



Explosief Practicum

Het ontwerpen van een serie reproduceerbare en valide testen voor een practicumdag explosie effecten



Kandidaat: Vaandrig M.P.J van Kaam
Begeleiders: Ir. J.B.W Borgers (Koninklijke Militaire Academie, Breda)
Prof. J. Vantomme (Koninklijke Militaire School, Brussel)

Brussel, 2006



Samenvatting

Dit onderzoek is een eindstudie, geschreven voor de promotie tot officier bij het Wapen der Genie aan de Koninklijke Militaire Academie (KMA) te Breda en het afronden van de Bachelor opleiding Civiele Techniek aan de Universiteit van Twente. Deze eindstudie is geschreven in samenwerking met de Koninklijke Militaire School te Brussel (België).

Het onderzoek is gericht op een serie ontwikkelde practicumproeven voor personen die geen of geringe kennis hebben van explosie-effecten. Voor dit onderzoek is een literatuurstudie naar explosie-effecten, mechanica en constructieleer gedaan. Vervolgens zijn drie proeven ontworpen die aansluiten bij kernonderwerpen uit de theorie over explosie-effecten. Deze proeven zijn een opstelling voor het bepalen van de piekoverdruk van een schokgolf, een opstelling voor de belastingverdeling op een constructie en een opstelling voor het vervormen van diverse profielen.

De proeven zijn getest en de resultaten zijn geanalyseerd. Bij de analyse is gelet op de reproduceerbaarheid van een testopstelling. Er wordt gekeken of een testopstelling continu dezelfde uitkomst geeft, of deze voor herhaling vatbaar is. Er is ook gekeken naar de validiteit van een testopstelling, waarbij de resultaten worden getoetst aan de vooraf gedane verwachting. De mate van reproduceerbaarheid en validiteit bepalen of een testopstelling geschikt is als practicumproef.

Er zijn drie goede illustratieve practicumproeven ontwikkeld die eenvoudig zijn en weinig voorbereiding nodig hebben. Het bepalen van de piekoverdruk in de eerste proef is goed voorspelbaar. De eerste proef sluit goed aan bij het beoogde leerdoel en laat duidelijk zien dat de uitgangspositie van de springstof een grote invloed heeft op de uitwerking. Het bepalen van de dynamische belasting op een constructie is in de tweede proef erg goed te voorspellen en meetresultaten laten duidelijk het drukverloop op de constructie zien. Er zijn voor de derde proef veel vorderingen gemaakt. Voor deze proef zijn veel testen ontwikkeld waaruit belangrijke lessen zijn getrokken. Na diverse proefmodellen is het goed gelukt om een vervormingproef te ontwikkelen die voor reproduceerbare uitwijkingen zorgt.



Summary

This paper is the final phase in the promotion to Engineering officer at the Royal Dutch Military Academy in Breda (Netherlands) and the completion of the Bachelor study Civil Engineering at the University of Twente (Netherlands), in coöperation with the Royal Military School (Belgium).

This research focuses on the development of a serie experiments about basic explosion theorie. The tests are develloped for people with little knowledge of explosion theorie. To this objective there was a literature study to the effects of explosions, mechanics and construction and three experiments have been constructed. The first experiment is the prediction of the peakoverpressure of a blastwave at a certain distance. Loads on structures will be predicted in the second experiment and the transformation of steel will be predicted in the third experiment.

After designing and testing, every experiment was analysed, and the approach of the experiment is discussed. In this discussion the scope lies in the reproduction and validation of an experiment. Reproduction is the relyability and the validation is the realness of an experiment. Discussing these key points will bring a final conclusion or neccesary improvements for the experiment.

Practice has indicated that there is a variety of explosion experiments which can be developed. However, devolpment of such an experiment takes a lot of preparation, planning and even more important, time and testing. The three experiments in this research are in need of little more attention before taken into account. An important part is the little time available for this research, where as many re-run's of tests as possible were made, a good statistical analyses requires more tests and thus more time.

In every experiment there are some differences between practice and theory, which isn't unexpected and some deflections cannot be explained. Despite a few differences, three very good tests are developed. The prediction of a peakoverpressure of a blastwave is very accurate with the result. The second experiment is a good illustrative test where minimum deflections were measured. And after lots of modelling and scaling a third test was developed for the plasticity of constructions with good reproducable qualities.



Voorwoord

Met dit eindwerk sluit ik het hoofdstuk voor academische vaardigheden aan de Koninklijke Militaire Academie af. Het schrijven van een scriptieonderzoek is voor mij een afsluiting van vier turbulente, maar belangrijke jaren. Een periode waarin veel gestudeerd werd, veel werd gereden tussen de Universiteit Twente en de KMA en veel weekenden aan de studie werden opgeofferd. Uiteindelijk wordt hard werken op de KMA beloond, door kansen om jezelf te ontplooiën en mogelijkheden die je horizon verbreden. Een grote kans voor mij was een afstudeerplek in Brussel, op de Koninklijke Militaire School in België, waar veel en grootschalig onderzoek mogelijk is en speciale apparatuur ter beschikking staat. Behalve het grote scala aan meetapparatuur is het zeer interessant en leerzaam om met buitenlandse collega's te mogen werken.

Graag wil ik een aantal mensen bedanken voor hun tijd en hun eindeloze begrip gedurende dit onderzoek. In het bijzonder bedank ik de prof. Vantomme voor het mogelijk maken van het onderzoek en ondersteuning bij theoretische vraagstukken. Veel dank gaat ook uit naar de Luitenant Desmet, voor zijn enorme behulpzaamheid. Het onderzoek was ook zeker niet mogelijk geweest zonder de heren Reymen en Verhagen voor de realisatie van ontwerpen. Daarnaast wil ik graag de Kapitein-commandant Den Hond en ondersteuning van het springterrein CEM te Brasschaat bedanken voor het mogelijk maken en hun hulp bij het testen van de vervormingproef. Uit Nederland wil ik mijn begeleider ir. J. Borgers bedanken voor het mogelijk maken van mijn eindstudie in Brussel en voor zijn tijd in de gehele controle. Als laatste bedank ik Adjudant M. van Hauter en Adjudant D. de Schacht voor een goede tijd op de KMS en de binnenstad van Brussel.

Al deze mensen wil ik complimenteren met hun professionele aanpak van zaken, waar ik veel van heb geleerd en waar ik in de toekomst nog vaak aan zal terug denken.

Getekend,

Marcel.P.J van Kaam,
Vaandrig der Genie



Inhoudsopgave

Inleiding	6
1 Onderzoeksopzet.....	7
1.1 Projectkader	7
1.2 Doelstelling	7
1.3 Begripsbepaling & Afbakening	7
1.4 Deelvragen.....	9
1.5 Opbouw van het onderzoek	9
2 Theorie.....	11
2.1 Explosie	11
2.2 Blast	12
2.3 Single Degree of Freedom	18
3 Proefopstellingen	26
3.1 Inleiding.....	24
3.2 Analyse van de proeven.....	25
3.3 Foutanalyse	26
4 Proefmodel voor het bepalen van piekoverdrukken	28
4.1 Proefomschrijving	28
4.3 Benodigde materialen	30
4.3 Berekeningen.....	30
4.4 Analyse	32
5 Proefmodel voor het bepalen van drukbelasting op een constructie	37
5.1 Proefomschrijving	37
5.2 Benodigde materialen	38
5.3 Berekeningen.....	39
5.4 Analyse van de resultaten.....	42
6 Proefmodel voor de vervorming van een constructie	46
6.1 Proefomschrijving	46
6.2 Excel als ondersteuning	47
6.3 Ontwerp van de opstelling.....	48
6.4 Berekeningen.....	56
6.5 Analyse van de resultaten.....	59
7 Conclusie & aanbevelingen	66
7.1 Conclusie.....	66
7.2 Discussie & aanbevelingen	67
Literatuurlijst.....	69
Bijlagen	68
Bijlage (1): Cd coëfficiënten	69
Bijlage (2): Ontwerp van een constructie voor dynamische belastingen	70
Bijlage (3): Werking van Excel programma	78
Bijlage (4): Eerste ontwerp vervormingproef	83
Bijlage (5): Reproduceerbaarheidproeven Drukproef 1	86
Bijlage (6): Reproduceerbaarheidproeven Drukproef 2	87
Bijlage (7): Reproduceerbaarheidproeven Drukproef 2 opstelling A	91
Bijlage (8): Reproduceerbaarheidproeven Drukproef 2 opstelling B	91
Bijlage (9): Reproduceerbaarheidproeven Drukproef 2 opstelling C	93
Bijlage (10): Eigenschappen piëzo-metrische drukmeter	95
Bijlage (11): Verificatietesten Blastpencil te Reek	97



Inleiding

Explosies komen veelvuldig voor. Kleine explosies, zoals het knappen van een fietsband, maar ook zeer grote zoals het exploderen van een vuurwerkfabriek (vuurwerkcramp Enschede, 13 mei 2001). Explosies kunnen een ongeluk zijn, maar kunnen ook zwaar werk verlichten. Denk hierbij aan het gebruik van springstoffen bij het slopen van een gebouw of in een steengroeve. Springstoffen worden niet alleen in de civiele wereld gebruikt, ook de krijgsmacht heeft met springstoffen te maken. In veel uitzendgebieden liggen mijnen en is losse munitie over het land verspreid of wordt hiermee geschoten. Kennis van de effecten van dergelijke springstoffen en opslag van eigen munitie verhoogt het bewustzijn van gevaren en daarmee de veiligheid van de troepen.

Het bestuderen van explosie effecten is niet eenvoudig en bestaat niet alleen uit een studie naar eigenschappen van springstoffen. Over de effecten van explosie effecten zijn veel boekwerken geschreven, maar die vereisen allen een redelijke voorkennis in mechanica, constructieleer en materialen.

Op de afdeling Bouwkunde & Polytechniek van de Koninklijke Militaire School (KMS) worden technisch aspirant officieren van de Belgische Krijgsmacht opgeleid. Deze officieren in opleiding krijgen in hun tweede studiejaar de cursus: “*Constructies onderworpen aan explosie belastingen*”. De cursus omvat de beginselen van explosie effecten en dient als basis om met kennis van zaken de bestaande handleidingen met betrekking tot springstoffen beter te begrijpen en vooral oordeelkundig te gebruiken.



1 Onderzoeksopzet

1.1 Projectkader

De theorie over explosie effecten is lastig en weinig illustratief. De praktijk is echter spectaculair en laat vaak een grote indruk achter over de kracht van springstoffen. Praktisch werken met springstoffen mist in de cursus “*Constructies onderworpen aan explosie belastingen*”. Een practicum is juist belangrijk, want het geeft een cursist een beter beeld en geluid bij de theorie. Een practicumdag over explosie effecten is een waardevolle toevoeging voor het beoogde effect van de cursus.

1.2 Doelstelling

Een practicumdag bestaat uit een serie proeven die de werking van een explosie op een constructie in een bepaalde situatie laat zien. De bijdrage van de serie proeven is dat de leerling beter bewust wordt van de effecten van explosies op constructies. Daarom zal het doel van deze studie zijn:

Het ontwerpen van een serie reproduceerbare en valide proeven voor een practicumdag explosie effecten, door een analyse te maken van deze proeven waarin constructies aan explosiebelasting worden blootgesteld.

1.3 Begripsbepaling & Afbakening

Om het onderzoek concreter en haalbaar te maken in de beschikbare tijd die gepland staat voor de scriptie, zijn een aantal randvoorwaarden opgelegd aan het onderzoek.



1.3.1 Test eigenschappen

Een randvoorwaarde is dat een proef reproduceerbaar moet zijn. Dit wil zeggen dat de uitkomst van de proef betrouwbaar is en continu hetzelfde resultaat laat zien. Een test dient tevens valide te zijn. Dit wil zeggen dat de test met gangbare theorieën verklaarbaar zijn. Om het nog concreter te maken dient de test zodanig te worden opgesteld, dat een leerling van de leerstoel Bouwkunde en Polytechniek zelfstandig een voorspelling kan geven over de uitkomst van de proef. Een test moet gemakkelijk zijn. De voorbereiding voor een opstelling moet in een kort tijdbestek gebeuren. Het streven is dat alle proeven in een of twee dagen door de leerling kan worden uitgevoerd.

1.3.2 Practicum locaties

De feitelijke practicumdag zal plaatsvinden in Brasschaat of in de bunker van de KMS in België. Het is daarom belangrijk dat het practicum zodanig is ingericht dat de aanwezige faciliteiten en meetapparatuur de beperkende factoren zijn in dit onderzoek. Verder is het belangrijk dat op geen enkele wijze de testen in strijd zijn met de aanwezige regelgeving op dat springterrein.

1.2.3 Theorie

De practicumdag dient cursusmatig te worden ingericht waarbij het leerdoel optimaal is. De proef moet illustratief zijn voor de leerling en hij moet vooraf een voorspelling kunnen maken van de proef. Dit wordt gerealiseerd met formules en theorie uit de aangeboden lesstof van de cursus. Er moet een duidelijke overlap en aansluiting zijn tussen de theorie en de praktijk, waarin de praktijk met de genoten theorie wordt onderbouwd. Dit wil zeggen dat de stof die wordt behandeld in [2] en [3] voldoende moet zijn om de proeven theoretisch te onderbouwen.

1.4 Deelvragen

In deze paragraaf zijn enkele deelvragen en sub deelvragen geformuleerd die stap voor stap worden beantwoord om aansluiting te vinden bij de doelstelling. Het beantwoorden van deze vragen zal op de achtergrond plaatsvinden. De vragen komen dus direct terug in het onderzoek, maar zullen in de komende hoofdstukken wel worden beantwoord.

- 1 Wat wordt bedoeld met explosie effecten?
- 2 Wat houdt de cursus in?
 - a. Welke onderwerpen worden behandeld?
 - b. Worden de onderwerpen in andere boeken nader uitgelegd?
- 3 Welke soorten constructies kunnen aansluitend op de theorie geproduceerd worden?
 - a. Wat zijn de beperkingen en kansen van de springlocaties?
 - b. Welke constructies zijn al gefabriceerd om mee te springen en wat zijn hun eigenschappen en beperkingen?
 - c. Welk materiaal is het meest geschikt voor springstofdemonstraties en wat zijn hun eigenschappen en beperkingen?
- 4 Welke effecten hebben de testen op de constructies?
 - a. Welke springstoffen gebruikt men op de KMS / Brasschaat?
 - i. Wat zijn diens eigenschappen en uitwerkingen?
 - ii. Wat zijn hiervan de beperkingen?
 - b. Hoe reageert een constructie op explosiebelasting?
- 5 Voldoen de constructies aan de gestelde criteria: reproduceerbaar, betrouwbaar, gemakkelijk en illustratief?

1.5 Opbouw van het onderzoek

Het onderzoek is in een paar facetten doorlopen. Allereerst is een literatuurstudie gedaan naar werking en uitwerking van blast en de vervormingeigenschappen van materialen zoals staal en aluminium. Voordat een test is ontwikkeld is gekeken naar de faciliteiten en mogelijkheden van de KMS en het CEM terrein in Brasschaat. Hierbij is vooral gekeken naar eenvoud en inspanning die noodzakelijk zijn voor de voorbereidingen van een proef, denk hier bijvoorbeeld aan voorschriften, het aanvragen van het springterrein, logistieke aanvoer van munitie en dergelijke. Aan de hand van de mogelijkheden is een eerste testopstelling per onderwerp ontworpen en is met behulp van gangbare theorieën een rekenmethode ontwikkeld. De



testopstellingen zijn daarna getest op reproduceerbaarheid en validiteit. Uit de resultaten volgt een analyse die bepaald of een testopstelling moet worden aangepast, of dat deze geschikt is als practicumproef.

De hoofdstukken zijn in dit onderzoek als volgt ingedeeld: hoofdstuk 2 beschrijft enkele basisonderwerpen over explosie eigenschappen. Dit hoofdstuk is een samenvatting van theorie die gebruikt is bij het ontwikkelen van de proeven. In hoofdstuk 3 staat een overzicht van de proeven en een inleidend verhaal over de wijze waarop de proeven zijn samengesteld, punten van kritiek en de omgang met fouten en correcties. Vervolgens wordt in hoofdstuk 4 de eerste proef behandeld. Hierin gaan we dieper in op de totstandkoming van de proef: de proefomschrijving, de testopstelling, berekeningen en de analyse van de resultaten. In hoofdstuk 5 en 6 worden respectievelijk de tweede en derde proef behandeld. In hoofdstuk 7 staan de conclusies en aanbevelingen per proef beschreven.



2 Theorie

2.1 Explosie

2.1.1 Definitie

Over het algemeen noemt men een proces een explosie wanneer de energie vrijkomt binnen een zeer korte tijd en in een beperkt volume zodat zich een drukgolf vormt van een eindige amplitude die zich van het explosiepunt af beweegt. De vrijgekomen energie kan in het systeem opgeslagen hebben gezeten als nucleaire, chemische, elektrische of drukenergie. De energie vrijgave wordt alleen explosief genoemd wanneer deze snel plaatsvindt en geconcentreerd genoeg is om een drukgolf te veroorzaken. Hoewel een explosie veel schade aan de omgeving kan aanrichten, hoeft deze niet altijd tot schade te leiden. Een eis is dat de explosie zo krachtig is dat hij hoorbaar moet zijn. [1]

Deze definitie heeft betrekking op explosies in de lucht, maar explosies kunnen zich natuurlijk ook voordoen in water of in de grond.

In de bovenstaande definitie staan een aantal begrippen welke enige toelichting nodig hebben. Zo zijn explosies gecategoriseerd in fysische, nucleaire of chemische processen. Dit is de zogenaamde oorzaak van een explosie. Het knappen van een fietsband of de eruptie van een vulkaan is een fysische explosie. Bij chemische explosies is er een snelle oxidatie van elementen (bijvoorbeeld koolstof en waterstof) die door middel van intense hitte, grote hoeveelheden energie leveren. Hier is de hoeveelheid energie afhankelijk van de eigenschappen van de elementen. De stabiliteit van elementen is tevens een belangrijk kenmerk. De elementen moeten op zich zelf, onder normale omstandigheden, stabiel zijn voor gebruik. Dan is er ook nog de nucleaire explosie. Nucleaire explosies halen hun energie uit een nucleaire reactie, waarbij de neutronen en protonen van verschillende nucleaire atomen worden gedistribueerd. De energie die vrijkomt uit een nucleaire reactie is vaak velen malen groter dan die van een chemische reactie. [9]

2.1.2 TNT Equivalentie

Er zijn veel verschillende springstoffen. Sommige springstoffen zijn makkelijker vervormbaar dan anderen of hebben hogere energetische eigenschappen. Afhankelijk van het probleem kiest men de meest geschikte springstof. Voor de berekening van springstoffen wordt altijd gerekend met het springstof TNT. Iedere springstof wordt namelijk geschaald naar een equivalente waarde TNT. De zogenaamde TNT equivalentie. De gebruikte springstof voor dit onderzoek is C4 Composiet. Deze hebben een hogere energetische waarde dan TNT, namelijk een factor 1,37. Voor een gedetailleerde beschrijving van TNT-equivalentie verwijs ik naar [10].

2.1.3 Detonatie

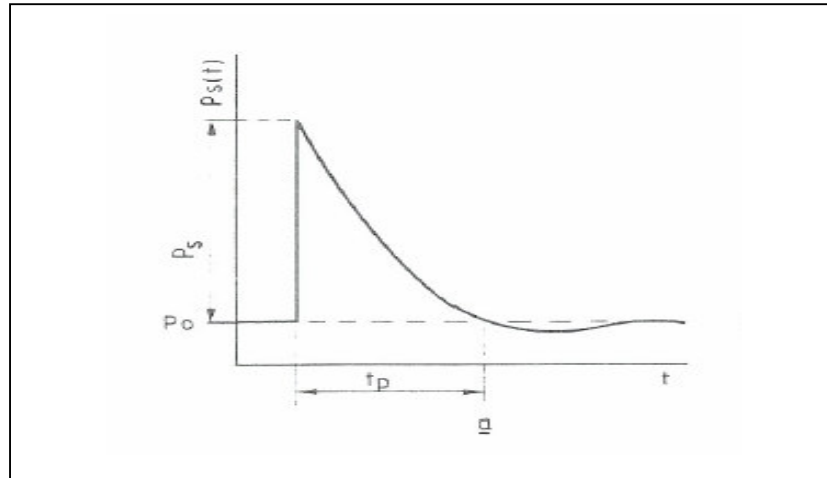
Springstoffen zoals TNT en C4 moeten geïnitieerd worden om een ontploffing te realiseren. Initiatie van dergelijke springstoffen geschiedt door detonatie. Een detonatie is een explosie waarbij de verbranding zich met supersone snelheid voortplant door een schokgolf. Toelichting: Een schokgolf is een zich voortplantende drukverhoging die tijdens het passeren het medium samenperst, waardoor dit tot reactie wordt gebracht. De snelheid waarmee een schokgolf zich voortplant heet detonatiesnelheid. Deze ligt bij explosieve gasmengsels tussen 1500 en 3000 m/s en bij vaste stoffen en vloeistoffen tussen 2000 en 8000 m/s. [11]

2.2 Blast

2.2.1 Definitie

Zodra de druk van een explosie vrijkomt, gebeurt dit in de vorm van een drukgolf. Er ontstaat een groeiende sferische bol vanaf het detonatiepunt. Deze drukgolf noemt men de blast van een explosie en is vaak te zien als een schokbeweging in de lucht. De blast van een springstof die door een detonatie wordt geïnitieerd heet een schokgolf. Zodra het schokfront van de blast een punt in de ruimte passeert, wordt er in zeer korte tijd een maximale druk bereikt. Dit gebeurt zo rap dat de drukopbouw als instantaan wordt gezien. Zodra het schokfront het punt in de ruimte heeft gepasseerd, zal de druk dalen tot de atmosferische druk. De tijd waarin dit gebeurt heet de positieve faseduur van de schokgolf. Na het bereiken van de atmosferische druk zal de druk verder dalen waardoor een trekkende beweging in de ruimte ontstaat, deze trekkende beweging heet de negatieve fase en zal langzaam afnemen waarna de druk

zal stijgen tot atmosferische waarden. De invloed van de negatieve fase is minimaal ten opzichte van de piekoverdruk en wordt daarom vaak verwaarloosd. In figuur 2.1 staat een illustratie van de piekoverdruk overgenomen uit [13].



Figuur 2.1

Het instantaan stijgen van de druk door een schokgolf noemen we de piekoverdruk (P_s). De piekoverdruk op een punt in de ruimte is afhankelijk van het gewicht van de lading en de afstand tot aan de bron. De piekoverdruk wordt bepaald door Brode: [1]

$$(1) \quad p_s = 6,7 + 1 \text{ [bar] als } p_s > 10 \text{ [bar]}$$

$$p_s = \frac{0,975}{Z} + \frac{1,455}{Z^2} + \frac{5,85}{Z^3} - 0,019 \text{ [bar] als } 0,1 < p_s < 10 \text{ [bar]}$$

Waarin de geschaalde afstand Z gedefinieerd is door:

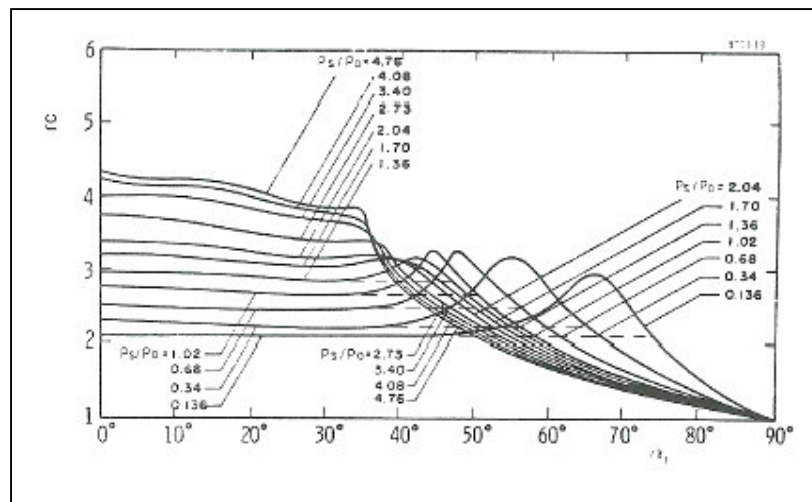
$$(2) \quad Z = \frac{R}{W^{1/3}}$$

De voorgaande definities en formules betreffen explosies in de lucht. Explosies kunnen ook op het land plaatsvinden, of onder water (laatst genoemde wordt niet verder behandeld). Een explosie in de lucht heet een *free air burst* of vrije explosie. Een explosie op het oppervlak heet een *Hemispherical surface burst* of oppervlakte explosie. Het verschil tussen beide is dat een ontploffing op de grond een grotere explosieve uitwerking heeft dan een ontploffing in de lucht. Om hiermee te kunnen rekenen moet in het ontwerp een modificatiefactor van 1,8 voor het gewicht van de lading worden gebruikt. Hiermee wordt bedoeld dat een oppervlakte explosie een

hogere energetische waarde heeft, namelijk 1,8 keer meer dan een vrije explosie. Opgemerkt dient te worden dat door de schokabsorberende eigenschappen van de grond een deel van de gereflecteerde schok wordt opgenomen. Indien het oppervlak de blastgolf perfect zou reflecteren, zou de modificatiefactor 2 zijn.

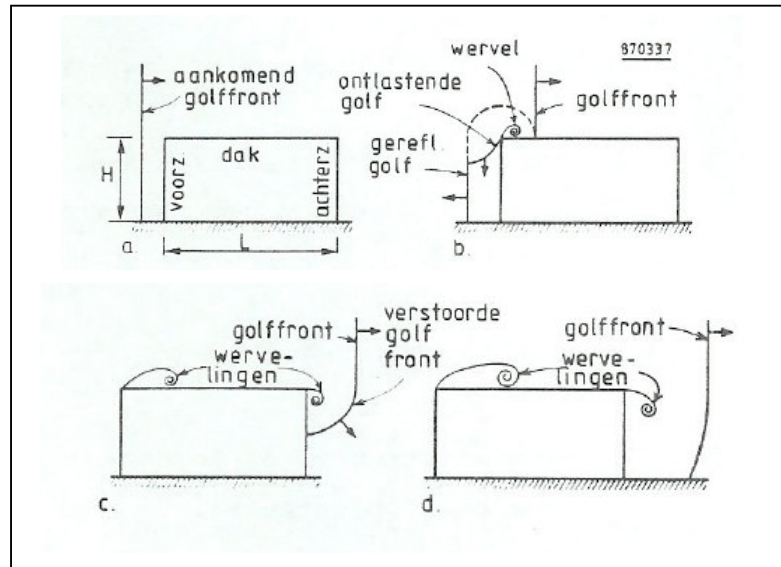
2.2.2 Reflectie ten gevolge van Blast

Zodra een blastgolf wordt gereflecteerd tegen het oppervlak, zal de energetische waarde stijgen. De factor waarmee de energetische waarde stijgt, is afhankelijk van de hoek van inval. Deze kan variëren van loodrechte (0°) tot zijdelingse (90°) inval. In de onderstaande figuur 2.2 kan men de reflectiefactor bepalen door de piekoverdruk te delen door de atmosferische druk.



Figuur 2.2: Reflectiefactor

Nu is de grond te beschouwen als een oneindig lange plaat. Wanneer een blastgolf stuit op een object met eindige afmetingen zal de blastgolf daar anders op reageren. Afhankelijk van de geometrie van een object, zal de blastgolf reflecteren, of eromheen verder uitdijen. In de figuur 2.3 wordt de werking van de blastgolf nader toegelicht. [13]



Figuur 2.3: Golffront

(a) Stel: een blastgolf raakt een constructie met een eindige lengte L en hoogte H loodrecht. Er zal een drukverhoging ontstaan in het midden aan de voorzijde van de constructie. Luchtdeeltjes zullen daar tot stilstand komen, maar worden door de aanhoudende druk verder worden samengedrukt, waardoor de druk nog verder stijgt. Dit kan resulteren in een drukverhoging die 2 tot 8 keer hoger ligt dan de oorspronkelijke piekoverdruk. [1] (b) Aan de hoeken zal de blastgolf met een krullende beweging om de hoeken heen draaien. De druk om de hoeken ligt lager dan aan de voorzijde, zodat een ontspanning plaatsvindt. (c) Het verschil in hoge en lage drukken doet wervelingen ontstaan die een gelijkverdeelde belasting uitoefenen op het dak, de side-on druk. (d) Aan de achterzijde zal de blastgolf naar beneden gaan neemt de druk toe en uiteindelijk dalen naar atmosferische waarde. [9] De gereflecteerde druk aan de voorzijde van de constructie als volgt is te berekenen:

$$(3) \quad P_r = 2p_s \cdot \left[\frac{7p_0 + 4p_s}{7p_0 + p_s} \right]$$

2.2.3 Dynamische druk ten gevolge van Blast

Met behulp van de gereflecteerde piekoverdruk kan de druk per zijde van het object worden berekend. Behalve de piekoverdruk, oefent de wind die veroorzaakt wordt door de explosie, ook een belasting uit op de constructie. Deze dynamische windbelasting wordt als volgt bepaald:

$$(4) \quad Q = \frac{5}{2} \cdot \frac{p_s^2}{7p_0 + p_s} [\text{Pa}]$$

De dynamische belasting wordt bepaald door Q te vermenigvuldigen met een factor C_d . Deze C_d factor is de dragcoëfficiënt van de constructie en is afhankelijk van de vorm van de constructie. In bijlage (1) staan de verschillende coëfficiënten. Waarbij de drag als volgt wordt berekend:

$$(5) \quad Q_d = C_d \cdot Q [\text{Pa}]$$

Met behulp van (5) kan men de stagnatiedruk berekenen. Nadat de ontlasting golf de hele voorzijde heeft afgelopen wordt daar de druk gelijk aan de stagnatiedruk. Deze druk is de som van de invallende piekoverdruk en de druk die de blastwind op de constructie uitoefent.

$$(6) \quad P_{\text{stag}} = p_s + Q_d [\text{Pa}]$$

Dynamische belasting aan de bovenzijde

Het dak en de zijgevels zijn evenwijdig met de voortplantingsrichting van de schokgolf. Hierop heerst dus de invallende druk P_s . Wegens de voortplanting van de schokgolf zijn drukken op ieder ogenblik in ieder punt verschillend. [2]

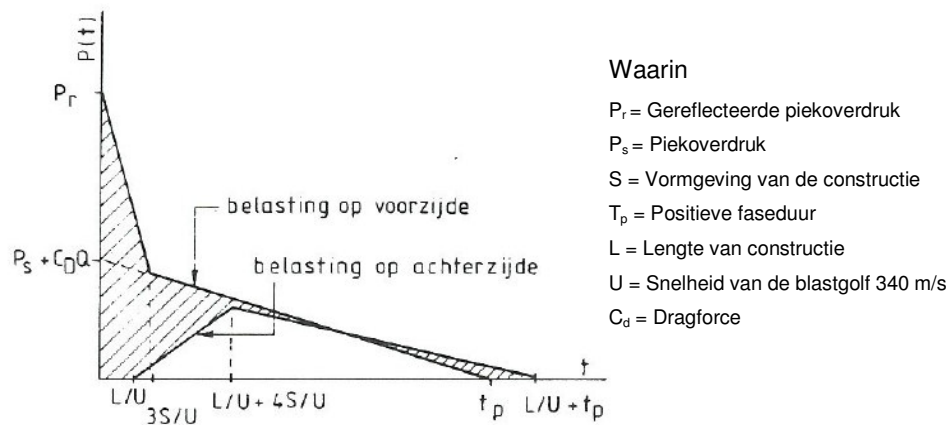
Dynamische belasting aan de achterzijde

Wanneer de blastgolf de achterzijde van de constructie bereikt, zal deze om de rand afgebogen worden, zodat er een compressiegolf over de achterzijde gaat lopen. Door de diffractie, zal de compressiegolf een meer geleidelijke druktoename met een eindige stijgtijd vertonen. Een paneel dat zich op een afstand d van de rand bevindt zal belast worden na een tijd d/U_s en bereikt een overdruk gelijk aan $(p_{\text{stag}} - p_d)$. De tijd die nodig is voor deze drukopbouw is bij benadering $2H/U_s$. [1]

De snelheid van de blastgolf wordt als volgt berekend:

$$(6) \quad U_s = 340 \cdot \sqrt{1 + \frac{6p_s}{7p_0}} \text{ [m/s]}$$

Als de drukken op de zijden van de constructie bekend zijn, kan eenvoudig de belasting op de constructie getekend worden.



Figuur 2.5: Dynamische belasting op constructie[13]

Zodra de blastgolf de constructie heeft bereikt, is er aan de voorzijde van de constructie sprake van een gereflecteerde piekoverdruk. De blastgolf zal zich vervolgens voortbewegen zoals beschreven in paragraaf 2.2.2. Op tijdstip $3S/U$ is er een ontspanning aan de voorzijde van de constructie. De druk hiervan ligt in het verlengde van de side on drukken en duurt tot het einde van de positieve faseduur. Op tijdstip L/U heeft de blastgolf de achterzijde van de constructie bereikt. De druk waaraan de constructie onderhevig is, is de druk aan de voorzijde minus de druk aan de achterzijde. Dit is het gearceerde deel van de figuur 2.5. [13]



2.3 Single Degree of Freedom

2.3.1 Inleiding

Een constructie die onderhevig is aan een explosie, hoeft niet direct in te storten of te beschadigen. Sommige materialen kunnen tot een zekere hoogte meebuigen met de blast, of voor een korte periode de belasting van de blastgolf weerstaan. Hoe een constructie reageert en of deze vervormt is afhankelijk van de grootte van de explosie enerzijds en de eigenschappen van de constructie anderzijds. In geval van een lineair elastisch materiaal zal de constructie zich in dezelfde staat stellen als voor de belasting. Vervormingen ontstaan in het plastische deel, waarin de uiterste toelaatbare elastische verplaatsing wordt bereikt. De constructie zal nu in een andere vorm staan dan voorheen.

De evenwichtstoestand van Newton is de volgende:

$$(7) \quad F_b = F_v + M \cdot a$$

Waarin: M = massa van de constructie
 a = de versnelling van de constructie

2.3.2 Statische belasting

Als een belasting langere tijd niet of nauwelijks verandert, spreekt men van statische belasting. Er ontstaan in de constructie interne spanningen door de belasting. Indien de constructie sterk genoeg is, zal het een evenwicht zoeken tussen de belasting F_b enerzijds en de interne spanning F_v anderzijds. De belasting is in dit geval niet onderhevig aan snelheid. Hierdoor wordt formule (3):

$$(8) \quad F_b = F_v$$

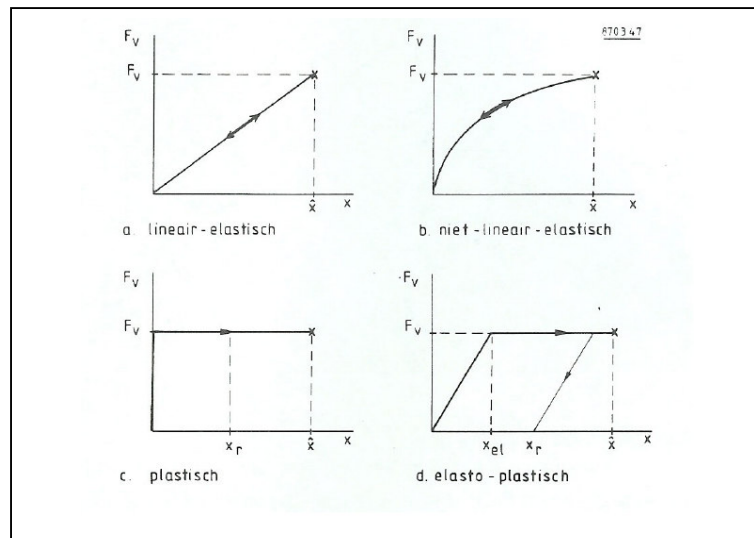
2.3.3 Dynamische belasting

Wanneer de belasting zeer snel verandert, zoals bij een explosie het geval is, dan spreekt men van een dynamische belasting. Door de snelveranderlijke belasting speelt de massa-traagheid een rol. [3] In een dergelijk geval gaan meerdere factoren

een rol spelen en ontstaat een dynamisch evenwicht tussen krachten en massa traagheid.

(9) $F_b \neq F_v$

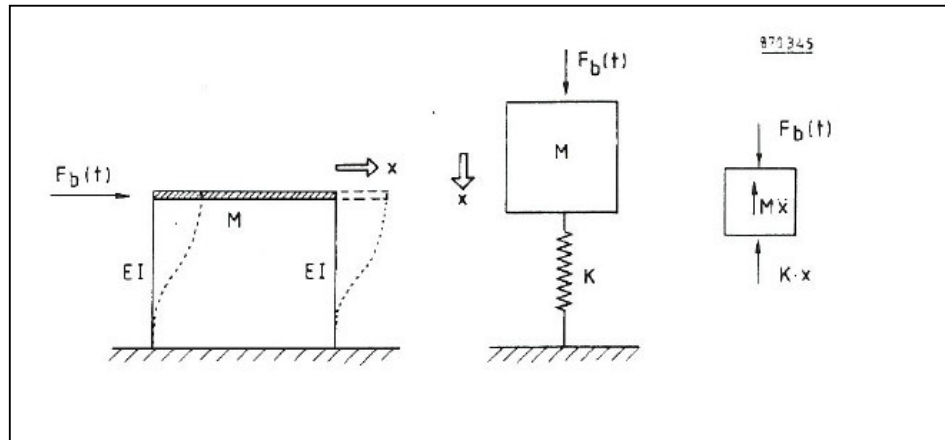
In figuur 2.6 staan de verschillende vervormingstadia van een constructie.



Figuur 2.6: Vervormingstadia

2.3.3 Single Degree of Freedom

Het bepalen van de respons van een constructie op een dynamische belasting is lastig. Om dit te vereenvoudigen wordt een vertaalslag naar een simpele benadering gemaakt. De meest eenvoudige benadering is de Single Degree of Freedom (SDOF), of Een Massa Veersysteem. Het evenwicht van een SDOF systeem wordt geïllustreerd in figuur 2.7 overgenomen uit [2]:



Figuur 2.7: Single Degree of Freedom

$$(10) \quad M_e \cdot \ddot{x} + c \cdot \dot{x} + K_e \cdot x = F_e(t)$$

Om een constructie om te schrijven naar een SDOF stelsel worden een equivalente massa (M_e), belasting (F_e) en veerstijfheid (K_e) bepaald. Deze worden bepaald door de waarden te vermenigvuldigen met een transformatiefactor. [15]

	K_m	K_l	K_k	K_{lm}
Elasticiteit	0,26	0,36	0,38	0,62
Plasticiteit	0,33	0,50	-	0,67

Tabel 2.1: Transformatie factoren voor eenzijdig ingeklemde constructies

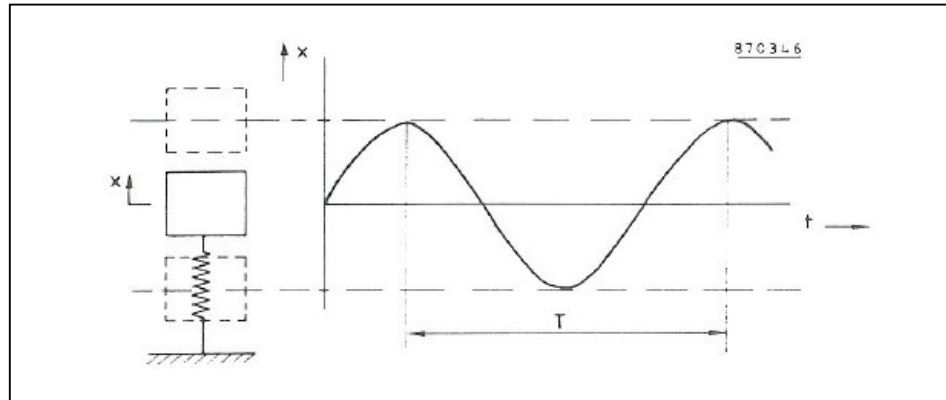
Een constructie onder een dynamische belasting zal gaan bewegen, waarbij dempende eigenschappen van de constructie de beweging uiteindelijk doen stoppen. Deze demping wordt gedefinieerd door middel van c .

2.3.4 Ductiliteit

Elke materiaalsoort heeft andere vervormingeigenschappen. Zo kan staal bijvoorbeeld meer plastisch vervormen dan gietijzer. De verhouding tussen de plastische vervorming en de elastische vervorming noemt men ductiliteit. Hoe hoger de ductiliteit, des te hoger zijn de vervormingeigenschappen van het materiaal. Staal heeft een maximale ductiliteit van ongeveer 15 en zal bij een grotere uitwijking scheuren of breken. De ductiliteit wordt bepaald door: [7]

$$(11) \quad \mu = \frac{x_{\max}}{x_e}$$

De ductiliteit kan ook op een andere manier worden berekend. Nadat het equivalente systeem is bepaald, kan door middel van de belasting tevens de ductiliteit worden bepaald. Hierbij zijn de eigentrillingstijd en de duur van de belasting belangrijk. De eigenfrequentie is de mate waarin de constructie beweegt nadat deze door een dynamische belasting in beweging is gezet.



Figuur 2.8: Eigentrillingstijd

De eigenfrequentie wordt gevonden door (6) te integreren [12]

$$(12) \quad f_n = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{K_e}{M_e}}$$

De eigen trillingstijd, die nodig is om de gehele trilling te beschrijven:

$$(13) \quad T_n = \frac{1}{f_n} = 2\pi \cdot \sqrt{K_{lm} \cdot \frac{M_k}{K_b}}$$

Afhankelijk van de belastingduur spreekt men van een impulsieve of een quasi-statische faseduur, het zogenaamde belastingregime. Bij een impulsieve belasting is de duur van de belasting kort vergeleken bij de eigentrillingstijd. Bij een quasi-statische belasting is de eigentrillingstijd kort vergeleken bij de belastingduur. Om te bepalen tot welk belastingregime de blastgolf hoort gebruikt men de volgende formule:

$$(14) \quad \frac{x_{\max}}{x_{\text{stat}}} = 2 \cdot \frac{\pi T}{T_n}, \text{ waarbij } T = \frac{t_0}{2}, \text{ indien driehoekimpuls}$$

Voor de grenzen tussen de verschillende domeinen neemt men in de praktijk [2]

Impulsdomein: $2 \cdot \frac{\pi \cdot T}{T_n} \leq 0.4$

Quasi statisch domein: $20 \leq 2 \cdot \frac{\pi \cdot T}{T_n} \leq 40$

Dynamisch domein: $0,4 \leq 2 \cdot \frac{\pi \cdot T}{T_n} < 20$

Na het bepalen van het juiste domein kan de ductiliteit worden berekend. Wanneer de $\mu \leq 1$ spreekt men van een elastische uitwijking. In een dergelijke situatie is het materiaal weer naar zijn oorspronkelijke vorm terug verbogen. Wanneer de $\mu > 1$, is er sprake van een plastische uitwijking en is er een zichtbare uitwijking te constateren. Het materiaal staat nu in een andere uitgangspositie. Men rekent verder met de plastische benaderingswijze.

Indien sprake is van een impulsieve belasting, dan wordt de ductiliteit als volgt bepaald:

$$(15) \quad \mu = \frac{P \cdot \pi \cdot t_0}{R_m \cdot \tau}, \text{ in elastisch geval; } \mu \leq 1$$

$$\mu = \frac{1}{2} \cdot \left[\left(\frac{P \cdot \pi \cdot t_0}{R_m \cdot \tau} \right)^2 + 1 \right], \text{ in plastisch geval}$$

In het geval van quasi-statische belasting wordt de ductiliteit bepaald door:

$$(16) \quad \mu = \frac{2 \cdot P}{R_m}, \text{ in elastisch geval; } \mu \leq 1$$

$$\mu = \frac{1}{2} \cdot \frac{(1 - P)}{R_m}, \text{ in plastisch geval}$$

In het geval van dynamische belasting wordt de ductiliteit bepaald door:

$$(17) \quad \frac{P}{R_m} = \frac{\tau}{\pi \cdot t_0} \cdot \sqrt{2\mu - 1} + \frac{1 - \frac{1}{2\mu}}{1 + 0,7 \cdot \frac{\tau}{t_0}}, \text{ voor } \mu \geq 1$$

Een derde manier om de ductiliteit te bepalen is door middel van uitlezen in een grafiek. Hier wordt verder niet meer op ingegaan en verwijs ik naar [1]. De ductiliteit is



de plasticiteit ten opzichte van de elasticiteit en met behulp van (10) kan de verwachte uitwijking worden bepaald. Namelijk:

$$(18) \quad \mu = \frac{x_{\max}}{x_e} \rightarrow x_{\max} = \mu \cdot x_e$$

Tot slot:

Dit hoofdstuk is een korte samenvatting van de benodigde theorie bij het berekenen van de hierna volgende practicumproeven. Het is aangeraden indien dit hoofdstuk voor de lezer onduidelijk is, het dictaat [1] of [3] door te nemen.



3 *Proefopstellingen*

3.1 Inleiding

De proeven hierna beschreven, zijn ontwikkeld aan de hand van de theorie die staat beschreven in de collegedictaten [2] en [3]. Deze dictaten worden ook gebruikt door cursisten van de KMS. De proeven beslaan enkele kernonderwerpen van de lesstof en zijn ook naar moeilijkheidsgraad ingedeeld. Waarbij de eerste proef gemakkelijk is en de laatste het moeilijkst.

Bij de ontwikkeling van de proeven is getracht de modellen zo dicht als mogelijk aan de theorie te laten sluiten door het creëren van de meest ideale situatie waar weinig of geen variabelen optreden. De proeven zijn als schoolmodellen opgezet. Hiermee wordt bedoeld dat de proeven zijn aangepast op de theorie. In de praktijk worden veelal aannames en concessies gemaakt. In de praktijk zijn namelijk veel extra parameters en variabelen aanwezig zijn. Denk hierbij aan verandering van temperatuur of aanslag op een staalstructuur door de jaren heen, oneffenheden in terrein of obstakels en fragmenten die kunnen rondvliegen. In de proeven is beoogd de invloed van deze factoren zo klein mogelijk te houden, door opstellingen steeds opnieuw op te bouwen. Door de proeven te doen in een betrouwbare harde testruimte en door het gebruik van nauwkeurige meetmiddelen. Zo blijft het rekenen met explosies eenvoudig en leuk. De onderwerpen die worden behandeld zijn:

- 1 Het rekenen aan een blastgolf
- 2 Het rekenen aan belasting op een constructie
- 3 Het rekenen aan vervorming van een constructie

Ad1 Het rekenen aan een blastgolf

De eerste proefopstelling is gemakkelijk, vereist minimale kennis van explosie effecten en is een introductie op de volgende proeven. Bij deze proef wordt een explosief op de grond op een bepaalde afstand van de drukmeter gelegd en tot detonatie gebracht, waarbij de druk wordt voorspeld en gemeten. Deze proef wordt meerdere malen herhaald waarbij het explosief telkens in een andere uitgangspositie verkeert,



bijvoorbeeld in de lucht of op een grotere afstand. Daarna worden de resultaten van de diverse proeven met elkaar vergeleken en enkele vraagstukken beantwoord.

Ad2 Het rekenen aan belasting op een constructie

Met deze proef wordt een geschaald gebouw op een afstand met een explosief belast. De belasting van de blastgolf zal op een bepaalde manier over de constructie verdeeld worden. Deze verdeling wordt van te voren voorspeld en nadien worden de berekeningen met de resultaten vergeleken. De moeilijkheidsgraad van deze proef ligt al iets hoger dan zijn voorganger, voor deze opgave is het daarom aangeraden [2] en [3] door te lezen.

Ad3 Het rekenen aan vervorming van een constructie

De laatste opgave is een stuk ingewikkelder en voor het juist uitvoeren van deze proef dient men [3] bestudeerd te hebben. De laatste opgave gaat over de vervorming van een constructie door dynamische belasting. Er moet worden vermeld dat er bij de voorbereiding vele opstellingen zijn ontwikkeld. Helaas vertoonde iedere testopstelling wel gebreken waardoor de theorie niet aansloot bij de praktijk. Hierbij ontstonden de grootste gebreken in de theoretische benadering van de constructie, zo werden opstellingen te licht uitgevoerd, of juist te zwaar en werd duidelijk dat de praktijk nog nauwer sluit dan de theorie. In de laatste proef is na veel ontwerpen een opstelling ontwikkeld dat goede reproduceerbare resultaten oplevert, maar nog geen valide resultaten. Doordat de beschikbare tijd was verstreken was het niet mogelijk om de opstelling aan te passen tot zijn uiteindelijke vorm. Daarom wordt in de laatste proef de laatste opstelling besproken en worden de aanpassingen aangedragen die waarschijnlijk nodig zijn om juiste vervormingen te krijgen. Hiervoor is verder testen wel noodzakelijk.

3.2 Analyse van de proeven

In de volgende hoofdstukken worden de proeven ruimschoots behandeld. Van iedere proef wordt eerst een proefomschrijving en een schematische voorstelling gegeven. Vervolgens wordt beschreven welke materialen er voor de proef benodigd zijn. Dan wordt per proef de schematische voorstelling berekend. Vervolgens wordt de opstelling getest en de resultaten geregistreerd. De resultaten van de test worden vergeleken met de verwachting. Hierbij wordt gelet op de reproduceerbaarheid en de validiteit van een test. Reproduceerbaarheid betekent de betrouwbaarheid van de proef. Is de proef betrouwbaar, geeft herhaling continu hetzelfde resultaat? Om de



reproduceerbaarheid van een testopstelling te garanderen zijn per opstelling, drie herhalingstesten uitgevoerd. Het is in de springbunker van de KMS en bij kleinschalige NAVO onderzoeken gebruikelijk dat reproduceerbaarheidstesten bestaan uit drie herhalingen. Aan de hand van die drie proeven wordt dan een beslissing gemaakt of de proef reproduceerbaar is of niet. Als de proef eenmaal reproduceerbaar is bevonden wordt aan de hand van een foutanalyse gekeken of de opstelling ook valide is, waarbij wordt bepaald of de uitkomst aansluit bij de voorspelling. Nu worden bij voorbaat enkele verschillen tussen praktijk en theorie verwacht. Zo zullen piekoverdrukken en vervormingen waarschijnlijk een iets afwijkende waarde hebben dan van te voren werd verwacht. Het voorkomen van dergelijke verschillen is haast onmogelijk. Er wordt gestreefd naar een zo klein mogelijke afwijking. Met behulp van een foutanalyse wordt hiervoor een marge bepaald.

3.3 Foutanalyse

Bij het analyseren van elke proef zullen er in de resultaten enkele verschillen zijn tussen de metingen verwachtingen. Een doelstelling van de analyse is het verklaren waardoor deze verschillen ontstaan. Iedere proef beslaat een ander onderwerp met andere rekenmethoden en benaderingen. Elke proef zal daarom zijn eigen gebreken hebben waardoor fouten ontstaan die bij een andere proef helemaal niet ter sprake zullen zijn. In deze paragraaf worden algemene benaderingen/aannames opgesomd die niet helemaal lineair lopen met de theorie en kunnen bijdragen aan een mogelijk verschil tussen theorie en praktijk. Omdat we op redelijk kleine schaal werken met springstoffen, kunnen kleine afwijkingen in de opstelling leiden tot grote verschillen in het resultaat. Voor deze verschillen kunnen de volgende factoren van invloed zijn geweest.

Locatie explosief

Een belangrijke factor is bijvoorbeeld de afstand waarop we het explosief plaatsen. De afstand werkt tot een derde macht door op de uitwerking van het explosief. Een cm te dichtbij of te veraf kan in ons geval al leiden tot een relatief groot drukverschil. Ook een cm te hoog of te laag leidt tot verschillen in de drukmeting. Omdat oppervlakte explosies schade kunnen veroorzaken aan de betonnen vloer van de bunker, zijn ladingen op een stalen lat van zes mm dik gelegd. Dit zorgt ervoor dat de vloer niet direct in contact staat met de springstof, zodat deze beschermd blijft. De stalen lat verstoort het beeld van de ideale oppervlakte explosie. De blastgolf reflecteert onder een kleine hoek tegen de vloer waardoor de piekoverdruk een andere waarde heeft.



De invloed hiervan is niet erg groot, omdat de verdeling van hoogte / lengte erg klein is.

Reflectiefactor

Voor de reflectiefactor is in de berekeningen voor oppervlakte explosies een reflectiefactor van 1,8 aangehouden (zie paragraaf 2.2.1). Het kan zijn dat deze factor aangepast moet worden om nauwkeurigere meetresultaten te krijgen.

Type springstof

Het gebruikte explosief bestaat uit twee onderdelen. Namelijk een bolletje C4 en de detonator. De springstof in de detonator is pentriet, een ander soort springstof dan C4, met een andere equivalentiefactor. Hier is in de berekeningen geen rekening mee gehouden en alleen gebruik gemaakt van equivalentiefactor voor C4. De detonator zelf is slecht 1 gram springstof en heeft op de uitwerking van grote ladingen springstoffen weinig toegevoegde waarde. Nu zijn de ladingen in deze proeven betrekkelijk klein en kan de invloed van de detonator verschillen opleveren.

Tot slot:

Omdat we weten dat verschillen tussen theorie en praktijk zullen ontstaan moet een foutmarge worden geaccepteerd. Een numerieke benadering hiervoor is niet mogelijk en daarom wordt gestreefd naar een nauwkeurigheid van 20%.



4 *Proefmodel voor het bepalen van piekoverdrukken*

4.1 Proefomschrijving

Deze proef bestaat uit verschillende experimenten waarbij de piekoverdruk op diverse afstanden wordt bepaald. In paragraaf 2.2.1 is uitgelegd hoe de piekoverdruk kan worden voorspeld. De belangrijkste factor voor het bepalen van de piekoverdruk is de afstand tot de bron ten opzichte van het gewicht van de lading, de geschaalde afstand: [1]

$$Z = \frac{R}{W^{1/3}}$$

Waarin: R de afstand is in meters

W het gewicht van de lading in kg

Waarbij de piekoverdruk wordt bepaald door:

$$P_s = \frac{0.975}{Z} + \frac{1.455}{Z^2} + \frac{5.85}{Z^3} - 0.019$$

Door de geschaalde afstand is de piekoverdruk geen lineair verband. Bijvoorbeeld: Het is onjuist om te zeggen dat de piekoverdruk van een bepaald gewicht op 10 meter hetzelfde is bij een explosie van 2 * het ladinggewicht op 20 meter. Een normale gedachte voor iemand die weinig weet van explosie effecten. De bovenstaande formule heeft alleen betrekking op explosies in de vrije ruimte. Zodra een blastgolf gereflecteerd wordt tegen het oppervlak zal de piekoverdruk veel hoger zijn (par. 2.2.1). De gedachte dat het geen verschil maakt of de detonatie op het oppervlak of in de lucht plaats vindt is onjuist.



Met behulp van de volgende leerdoelen wil ik deze gedachte bij te sturen.

- Het aantonen dat een verdubbeling van de lading op een dubbele afstand niet dezelfde piekoverdruk oplevert
- Het aantonen dat een detonatie vanaf de grond een andere piekoverdruk heeft dan een detonatie vanuit de lucht (hemispherical vs free air)
- Het geven van een voorbeeld bij welke afstand de druk hetzelfde is wanneer het gewicht onveranderd blijft

De proef wordt in de springbunker van de KMS getest. De opstelling is eenvoudig. Op een afstand van de bron plaatst men een meetinstrument om de druk te meten. Het explosief wordt afhankelijk van het soort proef opgehangen in de vrije ruimte of op het oppervlak geplaatst. Er worden in totaal drie vergelijkingen gedaan. In het eerste experiment willen we het verschil aantonen tussen een oppervlakte explosie en een vrije explosie. In het tweede experiment willen we aantonen dat een verdubbeling van de afstand en het gewicht van de lading niet dezelfde piekoverdruk levert. In het laatste experiment willen we een voorbeeld geven wanneer bij een andere afstand en lading dezelfde piekoverdruk wel wordt geleverd. Elk experiment bestaat uit twee verschillende opstellingen. Er zijn in totaal drie experimenten met vier verschillende opstellingen. Afhankelijk van het leerdoel varieert een opstelling in lading, afstand of locatie. Alvorens er wordt getest, wordt eerst een verwachting gedaan over de uitkomst. Het gewicht van de lading en de afstanden die zijn gebruikt voor de test staan per proef opgelijnd in tabel 4.1.

Leerdoel / proef	Lading (gram)	Afstand (mm)	Locatie
Het aantonen dat een detonatie vanaf de grond een andere piekoverdruk heeft dan een detonatie vanuit de lucht	1 x 20 1 x 20	500 500	Oppervlak Vrije ruimte
Het aantonen dat een verdubbeling van de lading op een dubbele afstand niet dezelfde piekoverdruk oplevert	1 x 20 1 x 40	500 1000	Oppervlak Oppervlak
Het aantonen bij welke afstand de druk hetzelfde is wanneer het gewicht onveranderd blijft	1 x 20 1 x 40	790 1000	Oppervlak Oppervlak

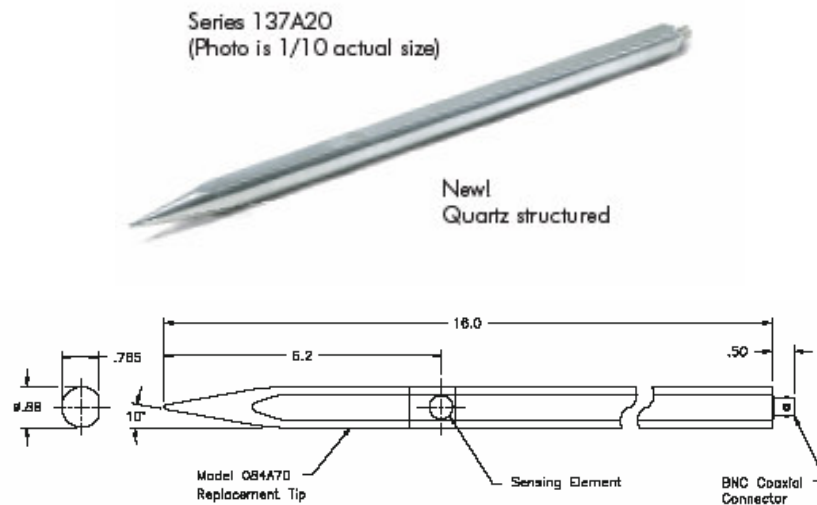
Tabel 4.1: Springschema drukproef 1

Nadat de berekeningen zijn gedaan worden de opstellingen getest. De resultaten hiervan worden dan geanalyseerd en vergeleken met de eerder gedane verwachting. Vervolgens worden de opstellingen met elkaar vergeleken en kijken we of het beoogde leerdoel is gehaald.

4.2 Benodigde materialen

Voor het meten van de piekoverdruk is een drukmeter nodig. Omdat een blastgolf reflecteert op alles wat hij tegenkomt, moet de drukmeter zodanig zijn gebouwd dat hij de piekoverdruk zonder reflectie meet. De meeste drukmeters zijn echter face on gebouwd [17]. Wat wil zeggen dat ze eigenlijk bedoeld zijn om de gereflecteerde druk te meten.

Om enkel de piekoverdruk te meten is daarom gebruik gemaakt van een “*Blastpencil Probe*”. De Blastpencil Probe 137 A 12 is een aluminium staaf met een conusvormige punt, met in de zijkant van de staaf een geïntegreerde drukmeter. De punt van de pen is zodanig ontworpen dat er minimale reflectie optreedt en dat de blast als het ware van de staaf afglijdt naar de zijkant. De drukmeter in de zijkant kan zodoende de piekoverdruk meten, waarbij minimale reflectie optreedt. In de onderstaande figuur 4.1 staat een illustratie van de blastpencil. [17]

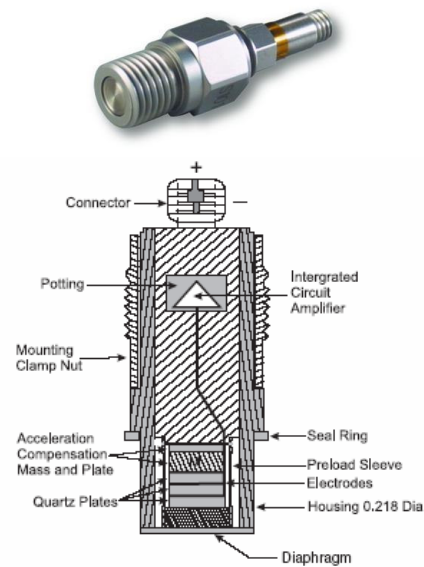


Figuur 4.1: PCB Blastpencil Probe 137 A 12

Voor het meten van de druk gebruikt de blastpencil de PCB 102 A15 sensor. De PCB 102 A 15 is een piëzo-elektrische druksensor die speciaal ontworpen is voor het meten van dynamische druk. Door zijn grote stijfheid heeft de druksensor een zeer kleine reactietijd. Piëzo-elektrische drukmeters zijn daarom in staat zeer korte impulsbelastingen tot relatief lange quasi-statische belastingen te meten en zijn geschikt voor het meten van belastingen met hoge frequenties. Dergelijke drukmeters zijn echter niet geschikt voor het meten van statische belastingen. Specificaties van de drukmeter staan in bijlage (10).

In figuur 4.2 staat de drukmeter afgebeeld. Bij inslag van de blast glijdt de druk langs de conus naar de zijkant van de blastpencil, over het diafragma van de drukmeter. De druk wordt dan door het diafragma overgebracht naar een kwartskristal in de drukmeter. Het kwartskristal geeft dan een elektrisch signaal af zodra de belasting verandert. Het signaal gaat vervolgens langs een kabel naar de centrale computer. De drukmeter is zodanig ontworpen dat het minimale resonantie (ruis) veroorzaakt. Toch is dit in de meetgegevens altijd terug te vinden. Dit komt meestal door de kabel tussen de blastpencil en de

centrale computer. Door de lengte van de kabel gaat de signaalsterkte verloren en dat resulteert in ruis in de registratie. Een ander probleem kan zijn dat de blastpencil of de drukmeter afwijkingen vertoont door slijtage of verkeerde installatie. Alvorens gebruik gemaakt kan worden van dergelijke meetapparatuur is het verstandig om eerst de blastpencil op resonantie te controleren. Het testen van de blastpencil verschilt eigenlijk niet zoveel van de opstelling die we willen gaan testen. Er wordt een verwachte piekoverdruk uitgerekend en vervolgens wordt dit nagemeten. Bij de laatste meting (2 juni 2005) bleek het instrument nog prima te werken. Resultaten hiervan staan in bijlage (11).



Figuur 4.2: PCB 102 A 15 drukmeter



4.3 Berekeningen

Voordat er gesprongen kan worden moet er door de student een voorspelling gedaan worden over de verwachte druk. Voor de uitvoering van de drie experimenten zijn in principe vier berekeningen nodig. De volgende vier berekeningen zullen in deze paragraaf worden behandeld:

- Vrije explosie van 20 gram op 50 cm
- Oppervlakte explosie van 20 gram op 50 cm
- Oppervlakte explosie van 40 gram op 100 cm
- Het toepassen van de schalingwet van 20 gram op afstand x ten opzichte van de oppervlakte explosie van 40 gram op 100 cm

De eerste stap is de keuze van de springstof. Voor deze proef maken we gebruik van C4. Voordat we verder kunnen moeten we eerst een equivalent TNT gewicht voor onze lading bepalen. Volgens [7] is de TNT equivalentiefactor voor dit springstof 1,37. Dit wil zeggen dat de gebruikte lading van 20 en 40 gram met 1,37 moet worden vermenigvuldigd. De equivalente TNT ladingen zijn dus:

$$20 \cdot 1,37 = 27,4\text{gr}$$

$$40 \cdot 1,37 = 54,8\text{gr}$$

Vervolgens kijken we naar de soort explosie. Bij een oppervlakte explosie moeten we een reflectiefactor toepassen op de lading. In dit geval hebben we te maken met een oppervlakte explosie, waarbij de invallende en gereflecteerde schokgolf direct samengaan. In geval van een ideaal reflecterend oppervlak zullen de schokgolfparameters corresponderen met die van een blastgolf van een vrije explosie, zonder reflecterend oppervlak, van een 1,8 keer zo grote lading [1]. Voor deze proef bepalen we twee keer de oppervlakte-explosie en een keer een vrije explosie.

De uiteindelijke gewichten zijn:

Vrije explosie (20 gram C4): 27,4 gr TNT

Oppervlakte explosie (20 gram C4): $27,4 \cdot 1,8 = 49,32\text{gr TNT}$

Oppervlakte explosie (40 gram C4): $54,8 \cdot 1,8 = 98,64\text{gr TNT}$



Nu we de equivalente gewichten en de afstanden bekend zijn kan de verwachte piekoverdrukken worden bepaald:

$$Z = \frac{R}{W^{1/3}}$$

$$P_s = \frac{0.975}{Z} + \frac{1.455}{Z^2} + \frac{5.85}{Z^3} - 0.019$$

Zodat geldt voor de drie ladingen:

Vrije explosie 20 gram: 238 kPa

Oppervlakte explosie 20gram: 381 kPa

Oppervlakte explosie 40 gram: 132 kPa

Voor de berekening van het laatste leerdoel, waarbij op een andere afstand en een andere lading dezelfde piekoverdruk gewenst is, maken we gebruik van de schalingswetten [2]

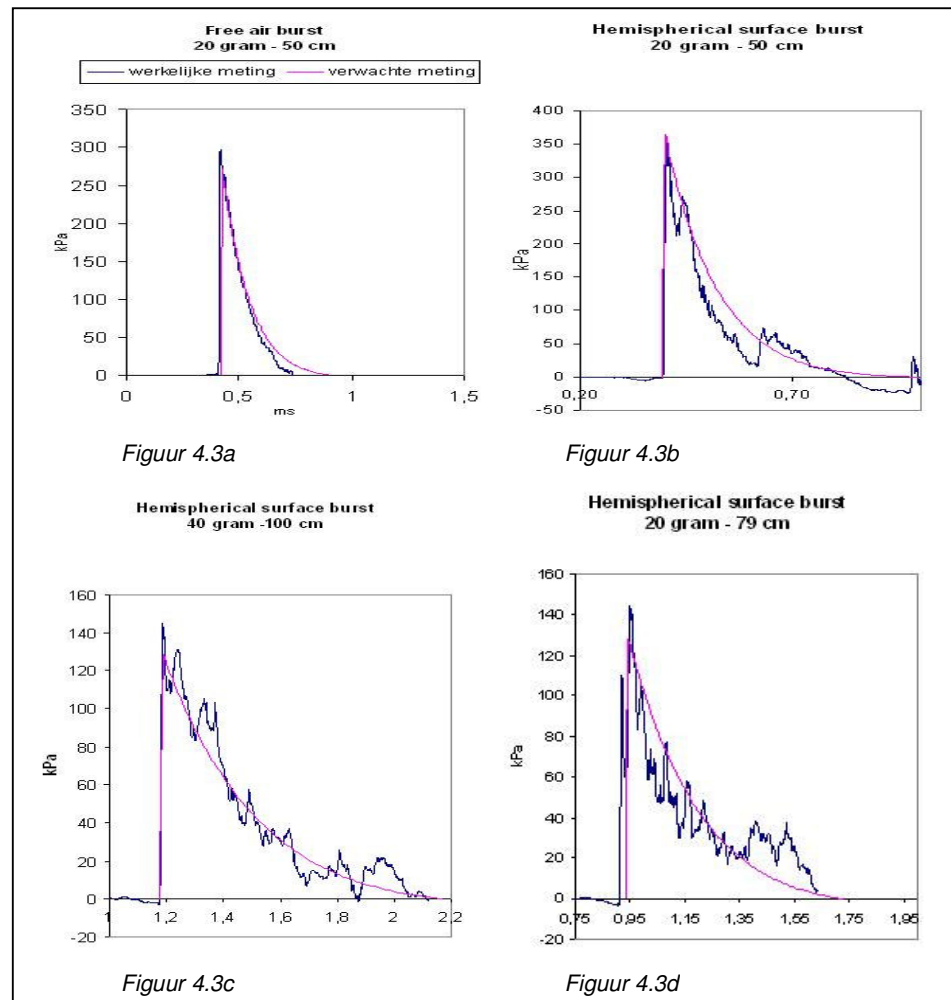
$$\frac{R_1}{R_2} = \left(\frac{w_1}{w_2} \right)^{1/3} \rightarrow R_2 = 100 \cdot \left(\frac{20}{40} \right)^{1/3} = 79\text{cm}$$

Voor een piekoverdruk van 132 kPa moeten we een lading van 20 gram op 79 cm van de drukmeter plaatsen.

4.4 Analyse van de resultaten

In deze paragraaf analyseren we de resultaten. De analyse bestaat uit een bestudering naar de reproduceerbaarheid en de validiteit van de proef.

4.4.1 Reproduceerbaarheid



De figuren 4.3 a t/m d zijn de resultaten van de proeven. Bovenaan iedere figuur staat bij welke opstelling de metingen horen. Verder bestaat iedere figuur uit twee grafieken. De verwachte piekoverdruk is door een rode lijn weergegeven en bepaald door [16]. De gemiddelde meting wordt door de blauwe lijn weergegeven. De resultaten van de afzonderlijke metingen vindt u in bijlage (5).

Opvallend is dat bij de eerste proefopstelling (free air burst) de werkelijke meting en de verwachte meting bijna dezelfde curve vertonen. Resonantie treedt meer op bij de

andere opstellingen. Waarbij de resonantie per volgende proef groter wordt. De ruis kan worden verweten aan de opstelling, maar die is na iedere proef gecontroleerd en aangedraaid. De drie proeven met oppervlakte explosie (waar ook de meeste resonantie optreedt) verschillen ook niet bijzonder veel van elkaar. Desondanks is de resonantie bij de laatste proef veel groter dan bij de eerste proef. De herhalingen vertonen op zich zelf wel continu hetzelfde resultaat, daarmee is de reproduceerbaarheid is dus wel garant.

4.4.2 Validiteit

Voor de validiteit van de proef willen we de procentuele afwijking tussen de verwachting en de meting bepalen, dit gaat als volgt:

Een drukmeting bestaat uit allemaal korte momentopnamen die met hoge frequentie worden geregistreerd. Deze frequentie ligt op ongeveer duizend opnamen per seconde. Per opname worden de druk en de tijd geregistreerd. Van deze opnamen wordt dan een grafiek uitgetekend die in figuur 4.3 staat afgebeeld. Voor het bepalen van de validiteit worden van de meting en de verwachting een gemiddelde bepaald. Vervolgens wordt de procentuele afwijking van de meting ten opzichte van de afwijking bepaald. In tabel 4.1 staan de procentuele verschillen weergegeven van de verwachte piekoverdruk.

Type	Gemiddelde verwachting	Gemiddelde meting	Procentuele afwijking
Free air 20 gram	60,79	49,53	-19%
Surface burst 20 gram	70,13	53,48	-24%
Surface burst 40 gram	34,96	41,35	18%
Schalingswet 20 gram 79 cm	34,96	40,25	15%

Tabel 4.1: Procentuele afwijking van theorie t.o.v praktijk

Opvallend is dat explosies op een grotere afstand beter aansluiten bij de verwachting. De afwijkingen schommelen van 15% tot 24%. De gemiddelde procentuele afwijking is 19% en ligt daarmee iets lager dan de gestreefde nauwkeurigheid van 20%. Het bepalen van de nauwkeurigheid is lastig. Er wordt namelijk op een korte afstand gemeten waardoor onnauwkeurigheden snel optreden.



4.4.3 Leerdoelen

Aan de hand van de berekeningen konden de verschillende leerdoelen al worden aangetoond. Het feit dat de metingen redelijk tot zeer goed aansluiten bij deze verwachtingen versterkt dit bewijs.

Het aantonen dat een detonatie vanaf de grond een andere piekoverdruk heeft dan een detonatie vanuit de lucht (hemispherical vs free air)

- Wanneer men de grafieken 4.3a en 4.3b vergelijkt ziet men een duidelijk verschil in piekoverdruk tussen de twee.
- Een lading van 20 gram op 50 cm geeft vanaf het oppervlak een piekoverdruk van 381 kPa
- Een lading van 20 gram op 50 cm geeft vanuit de vrije ruimte een piekoverdruk van 238 kPa

Het aantonen dat een verdubbeling van de lading op een dubbele afstand niet dezelfde piekoverdruk oplevert

- Uit grafieken 4.3b en 4.3c ziet men dat een lager gewicht op een kortere afstand duidelijk een hogere piekoverdruk veroorzaakt.
- Een lading van 20 gram op 50 cm geeft een piekoverdruk van 381 kPa
- Een lading van 40 gram op 100 cm geeft een piekoverdruk van 132 kPa

Het aantonen bij welke afstand de druk hetzelfde is wanneer het gewicht onveranderd blijft

- Uit de grafiek 4.3d is door resonantie enigszins moeilijk dezelfde piekoverdruk te onderscheiden.
- Theoretisch is aangetoond dat een lading van 20 gram op 79 cm dezelfde piekoverdruk geeft als een lading van 40 cm op 100 cm, namelijk 132 kPa

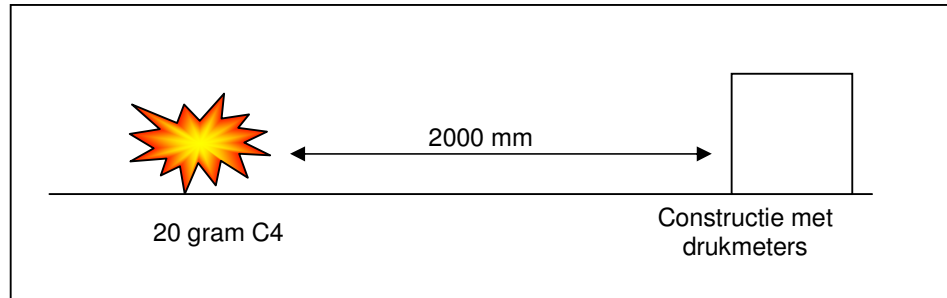
5 *Proefmodel voor het bepalen van drukbelasting op een constructie*

5.1 Proefomschrijving

De tweede proef is een vervolg op het eerste onderwerp. Uit de eerste proef heeft men geleerd dat reflectie via de grond een verhoogde piekoverdruk tot gevolg heeft. Nu zorgde in de eerste proef de vloer voor reflectie van de blastgolf. De vloer is dan eigenlijk te zien als een plaat met oneindige afmetingen. De blastgolf krijgt de gelegenheid om alle druk te reflecteren. In deze proef creëren we reflecties op constructies met eindige afmetingen. Wanneer de blast op een constructie belandt, wordt deze reflecteerd en belast deze de constructie. De uitgeoefende belasting proberen we in deze proef te voorspellen. Het berekenen van belastingen door een blastgolf staat beschreven in paragraaf 2.2.3.

Deze proef dient voornamelijk als oefening en ter ondersteuning van de lesstof. De student leert hoe hij door gebruik van meerdere drukmeters belastingen op een gebouw kan uitmeten. Verder leert de student verschillende grafieken te lezen en hoe deze grafieken gecombineerd moeten worden om ze te kunnen vergelijken met de verwachte waarde. De grafische vergelijking tussen de verwachting en de meting schept voor de student tevens een genuanceerder en meer realistischer beeld van de belasting op gebouwen door een blastgolf.

Voor deze proef gebruiken we een lading van 20 gram C4 die op de grond wordt geplaatst. We plaatsen een kubus met afmetingen $h \times b \times l$ (300x300x300 mm) op twee meter van het explosief. Voor het meten van de druk zijn op de kubus drie sensoren geplaatst. Deze druksensoren zijn de sensoren die ook in de eerste proef zijn gebruikt. De druksensoren bevinden zich aan de voorzijde, aan de bovenzijde en aan de achterzijde. In de onderstaande figuur 5.1 staat een schets van de proef.



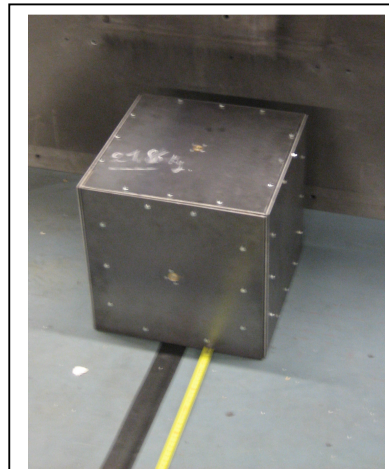
Figuur 5.1: Schematische voorstelling van de proef

5.2 Benodigde materialen

Voor deze proef is een kleine constructie nodig die dient als gebouw en drie druksensoren. Voor het meten van de drukken gebruiken we de druksensoren beschreven in paragraaf 4.2. De proeven worden uitgevoerd en getest in de springbunker van de KMS, daarom moet de afmeting van de constructie klein blijven. Reflectie in de bunker veroorzaakt extra belastingen die buiten niet zouden voorkomen.

Een dergelijk meetinstrument was niet voor handen en daarom moest voor deze proef een constructie worden ontworpen. Hiervoor is een analyse gedaan naar de gebruikerseisen en randvoorwaarden. In bijlage (2) vindt u deze analyse terug samen met de constructieberekeningen en de druktabel waarin de minimale afstanden en maximale ladingen voor dit instrument gelden. Tevens staan in deze bijlage de bouwtekeningen van het instrument.

De constructie heeft een skelet bestaande uit vier stalen L profielen van elk 30 cm hoog die door middel van U profielen, gelast met elkaar verbonden zijn. Aan iedere zijde, uitgezonderd de onderzijde, zijn stalen platen aangebracht van elk drie mm dik die zijn voorzien van gaten voor drukmeter-connectoren. Deze connectoren kunnen aan de buiten en binnenzijde van de constructie worden bevestigd, afhankelijk van de proef. Deze gaten bevinden zich in het midden van drie afneembare platen.



Figuur 5.2: Kist met drukmeters

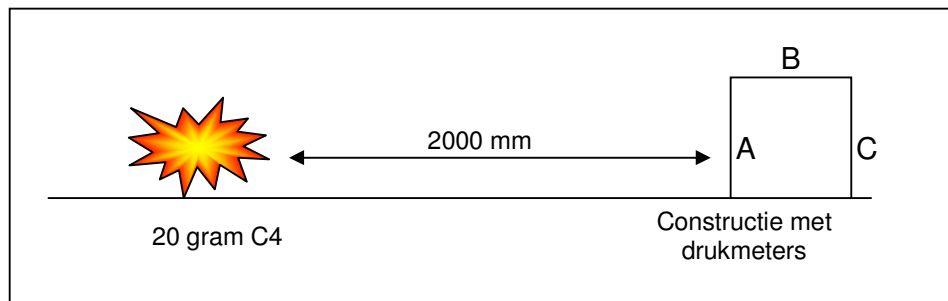
De constructie is zodanig ontworpen dat het licht is (22 kg), grote explosies van buitenaf en een lage interne belasting kan weerstaan zonder te vervormen. Hoewel de

constructie voornamelijk is bedoeld voor demonstraties in de springbunker van de KMS, kan hij gemakkelijk naar andere locaties worden vervoerd voor een demonstratie. De stalen platen zijn met behulp van schroeven bevestigd aan het skelet. De platen kunnen zodoende gemonteerd, of gedemonteerd worden om in de toekomst ook andere reflectieproeven te doen. Hierover straks meer.

5.3 Berekeningen

Voor de constructie met afmetingen H x B x L van 300 x 300 x 300 mm zal de belasting worden bepaald voor een oppervlakte explosie bestaande uit een lading van 20 gram C4 op 2000 mm. Allereerst moet onze 20 grams lading C4 worden verschaald naar TNT en nemen we de reflectiefactor voor oppervlakte explosies mee in de verschaling. Zodat ons rekengewicht gelijk is aan:

$$1,8 \cdot 1,37 \cdot 0,02 = 0,49 \text{ kg TNT}$$



Figuur 5.3: Schematische voorstelling met druksensoren A, B, C

In de bovenstaande figuur 5.3 staat de schematische voorstelling met drie druksensoren. Voor het bepalen van de dynamische druk op het gebouw zullen nu eerst alle benodigde gegevens per druksensor worden bepaald:

Druksensor aan de voorzijde (A)

De invallende piekoverdruk is:

$$Z = \frac{2}{(1,8 \cdot 1,37 \cdot 0,02)^{\frac{1}{3}}} = 5,45$$

$$P_s = \frac{0.975}{5.45} + \frac{1.455}{5.45^2} + \frac{5.85}{5.45^3} - 0.019 = 24.5 \text{ kPa}$$

Met een positieve faseduur van 1.24 ms. [16]

De dynamische druk wordt dan bepaald volgens:

$$Q = \frac{5}{2} \cdot \frac{24.5^2}{700 + 24.5} = 2.07 \text{ kPa}$$

Met (3) kunnen we de druk aan de voorzijde van de constructie bepalen, de gereflecteerde piekoverdruk is dan gelijk aan:

$$P_r = 2 \cdot 24.5 \cdot \left(\frac{7 \cdot 100 + 4 \cdot 24.5}{7 \cdot 100 + 24.5} \right) = 54 \text{ kPa}$$

Met een aangenomen weerstand coëfficiënt uit bijlage (1) volgt:

$$Q_d = 1.05 \cdot 2.07 = 2.17 \text{ kPa}$$

Zodat de stagnatiedruk gelijk is aan

$$p_{\text{stag}} = 2.17 + 24.5 = 26.67 \text{ kPa}$$

De schokgolfsnelheid volgt dan met:

$$U_s = 340 \cdot \left(1 + \frac{6 \cdot 24.5}{7 \cdot 100} \right)^{\frac{1}{2}} = 374 \text{ m/s}$$

Dit levert een ontlastingtijd aan de voorzijde:

$$\frac{3 \cdot 0.15}{374} = 1.2 \text{ ms}$$

Hierbij dient te worden vermeld dat het tijdstip van de ontlasting aan de voorzijde (1.2 ms), het moment waarop de stagnatiedruk aan de voorzijde wordt bereikt, bijna gelijktijdig is met de duur van de positieve faseduur (1.24 ms). In de benadering wordt de ontlasting na het bereiken van de stagnatiedruk verwaarloosd.

Druksensor aan de bovenzijde (B)

De bovenkant en de zijkant van de constructie zullen worden belast met de invallende piekoverdruk [1]. Sensor B bevindt zich op 2.15 meter van de explosie. Zodat de Z gelijk is aan 5.86 en de invallende piekoverdruk gelijk is aan 21.9 kPa.

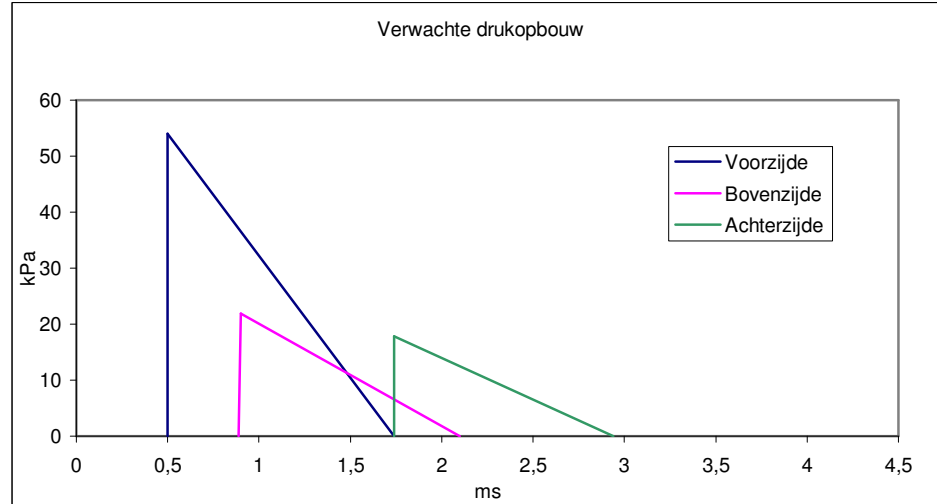
Druksensor aan de achterzijde (C)

De druk aan de achterzijde bepalen we door de invallende piekoverdruk op die afstand te bepalen. De afstand tot punt d (sensor) op de constructie is gelijk aan 2.45 meter, zodat de piekoverdruk gelijk is aan:

$$Z = \frac{2.45}{(1.8 \cdot 1.37 \cdot 0.02)^{1/3}} = 6.68$$

$$P_s = \frac{0.975}{6.68} + \frac{1.455}{6.68^2} + \frac{5.85}{6.68^3} - 0.019 = 17.9 \text{ kPa}$$

De verwachting van de drie sensoren staat in figuur 5.1 afgebeeld:

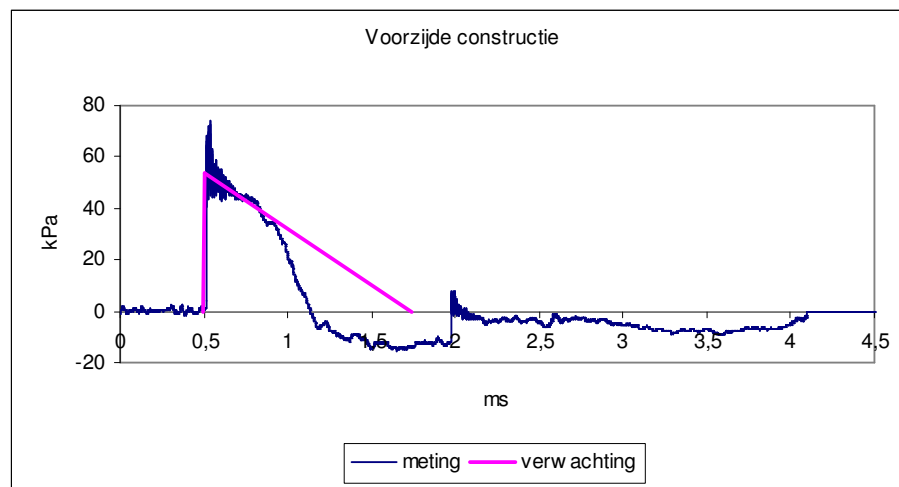


Figuur 5.1: Verwachte drukopbouw

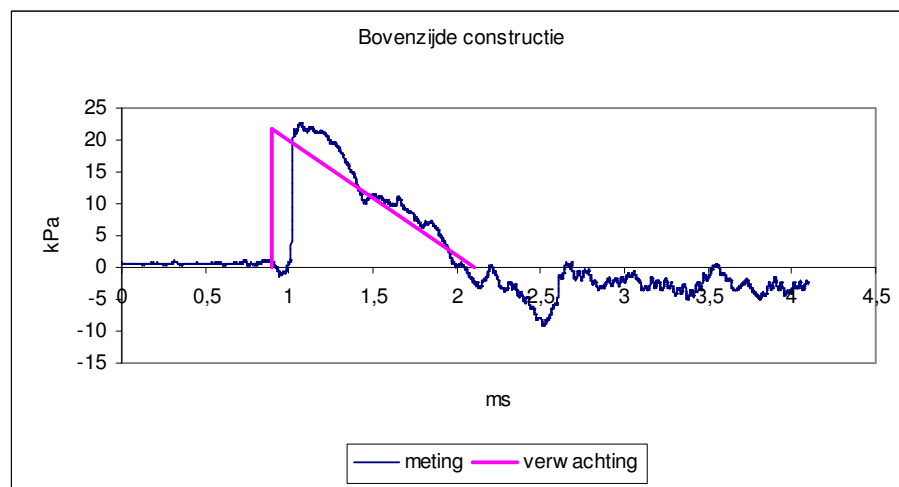
5.4 Analyse van de resultaten

In deze paragraaf analyseren we de resultaten. Bij de analyse wordt gekeken of de gemeten piekoverdrukken verschillen van de verwachte piekoverdrukken en proberen we deze verschillen te interpreteren en te verklaren.

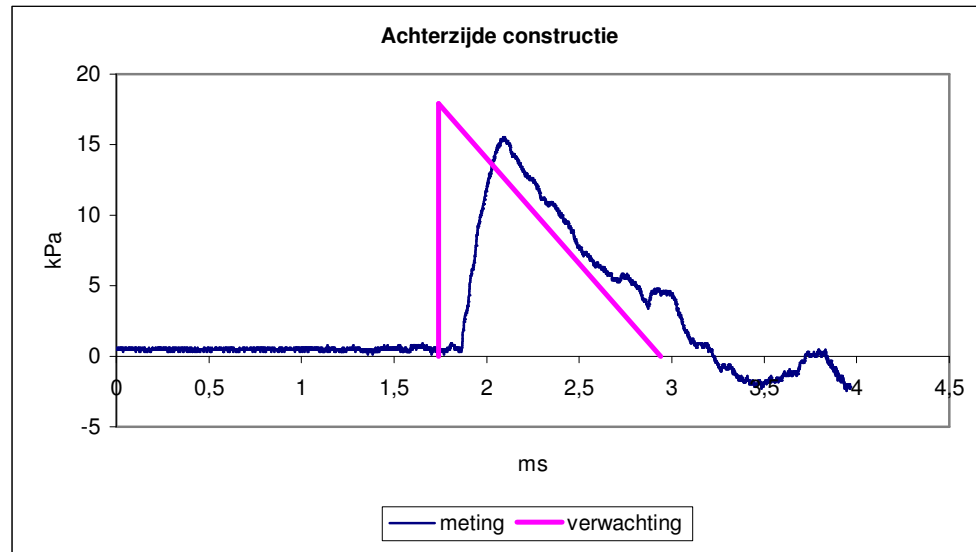
Over het algemeen is de proef zeer goed te voorspellen. De verwachte hoogte van de piekoverdrukken verschillen enigszins met de metingen. Ook is er een kleine afwijking in de tijd, maar die zijn echter zo kort (afwijking van ten hoogste 1 ms) dat deze verwaarloosbaar zijn. In de figuren 5.2 a t/m c staan de metingen aan de voorzijde, bovenzijde en achterzijde afgebeeld:



Figuur 5.2a: voorzijde constructie



Figuur 5.2b: bovenzijde constructie



Figuur 5.3c: achterzijde constructie

Elke figuur bestaat uit twee grafieken. De blauwe grafiek is de meting en de rode grafiek de verwachting.

In het begin van de meting aan de voorzijde (figuur 5.3a) zijn veel schommelingen te zien. Deze schommelingen ontstaan omdat de drukmeter plotseling een hoge druk krijgt te verwerken. Door deze schommeling is het lastig om de piekoverdruk te bepalen. Tevens verloopt de drukafbouw iets anders dan werd verwacht. De gemeten curve loopt in het begin van de afbouw redelijk gelijk met de verwachting, maar duikt dan plots naar atmosferische waarden. Dit is mogelijk het moment waarop de voorzijde van de meeste druk wordt verlost door ontspanning aan de kanten van de constructie. In de berekeningen vindt dit moment pas op een later tijdstip plaats. Dit komt door de verwachte snelheid. Wanneer de snelheid van de blastgolf hoger lag, treden ontspanningen aan de kanten inderdaad eerder op. Nu is "later" nogal kort door de bocht, omdat bij vergelijking de atmosferische druk "pas" een duizendste van een seconde later wordt verwacht.



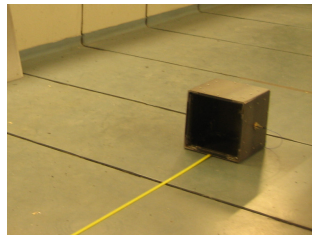
De meting aan de bovenzijde (figuur 5.3b) loopt zeer synchroon met de verwachting. De piekoverdruk is volgens de gebruikte benadering erg goed te voorspellen, maar ook de positieve fase duur en het verloop van de drukafbouw sluiten goed aan bij de verwachting.

De meting aan de achterzijde (figuur 5.3c) vertoont een klein verschil. Het berekenen van de druk aan de achterzijde is erg lastig. De gebruikte methode gaat hier vrij gemakkelijk mee om. De piekoverdruk is namelijk bepaald door de totale afstand te gebruiken die de blastgolf moet afleggen. De verschillen zijn ontstaan doordat er nu geen rekening wordt gehouden met de reflectie aan de voorzijde, wervelingen aan de bovenkant en ontspanningen aan de randen van de constructie. De gebruikte benadering sluit echter erg goed aan en heeft slechts een afwijking van ongeveer 16%.

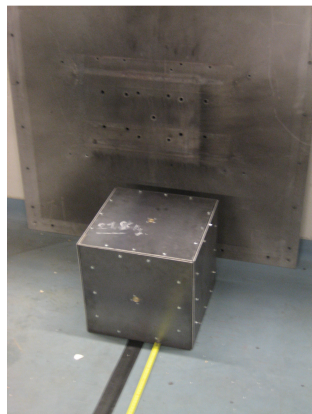
Tot slot:



Figuur 5.3: Proef 2



Figuur 5.4: Proef 3



Figuur 5.5: Proef 4

De kist is een stevig apparaat die in combinatie met de druksensoren op veel manieren kan worden ingezet. In paragraaf 5.2 is al gemeld dat deze kist voor meerdere proeven geschikt is. In dit onderzoek zijn een aantal extra proeven bedacht en getest. Deze proeven zullen echter niet meer op validiteit en reproduceerbaarheid geanalyseerd worden, maar zullen wel kort de revue passeren.

Een mogelijke testopstelling staat in figuur 5.3. Deze opstelling lijkt erg veel op de proef die in dit hoofdstuk centraal stond. Enig verschil is dat het explosief nu op een meter boven de grond hangt. Doordat deze in de lucht hangt ontstaat na detonatie een machstam die in de metingen (bijlage 7) erg duidelijk te zien is. Verder zijn er interessante drukverschijnselen op het dak van de constructie waar te nemen.

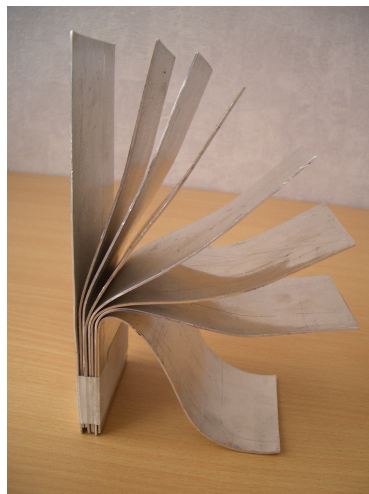
Bij de tweede mogelijke opstelling meten we de interne druk bij een explosie op een afstand van twee meter en een hoogte van een meter (Figuur 5.4). In de meetresultaten is goede verhoging van de overdruk te zien door reflecties in de constructie. (bijlage 8)

In de laatste mogelijke opstelling meten we de druk wanneer twee gebouwen dicht naast elkaar staan (Figuur 5.5). Hierbij plaatsen we de constructie op vijftien centimeter van de muur en zien we in de meting een duidelijke reflectie tegen de muur en een verhoging van de overdruk op de constructie (bijlage 9). De bovenstaande opstellingen zijn allen gebaseerd op dynamische belastingen op constructies. De kist is aan de hand van de theorie uit [13] ook voorbereid voor testopstellingen met glas. Zo kan de faalsterkte voor glasplaten van 300x300 mm worden getest zonder scherfwerking in de bunker. Het was helaas door de tijd niet meer mogelijk om deze optie te testen. Ontwikkelen hiervoor staan beschreven in bijlage (3).

6 *Proefmodel voor de vervorming van een constructie*

6.1 Proefomschrijving

In deze proef voorspellen we de overgang van elastische fase naar plastische fase van een bepaald soort profiel wanneer deze door blast wordt belast. De vervorming van een profiel door blast gaat voor het oog te snel. Hiervoor zijn hoge snelheidscamera's ontwikkeld die deze vervorming kunnen waarnemen. Het maken van een opname met een hoge snelheidscamera is niet vanzelfsprekend. Hoge snelheid camera's duur, vaak niet voorhanden of er is veel voorbereiding nodig de camera's te installeren en te positioneren. Dat is jammer, want een slow motion filmpje van een dynamische vervorming is erg illustratief. Voor deze proef hebben we ook geen hoge snelheidscamera ter beschikking, maar willen we wel zo een beeld creëren van de vervorming door dynamische belasting. Hiervoor gaan we uit van een zeer eenvoudige gedachte: wanneer we een materiaal dicht bij de explosiebron plaatsen zal deze meer gaan vervormen dan wanneer we deze verder plaatsen. Door meerdere profielen op verschillende afstanden te belasten creëren we steeds verschillende vervormingen. Wanneer we dan alle profielen aan elkaar zetten ontstaat er een beeld hoe de vervorming in zijn werk gaat. Een voorbeeld hiervan staat in figuur 6.1



Figuur 6.1: voorbeeld vervormingen

6.2 Excel als ondersteuning

Het is niet alleen interessant om een beeld te creëren van de vervorming, ook is interessant om de uitwijking van de vervorming te voorspellen. Met behulp van de [2] en [3] kan deze uitwijking worden berekend. Deze berekeningen zijn lastig en zijn bij het bepalen van veel uitwijkingen erg arbeidsintensief. Bij dit document wordt meegeleverd een diskette met daarop een Excel schema. Dit schema is voor deze proef gemaakt en dient het rekenen en controleren van plastische vervorming te vereenvoudigen. Het dient ter ondersteuning van de proef en rekent de uitwijking van een profiel uit die wordt belast door een blast. Het schema is alleen geschikt voor impulsieve en quasi-statische belastingen en geeft geen waarden voor belastingen die tussen de twee belastingregimes vallen. Dit is om twee redenen: voor belastingen die het dynamische domein liggen vereist de formule de functie "goal-seek" in Excel. Om het schema te beschermen is een beveiliging ingericht zodat de student geen formules kan aanpassen of veranderingen kan aanbrengen in cellen die in verbinding staan met andere cellen. De functie Goal-seek vereist dit echter wel om een uitspraak te doen over de dynamische belasting. De andere reden is dat het voor deze proef niet noodzakelijk is om andere belastingen uit te rekenen. Bij de vervormingproef wordt alleen gebruik gemaakt van de impulsieve belastingen.

Het schema kan twee typen profielen uitrekenen. Het is in staat om met balken en I profielen te werken en met de materialen staal en aluminium. Er kunnen meerdere soorten profielen en materiaalsoorten aan de database worden toegevoegd. Hiervoor moet het programma worden ontgrendeld en de eigenschappen van het profiel of het materiaal worden ingevuld in de database. Hiervoor is enige kennis van Excel wel noodzakelijk.

De tabbladen zijn als volgt ingericht: op het eerste tabblad kan de gebruiker het systeem omschrijven en de belastingen invoeren. Er kan onder andere gekozen worden uit het type profiel waarmee de gebruiker wenst te werken. Op hetzelfde blad komt ook het resultaat met commentaar in welke staat het profiel zich na de belasting bevindt (elastisch, plastisch of gebroken). Het is tevens mogelijk om het profiel als dwarsbalk die een grotere plaat draagt, in te voeren. Hiervoor hoeft de gebruiker enkel de dragende overspanning van de dwarsbalk in te vullen. Op het tweede tabblad staan alle stappen die het programma neemt om tot een resultaat te komen. Op het derde tabblad staat de database waarin meerdere profielen, materiaalsoorten en ondersteunend commentaar kan worden gewijzigd of worden toegevoegd. In bijlage (3) staat hoe het programma precies werkt en welke rekenstappen het programma maakt om tot een resultaat te komen.

The image shows two Excel spreadsheets side-by-side. The left spreadsheet, titled 'Blast eigenschappen' and 'Overlig', contains data for material properties and SDOF (Single Degree of Freedom) analysis. The right spreadsheet, titled 'Geschematiseerde Belastingen' and 'SDOF', contains data for simplified loading and SDOF analysis.

Blast eigenschappen		Overlig	
Pa	3.413.000 Pa	Plaat	mm
tD	0,05 ms		
Profiel eigenschappen		SDOF vervormingsfactoren	
Type	Lat	Km	Kl
Soort	Aluminium	elas	0,26
Re	180 N/mm ²	plas	0,33
E	69.000 N/mm ²		
Gewicht	2.700 kg/m ³		
L	100 mm		
B (1/2)	30,00 mm		
H (1/2)	0,50 mm		
		Uitkomst van het profiel	
		Het profiel is plastisch vervormd, de verwachte uitwijking is	
			153,31 mm

Geschematiseerde Belastingen	
oAdm	268
oMp	4.039,20
Rmb	0,00078
	0,0844965 ms
SDOF	
Kb	2.760,00 N/mm
Mb	0,01620 kg
Pb	20.478,00 N
Eigenperiode	
elas	12,27 ms
plas	12,37 ms
Impuls of Quasi-Statisch?	
elas	0,03 /impuls
plas	0,03 /impuls
Controle Elastisch of Plastisch	
p-elas	3,24
p-plas	5,24

Figuur 6.2: Interface vervormingschema in Excel

6.3 Ontwerp van de opstelling

6.3.1 Inleiding

Er is gedurende de ontwikkeling van deze proef de nodige tegenslag geweest. Al snel werd duidelijk dat het ontwerpen van een geschikte opstelling een lastige zaak is. Het systeem kan door verschrikkelijk veel factoren beïnvloed worden. Factoren waarvan gedacht werd dat die niet een zodanige rol zou spelen in de uitwerking. Niets bleek echter minder waar. Voor deze proef zijn een aantal theoretische benaderingen en opstellingen uitgetoetst die niet allemaal het gewenste effect opleverden. In deze paragraaf bespreken we de verschillende opstellingen, wat er verkeerd ging en de lessen die eruit zijn getrokken bij het ontwikkelen van nieuwe opstellingen.

6.3.2 Opstelling 1

Voor de vervormingproef waren dunne stalen latten ter beschikking gesteld. Deze latten waren 100x40x3 mm. Dit bleek echter niet het meest geschikte profiel te zijn voor deze proef. Wanneer een lat van geringe dikte explosief wordt belast, wordt de belasting aan de voorzijde op vrijwel hetzelfde moment voor een deel gecompenseerd door druk aan de achterzijde. De belasting schiet namelijk om het profiel heen en geeft een tegendruk aan de achterzijde (paragraaf 2.2.2). Een groot deel van de belasting gaat hierdoor verloren. Om verliezen te voorkomen moet er een manier gevonden worden om de drukopbouw aan de achterzijde te voorkomen. De blastgolf heeft een bepaalde snelheid en het duurt even voordat de blastgolf aan de achterzijde zijn druk opbouwt. Hoe groter de constructie, hoe later de drukopbouw aan de achterzijde begint. Verbreden van de beschikbare latten kostte teveel tijd. Door een grote huls om de latten te bouwen, wilden we hetzelfde effect bereiken. De blastgolf

reflecteert dan tegen de lat en de huls, waardoor de lat zou ombuigen en de blastgolf om de huls heen zou gaan, zodat de lat voldoende tijd zou krijgen om door te buigen.

Er zijn twee opstellingen ontworpen. Een ontwerp waarbij de lat rechtop staat en een waarbij de lat plat ligt. Het tweede ontwerp is gerealiseerd, omdat bij benadering het eenvoudiger was om te bouwen. Het was sterker dan het eerste ontwerp en goedkoper. Het ontwerp van de eerste opstelling staat in bijlage (4). In figuur 6.3 staat een afbeelding van de tweede opstelling.



Figuur 6.3:
Opstelling 1 te Brasschaat

De opstelling ziet er als volgt uit. De lading hangt aan een galg op een zekere hoogte en creëert bij detonatie een vrije explosie. De inklemming van de latten wordt gerealiseerd door een profiel die vast is geschroefd in houten blokken. Deze houten blokken moeten voorkomen dat de blastgolf achter het profiel schiet en zorgen voor de omtrekkende beweging. De blokken zijn op hun beurt genageld aan de grond door middel van piketten. Onder de blokken bevindt zich een kuil van 850 mm diep. Deze kuil zorgt ervoor dat de lat vrij kan doorbuigen. Toen de opstelling eenmaal stond, was er al een vermoeden dat drukopbouw aan de achterzijde niet helemaal kon worden voorkomen, dit om de volgende redenen:

- 1 Uit efficiency redenen werden er drie latten tegelijkertijd getest. De latten lagen naast elkaar, waardoor een kleine nis tussen de latten ontstond waarlangs de blastgolf kon ontsnappen naar de achterzijde.
- 2 De latten bogen door hun eigen gewicht licht door. Hierdoor zou de blastgolf niet op een volledig recht gedeelte reflecteren en een deel van zijn uitwerking verliezen door de invallende hoek.
- 3 Er ontstond een vermoeden dat een groot deel van de druk, bij doorbuigen van de lat zou “afglijden” en aan de achterzijde zal beginnen met het opbouwen van de druk.

De uitvoering

Vrijwel na de eerste proef werden de vermoedens al bevestigd. De theoretische benadering niet overeenkwam met de praktijk. De lat boog bij geen van de ladingen verder dan de elastische fase. Na twaalf proeven werd geconcludeerd dat de

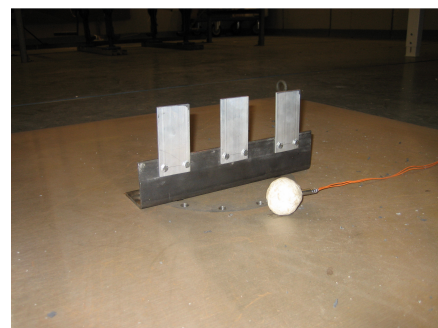
proefopstelling onjuist was en niet aansloot bij de theorie, waarbij de maximale belasting werd gerealiseerd door een lading van 200 gram op 100 cm.

Bij nadere bestudering van het proefmodel kan de volgende verklaring worden gegeven. Zodra de lat doorbuigt ontstaat er een ruimte tussen het uiteinde van de lat en de balk. De druk zal via deze ruimte in de kuil onder de lat doorschieten. Eenmaal achter de lat begint ook daar de drukverhoging die door reflecties van de wanden van de kuil nog eens worden versterkt. Een ander probleem is de beginsituatie van de latten. Door de grote overspanning buigen de latten al enigszins door, de belasting valt dan in onder een hoek waardoor een deel van de energie verloren gaat.

Het doel om de proef op deze wijze uit te voeren was om drukopbouw aan de achterzijde te voorkomen, waardoor een lage hoeveelheid springstof kon worden gebruikt. Het is theoretisch mogelijk om een lagere lading springstof te gebruiken wanneer aan de achterzijde geen drukverhoging plaatsvindt, maar dit is niet eenvoudig te realiseren. Om deze opstelling te laten werken moet een aanpassing komen waardoor drukopbouw aan de achterzijde gedurende de positieve fase duur wordt voorkomen. Deze proefopstelling is voor een practicumdag niet geschikt.

6.3.4 Opstelling 2

Door het ongewenst verrassende effect van het vorige proefmodel, werd besloten om de volgende opstelling in miniatuurmodel op te zetten. Miniatuurproeven hebben minder voorbereidingstijd nodig, wat voor dit onderzoek erg gewenst is. Het testen van het miniatuurmodel zou dan plaatsvinden in de springbunker van de KMS. Tevens werd de benadering van



Figuur 6.4: Opstelling 2 te KMS

het eerste proefmodel verworpen, omdat het te lastig is om een opstelling te ontwerpen die goed bij deze benadering aansloot. Voor dit model werd nog steeds een lat aan een zijde ingeklemd, maar nu werd de drukopbouw aan de achterzijde toegelaten en werd de gedachte geaccepteerd dat een relatief zwaarder explosief nodig was voor deze proef. Door berekeningen werd al snel duidelijk dat bij schalen een probleem ging ontstaan met het gebruik van staal. In de springbunker is maximaal 50 gram Composiet C4 toegestaan, dit in verband met slijtage aan de bunker en

geluidsoverlast in het gebouw. Dit heeft consequenties voor het gebruik van het huidige materiaal. Staal is namelijk te stijf en kon problemen opleveren met de maximale lading in de bunker. Er werd voor het proefmodel daarom voor aluminium latten gekozen. Aluminium is lichter en makkelijker vervormbaar dan staal. De proefopstelling (figuur 6.4) zag er als volgt uit.

Een bolletje springstof C4 van 50 gram werd op een afstand van 100 mm gelegd. Aan een stalen L profiel werden drie aluminium latten van 30 x 60 x 3 mm door middel van schroeven bevestigd aan het stalen profiel. Ook bij de voorbereidingen van dit model zijn er een aantal aandachtspunten.

- 1 Hoe groter de afstand van de latten tot de explosiebron, hoe beter de verdeelde belasting. Dit komt door de sferische vorm van de blastgolf. Nu ligt de lading erg dicht bij de latten (100 mm). Achteraf gezien is nu meer sprake van een zeer geconcentreerde belasting op de latten, dan een verdeelde belasting.
- 2 De latten zijn 50 mm van de grond bevestigd. Door deze verhoging is sprake van een andere invallende hoek, waar bij de berekeningen geen rekening mee was gehouden.

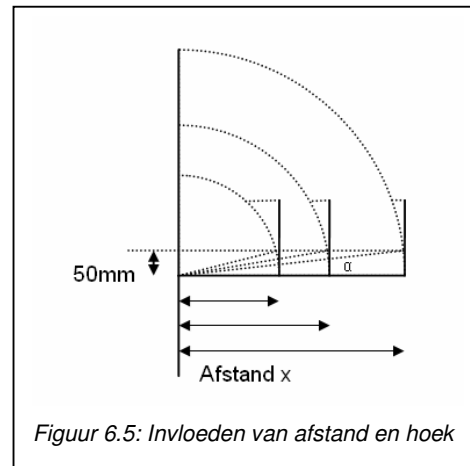
De uitvoering

Na detonatie werd plasticiteit in de latten bereikt, hetzij ook bij de opstelling. De bevestiging van de aluminium latten was of losgeraakt of verbogen en het stalen steunprofiel was om de moeren in de grond heen gebogen. Vervorming was dus wel bereikt, maar de inklemming was niet robuust genoeg en was ook verbogen. Verder ontstonden door de explosie deuken in de stalen onderplaat. Deze deuken zorgen ervoor dat ladingen in een kuil komen te liggen waardoor het blasteffect anders zal zijn, deuken in de stalen ondergrond dienen daarom voorkomen te worden.

Achteraf gezien zijn deze resultaten niet erg verrassend. Door de onverwachte wending in Brasschaat en de tijdsdruk is deze springdag slechts in twee dagen na de eerste springdag opgezet. Bij het ontwerp en de uitvoering van dit experiment zijn veel factoren niet meegenomen die wel een wezenlijke rol spelen in het resultaat. Misschien wel de belangrijkste factoren zijn de verdeelde belasting en de inklemming.

Verdeelde belasting

Een belangrijke factor is de wijze waarop de belasting op de constructie wordt geprojecteerd. De gebruikte rekenmethode om de plastische vervorming te berekenen vereist een goed verdeelde belasting. Door de sferische vorm van de belasting is dus een grote afstand nodig. In deze opstelling was de afstand slechts 100 mm. Het resultaat is dat de belasting meer neigt naar een geconcentreerde belasting in plaats van



Figuur 6.5: Invloeden van afstand en hoek

een verdeelde. Een andere factor was de hoogte waarop de latten waren bevestigd. De hoogte zorgt voor een invallende hoek van de belasting, deze invalshoek zorgt voor een andere uitwerking van de blastgolf. Ideaal zou zijn geweest om de latten op het oppervlak te bevestigen, maar daar was in de voorbereiding geen rekening mee gehouden. In figuur 6.5 staat uitgebeeld hoe de verdeelde belasting beter wordt naarmate de afstand groter is.

Inklemming

Door snelle beslissingen en korte voorbereiding is de inklemming eigenlijk verwaarloosd. Een belangrijke factor, want de inklemming moet in dergelijke proeven hoge weerstand bieden aan de blastgolf. In deze proefopstelling faalde de inklemming op een aantal punten. Allereerst waren de schroeven waarmee de latten aan het L profiel waren bevestigd ongeschikt voor grote belastingen. Doordat deze tijdens het proces vervormen gaat een deel van de energie verloren. Energie die bedoeld is voor de vervorming van de latten. Voor dit soort proeven zijn hoge weerstandsbouten nodig die door hun grote stijfheid grote belastingen kunnen weerstaan. Op deze manier wordt de inklemming gewaarborgd en gaat er minder vervormingenergie verloren.

Niet alleen de schroeven, maar ook het L profiel bleek niet voldoende stijf te zijn. Het L profiel was niet doorgerekend en er werd aangenomen dat het profiel wel voldoende zou zijn. Het resultaat was dat de belasting te hoog was en dat het profiel volledig om de (hoge weerstands-) bouten in de grond was verbogen. De groundbouten zelf zijn gedurende de belasting intact gebleven.

6.3.5 Proefmodel 3

De tweede opstelling moest worden herzien. De fouten uit de voorgaande opstellingen helpen ons om een beter ontwerp te maken. Bij het nieuwe ontwerp moet rekening gehouden worden met een aantal dingen.

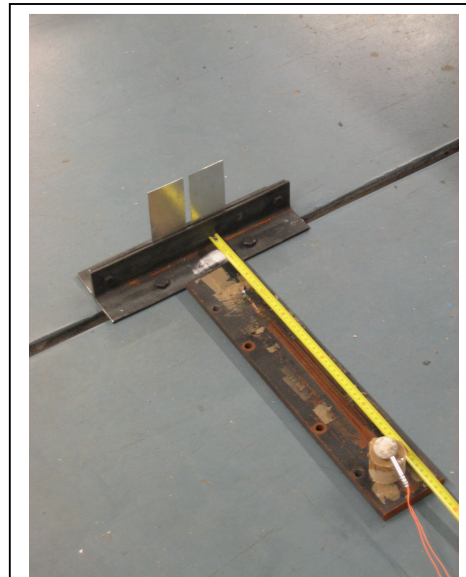
- 1 Eenvoud: het model moet belasting aan de achterzijde van de lat toe laten. Dit vereenvoudigt het rekenmodel en verkort de voorbereiding.
- 2 Afstand: een goede verdeelde belasting krijgen gebeurd door de afstand van de explosiebron tot aan de latten te vergroten.
- 3 Inklemming: het creëren van een stijve inklemming om de volledige vervormingenergie te benutten

Het concept uit de tweede opstelling werd gebruikt. Twee aluminium latten worden rechtop belast waarbij de drukopbouw aan de achterzijde wordt geaccepteerd.

Het vergroten van de afstand is nodig voor een beter verdeelde belasting, maar een grote afstand heeft een lagere piekoverdruk tot gevolg en dus een grotere lading. De springbunker heeft een maximaal toelaatbare lading, dus kan er maar beperkte lading worden gesprongen. Een andere mogelijkheid is het aanpassen van de latten. In plaats van de 30 x 60 x 3 mm latten uit de

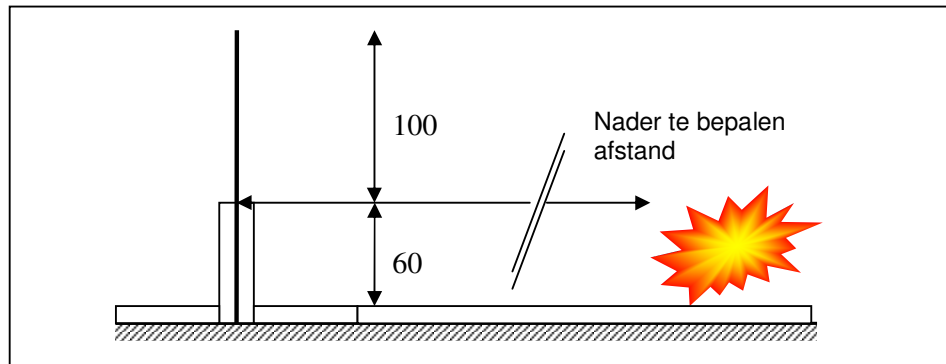
tweede springdag, is er gebruik gemaakt van 60 x 100 x 1 mm aluminium latten. De latten zijn breder zodat een groter oppervlak wordt belast door de explosie, maar ze zijn vooral dunner, zodat minder energie nodig is voor vervorming.

Deze latten werden vervolgens ingeklemd door twee L profielen. De L profielen zijn zwaarder uitgevoerd dan in de vorige proef en worden op elkaar gedrukt door middel van twee hoge weerstandsbouten. Vervolgens worden de L profielen weer vastgedraaid in de vloer. Op een bepaalde afstand werd vervolgens een bolletje springstof geplaatst en geïnitieerd. Het uitstekende deel van het aluminium plaatje



*Figuur 6.6:
Opstelling 3 te KMS*

wordt dan getest op vervorming. De onderkant van het plaatje staat 60 mm boven de grond, hiervan staat een illustratie in de onderstaande figuur 6.7:



Figuur 6.7: voorstelling proefopstelling 3

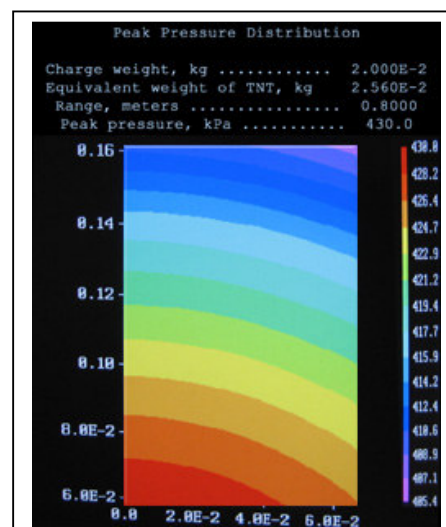
6.4 Berekeningen

De berekeningen voor de laatste proefopstelling van deze proef kunnen uitgevoerd door het Excel programma beschreven in paragraaf 6.2, maar dit is eigenlijk bedoeld ter ondersteuning. Voor de berekeningen is het experiment telkens dezelfde proef, maar dan op een andere afstand. Voor de berekeningen verandert er dus niet zoveel. Hierom wordt er een voorbeeld gegeven van een bepaalde afstand en voor de overige afstanden enkel de uitkomsten opgeschreven.

Voorbeeld

In dit voorbeeld wordt een aluminium lat met een breedte (60 mm), hoogte (100mm) en dikte (1mm) belast door een oppervlakte explosie van 20 gram C4 op 800 mm afstand. Voordat we de sterkte-eigenschappen van het materiaal gaan bepalen, bepalen we eerst hoe de druk op de latten wordt uitgeoefend.

Uit voorgaande opstellingen is geleerd dat, door de sferische vorm van de blastgolf, niet een volledig gelijkmatig verdeelde belasting wordt gehaald wanneer de springstof te dicht bij de latten ligt. Er

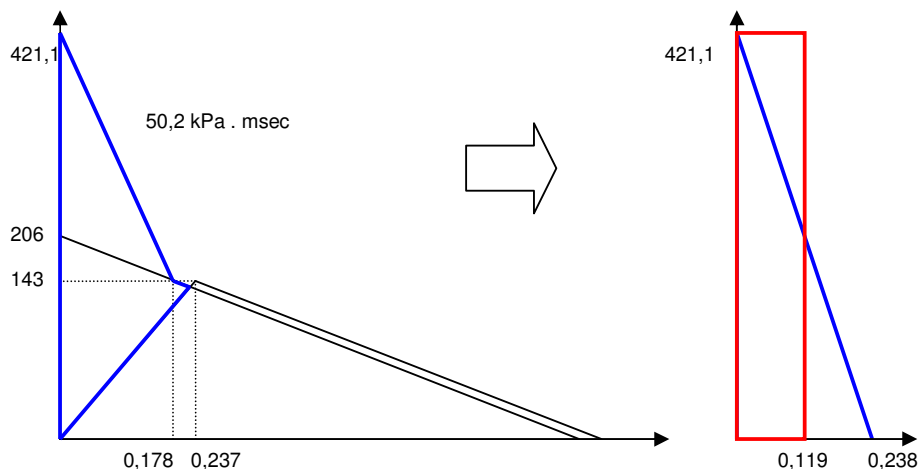


Figuur 6.8: CONWEP

ontstaat dan een afbouwende druk naar de bovenzijde zoals weergegeven voor een rechter lat in figuur 6.8. Met CONWEP's "*Loads on structures*", kan een voorspelling worden gedaan over het drukverloop op de lat en daar een equivalente verdeelde belasting voor worden berekend, hierbij proberen we door het vergroten van de afstand het drukverschil tussen de onderzijde en bovenzijde van de latten zo klein mogelijk te houden.

Figuur 6.8 laat zien dat het drukverloop scheef over de rechterlat loopt, omdat de lat niet haaks op de belasting staan. De gereflecteerde piekoverdruk van een oppervlakte explosie is maximaal 430 kPa onderaan het latje (dus op zes cm van de grond) en maximaal 406 kPa is aan de bovenkant van het latje en is er een equivalent uniform verdeelde belasting van 421.1 kPa. Om de belasting uit te tekenen kunnen we tevens gebruik maken van de gegevens van CONWEP. De belasting op de lat komt er volgens [1] als volgt uit te zien:

Dynamische druk: 59.96 kPa
Gereflecteerde uniforme piekoverdruk: 421,1 kPa
Piekoverdruk: 143,2 kPa
Zij druk: $59.96 \cdot 1,05 = 63$ kPa
Schokfront snelheid: 506,5 m/s
Ontlastingtijd: 0,178 ms
Tijd voor de achterzijde: 0 ms
Tijd voor maximale drukopbouw achter: 0,237 ms



Figuur 6.9: Dynamische belasting op de constructie

Deze belasting benaderen we als een driehoeksbelasting (par 2.3.4) waarbij we het oppervlak van het blauwe deel delen door de gereflecteerde piekoverdruk. Zodat de positieve fase duur in dit geval gelijk is aan $2 \cdot 50.2 \text{ kPa msec} / 421.1 \text{ kPa} = 0,238 \text{ ms}$.

Algemene mechanica

Stap twee is het bepalen van de mechanische eigenschappen van de opstelling, het systeem. Belangrijk zijn het maximaal plastische moment (M_{pl}) en de maximale weerstand (R_{mb}) zijn. Voor het maximale plastische moment boven een bepaalde waarde is een treksterkte waarde R_m voor aluminium nodig die in de geraadpleegde bronnen niet bekend was. Daarom is deze waarde geschat. Voor het bepalen van het dynamische gedrag van bouwmaterialen en elasto-plastisch gedrag van constructie-elementen zijn verschillende karakteristieken van belang: R_e , R_m en E . De meeste karakteristieke eigenschappen worden groter met toenemende vervormingsnelheden en zijn de elasticiteitsgrenzen meestal hoger liggen dan de opgelegde waarden. Hierom past men een gemiddelde vermeerderingscoëfficiënt c toe op de karakteristieke waarden en om economische redenen ook een algemeen gemiddelde vermeerderingscoëfficiënt a . [3]

$$c = 1,36$$

$$a = 1,1 \text{ voor } R_e < 345 \text{ N/mm}^2$$

$$a = 1,0 \text{ voor } R_e > 345 \text{ N/mm}^2$$

Voor het overschrijden van de elasticiteitsgrens neemt men de ductiliteitsfactor $\mu > 10$

Voor aanvullende informatie verwijs ik naar [3] hfdst 6.

$$R_e = 180 < 345 ; a = 1,1$$

$$\mu < 10; \sigma_{adm} = a \cdot c \cdot R_e = 1,1 \cdot 1,36 \cdot 180 = 269 \text{ MPa}$$

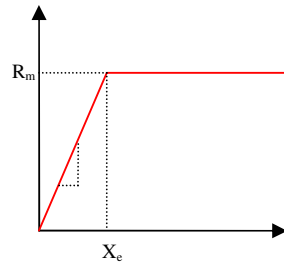
$$\mu > 10; 280 \text{ MPa}$$

$$M_{pl} = 2 \cdot BH^2 \cdot \sigma_{adm}$$

$$\mu < 10; M_{pl} = 2 \cdot 30 \cdot 0,5^2 \cdot 269 = 4.039 \text{ Nmm}$$

$$\mu > 10; M_{pl} = 2 \cdot 30 \cdot 0,5^2 \cdot 280 = 4.225 \text{ Nmm}$$

Bepalen van de R_{mb}



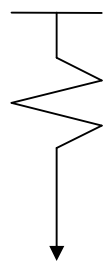
$$R_{mb} = \frac{2M_{pl}}{l}$$

$$\mu < 10; R_{mb} = \frac{2 \cdot 4.039}{100} = 0,08 \text{ kN}$$

$$\mu > 10; R_{mb} = \frac{2 \cdot 4.225}{100} = 0,08 \text{ kN}$$

Met behulp van de transformatiefactoren kan het programma de mechanische waarden omschalen naar het “Single Degree of Freedom” model. Verschalen gaat op de volgende wijze:

Omzetten naar Single Degree of Freedom



$$K = k_k \cdot k_b$$

$$M = k_m \cdot M_b$$

$$P = k_l \cdot P_b$$

$$k_b = \frac{8EI}{l^3}$$

$$M_b = \rho \cdot B \cdot H \cdot L$$

$$P_b = P_r \cdot B \cdot H$$

	K_m	K_l	K_k	K_{lm}
Elasticiteit	0,26	0,40	0,38	0,65
Plasticiteit	0,33	0,50	-	0,66

Tabel 6.1: SDOF transformatiefactor voor eenzijdige inklemming

Met behulp van deze formules kunnen de volgende waarden worden berekend:

$$K_b: 2.800 \text{ N/m} \quad M_b: 0,02 \text{ kg} \quad P_b: 3.906 \text{ N}$$

Het berekenen van de eigenperiode wordt dan gedaan met behulp van de formule:

$$\tau_{\text{elastisch}} = 2\pi \cdot \sqrt{K_{lm;\text{elas}} \cdot \frac{M_b}{K_b}} = 12 \text{ ms en}$$

$$\tau_{\text{plastisch}} = 2\pi \cdot \sqrt{K_{lm;\text{plas}} \cdot \frac{M_b}{K_b}} = 12 \text{ ms}$$

Met behulp van de eigenperiode en de positieve faseduur kan worden bepaald met welk type belasting we te maken hebben. In dit geval geldt (volgens driehoeksbenadering) dat: $0,1 < \frac{2\pi \cdot \frac{1}{2} \cdot 0.238}{12} < 0,4$ en hebben we te maken met een impulsbelasting. Nu het belastingregime bekend is, kunnen we de ductiliteit bepalen. Allereerst de elastische controle waarbij geldt:

$$\text{Elastisch: } \mu = \frac{143.200 \cdot \pi \cdot 0,238}{269 \cdot 12} > 1;$$

Omdat de $\mu > 1$ moet er plastisch worden gerekend (zie paragraaf: 2.3.4)

$$\text{Plastisch: } \mu = \frac{1}{2} \cdot \left[\left(\frac{421.100 \cdot \pi \cdot 0.238}{280 \cdot 12} \right)^2 + 1 \right] = 2.14$$

Met behulp van de ductiliteit kan dan de uiteindelijke uitwijking worden bepaald. Deze

wordt bepaald middels $\mu = \frac{x_{\max}}{x_e} \rightarrow x_{\max} = \mu \cdot x_e$. Invullen levert:

$$x_e = \frac{R_m}{K} = \frac{2m_{pl}}{8EI} = \frac{M_{pl} \cdot l^2}{4EI} \rightarrow x_e = \frac{4.039 \cdot 100^2}{4 \cdot 70.000 \cdot \frac{1}{12} \cdot 60 \cdot 1^3} = 29\text{mm}$$

Wanneer we een springstoflading C4 op een afstand van 800 mm plaatsen van een aluminium plaatje met afmetingen (bxhxl) 60x100x1mm dan is de plastische uitwijking:

$$x_{\max} = \mu \cdot x_e$$

$$29 \text{ mm} \cdot 2,14 = 62 \text{ mm}$$

Invullend levert voor de andere afstanden de volgende verwachtingen op:

Afstand	Maximale piek overdruk	Minimale piek overdruk	Uniform verdeelde belasting	Benaderde impuls	Positieve faseduur	Uitwijking
[mm]	[kPa]	[kPa]	[kPa]	[kPa . ms]	[ms]	[mm]
50	1676	1383	1551	107.2	0.138	231
60	960.3	840.7	908.5	79.5	0.175	134
70	615	561	592.8	61.8	0.208	86
80	430	405.6	421.1	50.2	0.238	62
90	311	298	306	47.4	0.310	54
100	236.7	229.3	233.8	40.3	0.334	43

Tabel 6.2: Verwachte uitwijkingen vervormingproef

6.5 Analyse van de resultaten

In de onderstaande tabel 6.3 staan de resultaten van de gerealiseerde springproeven. In deze paragraaf analyseren we de resultaten op reproduceerbaarheid en validiteit.

Afstand	Verwachte uitwijking	Werkelijke uitwijking						Variantie
[mm]	[mm]	[mm]						[mm ²]
50	231	80	93	90	100	100	100	64
60	134	60	55	60	78	54	-	61
70	86	33	23	35	38	26	-	31
80	62	21	24	24	23	22	23	1.4
90	54	Geen metingen						-
100	43							

Tabel 6.3: Werkelijke & verwachte uitwijking vervormingproef

6.5.1 Reproduceerbaarheid

In deze paragraaf bepalen we de reproduceerbaarheid van de proef. Voor het bepalen van de reproduceerbaarheid is voor de lezer enige kennis van statistiek nodig. Indien de lezer niet over deze kennis beschikt wordt aangeraden [8] of soortgelijke literatuur te raadplegen.

In de bovenstaande tabel staan de resultaten voor de plastische vervorming op een bepaalde afstand met een lading van 20 gram. Bij reproduceerbare proeven is het van belang dat de spreiding van de resultaten minimaal is. Hoe kleiner het verschil in spreiding tussen de onderlinge testen, hoe groter de reproduceerbaarheid. Een uitspraak over de reproduceerbaarheid wordt betrouwbaarder naarmate meerdere proeven zijn gedaan. Er zijn voor dit onderzoek zoveel mogelijk testen gedaan in de beschikbare tijd.

Verreweg de belangrijkste spreidingsmaatstaf is de *variantie* en de hieruit afgeleide *standaarddeviatie*. Variantie is gedefinieerd als de gemiddelde kwadratische afwijking van alle waarnemingen ten opzichte van het rekenkundig gemiddelde. Voor variantie gebruiken we het symbool S^2 . In de formule luidt deze: [8]

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}$$

In tabel 6.3 staat per afstand de variantie in vierkante millimeters weergegeven. Hier is duidelijk te zien dat de spreiding afneemt naarmate de afstand groter wordt. Het is aannemelijk te zeggen dat het vergroten van de afstand de betrouwbaarheid van de proef ten goede komt. Een variantie van 1.4 mm op 80 cm afstand is beduidend lager dan 64 mm op 50 cm. Om te controleren of de metingen door storingen inderdaad significant van elkaar verschillen en niet een toevalligheid zijn, nemen we twee steekproeven en gaan de variantie met elkaar vergelijken. We nemen de proeven die de meeste metingen hebben als steekproeven.

Voor de statistische benadering geldt dan een zogenaamde nulhypothese: $H_0: \mu_{50 \text{ cm}} = \mu_{80 \text{ cm}}$. De nulhypothese (H_0) is een hypothese die we statistisch willen bewijzen. Hierbij is μ de gemiddelde werkelijke uitwijking op respectievelijk 50 en 80 cm. In andere woorden staat er: we proberen de hypothese te bewijzen dat er *geen significant verschil* bestaat tussen de variantie op 50 cm en 80 cm (dit is eenvoudiger te bewijzen dan dat er wel een verschil zou zijn: $H_0: \mu_{50 \text{ cm}} \neq \mu_{80 \text{ cm}}$). Om twee varianties met elkaar te vergelijken moeten we gebruik maken van een zogenaamde “pooled variance”. Uit de tabel 6.3 vinden we dat de variantie voor 50 cm en 80 cm, respectievelijk 64 mm en 1.4 mm is. De pooled variance wordt als volgt berekend:

$$s_p^2 = \frac{(n-1)s_m^2 + (m-1)s_j^2}{n-1+m-1} = \frac{320 + 7}{10} = 32,7$$

Voor de volgende stap is onafhankelijkheid van de testen vereist. De ene test mag geen directe invloed hebben op de andere test. In dit experiment zijn alle proeven los van elkaar getest en is de omgeving elke keer naar beginsituatie teruggebracht. Zodoende hebben bijvoorbeeld de eerste acht testen geen invloed gehad op de negende test. We veronderstellen daarom dat de twee steekproeven onafhankelijk van elkaar zijn. Dan geldt voor de $\text{Var}(v)$: [8]

$$\text{Var}(v) = 2 \cdot \frac{s_p^2}{6} = 2s_p^2 \cdot \left(\frac{12}{36}\right) = 10,90$$

$$\text{dus } S_v = 10,90^{1/2} = 3,30$$

Bij een onbetrouwbaarheid van 1% vinden tweezijdig in een t-verdeling tabel $t_{0,005} = 3,355$ met (8 vrijheidsgraden). Om te bewijzen dat er *geen* significant verschil bestaat tussen de varianties geldt: $S_v \cdot -t_{0,005} < S_{50\text{cm}}^2 - S_{80\text{cm}}^2 < S_v \cdot t_{0,005}$. Echter geldt in ons geval inderdaad $3,30 \cdot -3,355 < 66,2$, maar is $3,30 \cdot 3,355 < 66,2$ en voldoet hier niet aan de hypothese. Er bestaat dus een zeker verschil tussen de varianties waarbij geen sprake is van een toevalligheid. Uit deze uitkomst kunnen we concluderen dat: verkorten van de afstand van het explosief tot aan de latten een toename van storing in het systeem optreedt, zodat in de variantie significante verschillen ontstaan. In andere woorden: Met een betrouwbaarheid van 99% hebben we bewezen dat hoe dichter we het explosief plaatsen bij de plaatjes, des te groter de spreiding in uitwijking van de lat wordt en des te onbetrouwbaarder het systeem wordt.

Het ontstaan van storingen op korte afstand kan worden veroorzaakt door de wijze waarop de blastgolf zich over de afstand ontwikkelt die in paragraaf 6.3 werd besproken. Wel dient erbij vermeldt te worden dat voor een betere uitspraak meer testen gedaan moeten worden. De verwachting is dat wanneer meerdere testen worden gedaan, de onderlinge spreiding kleiner wordt en daarmee de verschillen in variantie ook kleiner zullen worden. Verder zijn er geen testen gedaan op 90 en 100 cm afstand in verband met het naderen van de oplevering van dit onderzoek. De verwachting is nu wel dat de spreiding daar nog kleiner zal zijn en de reproduceerbaarheid groter.

6.5.2 Validiteit

In hoeverre komen de resultaten overeen met de verwachtingswaarde. Uit tabel 6.3 valt direct op dat de gemeten waarden niet overeenkomen met de verwachtingswaarde. De verwachtingswaarde is vaak tot drie maal groter dan de gemeten waarde. Hoewel de proef op grote afstand wel betrouwbare resultaten levert, sluit deze niet aan bij de theoretische verwachting. Er kunnen voor dit probleem talloze theorieën bedacht worden.

Het meest voor de hand liggende oorzaak is de gekozen R_m waarde. Momenteel hebben we de R_m waarde geschat. Hoewel de waarde geschat is, wordt verwacht dat de schatting niet ver naast de werkelijke waarde zal liggen. Zelfs al zou de werkelijke R_m waarde een stuk hoger of lager dan nog zal dit niet van invloed zijn op de resultaten zijn, omdat de R_m waarde alleen geldt voor een ductiliteit groter dan 10. Waarden die in dit onderzoek niet zijn gehaald.

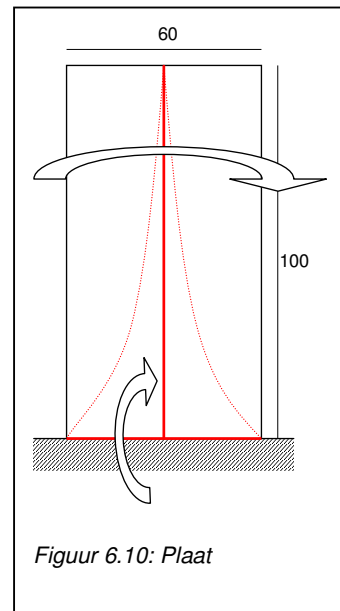
Het is ook mogelijk dat in de berekeningen een fout is gemaakt. Er is gebuikt gemaakt van de driehoeksimpuls benadering bij het bepalen van de positieve faseuur. De positieve faseuur is bepaald door het benaderde impulsoppervlak te delen door de gereflecteerde uniforme piekoverdruk en deze uitkomst te vermenigvuldigen met twee (zie paragraaf 6.4). Opvallend is dat wanneer we het benaderde impulsoppervlak alleen delen door de gereflecteerde uniforme piekoverdruk en dat resultaat gebruiken als de positieve faseuur (we vermenigvuldigen deze waarde dus nu niet met twee), dan kloppen alle verwachtingen met alle uitwijkingen. Dit mag alleen niet gedaan worden, omdat de positieve faseuur nu zomaar wordt gesplitst in tweeën. Het is mogelijk dat er ergens een fout in de berekeningen zijn gemaakt, maar die is tot nu toe niet gevonden.

Een andere mogelijke verklaring is de wijze van verdeelde belasting. Een minder verdeelde belasting zorgt ervoor dat de uitwijking minder is. De belasting op 80 cm is veel beter verdeeld dan bij 50 cm en moet daarom beter aansluiten bij de theorie. Echter, ook bij 80 cm afstand is er tussen de werkelijke meting en verwachting ook een zeer groot verschil. Een andere verklaring moet daarom gevonden worden.

Er kunnen onnauwkeurigheden in de proefopstelling zitten die voor een andere uitwijking zorgen. Er moet dan vooral worden gekeken naar de inklemming. Een volledig ingeklemde lat kan niet bewegen. De gebruikte inklemming had enigszins afgeronde hoeken, waardoor een zeer kleine bewegingsruimte voor de lat ontstaat. Deze speling is een belangrijke factor voor het verminderd doorbuigen van de latten. Echter, dit kan niet de enige oorzaak zijn, de balken zijn namelijk tot drie keer minder doorgebogen dan verwacht.

Een mogelijke aanvullende verklaring ontstond bij nadere bestudering van de gebruikte theorie. De theorie voor het berekenen van latten die enkelvoudig zijn ingeklemd en dynamisch worden belast is een benaderingswijze voor balken. Uit de definitie van [14] blijkt dat balken een breedte/hoogte verhouding hebben van 1/20 tot 1/30. De gebruikte latten die voor de proeven zijn gebruikt hebben een breedte/hoogte verhouding van (60 mm / 100 mm) 3/5. De dimensies van onze lat neigt meer naar die van een plaat. Een meer geschikte classificatie voor de gebruikte latten is plaatjes. Voor platen is echter een andere benadering voor dynamische belasting dan voor latten.

Behalve de speling in de inklemming sluiten de resultaten waarschijnlijk ook niet aan doordat het plaatje in twee richtingen wilt doorbuigen. Namelijk bij de inklemming, maar waarschijnlijk ook over een verticale middenas. De energie die wordt gebruikt voor de vervorming om de middenas gaat dan ten koste van de vervorming bij de inklemming, waardoor een minder grote uitwijking wordt gehaald. In de figuur 6.10 is de mogelijke vervorming rond de middenas weergegeven. Waarbij de rode stippellijnen een mogelijke elastische lijn in de plaatjes aangeeft. Er moet wel bij gezegd worden dat dit een theorie is die niet getest of gecontroleerd is. Hiervoor zijn verdere testen noodzakelijk. Deze theorie mag daarom niet zomaar worden aangenomen.





7 *Conclusie & aanbevelingen*

7.1 Conclusie

In dit onderzoek naar proefopstellingen voor een practicumdag heb ik getracht een drietal verschillende proeven te ontwikkelen. Deze proeven zijn veelvuldig getest naar gelang de tijd die hiervoor beschikbaar was. Uit de diverse analyses zijn veel conclusies te trekken. De meest belangrijke conclusies wil ik hier vermelden.

Over het algemeen geldt dat de praktijk heel erg nauw luistert met de theorie, het ontwikkelen van goede proeven vergt veel tijd, veel testen en een goede voorbereiding. Verschillen tussen theorie en praktijk treden altijd op, zelfs bij redelijk eenvoudige proeven. Deze afwijkingen worden groter naarmate de complexiteit van een proef toeneemt. Voor de verschillen tussen de praktijk en theorie is niet altijd een verklaring te vinden.

Van de drie ontwikkelde proeven is de piekoverdruk uit de eerste proef goed te voorspellen. De verwachte curve van de piekoverdruk is goed herkenbaar in de meting en de verschillende opstellingen geven een goede eerste indruk van de effecten van een explosie. De gestelde leerdoelen worden gehaald en procentuele verschillen liggen rond de gestreefde nauwkeurigheid van 20%. Deze marge is wel op gevoel gebaseerd. De resultaten van de eerste proef geven de toekomstige gebruiker een indicatie over de afwijking die deze proef met zich meebrengt. Opvallend is dat er tijdens de verdere testen van de proef meer resonantie optrad. Veelvuldig controleren van de opstelling en de meetinstrumenten is daarom wel noodzakelijk.

De tweede proef bestond uit het bepalen van dynamische belasting op een constructie. Hier werden drie sensoren aan een constructie bevestigd en werden de piekoverdrukken per zijde berekend. De resultaten vertonen kleine verschillen met de verwachting, maar de metingen geven een mooi beeld van het drukverloop op een constructie. Met behulp van de resultaten wordt de verdeling van de belasting erg inzichtelijk gemaakt. De gebruikte constructie voor de meting is voor veel verschillende proeven gebruikt en gaf zeer constante resultaten. De constructie bewees zeer stabiel te zijn en voor veel verschillende doeleinden geschikt.



Het is al eerder gezegd dat wanneer een opstelling complexer wordt, het moeilijker is om er een goede verwachting aan te koppelen. Dit was vooral het geval in de laatste proef, de vervormingproef. Voor de vervormingproef zijn veel opstellingen ontwikkeld. Opstellingen die steeds gedetailleerder werden en verder werden ontwikkeld. De belangrijkste ontwikkelingen zijn vooral de wijze van belasten en de robuustere inklemming. Verder maakte de keuze van een geschikt materiaal het mogelijk om met relatief kleine springladingen toch een vervormingproef te ontwikkelen. Deze ontwikkelingen hebben geleid tot een aantal belangrijke kenmerken. De proef heeft goede reproduceerbare resultaten en is in een korte periode voor te bereiden. Door de verbogen latten naast elkaar te leggen ontstaat een goed illustratief beeld zonder gebruik te hoeven maken van dure hogesnelheidscamera's.

7.2 Discussie & aanbevelingen

Over het algemeen hebben de testen die tot nu toe zijn uitgevoerd een redelijk beeld gecreëerd over de eigenschappen van deze proeven. Hoewel de opstellingen zijn getest en geanalyseerd is het nog vroeg om deze opstellingen aan te dragen als practicumtest. Hiervoor zijn nog wat onzekerheden die een vervolgstudie noodzakelijk maken.

Een groot discussiepunt is de hoeveelheid herhalingstesten die per proef zijn uitgevoerd. Hoewel het in de springbunker en bij kleinschalige NAVO onderzoeken het gebruikelijk is dat drie testen nodig zijn om reproduceerbaarheid vast te stellen, is dit naar mijn mening aan de magere kant. Voor een goede statistische analyse van de proeven zijn series van minimaal tien stuks geen overbodigheid. In een vervolgstudie kunnen meerdere herhalingstesten worden gedaan, die de hoeveelheid beschikbare data kan aanvullen, waardoor een betrouwbaarder beeld kan worden gegeven. Dit geldt voornamelijk voor de eerste proef.

De tweede proef heeft in dit onderzoek zeer goede resultaten geboekt. De veelzijdigheid van de constructie is naar mijn mening niet tot zijn recht gekomen in dit onderzoek. De constructie kan door zijn afneembare platen en sterke skelet voor oneindig veel proeven worden gebruikt. In een vervolgonderzoek raad ik aan hier gebruik van te maken. Zo kunnen onderzoeken gedaan worden naar bijvoorbeeld de sterkte van enkelglas ten opzichte van dubbel gelaagd glas onder dynamische belastingen of een drukmeting in kleine ruimtes met veel reflectie (zie bijlage 3).



De vervormingproef kan verder worden ontwikkeld. De goede reproduceerbare resultaten hebben nog geen valide uitkomst. Er zijn een aantal mogelijke oorzaken aangedragen, die in een vervolgonderzoek kunnen worden onderzocht.

Voor het ontwikkelen van nieuwe proeven is het aangeraden dergelijke testen in de springbunker uit te voeren. Behalve het grote scala aan meetapparatuur en gereedschappen, dat daar beschikbaar is, is de ruimte ideaal. De omgeving is namelijk niet onderhevig aan regen, wind, of schommelingen in temperatuur of terrein. Dit maakt snel en goed testen mogelijk.



Literatuurlijst

Literatuur

- [1] L.H.J. Absil e.a (2001). *Collegedictaat: Pyrotechniek en Beschermingsconstructies*. Rijswijk: TNO Prins Maurits Laboratorium
- [2] R. Bourgois (1999). *Constructies onderworpen aan explosie-belastingen deel 1*. Brussel (België): Koninklijke Militaire School
- [3] R. Bourgois (1999). *Constructies onderworpen aan explosie-belastingen deel 2*. Brussel (België): Koninklijke Militaire School
- [4] C. Hartsuijker (2001). *Toegepaste Mechanica deel 1, Evenwicht*. Schoonhoven: Academic Service
- [5] C. Hartsuijker (2001). *Toegepaste Mechanica deel 2, Spanningen, Vervormingen, Verschuivingen*. Schoonhoven: Academic Service
- [6] P.H.H Leijendeckers e.a (2002). *Polytechnisch zakboek*. Arnhem: Elsevier. 49^e druk
- [7] U.S. Army Corps of Engineers (1998). *Technical Manual 5-855-1 Design and Analysis of Hardened Structures to Conventional Weapons Effects*. Washington, D.C. (U.S.A)
- [8] A. Buijs (2000). *Statistiek om mee te werken*. Houten: Educatieve Partners Nederland B.V. zesde druk, vierde oplage
- [9] P.D. Smith e.a (1994). *Blast and Ballistic Loading of Structures*. Oxford: Butterworth-Heinemann Ltd (Groot Brittannië)
- [10] W.E. Baker e.a (1983). *Explosion hazards and evaluation*. San Antonio (U.S.A)
- [11] C-COKL. (1987). *VS 5-77 Vernielingen met springstof 3^e druk*. Den Haag: Ministerie van Defensie
- [12] W.L. Bolderman (2005). *Blasttest op Staalplaat*. Breda: Koninklijke Militaire Academie
- [13] VROM (2003). *Publicatiereeks Gevaarlijke Stoffen 1. Deel 2B: Effecten van explosie op constructies*. Den Haag: Ministerie van Verkeer en Waterstaat
- [14] A.H.L.G. Bone ea (2002). *Tabellenboek Bouwkunde*. Houten: Wolters-Noordhoff. Eerste druk, derde oplage
- [15] U.S. Army Corps of Engineers (1996). *Technical Manual 5-1300 Structures tot resist the effets of accidental explosions*. Washington, D.C. (U.S.A)

Toegepaste software

- [16] D. Hyde (1991). *Conwep, Application of TM-5-855*. U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station. Vicksburg (U.S.A)
- [17] PCB Piezotronics (z.j). *CD-Rom version 0300*. Depew (U.S.A): PCB Piezotronics



Bijlagen

Bijlage (1): Cd coëfficiënten

870339		
vorm	figuur	C _D
lange rechte cilinder	stroming → 	1.2
bol		0.47
cilinder	→ 	0.82
schijf	→  or 	1.17
kubus	→ 	1.05
kubus	→ 	0.80
langwerpige doos	→ 	2.05
langwerpige doos	→ 	1.55
strip	→ 	1.98

Bijlage (2): Ontwerp van een constructie voor dynamische belastingen

Voor de tweede drukproef (hoofdstuk 5) is een constructie noodzakelijk die het mogelijk acht om de juiste metingen te verrichten. Alvorens verder wordt gegaan over de constructie eerst een kleine toelichting. In de planning stond behalve een drukproef op constructies ook een drukproef op glas gepland. Deze laatste proef is door gebrek aan tijd niet doorgegaan, maar de voorbereidingen voor deze proef zijn wel in het ontwerp meegenomen. Deze voorbereidingen worden tevens besproken in de verdere ontwikkeling van de constructie. Zo geldt voor de drukproef een constructie met de volgende voorwaarden:

De constructie moet zwaar genoeg zijn om te kunnen blijven staan wanneer deze in contact komt met een blastgolf van bepaalde grootte.

De constructie moet licht genoeg zijn om te kunnen vervoeren over een langere afstand.

- De constructie moet stevig genoeg zijn om illustratieve proeven mee uit te voeren.
- De constructie moet geometrisch zo simpel mogelijk in elkaar zitten om complexe berekeningen uit te bannen.
- De constructie moet handelbaar zijn. Hier wordt onder verstaan dat het aanbrengen of demonteren van sensoren eenvoudig en snel moet kunnen gebeuren.

Voor de glasproef zijn de volgende eigenschappen noodzakelijk:

- De constructie moet zwaar genoeg zijn om te kunnen blijven staan wanneer deze in contact komt met een blastgolf.
- De constructie moet licht genoeg zijn om te kunnen vervoeren over een langere afstand.
- De constructie moet stevig genoeg zijn om illustratieve proeven mee uit te voeren
- De constructie moet wegschietende glasfragmenten kunnen opvangen om de veiligheid in acht te houden.
- De constructie moet zodanig zijn dat verschillende glassdikten kunnen worden getest.
- De constructie moet geometrisch zo simpel mogelijk in elkaar zitten om complexe berekeningen aan glasplaten uit te bannen zijn.

Het meest ideale ontwerp is een holle kubus met een opening aan de onderzijde. Een kubus is een simpel ontwerp en daarom snel te fabriceren. De holte in de kubus stelt



gebruikers in de gelegenheid om vanuit de onderzijde apparatuur in en aan de constructie te monteren dan wel te demonteren. Indien men de kubus ondersteboven neerzet, met het gat naar boven gericht, creëert men een bak waarop de glasplaat gelegd kan worden. De eventuele glasscherven bij een explosie worden zodoende opgevangen in de bak. Hierdoor blijft de veiligheid garant.

Van de diverse ontwerpen is er uiteindelijk een naar voren gekomen. Ieder ontwerp was eigenlijk een verkleinde versie van het voorgaande ontwerp. Uiteindelijk zijn minimale maten genomen om de constructie licht te houden. Het lichtste materiaal om de kubus van te maken is hout of aluminium. Een groot nadeel hiervan is dat de kubus dan verliest aan stevigheid ten opzichte van staal of beton. Een groot nadeel van beton is dat de kubus lastiger te fabriceren is en heel erg zwaar wordt. Het meest geschikte materiaal is staal. De minimale afmetingen van de onder en bovenzijde van de kubus dienen 300 mm te zijn, dit in verband met de glasproef, waar bij bedoeling 300x300 mm glazen werden beproefd. Voor de overige zijanten is om niet bepaalde redenen ook gekozen voor 300 mm.

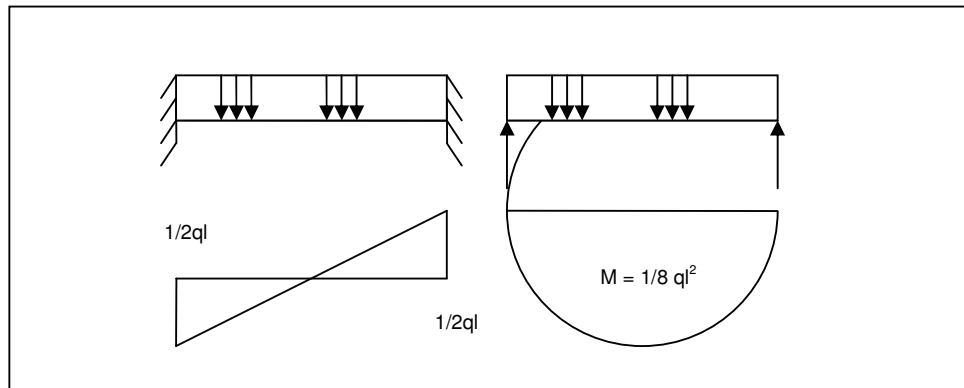
Om er zeker van te zijn dat de kubus de drukproef 2 en de glasproef, maar vooral andere belastingproeven in de toekomst, kan weerstaan moet de kubus stevig worden uitgevoerd. De kubus bestaat uit vier hoekprofielen met flensen van 30 mm lang en zes mm dik. De onderlinge flensen worden doormiddel van lassen verbonden door U profielen. De platen die de kubus afdekken hebben een dikte van drie mm.

Elke explosie heeft een andere uitwerking en de kubus moet behalve deze proeven ook proeven onder andere (zwaardere) omstandigheden kunnen weerstaan. Om te bepalen welke springladingen op welke afstand van de kubus geplaatst mogen zodat dat de kubus in het elastische gebied blijft zijn er aan de kant van de blastgolf slechts twee variabelen:

- de (gereflecteerde) piekoverdruk van de blastgolf
- de positieve faseduur van de blastgolf

De zwakste schakel van de kubus zijn de platen die aan alle zijden worden gemonteerd. De grootste druk zal optreden aan de voorzijde van de kubus, dus op de voorste plaat. De voorzijde van de kubus wordt gezien als een balk ingeklemd tussen twee liggers.

Waarbij de mechanische modellering van het systeem als volgt geschematiseerd kan worden:



Bij de berekening van de sterkte wordt aangenomen dat de constructie alleen door impulsieve explosies wordt belast. Een eis is dat de constructie niet plastisch mag vervormen onder de explosiebelasting. Voor elastische impulsbenaderingen geldt (paragraaf 2.3.4):

$$(1) \quad \mu = \frac{P \cdot \pi \cdot t_0}{R_m \cdot \tau}$$

Het maximaal toelaatbare moment (elastisch) en uitwijking voor de constructie wordt uit de mechanica leer als volgt bepaald:

$$(2) \quad M = \frac{1}{8} \cdot ql^2$$

$$(3) \quad M_{el} = \frac{4}{3} \cdot R_e \cdot BH^2 = \frac{4}{3} \cdot 365 \cdot 170 \cdot 3^2 = 0,75 \text{ kNm}$$

Substitutie uit (2) geeft voor de uitwijking X_e :

$$(4) \quad X_e = \frac{5}{384} \cdot \frac{Ml^2}{EI} = \frac{5}{384} \cdot \frac{ql^4}{EI}$$



De eigentrillingstijd van de constructie is:

$$(5) \quad T_{el} = 2\pi \cdot \sqrt{k_{lm} \cdot \frac{M_b}{k_b}}$$

waarbij,

$$(6) \quad M_b = 7853 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 320 \cdot 170 \cdot 3 = 1,24 \text{ kg}$$

$$(7) \quad K_b = \frac{ql}{X_e} \text{ N/m}$$

$$K_b = \frac{ql}{\frac{5}{384} \cdot \frac{ql^4}{EI}} = \frac{384}{5} \cdot \frac{EI}{l^3} = \frac{384}{5} \cdot \frac{210.000 \cdot \frac{1}{12} \cdot 170 \cdot 3^3}{310^3} = 2,07 \cdot 10^5 \text{ N/m}$$

Door de bovenstaande waarden in te vullen in (5) geeft:

$$(8) \quad T_{el} = 2\pi \cdot \sqrt{0,624 \cdot \frac{1,24}{2,07 \cdot 10^5}} = 12,1 \text{ ms}$$

De vloeispanning van staal is 235 N/mm^2 , uit de vervormingleer is bepaald dat door dynamische belasting deze vloeispanning hoger ligt. Voor een a geldt 1,1 en c is een staalfactor van 1,36. [3]

$$(9) \quad R_e = a \cdot c \cdot \sigma = 1,1 \cdot 1,36 \cdot 235 = 365 \text{ MPa voor } \mu < 10$$

De opgevangen overdruk wordt bepaald door:

$$(10) \quad P_0 = P_s \cdot 0,32 \cdot 0,17 = 0,0544 \cdot P_s$$

Substitutie van (12) in combinatie met (4) levert de benodigde waarden met twee variabelen,

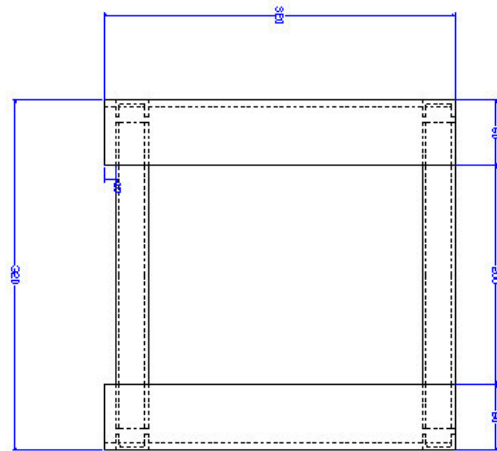
$$\mu = \frac{P_s \cdot 0,0544\pi \cdot t_0}{365 \cdot 12,1} < 1$$



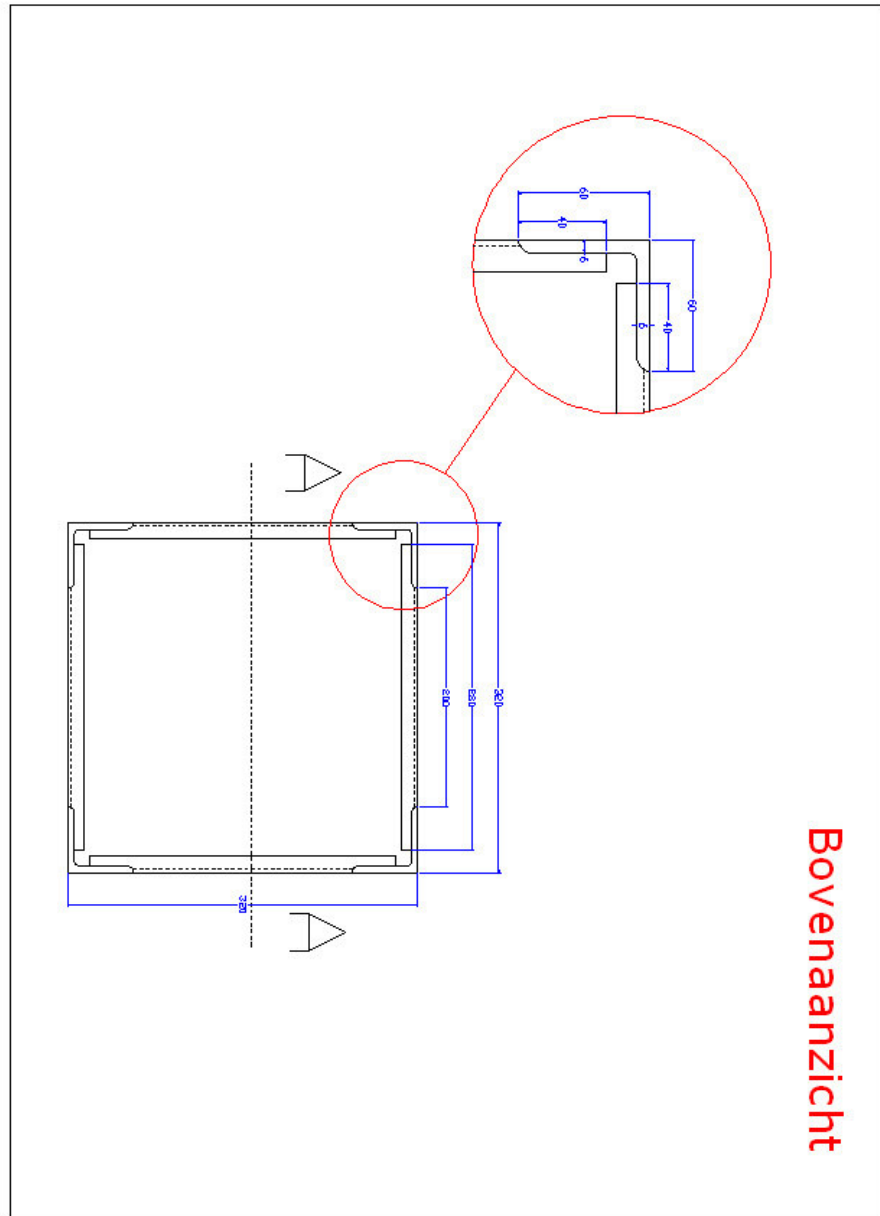
De afstand tot en de lading de explosie zijn bepalend voor de piekoverdruk en de positieve fase-duur (zie hoofdstuk 2). Zodoende kan de bijbehorende ductiliteit worden bepaald. In de onderstaande tabel staan enkele springladingen in grammen en de afstand in meters voor Brasschaat uitgerekend met de bijbehorende ductiliteit. Een ductiliteit hoger dan 1 is aangeduid met een rood vlak en is ongeschikt voor een betrouwbare meting doordat plastische vervorming zal optreden aan de constructie. Een ductiliteit dicht bij 1 is aangeduid met een grijs vlak, omdat het een grensgeval is van elastisch en plastisch en dient daarom afgeraden te worden voor gebruik. Groene vlakken hebben een ductiliteit onder 1 en zijn geschikt voor proefmetingen. In deze gevallen wordt de constructie elastisch belast.

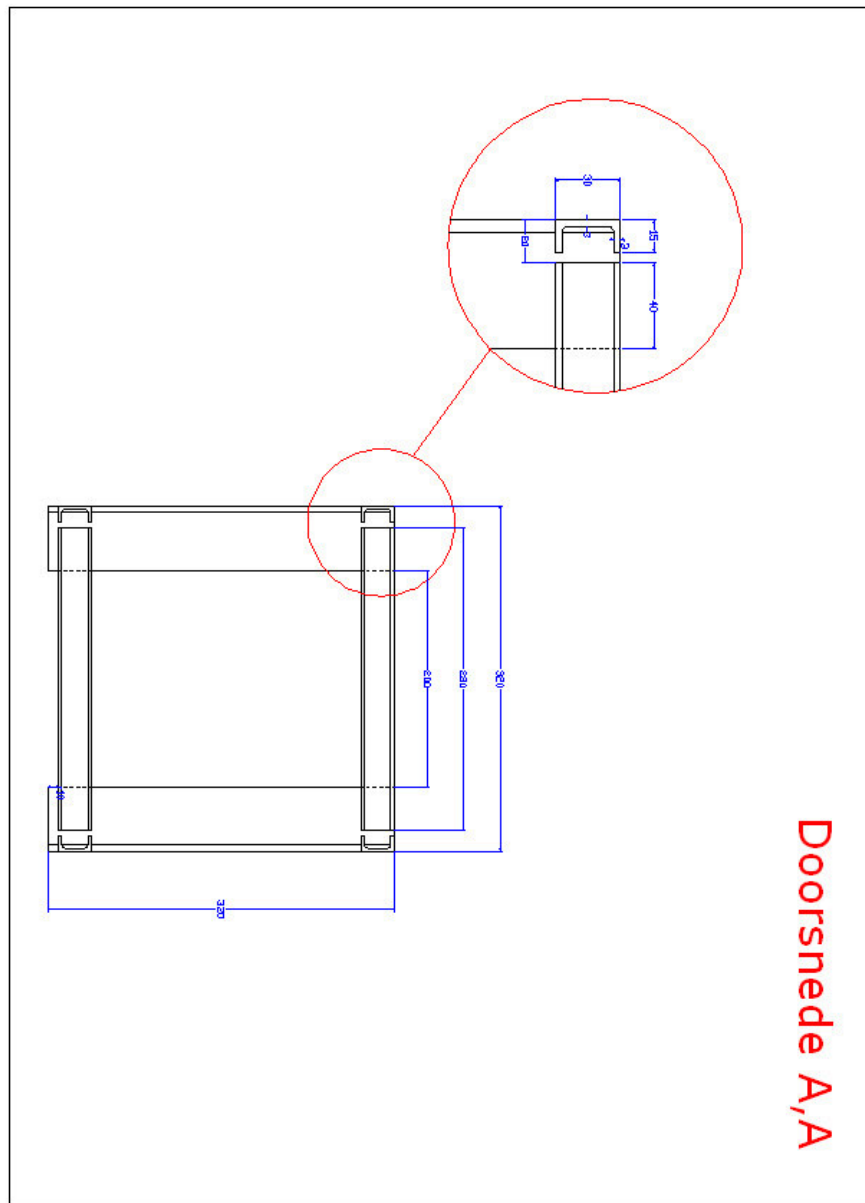
g/m	1	2	3	4	5
700	37,84	5,3	2,39	1,43	0,99
600	33,92	4,4	2,08	1,24	0,87
500	27,66	3,68	1,74	1,04	0,75
400	21,84	2,88	1,43	0,86	0,61
300	14,95	2,14	1,07	0,85	0,5

g/m	6	7	8	9	10
2000	1,84	1,43	1,17	0,99	0,87
1800	1,68	1,3	1,07	0,91	0,8
1600	1,51	1,19	0,97	0,82	0,72
1400	1,35	1,05	0,88	0,76	0,65
1200	1,16	0,93	0,77	0,67	0,59
1000	1,01	0,8	0,68	0,58	0,51



Vooranzicht







Bijlage (3): Werking van Excel programma

In dit hoofdstuk wordt de rekenwijze van vervorming in het Excel programma nader toegelicht. Excel werkt zelf met zogenoemde cellen. Deze cellen kunnen aan elkaar gekoppeld worden om zo informatie aan een andere cel door te geven of uit te lezen. Deze koppelingsmethode in Excel moet volgens bepaalde commando's gaan. Dit hoofdstuk buigt zich niet over de wijze waarop de cellen door commando's aan elkaar gekoppeld zijn.

Interface

De interface van het programma ziet er als volgt uit. In de onderstaande figuur staat het tabblad voor de invoer van het systeem. Het betreft hier de Blasteigenschappen (hierover later meer), het type en soort profiel kan gekozen worden door een menu en de geometrische eigenschappen van het profiel. In de "Overig" kolom kan men het profiel invoeren als een dwars- of langsligger. Hierbij is het te berekenen profiel een groter oppervlak aan het dragen. De gebruiker hoeft dan enkel de breedte van het te dragen oppervlak in te voeren. In de kolom "SDOF vervormingsfactoren" kan men de factoren wijzigen. De uitkomst van het profiel staat in de onderste kolom. Hier wordt de maximale uitwijking bepaald en vermeld of het profiel elastisch of plastisch is verbogen.

Blast eigenschappen			Overig			
Ps	421.100	Pa	Plaat		mm	
t0	0,13	ms				
			SDOF vervormingsfactoren			
Type	Lat		Km	Kl	Kk	Klm
Soort	Aluminium		elas	0,26	0,36	0,38
Re	180	N/mm2	plas	0,33	0,50	0,67
E	70.000	N/mm2				
Gewicht	2.700	kg/m3				
L	100	mm				
			Uitkomst van het profiel			
B (1/2)	30,00	mm	Het profiel is elastisch verbogen, de verwachte uitwijking is			
H (1/2)	0,50	mm				
			28,14		mm	
			2,813647671		cm	
door: CS M. van Kaam dec. 2005						



Stap 1: Mechanische model

De eerste stap voor het programma is het bepalen van de elastische uitwijking. Deze is nodig om later de plastische uitwijking te bepalen.

$X_e = \frac{R_m}{K}$ waarbij $R_m = \frac{2M_{pl}}{l}$ en $K = \frac{8EI}{l^3}$, substitutie geeft:

$$X_e = \frac{M_{pl} \cdot l^2}{4EI}$$

Stap 2: Bepaal plastische moment

Van het gekozen profiel wordt het plastische moment bepaald. In het voorbeeld rekent het programma met een stalen lat met de volgende dimensies $l \times b \times h = 850 \times 40 \times 3$ mm. Het programma is tevens geschikt voor het rekenen met aluminium latten, of IPE profielen van staal of aluminium. Meerdere opties zijn mogelijk en dienen ingevoerd te worden in het derde tabblad in de database. Hier is enige kennis van Excel wel nodig. Het plastische moment voor de stalen lat wordt als volgt bepaald:

2a) bepaal σ_{adm}

$$R_e = 235 \text{ MPa} < 345 ; a = 1,1$$

$$R_m = 365 \text{ MPa}$$

$$\mu < 10; \sigma_{adm} = a \cdot c \cdot R_e = 1,1 \cdot 1,36 \cdot 180 = 269 \text{ MPa}$$

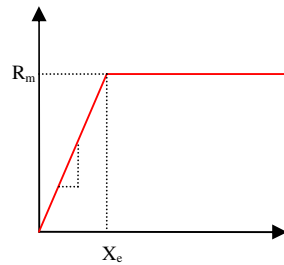
$$\mu > 10; \begin{aligned} \sigma_{adm} &= a \cdot c \cdot R_e + 0,25 \cdot (c \cdot R_m - a \cdot c \cdot R_e) \\ \sigma_{adm} &= 352 + 0,25(1,1 \cdot 269 -) = 364,4 \text{ MPa} \end{aligned}$$

2b) $M_{pl} = 2 \cdot BH^2 \cdot \sigma_{adm}$

$$\mu < 10; M_{pl} = 2 \cdot 20 \cdot 1,5^2 \cdot 352 = 31.680 \text{ Nmm}$$

$$\mu > 10; M_{pl} = 2 \cdot 20 \cdot 1,5^2 \cdot 364,4 = 21.796 \text{ Nmm}$$

Stap 3: bepalen van de R_{mb}



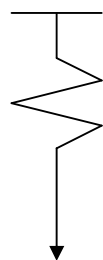
$$R_{mb} = \frac{2M_{pl}}{l}$$

$$\mu < 10; R_{mb} = \frac{2 \cdot 31.680}{850} = 0,075 \text{ kN}$$

$$\mu > 10; R_{mb} = \frac{2 \cdot 21.796}{850} = 0,078 \text{ kN}$$

Stap 4: Equivalentie SDOF

Met behulp van de transformatiefactoren kan het programma de mechanische waarden omschalen naar het “*Single Degree of Freedom*” model. Verschalen gaat op de volgende wijze:



$$K = k_k \cdot k_b$$

$$M = k_m \cdot M_b$$

$$P = k_l \cdot P_b$$

$$k_b = \frac{8EI}{l^3}$$

$$M_b = \rho \cdot B \cdot H \cdot L$$

$$P_b = P_r \cdot B \cdot H$$

	K_m	K_l	K_k	K_{lm}
Elasticiteit	0,26	0,40	0,38	0,65
Plasticiteit	0,33	0,50	-	0,66

Stap 5: Controle Eigenperiode

Met behulp van de verschaalde waarden kan het programma de Eigenperiode van het systeem uit rekenen:

$$\tau_{elastisch} = 2\pi \cdot \sqrt{K_{lm,elas} \cdot \frac{M_b}{K_b}}$$

$$\tau_{plastisch} = 2\pi \cdot \sqrt{K_{lm,plas} \cdot \frac{M_b}{K_b}}$$

$$5a) \quad K_b = \frac{8 \cdot 210.000 \cdot \frac{1}{12} \cdot 40 \cdot 3^3}{850^3} = 246 \text{ N/m}$$

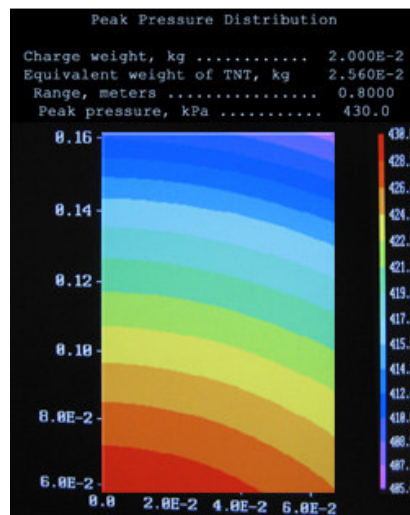
$$M_b = 7.850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 0,003 \cdot 0,85 \cdot 0,04 = 0,80 \text{ kg}$$

$$5b) \quad \tau_{elastisch} = 2\pi \cdot \sqrt{0,65 \cdot \frac{0,80}{246}} = 290 \text{ ms}$$

$$\tau_{plastisch} = 2\pi \cdot \sqrt{0,66 \cdot \frac{0,80}{246}} = 291 \text{ ms}$$

Stap 6: Belastingregime's bepalen

Het bepalen van de belastingregime's is enigszins lastig. De waarden die moeten worden ingevuld in het programma zijn de "equivalente gereflecteerde verdeelde belasting" en de "equivalente positieve faseduur".



Deze waarden kunnen snel berekend worden in CONWEB's "Loads on structures", waarin een uniforme verdeelde belasting uitgerekend kan worden en een equivalente Impuls. Het output schema kan er als volgt uitzien: Dit is een voorbeeld van plaatje dat enigszins scheef wordt belast. Door de equivalente impuls maal twee te delen door de equivalente verdeelde belasting vindt men de positieve faseduur



die in het programma onder t_0 ingevoerd dient te worden.

Indien t_0 is bepaald kan het domein van de blastgolf bepaald worden. Hierbij is de uitkomst belangrijk voor de keuze van het domein. Ook hier houdt het programma rekeningen mee.

Indien:

6a) $0,1 < \frac{2\pi \cdot T}{\tau} < 0,4 = \text{impulsbelasting}$

$$\text{Elastisch: } \mu = \frac{P_s \cdot \pi \cdot t_0}{R_m \cdot \tau} \text{ voor } \mu < 1; \text{voorwaarde } \left(\mu = \frac{P_s \cdot \pi \cdot t_0}{R_m \cdot \tau} \right) < 1$$

$$\text{Plastisch: } \mu = \frac{1}{2} \cdot \left[\left(\frac{P_r \cdot \pi \cdot t_0}{R_m \cdot \tau} \right)^2 + 1 \right]; \text{voorwaarde } \left(\mu = \frac{P_s \cdot \pi \cdot t_0}{R_m \cdot \tau} \right) \geq 1$$

6b) $\frac{2\pi \cdot T}{\tau} \geq 20 = \text{quasi-statische belasting}$

$$\text{Elastisch: } \mu = \frac{2P_s}{R_m}$$

$$\text{Plastisch: } \mu = \frac{1}{2 \cdot \left(1 - \frac{P_r}{R_m} \right)}, \text{ voor } \mu > 1$$

6c) $0,4 \leq \frac{2\pi \cdot T}{\tau} \leq 20 = \text{Dynamische belasting}$

$$\frac{P_r}{R_m} = \frac{\tau}{\pi \cdot t_0} \cdot \sqrt{2\mu - 1} + \frac{1 - \frac{1}{2\mu}}{1 + 0,7 \cdot \frac{\tau}{t_0}}, \text{ voor } \mu > 1$$

Stap 7: Bepaal de elastische doorbuiging

Zodra het programma het juiste domein heeft gekozen, doet hij automatisch de controle voor de ductiliteit. Hierbij controleert hij tevens of hij voor de volgende stap elastisch of plastisch moet rekenen voor de uiteindelijke uitwijking. In deze stap heeft het programma alle benodigde informatie om de elastische doorbuiging van stap 1 te kunnen berekenen:



$$X_e = \frac{R_m}{K} = \frac{2m_{pl}/l}{8EI/l^3} = \frac{M_{pl} \cdot l^2}{4EI}$$

$$X_e = \frac{31.680 \cdot 850^2}{4 \cdot 210.000 \cdot \frac{1}{12} \cdot 40 \cdot 3^3} = 303 \text{ mm}$$

Stap 8: Bepaal de verwachte plastische uitwijking aan de hand van de ductiliteit.

Met behulp van de in stap 7 gevonden elastische uitwijking en de ductiliteit uit stap 6

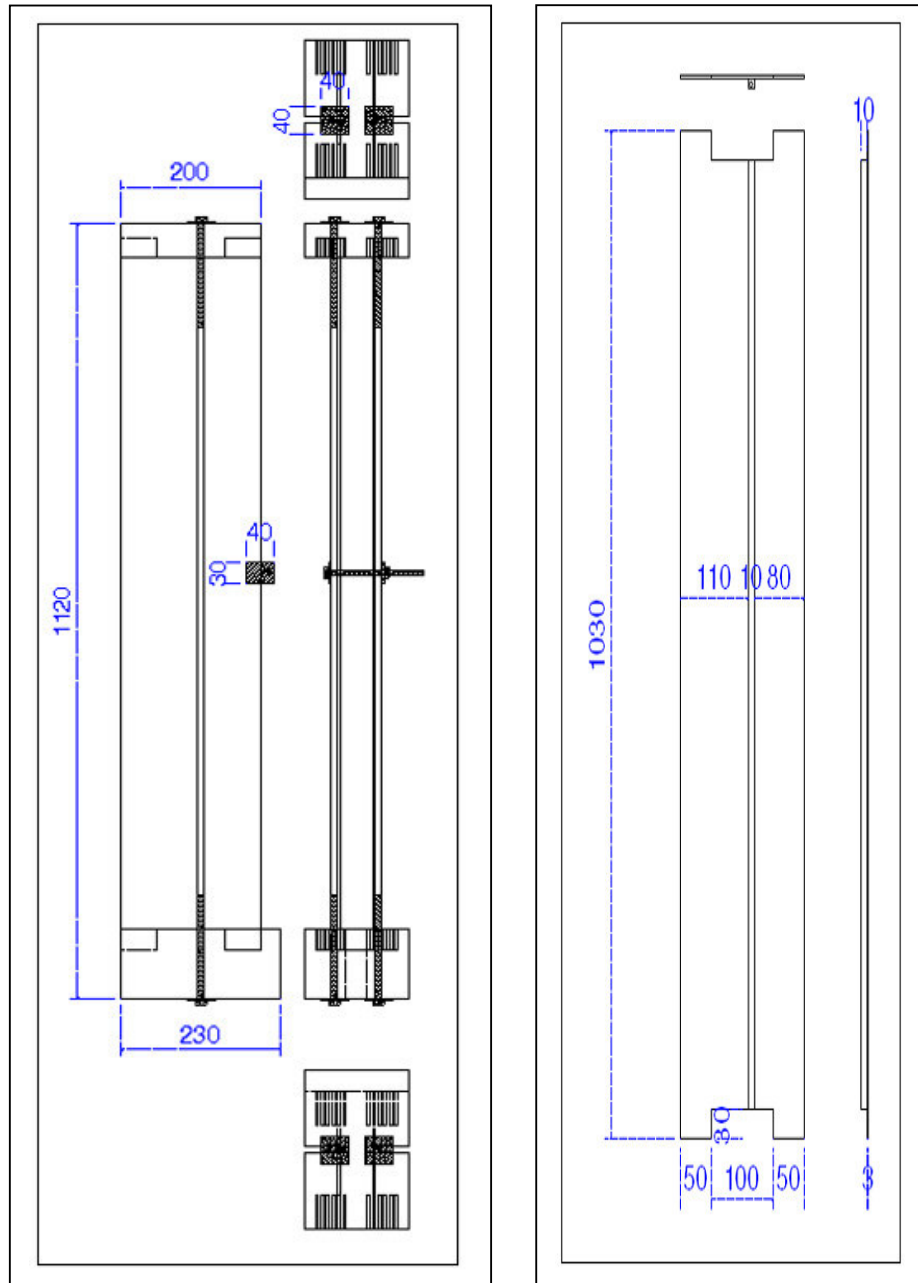
$$\mu = \frac{X_{\max}}{X_e} \rightarrow X_{\max} = \mu \cdot X_e$$

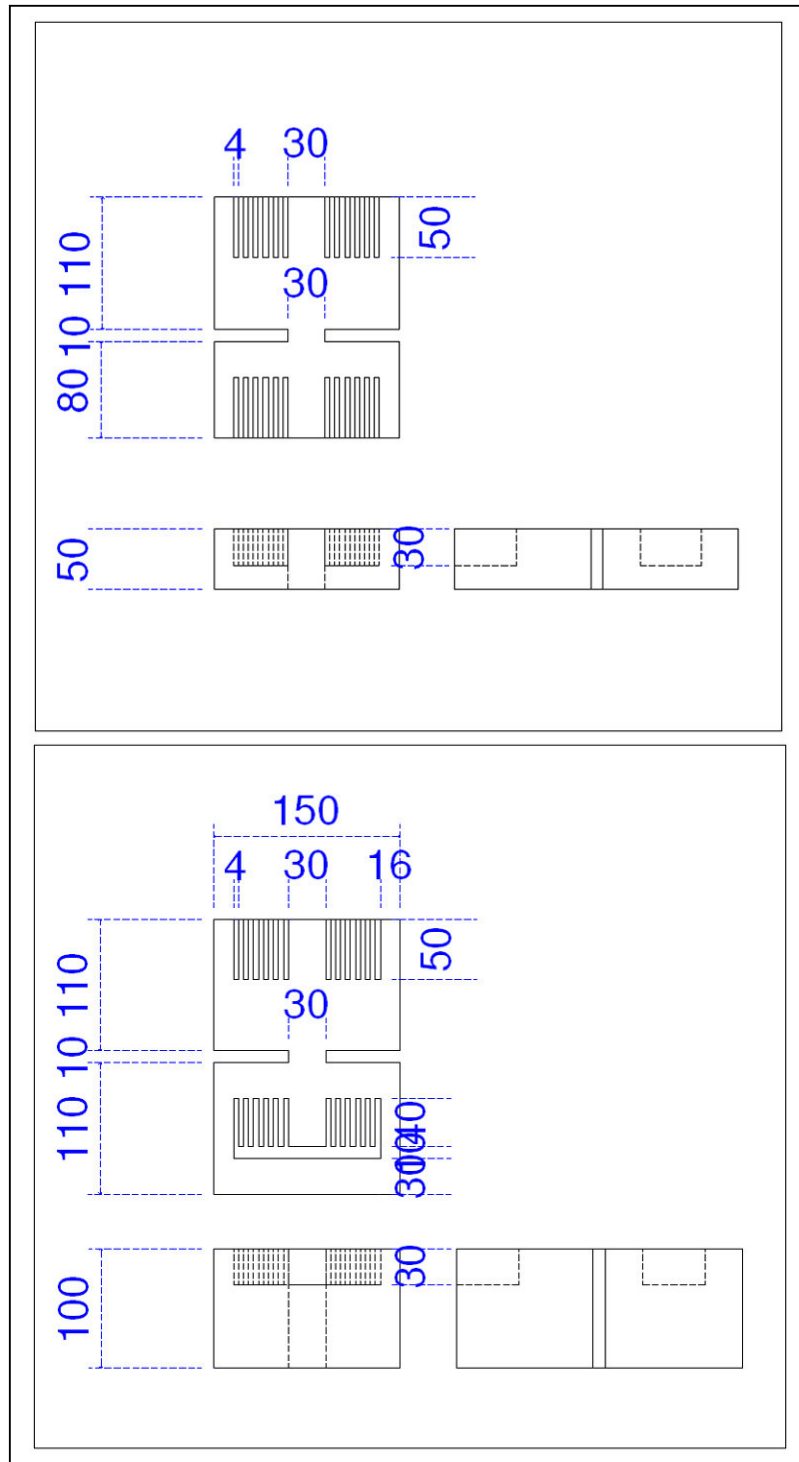
kan nu de maximale (plastische) uitwijking worden bepaald.

Alle stappen worden in het overzichts-tabblad van het programma getoond, zo kan de gebruiker alles narekenen indien hij of zij dit wenst. Onderstaande figuur is een voorbeeld van zo een overzicht.

Geschematiseerde Belastingen					
σ_{Adm}	269	281,66	Mpa	Oppervlakte	60,00
Mp	4.039,20	4.224,83	Nmm	I	5,00
	0,00	0,00	khm		
Rmb	0,08	0,08	kN		
SDOF					
Kb	2.800,00		N/m		
Mb	0,02		Kg		
Pb	2.526,60		N		
Eigenperiode					
elas	11,94		ms		
plas	12,33		ms		
Impuls of Quasi-Statisch?					
elas	0,03		Impuls		
plas	0,03		Impuls		
Controle Elastisch of Plastisch					
μ -elas	1,1				
μ -plas	0,98				

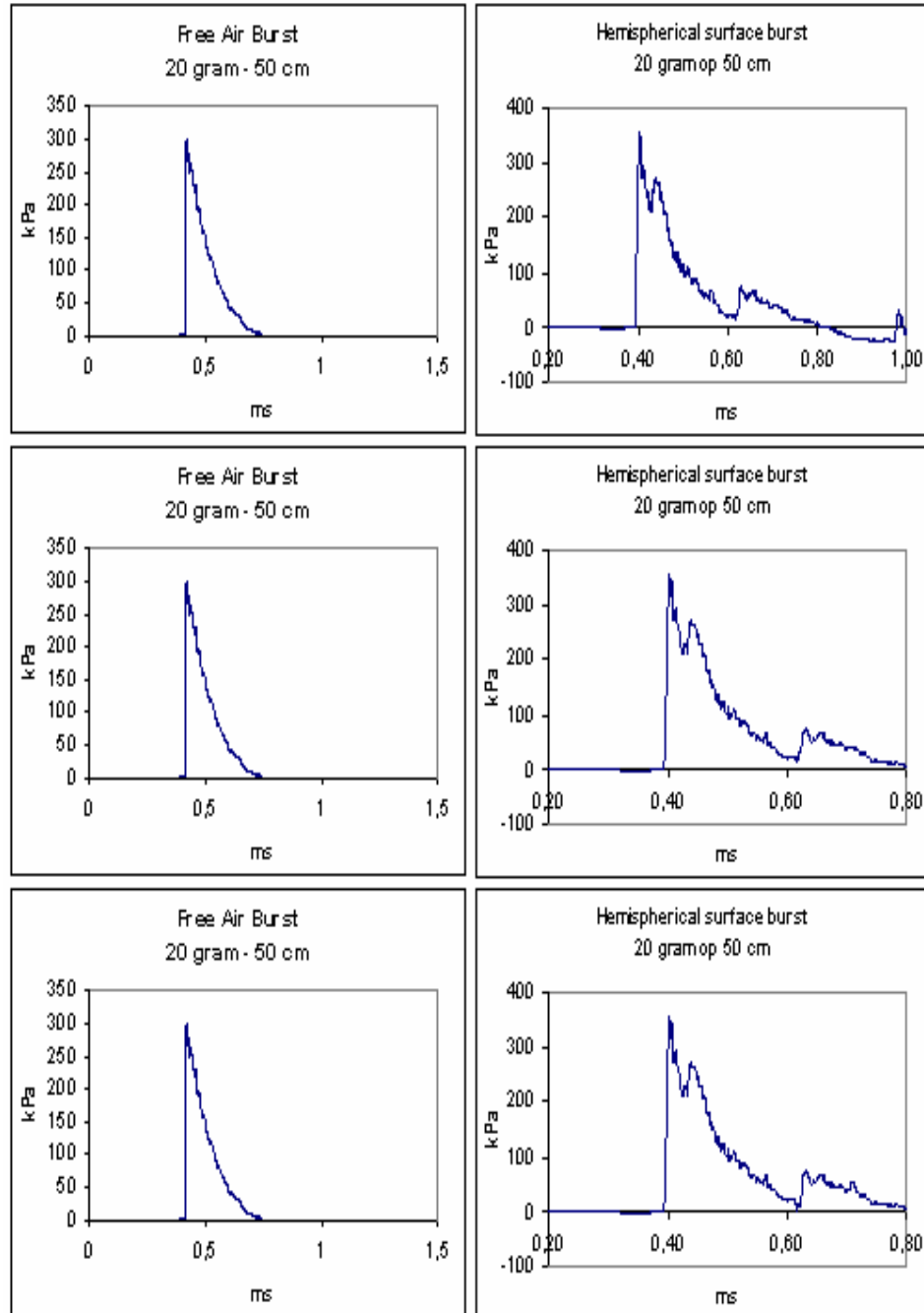
Bijlage (4) Eerste ontwerp vervormingproef

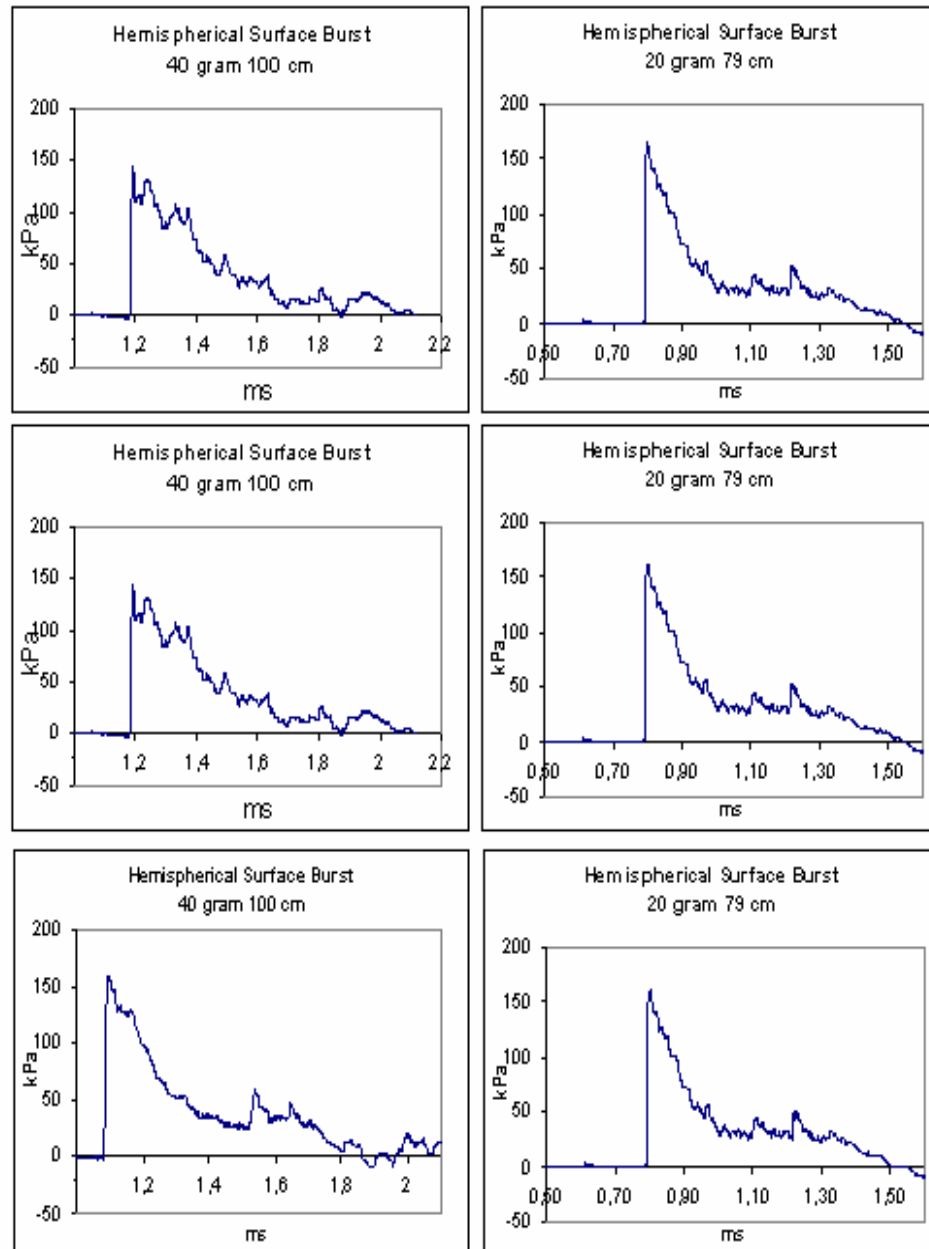




Bijlage (5) Reproduceerbaarheidproeven Drukproef 1

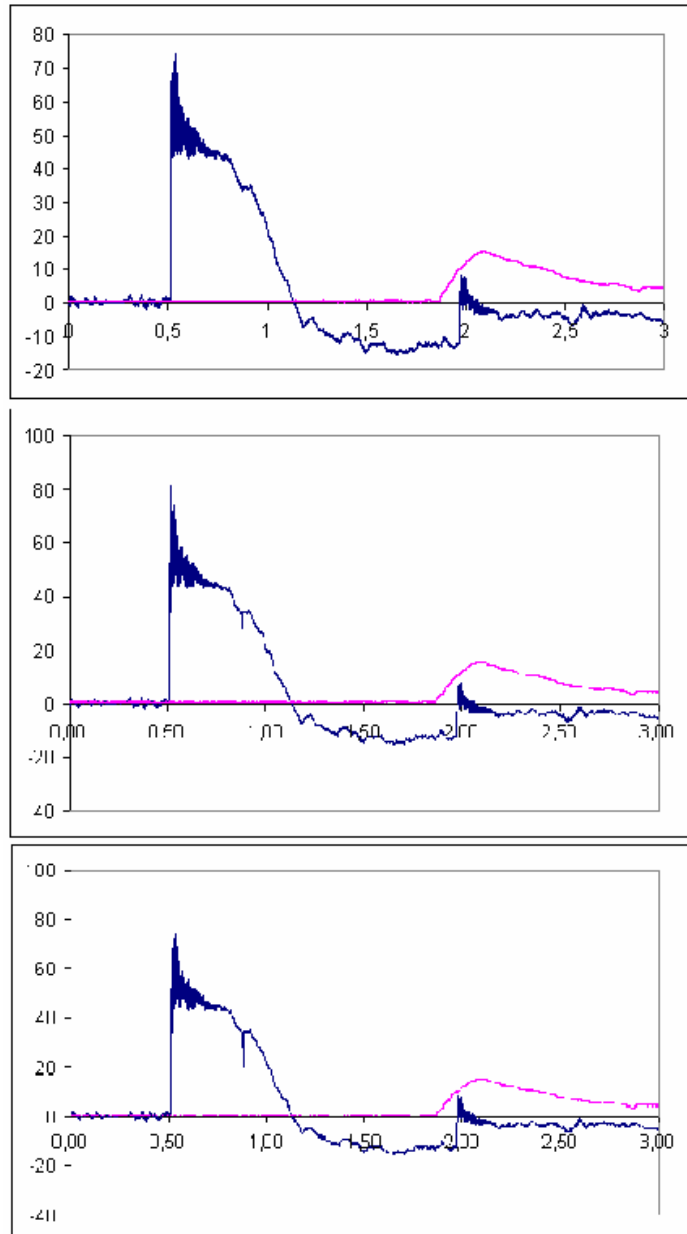
De metingen die zijn gebruikt voor de analyse van de eerste drukproef staan in de onderstaande figuren geïllustreerd.





Bijlage (6) Reproduceerbaarheidproeven Drukproef 2

De metingen die zijn gebruikt voor de analyse van de tweede drukproef staan in de onderstaande figuren geïllustreerd.

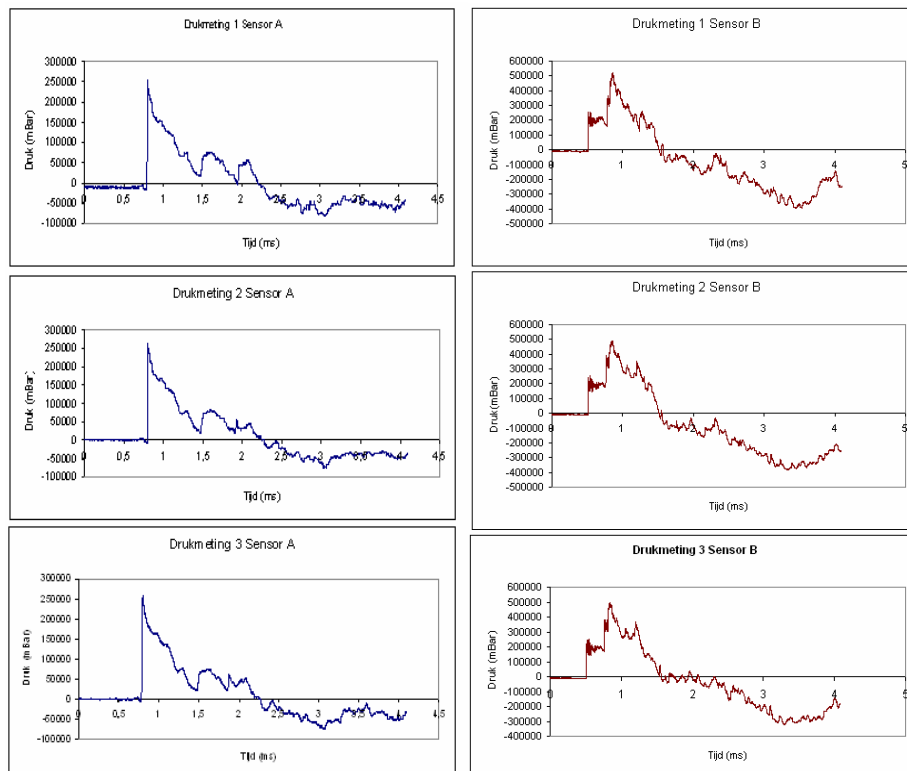


Bijlage (7) Reproduceerbaarheidproeven Drukproef 2 opstelling A EXTRA OPSTELLING

Het is mogelijk om met de constructie meerdere soorten proeven te doen. Hiervan zijn metingen gedaan die in een vervolg onderzoek eventueel geanalyseerd kunnen worden. Deze eerste proef is een referentieproef voor de proeven beschreven in bijlage (5) en (6). De referentieproef dient als vergelijkingsmiddel ten opzichte van de andere proeven. In deze situatie wordt een 20 grams explosief C4 op een hoogte van 1000 mm op 2000 mm geplaatst. De Hemisferische explosie is aan de hand van Hoofdstuk 2 te berekenen. Resultaten zijn als volgt:

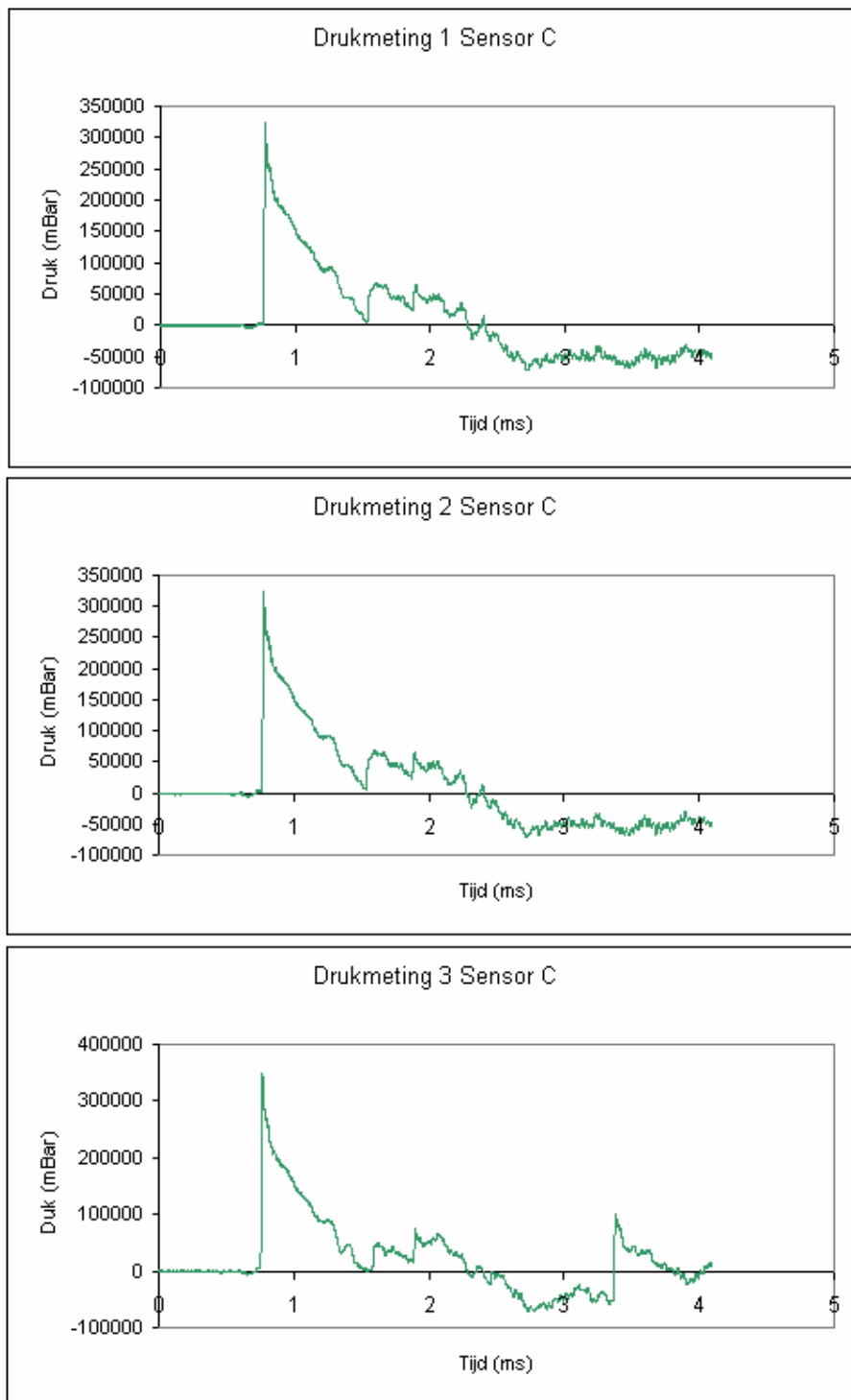
Reproduceerbaarheid Drukproef 2

Bovenzijde en voorzijde





Achterkant



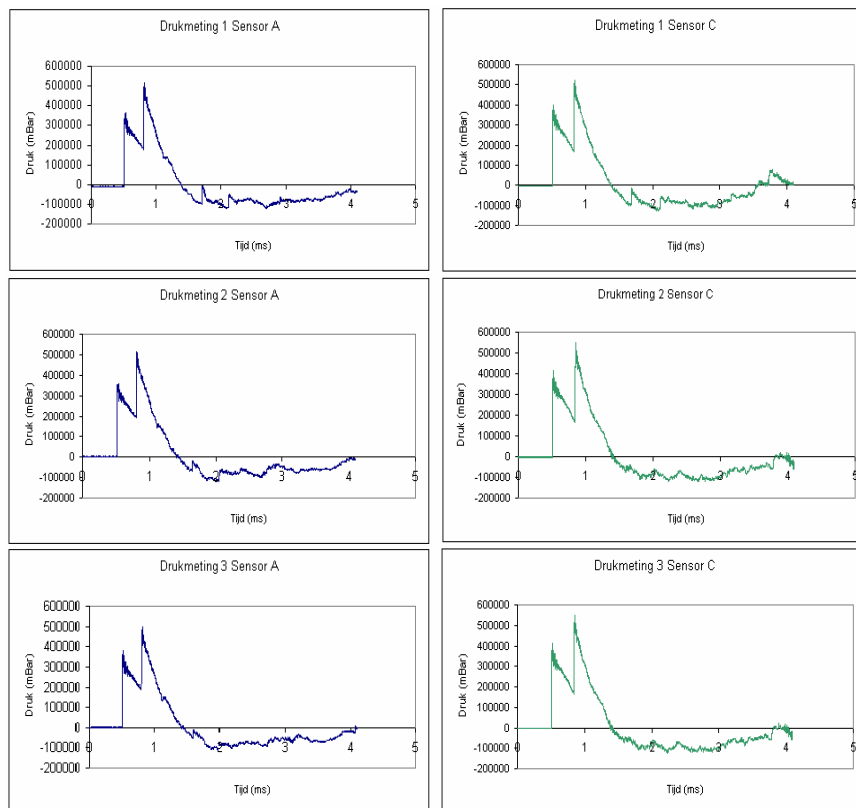
Bijlage (8) Reproduceerbaarheidproeven Drukproef 2 opstelling B

EXTRA OPSTELLING

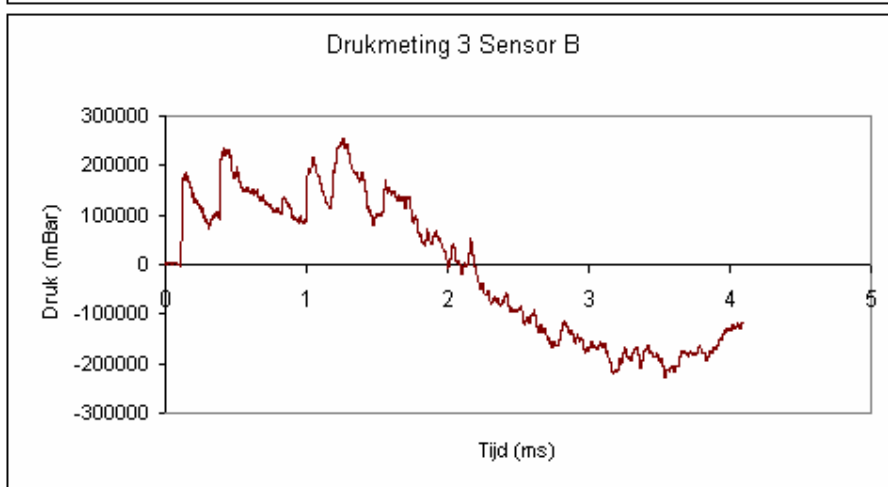
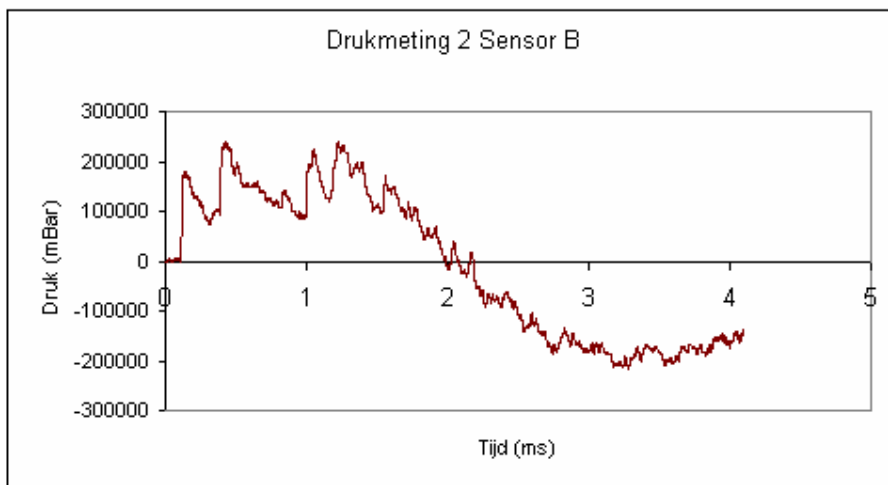
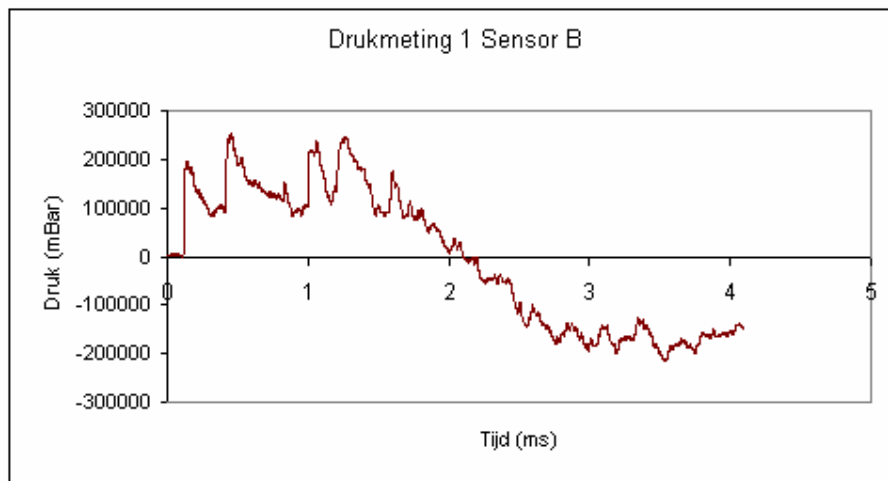
De onderstaande figuren zijn resultaten van een drukproef waarbij interne druk wordt gemeten. Dit kan bijvoorbeeld gebeuren wanneer een explosie nabij een bunker plaats vindt en de blastgolf via een opening in de bunker binnentreedt. De black boxconstructie heeft voor deze opstelling een drietal sensoren gekregen, waarvan er twee in de zijkant van de box zijn gemonteerd en een aan de achterzijde van de constructie. Het explosief is op 1000 mm hoogte opgehangen en op 2000 mm van de constructie geplaatst. Opvallend is de veel hogere drukuitval in deze proef in vergelijking met de drukproef uit bijlage (4).

Reproduceerbaarheid Drukproef miniatuur 2

Linker en rechterzijkant



Achterzijde



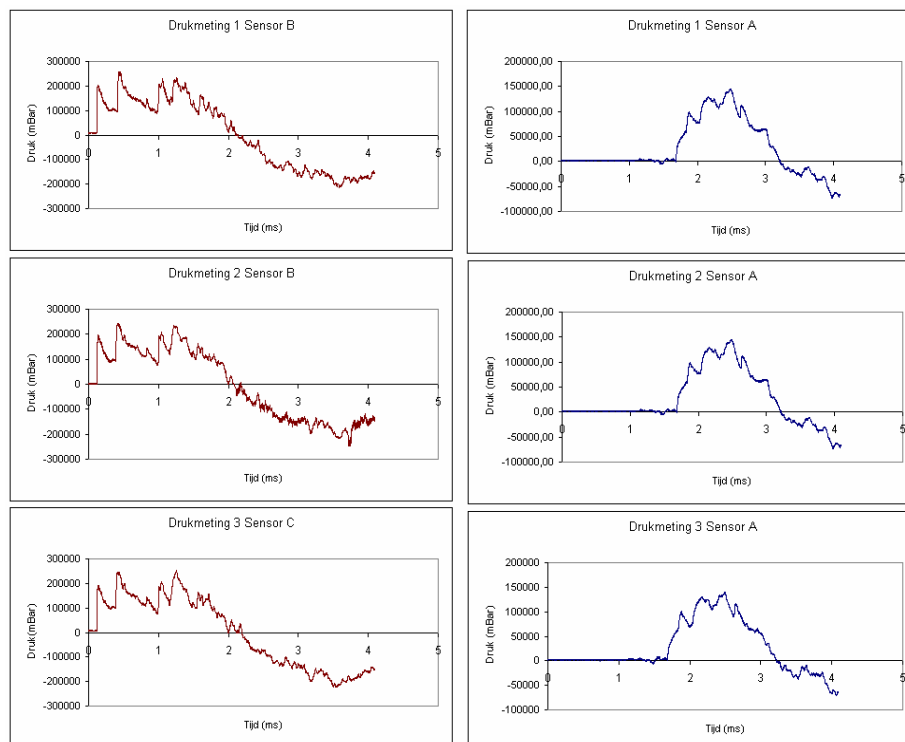
Bijlage (9) Reproduceerbaarheidproeven Drukproef 2 opstelling C

EXTRA OPSTELLING

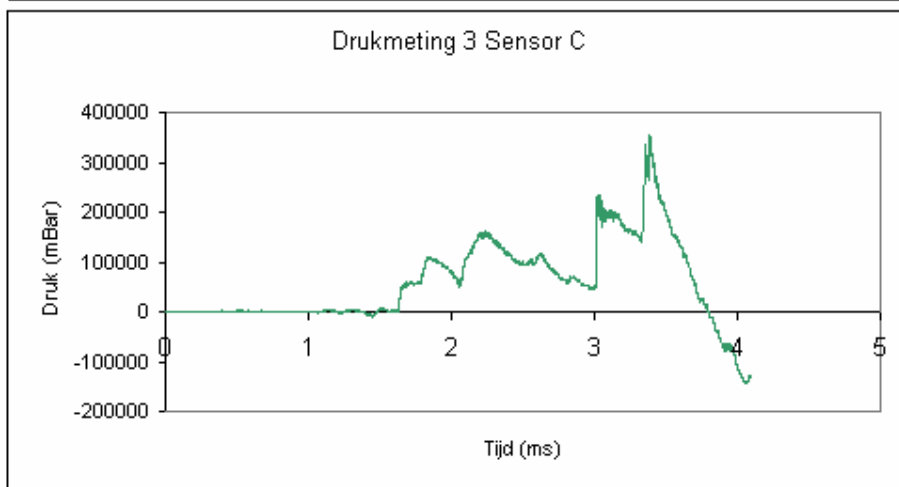
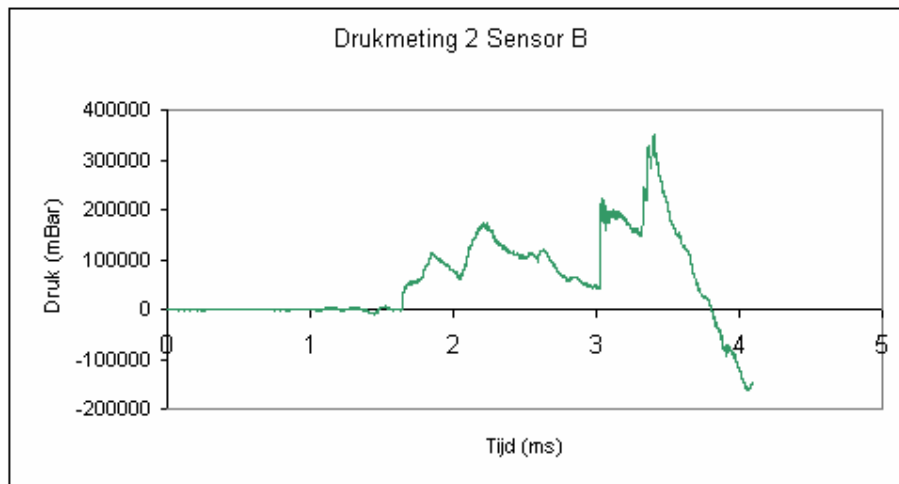
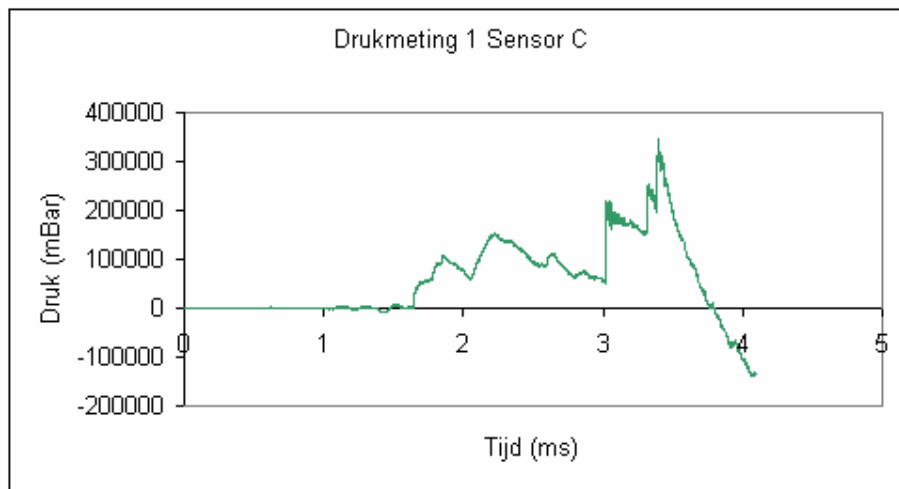
Een derde mogelijke opstelling met de constructie werd ook getest. In deze opstelling werd een situatie gecreëerd om twee gebouwen naast elkaar te plaatsen en dan de druk in de steeg te meten en het visualiseren van de reflecties die optreden binnen in die steeg. Op een afstand van 2000 mm en een hoogte van 1000 mm werd 20 gram C4 gehangen. De druksensoren bevonden zich aan de voor, boven en achterzijde van de constructie, waarbij de sensor aan de achterzijde de meest interessante meting moest doen (namelijk die van de reflecties). Echter, de voorste en bovenste meting vertonen door de reflecties in van het achterste gebouw ook interessante metingen. Te zien is dat er aan de bovenzijde een druk en trekbeweging is en aan de voorzijde curve van de blastgolf anders verloopt dan bij de proef uit bijlage (4). Op de achterzijde is een duidelijk terugkerende blastgolf te zien, die een duidelijke tweede druk uitoefent op de achterzijde van de constructie.

Reproduceerbaarheid Drukproef miniatuur 3

Voorzijde en bovenzijde



Achterzijde





Bijlage (10): Eigenschappen piëzo-metrische drukmeter



PERFORMANCE	ENGLISH	SI
Measurement Range (for $\pm 5V$ output)	200 psi	1379 kPa
Useful Overrange (for $\pm 10V$ output)	400 psi	2758 kPa [1]
Sensitivity (± 5 mV/psi)	25 mV/psi	3.6 mV/kPa
Maximum Pressure (static)	1 kpsi	6895 kPa
Resolution	3 mpsi	0.021 kPa
Resonant Frequency	≥ 500 kHz	≥ 500 kHz
Rise Time (Reflected)	≤ 1.0 μ sec	≤ 1.0 μ sec
Low Frequency Response (-5 %)	0.5 Hz	0.5 Hz
Non-Linearity	≤ 1.0 % FS	≤ 1.0 % FS [2]
ENVIRONMENTAL		
Acceleration Sensitivity	≤ 0.002 psi/g	≤ 0.0014 kPa/(m/s ²)
Temperature Range (Operating)	-100 to +275 °F	-73 to +135 °C
Temperature Coefficient of Sensitivity	≤ 0.03 %/°F	≤ 0.054 %/°C
Maximum Flash Temperature	3000 °F	5400 °C
Maximum Shock	20,000 g pk	196,000 m/s ² pk
ELECTRICAL		
Output Polarity (Positive Pressure)	Positive	Positive
Discharge Time Constant (at room temp)	≥ 1.0 sec	≥ 1.0 sec
Excitation Voltage	20 to 30 VDC	20 to 30 VDC
Constant Current Excitation	2 to 20 mA	2 to 20 mA
Output Impedance	<100 ohm	<100 ohm
Output Bias Voltage	8 to 14 VDC	8 to 14 VDC
Electrical Isolation	10 ⁹ ohm	10 ⁹ ohm
PHYSICAL		
Sensing Geometry	Compression	Compression
Sensing Element	Quartz	Quartz
Housing Material	Stainless Steel	Stainless Steel
Diaphragm	Invar	Invar
Sealing	Welded Hermetic	Welded Hermetic
Electrical Connector	10-32 Coaxial Jack	10-32 Coaxial Jack
Weight	0.41 oz	11.6 gm
SUPPLIED ACCESSORIES:		
Model 065A03 Seal ring 0.435" OD x 0.377" ID x 0.030" thk brass (3)		
OPTIONAL VERSIONS		
H - Hermetic Seal		
M - Metric Mount		
Supplied Accessory : Model 065A40 Seal ring 0.435" OD x 0.397" ID x 0.030" thk brass (3) replaces Model 065A03		
N - Negative Output Polarity		
S - Stainless Steel Diaphragm		
Diaphragm	316L Stainless Steel	316L Stainless Steel
W - Water Resistant Cable		

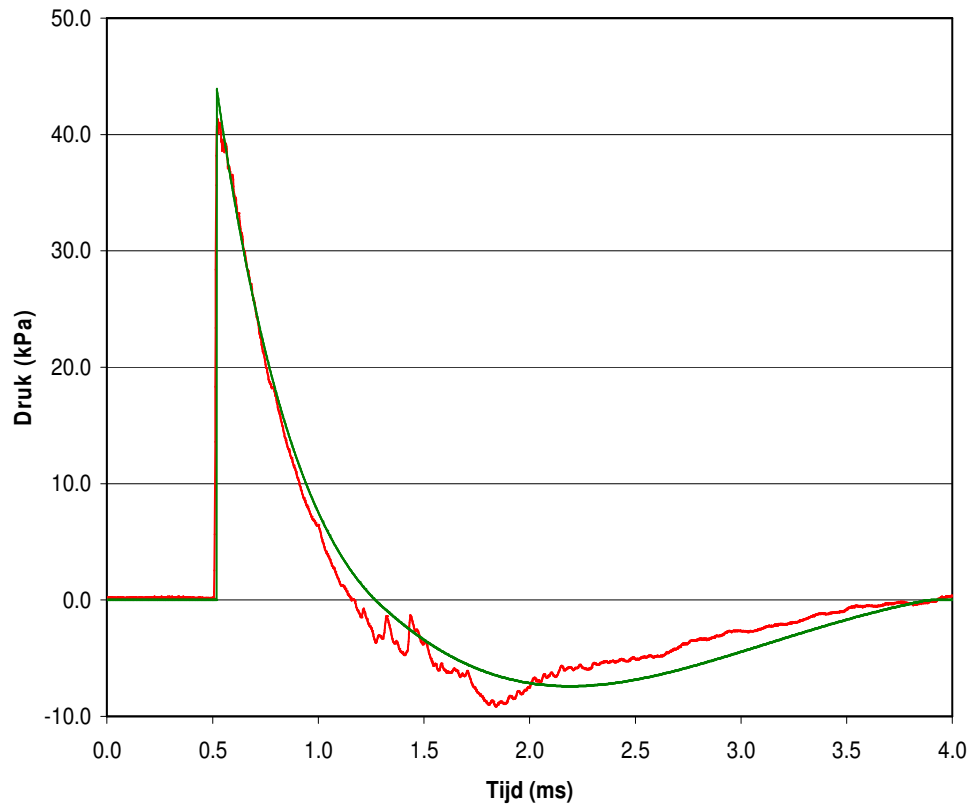


Bijlage (11) Verificatietesten Blastpencils te Reek

02-Juni 2005

Plastpencil 137A12 S/N 692 - 10 g C4 op 1 m

Meting versus voorspelling BlastXW



Gemeten piekwaarde: 40.8 kPa

Voorspelde piekwaarde: 43.9 kPa

Gemeten impuls: 11.05 kPa.msec

Voorspelde impuls: 11.61 kPa.msec