op verschillende manieren onderzoek naar wordt gedaan. De ladinggewichten van de explosieven variëren van enkele tot soms zelfs duizenden kilo's. De schade die deze explosies kunnen veroorzaken is enorm.

Om de effecten van grote hoeveelheden explosief materiaal te kunnen voorspellen en passende maatregelen hierop te nemen wordt er veel onderzoek naar gedaan. Het bepalen van de gevolgen dient zowel middels een theoretische berekeningen als met een praktijktest te worden gecontroleerd, hiermee kunnen de gevolgen namelijk beter zichtbaar worden gemaakt. Praktijktesten met grote hoeveelheden materiaal zijn echter niet altijd op grote schaal mogelijk gezien de geldende veiligheidsvoorschriften en beperkingen van de meeste springterreinen. Daarom zullen de experimenten op een correcte wijze moeten worden terug-geschaald, waarbij de effecten overeenkomen. Hierbij zijn de afstand en het ladinggewicht maatgevende factoren. De parameters die gemeten worden bij een dergelijk experiment zijn de piekoverdruk (Ps) en de impuls (I).

Het correct uitvoeren van een geschaald experiment is ingewikkeld, drie belangrijke factoren dienen beschouwd te worden:

- De blast parameters;
- Het constructie-element;
- De 'vlakheid' van de schokgolf.

Een correcte schalingsmethode waarbij afstand, ladinggewicht, druk en impuls correct worden geschaald was nog niet voor handen. Nu heeft Dhr Borgers een methode opgesteld waarbij zowel de druk als de impuls correct worden meegeschaald met het ladinggewicht.

Hierbij dient gebruik gemaakt te worden van een tunnel-test, waarbij de lading in, of voor, de tunnelingang geplaatst wordt en het test-object (constructie-element) aan het eind van de tunnel geplaatst wordt. In deze opstelling beweegt de schokgolf zich in één richting voort (door de tunnel), deze mag dan als een vlakke schokgolf beschouwd worden. Op verschillende afstanden van de lading kunnen vervolgens de druk en impuls gemeten worden, waardoor met een gelijke lading meerdere metingen gedaan kunnen worden, en dus de methode nauwkeuriger kan worden getest.

De resultaten van de uit te voeren experimenten kunnen leiden tot de validatie van deze methode, waarna deze in de toekomst mogelijk gebruikt kan worden om veel experimenten op een juiste wijze terug te schalen om zo met een kleinere hoeveelheid springstof dezelfde effecten te behalen. In de praktijk kan dit betekenen dat bijvoorbeeld de gevolgen van een IED-aanslag nagebootst kunnen worden met relatief kleine hoeveelheden explosief materiaal, waarna bouwwerken ontworpen en beproefd kunnen worden die hiertegen bestand zijn.

1.2. Doelstelling

Het doel van dit onderzoek is het toetsen van een nieuwe methode met betrekking tot het schalen van experimenten met springstoffen, door middel van het uitvoeren van een serie experimenten waarvan de resultaten worden vergeleken met de voorspelde uitkomsten.

1.3. Onderzoeksmodel

Om de bovengenoemde doelstelling te behalen is een onderzoeksmodel gemaakt. Het onderzoekmodel is hieronder weergegeven. Vervolgens is er een korte uitleg gegeven van de stappen a tot en met d.



Na het bestuderen van de verschillende theorieën en het ontwikkelen van een juiste proefopstelling (a), wordt een serie proeven uitgevoerd (b), waarvan de resultaten geanalyseerd en vergeleken worden met de verwachte uitkomst (c). De resultaten hiervan zullen worden verwerkt tot een conclusie betreffende de nieuwe theorie (d).

(c)

1.4. Vraagstelling

(a)

Aan de hand van het onderzoeksmodel zijn de verschillende deelvragen opgesteld die het mogelijk maken om de centrale vraag (en de doelstelling) correct te beantwoorden.

<u>Centrale vraag:</u> Kunnen pyrotechnische experimenten met behulp van de nieuwe schalingsmethode op correcte wijze worden teruggeschaald ?

Deelvragen: 1) Wat is een explosie?

- 2) Wat houdt de nieuwe schalingsmethode in?
 - a) Wat is de achterliggende theorie?

(b)

b) Wat zijn de gevolgen in de praktijk?

3) Middels welke proefopstelling kunnen de experimenten worden uitgevoerd?

- a) Is de opstelling betrouwbaar?
- b) Wat is het meest geschikte constructie-element?
- c) Komt de opstelling overeen met het theoretisch model?

(d)

4) Komen de resultaten overeen met de verwachtingen?

a) Wat zijn de meetresultaten?

b) Wat zijn de voorspelde resultaten?

De afzonderlijke deelvragen zullen niet puntsgewijs aan bod komen in het rapport, ze zijn verpakt in de verschillende hoofdstukken en zullen daar uitgebreid worden toegelicht.

1.5. Onderzoeksstrategie

1.5.1 De experimenten

Voor dit onderzoek wordt gebruik gemaakt van experimenten. De afstand tot een constructieelement en het ladinggewicht zijn hierbij de afhankelijke variabelen. Door deze te variëren kunnen de druk en impuls op het constructie-element beïnvloed worden, waarna de vervorming van het element geanalyseerd kan worden.

Hierbij is de juiste testopstelling van belang, in dit onderzoek wordt gebruik gemaakt van een tunnel. In de wand van de tunnel dienen meetinstrumenten geplaatst te worden om de schokgolf te meten. Het juist analyseren van gemeten waarden in combinatie met de berekende waarden en de effecten op het constructie element kunnen bepalen of de theorie als valide mag worden beschouwd of niet.

1.5.2 De theorie

Voordat de experimenten uitgevoerd kunnen worden dient veel informatie betreffende explosieve stoffen en de proefopstellingen vergaard te worden. Deze informatie is met name via internet en vakliteratuur verkregen.

De analyse van de data van de experimenten vindt met name plaats via het programma Matlab, waarna de meetgegevens kunnen worden vergeleken met de theoretische waarden.

1.6. Structuur van het rapport

De opbouw van het rapport is als volgt: Allereerst wordt in hoofdstuk 2 de theorie toegelicht. Zowel de basisbegrippen als de schalingsmethode worden hier behandeld. Naar deze methode wordt in de verdere hoofdstukken veelvuldig verwezen. Hoofdstuk 2.2 omvat de theoretische kern van dit rapport, aan de hand van deze theorie wordt vervolgens in hoofdstuk 3 een experiment beschreven. Dit experiment is ook daadwerkelijk uitgevoerd en de resultaten ervan komen in hoofdstuk 4 aan bod. Vervolgens zal worden toegewerkt naar de conclusie van het rapport waarin tevens de hoofdvraag wordt beantwoord, dit is terug te lezen in hoofdstuk 5. In datzelfde hoofdstuk worden nog enkele aanbevelingen gedaan.

2. De theorie

Het realiseren van de proefopstelling en het uitvoeren van de experimenten kan pas geschieden na een grondige studie van de achterliggende theorie. De theorie met betrekking tot de nieuwe schalingsmethode zal worden toegelicht, echter dient eerst enige pyrotechnische basiskennis behandeld te worden. De twee voornaamste parameters 'piekoverdruk' en 'positieve impuls' zullen allereerst kort toegelicht worden, alvorens de nieuwe schalingsmethode [2] uitgebreid aan bod komt. Er wordt enkel stilgestaan bij de schokgolfparameters die ook terugkomen in de schalingsmethode (druk en impuls), overige blast-parameters (zoals de snelheid van het schokfront, temperatuur, de dynamische druk en de deeltjessnelheid) worden buiten beschouwing gelaten in onderstaande paragrafen.

Verder wordt er nog stilgestaan bij het één-massa-veersysteem wat gebruikt wordt om effecten van de explosie op een constructie element te beschrijven.

2.1 Piekoverdruk en Impuls

Bij de detonatie van een springstof ontstaat er een schokgolf die zich naar 'buiten' verplaatst, als deze arriveert op een bepaalde plaats ontstaat er instantaan een overdruk welke vervolgens in de tijd afneemt tot een druk die lager is dan de atmosferische druk. Uiteindelijk zal het evenwicht, de atmosferische druk, zich herstellen. Het luchtdrukverloop ziet er als volgt uit.



Figuur 2.1.1: Druk-tijd verloop van een blastgolf

De piekoverdruk karakteriseert met name het destructieve vermogen van een blastgolf en wordt aangegeven in kilo Pascal, 1 kPa= 10^3 N/m²=0.01 bar. De piekoverdruk is afhankelijk van de afstand tussen de springstof en de sensor en het ladinggewicht.

Deze afstand wordt met de volgende formule bepaald:

 $Z = \frac{R}{\sqrt[3]{W}} = R/W^{\frac{1}{3}}$ $R = de \ af stand \ tot \ het \ explosief \ (m)$ $W = het \ lading gewicht \ in \ TNT \ eq \ (kg)(zie \ 2.1.1)$

Deze Z wordt ook wel de geschaalde afstand genoemd.

[2.1]

Vergelijking [2.1] is van toepassing op sferische explosies. Voor hemisferische explosies dient het ladinggewicht met een reflectiefactor vermenigvuldigd te worden. Deze wordt aangenomen 1.8 te zijn [8].

De positieve impuls is gedefinieerd als het totale oppervlak onder de druk-tijd grafiek (figuur 2.1) gedurende de positieve fase. Vergelijking [2.2] toont de exacte methode om de impuls te bepalen aan de hand van een druk-tijd grafiek.

$$i = \int_{t_a}^{t_a + t_+} p_s(t) dt$$
 [2.2]

Deze methode wordt vereenvoudigd door de gehele positieve fase als een driehoek te beschouwen. Zodoende kan de impuls als volgt bepaald worden.

$$i = \frac{t_+ \cdot p_s}{2}$$
[2.3]

2.1.1 De schokgolfinteractie

De schokgolf die ontstaat na de detonatie komt na zeer korte tijd in contact met een constructie element. Bij dit onderzoek is het constructie-element een vrij opgelegd staalplaatje. De mate van interactie tussen de schokgolf en het staalplaatje is afhankelijk van enerzijds de eigenschappen van de invallende golf, piekoverdruk en pulsduur en van de afmetingen, geometrie en oriëntatie en respons van de constructie. Dit wordt beschouwd als een zeer gecompliceerd proces, waarnaar reeds veel onderzoek is gedaan. Onderstaande figuur toont een voorbeeld van schokgolfinteractie met een rechthoekig object.





Wanneer een schokgolf een constructie of een element ervan bereikt, zal deze daartegen reflecteren waardoor de voorzijde belast wordt met een gereflecteerde druk die 2 tot 8 maal hoger is dan die

van de invallende schokgolf.[8] Vervolgens buigt de blastgolf om de constructie heen, waarbij de belasting de zijkanten en uiteindelijk de achterkant van de constructie belast. Waarna de druk met de tijd afneemt tot de omgevingscondities, zoals getoond in figuur 2.1.1.

Bij dit onderzoek wordt alleen gekeken naar de invallende piekoverdruk. Hiervoor is gekozen omdat het staalplaatje een zeer geringe dikte van 2mm heeft en een breedte van 40mm. De blastgolf zal dan ook een minimale ontlastingstijd hebben en van drukherstel zal ook geen sprake zijn gezien de geringe afmetingen van het constructie element. Een reflectiefactor wordt ook buiten beschouwing gelaten, het is namelijk niet mogelijk een juiste factor hier aan te koppelen. In dit onderzoek zullen de staalplaatjes met verschillende hoeveelheden explosief materiaal belast worden, waarbij de plaatjes vrij opgelegd gemonteerd zijn en om de resultaten goed te kunnen vergelijken wordt er enkel met invallende piekoverdruk gerekend.

2.1.2 TNT equivalentie

Het ladinggewicht (formule 2.1) wordt aangeduid met een hoeveelheid TNT equivalenten. Dit wordt gedaan om de verschillende springstoffen met elkaar te kunnen vergelijken. Voor de veelgebruikte springstoffen zijn deze conversiefactoren bepaald. In tabel 2.1 zijn de gangbare TNT conversiefactoren voor verschillende springstoffen weergegeven.

Explosief	Massa specifieke energie KJ/kg	TNT equivalentie Q/Q _{TNT}
TNT	4520	1.000
RDX	5360	1.185
НМХ	5680	1.256
PETN	5800	1.270
Nitroglycerine	6700	1.481
60% Nitroglycerinedynamiet	2710	0.600
Semtex	5660	1.250

Tabel 2.1: Conversiefactoren, TNT equivalentie

De springstof gebruikt in dit onderzoek, slagsnoer en kneed, vallen beide onder de categorie PETN(Pentriet) zodoende is de toegepaste conversiefactor 1.27.

Met andere woorden één kilogram kneed komt overeen met 1.27 kg TNT.

2.2 De oude schalingsmethode

Een veelgebruikte schalingsmethode is die van Hopkinson-Cranz, deze wordt in onderstaande paragraaf toegelicht. Overige modellen om parameters te bepalen worden in paragraaf 2.2.2 getoond.

2.2.1 De Hopkinson-Cranz schalingswet

De Hopkinson-Cranz schalingswet, ook bekend als de derde-machtswortel schalingswet, zegt dat gelijkblijvende blastgolven gegenereerd worden op dezelfde geschaalde afstanden wanneer twee explosieven van dezelfde springstof maar van verschillende afmeting detoneren onder dezelfde atmosferische condities.

Als twee ladingen met massa W_1 en W_2 en diameters d_1 en d_2 van dezelfde springstof dan volgt de volgende vergelijking:

 $\frac{d_1}{d_2} = \left(\frac{W_1}{W_2}\right)^{1/3}$

[2.4]

Hieruit blijkt dat W proportioneel is met d³.



Figuur 2. 2: Hopkinson-cranz schalingswet

Stel dat een sensor op afstand R₁ van het explosief met dimensie d₁ een blastgolf meet met een p_s en t₊. Als we vervolgens veronderstellen dat de ladinggewichten zich verhouden als d₂/d₁= λ , dan zal de sensor op een afstand R₂= λ R₁ een 'overeenkomstige' blastgolf ondervinden met dezelfde p_s,maar met een duur van λ t₊ en impuls λ i_s. De afstanden waarop dezelfde piekoverdruk gemeten kan worden wordt als volgt berekend:

$$\frac{R_1}{R_2} = (\frac{W_1}{W_2})^{1/3}$$

Uit de Hopkins-Cranz schalingswet blijkt al dat de impuls niet gelijkblijvend is bij een geschaalde explosie, hiervoor dient een nieuwe schalingsmethode opgesteld te worden.

2.2.2 Sferische (3D) blast parameters

Voor sferische explosies zijn in het verleden verschillende modellen opgesteld die de blast parameters kunnen voorspellen. Deze methoden maken gebruik van de in 2.1 uitgelegde schalings regels.

De toegepaste modellen zijn:

- De Kingery-Bulmash vergelijking [11], welke in CONWEP [10]gebruikt worden.
- De grafieken van Baker [1]
- De methode van Brode [9], gebaseerd op numerieke simulaties. Deze methode is enkel bruikbaar bij een Z < 10.

Deze modellen zijn allen in figuur 2.3 geplot om de overeenkomsten en verschillen duidelijk te maken.



Figuur 2. 3: Blast parameter modellen

2.2.3 Het schalings probleem met de 'oude' methode

Aan de hand van onderstaand voorbeeld zal het probleem wat zich voordoet bij het terugschalen van explosies worden toegelicht, waarna een nieuwe methode wordt toegelicht die dit probleem kan verhelpen.

Voorbeeld 2.1:

Een grote explosie, 1000 kg TNT equivalent, vindt plaats op een afstand van 30m van een gebouw. Uitgaande van de sferische expansie van de blast is het mogelijk om de oude schalings regels toe te passen om zo de parameters van de grote explosie te schalen naar een kleinere. De geschaalde afstand wordt: Z=3. De piekoverdruk is altijd gelijk bij deze geschaalde afstand (82 kPa, zie figuur 2.3). Een geschaalde afstand van 3 wordt ook bereikt bij het gebruik van 8 kg TNT op een afstand van 6 meter of het gebruik van 1kg TNT op een afstand van 3 meter.

Het toepassen van deze schalingsmethode zorgt voor een gelijkblijvende piekoverdruk, de impuls blijft echter niet gelijk. De geschaalde impuls $i_s^s = i_s/W^{1/3}$ is gelijk bij de geschaalde afstand, in bovengenoemd voorbeeld 64 Pa.s/kg^{1/3}. De geschaalde impuls heeft relatie met de geschaalde afstand. Zie paragraaf 2.2.5.

De impuls verschilt echter wanneer er een ander ladinggewicht wordt toegepast. 643Pa.s bij 1000 kg, 128 Pa.s bij 8 kg en 64 Pa.s bij 1 kg. De daadwerkelijke gevolgen van een dergelijke explosie voor de gebouwen of constructies kunnen dus alleen correct worden getest bij een experiment op volle schaal, omdat dan de piekoverdruk én impuls overeenkomen met de werkelijkheid. Als namelijk een van deze parameters een lagere waarde heeft zal dit zeer waarschijnlijk een andere uitwerking (minder schade) op de constructie als gevolg hebben. Het uitvoeren van experimenten op volle schaal is in de praktijk echter niet mogelijk gezien de vele beperkingen en veiligheidsvoorschriften die gelden op de springterreinen. Zoals het beperkt aantal proeven op jaarbasis waarbij een ladinggewicht van meer dan 1 kg mag worden gebruikt, vanwege geluidshinder bij omwonenden. Bij grote ladinggewichten dient ook op een groot deel van het springterrein het werk te worden neergelegd vanwege de veiligheidsstralen die gehanteerd worden. Binnen een bepaalde afstand tot het explosief mogen dan geen werkzaamheden verricht worden omdat de kans bestaat dat bij een experiment brokstukken uitgeworpen kunnen worden over grote afstand.

2.2.4 De tunnel

In het verleden is het gebruik van tunnels bij experimenten veelvuldig toegepast vanwege het in een dimensie voortplanten van de schokgolf, een schokgolf verplaatst zich namelijk door een tunnel, nadat alle reflecties afgenomen zijn, als een vlak front. De lading welke voor de tunnel wordt geplaatst explodeert echter vanuit een ontstekingspunt, waardoor een vlakke blastgolf in werkelijkheid niet direct optreed, eerst dienen de reflecties uit te dempen. De hoeveelheid en invloed van de reflecties is afhankelijk van het ladinggewicht, tunneldiameter en tunnellengte. De hoeveelheid lading in een tunnel wordt aangeduid als: W_{1D}, met de eenheid [kg/m²].

Voor het aanbrengen van de lading zijn er verschillende mogelijkheden:

- Een puntbron, in het midden van de tunneldoorsnede. Dit is vrij eenvoudig en effectief, echter zorgt het voor vrij veel reflecties. De reflecties kunnen worden uitgedempt door een grote tunnellengte toe te passen.
- Meerdere strengen slagsnoer, voor of in de tunnel. Dit zorgt voor een groter explosief oppervlak, waardoor de reflecties sneller uitdempen en er een 'blast-front' ontstaat.
- Een puntbron, iets voor de tunnelopening. Dit heeft als voordeel dat de blast eerst sferisch kan expanderen, alvorens deze bij de tunnel arriveert. De afstand tussen de bron en de tunnel zorgt voor minder reflecties in de tunnel. Er dient echter wel een grotere hoeveelheid explosief materiaal geplaatst te worden om dezelfde effecten te behalen.

2.2.5 Het 1D blast model

Om het schalingsmodel toepasbaar te maken op tunnelopstellingen dienen de ladinggewichten en geschaalde afstanden hierop aangepast te worden. De afstand in tunnels wordt namelijk anders geschaald dan bij sferische detonaties. Bij de tunnel gaat het namelijk om ladinggewichten per oppervlakte en de geschaalde afstand krijgt een eenheid van m³/kg.

Het ladinggewicht W_{1D} heeft de eenheid [kg/m²]. De geschaalde afstand Z_{1D} wordt dan R/ W_{1D} met de eenheid [m³/kg].

$$Z_{1D} = \frac{R}{W_{1D}}$$
[2.5]

Voor zowel de druk als de impuls zijn vervolgens grafieken opgesteld waar de nieuwe schalingsmethode uit voort komt [7]. Deze zullen aan de hand van een voorbeeld worden toegelicht. Figuur 2.4 toont de geschaalde afstand uitgezet tegen de optredende piekoverdruk. Voor het 1D blast model moet naar de grijze lijn gekeken worden (onderste in de legenda).



Figuur 2. 4: 1D piekoverdruk

Figuur 2.5 toont de geschaalde afstand, Z_{1D}, die is uitgezet tegen de geschaalde impuls. De geschaalde impuls wordt bepaald door de impuls te delen door het ladinggewicht: $i_s^s = i_s/W^{1/3}$. Deze heeft dan als eenheid: Pa· $s/(\frac{kg}{m^2})$.

Voor het 1D blast model moet naar de grijze lijn gekeken worden (onderste in de legenda).



Figuur 2. 5: 1D impuls

2.3 De nieuwe schalingsmethode

Het 3D- schalings probleem, toegelicht in paragraaf 2.2.3 kan nu met behulp van bovenstaande grafieken worden opgelost. Hiervoor zal hetzelfde voorbeeld gebruikt worden. (Een IED van 1000kg op een afstand van 30m).

Voorbeeld 2.2:

Bij eerder genoemde lading van 1000 kg TNT op een afstand van 30 meter wordt een piekoverdruk gemeten van 82 kPa.

Uit figuur 2.4 blijkt dat bij deze druk een Z_{1D} hoort van 67 m³/kg. Formule 2.5 toont Z_{1D} = R/ W_{1D} , dus R= 67x W_{1D} .

Dus bij een ladinggewicht van $100g/m^2$ wordt de afstand 6.7m of met $W_{1D} = 20g/m^2$ wordt de afstand 1.34m.

Om echter een impuls te krijgen die overeenkomt met 1000kg op 30m dient grafiek 2.5 toegepast te worden. De impuls (bepaald in paragraaf 2.2.3) is 643 Pa.s. Door deze in te vullen in figuur 2.5 blijkt dat een impuls van 643 Pa.s overeenkomt met een afstand van ongeveer 1.2 m.

Nu zowel R als Z_{1D} bekend zijn kan het bijbehorende ladinggewicht W_{1D} bepaald worden.

$$Z_{1D} = \frac{R}{W_{1D}}$$
 $W_{1D} = \frac{R}{Z_{1D}} = \frac{1.2}{67} = 0.018 kg/m^2$

Kortom om de effecten van een explosie van 1000kg TNT op 30m afstand te evenaren dient 18 g/m² op 1.2m afstand geplaatst te worden (in een tunnel).

Deze methode kan worden toegepast voor uiteenlopende ladinggewichten en afstanden. Het grote voordeel hiervan is dat slechts een fractie van het 3D-ladinggewicht toegepast hoeft te worden om geschaalde experimenten uit te voeren. Dit heeft zowel financiële als milieutechnische voordelen. De experimenten kunnen in verschillende tunnels worden uitgevoerd, als er maar rekening wordt gehouden met de W_{1D}, (ladinggewicht per oppervlakte).

Om de in dit hoofdstuk behandelde nieuwe schalingsmethode te toetsen zal een experiment uitgevoerd moeten worden, waarbij een hemisferische explosie als referentieproef zal dienen. Deze reeks van experimenten wordt in hoofdstuk 3 uitgebreid toegelicht.

2.4 Het massa-veer systeem

Om de doorbuiging van constructies en elementen hiervan te berekenen wordt veelal gebruik gemaakt van een schematische weergage hiervan, beter bekend als het één-massa-veer systeem. In hoofdstuk 6 van het dictaat Pyrotechniek [8] wordt deze methode gedetailleerd uitgelegd.

De constructie wordt eenvoudigweg geschematiseerd als één equivalente massa. Hierbij werkt enkel de externe belasting F_e op de constructie en nemen de veer en de massa, K en M, deze krachten op. Dit systeem wordt ook wel een SDOF-systeem (Single Degree Of Freedom) genoemd, omdat het maar één graad van vrijheid heeft.



Figuur 2.6: SDOF-systeem

Het evenwicht wat bij bovenstaande situatie beschreven wordt kan met de volgende formule bepaald worden:

$$M_e \ddot{x} + K_e x = F_e(t)$$

Waarin:

M_e de massa (kg)

 K_e de veerstijfheid (N/m)

x de uitwijking (m)

 \ddot{x} de versnelling (m/s²)

F_e(t) de externe belasting (N)

Vergelijking 2.6 kan middels numerieke integratie worden opgelost, hiervoor is een matlab script gebruikt. Dit script is opgenomen in Appendix A.

Om zonder het script een inzicht te krijgen in de vervorming die op zal treden kan gebruik worden gemaakt van een PI-diagram (druk impuls diagram), figuur 2.7.

[2.6]



Figuur 2.7: PI-diagram

De parameters zijn als volgt:

Parameter	Eenheid	Omschrijving
Р	Ра	De piekoverdruk
i	Pa.s	De impuls
Ψ_{p}	-	Dimensieloze parameters
Ψi	-	Dimensieloze parameters
Ψ _e	-	Dimensieloze parameters
Ψ_{w0}	-	Dimensieloze parameters
b	m	Breedte balk
н	m	Diepte balk
I	m	Lengte balk
ρ	kg/m ³	Materiaaldichtheid
E	N/m ²	Elasticiteitsmodulus van de balk
σ,	N/m ²	Vloeigrens materiaal
€ _{max}	-	Maximale rek in de balk
ω	m	Maximale doorbuiging
Α	m ²	Doorsnede oppervlak
1	m ⁴	Traagheidsmoment
Z	m ³	Plastisch weerstandsmoment

Tabel 2. 2: Parameters PI-diagram

Allereerst dienen de as-parameters bepaald te worden. Waarmee de grenswaarde e_{max} bepaald kan worden (de maximale rek in de balk). Vervolgens kan de maximale doorbuiging van de balk w_0 bepaald worden uit de relatie linksonder in de figuur.

Voor dit onderzoek is, zoals valt te lezen in hoofdstuk 3.1, gebruik gemaakt van het script. Hiervoor is gekozen omdat het gebruik van het PI-diagram gevoelig is voor onnauwkeurigheden en rekenfouten, en het gebruik van het script kan eenvoudig meerdere keren worden toegepast.

3. De proefopstellingen

De in hoofdstuk 2.3 uitgelegde schalingsmethode dient door middel van het uitvoeren van experimenten getoetst te worden. De experimenten bevatten enkele onderdelen waarover vooraf keuzes zijn gemaakt, deze worden per onderdeel toegelicht.

Tevens zullen aan de hand van de in hoofdstuk twee toegelichte theorie enkele berekeningen worden gedaan, deze berekeningen zijn van toepassing op de uit te voeren proeven. Ook zullen de resultaten vooraf berekend worden, waarna deze in hoofdstuk vier met de resultaten vergeleken kunnen worden.

De proefopstelling en onderdelen ervan zijn onderverdeeld in:

- Het constructie-element
- De referentieproef
- De tunneltesten
- De controle van grafiek 2.5

3.1 Het constructie-element

Bij elk van de experimenten wordt een stalen plaatje beproefd, waarvan de vervorming vervolgens berekend en gemeten kan worden. Dit plaatje representeert een constructie element, dan wel een bouwwerk. De koppeling tussen de schalingsmethode en de praktijk wordt hiermee nogmaals duidelijk gemaakt.

Er is gekozen voor staal omdat dit materiaal voldoende voor handen is, homogeen is en de eigenschappen ervan bekend zijn, deze worden namelijk door de fabrikant vermeld bij de aankoop en tevens kunnen de eigenschappen gecontroleerd worden op de trekbank in het genielab op de Seeligkazerne te Breda.

Een bijkomend voordeel is dat het materiaal in grote mate plastisch kan vervormen alvorens er breuken optreden. Waardoor het achteraf eenvoudig op te meten is. In tegenstelling tot bijvoorbeeld hout of steen/beton zijn de vervormingen aan staal goed meetbaar en vooraf te bepalen zoals beschreven in paragraaf 2.4.

Bij de experimenten is gebruik gemaakt van een metalen strip met de volgende afmetingen: 250 x 40 x 2 mm. Zowel bij de referentieproef als de tunneltesten zijn deze strips toegepast. Dat maakt het dus mogelijk om zowel de optredende piekoverdruk als de vervorming van de staalplaatjes van de referentieproeven met de tunneltesten te vergelijken. De afmetingen van het staal zijn afhankelijk van de gebruikte tunneldiameter, deze is 300 mm, zodoende is een lengte van 250mm haalbaar. De geringe dikte van het staal is voortgekomen uit het feit dat het plastisch moet vervormen, ook bij lagere piekoverdruk.

De staalkwaliteit

Staal is verkrijgbaar in verschillende sterkteklassen. De kwaliteit van het gebruikte staal is alvorens het bij de experimenten beproefd is getest in het genielab op de Seeligkazerne te Breda. De treksterkte van het staal is bepaald, door het in een trekbank te plaatsen.

Figuur 3.1 toont het resultaat van deze test. Uit deze trekproef bleek het staal een treksterkte van 520 N/mm² te hebben en een E modulus van 2.1x10¹¹ N/m². Dit komt overeen met staal met een kwaliteit S355[13]. Overeenkomstig met de kwaliteitseisen gesteld door de staalhandel waar het staal is aangekocht.



Figuur 3.1: Resultaat treksterkte bepalen

De doorbuiging

Bij de verschillende experimenten is het staalplaatje telkens vrij opgelegd op twee stalen onvervormbare nokken. Zodoende kan het element zich vrij bewegen als het belast wordt. Dit heeft als voordeel dat enkel de blast effecten invloed uitoefen op de constructie. Een bijkomend voordeel is dat het element bij elk experiment op een gelijke wijze bevestigd is.

Zowel de afmetingen, de staalkwaliteit als de te verwachten druk en impuls (Hoofdstuk 3.2) zijn bekend. Met deze gegevens kan de theoretische doorbuiging van de stalen strip bepaald worden. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van een Matlab-script (Zie appendix A).

De imput is als volgt:

Ps=5800e3;	% [Pa]	De piekoverdruk
Imp=165;	% [Pa.s]	De impuls
td=2*Imp/Ps;	% [sec]	De positieve faseduur
1=0.20;	% [m]	De lengte overspanning
b=.04;	% [m]	De breedte vh plaatje
t=2e-3;	% [m]	De dikte vh plaatje
RHOstaal=7800;	% [kg/m3]	De dichtheid van staal
E=2.1e11;	% [N/m2]	E modulus
SIGy=3.55e8;	% [N/m2]	De yield spanning



Hetgeen Matlab als uitvoer geeft ziet er als volgt uit:

Figuur 3.2: Resultaat Matlab



Het staalplaatje zal plastisch vervormen, dit wordt weergegeven door de blauwe lijn in figuur 3.2, de uiteindelijke vervorming zal in de evenwichtstoestand van deze sinusoide zijn. Voor figuur 3.2 geldt dat het plaatje 4.9cm zal vervormen.

Het hierboven toegelichte script houdt rekening met de wijze waarop het staalplaatje is opgelegd. De plaatjes welke gebruikt worden bij de experimenten zullen vrij opgelegd zijn. De vervorming die optreed wordt nauwkeurig gemeten. Hierbij dient rekening gehouden te worden met de opleglengte.

Bij elk van de uit te voeren experimenten zal deze 2.5cm aan elke kant zijn. Deze dient meegenomen te worden in de bepaling van de doorbuiging. Hieronder wordt een voorbeeld weergegeven.

De doorbuiging (D) van het staalplaatje is de maximale doorbuiging, minus de opleglengte (de stippellijn in de figuur). Op deze wijze zal de doorbuiging voor elk van de gebruikte staalplaatjes bepaald worden.

Figuur 3.3: De doorbuiging bepalen

3.2 De referentieproef

Om de 1D schalingsmethode te valideren dient er een referentieproef uitgevoerd te worden. Bij deze proef zullen op verschillende afstanden stalen strips geplaatst worden, onder invloed van de blast zullen deze vervormen. Hierbij dient de druk gemeten te worden. Deze proef zal vervolgens dienen als uitgangspunt voor de proeven met verschillende tunnellengten.

Gezien de beperkte hoeveelheid springstof die beschikbaar was en de geldende regelgeving op het springterrein in Reek, is besloten om 1kg kneed te detoneren. Er is voor gekozen om de springstof hemisferisch te detoneren. Dit heeft als voordeel dat de proefopstelling in zijn geheel op de grond geplaatst kan worden,waarbij relatief eenvoudig gewerkt kan worden met meetsensoren en constructie-elementen (staalplaatjes).

Bij de proef wordt op afstanden van 0.5, 1.0 en 1.5 meter de druk gemeten wordt middels een blastpencil. Deze proef wordt drie maal uitgevoerd, waarna redelijk nauwkeurig de optredende druk bepaald kan worden.

In combinatie met de in hoofdstuk 3.1 beschreven methode om de vervorming van het staal te bepalen is besloten om de afstanden 0.5, 1.0 en 1.5 meter te hanteren, de plaatjes zullen dan volgens de theorie plastisch vervormen.



Onderstaande figuur geeft een goed beeld van de opstelling.



Figuur 3. 4: Referentieproef

Het staalplaatje dient als een vrij opgelegd element belast te worden. Om dit te realiseren is het eenvoudig aan de stalen profielen vast getapet. Onder invloed van de explosie zal deze gemakkelijk loslaten en kan het element plastisch vervormen.

De constructie waaraan het element is bevestigd is uitgevoerd als een zwaar stalen profiel wat deels is ingegraven, zodat het als gevolg van de explosie niet verplaatst.

Daarnaast is er gebruik gemaakt van enkele zandzakken achter de opstelling. Deze zijn er om het staalplaatje op te vangen als het wordt uitgeworpen door de optredende druk.



Figuur 3. 5: Explosief geplaatst

Er is gekozen om de lading op een zware stalen plaat te plaatsen om zodoende de kratervorming tegen te gaan. Het voordeel hiervan is dat er minder zand van de grond wordt opgeworpen, dit zorgt namelijk voor onnauwkeurigheden in de meetgegevens. Het zand kan namelijk de blastpencils raken en de zeer gevoelige sensoren kunnen hierdoor verstoringen noteren in de meetgrafiek. Een ander voordeel van de staalplaat is dat er minder energie verloren gaat, de schokgolf zal namelijk grotendeels worden gereflecteerd.

3.1.2 De voorspelde resultaten

Theoretisch kan vooraf al de druk op de verschillende afstanden bepaald worden. Hiervoor dient de equivalente hoeveelheid TNT bekend te zijn van 1kg kneed die hemisferisch tot detonatie wordt gebracht. Vervolgens kan de geschaalde afstand Z bepaald worden, waarna in de grafiek van Baker (figuur 2.3) de druk bepaald kan worden.

TNT equivalentie

- 1kg kneedspringstof heeft een TNT equivalentie van 127%.[8]
- Voor hemisferische explosies geldt een reflectiefactor van 1.8.[4]

Het 'equivalent sferische' ladinggewicht (W) wordt voor de referentieproef dus: 1.000 x 1.27 x 1.8 =2.286 kg TNT eq.

De grafiek van Baker

Nu zowel de afstand als lading bekend zijn kan de Z worden bepaald en vervolgens de druk en impuls. (Net als in voorbeeld 2.1). De waarden zijn samengevoegd in tabel 3.1.

Afstand: R	Ladinggewicht: W	Geschaalde afstand: Z= R/W^1/3	Piekoverdruk:P	Impuls: I
(m)	(kg)		(kPa)	(Pa.s)
0.5	2.286	0.38	5800	165
1.0	2.286	0.76	1800	237
1.5	2.286	1.14	630	191

Tabel 3. 1: De referentieproef

3.1.3 De vervorming van de constructie-elementen

Voor de piekoverdruk en impuls worden achtereenvolgens de bij 3.1.2 bepaalde waarden ingevuld in het matlab script, samen met de overige eigenschappen van het staal levert het de onderstaande vervormingen op:

Piekoverdruk:P	Impuls:	Vervorming
(kPa)	(Pa.s)	(cm)
5800	165	4.9
1800	237	3.7
630	191	2.0

Tabel 3. 2: Vervorming staalplaatjes

Nu zowel de optredende druk en impuls bekend zijn kan bepaald worden welke ladinggewichten en tunnellengten er toegepast dienen te worden om de schalingsmethode op de juiste wijze toe te passen.

3.3 De tunneltesten

Voor het uitvoeren van de tunneltesten dient een opstelling gecreëerd te worden waarbij op exacte afstand van de springstof de druk in de tunnel gemeten kan worden. Hiervoor is een PVC-pijp met een diameter van 300mm gebruikt.

Het voordeel van dit materiaal is dat het eenvoudig op lengte af te zagen is en dat er gaten in geboord kunnen worden voor meetsensoren. Daarnaast zal de 7mm dikke wand mogelijk bestand zijn tegen de krachten die vrijkomen bij de explosies.

Zoals in hoofdstuk 2.3 beschreven dient met de bekende piekoverdruk een Z_{1D} bepaald te worden. Waarna met behulp van de impuls een afstand R bepaald wordt. Vervolgens kan door de R te delen door de Z_{1D} het ladinggewicht per oppervlakte (W_{1D}) bepaald worden. Hierbij worden figuren 2.3 en 2.5 gebruikt.

Referentie afstand (m)	P (kPa)	l (Pa.s)	Z _{1D} (m ³ /kg)	R (m)	W _{1D} (kg/m ²)
0.5	5800	165	0.20	0.16	0.8
1.0	1800	237	1.25	0.21	0.168
1.5	630	191	4.05	0.18	0.044

In tabel3.3 zijn de bovengenoemde stappen doorlopen:

Nu bekend is welk ladinggewicht per oppervlakte nodig is, is de volgende stap het berekenen van het ladinggewicht dat geplaatst moet worden in de opening van de PVC-pijp. De buis heeft een oppervlakte van $\pi \times r^2 = \pi \times 0.15^2 = 0.071 \text{m}^2$.

Tabel 3. 3: R en W_{1D} bepaald

Vervolgens wordt de hoeveelheid slagsnoer bepaald die voor de tunnelopening bevestigd dient te worden, ervan uitgaande dat er 12gram springstof per meter slagsnoer is.[6] Het elektrisch slagpijpje wat de explosie inleid bevat 1gram explosief materiaal, deze geringe hoeveelheid is meegenomen in de berekening voor de lengte van het slagsnoer.

W _{1D} (kg/m ²)	W _{1D} x 0.071 (kg)	W _{1D} (g)	Slagsnoer (m)
0.8	0.056	56.55	4.63
0.168	0.012	11.88	0.91
0.044	0.003	3.11	0.18

In tabel 3.4 staan de bovengenoemde stappen weergegeven:

Tabel 3.4: Lading bepaald

Uit tabel 3.4 blijkt dat er zeer uiteenlopende lengten slagsnoer vereist zijn om dezelfde resultaten te behalen als bij de referentie proef. Elk van deze drie proeven wordt drie maal uitgevoerd om de betrouwbaarheid te vergroten.

Bij de proef waar ruim 4 meter slagsnoer op 0.16m van de sensor geplaatst moet worden is er voor gekozen om geen tunnel te gebruiken aangezien het ladinggewicht dusdanig groot is dat de tunnel hier niet tegen bestand zal zijn. Hierbij wordt er vanuit gegaan dat de grote hoeveelheid slagsnoer die op een plat vlak in een spiraalvorm is bevestigd een relatief vlakke schokgolf veroorzaakt op 0.16meter afstand, gezien de zeer korte afstand en de hoeveelheid springstof. De blastpencil is exact op de vooraf bepaalde afstand bevestigd om de optredende piekoverdruk waar te nemen.

Het staalplaatje is vrij opgelegd op twee zware stalen nokken welke op een houten plaat zijn bevestigd. De afstand tussen het explosief en het staalplaatje (0.16m) wordt gerealiseerd door de drie verticale houten latten. Aan de bovenzijde van de springstof is een blastpencil bevestigd, deze meet op een zelfde afstand (0.16m) de druk.



Figuur 3.6: Tunneltest 1 (4.63m slagsnoer)

Voor het experiment waarbij 0.91m slagsnoer op 0.21m afstand van het staalplaatje bevestigd wordt is wel een tunnelelement gebruikt. Daarbij zijn in de tunnelwand ter hoogte van het staalplaatje twee druksensoren bevestigd. Ook is er een blastpencil op gelijke hoogte (0.21m) boven de springstof geplaatst. Het staalplaatje is vrij opgelegd op twee stalen nokken, welke aan de grondplaat zijn bevestigd.



Figuur 3.7: Tunneltest 2 (0.91m slagsnoer)

Bovenstaande afbeelding toont de proefopstelling. Er is gevarieerd met de wijze waarop de springstof is aangebracht, dit omdat bij de linker afbeelding de buis kapot is gegaan bij de explosie. Zodoende is bij de daaropvolgende proeven het slagsnoer op karton gewikkeld, op enige afstand van de tunnelwand. De tweede maal is de buis echter ook onherstelbaar beschadigd.

Voor het experiment waarbij 0.18m slagsnoer op 0.18m afstand van het staalplaatje tot detonatie wordt gebracht is hetzelfde materiaal gebruikt als voor tunneltest 2.



Figuur 3.8: Tunneltest 3 (0.18m slagsnoer)

Ook bij deze testserie is gebruik gemaakt van twee druksensoren en een blastpencil. Er is ook gevarieerd met de wijze waarop het slagsnoer is aangebracht, evenwijdig en loodrecht ten opzichte van het staalplaatje (de rechterafbeelding toont het slagsnoer loodrecht op het staalplaatje).

De gemeten drukken zullen overeen moeten komen met de voorspelde piekoverdrukken die ook voorspeld en gemeten zijn bij de referentie proef. Deze zullen in hoofdstuk 4 met de resultaten vergeleken worden.

3.4 Controle grafiek 2.5

De in figuur 2.5 weergegeven grafiek vertoont vrij veel variatie tussen de verschillende methodes en metingen, deze onzuiverheden kunnen mogelijk worden teruggedrongen door het doen van een serie experimenten. Het doel hiervan is het verloop van deze grafiek te controleren door middel van metingen en dus de schalingsmethode nauwkeuriger te maken.

Hiervoor is gebruik gemaakt van een PVC-pijp met een lengte van 2.00 meter. Waarin op verschillende afstanden (0.15, 0.25, 0.50, 1.00 en 1.50 meter) van de opening druksensoren zijn aangebracht in de wand van de tunnel. Op 2.00 meter is ook nog een blastpencil geplaatst.



Figuur 3.9: De Proefopstelling

Vervolgens zijn er verschillende hoeveelheden slagsnoer voor de buis geplaatst en tot detonatie gebracht. Zodoende zijn zowel het ladinggewicht per oppervlakte W_{1D}, als de afstand R, bekend. Vervolgens kan dan met formule [2.4] de geschaalde afstand bepaald worden.

$$Z_{1D} = \frac{R}{W_{1D}}$$
[2.4]

Deze kan vervolgens in grafiek 2.5 ingevuld worden waarna de gemeten impuls vergeleken kan worden met de andere resultaten die de grafiek weergeeft.

3.4.2. Het ladinggewicht en de afstand

De variatie in de eerder genoemde afstanden in combinatie met verschillende ladinggewichten zorgt ervoor dat de geschaalde impuls over een redelijk bereik gecontroleerd kan worden. Bij de uitvoering is ervoor gekozen om de stukken slagsnoer op enige afstand voor de tunnel te plaatsen, om het beschadigen van de tunnelopening te voorkomen, zodat het experiment meerdere malen kan worden uitgevoerd met verschillende ladingen. Het slagsnoer is op een afstand van 10 centimeter voor de buis bevestigd, waarbij het aan beide zijden 10 centimeter voorbij de buis stak. Zodoende zijn er strengen van 0.50 meter slagsnoer gebruikt, effectief zit er dus 0.30 meter slagsnoer 'in' de tunnelopening. Bij het experiment is gevarieerd met de hoeveelheid slagsnoer, er is gebruik gemaakt van 1 tot 3 strengen. Zie figuur 3.10.



Figuur 3. 10: Variatie in ladinggewicht

De tunnel heeft een oppervlakte van 0.071m^2 , het slagsnoer heeft een explosieve massa van 12 gram per meter, met een TNT equivalentie van 1.27. Zodoende kan het ladinggewicht per vierkante meter bepaald worden (W_{1D}), er vanuit gaande dat de tunnel direct begint bij de springstof.

$$W_{1d} = \frac{0.3x0.012x1.28}{\pi x 0.15^2} = 0.065 \text{ kg/m}^2$$

Bovenstaande formule toont een voorbeeld berekening, hierbij is voor 1 streng slagsnoer met een effectieve lengte van 0.30m het ladinggewicht per oppervlakte berekend.

In tabel 3.5 is dit voor zowel 1, 2 als 3 strengen slagsnoer gedaan, met daarbij ook de Z_{1D} berekend.

R (m)	W _{1D} (kg/m²) 1 Streng	Z _{1D} (m ³ /kg)	W _{1D} (kg /m ²) 2 Strengen	Z _{1D} (m ³ /kg)	W _{1D} (kg /m ²) 3 Strengen	Z _{1D} (m ³ /kg)
0.25	0.065	3.85	0.130	1.92	0.196	1.28
0.35	0.065	5.54	0.130	2.69	0.196	1.79
0.60	0.065	9.23	0.130	4.62	0.196	3.06
1.10	0.065	16.92	0.130	8.46	0.196	5.61
1.60	0.065	24.62	0.130	12.31	0.196	8.16
2.00	0.065	30.77	0.130	15.38	0.196	10.20

Tabel 3. 5: Z_{1D} bepaald

Bovenstaande tabel toont de geschaalde afstanden die voortkomen uit de combinatie van de meetopstelling en het ladinggewicht. De meetresultaten van het experiment zullen in hoofdstuk 4 omgeschreven worden naar geschaalde impuls waarna deze in figuur 2.5 geplot kunnen worden.

3.4.3 Correctie voor de tunnelopening

Om de geschaald impuls correct te berekenen dient er een correctie op uitgevoerd te worden omdat de geschaalde impuls in eerste instantie gebaseerd is op het feit dat exact de helft van alle energie van de explosie de tunnelopening in gaat, in de praktijk is dit echter zeer onwaarschijnlijk[4]. Omdat een deel van de energie langs de tunnel gaat. Zie figuur 3.11.

Hiervoor dient dan ook een correctiefactor bepaald te worden om de geschaalde impuls te herberekenen. Bij de uitvoering van de experimenten zijn de strengen slagsnoer 10cm voor de tunnelopening geplaatst omdat dan de kans op beschadigingen van de tunnel kleiner is. De correctiefactor wordt als volgt bepaald:

Van de sferisch expanderende blastgolf gaat slechts een deel de tunnelopening in. Dit hangt samen met de hoek tussen het explosief en de tunnelwand.



Figuur 3.11: Correctiefactor bepalen

In figuur 3.11 wordt een situatieschets weergegeven.

De straal van de tunnel is 15 cm en de afstand tussen het explosief en de tunnelopening is 10 cm. Nu kan hoek α bepaald worden: tan $a = \frac{0.15}{0.10} \rightarrow a = 0.98 \ rad$.

De gehele hoek is 2x 0.98 rad. Deze hoek dient beschouwd te worden als een cilinder langs de tunnelopening. Zodoende wordt deze door π gedeeld, wat neerkomt op 2x0.98/ π . Dit komt neer op een factor van 0.62 van alle vrijkomende energie, oftewel 62% van de energie

Dit komt neer op een factor van 0.62 van alle vrijkomende energie, oftewel 62% van de energie verplaatst zich door de tunnel.

Deze correctie is kloppend voor een vierkante tunnel, in het geval bij dit onderzoek is echter gebruik gemaakt van een ronde tunnel. Dit houdt in dat de in figuur 3.12 blauw gearceerde delen niet dienen te worden meegenomen in het bepalen van de exacte correctiefactor.



Figuur 3. 12: Correctiefactor bepalen

Het percentage van het vierkant wat in de cilinder valt wordt als volgt bepaald:

$$\frac{A_{cil}}{A_{vk}} = \frac{\pi r^2}{4r^2} = \frac{\pi}{4}$$

 $4/\pi$ komt overeen met 0.785, of 78.5%.

Dit percentage gecombineerd met de eerder berekende 62% is het exacte percentage van de explosie energie welke de tunnel binnendringt.

 $0.785 \times 0.62 = 0.487$, dit wordt aangehouden als de correctiefactor bij het bepalen van de gecorrigeerde impuls in hoofdstuk 4.

3.4.4. De uitvoering

De proef is op verschillende manieren uitgevoerd, zoals hierboven al vermeld is. De uitvoeringsvolgorde is hieronder weergegeven. In hoofdstuk 4 wordt verder stilgestaan bij de resultaten.

Proef:	1a	1 streng slagsnoer
	1b	1 streng slagsnoer
	1c	1 streng slagsnoer
	2	2 strengen slagsnoer
	3	3 strengen slagsnoer

- 4 1 streng slagsnoer op karton
- 5 2 strengen slagsnoer op karton

Bijzonderheden: Computerstoring, geen meting Computerstoring, geen meting --

Tunnel gescheurd, hersteld met tape Tunnel kapot

De strengen slagsnoer zijn bij enkele experimenten op een stuk karton bevestigd. Dit heeft mogelijk voor enige reflectie gezorgd, maar dit zal blijken uit de meetresultaten en hier wordt verder op ingegaan in hoofdstuk 4.



Figuur 3.13: Slagsnoer op karton

Na de detonatie van een streng slagsnoer op karton vertoonde de tunnel enkele scheuren, en toen de tunnel belast werd met de schokgolf van twee strengen slagsnoer op karton brak de buis in stukken. Er wordt vanuit gegaan dat het opbreken van de tunnel geen grote gevolgen heeft voor de meetresultaten van deze proef, omdat het schokfront zich met een dusdanig hoge snelheid door de buis verplaatst dat het de sensoren al gepasseerd is voordat de buis geheel gebroken is. Het is wel mogelijk dat de sensoren op grotere afstand van het explosief een lagere waarde meten vanwege de mogelijkheid dat de druk kan ontsnappen via de scheuren.

Het opbreken van de tunnel heeft helaas geleid tot het voortijdig afbreken van de reeks experimenten.



Figuur 3.14: De tunnel kapot

3.4.5. Proef 6

Na de bovengenoemde test serie is er nog een zesde proef gedaan met een zelfde buis met een lengte van 1.5 meter. Waarbij op 0.5, 1.0 en 1.5 meter een blastpencil geplaatst is. Bij deze proef zijn maarliefst 10 strengen slagsnoer op een stuk karton bevestigd. Zie onderstaande figuur:



Figuur 3. 15: 1.5 meter buis met 10 strengen slagsnoer.



De uitwerking was, zoals te verwachten, destructief:

Figuur 3. 16: Resultaat na detonatie

Voor dit experiment moet net als beschreven in hoofdstuk 3.4.2 beschreven staat de Z_{1D} en de W_{1d} berekend worden.

$$W_{1d} = \frac{(0.3 \times 10) \times 0.012 \times 1.28}{\pi \times 0.15^2} = 0.652 \text{ kg/m}^2$$
$$Z_{1D} = \frac{R}{W_{1D}}$$

(kg/m ²) 10 Strengen	(m³/kg)
0.652	0.77
0.652	1.53
0.652	2.30
	(kg/m ²) 10 Strengen 0.652 0.652 0.652

Tabel 3. 6: Z1d bepaald

De correctiefactor bepaald in hoofdstuk 3.4.3 , 48,7%, zal ook bij dit experiment gehanteerd worden om de geschaalde impuls te corrigeren.

De verschillende proefopstellingen en gebruikte materialen zijn toegelicht in dit hoofdstuk en de grote variatie en complexiteit van de experimenten is beschreven. In het volgende hoofdstuk zullen de resultaten van de experimenten worden beschreven waarbij de afwijkingen in de meetgegevens geanalyseerd wordt.

4. De resultaten

Zoals de titel van dit hoofdstuk al aangeeft zullen in de onderstaande paragraven de resultaten van de experimenten gepresenteerd en geanalyseerd worden. Er wordt onderscheid gemaakt tussen de gegevens welke middels de meetsensoren verkregen zijn en de vervorming van de staalplaatjes.

Het meetrapport, met daarin de matlab grafieken, is terug te lezen in Appendix C. Hierbij is onderscheid gemaakt tussen de referentieproef C.1, de tunneltesten C.2, Grafiek 2.5 C.3 en proef 6 C.4.

Voor elk van deze proeven is gebruik gemaakt van computersoftware om exact de piekoverdruk en impuls te bepalen. Dit is veelal nauwkeuriger dan wanneer dit met de hand gedaan zou moeten worden. Het handmatig berekenen van de impuls dient per grafiek afzonderlijk te gebeuren, omdat geen enkele meting hetzelfde is. Een manier om de impuls te bepalen is middels een friedlander - curve[5]. Hiervoor is een formule opgesteld welke de kromming van de grafiek benaderd: $\alpha(Z) = 1.5Z^{-.38}$ [4.1]

De Z staat voor de geschaalde afstand.

In onderstaande grafiek is een schatting van de impuls uitgevoerd middels een driehoekbenadering, deze methode is relatief eenvoudig, maar ook minder nauwkeurig. In rode lijnen is een driehoek geplot, de oppervlakte onder deze driehoek zal vervolgens overeen moeten komen met de impuls die middels de software bepaald is. Zoals al valt te zien is het oppervlak onder de rode lijn groter dan dat onder het blauwe meetsignaal, dit geeft de onnauwkeurigheid aan.

Middels de driehoeksbenadering wordt de impuls berekend op: 118 Pa.s.

Het computerprogramma bepaald deze op 89 Pa.s. Deze methode is meer accuraat en daarom is besloten om in de rest van het rapport enkel de middels software bepaalde impuls te gebruiken, tenzij de grafiek te veel verstoringen vertoond.



Figuur 4.1: Impuls bepalen

4.1 De referentieproef

De schokgolf metingen van de referentieproef zijn beschreven in appendix C.1. In onderstaande tabellen worden alle relevante waarden weergegeven, tevens worden deze waarden vergeleken met de vooraf bepaalde waarden.
Afstan	Afstand 0.5 m				Vooraf			
				bepaald				
Proef	Piekoverdruk	Impuls	Vervorming	Piekoverdruk	Impuls	Vervorming		
	(kPa)	(Pa.s)	plaatje (cm)	(kPa)	(Pa.s)	plaatje (cm)		
1	6242	397	9.8	5800	165	4.9		
2	5021	221	9.6					
3	5783	305	9.5					

Van de metingen uitgevoerd op 0.5 m afstand van het explosief zijn de volgende resultaten bekend:

Tabel 4. 1: Resultaten 0.5m

De verschillende grafieken tonen alle drie redelijk wat verstoringen in het meetsignaal. De eerste proef toont de hoogste piekoverdruk, 6242 kPa, dit is te verklaren doordat er meer reflectie is opgetreden bij de staalplaat in vergelijking met de houten plank welke bij proef twee en drie gebruikt zijn.

In de grafieken behorende bij proef 1 en 3 zijn markante reflecties zichtbaar. Deze hebben invloed op het berekenen van de impuls middels de software. De vervormingen van de plaatjes komt bij elk van de proeven overeen, deze is echter wel ruim 4cm groter dan vooraf voorspeld was.

Van de metingen uitgevoerd op 1.0 m afstand van het explosief zijn de volgende resultaten bekend:

Afstan	Afstand 1.0 m				Vooraf			
				bepaald				
Proef	Piekoverdruk	Impuls	Vervorming	Piekoverdruk	Impuls	Vervorming		
	(kPa)	(Pa.s)	plaatje (cm)	(kPa)	(Pa.s)	plaatje (cm)		
1	1665	374	2.8	1800	237	3.7		
2	1391	195	1.0					
3	1570	442	3.2					

Tabel 4. 2: Resultaten 1.0m

Bij deze serie metingen valt op dat wederom in iedere grafiek grove verstoringen worden waargenomen. Het druk- tijd verloop is anders dan beschreven in paragraaf 2.1. De piekoverdruk valt veel sneller terug, dit heeft als gevolg dat er eigenlijk geen nette driehoek benadering kan worden uitgevoerd. De vervorming van de staalplaatjes toont ook enige variatie. De strip gebruikt bij proef drie was ingeklemd geraakt tussen de nokken. De relatief lage druk en impuls bij proef twee zijn waarschijnlijk de reden dat dit staalplaatje slechts 1.0cm is vervormd.

vanue	van de metingen ditgevoerd op 1.5 maistand van het explosier zijn de volgende resultaten bekend.							
Afstand 1.5 m				Vooraf				
				bepaald				
Proef	Piekoverdruk	Impuls	Vervorming	Piekoverdruk	Impuls	Vervorming		
	(kPa)	(Pa.s)	plaatje (cm)	(kPa)	(Pa.s)	plaatje (cm)		
1	602	205	1.2	630	191	2.0		
2	418	222	1.1					
3	612	205	1.0					

Van de metingen uitgevoerd op 1.5 m afstand van het explosief zijn de volgende resultaten bekend:

Tabel 4. 3: Resultaten 1.5m

Bij de serie metingen op een afstand van 1.5 meter valt direct de overeenkomst op tussen meting een en drie. Het verloop van deze grafieken komt overeen, net als de meetgegevens. Deze waarden komen ook goed overeen met de vooraf bepaalde druk en impuls. De tweede proef vertoont een minder duidelijke druk- tijd grafiek. Zie figuur C.11.

4.1.1 Conclusie referentieproef

Opvallend is dat bij elk van de proeven de gegevens voortkomend uit proef twee lager zijn dan die bij proef een en drie. De schokgolf is minder zwaar geweest dan bij de andere proeven. Een verklaring hiervoor is dat bij proef 1 een metalen grondplaat gebruikt is, en bij proef 2 enkel een dunne houten plaat. De derde proef is uitgevoerd met echter ook uitgevoerd met alleen de dunne houten plaat onder het explosief. De er is dan ook geen directe verklaring voor het verschil in resultaten tussen proef 2 en 3.

Onderstaande tabel toont de gemiddelde waarden van zowel de druk als de impuls, met in de rechter kolom de vooraf bepaalde waarden.

Resultate	en:		Vooraf			
				bepaald:		
Afstand	Gem.	Gem.	Gem.	Piekoverdruk	Impuls	Vervorming
	Piekoverdruk	Impuls	Vervorming	(kPa)	(Pa.s)	plaatje (cm)
(m)	(kPa)	(Pa.s)	plaatje (cm)			
0.5	5682	307	9.6	5800	165	4.9
1.0	1542	337	2.3	1800	237	3.7
1.5	544	210	1.1	630	191	2.0

Tabel 4. 4: Gemiddelde resultaten

Uit bovenstaande tabel blijkt dat bij elke afstand de piekoverdruk lager uitvalt dan vooraf bepaald, dit in tegenstelling tot de impuls welke hoger gemeten wordt dan vooraf is bepaald. De vervorming van de staalplaatjes komt ook anders uit dan vooraf bepaald. Op een afstand van 0.5 meter is de werkelijke vervorming ruim 4.5cm meer dan vooraf bepaald, daarbij is het plaatje geheel door de oplegging heen gedrukt. Dit heeft als gevolg dat de opleglengte ten tijde van de belasting steeds groter wordt, dit heeft als gevolg dat de vervorming hoger uitkomt dan vooraf is voorspeld. Op afstanden van 1.0 en 1.5 meter is de gemeten vervorming respectievelijk 1.4 en 0.9 cm minder dan vooraf bepaald.

De spreiding in de resultaten is opvallend, met name bij 1.0m afstand (tabel 4.2) zijn de verschillen in vervorming groot. Dit lijkt te komen door de variatie in de impuls, deze verschilt nogal bij de drie proeven.

4.2 Tunneltesten

Er wordt onderscheid gemaakt tussen de drie verschillende tunneltestseries. Per paragraaf wordt een test en de resultaten toegelicht. De grafieken met de gemeten drukken zijn opgenomen in appendix C.2

4.2.1 Tunneltest 1

Bij deze test was een dusdanig grote hoeveelheid slagsnoer op een zeer kleine afstand van het staalplaatje benodigd, dat is besloten om geen tunnelelement te plaatsen. Dit heeft als gevolg gehad dat er maar één blastpencil op de gestelde afstand de druk heeft kunnen meten. Daarbij moet tevens rekening gehouden worden met het feit dat de springstof op een kartonnen vel geplakt is om een vlak schokfront te creëren. Dit heeft als nadeel dat de gemeten druk (aan de bovenzijde van het karton) mogelijk lager is dan de druk die daadwerkelijk het stalen plaatje belast, zie figuur 4.2. Er zijn echter geen bronnen die het directe effect van karton kunnen kwantificeren. Met een lengte van 4.6m slagsnoer is het bevestigen op karton de enige, herhaaldelijk uit te voeren optie. Er moet echter wel onthouden worden dat delen van het karton onnauwkeurigheden in het meetsignaal kunnen veroorzaken.





Figuur 4. 2: Tunneltest 1

Tunneltest 1				Vooraf bepaald		
Proef	Piekoverdruk (kPa)	Impuls (Pa.s)	Vervorming plaatje (cm)	Piekoverdruk (kPa)	Impuls (Pa.s)	Vervorming plaatje (cm)
1.1	2890		8.9	5800	165	4.9
1.2	2007		8.1			
1.3	2323	160	8.6			

Tabel 4. 5: Resultaten tunneltest 1

De bovenstaande tabel toont de gemeten resultaten. Hieruit blijken al de zeer grote verschillen in de gemeten piekoverdruk. De gemeten impuls, zoals deze bepaald is met de computer software, waren niet bruikbaar. Er waren namelijk waarden berekend van respectievelijk 1502 en 40 Pa.s. De vooraf bepaalde druk is in de praktijk bij deze test niet gemeten, de vervorming van de staalplaatjes is groter dan vooraf voorspeld. De gemeten vervorming is ruim 3 cm meer dan vooraf voorspeld.

4.2.2 Tunneltest 2

De tweede tunneltest, waarbij de resultaten corresponderen met de referentieproef op een afstand van 1.0meter, is slechts twee maal uitgevoerd. De hoeveelheid slagsnoer zorgde er namelijk voor dat het tunnelelement in stukken sprong. Daarnaast is er nog een fout gemaakt bij de metingen, de software was onjuist ingesteld, waardoor de matlab grafieken niet bruikbaar zijn. Zodoende kan enkel de vervorming van het staalplaatje gemeten worden. Zie onderstaande tabel.

Tunneltest 2				Vooraf bepaald		mpuls Vervorming Pa.s) plaatje (cm)	
Proef	Piekoverdruk (kPa)	Impuls (Pa.s)	Vervorming plaatje (cm)	Piekoverdruk (kPa)	Impuls (Pa.s)	Vervorming plaatje (cm)	
2.1			0.2	1800	237	3.7	
2.2			0.6				

Tabel 4. 6: Resultaten tunneltest 2

4.2.3 Tunneltest 3

Bij de derde serie tunneltesten is dezelfde meetfout gemaakt waardoor de drukken boven de 700kPa niet waargenomen zijn. Dit is te lezen in Appendix C.2 . Hierbij is het nog wel mogelijk om middels extrapolatie een schatting te maken van de piekoverdruk, waarna de impuls berekend kan worden. Deze waarden zijn opgenomen in tabel 4.7.

Tunneltest 3				Vooraf bepaald			
Proef	Piekoverdruk (kPa)	Impuls (Pa.s)	Vervorming plaatje (cm)	Piekoverdruk (kPa)	Impuls (Pa.s)	Vervorming plaatje (cm)	
3.1	825	67	0.0	630	191	2.0	
3.2	950	85	0.0				
3.3	775	70	0.0				

Tabel 4. 7: Resultaten tunneltest 3

De juistheid van bovengenoemde druk en impuls in tabel 4.7 berust op extrapolatie van de grafiek, exact bepalen van de gegevens is zoals beschreven helaas niet mogelijk. Er kan echter wel worden gezegd dat de orde van grootte van deze geschatte getallen overeenkomt met de te verwachten meetresultaten. De grote afwijking met de vooraf bepaalde gegevens valt direct op, dit geldt ook voor de vervorming van het staalplaatje. De stalen strips vertoonden geen vervorming.

4.2.4 Conclusie tunneltesten

De resultaten van de drie afzonderlijke tunneltesten zouden op voorhand overeen moeten komen met de resultaten welke verkregen zijn bij de referentieproef. Na de analyse van de meetgegevens blijkt dit toch enigszins tegen te vallen.

Bij tunneltest 1 kon maar via één kanaal een meting gedaan worden, achter een stuk karton. dit verklaart mogelijk de lage piekoverdruk. De vervorming van het staalplaatje komt weldegelijk overeen met de vervorming welke is waargenomen bij de referentieproef, echter deze is groter dan vooraf bepaald.

De resultaten van de tweede test zijn, behalve het staalplaatje, niet bruikbaar in de vergelijking met de referentieproef. De vervorming van het staal was vele malen lager dan vooraf voorspeld. Dit komt zeer waarschijnlijk door een te lage impuls.

De derde test vertoonde veel gelijkenissen met de tweede tunneltest, hier was zelfs helemaal geen vervorming waarneembaar van de staalplaatjes. De resultaten van de drukmetingen berusten op een extrapolatie, hieruit komt naar voren dat de impuls vele malen lager is als vooraf voorspeld. Dit wordt dan ook gezien als de oorzaak van het niet vervormen van de staalplaatjes.

De proeven zijn allemaal uitgevoerd op de in hoofdstuk 3 beschreven wijze, helaas vallen de resultaten zoals gezegd in sommige gevallen tegen. Hier zal dieper op worden ingegaan in hoofdstuk 5, waar een algehele conclusie en aanbevelingen voor vervolgonderzoek worden gegeven.

4.3 Controle grafiek 2.5

Van de uitgevoerde experimenten zijn de meetgrafieken opgenomen in Appendix C.3. In onderstaande tabellen zijn de gemeten druk en impuls van de eerst vijf experimenten opgesomd. Hierin zijn de foutmetingen doorgehaald. Deze zullen in de verdere analyse buiten beschouwing worden gelaten. Hiervoor is gekozen omdat deze foutmetingen anders tot een verkeerde analyse van de resultaten kunnen leiden. Er zijn dusdanig veel metingen dat het wegstrepen van de foutmetingen geen afbreuk doet aan de nauwkeurigheid van de experimenten.

Proef:		1C	2	3	4	5
Kanaal	Afstand	Druk (kPa)	Druk (kPa)	Druk (kPa)	Druk (kPa)	Druk (kPa)
1	0.25	1085	950	1408	673	1408
2	0.35	689	1160	1221	1044	1305
3	0.60	298	544	688	245	715
4	1.10	215	354	477	152	551
5	2.00	121	192	289	115	286
6	1.60	176	324	414	165	400
7	0.60	435	1383	1139	404	680

Tabel 4. 8: Gemeten piekoverdruk

Proef:		1C	2	3	4	5
Kanaal	Afstand	Impuls (Pa.s)	Impuls (Pa.s)	Impuls (Pa.s)	Impuls (Pa.s)	Impuls (Pa.s)
1	0.25	67.8	97.3	108.8	71.1	109.9
2	0.35	61.9	86.7	101.4	63.9	288.3
3	0.60	48.4	109.5	208.8	69.0	157.4
4	1.10	89.7	133.0	262.2	81.9	165.1
5	2.00	64.6	95.7	126.8	61.4	99.9
6	1.60	106	143.5	281.2	89.6	202
7	0.60	42.4	170.4	180.4	88.6	165

Tabel 4. 9: Gemeten impuls

Om de gemeten impuls in te voeren in grafiek 2.5 is de geschaalde impuls benodigd. Deze wordt zoals reeds in hoofdstuk 2 beschreven is berekend. Hiervoor is de in tabel 3.5 beschreven W_{1d} benodigd.

De geschaalde impuls wordt als volgt berekend: $\hat{l_s} = \frac{i_s}{W_{1D}}$

Voorbeeld:

De geschaalde impuls behorende bij proef 1C op een afstand van 0.25m is:

$$\hat{\iota}_s = \frac{67.8}{0.065} = 1043 Pa \cdot s / (\frac{kg}{m^2})$$

Proef:		1C	2	3	4	5
Kanaal	Afstand	Geschaalde	Geschaalde	Geschaalde	Geschaalde	Geschaalde
		Impuls	Impuls	Impuls	Impuls	Impuls
	(m)	Pa· $s/(\frac{kg}{m^2})$				
1	0.25	1043	748	555	1094	845
2	0.35	952	667	517		2218
3	0.60		842	1065	1062	1211
4	1.10	1380	1023	1338	1260	1270
5	2.00	993	736	647	945	768
6	1.60	1631	1104	1435	1378	1554
7	0.60	652	1311		1363	1269

Onderstaande tabel toont de berekende geschaalde impuls van verschillende proeven:

Tabel 4. 10: Geschaalde impuls

R (m)	Z_{1D} (m^3/kg)	Z_{1D} (m ³ /kg)	Z_{1D} (m ³ /kg)
()	(11 streng)	(2 strengen)	(3 strengen)
0.25	3.85	1.92	1.28
0.35	5.54	2.69	1.79
0.60	9.23	4.62	3.06
1.10	16.92	8.46	5.61
1.60	24.62	12.31	8.16
2.00	30.77	15.38	10.20

Tabel 4.11: De geschaalde afstand

Bovenstaande waarden voor de geschaalde impuls kunnen in combinatie met de in tabel 4.11 vermelde geschaalde afstand, Z_{1D}, geplot worden in grafiek 2.5. Alvorens de resultaten vergeleken worden met de grafiek dient er echter nog rekening gehouden te worden met een correctiefactor.

De correctie:

Het percentage van de energie dat de tunnelopening binnengaat is reeds in hoofdstuk 3 bepaald op 48,7 procent. Dit heeft gevolgen voor het effectieve ladinggewicht per oppervlakte, de W_{1D} . Deze dient dan ook gecorrigeerd te worden met 48,7%.

Een andere W_{1D} heeft directe invloed op de geschaalde afstand, zodoende dient deze herberekend te worden.

Daarnaast wordt ook de afstand R gecorrigeerd omdat bij het experiment er 10cm tussen de tunnelopening en het explosief zat. Bij het bepalen van de W_{1d} is er echter van uitgegaan dat het explosief in de tunnelopening geplaatst is.

R (m)	W _{1D} (kg/m²) 1 Streng	Z _{1D} (m ³ /kg)	W₁D (kg /m²) 2 Strengen	Z _{1D} (m ³ /kg)	W _{1D} (kg /m²) 3 Strengen	Z _{1D} (m ³ /kg)
0.15	0.032	4.69	0.063	2.38	0.095	1.58
0.25	0.032	7.81	0.063	3.97	0.095	2.63
0.50	0.032	15.63	0.063	7.94	0.095	5.26
1.00	0.032	31.25	0.063	15.87	0.095	10.53
1.50	0.032	46.88	0.063	23.81	0.095	15.79
1.90	0.032	59.34	0.063	30.16	0.095	20.00

Onderstaande tabel toont de gecorrigeerde R, W_{1D} en Z_{1D}.

Tabel 4. 12: Gecorrigeerd waarden voor W_{1D} en Z_{1D}

Met de bovenstaande gecorrigeerde W_{1D} kan opnieuw de geschaalde impuls berekend worden, deze staan in onderstaande tabel opgesomd.

Proef:		1C	2	3	4	5
Kanaal	Afstand	Geschaalde	Geschaalde	Geschaalde	Geschaalde	Geschaalde
		Impuls	Impuls	Impuls	Impuls	Impuls
		Pa· $s/(\frac{kg}{m^2})$	Pa· $s/(\frac{kg}{m^2})$	$Pa \cdot s/(\frac{kg}{m^2})$	Pa· $s/(\frac{kg}{m^2})$	$Pa \cdot s/(\frac{kg}{m^2})$
1	0.15	2119	1544	1145	2241	1744
2	0.25	1934	1376	1067		4576
3	0.50		1738	2198	2156	2498
4	1.00	2803	2111	2760	2559	2621
5	1.90	2019	1519	1335	1919	1586
6	1.50	3313	2278	2960	2800	3206
7	0.50	1325	2705		2769	2619

Tabel 4. 113: Gecorrigeerd geschaalde impuls

De gecorrigeerde geschaalde impuls kan in combinatie met de gecorrigeerde geschaalde afstand geplot worden in grafiek 2.5.

4.3.3 De meetresultaten geplot in de grafiek

Om de resultaten goed te kunnen vergelijken is er voor gekozen om de meetresultaten van de proeven samen te voegen. Allereerst wordt de grafiek getoond waarin de gemeten piekoverdruk is geplot. Deze grafiek is tevens in groter formaat opgenomen in Appendix B.1.1, in deze grafiek worden de resultaten van de 5 proeven geplot. In Appendix B.1.2. zijn de 5 proeven wederom geplot, hier wordt echter enkel onderscheid gemaakt tussen de gecorrigeerde en ongecorrigeerde w_{1d}.



Figuur 4. 3: Gemeten piekoverdruk proef 1 t/m 5

Uit bovenstaande figuur blijkt dat de gemeten piekoverdruk bij elk van de proeven redelijk overeen komt met modellen die in de grafiek weergegeven zijn. De metingen komen in een enkel geval lager uit dan de geplotte lijnen. Hierbij is enkel gekeken naar de geschaalde afstand en niet naar de gecorrigeerde geschaalde afstand uit tabel 4.11.

Uit bijlage B.1.2 blijkt dat bij het corrigeren van de W_{1D} de verschillen met het model toenemen. Uit figuur 4.3 blijkt ook dat de invloed van het karton, gebruikt bij proef 4 en 5, geen duidelijk invloed heeft. De gemeten waarden in tabel 4.8 tonen dat de druk bij proef 5 op elk van de kanalen hoger dan die bij proef 2. Dit verband is echter niet te zien tussen proef 4 en 1.

Figuur 4.3 toont zowel de geschaalde als de gecorrigeerde geschaalde impuls van alle 5 de metingen. Deze grafiek is tevens in groter formaat opgenomen in Appendix B.2.



Figuur 4. 4: De (gecorrigeerde) geschaalde impuls proef 1 t/m 5

Uit bovenstaande figuur blijkt de grote variatie in metingen, zodoende wordt voor een betere analyse onderscheid gemaakt tussen de geschaalde en de gecorrigeerde geschaalde impuls. Deze worden elk in een separate figuur geplot.



Figuur 4. 5: Geschaalde impuls proef 1 t/m 5





4.3.4 Conclusies validatie grafiek 2.5

Uit bovenstaande 2 grafieken blijken veel overeenkomsten, zowel met de geplotte lijnen als tussen de metingen onderling.

Er wordt onderscheid gemaakt tussen wel en niet gecorrigeerde geschaalde impuls, deze verschilt namelijk vrij veel, dit blijkt ook goed uit de grafieken. De gecorrigeerde impuls bevindt zich veelal boven of rond de rode lijn, en de geschaalde impuls eronder. Hieruit blijkt wel dat een correctiefactor zeker van toepassing is om de schalingsmethode goed te gebruiken, de gehanteerde 48,7% uit paragraaf 3.4.3 blijkt te kloppen voor de nieuwe schalingsmethode voor wat betreft de impuls. Het gebruik van de correctiefactor zorgt voor een grotere afwijking tot het model bij de grafiek voor de piekoverdruk (Appendix B.1.2). Hieruit blijkt de dat de correctiefactor aan de hoge kant is. Het gebruik van karton lijkt bij proef 5, in relatie tot proef 2, tot een verhoging van de druk te zorgen(+23 % gemiddeld). Dit verband is echter niet waarneembaar bij proef 4 in relatie tot proef 1, hier is namelijk sprake van een daling van gemiddeld 17%. Dit heeft als gevolg dat het directe effect van het karton niet bepaald kan worden.

4.3.5. Proef 6

De zesde proef in deze reeks experimenten bestond uit een tiental strengen slagsnoer welke voor een buis met een lengte van 1.5 meter op een stuk karton bevestigd zijn alvorens deze tot ontploffing zijn gebracht. Het effect was vernietigend voor de PVC tunnel, zodoende is de proef één maal uitgevoerd. Van deze proef zijn de druk tijd grafieken opgenomen in Appendix C.4.

De gemeten druk en impuls zijn in onderstaande tabel weergegeven.

Afstand (m)	Druk (kPa)	Impuls (Pa.s)
0.5	3253	486
1.0	1078	252
1.5	813	479

Tabel 4. 14: Meetgegevens proef 6

Allereerst zal de geschaalde impuls bepaald worden met de in tabel 3.3 bepaalde W_{1d} . Deze is voor elke afstand in de volgende tabel weergegeven.

Afstand (m)	Geschaalde impuls Pa $\cdot s/(rac{kg}{m^2})$
0.5	745
1.0	387
1.5	735

Tabel 4. 125: Geschaalde impuls

In combinatie met de reeds bepaalde Z_{1d} kunnen deze waardes geplot worden in grafiek 2.5. De correctiefactor dient hier echter wederom niet buiten beschouwing gelaten te worden.

De correctie:

De factor van 48.7% wordt ook bij deze proef gehanteerd. De werkelijke hoeveelheid energie die de tunnel binnengaat is niet exact te bepalen, gezien het feit dat 10 strengen slagsnoer voor de opening geplaatst zijn zal de effectieve lengte van elke streng niet gelijk zijn. Daarnaast heeft het karton nog mogelijke invloed, zodoende kan dit percentage ook 5% hoger of lager uitvallen. Dit is gezien het feit dat de proef slechts één maal is uitgevoerd niet met zekerheid te zeggen.

De aangenomen correctiefactor leidt tot de volgende gecorrigeerde gegevens:

R	W_{1D}	Z _{1D}
(m)	(kg/m ²)	(m³/kg)
	10 Strengen	
0.5	0.317	1.58
1.0	0.317	3.15
1.5	0.317	4.73

Tabel 4. 16: Gecorrigeerde W_{1d} en Z_{1d}

Nu kan met de gecorrigeerde W_{1d} de geschaalde impuls herberekend worden:

Afstand (m)	Geschaalde impuls Pa $ s/(\frac{kg}{m^2})$
0.5	2350
1.0	1221
1.5	2319

Tabel 4.17: Gecorrigeerde geschaalde impuls

De gecorrigeerde geschaalde impuls kan in combinatie met de gecorrigeerde geschaalde afstand geplot worden in grafiek 2.5.

4.3.6 De meetresultaten geplot in de grafiek

In figuur 4.7 zijn de gemeten drukken uitgezet tegen de geschaalde afstand en in figuur 4.8 is hetzelfde gedaan voor de gecorrigeerde en geschaalde impuls.



Figuur 4. 7: Piekoverdruk proef 6

Uit bovenstaande figuur blijkt dat de gemeten piekoverdrukken in lijn liggen met hetgeen het model voorschrijft. De groene markers tonen de piekoverdruk uitgezet tegen de gecorrigeerde geschaalde afstand, hier is een grotere afwijking ten opzichte van het model te zien.



Figuur 4. 8: (gecorrigeerde) en geschaalde impuls

De geschaalde impuls en de gecorrigeerde geschaalde impuls zijn uitgezet tegen de geschaalde afstand. Uit figuur 4.8 blijkt dat de gecorrigeerde impuls eveneens in lijn ligt met de grafiek. Opvallend is dat de impuls gemeten op 1.0 meter afstand lager is als die op 1.5m. Dit duidt mogelijk op een fout in de meting, helaas is deze proef maar één maal uitgevoerd en zijn er dus geen resultaten beschikbaar om het mee te vergelijken.

4.3.7: Conclusie proef 6

De resultaten van in grote lijnen overeen met de grafiek. Met name de gemeten piekoverdruk sluit aan bij het model, het toepassen van de correctiefactor op de geschaalde afstand zorgt echter voor een grotere afwijking (figuur 4.7).

Wat direct opvalt bij de impuls is het feit dat die op 1.0 m lager uitvalt dan de impuls op 1.5 meter. Dit is te verklaren door de verstoring in het meetsignaal (figuur C.64).

De correctiefactor welke is toegepast lijkt te zorgen voor een grotere afwijking met de grafiek. Mogelijk dient deze minder dan 48.7% te zijn, aangezien een groter deel van de energie langs de buis gaat in plaats van erin. Vanwege de grote spreiding tussen de strengen slagsnoer is mogelijk de effectieve lengte slagsnoer voor de tunnelopening minder dan 0.3 meter.

Deze proef is zoals gezegd slechts eenmaal uitgevoerd vanwege het verniellende effect op de tunnel. Zodoende kunnen de resultaten niet worden vergeleken met een tweede proef.

De resultaten van elk van de uitgevoerde proeven is uitgebreid besproken en er zijn per testserie korte conclusies geformuleerd. In het volgende hoofdstuk zullen deze elk behandeld worden om tot de beantwoording van de hoofdvraag te komen.

5. Conclusie / Aanbeveling

In het voorgaande hoofdstuk is al bij elk van de experimenten een korte conclusie geschreven, met daarin de opvallende resultaten en gegevens. Onderstaande alinea's gaan daar nogmaals uitvoerig op in om uiteindelijk de onderzoeksvraag, welke in hoofdstuk 1 is opgesteld, te beantwoorden. De onderzoeksvraag luidde als volgt: Kunnen pyrotechnische experimenten met behulp van de nieuwe schalings-methode op correcte wijze worden teruggeschaald? Naast het beantwoorden van deze hoofdvraag zullen ook aanbevelingen worden gedaan voor

Naast het beantwoorden van deze hoofdvraag zullen ook aanbevelingen worden gedaan voor eventueel vervolgonderzoek.

5.1 Conclusie: referentieproef en de tunneltesten

De vooraf bepaalde drukken van de referentieproef kwamen goed overeen met de gemeten resultaten. De uitwerking van (hemi-)sferische explosies is immers al vele malen onderzocht en daarom goed te voorspellen. De uitwerking ervan op een constructieonderdeel, voor dit onderzoek een staalplaatje, bleek echter minder nauwkeurig te voorspellen. Dit resulteerde dan ook in een forse afwijking, op korte afstand van het explosief was de vervorming groter dan verwacht en op de grotere afstanden, 1.0 en 1.5 meter, was deze juist kleiner dan voorspeld. Deze verschillen ontstaan waarschijnlijk door het verschil tussen de gemeten en de vooraf bepaalde impuls.

Om de schalingsmethode te valideren was het van belang dat de resultaten, zowel de doorbuiging van het staal als de gemeten druk, van de tunneltesten overeenkomen met de resultaten van de referentieproef. Zoals in hoofdstuk 4 reeds aangehaald bleek dit niet bij elke test het geval te zijn, zodoende zijn enkele metingen niet bruikbaar geweest. Bij tunneltest 1 trad een vergelijkbare vervorming op van het staalplaatje als bij de referentieafstand 0.5meter. Tunneltest 2 en 3 hadden helaas veel onbruikbare drukmetingen en de vervorming van het staal was bij test 2 zeer gering en bij test 3 helemaal niet aanwezig.

Deze tegenvallende resultaten van de tunneltesten zijn mogelijk te verklaren doordat er geen vlak schokfront op een dergelijke korte afstand (15 tot 30 cm van de bron) gerealiseerd kan worden met een kleine hoeveelheid explosief materiaal. Daarnaast dienen fouten in de instellingen van de meetsoftware vermeden te worden om de bruikbaarheid van de resultaten te vergroten.

Enkel na het uitvoeren van de tunneltesten en de referentieproef kan dan ook niet geconcludeerd worden dat de schalingsmethode daadwerkelijk de beoogde resultaten boekt. De validatie van grafiek 2.4 toont echter wel betere resultaten. Maar er zal verder onderzoek gedaan moeten worden, suggesties hiervoor worden gedaan in hoofdstuk 5.3.

5.2 Conclusie: validatie van 'grafiek 2.5'

De resultaten van proeven die uitgevoerd zijn om de grafiek met de geschaalde impuls te valideren vertonen, zoals reeds beschreven in hoofdstuk 4, veel overeenkomsten met de voorgeschreven waarden. Uit de metingen blijkt echter wel dat er nog veel variatie in de druk zit, dit kan een gevolg zijn van reflecties in de tunnel alvorens er een vlak schokfront ontstaat. Het vlakke schokfront ontstaat namelijk pas als de reflecties zijn uitgedempt, hiervoor is afstand tussen het explosief en de sensor in de tunnelwand een vereiste. Bij de metingen zijn verschillen tot wel 400 kPa op de korte afstanden gemeten, op langere afstanden zijn deze beduidend minder.

Het gebruik van karton bij de experimenten heeft zorg gedragen voor een goede spreiding van het slagsnoer voor de tunnelopening, de mogelijke reflectie die hierbij zou kunnen optreden is daarbij buiten beschouwing gelaten. Uit de resultaten is wel een geringe verhoging van de druk waar te nemen bij een van de proeven waarbij gebruik is gemaakt van karton (Zie Appendix B.1). Er kan echter niet worden gesproken van een direct verband.

Het corrigeren van de lading met de correctiefactor van 48.7% zorgt voor een betrouwbaarder resultaat. Deze factor dient echter, mogelijk in combinatie met het effect van het karton, verder onderzocht te worden.

5.3 De hoofdvraag

Nu terugkomend op de hoofdvraag, of pyrotechnische experimenten met behulp van de nieuwe schalings methode op correcte wijze kunnen worden teruggeschaald, blijkt dat dit in de praktijk mogelijk is, mits veel factoren en onnauwkeurigheden uitgesloten kunnen worden.

Zo blijkt het gebruik van een PVC tunnel niet ideaal aangezien deze bij geringe belasting al scheurt of zelfs versplintert. Het gebruik van staal als constructie-element om de uitwerking van de explosie te bepalen is relatief eenvoudig en goed te vergelijken.

Maar los van het te gebruiken materiaal en alleen kijkend naar de theoretische onderbouwing en de bijbehorende grafieken blijkt de methode veel overeenkomsten te vertonen met de meetgegevens welke verzameld zijn gedurende dit onderzoek. Dus kan geconcludeerd worden dat de methode weldegelijk gebruikt kan worden om pyrotechnische experimenten op een juiste wijze terug te schalen. Om de methode nog grondiger te toetsen kunnen de onderstaande aanbevelingen in acht genomen worden.

5.4 Aanbevelingen

Als een dergelijk onderzoek nogmaals uitgevoerd kan worden, wordt aangeraden om de volgende aspecten extra aandacht te geven.

Allereerst de materiaalkeuze, uniformiteit bij de uitvoering van de experimenten is van belang, hiervoor dient een materiaal te worden gekozen dat voldoende voor handen is. In plaats van een Pvc-buis kan gekozen worden voor een stalen cilinder, deze zullen immers beter bestand zijn tegen de optredende krachten.

Daarnaast dient er een methode ontwikkeld te worden om verschillende ladinggewichten correct in of voor een tunnelopening te plaatsen. Het werken met karton is zeer eenvoudig, de effecten hiervan dienen echter wel nauwkeurig onderzocht te worden. Dit zal de meetnauwkeurigheid ten goede komen.

Voor het testen van een constructie-element zijn de opties beperkter, staal of aluminium is één van de weinige materiaalsoorten die hiervoor bruikbaar is. Essentieel hierbij is ook het exact weten van de materiaaleigenschappen van het te testen materiaal.

Andere aspecten waar nauwkeurig naar gekeken dient te worden zijn de wijze van oplegging en de schokgolfinteractie. De opleglengte wordt door de belasting namelijk groter en hiermee wordt in het voorspellen van de doorbuiging geen rekening gehouden. De schokgolfinteractie met het constructie-element en de mate van reflectie die optreed zijn factoren die eveneens meer aandacht nodig hebben bij vervolgonderzoek.

Als er wederom gewerkt gaat worden met een referentieproef en een geschaalde variant hiervan, dient een zo zwaar mogelijke referentieproef uitgevoerd te worden, omdat dan de geschaalde experimenten een zwaarder ladinggewicht nodig hebben.

Een ander aspect waar rekening mee gehouden moet worden is het ontstaan van een vlak schokfront, dit treedt namelijk pas op na enige afstand. Zodoende moet getracht worden gebruik te maken van langere tunnels, waardoor reflecties kunnen uitdempen. De lengte van de tunnel wordt echter voorgeschreven door de methode, dus dit is moeilijk te realiseren. Een andere optie zou zijn om de tunneldiameter te verkleinen. Dit heeft als gevolg dat wanneer dezelfde hoeveelheid springstof gebruikt wordt er een groter explosief oppervlak gecreëerd kan worden, waardoor reflecties sneller uitdempen.

Mochten bovenstaande aanbevelingen in toekomstige practica uitgevoerd kunnen worden, dan ben ik er van overtuigd dat de schalingsmethode in de toekomst als zeer accurate methode toegepast kan gaan worden. Deze methode kan dan voor zowel Defensie als het vakgebied pyrotechniek in het algemeen vele voordelen hebben.

Bibliografie

[1] Baker, W. C. (1983). *Explosion Hazards and Evaluation*. Amsterdam: Elsevier.

[2] Borgers J.B.W. and Vantomme J. van. (2012). *Scaling rules for tunnel testing.* Breda. [concept paper, nog niet gepubliceerd]

[3] Borgers J.B.W. (2010). *Blast Walls reviewed*. Presented at the 21 st Militairy Aspects of Blast and Shock (MABS) Symposium.

[4]Borgers J.B.W. (2008). A volume approach to predict airblast parameters. Presented at the 20 st Militairy Aspects of Blast and Shock (MABS) Symposium.

[5] Borgers J.B.W. (2008) *Improving the accuracy of blast parameters using a new friedlander curvature a.* Presented at the DoD Expolsives safety seminar 2008.

[6] Borgers J.B.W. (2012) *Blast characterization of Det-cord.* Presented at the 22 st Militairy Aspects of Blast and Shock (MABS) Symposium.

[7]Borgers J.B.W. (2013) The equivalent volume approach. Breda

[8] Borgers, J.B.W. (2012). *Pyrotechniek en Beschermingsconstructies*. Breda: NLDA. [college dictaat]

[9] Brode, H. (1955). Numerical solution of spherical blast waves. Journal of Applied Physics.

[10] CONWEP. (1991). Conventional Weapons Effects Program. Vicksburg: US Army Waterways Experimental Station. [computerprogramma]

[11] Kingery, C. B. (1984). *Airblast Parameters from TNT Spherical Air Burst and Hemispherical Surface Burst.* Aberdeen Proving Ground, Maryland : US Army Armament Research and Development Center.

[12] *National Counterterrorism Center*. (sd). Opgeroepen op 12 4, 2012, van NCTC: http://www.nctc.gov/site/technical/tnt.html

[13] Welleman, J. (2001). Basisboek toegepaste mechanica. Waltman.

Appendices

A: Matlab-script voor plastische vervormingen

B: Meetgegevens validatie grafiek 2.5 B.1: De gemeten piekoverdruk B.2: De geschaalde en gecorrigeerde impuls

C: Het meetrapport

C.1: De referentieproef C.2: De tunneltesten C.3: Grafiek 2.5 C.4: Proef 6

Appendix A: Matlab-script voor plastische vervormingen

Onderstaand matlab-script is gebruikt om de vervorming van de staalplaatjes met een bekende druk en impuls vooraf te voorspellen.

```
Ps=5800e3;
             % [Pa]
                          schokgolf definitie
Imp=165; % [Pa.s]
td=2*Imp/Ps; % [sec]
         % [m] lengte overspanning
1=0.20;
b=.04; % [m] breedte vh plaatje
t=2e-3; % [m] dikte vh plaatje
RHOstaal=7800;
                 % [kg/m3] dichtheid staal
E=2.1e11;
                % [N/m2] E modulus = Youngs modulus
SIGy=3.55e8;
                 % [N/m2] yield spanning
V=l*b*t;
Mass=V*RHOstaal;
I = (b + t^3) / 12;
k = (384 \times E \times I) / (5 \times 1^{3});
Mpl=SIGy*(b*t^2)/4;
Fe=Ps*b*l;
Ke=k;
Me=0.78*Mass;
Mp=0.66*Mass;
Rme=1e10;
Rmp=8*Mpl/l;
xel=Rme/Ke;xml=xel;
xe2=Rmp/Ke; xm2=xe2;
tN=2*pi*(Me/Ke)^.5;
 tmax=8*tN;
dt=tmax/nstap;
    x1(1) = 0;
    x2(1)=0;
    a1(1)=Fe/Me;
    a2(1)=Fe/Mp;
    for i=2:nstap
         t(i) = (i-1) * dt;
         tss(i)=t(i)/td;
         if t(i) <td</pre>
             Fi=Fe*(1-t(i)/td); % driehoekspuls
         else
             Fi=0;
         end
         if i<3
             x1(i) = 2 \times 1(i-1) - 0 + a1(i-1) \times dt^{2};
             x2(i) = 2 \times 2(i-1) - 0 + a2(i-1) \times dt^{2};
         else
             x1(i) = 2 \times 1(i-1) - x1(i-2) + a1(i-1) \times dt^{2};
             x2(i) = 2 x 2(i-1) - x 2(i-2) + a 2(i-1) + dt^2;
         end
                                                    if t(i) 
         if abs(x1(i))>xm1
                                        2
Rx1=0; end
            Rx1=Rme*sign(x1(i));
            xml=abs(x1(i));
         else
             Rx1=Ke*(abs(x1(i))-xm1+xe1)*sign(x1(i));
```

Waarna de volgende figuur geplot wordt.



Figuur A.1: Vervorming staalplaatje

Appendix B: Meetgegevens validatie grafiek 2.5

B.1.1: De gemeten piekoverdruk



Figuur B. 1.1: De gemeten piekoverdruk, proef 1 t/m 5

B.1.2: De gemeten piekoverdruk+ correctie Blauw: De gemeten piekoverdruk

Rood: De gemeten piekoverdruk, met gecorrigeerde W_{1d}





B.2: De geschaalde en gecorrigeerde impuls Blauw: De geschaalde impuls

Blauw: De geschaalde impuls Rood: De geschaalde en gecorrigeerde impuls



Figuur B. 2: De geschaalde en gecorrigeerde impuls proef 1 t/m 5

Appendix C: Het meetrapport

In onderstaande paragrafen worden de verschillende experimenten beschreven. De meetresultaten zullen middels matlab-grafieken getoond worden. Daarbij zullen kort de bijzonderheden vermeld worden. Ook wordt de vervorming van de staalplaatjes gemeten.

C.1: De Referentieproef

De referentieproef, zoals in 3.2 is beschreven, is drie maal uitgevoerd. De klimatologische omstandigheden zijn hierbij gelijk gebleven. Bij elke meting is gebruik gemaakt van dezelfde opstelling, met dezelfde sensoren en bijbehorende kabels. De wijze waarop de staalplaatjes aan de opstellingen zijn bevestigd is ook ongewijzigd.

De gebruikte hoeveelheid explosief is voor iedere proef op de gram nauwkeurig gewogen en ook daar waren geen variaties in.

Bij het experiment is de eerste keer gebruik gemaakt van de zware metalen grondplaat onder het explosief, deze is echter dusdanig vervormt dat hij niet meer bruikbaar was voor de tweede en derde test.



Figuur C. 1: De vervormde staalplaat

Zodoende is deze vervangen door een houten multiplex plaat met een dikte van 8mm. Het effect hiervan is dat een grotere krater ontstond en er dus mogelijk meer energie verloren is gegaan in de grond. Daarbij komt ook nog dat de hoeveelheid uitgeworpen grond mogelijk voor verstoringen in de meetgegevens heeft gezorgd. Hier wordt bij de resultatenanalyse dieper op ingegaan.

De resultaten:

De resultaten worden voor elk van de afstanden (0.5, 1.0 en 1.5 meter) afzonderlijk behandeld. Hierbij worden de meetgegevens van elk van de drie proeven naast elkaar gezet. Waarbij specifiek aandacht wordt besteed aan de maximale piekoverdruk en de oppervlakte onder de grafiek, de impuls. Zowel de piekoverdruk en de impuls zijn middels computersoftware (Matlab) bepaald. Ook zijn beide parameters met de hand gecontroleerd, om mogelijke meetonzuiverheden er uit te filteren.

0.5 meter



Figuur C. 1: Proef 1 0.5m

Deze meting toont een zeer hoge piekoverdruk (+7000kPa) op ongeveer 0.33msec, terwijl de eerste piekoverdruk op 0.27 6242 kPa als maximale waarde heeft. De tweede piek duidt op een verstoring van het meetsignaal, mogelijk is er een brokstuk of iets dergelijks tegen de pencil gekomen. De computersoftware berekend de totale oppervlakte onder de grafiek, deze komt zodoende op een impuls van 397 Pa.s.



Figuur C. 1: Proef 2 0.5m

Er is een hoge piek te zien, deze ligt in dit geval op 0.18 msec en heeft een waarde van 5021 kPa. De oppervlakte onder de grafiek is goed te bepalen een heeft een waarde van 221 Pa.s.



Referentieproef 3:

Figuur C. 2: Proef 3 0.5m

Bij de derde referentieproef vertoont de grafiek een piek van 5783 kPa op 0.09 msec, deze loopt daarna zeer snel terug naar de atmosferische druk. Vervolgens toont de grafiek nog enkele pieken tot op een hoogte van 2500 kPa. De impuls wordt berekend op 305 Pa.s. Het verloop van de grafiek is echter niet representatief voor een blastgolf en zal niet worden meegenomen in de verdere analyse.

Vervorming van de staalplaatjes:



Figuur C. 3: Vervormde staalplaatjes 0.5m

Bij elke van de metingen is zoals eerder is toegelicht een staalplaatje vrij opgelegd en belast met de schokgolf. Van links naar rechts zijn dit de resultaten van proef 1, 2 en 3. De vervormingen zijn:

Proef	Plaatje	Vervorming (cm)
1	1	9.8
2	4	9.6
3	7	9.5

Tabel C. 1: Vervorming 0.5m



1.0 meter Referentienroef



De bovenstaande grafiek toont een maximale piek op 0.5msec met een piekoverdruk van 1668 kPa. Waarna deze terugloopt richting de atmosferische druk, er zijn echter nog drie andere pieken waarneembaar in de grafiek. De totale impuls heeft een waarde van 374 Pa.s.



Referentieproef 2:



De meetgegevens van de tweede proef tonen een piek na 0.52 msec met een waarde van 1391 kPa. Tevens is er nog een tweede piek zichtbaar na 0.7msec, deze is mogelijk veroorzaakt door een storing in het meetsignaal. De impuls heeft een waarde van 195 Pa.s.



Referentieproef 3:



De eerste piekoverdruk wordt geregistreerd op 0.3msec. Vervolgens is er nog een tweede (hogere) druk gemeten op 0.45msec.

Dit zal worden beschouwd als een onzuiverheid in de meting en dus zo veel mogelijk buiten beschouwing gelaten worden. De eerst gemeten piekoverdruk heeft een waarde van 1570 kPa. De impuls heeft een waarde van 442 kPa.

Vervorming van de staalplaatjes:





Figuur C. 8: Vervormde staalplaatjes 1.0m Tabel C. 2: Vervorming 1.0m Figuur C. 7: Plaatje 8 ingeklemd

Plaatje

2

5

8

De vervorming van plaatje nummer 8 is significant groter dan de vervorming van de andere twee plaatjes. Dit is mogelijk te verklaren door het feit dat de impuls een waarde had van 443 Pa.s en die bij proef 2 slechts 195 Pa.s was, dit verklaart mogelijk de grotere doorbuiging.

Proef

1 2

3



1.5 meter Referentieproef 1:

Figuur C. 9: Proef 1 1.5m

De piekoverdruk heeft een maximale waarde van 602 kPa. De impuls die overeenkomt met deze grafiek heeft een waarde van 205 Pa.s. Er valt een kleine reflectie op na 1.7msec, deze heeft echter geen invloed op de parameters.



Referentieproef 2:



De gemeten piekoverdruk heeft een waarde van 418 kPa. Het verloop van de grafiek is opvallend, de druk daalt op 0.8msec bijna naar atmosferisch, waarna deze snel weer stijgt tot boven de 300kPa. De software berekent voor de impuls een waarde van 222 Pa.s.





Figuur C. 11: Proef 3 1.5m

Het verloop van figuur C. 12 vertoont veel gelijkenissen met figuur C.10. De gemeten piekoverdruk is 612 kPa. De impuls die bij bovenstaande figuur hoort is 205 Pa.s

Vervorming van de staalplaatjes:



Figuur C. 12: Vervormde staalplaatjes 1.5m

Op een afstand van 1.5m hebben de staalplaatjes de volgende vervormingen gekregen.

Proef	Plaatje	Vervorming (cm)
1	3	1.2
2	6	1.1
3	9	1.0

Tabel C. 3: Vervorming 1.5m

C.2 De tunneltesten

De resultaten van tunneltesten zullen uiteindelijk vergeleken worden met de resultaten van de bijbehorende referentieproef. Er zijn drie tunneltesten uitgevoerd, elk corresponderend met een bepaalde afstand van de referentieproef. Zoals beschreven in hoofdstuk 3 zijn de testen uitgevoerd. De resultaten worden per tunneltest behandeld.

Tunneltest 1 (4.6 m slagsnoer).



Figuur C. 13: Tunneltest 1.1

De grafiek van test 1.1 toont een vreemd verloop, de opbouw van de druk lijkt in stappen te gaan. De maximale druk heeft een waarde van 2890kPa. Daarnaast komen er ook meerdere pieken in voor, dit duidt mogelijk op reflecties of delen van het karton die de blastpencil raken. Zodoende is het niet eenvoudig om de impuls te bepalen. De software berekend een impuls van maarliefst 1502 Pa.s. De werkelijke impuls zal zeerwaarschijnlijk vele malen lager zijn, dit is echter niet uit de grafiek af te leiden.

Tunneltest 1.2:



Figuur C. 14: Tunneltest 1.2

Figuur C.15 vertoont een verstoring vlak voordat de maximale waarde bereikt wordt, de piek is 2007 kPa. Omdat de druk echter binnen zeer korte tijd weer atmosferisch is, (met vervolgens enkele verstoringen) is de impuls zeer laag. De software bepaald de impuls met een waarde van 40 Pa.s. Dit is een zeer groot verschil in vergelijking met test 1.1.



Tunneltest 1.3:

Figuur C. 15: Tunneltest 1.3

De derde en laatste test met dit ladinggewicht vertoont een betere druk –tijd grafiek. De piekoverdruk is 2323 kPa en de impuls is 160 Pa.s De drukopbouw is correct, echter zijn er nog enkel pieken te zijn bij 0.25msec en 0.32 msec.

Vervorming van de staalplaatjes:



Figuur C. 16: Vervormde staalplaatjes tunneltest 1

De beproefde staalplaatjes zijn in bovenstaande figuur weergegeven. De plastische vervorming is duidelijk waarneembaar. Met name plaatje 11 en 15 vertonen veel gelijkenissen. Plaatje 13, welke bij test 1.2 gebruikt is, is duidelijk minder vervormd. Dit kan mogelijk komen doordat de gemeten impuls vele malen lager was dan bij test 1.1 en 1.3.

De gemeten vervorming is als volgt:

Tunneltest	Plaatje	Vervorming (cm)
1.1	11	8.9
1.2	13	8.1
1.3	15	8.6

Tabel C. 4: Vervorming staalplaatjes

Tunneltest 2 (0.91 m slagsnoer).

Bij deze serie experimenten was er wel sprake van het gebruik maken van een tunnelbuis. Er werd 0.91m slagsnoer bevestigd zoals beschreven in hoofdstuk 3.2. Bij de uitvoering van het experiment beschadigden de buizen echter dusdanig dat deze proef maar twee keer is uitgevoerd.

De resultaten van test 2.1 en 2.2 zijn echter van dien aard dat deze niet in een bruikbare grafiek kunnen worden uitgedrukt. Onderstaande figuur is daar een voorbeeld van.



Figuur C. 17: Tunneltest 2.1/2.2

De computer operator heeft bij het experiment de software niet juist ingesteld, zodoende zijn de waarden boven de 700 of 140 kPa niet werden geregistreerd. Dit geldt voor zowel de sensoren als de blastpencil welke bij deze serie proeven gebruikt zijn. Het gevolg is een onbekende piekoverdruk en dat het bepalen van de impuls is ook niet mogelijk. Dit heeft uiteraard negatieve gevolgen voor het onderzoek, deze serie proeven zal buiten beschouwing gelaten moeten worden.

Vervorming van de staalplaatjes:



Tunneltest	Plaatje	Vervorming (cm)
2.1	10	0.2
2.2	17	0.6

Figuur C. 18: Vervormde staalplaatjes test 2. Tabel C. 5: Vervorming staalplaatjes

Ook bij deze test zijn staalplaatjes beproefd. De vervorming was echter minimaal, mogelijk komt dit doordat de PVC-tunnel kapot ging bij het experiment, waardoor de druk zich alzijdig kon uitzetten.

Tunneltest 3 (0.18 m slagsnoer).

Bij de derde serie tunneltesten was maar een geringe hoeveelheid slagsnoer nodig, 0.18m. Bij deze test is gebruik gemaakt van twee druksensoren in de wand van de buis en een blastpencil erboven. Helaas is ook bij deze serie dezelfde fout in de instellingen van de software geslopen waardoor pieken hoger dan 700 kPa afgevlakt worden. Van de drie meetsignalen vertoonde een kanaal storingen, zodoende is deze buiten beschouwing gelaten. De twee zuivere meetgrafieken zijn afgebeeld per proef.

Tunneltest 3.1:





0.55

0.6

100

In de bovenstaande figuren zijn de afgeplatte pieken duidelijk zichtbaar. Dit maakt het niet mogelijk de maximale piekoverdruk exact te bepalen.

0.7

time (msec)

0.75

0.65

Op basis van extrapolatie is echter geschat dat de piekoverdruk in figuur C.20 850 kPa is en de bijbehorende impuls 60 Pa.s bedraagt. Figuur C.21 toont een geschatte piekoverdruk van 800 kPa en een impuls van 75 Pa.s.

0.8

0.85









Figuur C. 22: Tunneltest 3.2

In de bovenstaande figuren zijn de afgeplatte pieken wederom duidelijk zichtbaar. Dit maakt het niet mogelijk de maximale piekoverdruk exact te bepalen. Van de bovenste grafiek kunnen de parameters nog bepaald worden, deze puls is echter dusdanig kort (0.05msec) dat deze niet als bruikbare meting beschouwd kan worden. In figuur C.23 wordt de piekoverdruk na extrapolatie geschat op 950 kPa en de impuls hierbij zou 85 Pa.s zijn.







Figuur C. 24: Tunneltest 3.3

In de bovenstaande figuren zijn de afgeplatte pieken duidelijk zichtbaar. Dit maakt het niet mogelijk de maximale piekoverdruk exact te bepalen. In figuur C.24 is na extrapolatie een druk van 850 kPa bepaald met een bijbehorende impuls van 70 Pa.s. De piek van de figuur C.25 grafiek is 698 kPa en de bijbehorende impuls is 36 Pa.s.

Vervorming van de staalplaatjes:



Tunneltest	Plaatje	Vervorming (cm)
3.1	12	0.0
3.2	14	0.0
3.3	16	0.0



 Tabel C. 6: Vervorming staalplaatjes

De staalplaatjes die bij deze testserie gebruikt zijn toonden geen enkele vervorming.

C.3: Validatie grafiek 2.5

De uitvoering

De testserie die uitgevoerd is om de schalingsmethode te valideren bestaat uit verschillende experimenten met een groot aantal metingen. Onderstaande opsomming toont de verschillende experimenten.

			Bijzonderheden:
Proef:	1a	1 streng slagsnoer	Computerstoring, geen meting
	1b	1 streng slagsnoer	Computerstoring, geen meting
	1c	1 streng slagsnoer	
	2	2 strengen slagsnoer	
	3	3 strengen slagsnoer	
	4	1 streng slagsnoer op karton	Tunnel gescheurd, hersteld met tape
	5	2 strengen slagsnoer op karton	Tunnel kapot

Bij proef 1 tot en met 5 zijn zes sensoren en een blastpencil gebruikt, de sensoren zijn op de volgende afstanden van het explosief geplaatst: 0.25, 0.35, 0.60 (2x), 1.1 en 1.6m. De blastpencil bevindt zich op 2.0m van het explosief. Op een afstand van 0.6m zijn twee sensoren geplaatst, dit is gedaan om de mogelijke verschillen in het schokfront te meten, de sensoren zijn onder een hoek van 90 graden ten opzichte van de tunnelwand geplaatst.

Onderstaande tabel toont welk meetkanaal overeenkomt met welke sensor in de wand van de tunnel.

Kanaal	Afstand	
1	0.25	
2	0.35	
3	0.60	
4	1.10	
6	2.00	(blastpencil)
7	1.60	
8	0.60	

Tabel C. 7

De meetgrafieken

Op onderstaande pagina's worden de matlab-grafieken met meetsignalen getoond, vervolgens zijn de impuls en piekoverdruk van de proef samengevoegd in een tabel. Daarbij is een kolom toegevoegd waarin opmerkingen geplaatst zijn over de betreffende meting.

Proef 1 a/b

De eerste twee testen zijn wegens een fout in de meetapparatuur niet bruikbaar. De resultaten worden dan ook niet verder geanalyseerd.

Proef 1 c

Onderstaande 7 grafieken tonen de waargenomen meetsignalen. Tevens is middels computer software de piekoverdruk en impuls berekend.






Figuur C. 27: Proef 1C, kanaal 2















Figuur C. 31: Proef 1C, kanaal 7



Figuur C. 32: Proef 1C, kanaal 8

4 4005 67.0	
1 1085 67.8	
2 689 61.9	
3 298 48.4 Te korte piek, onbruikba	ar
4 215 89.7	
5 121 64.6	
6 176 106	
7 435 42.4	

Tabel C. 8: Resultaten proef 1

Proef 2

Onderstaande 7 grafieken tonen de waargenomen meetsignalen. Tevens is middels computer software de piekoverdruk en impuls berekend.















Figuur C. 36: Proef 2, kanaal 4













77

Kanaal	Druk (kPa)	Impuls (Pa.s)	Opmerkingen
1	950	97.3	Lange stijgtijd
2	1160	86.7	
3	544	109.5	
4	354	133.0	
5	192	95.7	
6	324	143.5	
7	1383	170.4	Afgestompte piek

Tabel C. 9: Resultaten proef 2

Proef 3

Onderstaande 7 grafieken tonen de waargenomen meetsignalen. Tevens is middels computer software de piekoverdruk en impuls berekend.



Figuur C. 40: Proef 3, kanaal 1



Figuur C. 41: Proef 3, kanaal 2













79







Figuur C. 46: Proef 3, kanaal 7

Kanaal	Druk (kPa)	Impuls (Pa.s)	Opmerkingen
1	1408	108.8	Lange stijgtijd
2	1221	101.4	Lange stijgtijd
3	688	208.8	
4	477	262.2	
5	289	126.8	
6	414	281.2	Opvallende reflectie (2.15msec)
7	1139	180.4	Meetfout

Tabel C. 10: Resultaten proef 3



Onderstaande 7 grafieken tonen de waargenomen meetsignalen. Tevens is middels computer software de piekoverdruk en impuls berekend.











Figuur C. 49: Proef 4, kanaal 3













82





Kanaal	Druk (kPa)	Impuls (Pa.s)	Opmerkingen
1	673	71.1	Afgestompte piek
2	1044	63.9	Drukopbouw vertoont meetfout
3	245	69.0	
4	152	81.9	
5	115	61.4	
6	165	89.6	
7	404	88.6	Verstoring op 0.9msec

Tabel C. 11: Resultaten proef 4

Proef 5

Onderstaande 7 grafieken tonen de waargenomen meetsignalen. Tevens is middels computer software de piekoverdruk en impuls berekend.



Figuur C. 54: Proef 5, kanaal 1



Figuur C. 55: Proef 5, kanaal 2



Figuur C. 56: Proef 5, kanaal 3







Figuur C. 58: Proef 5, kanaal 5



Figuur C. 59: Proef 5, kanaal 6



Figuur C. 60: Proef 5, kanaal 7

Kanaal Druk (KPa)	impuis (Pa.s)	Opmerkingen
1 1408	109.9	Opvallende stijgtijd
2 1305	288.3	
3 715	157.4	
4 551	165.1	
5 286	99.9	
6 400	202	Correctie in grafiek
7 680	165	Correctie in grafiek

Tabel C. 12: Resultaten proef 5

C.4: Proef 6

Deze proef vertoont gelijkenissen met de 5 proeven die zijn uitgevoerd om grafiek 2.5 te valideren. Deze proef is slechts één maal uitgevoerd waarbij met drie blastpencils op verschillende afstanden (0.5, 1.0 en 1.5m) de druk gemeten is in een tunnel bij een explosie van 10 strengen slagsnoer.

Onderstaande grafieken tonen het druk tijd verloop.



Figuur C. 61: Proef 6, kanaal 1



Figuur C. 62: Proef 6, kanaal 2



Figuur C. 63: Proef 6, kanaal 3

Afstand(m)	Druk (kPa)	Impuls (Pa.s)	Opmerkingen
0.5	3253	486	Druk daalt zeer snel
1.0	1087	252	Veel reflectie pieken
1.5	813	479	Verstoring op 2.6 msec

Tabel C.13: Resultaten proef 6