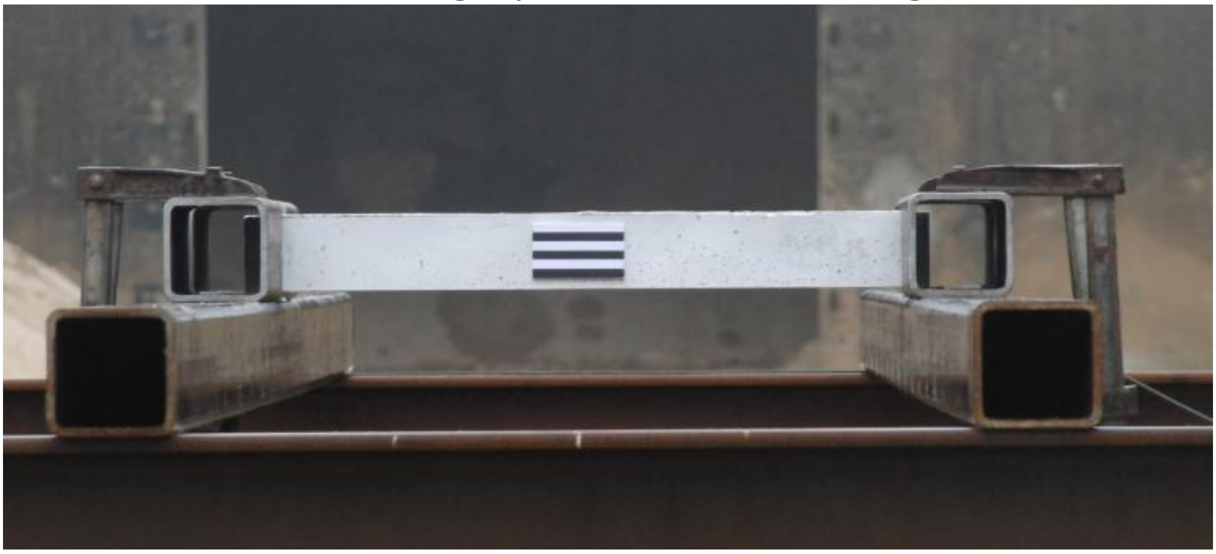
NEDERLANDSE DEFENSIE ACADEMIE EN KONINKLIJKE MILITAIRE SCHOOL

Explosies en schaalmodellen

De toepasbaarheid van schaalmodellen in het onderzoek naar het gedrag van een gewapend betonnen ligger onder een hoog dynamische belasting



Cadet-Vaandrig Sven Weijnschenk

22-1-2013

NEDERLANDSE DEFENSIE ACADEMIE EN KONINKLIJKE MILITAIRE SCHOOL

Explosies en schaalmodellen

De toepasbaarheid van schaalmodellen in het onderzoek naar het gedrag van een gewapend betonnen ligger onder een hoog dynamische belasting

Schrijver:	**Cadet-Vaandrig Sven Weijnschenk**	**Nederlandse Defensie Academie**
Begeleiders:	**Ir. J.B.W. Borgers**	**Nederlandse Defensie Academie**
	Professor Vantomme	**Koninklijke Militaire School**
	Kapitein Suleau	**Koninklijke Militaire School**

Voorwoord

In het kader van de samenwerkingsverbanden tussen de Nederlandse Defensie Academie en de Koninklijke Militaire School kregen de Cadetten van de genie de kans om een scriptie te schrijven op de KMS in Brussel. Het onderwerp kwam voort uit een Master thesis uit 2011 die de Belgische Onder-Luitenant Deklerck had geschreven. Omdat de KMS zeer goed bekend staat onder cadetten van de genie was ik dan ook zeer blij dat ik dit onderzoek kon uitvoeren.

Allereerst wil ik mijn dank uit spreken naar Kapitein Stephané Suleau die mij in elke stap van het onderzoek heeft ondersteunt. Zijn gedrevenheid en discipline hebben grote indruk op mij gemaakt en hebben mij gemotiveerd om hard te werken. Ook wil ik Professor Vantomme bedanken die minimaal één keer in de week tijd maakte om feedback te geven op de voortgang van het onderzoek, met vragen kon ik ook altijd bij hem terecht. Verder wil ik ook Ir. Borgers bedanken voor zijn input en het model dat ik zeer goed kon gebruiken bij mijn onderzoek. Zonder hem was het niet mogelijk geweest om de gewenste resultaten te bereiken.

Verder wil ik alle medewerkers bedanken die tijd en moeite in mijn onderzoek hebben gestoken, zo heeft dhr. Bruno Reymen een grote rol gespeeld bij het voorbereiden en uitvoeren van de experimenten. Dankzij zijn specialistische kennis was het mogelijk om tot geslaagde experimenten te komen. Ook wil ik Serge Musette bedanken die uitstekend laswerk heeft verricht bij het bouwen van de tunnel.

Tot slot wil ik Chris bedanken die ook in Brussel zijn scriptie schreef. Zijn positieve houding en relativering vermogen zorgde ervoor dat de scriptie periode één van de leukste periodes van de opleiding is geworden.

Vanwege de uitstekende begeleiding op de KMS kan ik dan ook elke genie Cadet van harte aanbevelen zijn scriptie op de KMS te schrijven. Ik hoop dan ook dat in tijden van bezuinigen en herstructureren van de opleidingen op de NLDA deze geweldige samenwerking tussen Academies niet verloren gaat.

Brussel Februari 2013,

Sven Weijnschenk

Cadet-Vaandrig

Abstract

Om belangrijke elementen in constructies te beschermen tegen de dreiging van terroristische aanslagen is het belangrijk om het gedrag van gewapend betonnen elementen te kunnen voorspellen. Met behulp van numerieke modellen is dit mogelijk, echter om deze modellen te valideren zijn experimenten nodig. Experimenten op ware schaal zijn vaak duur en in potentie gevaarlijk , het doen van proeven op schaal is daarbij een uitkomst.

In 2011 is een schaalmodel ontwikkeld dat bruikbaar is om het gedrag van een gewapend betonnen ligger op ware schaal bij een statische belasting te voorspellen. In deze scriptie wordt onderzocht of dit schaalmodel ook gebruikt kan worden voor het bepalen van het gedrag bij een hoog dynamische belasting. Dit wordt gedaan door te berekenen en te testen of het mogelijk is om plastische vervorming van het schaalmodel te realiseren met behulp van in Nederland en België beschikbare en toelaatbare ladingsgewichten.

Door een sferische explosie met in Nederland en België beschikbare en toelaatbare ladingsgewichten bleek het niet mogelijk om de schaalmodellen plastisch te vervormen. Dit heeft deels te maken met het feit dat de balk een klein oppervlakte heeft waarop de schokgolf zijn druk op kan uitoefenen en deels doordat de hogere reflectie golf snel kan wegebben door de geringe breedte van de balk waarbij er ook diffractie aan de onderkant van de balk optreedt die de doorbuiging van de balk tegenwerkt en daarmee de verhoogde druk door de reflectie op de balk deels of volledig opheft. Ook bleek er bij de sferische explosies dat het meten van vervorming en doorbuiging door middel van hoge snelheidscamera beelden erg complex is door de lichtflits die vrijkomt bij een explosie.

Met een tunnel kan wel de gewenste plastische vervorming gerealiseerd worden met een relatief klein ladingsgewicht. De gereflecteerde piekoverdruk in een tunnel valt vrij nauwkeurig te voorspellen met het 1D model van Borgers, de impuls lag echter aanzienlijk lager dan de voorspellingen met volledige reflectie doordat de schokgolf weg kon lekken door imperfecties in de tunnel. Daardoor was doorbuiging van de balken was in alle gevallen lager dan de voorspelde doorbuiging met volledige reflectie en hoger dan de doorbuiging met de invallende druk. Bij deze proefserie bleek dat de balken door de trilling aan bovenzijde op trek worden belast waardoor er plastische vervorming optreedt naar boven toe in plaats van naar onder zoals bij een statische belasting. Een verklaring hiervoor is dat de balk aan de bovenzijde niet voorzien is van trekwapening. Verder vertoont het scheurpatroon gelijkenissen met die uit de literatuur.

Geconcludeerd kan worden dat de schaalmodellen gebruikt kunnen worden bij het voorspellen van het gedrag van gewapend betonnen liggers als er gebruik gemaakt wordt van een tunnelconstructie. De tunnelconstructie is nog wel onderhevig aan verbeteringen om de impuls te vergroten.

Inhoudsopgave

1. Inleiding

Sinds een aantal jaren is er de samenwerking tussen de Nederlandse Defensie Academie en de Koninklijke Militaire School. In het kader van deze samenwerking heeft de KMS gevraagd om studenten die onderzoek doen naar de effecten van explosies.

1.1 Aanleiding

Bij het ontwerpen van economisch, sociaal en strategisch belangrijke constructies moet er rekening gehouden worden met vele facetten. Naast de statische en dynamische krachtsverdeling in een constructie moet er ook rekening gehouden worden met meteorologische invloeden, natuurrampen en de eventuele dreiging van terrorisme.

De invloed van de meteorologische omstandigheden op de constructie is door empirische data vrij nauwkeurig te bepalen, constructies over heel de wereld worden dagelijks blootgesteld aan de meest extreme klimaten. Ook het berekenen van de invloed van natuurrampen op een constructie kan met een vrij grote nauwkeurigheid doordat er gebruik gemaakt wordt van ervaringen uit het binnen- en buitenland en de vergevorderde natuurwetenschappen.

Het onderzoek naar de effecten van de dreiging van terrorisme is erg complex . Dit is te wijten aan een aantal factoren; zo is de aard van de terroristische dreiging vaak explosief, hiermee wordt bedoeld dat een terroristische aanval over het algemeen gepaard gaat met één of meerdere explosies. Door de brisante werking van explosieven gaat bewijs vaak verloren.

Nu zijn er zowel analytische als numerieke modellen om de invloed van de detonatie van explosieven te berekenen; deze modellen moeten echter getoetst worden aan de werkelijkheid. Het doen van proeven is een dure en potentieel gevaarlijke aangelegenheid. Om economische en veiligheidsredenen geniet het dan ook de voorkeur om experimenten op kleinere schaal uit te voeren.

Naar de schalingswetten van explosieven is veel onderzoek gedaan; de schokgolf van een geschaalde hoeveelheid springstof is redelijk te voorspellen. De meest gebruikte schalingswet is de Hopkinson-Cranz schalingswet, die zegt dat gelijkvormige schokgolven gegenereerd worden op dezelfde geschaalde afstand wanneer twee explosieve ladingen met dezelfde geometrie en van dezelfde springstof maar van verschillende afmetingen detoneren onder dezelfde atmosferische condities [1].

Afgelopen jaar is er op de Koninklijke Militaire School onderzoek gedaan naar de bezwijklast van betonnen elementen op schaal. Het onderzoek genaamd ‘studie van schademechanismen in constructies in gewapend beton door middel van schaalmodellen’ uit het studiejaar 2011-2012, dat is uitgevoerd door Onderluitenant Deklerck, had tot doel een schaalmodel op te maken waarbij de scheurpatronen en het breukmechanisme overeen kwamen met die van een gewapend betonnen ligger op werkelijke schaal. Door te variëren in materiaalcombinaties is de vraag: is het mogelijk op kleine schaal een scheurpatroon en breukmechanisme te creëren, overeenstemmend met dit van een constructie in gewapend beton? Deze vraag wordt in de conclusie positief beantwoord bij het gebruik van microbeton en galvastaal [2].

Of het schaalmodel van Deklerck ook gebruikt mag worden bij de dynamische belasting van een schokgolf is nog onbekend. Bij het bepalen van de schade door een dynamische belasting spelen de factoren tijd en traagheid een grote rol. Ook kunnen de scheurpatronen in de ligger anders verlopen dan bij de statische belasting uit het onderzoek van Deklerck. In de literatuur is er veel te vinden over de scheurpatronen bij een explosie. Aan de hand van de literatuur zullen dan ook graadmeters opgesteld moeten worden om te bepalen of de scheurpatronen en bezwijkmechanisme van het schaalmodel overeenkomt met dat van een ligger op werkelijke schaal. Er wordt in dit onderzoek gekozen om de brisante werking buiten beschouwing te laten omdat er naar dit onderwerp al meer onderzoek is gedaan door Cadet-Vaandrig van den Oever in 2005 . De studie zal zich dan ook richten op de dynamische belasting van een schokgolf.

Als er vast te stellen is dat de respons van een betonnen balk op een explosie op schaal betrouwbaar en concreet na te bootsen is, is het mogelijk om aan de hand van geschaalde modellen de effecten van een explosie op een constructie die gebruik maakt van betonnen balken te bepalen. De relevantie voor de wetenschap is dat het mogelijk is meer praktische informatie in numerieke modellen te verwerken waardoor deze nauwkeuriger de effecten van explosies op beton kunnen voorspellen. Voor de NLDA is dit relevant om proeven op schaal uit te kunnen voeren op constructie elementen bij de Nederlandse defensie.

1.2 Probleemstelling

Het testen van explosies op constructies is een dure en potentieel gevaarlijke aangelegenheid, het is onbekend of een schaalmodel dezelfde fenomenen toont als een model op werkelijke schaal bij het doen van explosieproeven.

1.3 Doelstelling

De doelstelling van dit onderzoek is het bepalen of het schaalmodel van een gewapend betonnen ligger te gebruiken is voor de studie naar het hoog dynamische gedrag en breukmechanisme van een ligger door de belasting van een schokgolf.

1.4 Vraagstelling

1) Is het schademodel van Deklerck bruikbaar om te voorspellen wat de effecten van een schokgolf door een explosie zijn op een gewapend betonnen ligger.
    a) Zijn de schade beelden van het schaalmodel vergelijkbaar met die uit de theorie?
        i) Zijn de scheurpatronen vergelijkbaar met die uit de theorie?
    b) Wat is de fysieke respons van de schaalmodellen en wat levert dit voor problemen op bij het meten.
        i) Is het mogelijk om met de beschikbare middelen de schaalmodellen plastisch te laten vervormen.
        ii) Is de plastische vervorming van de balk meetbaar?
2) Is er een overeenkomst tussen de metingen van het schaalmodel en de analytische rekenmethoden?
    a) Komt de mate van elastische vervorming van de balk uit de metingen overeen met die berekend is aan de hand van een SDOF schematisering?
    b) Komt de doorbuiging van het middelpunt van de ligger overeen met die berekend is aan de hand van een SDOF schematisering.

1.5 Afbakening onderzoek

Het theoretische kader zal bestaan uit het onderzoek naar de rekenmethodes om de doorbuiging en mate van vervorming te beschrijven voor het schaalmodel van Deklerck. Dit onderzoek richt zich daarbij op de eerste doorbuiging van de balk en niet naar de trilbeweging van de balk die daarop volgt.

1.6 Onderzoeksstrategie

Het onderzoeken of het gedrag van het schaalmodel overeen komt met dat van een model op werkelijke schaal is tweeledig. Ten eerste zal er onderzocht worden of er een explosieve belasting te creëren is die de het schaalmodel kan laten bezwijken. Verder moet er onderzocht worden of de theorie omtrent scheurvorming van gewapend betonnen liggers toepasbaar is op het schaalmodel.

1.7 Onderzoeksstructuur

Dit onderzoek bestaat inclusief inleiding uit zeven hoofdstukken. Het eerste hoofdstuk is de inleiding waarin aangegeven wordt wat de probleemstelling is, het doel van het onderzoek is en de manier van onderzoeken wordt aangegeven. Het tweede hoofdstuk bestrijkt het theoretische kader van het onderzoek waarin uitgelegd wordt met welke rekenmethodes de voorspellingen worden gedaan. Het derde hoofdstuk geeft weer hoe de balken zijn geproduceerd. In hoofdstuk vier zal de eerste testreeks met een sferische explosie besproken worden . Hoofdstuk vijf staat in het teken van de proeven met een tunnelopstelling. De conclusies en aanbevelingen zullen zich bevinden in hoofdstuk zes.

2. Theoretisch kader

In dit hoofdstuk zal het theoretisch kader naar voren komen, het theoretisch kader van dit onderzoek is tweeledig; Allereerst wordt de theorie behandeld met betrekking tot de expansie van een explosie, hierin komen de belangrijkste karakteristieken van een schokgolf naar voren en wordt uitgelegd met welke rekenmethodes de karakteristieken van een schokgolf te voorspellen vallen. Het tweede deel van het theoretische kader bestaat uit de theorie om het gedrag van een gewapend betonnen ligger onder een dynamische belasting te beschrijven, het eerste deel daarvan richt zich op de uitwijking en mate van elastische vervorming en het tweede deel focust zich op de scheurvorming van een gewapend betonnen balk. De berekening van de karakteristieken van de schokgolf is gebaseerd op de TM5 -855-1 en het dictaat Pyrotechniek en beschermingsconstructies van Borgers, de effecten van deze karakteristieken op de balken worden gebaseerd op de theorie uit de Unified Facillities Criteria (UFC) 3-340-02 en het dictaat Inleiding tot de cursus Berekening van betonconstructies van de Professor Vantomme .

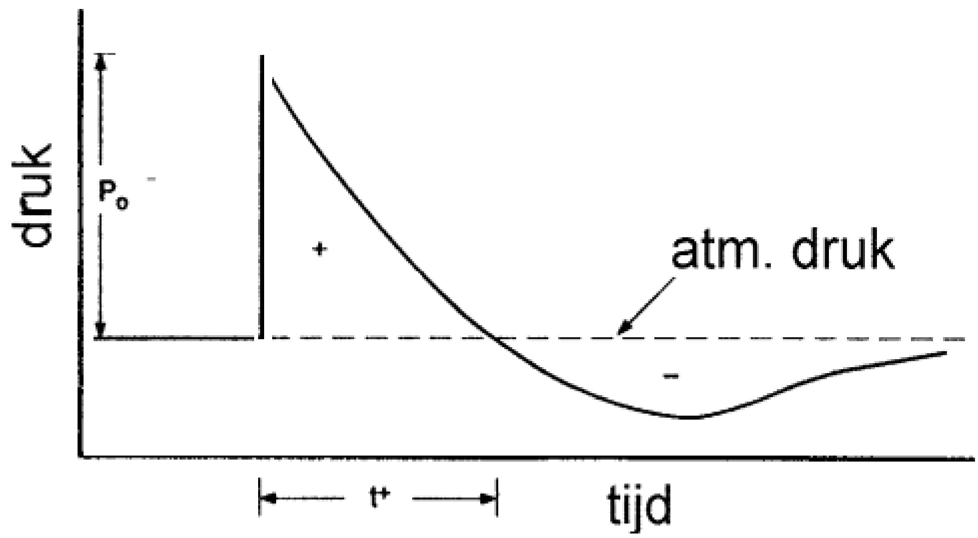
2.1 Karakteristieken schokgolf

Om tot een goede proefopstelling te komen is het nodig om een voorspelling te maken van de eigenschappen van een schokgolf. Hiervoor moet eerst een aantal schokgolf-eigenschappen kort toegelicht worden die van invloed zijn op het gedrag van de balk.

2.1.1 Piekoverdruk, positieve faseduur en impuls

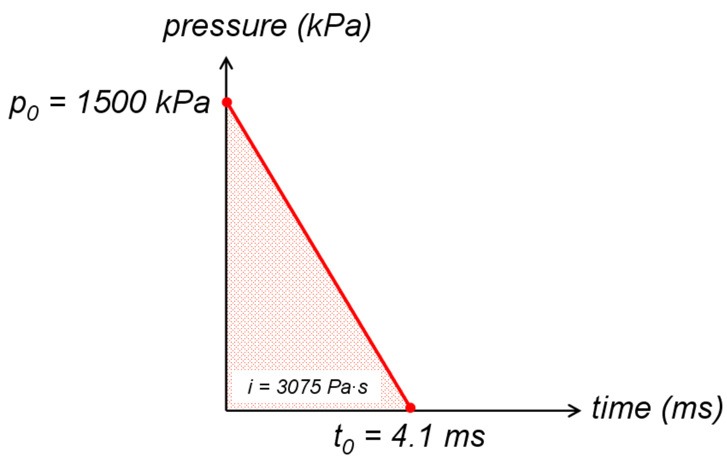
Bij het bepalen van de vervorming en de doorbuiging van de balk zijn de impuls en de piekoverdruk bepalend [1]. De schadebeelden van een gebouw wordt dan ook beschreven met PI diagrammen waarin de Piekoverdruk en Impuls bepalend zijn of een constructie bezwijkt. Wanneer een springstof detoneerd zullen als gevolg van een snelle verbranding hete detonatie gassen ontstaan waarin zeer hoge drukken en tempraturen heersen. Door de hoge drukken zal er een snelle expansie zijn waarbij de omringende lucht wordt weggedrukt. De detonatie gassen en een laag van gecomprimeerde lucht vormen de schokgolf. Bij toenemende afstand daalt de druk in de schokgolf totdat de druk geleidelijk weer de atmosferische druk aanneemt [1].

De overdruk die hierbij ontstaat wordt de piekoverdruk genoemd, de tijdsperiode van een verhoogde druk noemt men de positieve faseduur. De druk zal na het passeren van de schokgolf weer afnemen en zelfs een negatieve waarde aannemen, de tijdsperiode met een negatieve druk heet de negatieve faseduur. In figuur 2.1 zijn de verschillende parameters te zien, waarbij opgemerkt moet worden dat de positieve faseduur in dit onderzoek aangeduid wordt met de parameter t0 in tegenstelling tot de hier gebruikte t+.



Figuur 2.1 positieve en negatieve faseduur [3]

De totale overdruk die de balkjes zullen ervaren wordt de impuls genoemd. De impuls is dan ook de totale oppervlakte onder de grafiek van gedurende de positieve faseduur. De piekoverdruk, positieve faseduur en de impuls zijn zeer belangrijk bij het bepalen van de respons van een constructie. Zo zal een hoge piekoverdruk met een kleine positieve faseduur minder schadelijk kunnen zijn dan een kleinere piekoverdruk met een langere positieve faseduur.



Figuur 2.2 driehoeksbenadering Impuls [4]

Bij berekeningen aan de vervorming van constructies met de UFC-3-340-02 wordt de impuls vaak benaderd met de driehoeksbenadering (zie figuur 2.2) dit wil zeggen dat de impuls berekend wordt door de piekoverdruk te vermenigvuldigen met de positieve faseduur wat vervolgens door 2 gedeeld wordt. Dit wordt gedaan omdat de berekening van de impuls zonder deze benadering een stuk complexer is. In de meeste gevallen zal de impuls gevonden door de driehoeksbenadering de werkelijke impuls redelijk benaderen, echter de overschatting van de impuls neemt toe met de hoogte van de piekoverdruk. Dit wordt aangetoond in tabel 2.1 waarin de piekoverdruk, positieve faseduur en de impuls staan weergeven op één meter afstand (berekend met Conwep zie paragraaf 2.1.5). De eerste impuls (i) is berekend met Conwep, die de oppervlakte onder de piekoverdruk gedurende de positieve faseduur optelt, de 2e reeks impulsen (I drie) is berekend met behulp van de driehoeksbenadering. De afwijking is het verschil tussen de reeksen.

c4 (gram)	R (m)	t0 ms	ps(kPa)	i (pa*s)	I (pa*s) drie	Afwijking
100	1	0,924	198,1	46,76	91,5	44,8
200	1	1,064	333,9	72,98	177,6	104,7
300	1	1,239	454,4	95,05	281,5	186,5
400	1	1,412	565,4	114,7	399,2	284,5
500	1	1,559	669,4	132,4	521,8	389,4
600	1	1,67	767,8	148,6	641,1	492,5
700	1	1,749	861,6	163,4	753,5	590,1
800	1	1,804	951,4	177	858,2	681,2
900	1	1,839	1038	189,4	954,4	765,0
1000	1	1,859	1121	200,7	1042,0	841,3

Tabel 2.1 verschil diehoeksbenadering-Conwep op 1 meter afstand

Doordat Conwep de impuls nauwkeuriger benadert geniet het dan ook de voorkeur om met deze impuls te rekenen. Omdat de rekenmethode in de UFC-3-340-02 gebruik maakt van de driehoeksbenadering wordt er niet gevraagd wordt de impuls maar naar de positieve faseduur. Doordat de impuls afhankelijk is van de piekoverdruk en de positieve faseduur kan vrij gemakkelijk een bijbehorende positieve faseduur worden berekent met een inverse driehoeksbenadering bij een berekende impuls.

2.1.2 Sferische explosie, hemi-sferische explosie

Bij het bepalen van een proefopstelling heeft men een aantal keuzes om een schokgolf te creëren; Zo kan men een springstof vrij in de lucht te laten exploderen waarbij de schokgolf alle kanten op kan expanderen dit heet een sferische explosie, men kan er ook voor kiezen om een springstof op een plaat met een zeer hoge dichtheid te laten exploderen waardoor er een hemi-sferische explosie ontstaat waarbij de schokgolf zich maar in de helft van de richtingen van een sferische explosie kan expanderen. Dit resulteert in een hogere piekoverdruk en impuls maar kan ook kratervorming veroorzaken, om een perfecte hemi-sferische explosie te modeleren zal de plaat waarop de explosie ligt een oneindige dichtheid moeten hebben. Naast sferische en hemi-sferische explosies zijn er nog een aantal andere opstellingen te bedenken waarbij de schokgolf beperkt wordt in richting van expanderen. Dit zal besproken worden in paragraaf 2.1.6.

2.1.3 Reflectie

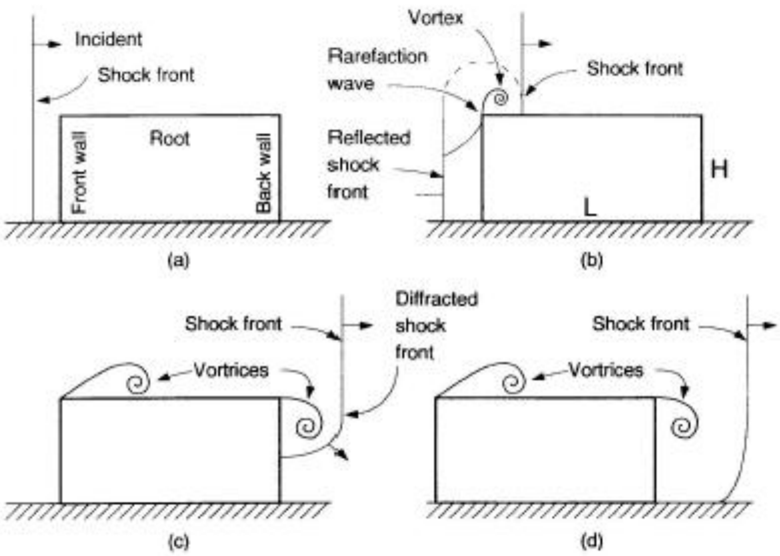
Wanneer een schokgolf loodrecht invalt op een vast oppervlak, of een medium met een hogere dichtheid, zal de schokgolf reflecteren. In dat geval zal het invallende schokfront, dat zich met een hoge snelheid voortplant, tegen het oppervlak gereflecteerd worden waarbij de bewegende luchtdeeltjes tot rustcondities worden afgeremd en verder worden samengedrukt. Het vlak waartegen de golf reflecteert wordt belast met een gereflecteerde overdruk die hoger is dan de overdruk van de invallende schokgolf. Rankine en Hugoniot hebben de volgende uitdrukking afgeleid voor de gereflecteerde overdruk, waarbij wordt verondersteld dat lucht zich gedraagt als een ideaal gas [1].

$$Gereflecteerde\ druk\ p_r = 2p_s * \frac{7p_0 + 4p_s}{7p_0 + p_s}$$

Uit deze vergelijking kan men afleiden dat de gereflecteerde druk tussen de twee en acht maal zo groot kan worden als de invallende piekoverdruk. De reflectiefactor (verhouding gereflecteerde druk piekoverdruk) neemt toe met de hoogte van de piekoverdruk. Bij belasting van de schaalmodellen zal er ook sprake zijn van gereflecteerde druk als de schokgolf loodrecht op de balk invalt.

2.1.4 Ontlastingsgolf

Andere aspecten waar rekening mee gehouden moet worden zijn de ontlastingsgolf en diffractie van de schokgolf. Om te beschrijven waar deze fenomenen vandaan komen is het nodig om het passeren van de schokgolf te faseren. Als we de balk beschouwen als twee-dimensionele rechthoek met afmetingen *H* en *L* die belast worden door een schokgolf met de invallende piekoverdruk p_s (zie figuur 2.3). De schokgolf zal bij het aankomen bij de voorzijde van de rechthoek reflecteren waarbij de voorzijde belast door een gereflecteerde druk die 2 tot 8 maal zo hoog is als de invallende druk (zie 2.1.3). De blastgolf buigt om de rechthoek heen waarbij er een drukbelasting op de bovenkant en de zijkanten die gelijk is aan de invallende piekoverdruk. Door het drukverschil tussen het gebied waar de invallende druk heerst en het gebied waar de gereflecteerde druk heerst rechthoek ontstaat er een stroming van hoge naar lage druk wat de ontlastingsgolf genoemd wordt in figuur 2.3 b wordt dit beschreven met de term “Rarefaction wave”. Over de voorzijde van de rechthoek zal deze ontlastingsgolf zich naar beneden toe bewegen die de verhoogde piekoverdruk op zal heffen waarna de invallende piekoverdruk overblijft.



Figuur 2.3 verloop schokgolf 2D rechthoek [1]

De tijdsduur waarin de ontlastingsgolf de voorzijde volledig af heeft gelopen ($t_{ontlasting}$) is afhankelijk van de kleinste hoogte H van het frontale oppervlakte en de snelheid van de schokgolf en is uit te rekenen met een empirisch bepaalde vergelijking [1]:

$$t_{ontlasting} = \frac{3H}{U_s}$$

Waarin:

$$H = Kleinste\ hoogte\ balk$$

$$U_s = Snelheid\ schokgolf$$

Bij een sferische explosie en een vrije oplegging zoals in hoofdstuk 4 besproken zal worden kan de schokgolf de opgelegde balk aan vier zijden van de balk passeren. De kleinste H is dan ook de breedte van de balk gedeeld door twee. De breedte van de balk van Deklerk is 46 millimeter [2] waardoor de kleinste hoogte van de balk dus 23 millimeter wordt.

Om de ontlastingstijd te bepalen is ook de snelheid van de schokgolf benodigd. Deze kan bepaald worden door Conwep waar in de volgende paragraaf meer over verteld wordt. Bij een explosie van een halve kilogram C4 op een meter afstand is de snelheid U_s gelijk aan 875,2m/s. Als deze gegevens worden ingevuld komt men tot de volgende ontlastingstijd:

$$t_{ontlasting} = \frac{3 * 0{,}046 * 0{,}5}{875{,}2} = 0{,}0788\ milliseconde$$

Na deze tijd zal de druk op de voorzijde van de balk terug vallen naar de invallende piekoverdruk P_s (669,4 kPa *zie 2.1.6).* Een berekening met Conwep toont dat de positieve faseduur van de schokgolf bij een explosie met 0,5 kilogram C4 op 1 meter afstand 1,559 milliseconde bedraagt.

$$\frac{0{,}0788}{1{,}559} = 0{,}049 = 5\%$$

Bij een sferische belasting komt de ontlastingsgolf dus al na 5 procent van de positieve faseduur, de gereflecteerde druk zal dus maar erg kort werken. Bij het gebruik van een tunnel constructie (zie paragraaf 2.1.5) is de kleinste H een stuk groter omdat de schokgolf de balk maar aan twee kanten kan passeren, de kleinste H is dan de helft van de lengte van de balk (750 millimeter) [2]. De $t_{ontlasting}$ bij de tunnelconstructie met een schokgolf met dezelfde snelheid:

$$t_{ontlasting\ tunnel} = \frac{3 * 0{,}75 * 0{,}5}{875{,}2} = 1{,}285\ milliseconde$$

De bovenzijde van de balk wordt dus pas ontlast van de gereflecteerde druk na:

$$\frac{1{,}285}{1{,}559} = 0{,}824 = 82\ \%\ van\ de\ positieve\ faseduur$$

Hieruit kan men concluderen dat de gereflecteerde druk bij het gebruik van een tunnel lang aan zal houden.

Doordat de schokgolf zich om de balk heen kan verplaatsen zal er aan de onderkant van de balk ook een tijdelijke piekoverdruk ontstaan, dit noemt men diffractie (in figuur 2.3 aangegeven als diffracted shock front). Bij een sferische belasting zal er dan ook diffractie optreden.

Bij een sferische explosie kan er dan ook de aanname gemaakt worden dat de ontlastingsgolf in combinatie met de diffractie de effecten van een verhoogde gereflecteerde piekoverdruk zullen opheffen en dat er bij de voorspellingen van de vervorming gerekend zal moeten worden met de invallende piekoverdruk. Bij het gebruik van een tunnelconstructie geldt dit echter niet, de ontlastingstijd is bijna even groot als de positieve faseduur waardoor er een groot gedeelte van de positieve faseduur de gereflecteerde druk op de balk werkt. Doordat de schokgolf de balk maar aan twee kanten kan passeren zal ook de diffractie significant kleiner zijn dan bij een sferische explosie. Hieruit kan geconcludeerd worden dat bij de berekeningen voor het bepalen van de vervorming de gereflecteerde piekoverdruk gebruikt kan worden.

2.1.5 Berekeningen met Conwep

Om de uitwerking van een schokgolf op een object te bepalen zijn een aantal gegevens noodzakelijk; zoals het ladingsgewicht, de afstand tussen de explosie en het object, de gebruikte springstof, het soort explosie (sferisch of hemi-sferisch). Met deze gegevens kan men aan de hand van empirische data en gevalideerde rekenmodellen vrij nauwkeurig de eigenschappen van een schokgolf bepalen. De belangrijkste rekenmodellen voor sferisch en hemi-sferische explosies zijn die van; Baker, Kingery Bulmash, Brode en Kinney Graham [5]. Deze modellen kunnen zowel handmatig als met computerprogramma's gehanteerd worden. Een bekend computerprogramma dat het Kingery Bulmash model gebruikt is Conwep dat geschreven is door het Amerikaanse Engineer Corps.

Het programma vraagt om de eigenschappen van de springstof en het soort explosie en berekent met de afstand de eigenschappen van de schokgolf. Als voorbeeld wordt in figuur 2.4 de uitvoer van een sferische explosie met 500 gram C4 op een meter afstand beschreven in de 1992 versie van Conwep. In het keuze menu van het computer programma zijn de volgende keuzes gemaakt;

1. Weapon effects main menu → Air blast
2. Air blast menu → Above ground detonation
3. Aboveground detonation→ Find peak pressure given charge weight and range
4. Select weapon type → Bare HE
5. Select an explosive → Composition c-4
6. Enter weight of explosive→ 0,5 kg
7. Select configuration → Spherical free-air burst
8. Enter range to target → 1 meter

Met deze gegevens berekend Conwep een benadering van de schokgolf eigenschappen. De parameters die voor dit onderzoek gebruikt worden zijn; de piekoverdruk, de gereflecteerde piekoverdruk, de impuls en de gereflecteerde impuls.

```
INPUT

 Spherical Free-Air Burst
Charge weight .......................... 0.5000 kg
Equivalent weight of TNT ............... 0.6400 kg
Range to target ........................  1.000 meters

OUTPUT

Peak incident overpressure .............  669.4 kPa
Normally reflected pressure ............  3238. kPa
Time of arrival ........................ 0.6057 msec
Positive phase duration ................  1.559 msec
Incident impulse .......................  132.4 kPa-msec
Reflected impulse ......................  397.5 kPa-msec
Shock front velocity ...................  875.2 m/s
Peak dynamic pressure ..................  829.3 kPa
Peak particle velocity .................  623.7 m/s
Shock density ..........................  4.263 kg/m**3
Specific heat ratio ....................  1.393
Decay coefficient θ (msec), where
 P(t)=Pso*[1-(t-ta)/to]*exp[-(t-ta)/θ] . 0.2325
```

Figuur 2.4 Uitvoer voorbeeld Conwep

2.1.6 3D, 2D en 1D model

Hoe een explosie zich zal expanderen in 3 dimensies is beschreven in verschillende bekende en veelgebruikte modellen. De Hopkinsons Cranz schalings wetten en de modellen van Kingery Bulmash, Brode en de grafieken van Baker kunnen gebruikt worden om een sferische explosie vrij nauwkeurig te voorspellen. Soms is het effect van een sferische explosie echter niet genoeg om een resultaat te behalen terwijl men toch gelimiteerd is door de toegestane hoeveelheid springstof.

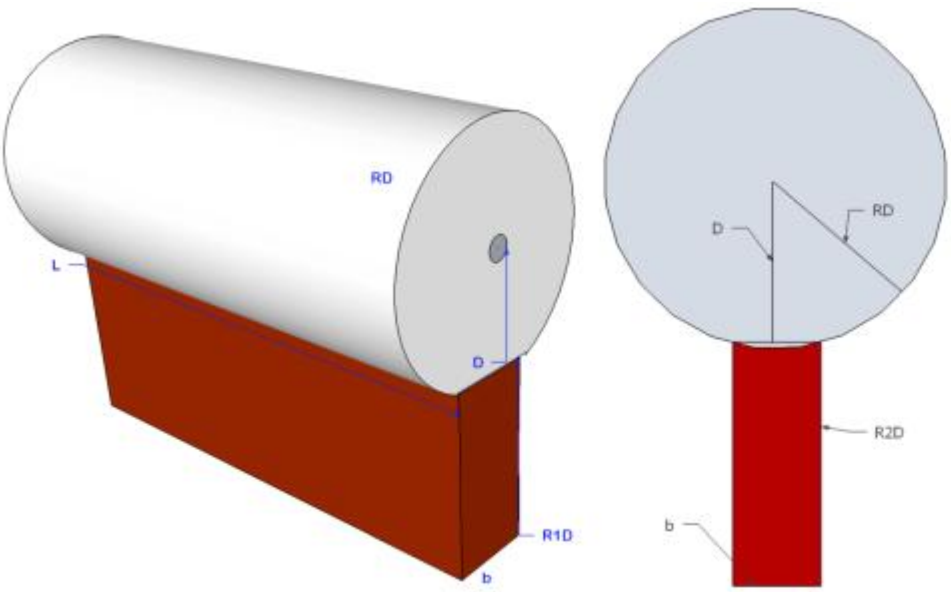
In zo´n geval moet er gezocht worden naar hoe er met eenzelfde ladingsgewicht een groter effect bereikt kan worden. Een logische oplossing hiervoor is het beperken van de expansieruimte van een explosief. Als men gebruik maakt van een lijnlading kan een explosief zich maar in 2 dimensies expanderen (2D). Als een schokgolf zich niet in drie dimensies verspreidt maar in twee dimensies zal de kracht van de schokgolf minder snel afnemen en dus krachtiger zijn dan bij een sferische explosie.

Om de effecten hiervan te berekenen kan er gebruik gemaakt worden van een publicatie op de MABS conferentie in 2012 van de heer Borgers. In het stuk Blast characterizations of det-cord beschrijft Borgers een 2D model om de blast karakteristieken van det-cord te voorspellen [5]. Bij een cilindrische lading C4 ontstaat eenzelfde soort explosie, daarom is de aanname dat het model ook toepasbaar is op de voorspelling van de impuls en piekoverdruk bij een cilindrische lading C4. Dit model kan gebruikt worden bij het voorspellen van de piekoverdruk, positieve faseduur, de impuls en de aankomsttijd van een schokgolf. De vergelijkingen die bij dit model horen zijn te vinden in tabel 2.2.

par		unit	Z_{2D}-domain	C1	C2	C3	C4
pressure:	p_s	[kPa]	0.04-40	0.178	-0.146	-1.480	3.063
scaled impulse:	$i_s/W_{2D}^{1/2}$	$[\frac{Pa.s}{(kg/m)^{1/2}}]$	0.04-0.675	-0.228	0.667	1.474	2.767
			0.675-40	-0.129	0.227	-0.436	2.409
scaled arrival time:	$t_a/W_{2D}^{1/2}$	$[\frac{msec}{(kg/m)^{1/2}}]$	0.04-40	-0.092	0.028	1.600	-0.258
scaled duration time:	$t_d/W_{2D}^{1/2}$	$[\frac{msec}{(kg/m)^{1/2}}]$	0.04-0.289	-1.195	-4.392	-5.315	-3.025
			0.289-0.606	53.55	75.10	37.07	5.228
			0.606-40	-0.338	0.663	0.325	0.176
par= $10^{(C1.log(Z_{2D})^3+C2.log(Z_{2D})^2+C3.log(Z_{2D})+C4)}$							

Tabel 2.2 2D model Borgers met de parameters voor de piekoverdruk, geschaalde impuls, geschaalde aankomsttijd en de geschaalde positieve faseduur [5]

Als de een lijnbron alsnog niet de gewenste resultaten geeft moet de schokgolf nog verder beperkt worden in het expanderen tot één dimensie. Om een in 1D expanderende schokgolf te creëren is het nodig om een volledig vlakke lading te realiseren. Omdat dit in de realiteit niet mogelijk is wordt deze volledig vlakke lading benaderd door drie verschillende ladingstypen; De makkelijkste optie is een puntbron die zich in het midden van de tunnel bevind, helaas ontstaan hierbij reflecties waardoor de tunnel lang moet zijn om een vlakke schokgolf te realiseren. Daarnaast kan men een lijnlading in of boven de ingang van de tunnel gebruiken, hierdoor ontstaat vrij snel een vlakke schokgolf, een nadeel hiervan is dat de lijnlading maar op één punt geïnitieerd kan worden waardoor de schokgolf initieel niet vlak is. De laatste optie is een lijnbron op enige afstand tot ingang van de tunnel, hierdoor ontstaat een cilindrisch expanderende schokgolf die in de tunnel wordt gekanaliseerd. Het voordeel van deze optie is dat er in de tunnel weinig reflectie ontstaat, een nadeel is dat het ladingsgewicht groter moet zijn omdat de schokgolf voor de tunnel zich in twee dimensies kan expanderen. Een schematische weergave hiervan is te zien in figuur 2.5.



Figuur 2.5 Cilindrische lading boven tunnel [6]

Het 1D model is gebaseerd op empirisch verkregen data en numerieke simulaties. Hieruit heeft Borgers een vergelijking afgeleidt die de geschaalde impuls en de piekoverdruk bij gebruik van een tunnelconstructie kan bepalen. De impuls is weer af te leiden door de geschaalde impuls te vermenigvuldigen met het ladingsgewicht. Doordat de schokgolf zich maar in één richting kan expanderen zullen zowel de piekoverdruk en de impuls aanzienlijk hoger zijn bij een sferische explosie op gelijke afstand.

Hieronder staat de vergelijking voor de parameters van de schokgolf in bij het gebruik van een vlakke lading waarbij p_{1D} staat voor de piekoverdruk en i_{1D} voor de geschaalde impuls [7], de bijbehorende coëfficiënten staan weergeven in tabel 2.3:

$$p_{\,1D}(or\ i_{1D}\,) = 10^{(C1*\log(Z1D)^3+C2*\log(Z1D)^2+C3*\log(Z1D)+C4)}$$

Parameter		Unit	Z1D Domein	C1	C2	C3	C4
Pressure	p_s	[kPa]	0,002-2000	0,0158	-0,0371	-0,734	3,279
Scaled Impulse	I_s/W_{1D}	[pa*s/ (kg/m^2)]	0,0045-0,45 0,45-240	0,041 -0,0157	0,485 0,0258	1,577 0,198	3,232 2,796

Tabel 2.3 parameters 1D model Borgers [7]

Een bijkomend voordeel van het gebruik van een theoretische tunnel is dat de aanname er is dat er geen ontlastingsgolf kan plaatsvinden doordat de schokgolf niet langs de balk kan. Dit betekent dat bij het voorspellen van het gedrag van de balken er gerekend mag worden met de gereflecteerde druk en impuls doordat de verhoging van de reflectie niet wordt opgeheven door een ontlastingsgolf.

In een ondersteunend stuk van de docent Sven's Dillemma vergelijkt Borgers de verschillende rekenmodellen met elkaar om een maatgevende impuls en piekoverdruk combinatie te realiseren. De aanname in een eerdere fase van deze thesis was dat de balken een plastische vervorming zullen vertonen bij een schokgolf met een piekoverdruk van 5100 kPa en een impuls van 570. Bij gebruik van een sferische explosie en dus een 3D model zou dit betekenen dat er een landingsgewicht nodig is van 72 kilogram, bij gebruik van een lijnbron en dus een 2D model zou een ladingsgewicht van 13,5 kilogram per meter voldoen en bij een vlakke lading en dus het 1D model met volledige reflectie zou een ladingsgewicht van 3,3 gram voldoende zijn [6].

Het werken met een tunnel brengt echter ook nadelen met zich mee. Zo is het lastiger om de vervorming te kunnen waarnemen gedurende de proef. Verder zal de opstelling een flinke klap moeten kunnen weerstaan aangezien de krachten die vrij komen erg groot zijn wat betekend dat de opstelling stevig uitgevoerd moet zijn. Tot slot levert het gebruik van een tunnel problemen op met het zichtbaar houden van de balk gedurende de proeven.

2.2 Respons balkjes

Als de karakteristieken van de schokgolf zijn bepaald kan het effect hiervan op de schaalmodellen worden berekend. Hiervoor kan men de rekenmodellen uit de UFC-3-340-02 gebruiken.

Een explosiebelasting is een hoog dynamische belasting, dat wil zeggen dat tijd een belangrijke parameter is. De belasting is kortstondig en daardoor is het mogelijk dat een constructie de hoge druk wel kan weerstaan. Terwijl op basis van statische sterkteberekeningen een constructie zou bezwijken [1].

Bij een statische belasting wordt het evenwicht gezocht tussen de belasting en de inwendige krachten, de constructie heeft tijd nodig om te vervormen. Bij een dynamische belasting heeft een constructie niet altijd de tijd om mee te vervormen met de belasting. In het geval van deze snel veranderende belasting speelt de massatraagheid dan ook een grote rol in de vervorming van een constructie. Er is daarom een andere rekenmethode nodig dan bij een statische belasting.

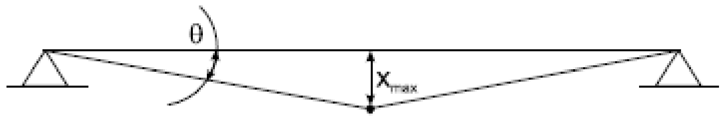
Om te bepalen wat de doorbuiging en vervorming van de balken zullen zijn onder invloed van een explosie word er gebruik gemaakt van een rekenmethode uit de UFC 3-340-02 [8]. Deze rekenmethode vergelijkt de weestand van een gewapend betonnen balk met de belasting die de explosie levert. Als de belasting groter is dan het weerstandsmoment van de balk zal er sprake zijn van een plastische vervorming. De rekenmethode schematiseert de balk als een één-massa-veersysteem, deze schematisering is gestoeld op de theorie van Biggs [1]. De schematisering gaat ervan uit dat een gedeelte van een constructie kan worden weergeven door een equivalente massa en een equivalente veerstijfheid.

De rekenmethode maakt een aantal versimpelingen, zo wordt de impuls bepaald door middel van een driehoekbenadering van een schokgolf, in dit geval een grove overschatting van de impuls zoals weergeven in tabel 2.1. Verder gaat de rekenmethode uit van een lineaire vervorming van de balk tot dat de balk bezwijkt.

Omdat het een vrij lange berekening is waar makkelijk fouten in gemaakt kunnen worden heeft de 2e luitenant Debroey in 2010 op de KMS de berekeningen van de UFC in een excelsheet verwerkt. Hierbij moet men een aantal gegevens van de balk en de explosie ingeven waarna de excelsheet de berekening uitvoert. Om de berekening goed te begrijpen en te valideren of excelsheet gebruikt mag worden voor dit onderzoek is de berekening ook handmatig uitgevoerd voor één situatie waarbij de resultaten vergeleken worden met de methode van Debroey. De ingevulde excelsheet is te vinden in bijlage 3. Bij het valideren van de excelsheet van Debroey zal er gebruik gemaakt worden van deze driehoeksbenadering, echter bij het voorspellen van de respons van de balkjes (in hoofdstuk 4 en 5) wordt gebruik gemaakt van een op basis van de impuls berekende positieve faseduur.

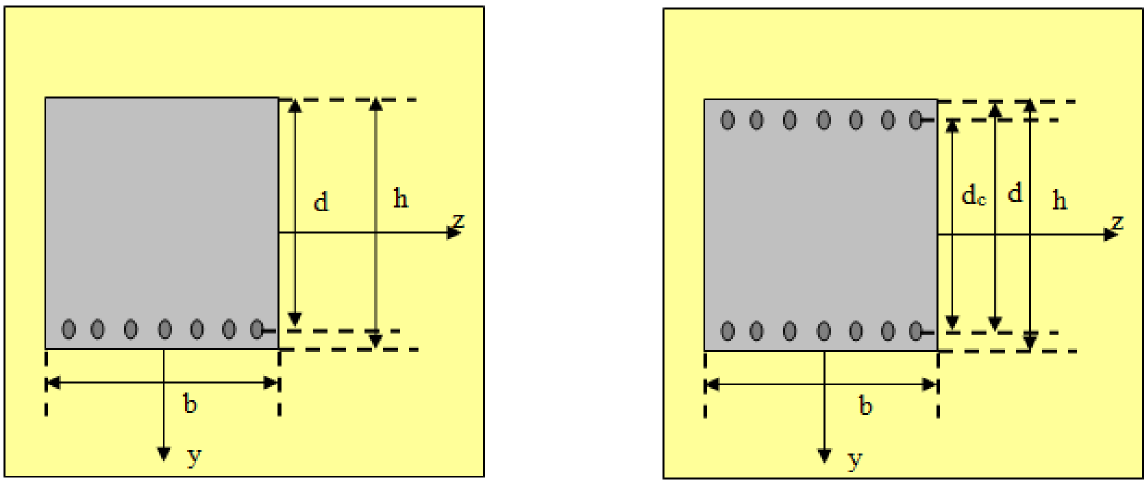
2.2.1 Breukmechanisme

De berekening begint met de vraag of de gebruiker een level 1 of level 2 schadebeeld wil berekenen. Level 1 schadebeelden zijn schadebeelden van gewapend beton waarbij de maximale hoekverdraaiing (θ) van de steunpunten naar het midden van de balk maximaal 2 graden bedraagt zoals te zien in figuur 2.5. Dit komt overeen met een maximale doorbuiging van het midden voordat de balk zal bezwijken.



Figuur 2.6 relatie $\emptyset$ *en Xmax* [9]

Bij schade level 2 wordt er gerekend met een maximale hoekverdraaiing van 4 graden. Het verschil in toelaatbare draaihoek zit hem in het feit dat er bij een level 1 schadebeeld enkel gerekend wordt met een op trek belaste hoofdwapening aan de onderzijde van de balk. Bij schade level 2 wordt er gerekend met symmetrische wapening waarbij de bovenwapening nog weerstand geeft voor het bezwijken van de balk als het beton al samengedrukt is in de drukzone waardoor de doorbuiging van het midden groter kan zijn voordat de balk bezwijkt [9].



(a) type 1 section (b) type 2 section

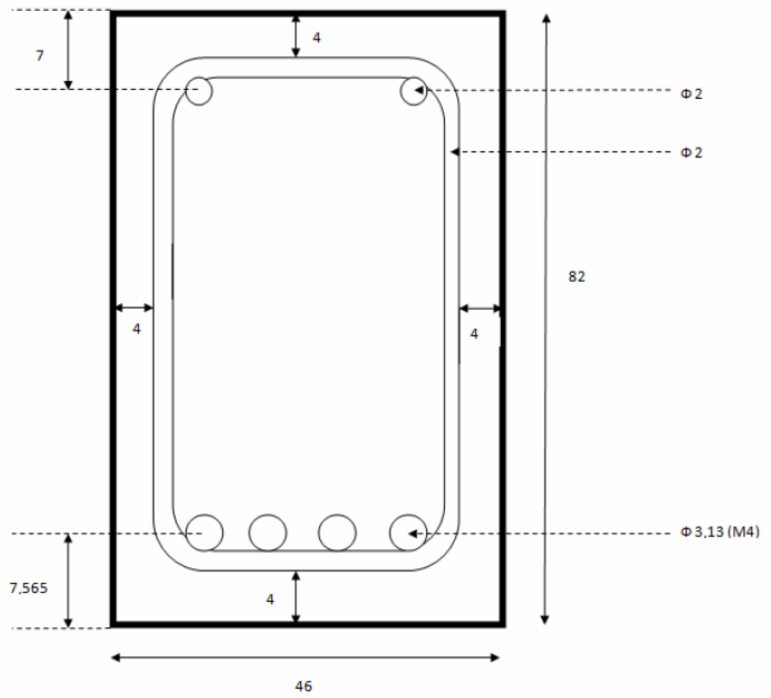
Figure 2: The two types of section corresponding with the two levels of damage

Figuur 2.7 type 1 en 2 secties [4]

De balk die gebruikt wordt bij de experimenten is aan de onderkant gewapend met vier stalen staven. De bovenwapening is enkel geplaatst om de beugels op hun plaats te houden. Het is daarom niet realistisch om te rekenen met een type 2 schadebeeld waarbij er wordt uitgegaan van een verticaal symmetrische wapening. Daarom zullen we bij de berekeningen van de uitwijking en de vervorming uitgaan van een type 1 schadebeeld. Een belangrijk feit hierbij is dat er in de theorie van de UFC uit wordt gegaan van een breukmechanisme bij een te grote hoekverdraaiing van de balk, voor een symmetrisch gewapend betonnen ligger 4 graden en voor een niet symmetrisch gewapend betonnen ligger 2 graden.

2.2.2 Gegevens schaalmodel

De doorsnede van de balk is te zien in figuur 2.7, waarbij alle maatvoering in millimeters is weergeven. De balk heeft een totale hoogte van 82mm en een breedte van 46mm. Deze geometrische gegevens worden in de berekening een aantal maal gevraagd.



Figuur 2.8 wapeningsdoorsnede(mm) [2]

Om te bepalen bij welke last de balk zal bezwijken zal eerst het plastisch moment bepaald moeten worden. Voor schadebeeld 1 geldt de vergelijking [9]:

$$M_p(\, kNm) = A_s * f_{ds} * (d - 0{,}45 * x)$$

Voor deze vergelijking zijn een aantal parameters benodigd, zoals de sterkte van de verschillende materialen onder een dynamische belasting, doordat deze belasting niet langdurig aanwezig is zijn deze waarde hoger dan de rekenwaarde voor statische belastingen. De waarde voor de treksterkte van het staal komt uit de trekproeven waarvan de resultaten te vinden zijn in bijlage 1 De formule om de dynamische treksterkte te bepalen is als volgt [9], de treksterkte wordt verhoogt met 20 procent omdat er vanuit gegaan wordt dat staal onder een dynamische belasting sterker is dan onder een statische belasting. Deze rekenregel komt voort uit het feit dat bij een dynamische belasting de belastingsduur korter is waardoor het materiaal niet de kans heeft om te vervormen, de dynamische treksterkte f_{ds} wordt dan:

$$f_{ds} = 1{,}2 f_y$$

Ingevuld is dat:

$$f_{ds} = 1{,}2 f_y = 1{,}2 .* 723 \text{ (gemeten)} = 867{,}6 \text{ N/mm}^2$$

Ook voor beton geldt dat de sterkte bij een relatief korte dynamische belasting hoger is dan bij een statische belasting. De dynamische betondruksterkte is dan ook [9]:

$$f_{dcu} = 1{,}25 * f_{ck} = 1{,}25 * 35\ N/m^2 = 43{,}75\ N/m^2$$

De oppervlakte van het wapeningsstaal wordt uitgedrukt in A_s, hierbij wordt de drukwapening buiten beschouwing gelaten.

$$A_s = 4 * (\pi * r^2) = 4 * (\pi * 1{,}57^2 mm) = 30{,}97 mm^2$$

2.2.3 Plastisch moment

Nadat de oppervlakte en treksterkte van het staal zijn bepaald wordt de arm bepaald, het moment waarop de balk plastisch gaat bezwijken wordt bepaald door de strekte van het staal te vermenigvuldigen met de arm waarover de kracht kan werken. Dit gebeurt met de volgende vergelijkingen ([9]):

$$x = \frac{A_s * f_{ds}}{0{,}6 * b * f_{dcu}} = \frac{30{,}97 * 867{,}6}{0{,}6 * 46mm * 43{,}75} = 22{,}25mm$$

Om de arm te bepalen moet eerste de effectieve hoogte d van de doorsnede worden bepaald. De geometrische gegevens van de balk die hierin gebruikt worden zijn terug te vinden in figuur 2.7.

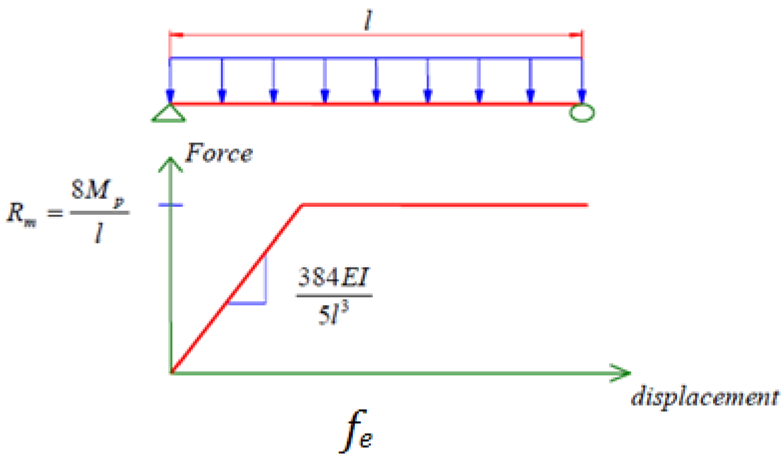
$$d = \text{h} - \text{c (dekking)} - \text{bg(beugel diameter)} - \tfrac{1}{2}\,\text{hw(hoofdwapening diameter)}$$

$$d = 82 - 4 - 2 - \left(\frac{1}{2} * 3{,}14\right) = 74{,}43mm$$

Het plastisch moment wordt bepaald door de kracht van het staal te vermenigvuldigen met de arm.

$$M_p\ (plastisch\ moment) = A_s * f_{ds} * \ (d - 0{,}45\ * x)$$

$$M_p = 30{,}97 * 867{,}6 * \left(74{,}43 - (0{,}45 * 22{,}25)\right) = 173{,}09 * 10^6 Nmm = 173{,}09kNm$$



Figuur 2.9 schematisering kracht uitwijking [4]

2.2.4 Weerstandsmoment

In de UFC 3-340-02 schematiseert men de vervorming van de balk met een toenemende kracht zoals in figuur 2.8 te zien is. Bij deze schematisering is het weerstandsmoment van de balk gelijk aan 8 maal de het plastisch moment gedeeld door de lengte van de overspanning. De lengte van de overspanning is korter dan de lengte van de balk. Dit komt omdat de opleggingen niet precies op het uiteinde van de balk zitten. Daarom wordt er gerekend met een overspanninglengte l [9] van 70.

$$R_m(weerstandsmoment) = \frac{8 * M_p}{l(lengte\ overspanning)}$$

$$R_m = \frac{8 * 173{,}09}{0{,}7} = 19{,}78 * 10^3 N$$

De stijfheid K_b van de balk is te berekenen met inachtneming van de buigstijfheid EI (elasticiteitsmodulus en traagheidsmoment)van de ligger [9]:

$$K_b = \frac{384 * E_c * I}{5 * l^3}$$

De elasticiteitsmodulus van staal en beton zijn bepaald door de kwaliteit op te meten en de daarbij behorende waarden op te zoeken in eurocode 2. Het staal is getest op treksterkte in een trekbank in het materiaallab op de KMS (zie bijlage 1), het beton is getest op druksterkte en treksterkte met behulp van een druktest in het materiaallab. De beton kwaliteit is bepaald doormiddel van een drukproef en een buigproef op specimens van dezelfde betonmortel als die in de balken(zie bijlage 2). Met behulp van de staalkwaliteit en de betonkwaliteit kunnen de eurocodes gebruikt worden om de bijbehorende parameters op te zoeken.

$$E_c = elastisieitsmodulus\ van\ beton(c35/45) = 34000\ N/mm^2\ [12]$$

Het traagheidsmoment wordt als volgt berekend [9]:

$$I = F * b * d^3$$

Waarbij de krachtscoëfficiënt F gevonden kan worden als functie van de verhouding wapening doorsnede ρ_s en de verhouding van elasticiteitsmodulus van staal en beton *n* in figuur 2.10 [9].

$$\rho_s = \frac{\mathrm{A_s}}{\mathrm{b * d}} = \frac{30{,}97}{46 * 74{,}43} = 0{,}009$$

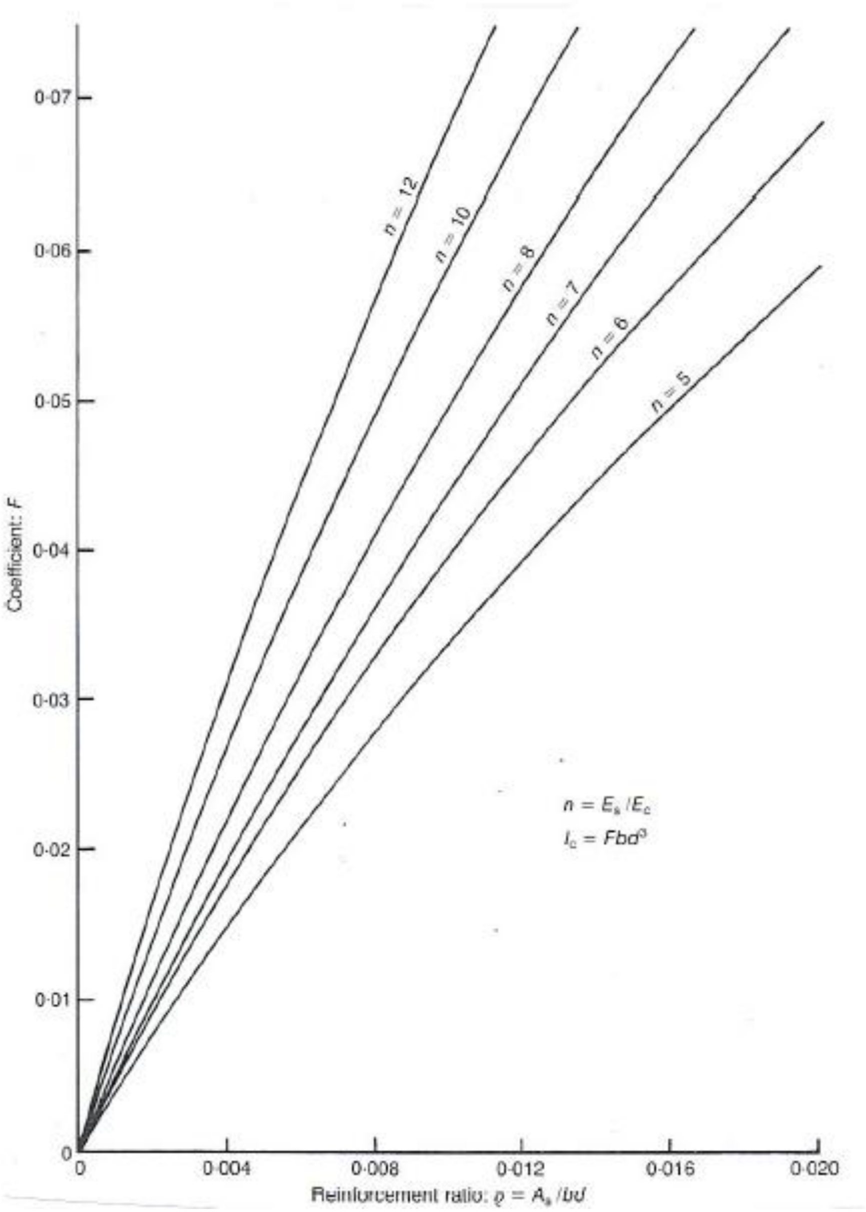
$$n = \frac{E_s}{E_c}$$

Waarin:

$$E_s = elastisiteitmodulus\ staal\ (\ s500) = 210000\ N/mm^2\ [12]$$

Waaruit volgt:

$$n = \frac{210000}{34000} = 6{,}17 = 6$$



Figuur 2.10 Coëfficiënt F bepalen [9]

Met die gegevens kan de waarde 0,039 voor Coëfficiënt F in Figuur 2.10 worden afgelezen. Het traagheidsmoment wordt dan:

$$I = 0{,}039 * 46mm * 74{,}43mm^3 = 739{,}72 * 10^3 mm^4$$

De stijfheid van de balk is dus:

$$K_b = \frac{384 * 34000 * 739{,}72 * 10^3}{5 * 700^3} = 5631{,}34 * 10^3 kN/m$$

De elastisch toelaatbare uitwijking is een verhouding tussen het weerstandsmoment en de stijfheid van de balk:

$$f_e = \frac{R_m}{K_b} = \frac{19{,}78 * 10^3 N}{5631{,}34 * 10^3 N} * m = 0{,}003512m = 3{,}512mm$$

Om verder te gaan met de schematisering van de balk moet de massa van de balk worden bepaald.

$$Massa\ balk = inhoud * \rho b = 0{,}7 * 0{,}046 * 0{,}082 * 2500\ [10]$$

2.2.5 Gegevens schokgolf

De piekoverdruk die door Conwep (zie figuur 2.1.5) is uitgerekend bedraagt 669,4 kPa, de positieve faseduur is 1,559 milliseconde. De K_{lm} is 0,78 bij een vrije oplegging en elastische vervorming volgens de UFC 3-340-02. De eigen periode van een equivalent veersysteem voor de balk is dan [9]:

$$\tau_{sdof} = 2\pi\sqrt{K_{lm} * \frac{M_b}{K_b}} = 2\pi\sqrt{0{,}78 * \frac{6{,}6kg}{5631{,}34 * 10^3 kg * m}} = 0{,}006s = 6ms$$

De kracht op de balk door de schokgolf kan men berekenen door de invallende piekoverdruk te vermenigvuldigen met de oppervlakte waarop de druk werkt A, het is belangrijk om hier met de invallende piekoverdruk te rekenen omdat die ook gebruikt wordt bij de berekening in de excelsheet van Debroey.

$$P_0 = p_0 * A = 669{,}4 * 10^3 pa * 0{,}046 * 0{,}7 = 21{,}55kN$$

Vervolgens wordt de trillingstijd berekend van het massa veersysteem, omdat de impuls wordt benaderd met een driehoek is de trillingstijd T gelijk aan $t_0/2$:

$$T = \frac{t_0}{2} = \frac{1{,}559}{2} = 0{,}7795ms$$

Vervolgens wordt het domein bepaald om te bepalen met welke rekenmethode de doorbuiging en de mate van vervorming gebruikt moet worden. De domeinen zijn te zien in tabel 2.4.

$2\pi T/\tau \leq 0.4$	**impulse**
$0.4 < 2\pi T/\tau < 20$	**dynamic**
$2\pi T/\tau \geq 20$	**quasi-static**

Tabel 2.4 domeinen berekening [4]

$$\frac{2\pi * T}{\tau} = \frac{2\pi * 0{,}78}{6{,}00} = 0{,}816 => 0{,}4 < 20$$

Omdat de waarde groter is dan 0,4 maar kleiner is dan 2,0 zal er gerekend moeten worden met een dynamische rekenmethode. Op basis van de UFC stelt Debroey dat de dynamische oplossingen zeer complex en onnauwkeurig zijn en adviseert om bij een waarde tussen de 0,0 en 2,0 te rekenen met de impulsbenadering. Bij een waarde hoger dan 2 moet er gebruik gemaakt worden van de quasi-statische benadering. In dit geval wordt er dan ook doorgerekend met de impuls benadering.

Allereerst wordt de maximaal toelaatbare ductiliteit berekent, dit is een verhouding tussen de maximaal toelaatbare elastische vervorming gedeeld door de maximaal toelaatbare doorbuiging [4] .

$$X_{max}/f_e = \mu_{max}$$

De X_{max} is de toelaatbare doorbuiging die gekoppeld is aan de maximaal toelaatbare hoekverdraaiing van 2 graden. De bijbehorende doorbuiging is eenvoudig uit te rekenen:

$$X_{max} = \frac{l}{2} * \tan(2°) = \frac{0{,}7}{2} * \tan(2°) = 0{,}0122\text{m}=12{,}2\text{mm}$$

De maximaal toelaatbare ductiliteit is dan:

$$\mu_{max} = \frac{12{,}2mm}{3{,}512mm} = 3{,}485$$

2.2.6 Vervorming en doorbuiging

Vervolgens moet er bepaald worden of de balk elastisch of plastisch bezwijkt, dat wordt bepaald door te kijken of de explosieve belasting groter is dan het weerstandsmoment [4].

$$\mu = \frac{(\,P0.\pi.t0\,)}{Rm.\tau} = \frac{21{,}55 * 10^3 N * \pi * 0{,}001559s}{19{,}78 * 10^3 N * 0{,}006s} = 0{,}889 < 1\ dus\ elastisch$$

De doorbuiging wordt ten slotte berekend door de maximale elastische doorbuiging te vermenigvuldigen met de mate waarin de balk elastisch vervormd µ.

$$X_{max} = \mu * fe = 0{,}889 * 3{,}512mm = 3{,}121\ milimeter$$

2.2.7 Validatie Debroey

De mate van vervorming en de doorbuiging zijn ook berekend met de excelsheet van Debroey, een excelsheet waarin de berekeningen van de UFC-3-340-02 zitten verwerkt. In bijlage 3 zit de ingevulde excelsheet bijgevoegd. De resultaten hiervan zijn in tabel 2.5 weergeven.

Parameters	**Handmatig**	**Debroey**
µ	0,889	0,860
Xmax	3,121mm	3,211mm

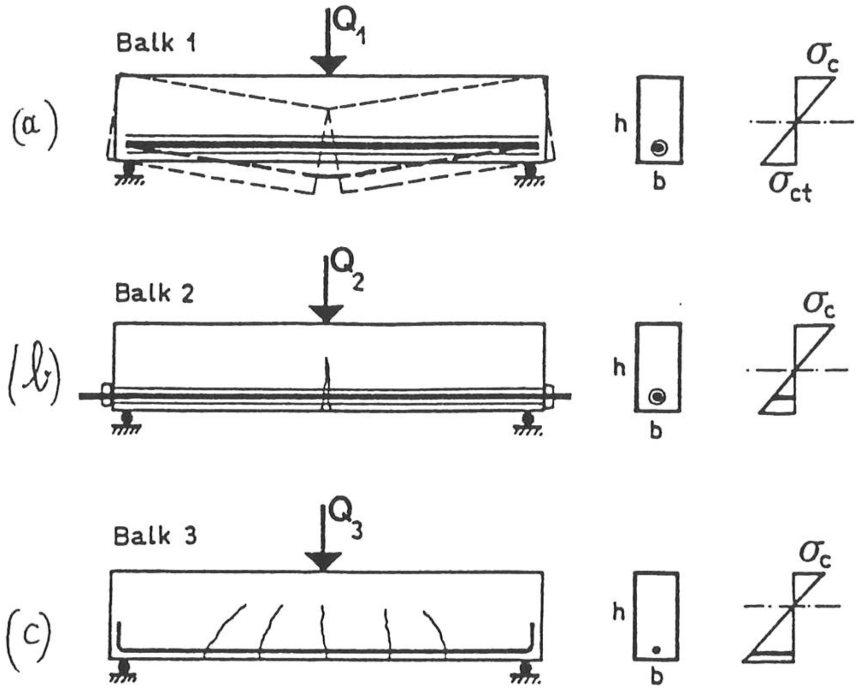
Tabel 2.5 validatie Debroey

Zoals te zien is in de tabel liggen de waarden erg dicht bij elkaar. Het verschil valt de verklaren door afrondingsfouten en interpolatieverschillen, de tussenresultaten voor de bepaling van de F coëfficiënt komen overeen met de waarden van de excelsheet Debroey. Verder zitten er zoveel onzekerheden in de berekening dat een significantie van 2 decimalen al erg optimistisch is, zo kan de kwaliteit van de balken onderling variëren door imperfecties zoals vermeld in hoofdstuk 2. De excelsheet van Debroey kan dus gebruikt worden bij het voorspellen van de vervorming en doorbuiging.

2.3 Scheurvorming

2.3.1 Aanhechting wapening

Bij het bepalen van het scheurpatroon in de balken bij het belasten van de balk moet er allereerst gekeken worden naar de aanhechting van de wapening aan het beton. In figuur 2.11 zijn 3 methoden van het verankeren van de wapening weergeven; situatie a toont een balk waarbij de wapening in een buis zit en niet verankerd is aan het beton. Bij situatie b zit de wapeningstaaf nog steeds in een buis maar aan de wapeningsstaaf is een bout bevestigd die de staaf verankert aan het beton. Situatie c toont de situatie waarin de wapening over de volledige lengte van de balk verankerd is in het beton. Omdat er gebruik is gemaakt van geribbelde wapeningsstaven mag er vanuit gegaan worden dat de staven over de gehele lengte van de balk zich aan het beton hebben gehecht, de testen van Deklerck ondersteunen deze uitspraak omdat de scheurvorming overeen komt met die van balk c in figuur 2.11 [2]. Het spanningsverloop in de doorsnede van de balk is dan ook niet symmetrisch [11].



Figuur 2.11 verankeringsmethoden [11]

Bij een belasting Q waarbij de balk zonder aanhechting van de wapening zal bezwijken ontstaat een scheur onder de puntlast. De wapeningstaaf zal ten opzichte van het beton een kleine verschuiving maken maar dankzij de aanhechting van de wapening over de volledige balklengte zal de verbinding tussen de wapening en het beton behouden blijven. Bij een verhoogde belasting zullen er nieuwe scheuren ontstaan in naburige doorsneden zodra de trekspanning in het beton de buigtreksterkte van de doorsnede overtreft. De scheuropening van eerder gevormde scheuren neemt toe bij toenemende belasting. De scheurvorming zal zich verder verspreiden over de balk tot aan de balkeinden. De balk waarbij de wapening volledig aangehecht is kan op drie manieren bezwijken [11];

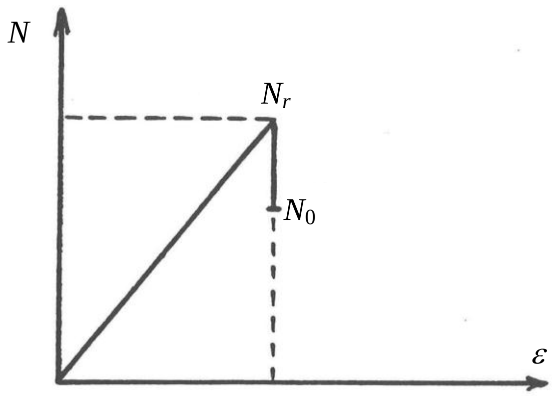
1. Het staal in de scheuren bereikt de vloeigrens waardoor het zal gaan vloeien. Q3 = f_{yk}.
2. De druk in het beton aan de drukzijde bereikt de beton druksterkte waardoor het beton zal bezwijken. Q3= f_{ck}
3. De verankering van de wapening zal bezwijken waardoor het staal niet meer mee doet in de weerstand van de balk. Dit kan voorkomen worden door de wapening tot ver over de steunpunten te bevestigen.

2.3.2 Fasering scheurvorming

Bij het berekenen van de scheurwijdte moet men twee fasen onderscheiden; de scheurvormingfase, waarbij de scheurwijdte maximaal is voor het moment dat de volgende scheur ontstaat en de scheurfase waarin het scheurenpatroon compleet is. Wanneer het scheurpatroon compleet is neemt de kracht toe maar de rek niet meer. Er komen geen nieuwe scheuren bij maar de bestaande scheuren worden wijder dan in de eerste fase. De maximale scheurwijdte hangt af van de staalspanning in de scheur [11]. De nieuwe scheuren zullen blijven ontstaan totdat de balk zal bezwijken.

Bij de voorspellingen van de scheurvorming zal dit stuk zich beperken tot de voorspelling met betrekking tot de inleidinglengte van de scheuren, maximale scheurwijdte en het scheurmoment van de balk.

De eerste scheur ontstaat op het moment dat de centrische kracht groter is dan de door het staal en beton geleverde doorsnede krachten. De toename kracht en rek zijn te zien in figuur 2.12



Figuur 2.12 kracht-rek diagram [11]

Hierin is duidelijk te zien dat nadat het beton gescheurd is de kracht om uitrekking ε te realiseren een stuk kleiner is, N_0 komt overeen met de trekkracht van het staal in de doorsnede.

De normaalkracht N_r waarbij de eerste scheur ontstaat is te berekenen met de volgende vergelijking [11]:

$$N_r = f_{ct} * A_c * (1 + n * \rho)$$

waarin:

$$N_r = normaalkracht$$

$$f_{ct} = buigtreksterkte\ beton$$

$$A_c = Oppervlakte\ beton$$

$$\alpha\ verhouding\ Elasticiteit\ staal\ beton = \ E_s/E_c$$

$$\rho\ wapeningspercentage = A_s/A_c$$

Als we dit invullen [10]:

$$A_c = 3{,}74 * 10^{-3}mm^2$$

$$f_{ct}\left(\frac{c35}{45}\right) = 3{,}2 * 10^6 pa\ [10]$$

$$\rho \quad = \frac{3{,}09 * 10^{-5}m}{3{,}74 * 10^{-3}m} = 8{,}26 * 10^{-3}$$

$$n \ \ = 6$$

$$N_r = 3{,}2 * 10^6 * 3{,}74 * 10^{-3} * (1 + 6 * 8{,}26 * 10^{-3}) = 12561{,}13\ N$$

De eerste scheur zal dus ontstaan wanneer de normaalkracht in de balk door een belasting de waarde N_r overschrijdt. Op dat moment zal het staal in de doorsnede de volledige kracht op moeten vangen, de vergelijking wordt dan [11]:

$$N_r = A_s * \sigma_{sr}$$

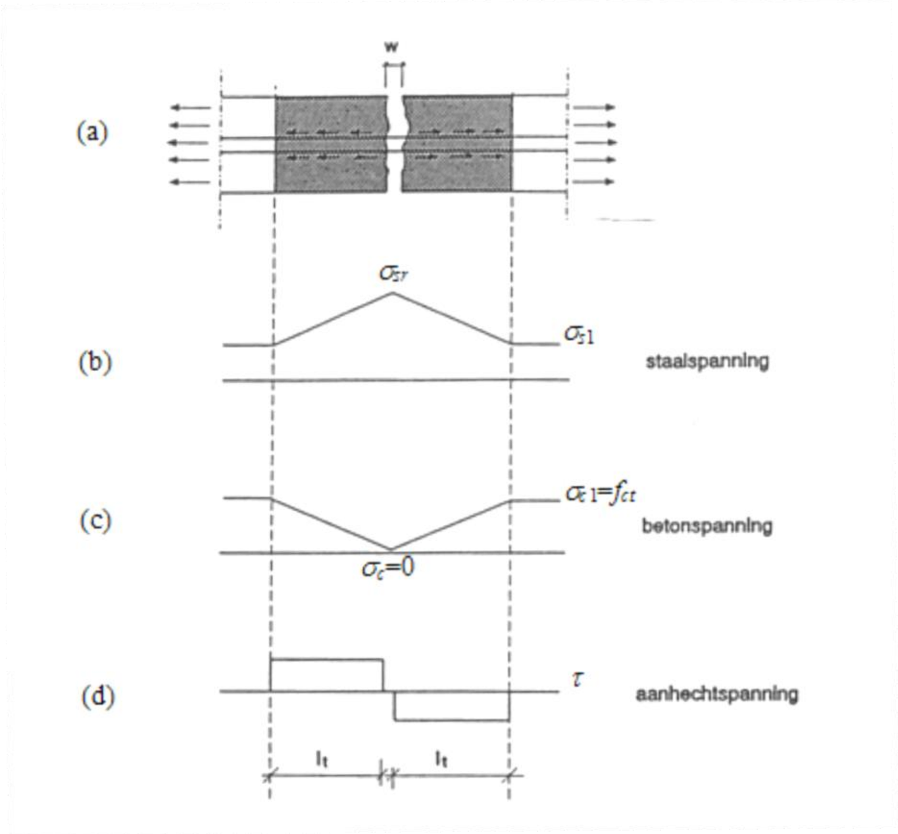
Waarin:

$$\sigma_{sr} = staalspanning\ gedurende\ de\ scheur$$

Hieruit blijkt:

$$\sigma_{sr} = \frac{12561{,}13N}{3{,}09 * 10^{-5}m^2} = 4{,}065 * 10^5 kN/m^2 = 406{,}5N/mm^2$$

In figuur 2.13 ziet men het spanningsverloop gedurende de scheurvorming, de spanning in het staal neemt gedurende de scheurvorming toe tot 406,5 N/mm^2 en de spanning in het beton neemt af tot 0 omdat het beton bezweken is totdat er een nieuwe scheur ontstaat:



Figuur 2.13 Spanningsverloop materialen gewapend beton [11]

De inleidinglengte l_t is de lengte die nodig is om de spanning van het staal over te brengen op het beton en wordt berekend met de volgende vergelijking [11]:

$$l_t = \frac{1}{8} * \frac{\emptyset}{\rho}$$

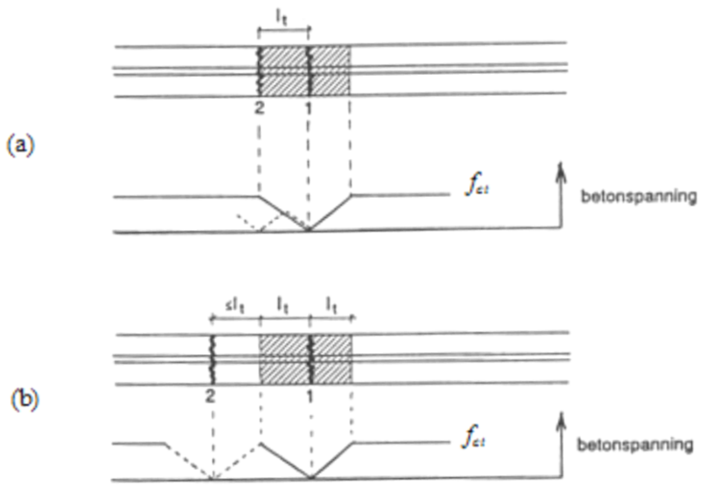
Waarin ∅ de doorsnede van de wapeningsstaaf is:

$$\emptyset = 0{,}00314m \text{ [13]}$$

De inleidinglengte is dan:

$$l_t = \frac{1}{8} * \frac{3{,}14 * 10^{-3}\ m}{8{,}26 * 10^{-3}} = 0{,}0475m = 4{,}74cm$$

De maximale afstand tussen de scheuren is gelijk $2 * l_t$ en de minimale afstand tussen de scheuren is gelijk aan l_t zoals te zien in figuur 2.14 waarbij bovenaanzicht a de minimale afstand laat zien en bovenaanzicht b de maximale afstand tussen de scheuren toont. [11].



Figuur 2.14 afstand tussen scheuren [11]

Om de maximale scheurwijdte te bepalen kan men vervolgens gebruik maken van de volgende vergelijking [11]:

$$w_{max} = \frac{1}{8} * \frac{\emptyset}{\rho^2} * \frac{f_{ct}}{E_s} * (1 + \alpha * \rho)$$

Als men deze vergelijking invult voor de balken ontstaat een volgende maximale scheurwijdte:

$$w_{max} = \frac{1}{8} * \frac{3{,}14 * 10^{-3}\ m}{(6{,}26 * 10^{-3})^2} * \frac{3{,}2 * 10^6 pa}{2{,}1 * 10^{11} n/m^2} * (1 + 6 * 8{,}26 * 10^{-3}) = 1{,}601 * 10^{-4} m$$

2.3.3 Scheurvorming compleet

Nadat het scheurpatroon compleet is zullen er geen nieuwe scheuren meer bij komen, de scheurwijdte kan nog wel toenemen door de verlenging van het staal in de scheuren, deze verlenging wordt beschreven met de volgende vergelijking [11]:

$$\Delta w = \frac{\Delta \sigma s}{Es} = 2 * \frac{lt}{E_s} * (\sigma s - \frac{f_{ct}}{\rho} - \alpha * f_{ct})$$

De totale scheurwijdte is een sommatie van w_{max} *en* Δw*.* Wat omgeschreven kan worden naar [11]:

$$w_{max} = \frac{4 * \emptyset}{4 * \rho * E_s} * (\sigma_s * \frac{f_{ct}}{2 * \rho} * (1 + \alpha * \rho))$$

Ingevuld:

$$w_{max} = \frac{4 * \ 3{,}14 * 10^{-3}}{4 * 6{,}26 * 10^{-3} * 2{,}1 * 10^{11}} * \left(\sigma_s * \frac{3{,}2 * 10^6}{2 * 6{,}26 * 10^{-3}}\right) * (1 + 6 * 8{,}26 * 10^{-3})$$

De maximale scheurwijdte hangt dus af van de staalspanning. Zodra men een volledig scheurpatroon en de staalspanning bekend is kan de maximale scheurwijdte berekend worden. De staalspanning is te berekenen door de kracht op de doorsnede te delen door de oppervlakte van het staal. De gemiddelde scheurlengte is gelijk aan 1,5 keer de inleidinglengte. Als men de scheurwijdte opmeet kan daarna de staalspanning berekent worden.

2.3.4 Scheurmoment M_r

Om scheurmoment te bepalen, om te bekijken of de schaalmodellen ook scheurvorming zullen vertonen wordt het scheurmoment bepaald. Het scheurmoment zal gelden voor een statische belasting, echter de aanname hier is dat het wel een indicatie zal geven voor het scheurmoment bij een dynamische belasting. De rekenmethode die hierbij gebruikt wordt komt uit het dictaat van Vantomme. De vergelijking voor het bepalen van het scheurmoment is [11]:

$$M_r = \frac{f_r.I_1}{a_1} = f_r.W_1$$

Waarin:

$$W_1 = \frac{I_1}{h-x}$$

En:

$$f_r = f_{ctm}\ in\ eerste\ instantie\ [11] = 3{,}2MPa\ [12]$$

Allereerst moet de waarde van x berekend worden, x is beschreven met de volgende vergelijking [11]:

$$\frac{b*x^2}{2} = \frac{b(h-x)^2}{2} + a*A_{s1}*(d-x)$$

De bekende parameters:

$$b = 46mm$$

$$A_{s2} = 0\ (wordt\ niet\ meegenomen\ in\ de\ berekeningen)$$

$$h = 82mm$$

$$d = 74{,}4\ mm$$

$$A_{s1} = 30{,}9mm^2$$

$$\alpha = 6$$

Wordt dit herschreven, dan ontstaat de volgende vergelijking:

$$\frac{b(h-x)^2 + 2*\left(a*As1*(d-x)\right)}{b*x^2} = 0$$

Als alle bekende variabelen worden ingevuld ontstaat er een vergelijking waarin alleen x onbekend is:

$$\frac{46(82-x)^2 + 2*\left(6*30{,}9*(74{,}4-x)\right)}{46*x^2} = 0$$

Met een numerieke solver komt men tot:

$$x = 76{,}7mm\ of\ x = 87{,}72mm$$

Omdat 87,72mm onder de doorsnede ligt zal het zwaartepunt op 76,7 millimeter van de bovenkant van de doorsnede liggen. Vervolgens kan het traagheidsmoment berekend worden met de volgende vergelijking [11]:

$$I_1 = \frac{b*x^3}{3} + \frac{b*(h-x)^3}{3} + a*As1*(d-x)^2$$

Vult men dit in:

$$I_1 = \frac{46*76{,}7^3}{3} + \frac{46*(82-76{,}7)^3}{3} + 6*30{,}9*(74{,}4-76{,}7)^2 = 6{,}921*10^6 mm^4$$

De buigingsmodulus van de ongescheurde doorsnede is dan:

$$W_1 = \frac{I_1}{h-x} = \frac{6{,}921*10^6 mm^4}{82-76.7} = 1{,}306*10^6 mm^3$$

Het scheurmoment is dan:

$$M_r = f_r * W_1$$

$$M_r = 3{,}2\ MPa * 1{,}306*10^6 mm^3 = 435{,}2\ kNm$$

Bij een verdeelde belasting geldt daar het vergeet me nietje:

$$\frac{1}{8} q l^2 = M$$

De belasting voordat er een scheur ontstaat is dan gelijk aan:

$$q_r = \frac{8*M_r}{l^2} = 8*\frac{435{,}2kNm}{0{,}7^2} = 7105{,}3\ kN/m$$

Als men er vanuit zou gaan dat een schokgolf een statische belasting is zou dit overeenkomen met een piekoverdruk van:

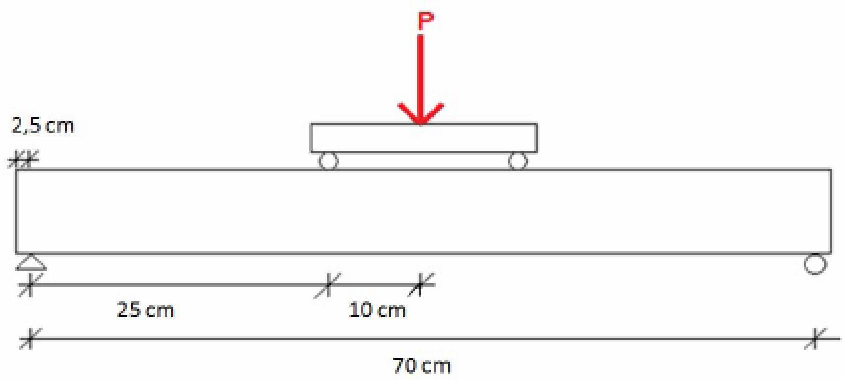
$$P_0 = 7105{,}3\ kPa$$

Hierbij moet opgemerkt worden dat in deze berekening de factor tijd buiten beschouwing wordt gelaten, eerder is al opgemerkt dat tijd een erg belangrijke factor is in het bezwijken van een balk. Het is daarom slechts een indicatie om te kijken of er scheuren op kunnen treden.

3. Het bouwen van het schaalmodel

3.1 Model Deklerck

Het schaalmodel dat gebruikt is bij de experimenten is ontworpen door Onder-luitenant Deklerck in 2011. In zijn Master-thesis heeft hij een schaalmodel ontwikkeld met een vijfde van de afmetingen van een gewapend betonnen balk welke een jaar eerder is gemaakt door Sam van Dam [12]. Dit schaalmodel is ontwikkeld om te kijken of de fenomenen van het bezwijken van een gewapend betonnen balk te benaderen zijn met een schaalmodel. Er zijn verschillende schaalmodellen gemaakt, met elk een andere samenstelling. Deze modellen zijn vervolgens onderworpen statische belasting met een vierpuntsbuigproef, te zien in figuur 3.1.



Figuur 3.1 vierpuntsbuigproef [12]

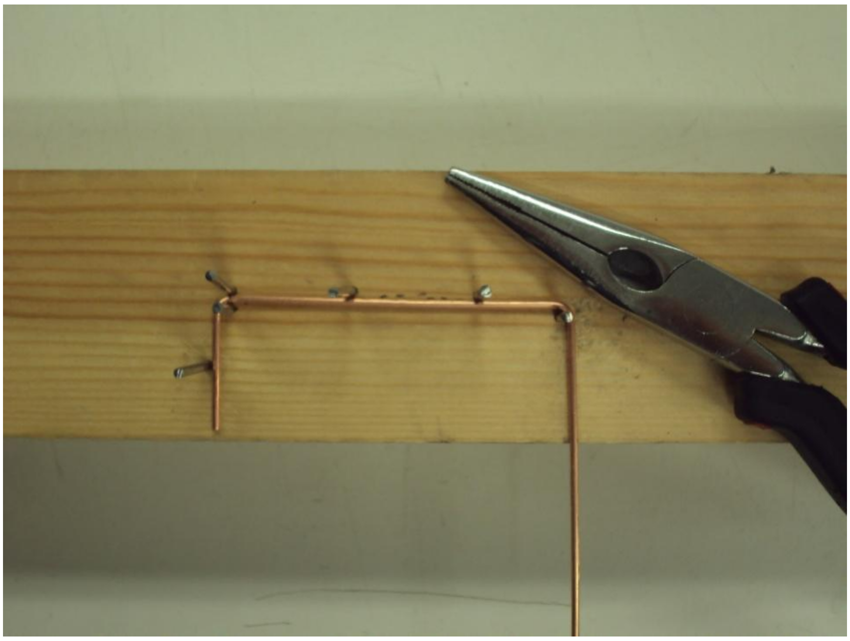
Met het een mengsel van micro-beton, de hoofdwapening van draadstangen, drukwapening en de beugels van galvastaal is gebleken dat de scheurvorming en het bezwijkmechanisme van de balk gelijkaardig waren als die van de balk van Sam van Dam [2] onder een statische belasting van de vierpuntsbuigproef.

Om te bekijken of dit schaalmodel bij een dynamische belasting van een explosie ook dezelfde fenomenen geeft als betonnen liggers op werkelijke schaal is het schaalmodel van Deklerck nagemaakt. Hiervoor is het werk van Deklerck als bouwhandleiding gevolgd.

3.2 Wapening

De staalsoort die gebruikt dient te worden is standaard schroefdraad m4 met een sterkte van *s500* en een binnendiameter van 3,14 millimeter. Deze stangen zijn in het lab getest op treksterkte en elasticiteit. De resultaten van deze metingen zijn te vinden in bijlage 1 en zijn gebruikt in de verdere hoofdstukken om de doorbuiging en uitwijking te berekenen (zie hoofdstuk 2). Het draadstaal dat gebruikt wordt voor de beugels en de bovenwapening is galvastaaldraad met een diameter van 1,8 millimeter. Het staaldraad dat gebruikt is om de beugels te bevestigen aan de hoofdwapening en drukwapening is fijn staaldraad met een zo klein mogelijke diameter.

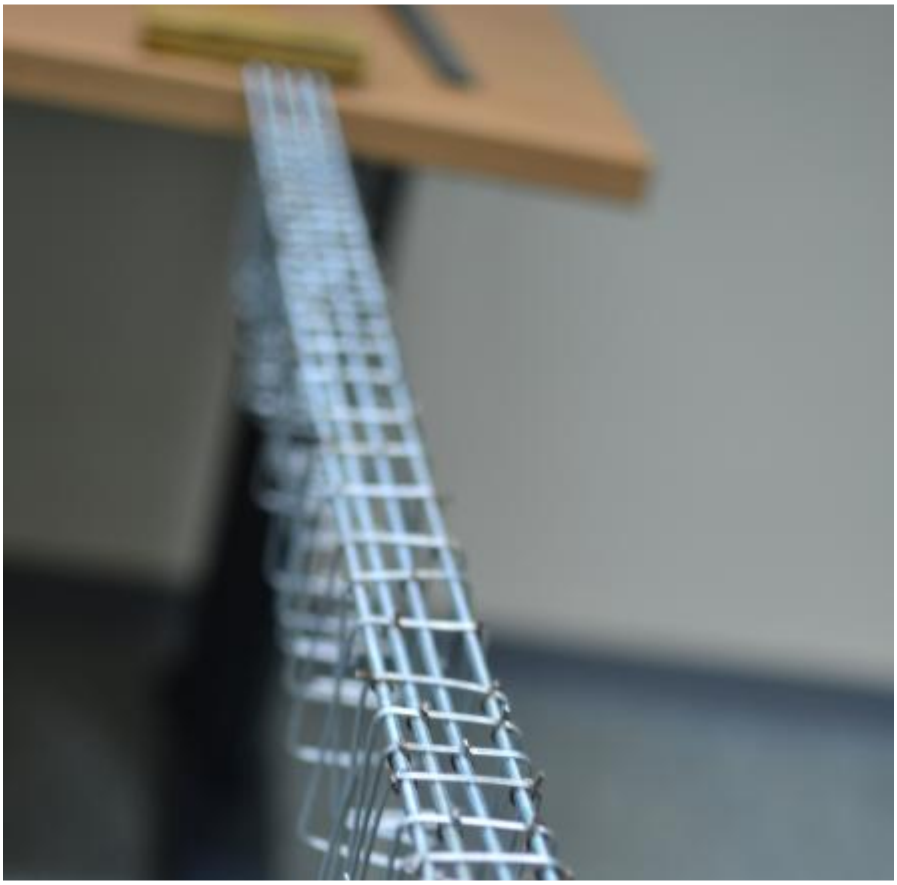
Bij het bouwen van de balken begint men met het vlechten van de wapening. In totaal zijn er $38 * 8 = 304$ beugels geplooid. Dit is gedaan met de hand gedaan met behulp van een stuk hout waarin spijkers zijn geslagen en een tang. Het voorbereide stuk hout is afkomstig van Deklerck en is te zien in figuur 3.2. Allereerst zijn stukken staaldraad op maat geknipt en recht gebogen. Vervolgens zijn de rechte staaldraden tussen de spijkers met een tang geplooid waardoor er een rechthoek ontstond met de juiste afmetingen.



Figuur 3.2 Plooien beugels [2]

Nadat de beugels voltooid zijn worden ze aan de hoofdwapening bevestigd. Dit is gedaan door de hoofdwapeningsstaven in te klemmen tussen twee tafels met behulp van vier lijmtangen en een mal voor de wapeningsstaven. Hiertussen zijn alle beugels met de juiste tussenafstanden gehangen, die met behulp van fijner staaldraad aan de beugels zijn bevestigd, elke beugel moet met minstens twee staven van de hoofdwapening bevestigd zijn om een goede verbinding te realiseren. Dit is te zien in figuur 3.3.

De verdeling van de beugels is dezelfde als die van Deklerck. Deze tussenafstanden zijn gebaseerd op de tussen afstanden van de beugels in het model op ware schaal. De beugels worden vervolgens aan de hoofdwapening gehangen en bevestigd met behulp van een fijn soort staaldraad. De hoofdwapeningsstaven worden hiervoor ingeklemd waarna de beugels er tussen gehangen worden. Dit is te zien in figuur 3.3.



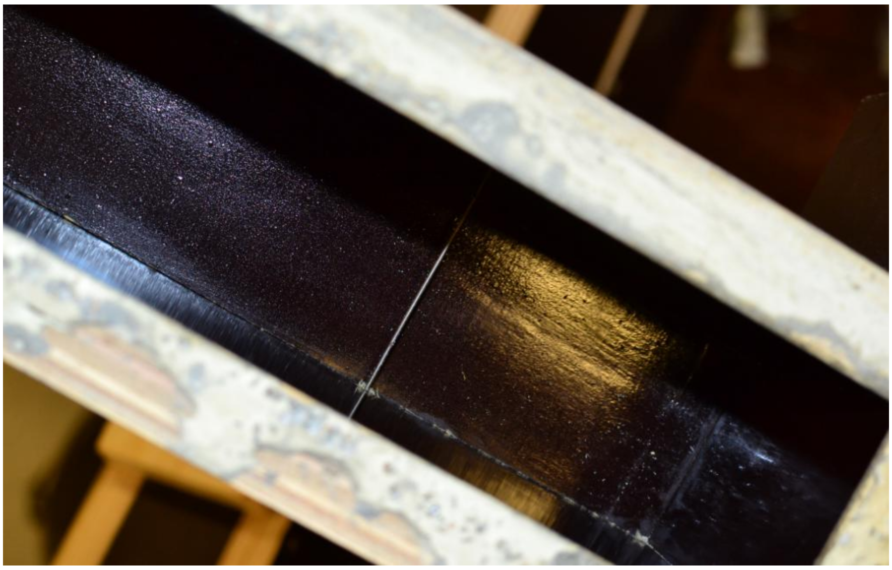
Figuur 3.3 het ophangen van de beugels.

Nadat de hoofdwapening aan de beugels bevestigd zijn wordt de drukwapening aan de beugels bevestigd. Dit gebeurt op de zelfde manier als de hoofdwapening. De staven worden aan de hoeken van de beugels bevestigd met een fijn soort staaldraad. Het bevestigen van de beugels aan de hoofdwapening en drukwapening is een tijdrovend proces. Een goede soort fijn staaldraad is hierbij dan ook gewenst.

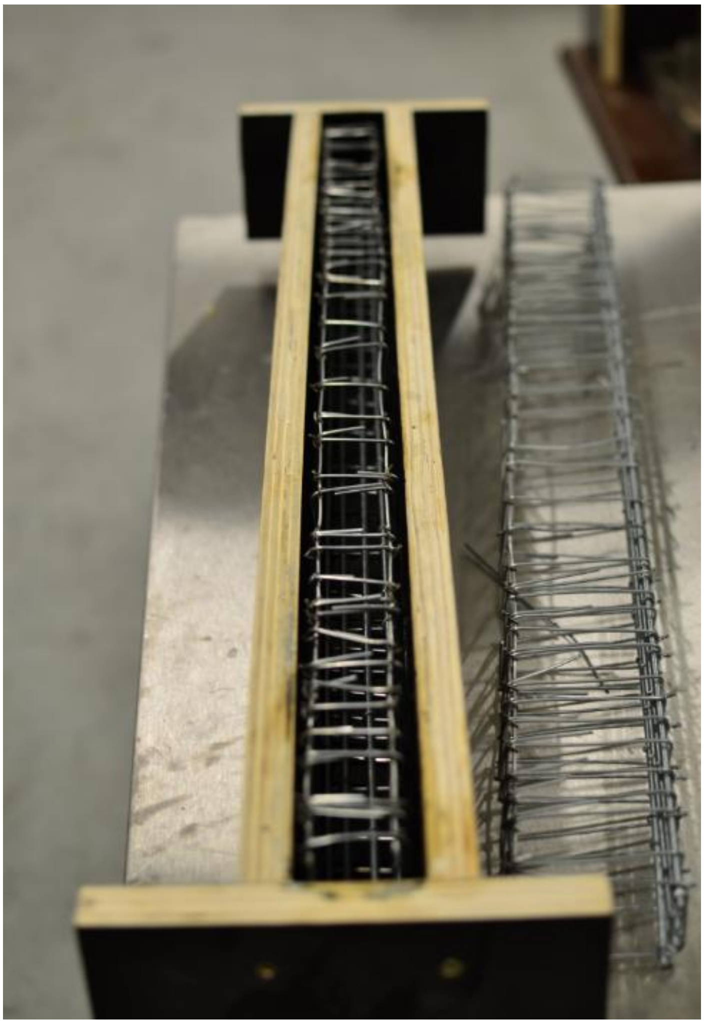
Hierna moet het wapeningsskelet nog op maat gemaakt worden voor het in de bekisting past. Om de staven op maat te maken wordt er gebruik gemaakt van een cirkelzaag. De hoofdwapening wordt iets korter dan de balk gemaakt zodat de wapening niet uit de balk steekt. De drukwapening wordt omgebogen om een goede verankering in het beton te realiseren. De hoofdwapening wordt verankerd in het beton door gebruik te maken van bouten aan de uiteinde van de hoofdwapening. Het volledige wapeningsskelet is te zien in figuur 3.4.

Figuur 3.4 Wapeningsskelet

Het wapeningsskelet heeft een bepaalde afstand tot de bekisting nodig. Daarom wordt er dun staaldraad gespannen in de bekisting. Deze draden zijn te zien in figuur 3.5. Naast de dekking aan te houden hebben de draden in de bekisting nog een functie, het wapeningskelet wordt door de staaldraden op zijn plek gehouden tijdens het storten van het beton.



Figuur 3.5 Afstandhouders bekisting



Figuur 3.6 Bekisting met wapening

De bekisting met wapeningsskeletten erin is te zien in figuur 3.6. In dit figuur is duidelijk te zien dat de wapening niet overal de gewenste dekking zal hebben omdat de beugels de wanden van de bekisting raken. Dit komt dat het recht trekken van de drukwapening vrij lastig is. Ook is de afstand tussen de beugels niet overal gelijk. Dit komt omdat bij het aandraaien van het fijnere staaldraad de beugels soms meedraaien met het fijnere staaldraad.

Hier is ook goed te zien dat de ruimte voor het beton om door de wapening te komen vrij klein is, daarom moet het beton meerdere malen aangetrild worden op een trilplaat. Deze onvolmaaktheden gaan ten koste aan de kwaliteit van de balken en de nauwkeurigheid bij het vergelijken van de onderlinge resultaten tussen de balken.

3.3 Beton

Het microbeton wordt gemaakt door de zeefcurve van het toeslagmateriaal te vermenigvuldigen met een verkleinfactor. Microbeton heeft als nadeel dat het bij eenzelfde samenstelling een mindere verwerkbaarheid heeft. De oplossing hiervoor is om meer cement en water te gebruiken. Dit heeft echter wel een negatief effect op de sterkte van het beton. Het cement dat gebruikt wordt bij de bereiding van het microbeton is *CEM II/B-M (S-V) 32,5* N Portlandcement. De samenstelling van de toeslagmaterialen en de verhoudingen tussen de gewichten staan hieronder weergeven.

- Grind 8 kg;
- Zand 5 kg;
- Cement 2,5 kg;
- Water 1,25 kg;
- Superplastificeerder 50 g

Het grind en zand is vooraf gedroogd in een oven om er zeker van te zijn dat er geen water in de mix zit. De ingrediënten zijn vervolgens gemixt met een cementmixer in het betonlab. Hierna is het cement in de bekisting gestort waarbij het verdicht door een trilplaat. Wat hierbij opgemerkt moet worden is dat balk 1 en balk 5 te veel verdicht zijn. Dit bleek uit dat de bovenkant van de betonmix er erg vloeibaar uitzag, waarschijnlijk doordat het water uit de betonmix verdrongen was door een lagere dichtheid. Gek genoeg was balk 5 ook de balk waarbij de hoofdwapening zichtbaar is door gaten in het beton.

Gedurende het uitharden zijn de balken in folie gehuld om ze te beschermen tegen uitdroging. In het lab is de tempratuur gedurende 28 dagen gemeten. Uit deze metingen blijkt dat de tempratuur op sommige momenten, vooral gedurende de koude nachten, onder de 19 graden lag. Dit kan een negatief effect hebben op de sterkte van het beton. De ideale tempratuur voor beton om te drogen ligt namelijk op 21 graden celcius.

Naast de balken zijn er van de betonmix ook specimens gemaakt om proeven op uit te voeren. De resultaten van deze proeven zijn te vinden in bijlage 2. Uit deze proeven bleek dat het beton dezelfde sterkte heeft als het beton van Deklerck, het beton kan geclassificeerd worden als c35/45 met een kubusdruksterkte van 45 MPa. Dit is berekend door de bezwijkkracht te delen door de oppervlakte van het specimen. Echter de betonsterkte van de specimens hoeft niet overeen te komen met de beton sterkte van de gebruikte balken omdat deze minder lang aangetrild zijn door het ontbreken van wapening.

De balken met de bijzonderheden staan vermeld in tabel 3.1.

Balk nummer	**Bijzonderheden**	**Wordt gebruikt bij**
1	Beugels deels zichtbaar	Sferisch experiment proef 1 en Tunnel experiment verkennende proef
2	Beugels deels zichtbaar, door lang aantrillen bovenlaag “waterig”.	Sferisch experiment proef 2
3	Beugels niet volledig recht	Sferisch experiment proef 3
4	Geen bijzonderheden	Tunnel experiment proef 1
5	Hoofdwapening zichtbaar door te weinig ruimte tussen de beugels. Tevens te lang aangetrild waardoor de bovenlaag “waterig” is.	Tunnel experiment proef 2
6	Beugelafstand varieert meer dan wenselijk	Tunnel experiment proef 3
7	Beugelwapening deels zichtbaar	Niet in dit onderzoek
8	Geen bijzonderheden	Niet in dit onderzoek

4. Sferische experimentenreeks

Om te testen of de theorie omtrent het gedrag van de balk ook van toepassing is op de gemaakte schaalmodellen is het nodig om de voorspellingen te toetsen aan de werkelijkheid. Om de voorspellingen te testen is er gekeken naar de beschikbare testmogelijkheden, op de KMS is het niet mogelijk om testen uit te voeren die een ladingsgewicht van 50 gram overschrijden. Omdat de voorspelling is dat de balken een vrij grote belasting nodig hebben voordat ze bezwijken is er daarom uitgeweken naar een oefenterrein in Brasschaat waar het maximale ladingsgewicht 1,5 kilogram C4 mag bedragen. Er zijn voor de eerste proevenreeks drie verschillende ladingsgewichten gekozen om te voorkomen dat bij een verkeerde hypothese de laatste twee proeven niks meer opleveren. Als de ontlastingstijd van de balk langer is dan aangenomen ontstaat een situatie waarin de balken langer belast worden met de gereflecteerde piekoverdruk waarbij de balken een aanzienlijk hogere impuls te verduren krijgen.

In paragraaf 4.1 zal naar voren komen dat er bij gebruik van het toegestane ladingsgewicht bij een sferische explosie en een invallende piekoverdruk geen plastische vervorming voor zal komen. Wel kan hier getest worden of de uitwijking in het midden van de balk goed voorspeld kan worden. Tot slot kan er getest worden of de aanname uit 2.1.4 klopt, hierin wordt aangenomen dat er bij een sferische explosie en een vrije oplegging met de invallende piekoverdruk gerekend moet worden door de zeer korte ontlastingstijd en optredende diffractie bij het bepalen van de doorbuiging.

4.1 Voorspellingen

De resultaten uit van de voorspellingen staan weergeven in tabel 4.1. Hierin zijn de piekoverdruk en de impuls weergeven bij een sferische explosie met het gebruik van C4 op een afstand van 1 meter boven het middelpunt van de balk, de berekeningen zijn uitgevoerd met Conwep zoals beschreven in 2.1.5. Omdat een sferische explosie goed te voorspellen valt wordt de piekoverdruk en de impuls niet nagemeten. De positieve faseduur is berekend met de inversie driehoekmethode om zo de door Conwep berekende impuls te kunnen gebruiken.

4.1.1 Karakteristieken schokgolf

Bij het gebruik van Conwep krijgt men twee soorten resultaten voor de piekoverdruk en de impuls; de variant waarin gerekend wordt met de gereflecteerde druk en de variant waarmee gerekend wordt met de invallende piekoverdruk. In paragraaf 2.1.4 wordt verder ingegaan op waarom er gekozen is voor de invallende overdruk en niet voor de gereflecteerde druk. De hypothese is dat de ontlastingsgolf verhoogde piekoverdruk door de reflectie snel zal ontlasten.

C4 (gram)	t0 berekend (ms)	p_s (kPa)	i (Pa*s)	Afstand object-explosie (m)
500	3,96	669,4	132,4	1
1000	3,58	1121,0	200,7	1
1500	3,23	1503,0	242,9	1

Tabel 4.1 Voorspelling Conwep op 1 meter afstand

De gereflecteerde druk en impuls zijn ook berekend met Conwep en staan weergeven in tabel 4.2

4.1.2 Respons balken

Met de karakteristieken van de schokgolf is om de doorbuiging en mate van plastische vervorming Mu te bepalen. Hiervoor is gebruik gemaakt van de excelsheet van Debroey zoals beschreven in hoofdstuk 2. De berekeningen zijn zowel gemaakt voor de invallende drukken en bijbehorende impulsen en de gereflecteerde drukken (P_r) en bijbehorende impulsen. De resultaten staan weergeven in tabel 4.2. De groene arcering geeft aan dat de vervorming elastisch is en de blauwe arcering staat voor plastische vervorming.

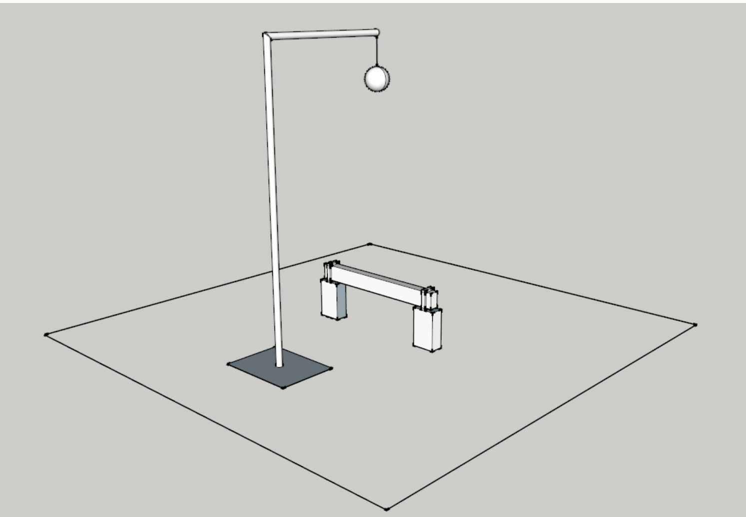
c4 (gram)	Afstand (m)	i (Pa*s)	t0 (ms)	ps (kPa)	Mu	Xmax (mm)	ir (Pa*s)	t0 (ms)	Pr (kPa)	Mu (ref)	Xmax (mm)
500	1,00	132,4	0,396	669,4	0,22	0,816	397,5	0,2455	3238	0,66	2,45
1000	1,00	200,7	0,358	1121	0,33	1,24	676,3	0,2134	6337	1,24	4,6
1500	1,00	242,9	0,323	1503	0,44	1,62	927,5	0,2008	9239	1,89	7,05

Tabel 4.2 Vervorming en doorbuiging van invallende piekoverdruk en gereflecteerde piekoverdruk (groen elastische vervorming, blauw plastische vervorming.)

Uit tabel 4.2 blijkt dat bij berekeningen met de invallende piekoverdruk de vervorming enkel elastisch is en bij het rekenen met de gereflecteerde druk de vervorming bij gebruik van 1,0 kg en 1,5 kg C4 de vervorming plastisch is.

4.2 Opstelling

De meetopstelling waar de eerste proeven op uitgevoerd zullen worden is te zien in figuur 4.1. Waarbij de bol een lading van 500 gram C4 vertegenwoordigd en de balk gesteund wordt door 2 beugels met daartussen een siliconen laag. Door deze opstelling te maken wordt er een vrije oplegging gesimuleerd met een rol en een schanier. Door gebruik te maken van de beugels kan de balk niet weg schieten bij de impact van de explosie. Het middelpunt van de explosie zal op een meter afstand van de balk worden gemonteerd. Hierdoor kan er gerekend worden met een afstand tussen het middelpunt van explosief en object van 10000 millimeter en een ladingsgewicht C4 van 500 gram, 1000 gram en 1500 gram. In figuur 4.2 kan men zien wat de uiteindelijke opstelling is geworden. De afstand van een meter is gekozen omdat er bij een te korte afstand brisante werking van het explosief op kan treden en de impuls kleiner wordt naarmate de afstand van de balk kleiner wordt (zie ook tabel 5.1)..

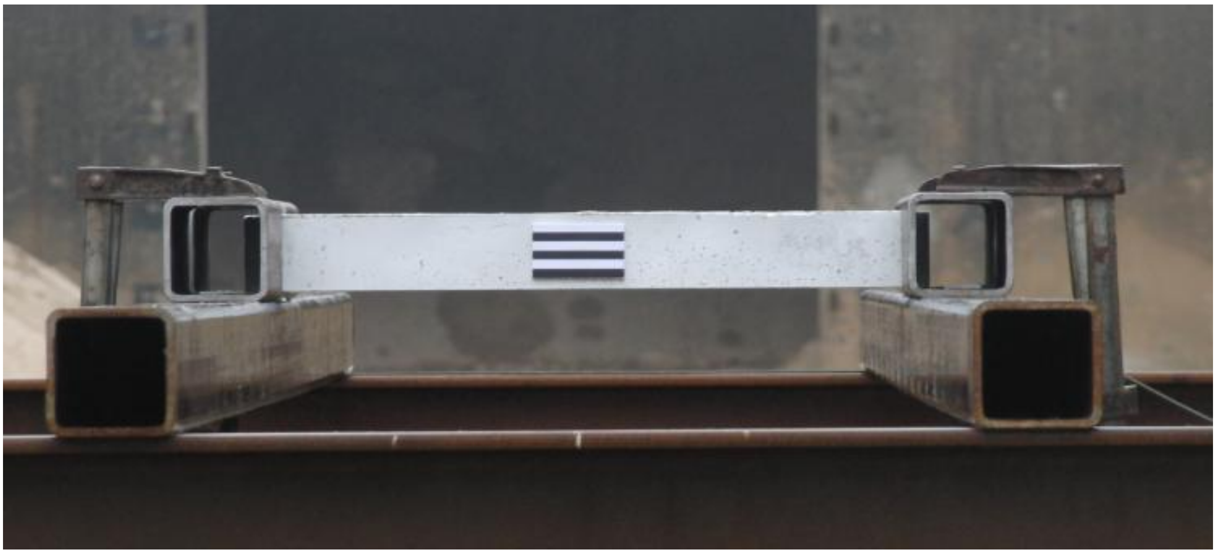


4.1 beoogde opstelling sferische proeven

De afstand van één meter is verder gekozen omdat de piekoverdruk en de impuls op deze afstand in de situatie waar de reflectie niet ontlast wordt voldoende zal zijn om de balken plastisch te laten vervormen (zie tabel 4.2).

4.3 Uitvoering

De uitvoering van de proef was vrijwel zoals gepland, de oplegging was echter wel anders dan in het ontwerp. In het ontwerp was de balk opgelegd op twee steunpunten, dit bracht het risico met zich mee dat de balk weg zou schieten. Daarom is er in overleg met Bruno besloten de balk op te leggen op twee stalen balken waartussen silicone is aangebracht om een vrije oplegging te creëren en ervoor te zorgen dat de opleggingen niet kapotslaan op het staal. Hiernaast zijn twee stalen buizen aan beide zijden van de balk aangebracht die de balk moet weerhouden om weg te schieten. De oplegging zag er in de eerste proefstelling als volgt uit:



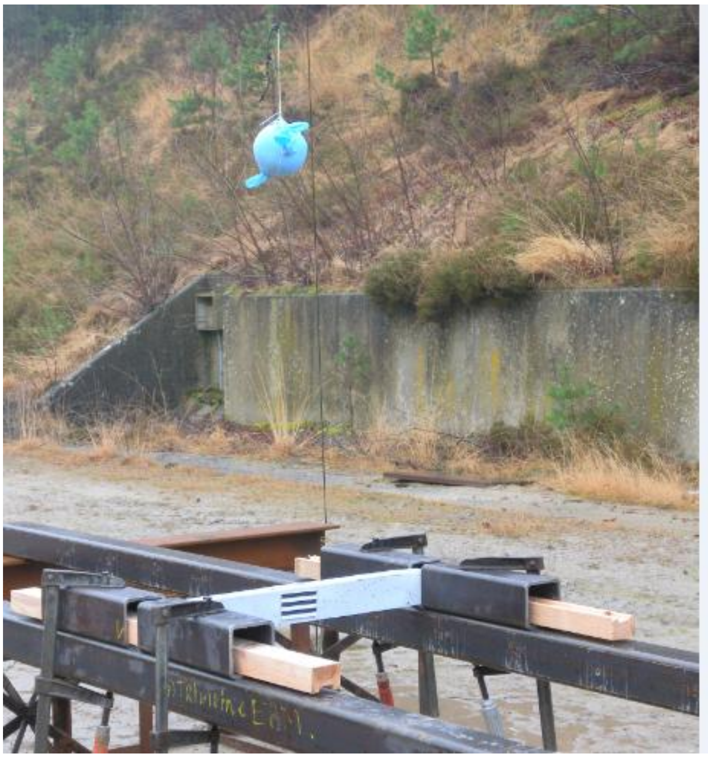
Figuur 4.2 Uiteindelijke opstelling

De lijmtangen houden de vier buizen naast de balk op de plaats tijdens de explosie. De balk is nergens ingeklemd om een vrije oplegging te simuleren.

Het explosief is aan een buis boven de balk gehangen op een meter afstand van de balk. Hierbij is gepoogd om de bol met explosief zo recht mogelijk boven het midden van de balk te hangen. Echter als het een beetje waait kan het explosief niet precies meer boven de balk hangen. Dit is dan ook een onzekerheid geweest bij het testen. Dit is goed te zien in figuur 4.3.

Bij de proef met een ladinggewicht van 1,5 kilogram C4 zijn er in de buizen houten planken geplaatst om de balk te weerhouden van wegspringen door de explosie. Hierdoor kon de balk maar 1 kant op, de richting van de

schokgolf.



Figuur 4.3 Ladinggewicht boven de balk , gevoelig voor wind.

De proeven zijn gefilmd met een high speed camera van Sony, de camera stond op een veilige afstand van de explosie. Dit is te zien in figuur 4.4. Door referentiestrips aan een aantal pixels te koppelen is het mogelijk om de vervorming in het midden van de balk aan de hand van de camera beelden te berekenen met behulp van het programma Matlab.

Figuur 4.4 Camera opstelling

De explosies werden begeleid door militairen op het terrein in Brasschaat, in een nabijgelegen bunker was er de mogelijkheid om de explosie waar te nemen.

Na de explosie werden de balken onderzocht op scheuren en waarneembare vervormingen. In het lab zijn de balken grondiger onderzocht met een microscoop en een spray om onzichtbare scheuren te tonen.

Ook zijn de balken van te voren wit gespoten om eventuele scheuren meteen te zien. Het explosief is C4 dat met de hand in een bolvorm is gekneed. Dit is gedaan om een perfect sferische explosie te benaderen. In figuur 4.5 is de bol van 1,5kg te zien.

Figuur 4.5 Explosief gehuld in handschoen

4.4 Testresultaten

Hieronder zullen kort de testresultaten van de proeven besproken worden. Ook zal er een beeld getoond worden van het moment dat de schokgolf de balk raakt en er sprake is van de eerste vervorming. Bij de tweede en derde proef van de eerste test reeks is niks te zien op het moment van de explosie, deze beelden zijn dan ook niet opgenomen in het verslag.

4.4.1 Proef 1 0,5 kilogram C4

De balk gedroeg zich bij de eerste proef volgens verwachting, de balk bleef netjes op de steunpunten. Helaas bleek bij het bekijken van de beelden dat de flits van de explosie de beelden verblind, bij het eerste zichtbare beeld is de balk omhoog geveerd. Dit is te zien op figuren 4.6 en 4.7.

Figuur 4.6 0,5kg C4 moment van explosie

Figuur 4.7 0,5kg C4 eerste zichtbare beeld

Ook blijkt uit de camera beelden dat de camera niet volledig stil blijft gedurende de dynamische belasting. Hierdoor is het onmogelijk om met de gebruikte opstelling de maximale uitwijking van de balk te bepalen. Helaas was het gedurende de testreeks niet mogelijk om de beelden te bekijken en zullen deze problemen bij elke test in deze testreeks terugkomen.

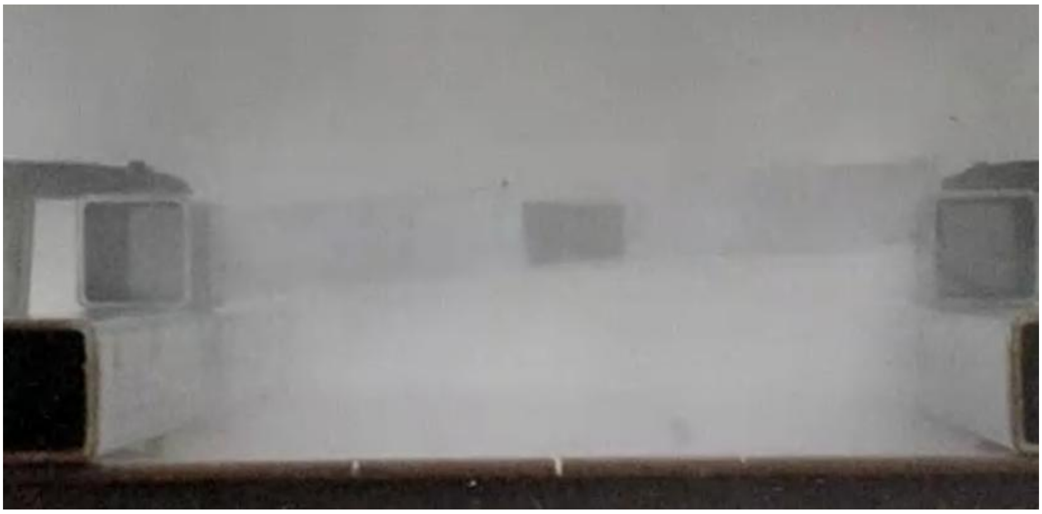
De balk zelf was niet zichtbaar beschadigd, dit is te zien op figuur 4.8, zo waren er geen scheuren of vervormingen waar te nemen.

Figuur 4.8 balk na explosie 0,5kg C4

De referentiestrip is er door de explosie af geblazen, dit is geen probleem omdat de referentiestrip gebruikt word om het aantal pixels per centimeter balk te bepalen en deze ijking in principe niet veranderd als de afstand van de camera tot de balk niet veranderd.Ook het verwachte scheurpatroon in het beton is niet te zien. Hieruit kan geconcludeerd worden dat de testopstelling niet voldoet om de vervorming te bepalen.

4.4.2 Proef 2 1,0 kg C4

De proef met 1 kilogram is hetzelfde uitgevoerd als de proef met een halve kilogram C4. Hierdoor zijn dezelfde problemen ontstaan als bij de eerdere proef. Een bijkomend probleem was dat de balk bij het terugveren van de opleggingen schoot. Net als bij de eerste proef is de eerste uitwijking van het midden van de balk niet waar te nemen door de lichtflits van de explosie. Op het beeld van het moment van de explosie is helemaal niks te zien. Op het moment dat de balk weer in beeld komt, is die omhoog geveerd en losgekomen van de oplegging. Dit is te zien in figuur 4.9.



Figuur 4.8 1,0kg C4 moment na de explosie

Bij het bekijken van de beelden valt tevens op dat de camera niet stil blijft gedurende de explosie. De camera wordt door de schokgolf gedestabiliseerd. Hierdoor is het niet mogelijk om uitspraken te doen over de uitwijking van de balk. De strip op de balk komt overeen met een aantal pixels in het beeld bij een vaste afstand. Als deze afstand verandert, verandert ook het aantal pixels per centimeter balk. De initiële uitwijking is dan ook niet te controleren.

De balk is na afloop van de proef niet zichtbaar beschadigd, zo zijn er geen zichtbare scheuren en is er geen sprake van een plastische vervorming zoals te zien in figuur 4.10.

Figuur 4.9 balk na de explosie 1,0kg C4

Ook deze proef kan helaas niet gebruikt worden om de uitwijking te bepalen. Omdat er ook geen sprake is van een scheurvorming kan dit ook niet vergeleken worden met de voorspelling.

4.4.3 Proef 3 1,5 kilogram C4

Bij het doen van de derde proef wordt er gebruik gemaakt van 1,5 kilogram C4. Dit is het maximale ladingsgewicht dat er op het oefenterrein in Brasschaat mag gesprongen worden. Omdat er bij de vorige proef gebleken is dat de balk van de opleggingen af kon vallen doordat de balk horizontaal kan schuiven is er voor gekozen om de buizen te vullen met twee houten balken om ervoor te zorgen dat de balk niet kan verschuiven, dit is te zien in 4.11.

Figuur 4.10 oplegging proef 3

Omdat de camera beelden gedurende de proeven niet bekeken zijn is dezelfde opstelling voor de camera gebruikt. Hierdoor blijkt dat de camera tijdens de explosie weer verblind wordt door de explosie. Bij de eerste explosie was dit voor een aantal milliseconden, bij de tweede explosie voor een tiental milliseconden en bij de derde explosie is het beeld een halve seconde verblind. Het eerste zichtbare beeld na de explosie is te zien in figuur 4.12.

Figuur 4.11 eerste zichtbare beeld proef 2 1,0kg C4

Zoals te zien wordt de gehele opstelling door de explosie instabiel. Dit resulteert tot het kantelen van de ligger waarop de balk is opgelegd. Hierdoor valt de balk alsnog op de grond, ondanks de houten balk achter de balk.

Ook bij de derde proef kan er geen uitspraak worden gedaan over de uitwijking van het midden van de balk omdat er geen bruikbaar beeld is. En net als bij de eerdere proeven vertoond de balk geen scheuren of plastische vervorming.

Een ander belangrijk punt om in overweging te nemen bij het herhalen van de proeven is dat de hele proefopstelling moet bestaan uit materialen die niet meeveren. Bij de derde proef veerde de stalen balken mee door de explosie, een gemeten doorbuiging zou daarom alsnog niet tot een valide meetresultaat leiden.

4.5 Conclusie sferische experimentenreeks

De eerste serie proeven toont aan dat het met de gebruikte opstelling niet mogelijk is om de initiële uitwijking van de balk in het midden te meten. De camera wordt op het moment van de initiële uitwijking verblind door de explosie. Daarnaast wordt de camera bij alle drie de proeven instabiel gemaakt, waardoor de afstand tussen de camera en de balk niet gelijk is als voor de explosie. Hierdoor is het niet mogelijk om de referentiestrip op de balk te gebruiken om de uitwijking te bepalen.

Wel kan er geconcludeerd worden dat de balken door een sferische explosie met het grootste toelaatbare ladingsgewicht niet plastisch vervormen. Hieruit blijkt dat er terecht aangenomen is dat de ontlastingsgolf en de diffractie ervoor zorgen dat het verhogende effect van de geflecteerde druk verwaarloosbaar is doordat de ontlastingsgolf vrijwel meteen ontstaat nadat de schokgolf aankomt (zie 2.1.4). Bij berekeningen met de gereflecteerde druk zou de balk met een ladingsgewicht van 1,0 kilogram en 1,5 kilogram C4 ver plastisch vervormen terwijl er nu nog geen zichtbare plastische vervorming is.

Om toch de uitwijking van de balken gedurende de explosie op te meten bij een sferische explosie zal er dus een andere methode gezocht moeten worden. Zo kan er met een laser de uitwijking gemeten worden en is het mogelijk om met een pin onder de balk de uitwijking te meten. Een groot nadeel van deze methoden is echter dat de apparatuur gedurende de proeven bloot gesteld wordt aan grote belastingen waardoor deze kunnen beschadigen. In hoofdstuk 5 zal beschreven worden welke oplossing er voor de ondervonden problemen worden gevonden.

Om toch tot een goede proefopstelling te komen zal er gebruik gemaakt moeten worden van een tunnel waarin de explosie zich in maar één richting kan expanderen. Deze proeven en resultaten zullen in het volgende hoofdstuk worden beschreven.

5. Tunnel experimenten

In hoofdstuk vier is naar voren gekomen dat er met een sferische belasting geen plastische vervorming gerealiseerd kon worden met de gebruikte (toegestane) ladingsgewichten. De aanname over de ontlastingsgolf is juist gebleken. Om toch een plastische vervorming met eenzelfde of kleiner ladingsgewicht te realiseren is er gekeken naar een lijnbron en een vlakke lading. Een lijnbron (2D model) is gemakkelijker te realiseren dan een vlakke lading (1D) echter om de balk toch in het plastische gebied te laten vervormen bleek dat ook een lijnbron niet voldoende effect zou hebben. Dit zal in paragraaf 5.1.1 naar voren komen.

5.1 Voorspellingen

In hoofdstuk 3 is kort naar voren gekomen dat het gebruik van een lijnbron of vlakke lading het benodigde ladingsgewicht flink kan beperken. Om te berekenen of met een lijnbron de gewenste plastische vervorming wordt bereikt wordt er gebruik gemaakt van het 2D model van Borgers dat al kort besproken is paragraaf 2.1.6 en de berekeningsmethode uit de UFC-3-340-02, die uitgelegd staat in paragraaf 2.2. Of een lijnbron voldoet is bekeken door met het maximale ladingsgewicht te variëren in de afstand tussen de bron en het object om zo een optimale afstand te bepalen en de daarbij behorende vervorming en doorbuiging uit te rekenen. Als deze doorbuiging hoger is dan de elastische toelaatbare doorbuiging zal de balk plastisch vervormen.

5.1.1 Voorspellingen 2D model

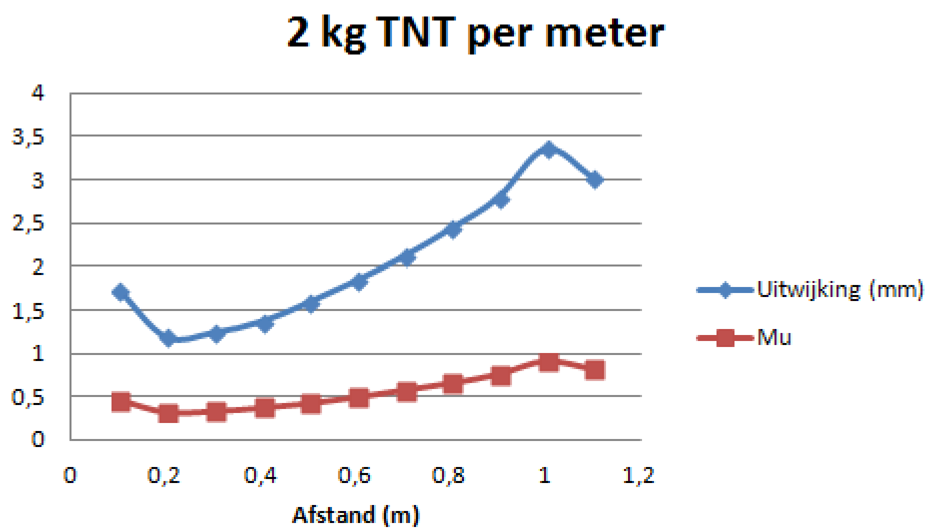
De resultaten van deze berekening zijn te vinden in tabel 5.1waarbij er gebruik is gemaakt van de berekeningmethoden van Borgers die beschreven staat in paragraaf 2.1.6. De berekeningen voor de maximale doorbuiging in het midden (x_{max}) en de mate van elastische vervorming (Mu) zijn uitgevoerd met de excelsheet van Debroey.

De R is de afstand tussen het explosief en de balk, Z_{2D} is de geschaalde afstand, berekend door de afstand te delen door de wortel van het ladingsgewicht in kilogram per meter. De P is de invallende piekoverdruk berekend met de vergelijking van Borgers, de i (scaled) is de geschaalde impuls, eveneens berekend met de vergelijking van Borgers, de i is de impuls, berekend door de geschaalde impuls te vermenigvuldigen met de wortel van het ladingsgewicht [5]. W staat voor ladingsgewicht die bepaald is door te kijken naar het maximaal toelaatbare ladingsgewicht in Braschaat, 2kg TNT. Om er zeker van te zijn dat de balk belast wordt met een in 2D expanderende schokgolf moet de lading breder zijn dan de balk. De kop en de staart van de lijnbron kunnen namelijk in 3 dimensies expanderen. Als men een lengte voor de lijnbron van 1 meter aanneemt zal de lijnbron aan beide kanten van de balk 12,5 centimeter overhellen, wat waarschijnlijk genoeg zal zijn. Als de 2 kilogram verdeeld wordt over 2 meter ontstaat er een ladingsgewicht (W) van 2kg TNT per strekkende meter. De t0 is de aan de hand van de impuls berekende t0 zoals uitgelegd in hoofdstuk 3 om een overschatting van de impuls door de UFC te voorkomen. De Mu en X_{max} zijn berekend met de excelsheet van Debroey.

R (m)	Z2d	P (kPa)	i (scaled)	I	W (Kg/m)	t0 (ms)	Mu	Xmax (mm)
0,1	0,071	20018,2	200,11	282,995	2,00	0,028	0,46	1,73
0,2	0,141	12757,5	136,76	193,403	2,00	0,030	0,32	1,18
0,3	0,212	8690,9	140,12	198,158	2,00	0,046	0,33	1,23
0,4	0,283	6330,4	157,34	222,506	2,00	0,070	0,37	1,36
0,5	0,354	4843,2	181,31	256,404	2,00	0,106	0,42	1,58
0,6	0,424	3842,9	210,08	297,102	2,00	0,155	0,49	1,83
0,7	0,495	3135,6	242,96	343,592	2,00	0,219	0,57	2,11
0,8	0,566	2615,5	279,63	395,455	2,00	0,302	0,65	2,43
0,9	0,636	2220,8	319,97	452,510	2,00	0,408	0,75	2,79
1	0,707	1913,6	364,09	514,899	2,00	0,538	0,9	3,35
1,1	0,778	1669,3	347,09	490,866	2,00	0,588	0,81	3,02

Tabel 5.1 Resultaten berekeningen 2D model

Uit tabel 5.1 kan geconcludeerd worden dat de optimale afstand tussen de 1 en 1,1 meter zit. Dit is ook goed te zien in figuur 5.1 waarin de doorbuiging en vervorming (Mu) op de y-as afgezet zijn tegen de afstand op de x-as.



Figuur 5.1 Bepalen optimale afstand

Wat hier verder uit blijkt is dat zelfs op de afstand met de maximale Mu en uitwijking geen plastische vervorming optreedt bij het gebruik van een lijnbron. De maximale vervorming zal 0,9 keer de elastische vervorming van de balk zijn. Hieruit kan geconcludeerd worden dat er bij het gebruik van een lijnbron met cilindrische expansie van de schokgolf niet voldoet. Daarom zal er gebruik gemaakt moeten worden van een vlakke lading. De testen met een vlakke lading zullen in de volgende paragraaf besproken worden. Wel moet hierbij geconcludeerd worden dat het gebruik van een lijnlading het effect van de lading sterk vergroot. Zo is de berekende uitwijking (bij het rekenen met de invallende druk) ruim twee keer zo hoog (3,35/1,62) als bij het gebruik van 1,5 kg C4 bij een sferische explosie.

5.1.2 Voorspellingen 1D model

Om te voorspellen wat de effecten van de verschillende explosies op de balk zullen zijn wordt gebruik gemaakt van de vergelijkingen uit het 1D model van Borgers zoals beschreven in hoofdstuk 3. De drie balken zullen belast worden met drie verschillende ladingen. Om een vlakke lading te creëren wordt gebruik gemaakt van slagkoord met 10 gram PETN per meter, omdat het gedrag van de balk grotendeels afhankelijk is van de impuls, wordt de TNT-equivalentie voor de impuls genomen, zijnde 1,28. Dit betekend dat het aantal gram PETN vermenigvuldigd moet worden met de factor 1,28 om tot equivalente hoeveelheid TNT te komen. Dit wordt gedaan omdat TNT de rekeneenheid is in veel berekeningen is, zo ook in het 1D model van Borgers.

Om het ladingsgewicht per vierkante meter te weten, wat de rekeneenheid is in het 1D model moet de hoeveelheid TNT per strekkende meter nog vermenigvuldigd worden met de breedte van de balk van 46 millimeter. Omdat er in een tunnel weinig tot geen ontlastingsgolf kan optreden, de schokgolf kan de balk immers niet passeren (in theorie), is het aannemelijk te mogen rekenen met de gereflecteerde druk. Om de gereflecteerde druk te bepalen kan er gebruik gemaakt worden van de volgende vergelijking:

$$Gereflecteerde\ druk\ p_r = 2p_s * \frac{7p_0 + 4p_s}{7p_0 + p_s}$$

Waarin:

$$p_s = invallende\ piekoverdruk$$

$$p_0 = atmosferische\ druk\ (101{,}3\ kPa\ [1])$$

De verhouding tussen de gereflecteerde piekoverdruk en de invallende piekoverdruk wordt uitgedrukt met de constante C_r. Deze wordt berekend met de volgende vergelijking [1]:

$$C_r = \frac{p_r}{p_s}$$

De impuls neemt evenredig toe met de piekoverdruk [1]. De gereflecteerde impuls kan dan ook bepaald worden met de volgende vergelijking:

$$i_r = C_r * i_s$$

Waarin:

$$i_s = invallende\ impuls$$

Doordat het lastig is om de lading in de tunnel te bevestigen is er voor gekozen om de lading aan de bovenzijde van de tunnel te bevestigen. Hier is het mogelijk om vrij eenvoudig het slagkoord te bevestigen, hierover in de volgende paragraaf meer. Om de met de karakteristieken van de schokgolf te variëren worden er verschillende ladingsgewichten op eenzelfde afstand geplaatst. De afstand van de balk tot het explosief materiaal is 0,835 meter. De resultaten van de berekeningen zijn te zien in tabel 5.2 (invallende piekoverdruk) en tabel 5.3 (gereflecteerde piekoverdruk). Waarin het aantal draden slagkoord staat weergeven, de TNT –equivalentie (factor 1,28 [5]) daarvan, het ladingsgewicht W in kg/m^2, de invallende piekoverdruk en bijbehorende impuls, daarnaast de gereflecteerde piekoverdruk en gereflecteerde impuls waarnaast de berekende t0 staat voor zowel de invallende schokgolf als de gereflecteerde schokgolf. De mate van vervorming en de doorbuiging zijn berekend met de excelsheet van Debroey.

Draad	PETN (kg/m)	TNT equ.	W (kg/m^2)	Afstand (m)	Ps (kPa)	i (Pa*s)	t0 (ms)	Mu	Xmax(m)
1	0,008	0,0096	0,2510	0,835	787,40	199,15	0,506	0,33	0,00123
2	0,015	0,0192	0,5020	0,835	1308,70	347,11	0,530	0,57	0,00214
3	0,023	0,0288	0,7529	0,835	1762,09	480,46	0,545	0,79	0,00296
4	0,030	0,0384	1,0039	0,835	2176,40	605,15	0,556	1,09	0,00406
5	0,038	0,0480	1,2549	0,835	2563,92	723,77	0,565	1,35	0,00502

Tabel 5.2 Resultaten 1D model invallende schokgolf

Draad	PETN (kg/m)	TNT equi.	W (kg/m^	Afstand (m)	Pr (kPa)	ir (Pa*s)	t0 r(ms)	Mu (ref)	Xmax (m)
1	0,008	0,0096	0,2510	0,835	4060,6	1027,02	0,506	2,2	0,008
2	0,015	0,0192	0,5020	0,835	7710,2	2044,97	0,530	7,24	0,027
3	0,023	0,0288	0,7529	0,835	11062,9	3016,48	0,545	15,17	0,057
4	0,030	0,0384	1,0039	0,835	14202,1	3948,91	0,556	25,65	0,096
5	0,038	0,0480	1,2549	0,835	17178,5	4849,32	0,565	38,52	0,143

Tabel 5.3 Resultaten 1D model gereflecteerde schokgolf

Waarin:

Elastische vervorming
Plastische vervorming
Breuk

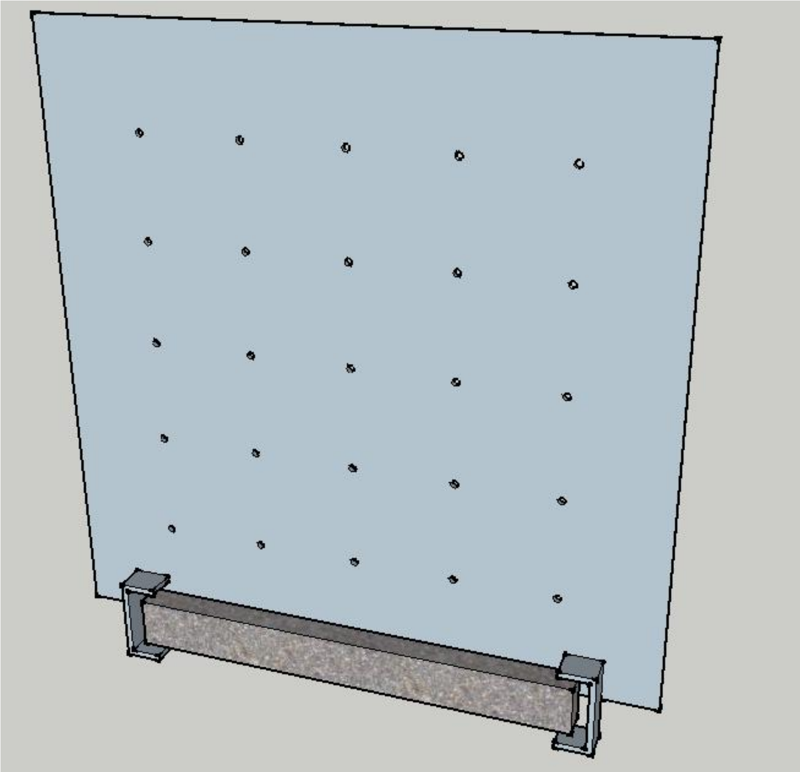
Tabel 5.4 Kleuren vervorming tabel 5.2 en 5.3

Uit deze gegevens kan geconcludeerd worden dat volgens de theorie de gewenste plastische vervorming zal plaats vinden als de schokgolf volledig reflecteert en er geen ontlastingsgolf noch diffractie plaats vindt, er sprake is van een breuk van de balk bij de 2e en 3e proef. Als het blijkt dat de balken plastische vervorming vertonen bij de 2e en 3e proef zullen de proeven met 40 gram en 50 gram niet uitgevoerd worden omdat dit de mogelijkheid open houdt om proeven te doen met een verbeterde opstelling.

5.2 Opstelling

Daarop is besloten om een tunnel te bouwen die de schokgolf kan geleiden. Om de kosten en tijdsduur van het bouwen te reduceren is er zo veel als mogelijk gebruik gemaakt van bestaande materialen bij het departement COBO in Brussel.

De tunnel moet aan een aantal zaken voldoen, allereerst moet de schokgolf zich vlak expanderen, het is daarom nodig om een constructie te ontwikkelen waarin de schokgolf maar één kant op kan. In een ideale situatie zou dit betekenen dat er een tunnel wordt ontwikkeld met vier muren waartussen de het explosief aan de ene zijde wordt gehangen en de balk aan de andere zijde vrij opgelegd wordt. Deze opstelling is vrijwel onmogelijk te creëren met de tijd en middelen die voorhanden zijn. Door ervoor te kiezen om de kopse kanten van de tunnel open te laten ontstaat er het probleem dat de schokgolf kan ontsnappen aan de uiteinden van de balk. Echter als de tunnel breder wordt gemaakt dan de balk, zal hij waarschijnlijk toch een vlakke schokgolf ontvangen. Deze aanname zal met verschillende drukmetingen op de balk gecontroleerd kunnen worden.



5.2 Beoogde opstelling

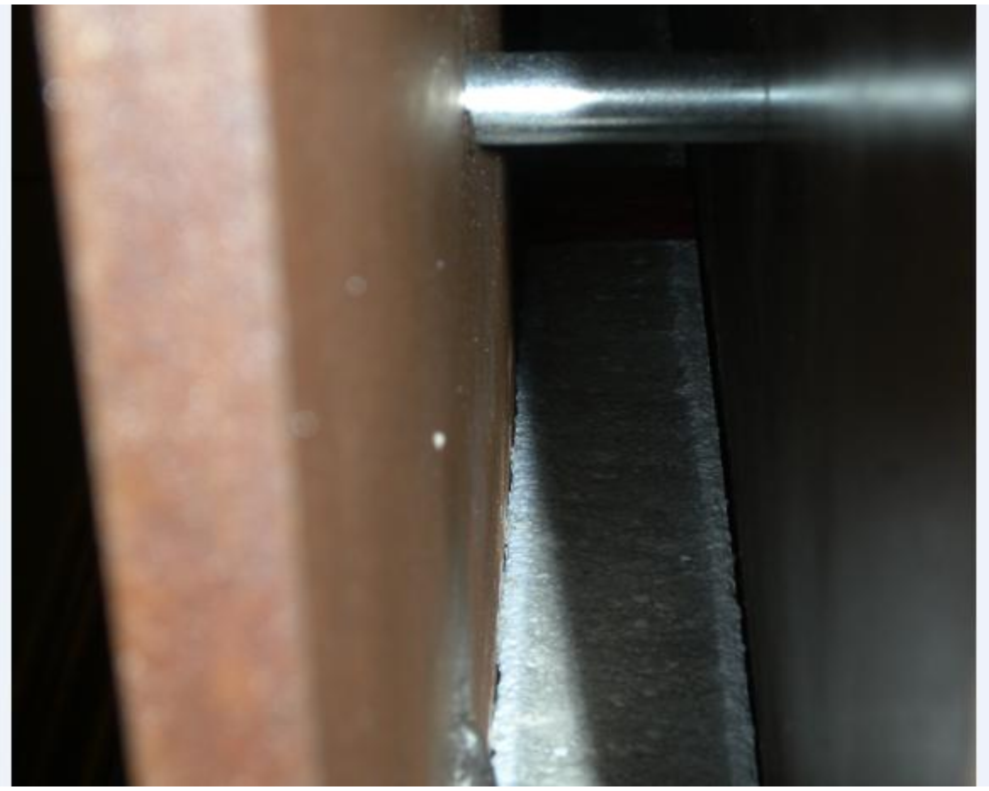
Omdat er enorme krachten vrij komen tussen de platen, de krachten zijn immers groot genoeg om een gewapend betonnen balk plastisch te laten vervormen, moet de opstelling stevig uitgevoerd worden. De platen die gebruikt worden moeten dan ook dik genoeg zijn om niet plastisch te vervormen bij een explosie. Een andere eis aan de tunnel is dat de platen krachtig bij elkaar gehouden moeten worden om te voorkomen dat ze van elkaar afschieten of doorbuigen. Daarbij moeten de platen op een gelijke afstand van elkaar gehouden worden. Daarnaast moet er ook nagedacht worden over hoe de balk tussen de tunnel bevestigd wordt en tot slot moet ook de doorbuiging meetbaar zijn.

Om aan al deze eisen te voldoen is er met behulp van Kapitein Suleau een tunnel ontworpen die bestaat uit twee platen met een oppervlakte van 1x1 meter en een dikte van 1 centimeter. Deze platen worden bij elkaar gehouden door bouten die tussen de platen worden gemonteerd. Daartussen komen afstandhouders om de tunnel overal dezelfde breedte te geven.

De balk wordt tussen twee u-profielen opgelegd, dit is gedaan om te voorkomen dat de balk van de oplegging schiet als bij de sferische testen. Het explosief zal aan de bovenkant van de tunnel gemonteerd worden waardoor er een afstand tussen de balk en het explosief van 83,5 centimeter ontstaat.

5.3 Uitvoering

De tunnel die gemaakt is voldoet grotendeels aan de gewenste opstelling. Echter de keuze is gemaakt om de u profielen volledig aan één van de platen vast te lassen omdat het vermoeden bestaat dat de verbinding tussen het u-profiel en de plaat zal bezwijken onder de druk die de balken uitoefenen op de profielen, door het contact oppervlakte te vergroten is een grotere en sterkere lasverbinding mogelijk. De afstand tussen de platen wordt bewaard door buisjes die om de bouten tussen de platen worden geplaatst. Deze afstandhouders hebben een lengte van 50 millimeter. Dit is iets breder dan de balk (46 mm) om er voor te zorgen dat de balk niet ingeklemd zit tussen de platen. Dit zorgt ervoor dat er toch een ontlastingsgolf kan ontstaan. Hier zal dan ook rekening mee gehouden moeten worden. De afstand tussen de balk en de platen is te zien op figuur 5.3.

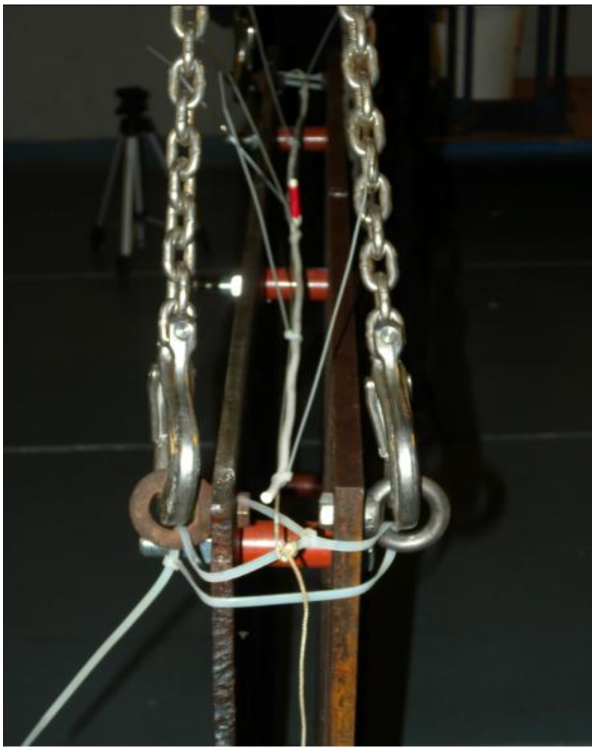


Figuur 5.3 tussenruimte balk-tunnel

Figuur 5.4 toont de achterste plaat van tunnel met daarop de u-profielen vast gelast. Als men goed kijkt is het mogelijk om de gaten waar de bouten door geplaatst kunnen worden te zien zitten. Voor elke proef moet de bovenste plaat van de onderste plaat afgetakeld worden alvorens er een nieuwe balk geplaatst kan worden. Dit is een tijdrovend proces, het gereedmaken van een proefopstelling voor één proef duurt al gauw 1,5 uur.

Figuur 5.4 Balk tussen de u-profielen

De twee platen kunne aan elkaar bevestigd worden door 20 m16 bouten en moeren, deze bouten en moeren moeten ervoor zorgen dat de platen gedurende de testen niet uit elkaar klappen.



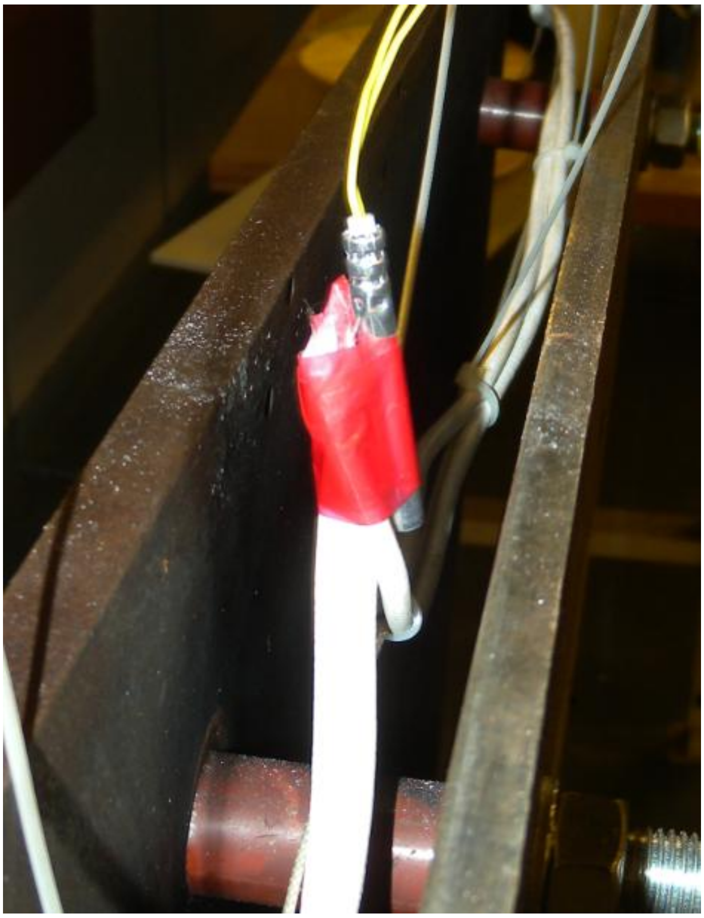
Figuur 5.5 bevestiging slagkoord-tunnel

Bij de eerste twee proeven is ervoor gekozen om maar 7 van de 20 bouten met afstandhouders te plaatsen om een aantal redenen; Allereerst omdat voor elke wisseling van de balken, alle bouten en moeren los moeten, de inschatting is dat de buitenste zeven moeren met afstandhouders de krachten van de explosie op de tunnel kunnen vangen, verder zijn de binnenste afstandhouders vrijwel onmogelijk om te plaatsen omdat het gewicht van de platen erg hoog waardoor het optillen van de platen alleen mogelijk is met takels.

Bij de proef met 10 gram PETN bleek dat de platen uitbolde net boven de balk. Daarop is besloten om drie bouten boven de balk te plaatsen zoals te zien op figuur 5.3. De later geplaatste bouten (zonder afstandhouders) zorgde er helaas wel voor dat de afstand tussen de balk en de platen zodanig klein was dat het niet uit te sluiten valt dat de wrijving tussen het beton en de stalen platen van invloed is geweest op de oplegging.

De balk is na een verkenningsproef opgelegd op silicone in het u-profiel. Hiervoor is gekozen omdat bleek dat de balk beschadigde bij de opleggingen. De effecten van het silicone is niet helemaal duidelijk. Het kan zijn dat de silicone ingedrukt wordt door het beton waardoor er een verplaatsing van het midden van de balk geregistreerd wordt. In volgende proeven kan er dan ook beter gebruik gemaakt worden van een harder materiaal zoals een stuk hout.

De platen zijn verticaal op de grond geplaatst waarbij vier takels de hoekpunten vast hebben, deze takels zorgen er enkel voor dat de opstelling bij een explosie niet om kan vallen. Het slagkoord wordt aan een gespannen touwtje vastgemaakt met behulp van tyreps, dit is te zien in figuur 5.5. Het touw wordt op zijn beurt vastgeknoopt aan tyreps die om de ogen aan de hoekpunten worden vastgemaakt. Het slagkoord zit op een aantal centimeter van de eerste afstandshouders bevestigd hierdoor ontstaan bij latere proeven deuken in de afstandhouders zoals te zien in figuur 5.18.

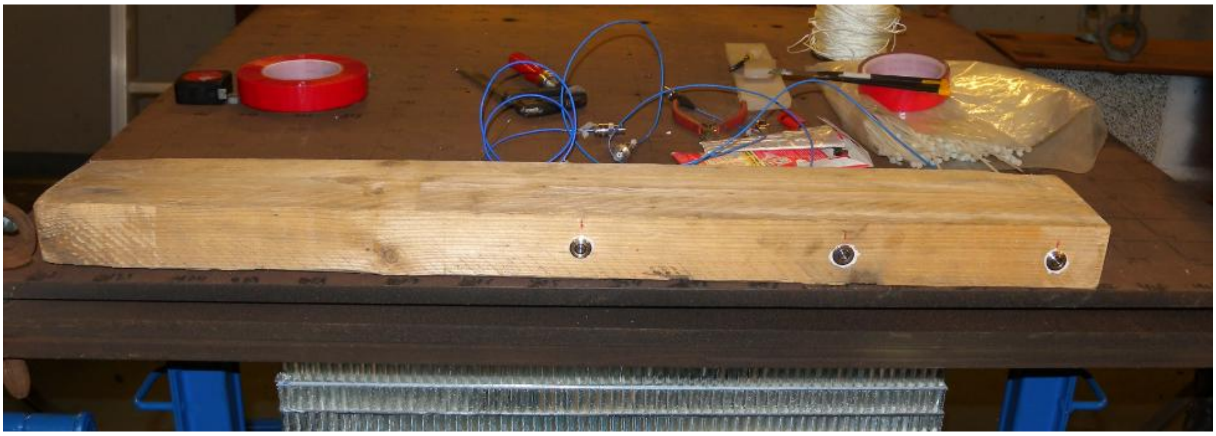


Figuur 5.6 Bevestiging slagkoord-slagpijpje

Het slagkoord wordt vanuit het midden ingeleid om een vlakke schokgolf te creëren. Dit wordt gedaan door het slagkoord in twee stukken te verdelen en deze in het midden bij elkaar te plakken. Bij deze stukken slagkoord wordt het slagpijpje bevestigd waardoor het slagkoord van het midden uit geïnitieerd wordt dit is te zien in figuur 5.6.

Om te controleren of het 1D model van Borgers de piekoverdruk en impuls nauwkeurig voorspelde is er een test gedaan met drukmeters verwerkt in een houten balk die net tussen de profielen past. De drukmeters zijn op 3 plekken aan één zijde van de balk bevestigd omdat de aanname is dat de schokgolf zich symmetrisch zal verdelen over de balk. Hiermee ontstaat een beeld dat gelijk is aan 5 sensoren.

Met de geplaatste sensoren zou dus de gemiddelde druk op de balk berekend kunnen worden. De gevonden resultaten zullen in de volgende paragraaf worden besproken.



Figuur 5.7 Bevestiging druksensoren houten balk

Om de doorbuiging te meten is er onder de balk een linear variable differential transformer (LVDT) gemonteerd. Dat is een staafje dat in een standaard onder de balk wordt bevestigd en de uitwijking meet als functie van de tijd. De LVDT zit geplaatst in een standaard waar de tunnel boven zal worden gehangen (zie figuur 5.8).Om hiermee te kunnen werken moet er een “schoen” aan de balk worden bevestigd waar het stalen staafje in bevestigd kan worden. De schoen die op de balk is geplakt is te zien in figuur 5.8

Figuur 5.8 "Schoen" LVDT

Het staafje wordt in de schoen gedraaid waarna die in de LVDT moet vallen. De standaard met LVDT is te zien in figuur 5.9. De platen werden op de opstelling zodanig worden gepositioneerd dat de LVDT precies onder de schoen valt.

Figuur 5.9 LVDT standaard

De totale opstelling gereed voor de explosie is te zien in figuur 5.10. Er zit vrijwel geen speling in de takels waardoor de tunnel niet om kan vallen. Verder zorgt dit ervoor dat de tunnel recht blijft staan. Dit is erg belangrijk omdat anders de

Figuur 5.10 meetopstelling

Om te kijken hoe de tunnel zou reageren op een explosie is er allereerst een proef uitgevoerd zonder LVDT en met een balk uit de eerste testserie die op het oog onbeschadigd lijkt maar niet voor een echte test gebruikt kon worden, met 1 slagkoord van 10 gram per meter. De angst was dat de meet apparatuur beschadigd zou raken tijdens de testen. Toen bleek dat dit niet het geval was is de opstelling in gebruik genomen zoals te zien in 5.10.

5.4 Testresultaten

De eerste proef werd uitgevoerd met één slagkoord, de tweede proef met twee bij elkaar gebonden slagkoorden en de derde proef met drie bij elkaar gebonden slagkoorden. Vervolgens zijn dezelfde proeven nogmaals uitgevoerd met de houten balk om de piekoverdruk te meten.

5.4.1 Drukmetingen

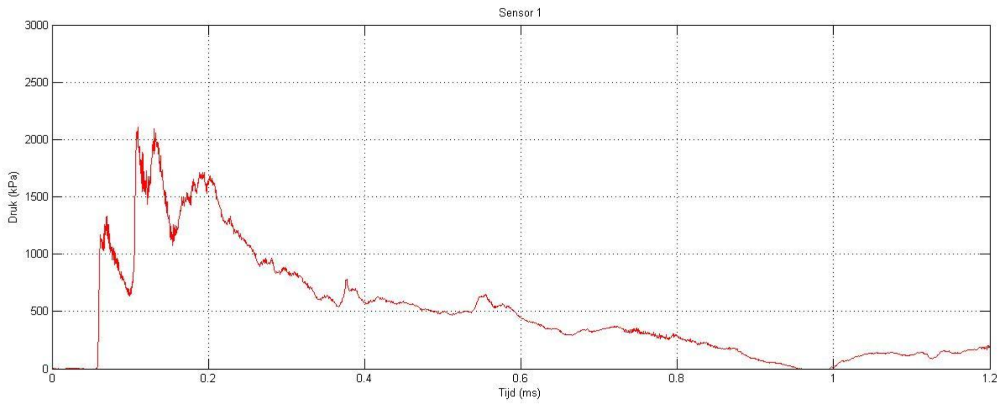
De drukmetingen zijn uitgevoerd met een houten balkje waarin 3 sensoren symmetrisch over de balk zijn verdeeld. Later in dit hoofdstuk zullen de verschillen met de verwachte resultaten worden toegelicht. De drukmetingen staan weergeven in tabel 5.5. De druk sensoren zijn geplaatst op 1/5^e (sensor 1) , 2/5^e (sensor 2), en 3/5^e (sensor 3) van de oplegginglengte, dit is te zien in figuur 5.7. Bij de tweede meting is bij sensor 2 het signaal gedurende de positieve faseduur weg gevallen en de berekende impuls kan daarom niet gebruikt worden als test resultaat. Wat verder opvalt is het grote onderlinge verschil in piekoverdrukken. Zo is bij de proef moet 20 gram PETN de gemeten piekoverdruk op sensor 1 meer dan anderhalf keer zo groot als die op sensor 3, terwijl bij de proef met 30 gram PETN sensor 3 een hogere druk opgelegd krijgt, dit verschil is lastig te verklaren. In bijlage 4,5 en 6 is te zien dat onregelmatig hoge piekoverdrukken vaak maar kort aan houden.

De gemeten impulsen ligger dichter bij elkaar, de afwijking van de impuls met de gemiddelde impuls ligt in alle gevallen onder de 15%. De meetgegevens zijn verwerkt met het computer programma Matlab. Deze telt de deeltjes onder de druk tijd diagram op om tot een impuls te komen om tot de integraal van de druk tijd grafiek te komen.

	Piekoverdruk			Impuls		
	Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3	Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3
10 gram	2046,78	2100,88	3668,18	569,52	760,614	643,754
20 gram	10072,1	7421,05	6141,88	1076,38	n.v.t.	1240,63
30 gram	10935,7	10744,1	13427,4	1414,95	1485,28	1284,97

5.5 metingen druksensoren 10 gram PETN ,20 gram PETN en 30 gram PETN

In figuur 5.11 staat een voorbeeld van een druk tijd diagram van sensor 1 met 10 gram PETN bij het gebruik van een tunnel.



5.11 Druk tijd diagram 10 gram PETN Tunnel

5.4.2 Proef 1, 10 gram PETN

De resultaten van de proef en voorspellingen staan weergeven in tabel 5.6

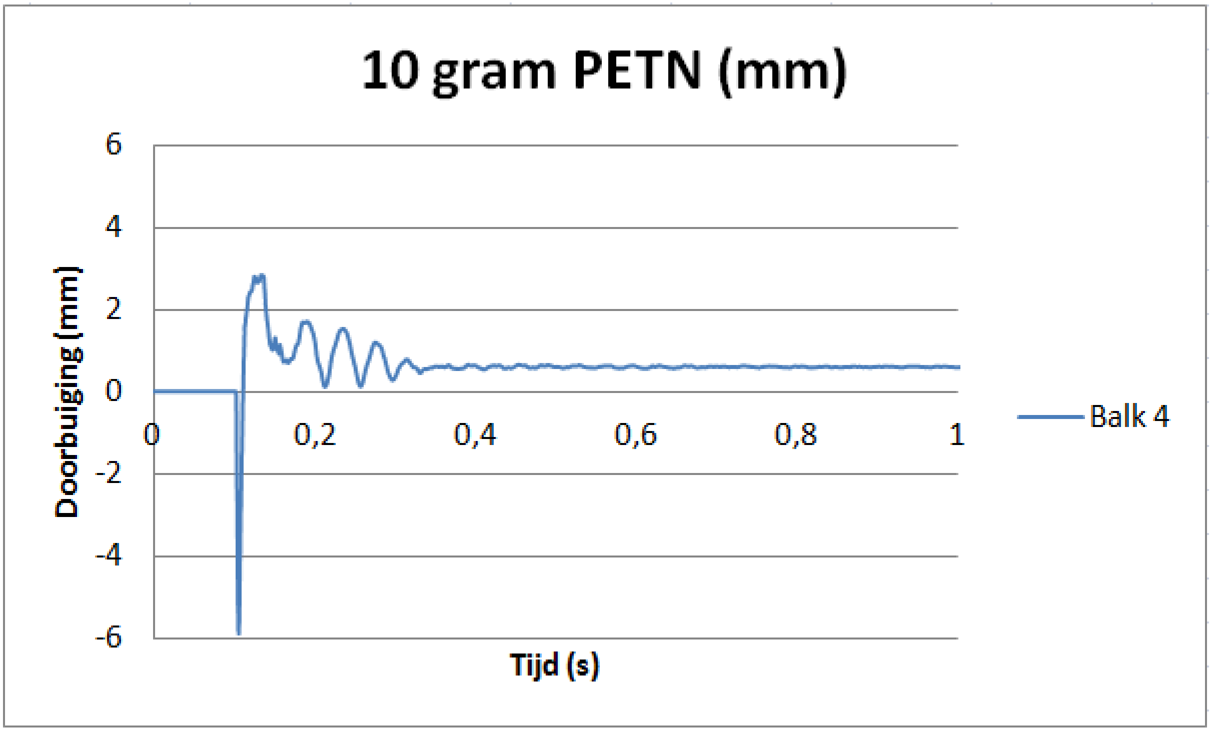
Voorspeld	10 gram PETN				Gemeten							
Reflectie	Po (kPa)	impuls (Pa*s)	xmax (mm)	Mu	Piekoverdruk (kPa)			Impuls (Pa*s)			Doorbuiging	
0%	787,4	199,1	1,2	0,33	Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3	Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3	xmax (mm)	Mu
100%	4060,6	1027,0	8	2,2	2046,78	2100,88	3668,18	569,52	760,614	643,754	2,83	0,76

Tabel 5.6 Voorspelling en resultaten, tunnelproef 1 met 10 gram PETN

Deze resultaten laten zien dat de gemeten piekoverdruk van sensor 1 en 2 tussen de waarden van de gereflecteerde druk en de invallende druk inzit, sensor 3 benaderd de voorspelde gereflecteerde druk vrij nauwkeurig. De impulsen zijn een stuk lager dan de voorspelde impuls met 100% reflectie. Wel zijn ze een stuk hoger dan de voorspelde impuls met de invallende piekoverdruk. Dit kan te wijten zijn aan het feit dat de schokgolf kan "ontsnappen" via drie openingen in de tunnel; de schokgolf kan ontsnappen door de open einden van de tunnel, door de 13 open gaten (per plaat) en door de spleten tussen de tunnelwanden en de balk.

Hierbij moet opgemerkt worden dat het verschil tussen de piekoverdrukken van de drie sensoren vrij groot is, een verklaring kan hiervoor zijn dat de schokgolf niet volledig vlak was toen hij de balk raakte. Omdat het drukverloop in de tunnel zo complex is zijn er meer metingen nodig om dit verschil te verklaren.

In figuur 5.12 is de grafiek weergeven waarin de door de LVDT gemeten doorbuiging tegen de tijd is afgezet. Een positieve doorbuiging betekent een doorbuiging van het midden naar beneden toe. Hierbij moet vermeld worden dat de eerste negatieve "spike" te wijten is aan een elektronische storing en dus buiten beschouwing gelaten moet worden.

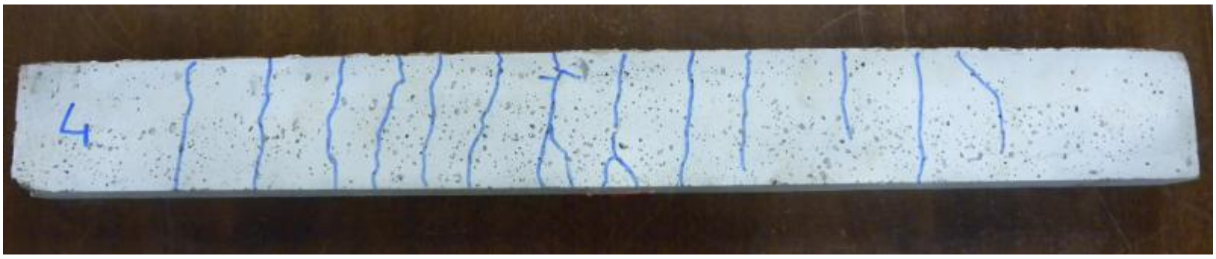


Figuur 5.12 Uitwijking -tijd 10 gram PETN in tunnel , positieve uitwijking is uitwijking naar beneden toe (met elektronische storing voor de eerste uitwijking)

De maximale uitwijking (X_{max}) van de balk is 2,83mm naar beneden toe. Door dit te delen door de theoretisch maximale elastische uitwijking is het mogelijk om de Mu te berekenen. Hieruit is goed te zien dat de balk door de explosie in een trilling wordt gebracht, ook is te zien dat er een plastische vervorming heeft plaatsgevonden, de doorbuiging blijft immers ook na de trilling positief, dit valt echter te verklaren doordat het silicone na de proef dunner was dan voor de proef, het kan zijn dat het silicone door de balk ingedrukt is. Deze aanname wordt gesterkt door het feit dat de balk naar boven opgebold lijkt (zie figuur 5.13) in tegenstelling tot naar beneden, de LVDT zou zonder het silicone zou dus een negatieve blijvende doorbuiging moeten registreren.

Verder kan er door de pieken in de grafiek een trillingstijd worden afgeleid, deze is 46 milliseconde bij de eerste trilling. Dit is een factor 7.7 verschil met de berekende eigen trillingstijd τ_{SDOF} van 6 milliseconde in de berekeningen van hoofdstuk 2 (zie 2.2.5). Dit groter verschil kan deels verklaard worden doordat het silicone de trilling van de balk dempt waardoor de trillingstijd een stuk vergroot wordt. Anderzijds kan het komen doordat de stelling waarop de tunnel staat mee veert met de tunnel waardoor de hele tunnel mee doet aan de door de LVDT geregistreerde trilling.

In figuur 5.13 is de balk na de proef weergeven. De scheuren zijn blauw gemarkeerd om ze beter zichtbaar te maken.



Figuur 5.13 balk 4 na explosie 10 gram PETN in tunnel

Hier is goed te zien dat het scheurpatroon bestaat uit 13 scheuren met een tussenafstand van 4,5 cm tot 5,8 centimeter. In hoofdstuk 3 is bepaald dat de tussenafstand van de scheuren tussen de 4,75 centimeter en 8,5 centimeter in moet zitten. Dit klopt dus vrij goed. De scheurwijdte is moeilijk te controleren omdat de scheuren zo klein zijn dat ze vrijwel onmogelijk nauwkeurig na te meten zijn.

Een ander opmerkelijk aspect is dat de balk naar boven gebold lijkt in plaats van naar onder. Dit is te verklaren door het feit dat de balk geen trekwapening aan de bovenzijde van de doorsnede heeft terwijl de bovenzijde van de balk wel op trek wordt belast. Hierbij ontstaat trekspanning aan de bovenzijde van de balk die door het beton opgevangen moet worden. Beton is zeer slecht in staat om trekkrachten op te nemen, dit verklaart dan ook waarom de balk plastische vervorming naar boven vertoont.

Gedurende deze proef is ook naar voren gekomen dat de tunnelplaten licht uitgebold zijn net boven de balk. Dit is te verklaren door de reflectie van de schokgolf op de balk wat voor een verhoogde piekoverdruk zorgt in dat gebied. Daarom is er voor gekozen in de volgende proeven 3 bouten en moeren extra boven de balk te plaatsen omdat in dat gebied de druk het hoogst is door de reflectie op de balk.

5.4.3 Proef 2, 20 gram PETN

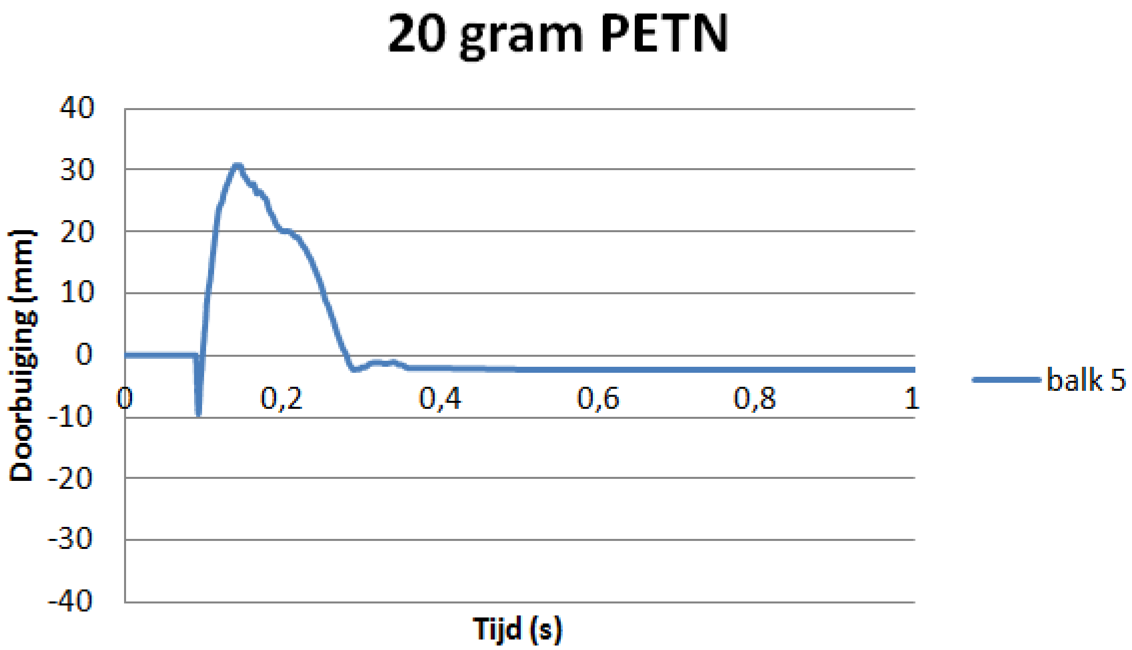
De resultaten en voorspellingen van proef 2 met 20 gram PETN staan weergeven in tabel 5.7.

Voorspeld	20 gram PETN				Gemeten							
Reflectie	Po (kPa)	impuls (Pa*s)	xmax (mm)	Mu	Piekoverdruk (kPa)			Impuls (Pa*s)			Doorbuiging	
0%	1308,7	347,1	2,1	0,57	Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3	Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3	xmax (mm)	Mu
100%	7710,2	2045,0	27	7,2	10072,1	7421,05	6141,88	1076,38	n.v.t.	1240,63	n.v.t.	n.v.t.

Tabel 5.7 Voorspelling en resultaten, tunnelproef 2 met 20 gram PETN

Wat hierbij opvalt is dat de piekoverdruk een stuk beter benaderd wordt dan bij de proef met 1 slagsnoer. De impuls is ook hier een stuk kleiner dan de voorspelde impuls met volledige reflectie. In de grafiek met de druk tijdverdeling is weer te zien dat de piekoverdruk in het begin een erg hoge piek heeft waarna de druksensor vrijwel meteen weer ontlast wordt net als in figuur 5.11. Dit is vooral duidelijk te zien in de grafiek van sensor 1 in bijlage 5.

Ook hier is de aanname dat dit komt doordat de tunnel niet volledig dicht is door de open uiteinden en gaten waardoor er een snelle ontlasting van de gereflecteerde druk plaats kan vinden. Om dit te controleren zou dezelfde test uitgevoerd moeten worden met een volledig dichte tunnel. De impuls van sensor 2 bij deze proef is niet meegenomen in het berekenen van de gemiddelde impuls omdat daar het signaal gedurende de positieve faseduur weg is gevallen zoals te zien in bijlage 5, sensor 2. Gedurende de proef met 20 gram PETN is het staafje van de LVDT waarschijnlijk uit de LVDT geschoten, deze meting kan dan ook niet gebruikt worden om de doorbuiging en mate van vervorming te bepalen deze staan dan ook niet weergeven in tabel 5.7. Een mogelijke verklaring hiervoor is dat de tunnel niet volledig verticaal stond toen de proef uitgevoerd werd. Door het lengte verschil in de afstandhouders trok de tunnel een beetje krom bij het aandraaien van de bouten en moeren. Het resultaat hiervan is dat de tunnelplaten niet volledig horizontaal op het standaard te plaatsen waren waardoor het staafje van de LVDT ook niet volledig recht onder de balk zat. De grafiek met de foutieve meting staat weergeven in figuur 5.14, hier is wel de elektronische storing van de LVDT te zien.



Figuur 5.14 Foutieve meting uitwijking-tijd 20 gram PETN in tunnel

Een ander feit waarom de meting niet gebruikt kan worden is dat bij het uitvoeren de 2e proef de silicone oplegging los was gekomen van het u-profiel. Het silicone bevond zich naast de tunnel toen de bunker betreden kon worden.

In figuur 5.15 is de balk na de explosie te zien Hierin zijn 13 scheuren te tellen die verticaal volledig doorlopen. Ook is er plastische vervorming van de balk waargenomen bij het verwijderen van de balk uit de tunnel, op figuur 5.15 is de vervorming van het midden naar boven toe te zien. Doordat de balk weer horizontaal heeft gestaan voordat de foto is genomen werd is de bolling iets afgenomen. Verder zijn er aan de bovenkant en onderkant stukken beton afgeslagen. Er kan bij geconcludeerd worden dat er nog geen sprake is van bezwijken of breuk bij deze balk. Wat bij deze proef nog wel opgemerkt moet worden is dat de gebruikte balk (balk 5) voor de proef imperfecties vertoonde bij de hoofdwapening (zie hoofdstuk 3), dit kan een effect hebben gehad om het scheurenpatroon en de mate van bezwijken van de balk.

Ook bij balk 5 is de vervorming van het midden naar boven toe door het ontbreken van de trekwapening aan de bovenzijde van de balk. Omdat de LVDT geen trilling heeft kunnen registreren is dit een conclusie op basis van de optische vervorming van de balk.

Figuur 5.15 balk 5 na explosie 20 gram PETN in tunnel

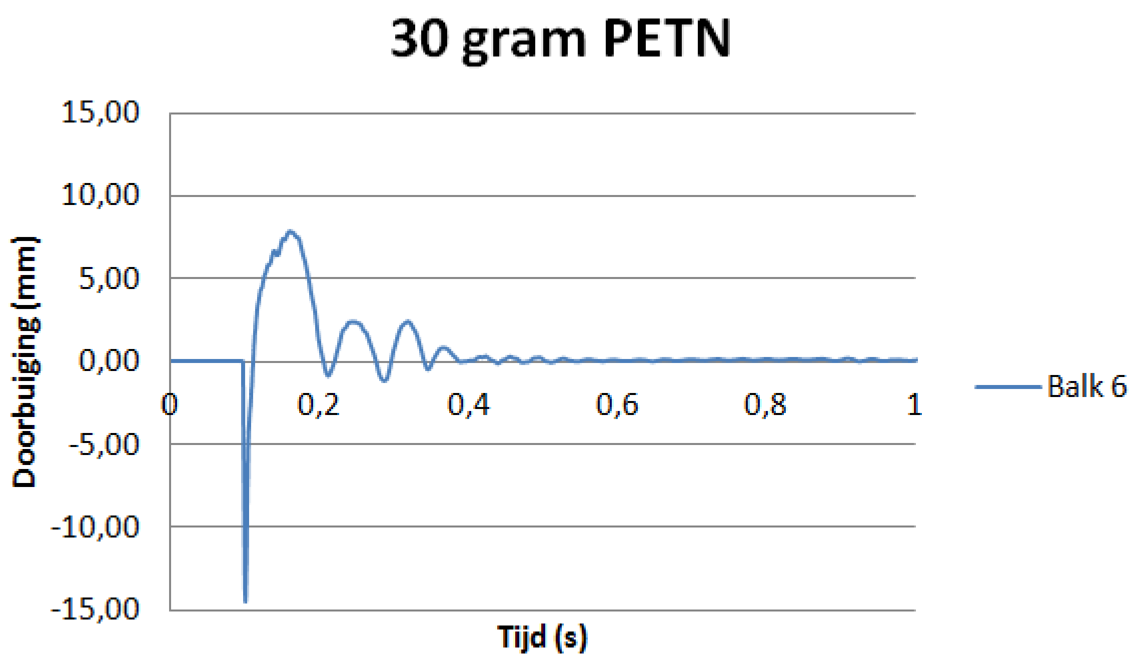
5.4.4 Proef 3, 30 gram PETN

De derde en laatste proef is uigevoerd met drie slagsnoeren met 30 gram PETN de resultaten van deze proef zijn te vinden in tabel 5.8.

Voorspeld	**30 gram PETN**				**Gemeten**							
Reflectie	Po (kPa)	impuls (Pa*s)	xmax (mm)	Mu	Piekoverdruk (kPa)			Impuls (Pa*s)			Doorbuiging	
0%	1762,1	480,5	2,96	0,79	Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3	Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3	xmax (mm)	Mu
100%	11062,95	3016,5	56	15,2	10935,7	10744,1	13427,4	1414,95	1485,28	1284,97	7,86	2,11

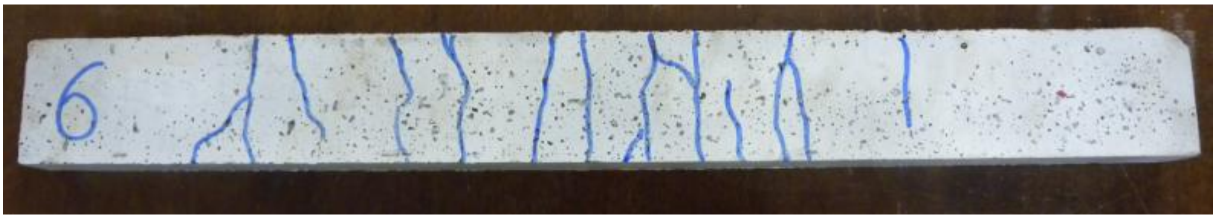
Tabel 5.8 Voorspelling en resultaten, tunnelproef 3 met 30 gram PETN

De piekoverdruk wordt door het 1D model vrij nauwkeurig benaderd. De afwijking van de impuls met de voorspelling van de gereflecteerde druk wordt echter met de toename van de druk groter. De doorbuiging van de balk is groter dan die bij 10 gram PETN. De lagere doorbuiging dan voorspeld met volledige reflectie is te wijten aan de lagere impuls. De impuls is in grote mate bepalend voor de doorbuiging van de balk en niet zo zeer de piekoverdruk. Dit is echter niet de enige verklaring, in paragraaf 5.5 zal blijken dat met de gemeten impuls en piekoverdruk ook een hogere doorbuiging plaats zou moeten vinden. Een andere mogelijke verklaring voor deze overschatting is dat de balk te stevig ingeklemd is door de tunnel, bij de laatste proef zijn de moeren en bouten aangedraaid waardoor er minder ruimte ontstond tussen de balkjes en de platen. Ook zijn de afstandhouders door de eerdere explosies gebold waardoor de lengte daarvan afneemt, dit is te zien in figuur 5.18. Daarbij komt dat bij de drie extra bouten, die na de proef met 10 gram PETN werden gemonteerd, geen afstandhouders zijn geplaatst waardoor het moeilijker is om de bouten met de juiste kracht (lees de juiste afstand tussen de tunnelplaten) aan te draaien. In figuur 5.16 is de doorbuiging ten opzichte van de tijd weergeven, ook hier is weer de storing van het meetsignaal te zien vlak voor de eerste doorbuiging.



Figuur 5.16 Uitwijking -tijd 30 gram PETN in tunnel , positieve uitwijking is uitwijking naar beneden toe (met elektronische storing voor de eerste uitwijking)

In figuur 5.16 is te zien dat de balk na de eerste uitwijking nog een aantal trillingen ondergaat, de negatieve doorbuiging (het omhoog komen van het midden) is hierbij echter minder dan bij de eerste proef. Gecombineerd met de minder hoge doorbuiging dan voorspeld met volledige reflectie (ook in paragraaf 5.5) kan er geconcludeerd worden dat de te kleine afstand tussen de platen en de balk toch invloed gehad moet hebben op het gedrag van de balk. In het vervolg zouden dus ook bij deze bouten afstandhouders geplaatst moeten worden.



Figuur 5.17 balk 6 na tunnel explosie 30 gram PETN

In figuur 5.17 is balk 6 te zien met het gemarkeerde scheurpatroon, nu zijn er 11 scheuren te tellen met een minimale tussenafstand van 2 centimeter en een maximale tussenafstand van 5 centimeter, ook dit wijst er weer op dat de tunnel te strak aangedraaid was, de minimale lengte zou immers 4,75 centimeter moeten zijn (zie paragraaf 2.3). Verder ziet de balk er optisch minder beschadigd uit dan de balk die belast is met 20 gram PETN. Ook dit sterkt de aanname dat de balk ingeklemd was door de tunnel. Wel is de gemeten doorbuiging een stuk groter dan bij de proef met 10 gram PETN. Bij de proeven met 20 gram en 30 gram PETN is er nog geen sprake van de voorspelde breuk van de balken. Echter doordat de tunnel en de meet apparatuur geen grotere schokgolf kan weerstaan is er voor gekozen het bij deze proeven te laten. Zo hebben de meetsensoren voor de piekoverdruk een bereik tot 140000 kPa wat bij deze proef overschreden is bij sensoren 1 en 2. Bij het vergroten van de impuls zal het effect versterkt worden zonder dat er een hogere piekoverdruk hoeft te ontstaan.

Figuur 5.18 Uitbolling van de afstandhouders

5.5 Berekening met de gemeten Piekoverdruk en Impuls

Omdat de parameters van de schokgolf opgemeten zijn is het mogelijk om daarmee nogmaals de doorbuiging en mate van vervorming uit te rekenen. Door dit te doen is het mogelijk om nauwkeuriger te kijken naar waar de afwijkingen tussen de resultaten en de voorspellingen vandaan komen. De berekende doorbuiging en mate van vervorming is afhankelijk van drie modellen (met daarbij versimpelingen); Allereerst de modellering van de schokgolf door het 1D model van Borgers, de modellering van de gewapend betonnen balk en tot slot de modellering van de materiaaleigenschappen van de gebruikte materialen. Door de gemeten schokgolfparameters te gebruiken omzeilt men de versimpelingen die gepaard gaan met het gebruik van het 1D model (zie hoofdstuk 2). Daarbij moet opgemerkt worden dat er ook meetfouten op kunnen treden waardoor het gebruik van de gemeten parameters niet altijd tot een beter resultaat zal leiden.

Deze berekeningen worden uitgevoerd met de gemiddelde waarden van de gemeten piekoverdruk en impuls omdat de UFC rekent met de gemiddelde verdeelde belasting op de balk. De berekeningen zijn uitgevoerd met de excelsheet van Debroey zoals uitgelegd in paragraaf 2. De resultaten hiervan zijn te zien in tabel 5.9.

Wat opvalt in tabel 5.9 is dat het verschil tussen de voorspelde doorbuiging en gemeten doorbuiging ene stuk minder groot is dan bij de eerdere voorspellingen. Bij deze voorspellingen is er nog steeds een overschatting van de doorbuiging, dit kan echter aan een hoop factoren liggen. Zo kan de balk sterker zijn dan aangenomen, en zijn er een hoop versimpelingen gemaakt in de voorspelling van de doorbuiging (zie paragraaf 2.2). Een voorbeeld hiervan is dat de balk wel drukwapening heeft maar dat die niet meegenomen wordt in de berekeningen omdat er geen sprake is van symmetrische wapening (zie paragraaf 2.2).

Parameters		Voorspelling geen ref.		Voorspelling 100% ref.		Aangepaste voorspelling		Gemeten xmax en Mu	
P (kPa)	t0 (ms)	xmax (mm	Mu	xmax (mm	Mu	xmax (mm)	Mu	xmax (mm)	Mu
2605,3	0,505	1,23	0,33	8,0	2,2	4,47	1,20	2,83	0,76
7878,3	0,294	2,14	0,57	27,0	7,2	8,72	2,34	n.v.t.	n.v.t.
11702,4	0,238	2,96	0,79	56,0	15,2	13,6	3,65	7,86	2,11

5.9 Berekeningen met de gemeten schokgolf parameters

Doordat de verschillen een stuk kleiner zijn is het dus wel mogelijk om met de gemeten schokgolf karakteristieken een indicatie te krijgen van de doorbuiging.

Wat hier verder uit geconcludeerd kan worden is dat de overschatting in de eerdere voorspellingen dus ook deels voort komt uit de berekeningsmethode uit de UFC en niet alleen uit de openingen van tunnel. En dat de gemeten waarden van de doorbuiging en mate van vervorming tussen de voorspelling zonder reflectie en met 100% reflectie inzit aan de kant van de voorspellingen met de invallende piekoverdruk.

5.6 Conclusie Tunnel experimenten

Een tunnel is een goede methode om plastische vervormingen van de balk tot stand te brengen. Met het 1D model van Borgers is het ook goed mogelijk om een uitspraak te doen over de verwachte piekoverdruk in de tunnel. De impuls in de gecreëerde tunnel blijkt een stuk lastiger te voorspellen, dat komt doordat balk snel ontlast wordt van de gereflecteerde druk doordat de schokgolf door de open delen van de tunnel snel weg kan lekken. Daarbij kan de schokgolf nog in beperkte mate om de balk heen door de speling tussen de tunnelplaten en de balk. Door zowel de gaten te dichten en de kopse kanten van de tunnel dicht te maken zal de gereflecteerde druk op de balk langer in stand gehouden wat resulteert in een hogere impuls.

Om te bepalen waardoor de schokgolf kan ontsnappen zouden er een aantal opstellingen getest moeten worden; Zo moet er een test uitgevoerd worden waarbij alle bouten en afstandhouders geplaatst zijn om het effect van de open gaten op te heffen. Er moet een test uitgevoerd worden waarbij de tunnel aan de kopse kanten afgesloten wordt om het weglekken naar de open zijden te bepalen en er moet een testserie uitgevoerd worden met alle afstandhouders geplaatst (maximale speling) en zonder afstandhouders waarbij alle moeren aangedraaid zijn (minimale speling). Op basis hiervan kan er geconcludeerd worden welke aanpassingen een groot effect op de impuls zullen hebben.

In paragraaf 5.5 blijkt verder dat de doorbuiging met de gemeten schokgolf karakteristieken redelijk te voorspellen valt op basis van twee metingen. De voorspellingen zijn wel een overschatting van de werkelijke doorbuiging. Mogelijke verklaringen hiervoor zijn dat er veel versimpelingen in het rekenmodel zitten en dat wrijving op kan treden tussen de balk en de tunnelwanden bij het aandraaien van de bouten en moeren boven de balk. Om te testen of dit laatste invloed heeft gehad op de resultaten zou eenzelfde proef nogmaals uitgevoerd moeten worden met afstandhouders om de bouten en moeren boven de plaat heen.

Tot slot kon er geconcludeerd worden dat de balken uit deze serie plastische vervorming vertonen naar boven toe. Dit is te wijten aan het terugveren van de balken waarbij er geen trekwapening zit aan de bovenkant van de balk. Er valt dus te concluderen dat er met een ladingsgewicht die 150 keer kleiner is dan het ladingsgewicht bij de sferische experimenten meer schade toebracht wordt aan de balken. Het nut van de tunnel heeft zich dus zeker bewezen te meer omdat proeven nu ook in de bunker van de KMS Brussel uitgevoerd kunnen worden.

6. Conclusies en aanbevelingen

In de conclusie zal antwoord worden gegeven op de deelvragen uit de inleiding. De opzet van dit onderzoek was om de schadebeelden van de schaalmodellen te vergelijken met schadebeelden van een balk op ware schaal. Maar om schadebeelden te constateren is het eerst nodig om de schaalmodellen daadwerkelijk te beschadigen. Omdat dit meer problemen gaf dan in eerste instantie gedacht heeft dit onderzoek zich dan ook vooral gericht op het vinden van een manier om de schaalmodellen te laten bezwijken onder een explosieve belasting. De analyse van de scheurvorming en het bezwijkmechanisme is hierdoor dan ook onderbelicht gebleven omdat er bij de uitgevoerde proeven nog geen balken zijn bezweken.

6.1 Conclusies

Gebaseerd op een beperkt aantal uitgevoerde proeven kan geconcludeerd worden dat de schaalmodellen gebruikt kunnen worden bij voorspellingen van het gedrag van een gewapend betonnen ligger onder een hoog dynamische belasting, de scheurpatronen zijn vergelijkbaar met die uit de theorie en de rekenmethode uit de UFC 3-340-02 kan gebruikt worden om een indicatie te krijgen van de mate van plastische vervorming en uitwijking van de balk.

Om de balk plastisch te laten vervormen moet er gebruik gemaakt worden van een tunnel constructie, waarbij gerekend moet worden met het 1D model van Borgers. Uit berekeningen en testen is gebleken dat bij het gebruik van een sferische of hemi-sferische lading met het maximaal toelaatbare ladingsgewicht op militaire oefenterreinen in Nederland en België de plastische grens niet bereikt wordt. Dit komt doordat de ontlastingstijd voor de gereflecteerde druk maar zeer gering is in verhouding met de positieve faseduur waardoor de verhoogde gereflecteerde piekoverdruk vrijwel meteen terugvalt naar de invallende piekoverdruk waarbij er ook diffractie op treedt die de schokgolf tegenwerkt. Dit resulteert in verwaarloosbaar kleine verhoging van de impuls door de reflectie. Bij berekeningen moet daarom gerekend worden met een invallende piekoverdruk die tot wel 6 keer zo klein is als de gereflecteerde piekoverdruk. Bij berekeningen met de maximaal toelaatbare hoeveelheid C4 in een lijnbron (2D model) kwam naar voren dat ook dit niet tot een plastische vervorming zou leiden ondanks dat de lading een stuk kleiner kan worden. Daarom is er een tunnel ontwikkeld waarin de schokgolf in maar één richting kan expanderen. Met deze tunnel was het wel mogelijk om de schaalmodellen plastisch te laten vervormen. Dit is toch een opmerkelijk resultaat aangezien een ladingsgewicht van 10 gram PETN meer schade aan de balk heeft aangericht dat 1,5 kg C4. Een groot voordeel hiervan is dat proeven die de balk kunnen doen bezwijken uitgevoerd kunnen worden in de bunker van de KMS.

De vervorming is meetbaar met behulp van een LVDT sensor, die de doorbuiging per tijdseenheid op kan meten als functie van de tijd. Het is hierbij van belang dat de schoen van de het staafje goed boven de LVDT gepositioneerd wordt om te voorkomen dat testresultaten onbruikbaar zijn zoals in de 2e proef van het tunnelexperiment.

Er is een kleine overeenkomst tussen de meetresultaten en de voorspellingen aan de hand van het 1D model van Borgers en de rekenmodellen uit de UFC-3-340-02. De piekoverdruk wordt vrij nauwkeurig door het 1D model voorspeld echter de gemeten waarde van de impuls blijft sterk achter bij de berekende waarde voor de impuls, dit is te wijten aan de vele lekkages van de schokgolf in de tunnel. Op basis van het kleine aantal testen is wel te concluderen dat de voorspellingen met de gemeten piekoverdruk en impuls wel gebruikt kunnen worden als indicatie van de doorbuiging.

De afwijking tussen de voorspelling met de gemeten karakteristieken en de gemeten doorbuiging valt te verklaren door de versimpelingen in het rekenmodel van de UFC 3-340-02 en de meet-onnauwkeurigheden. Wel is de tunnel vatbaar voor verbeteringen om de lekkage van de schokgolf te beperken om met een gelijkblijvende piekoverdruk een grotere impuls te realiseren. De gemeten waarde van de piekoverdruk zat bij de proef met 30 gram PETN al over het bereik van de meetsensoren heen.

Op basis van de tunnel testen kan er geconcludeerd worden dat de plastische vervorming van de balk naar boven toe is in plaats van naar beneden toe. In deze scriptie is er enkel gekeken naar de positieve initiële doorbuiging waardoor de doorbuiging naar boven toe niet berekend is. Het kan dan ook erg interessant zijn om dit in een volgend onderzoek wel mee te nemen omdat dit immers de beweging is die zorgt voor de plastische vervorming.

6.2 Aanbevelingen

Op basis van dit onderzoek kunnen er een aantal aanbevelingen worden gedaan. Allereerst moet de tunnel verbeterd worden waardoor de schokgolf minder snel weg kan “lekken”. Dit kan door de gaten en de uiteinden van de tunnel te dichten. Als er een afgesloten tunnel ontstaat is de impuls nauwkeuriger te voorspellen en zullen de voorspellingen van de doorbuiging en mate van plastische vervorming beter overeenkomen met de werkelijkheid. De verbeteringen van de tunnel moeten vervolgens getest worden om te kijken of het gewenste resultaat daarmee bereikt wordt. De belangrijkste verbetering van de tunnel moet gezocht worden in de methode van het wisselen van de balken. Doordat de tunnel uit elkaar moet om de balken te wisselen ontstaan variaties in het vastschroeven van de tunnel en daarmee de tussenruimte van de balk en de tunnelwanden. Er zal een manier gezocht moeten worden om de balk te wisselen zonder de tunnel uit elkaar te schroeven. Een oplossing hiervoor kan zijn om in plaats van U-profielen, L-profielen te gebruiken die aan de bovenzijde afgesloten worden met een bout en een moer. Dit zijn dan de enige bouten en moeren die los en vast gemaakt moeten worden om de balk te wisselen. Om de balk uit de opstelling te liften is het nodig om beugels aan de balk te maken waaraan de balken in en uit de tunnel geplaatst kunnen worden. Als dit systeem werkt dan kunnen alle verbeteringen blijvend aangebracht worden. Een opmerking hierbij is dat ook de afstandhouders van een sterker materiaal gemaakt moeten worden om vervorming (uitbolling) en daarmee een wijzigende afstand tussen de platen te voorkomen.

Verder zal de oplegging van de balk verbeterd moeten worden. Bij het analyseren van de resultaten bleek dat het silicone een groot effect had op de gemeten doorbuiging. Het is beter om hier een harder materiaal voor te kiezen zodat de gemeten doorbuiging ook daadwerkelijk de doorbuiging van de balk is. Ook moet men ervoor waken dat de tunnel niet op de standaard van de LVDT rust. Hierdoor kan de situatie ontstaan dat het meeveren van de stellage als een doorbuiging wordt geregistreerd.

Naast de opstelling is het ook belangrijk dat er gekeken wordt naar het bouwproces van de balken. Het fabriceren van de wapening is een tijdrovende klus waarbij variatie tussen de balken niet te voorkomen is. Het bevestigen van de beugels aan de hoofdwapening neemt hierbij het meeste tijd in. Als de beugels met een mal op de juiste afstand van elkaar worden gehouden is het makkelijker om de beugels te bevestigen. Daarnaast moet er kritisch gekeken worden naar hoe het betonmengsel aangetrild wordt. Bij het gebruik van de trilplaat moet het mengsel te vaak aangetrild worden voordat het goed verdeeld is onder de hoofdwapening. Hierdoor verdringt het water zich naar de bovenkant van de balk waardoor het watergehalte van de onderkant van de balk te laag is en de bovenkant te hoog. Een trilnaald kan dit probleem verhelpen.

Tot slot is het belangrijk om in een volgend onderzoek de planning strak in de gaten te houden. Doordat de eerste testreeks met de sferische belasting geen goede testresultaten op leverde moest erop zeer korte termijn een nieuwe testreeks ingepland worden. Hierdoor ontstond vertraging in het onderzoek. Het is dan ook belangrijk om vanaf het eerste moment in een nieuw onderzoek te beginnen met het fabriceren van balken, het uitharden van de balk kost namelijk bijna een maand en het vlechten van de wapening kost ook gauw twee weken voor 8 balken.

Bibliografie

[1] J. Borgers, Pyrotechniek en Berschermingsconstructies dictaat, Breda: Nederlandse Defensie Academie en TNO, 2011.

[2] L. Deklerck, *Studie van plastisch gedrag van liggers in gewapend beton,* Brussel: Koninklijke Militaire School, 2011.

[3] L. Absil, *Interferometry in Compressible Flow,* TNO, 1995.

[4] J. Debroey, *Calculation of beams in reinforced concrete under explosive loading,* Konlinklijke militaire school Brussel, 2010.

[5] J. Borgers, *Blast characterizations of det-cord,* Nederlandse Defensie Academie, 2012.

[6] J. Borgers, *Sven's Dillema ondersteunend stuk geschreven in het kader van onderzoek van Weijnschenk,* Breda: NLDA, 2012.

[7] J. Borgers, *Scaling rules for tunnel testing,* Nlda, 2012.

[8] U.S. Army corps of engineers, *UFC 3-340-02,* U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS, 2008.

[9] J. Vantomme, *Calcul de projet de poutres en béton armé pour résister à des explosions cursusdictaat,* KMS, 2008.

[10] Bureau van Normalisatie, *Nbn_en_1992_1_1,* Brussel, 1992.

[11] J. Vantomme, Inleiding tot de cursus "Berekening van betonconstructies", Brussel, 2009.

[12] S. v. Dam, *Studie van het plastisch gedrag van liggers in gewapend beton,* Brussel: Vrije Universiteit Brussel, 2011.

Bijlagen

Bijlage 1 testresultaten staalstaven hoofdwapening

Zwick Roell

Nr	E GPa	$R_{p0.2}$ MPa	R_{eH} MPa	A_e %	R_{eL} MPa	R_m MPa	A_g %	A_{gt} %	R_B MPa	A_t %	d_0 mm	S_0 mm²
2	198	-	-	-	-	831	-1.4	-1.0	727	-1.0	3.141	7.75
3	194	-	-	-	-	811	-1.5	-1.0	718	-1.0	3.141	7.75
4	200	703	-	-	-	829	-1.5	-1.1	722	-1.1	3.141	7.75

Série n = 3	E GPa	$R_{p0.2}$ MPa	R_{eH} MPa	A_e %	R_{eL} MPa	R_m MPa	A_g %	A_{gt} %	R_B MPa	A_t %	d_0 mm	S_0 mm²
$\bar{x}$	198	703	-	-	-	824	-1.4	-1.0	723	-1.0	3.141	7.75
s	3.29	-	-	-	-	11.3	0.1	0.1	4.77	0.1	0.000	0.00
V	1.66	-	-	-	-	1.37	-3.55	-5.02	0.66	-5.01	0.00	0.00

Diamètre de l'éprouvette

Diamètre	3.141	mm
Longueur d'essai	10	cm

Bijlage 2 testresultaten drukproef beton

Zwick / Roell

Nr	F_{max} N	dL pour F_{max} mm	F_{Rupt} N	dL à rupture mm	a_0 mm	b_0 mm	S_0 mm²
1	81500	2.1	75200	2.2	40	40	1600.00
2	79500	2.2	68300	2.3	40	40	1600.00
3	82500	2.2	76100	2.3	40	40	1600.00
4	74500	2.0	70200	2.1	40	40	1600.00
5	80700	2.2	68900	2.2	40	40	1600.00
7	80700	2.1	70300	2.0	40	40	1600.00

Série n = 6	F_{max} N	dL pour F_{max} mm	F_{Rupt} N	dL à rupture mm	a_0 mm	b_0 mm	S_0 mm²
$\bar{x}$	79900	2.1	71500	2.2	40	40	1600.00
s	2820	0.1	3300	0.1	0.000	0.000	0.00
ν	3.53	3.20	4.61	4.30	0.00	0.00	0.00

Bijlage 3 ingevulde excelsheet Debroey

Input:

h=	8,20E-02	[m]
b=	4,60E-02	[m]
d=	7,44E-02	[m]
d_c=	7,44E-02	[m]
ℓ=	7,00E-01	[m]

tension		
#=	4	[none]
ø=	0,00314	[m]
A_{s1}=	3,097E-05	[m²]
compression		
A_{s2}=	#########	[m²]
$A_c = b.h - A_{s1} - A_{s2}$	3,74E-03	[m²]

	f_{cu}=	3,50E+07	[N/m²]
	f_y=	7,23E+08	[N/m²]
	f_u=	8,24E+08	[N/m²]
	E_s=	2,10E+11	[N/m²]
	E_c=	3,40E+10	[N/m²]
	ρ_C=	2400	[kg/m³]
	ρ_{rc}=	2500	[kg/m³]
	$n = E_s / E_c$	6,18	[none]
type1	$\rho_1 = A_{s1} / b.d$	9,05E-03	[none]
	F=	3,68E-02	[none]
type2	$\rho_1 = A_{s1} / b.d$	9,05E-03	[none]
	F=	3,52E-02	[none]

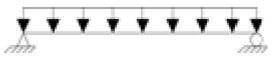
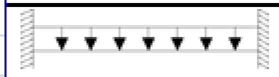
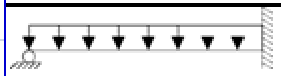
	t_0=	1,56E-03	[s]
	p_0=	6,69E+05	[Pa]
	$A_b = b.\ell$	3,22E-02	[m²]
	$P_0 = p_0.A_b$	2,16E+04	[N]
Other	P_0=	1,73E+07	[N]

Output:

CALCULATION OF THE TOTAL DEFLECTION x_m

Impulse		
$\mu = (P_0.\pi.t_0) / (R_{mb}.\tau)$	<1	ELASTIC
	>=1	PLASTIC

ELASTIC	$\mu_e = \mu$	$x_{max,e} = \mu_e \cdot f_E$
PLASTIC	$\mu_p = 1/2 \cdot [\mu^2 + 1]$	$x_{max,p} = \mu_p \cdot f_E$

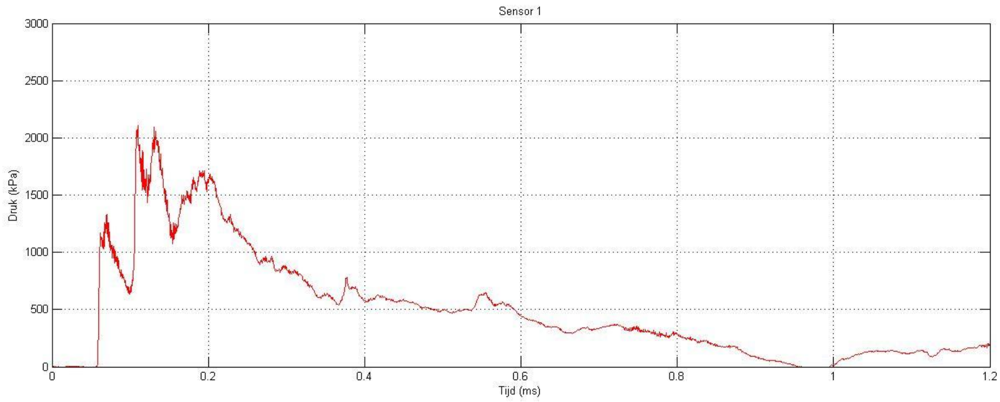
Support conditions		μ	μ_e	$x_{max,e}$ [m]	μ_p	$x_{max,p}$ [m]
	E	0,86	0,86	3,21E-03		
	P	0,94	0,94	3,49E-03		
	E	0,59	0,59	1,74E-03		
	P	0,94	0,94	1,75E-03		
	E	0,67	0,67	2,28E-03		
	P	0,90	0,90	2,42E-03		
Other	E	256,33			32853,37	5,76E+03
	P	463,03			107198,18	2,03E+04

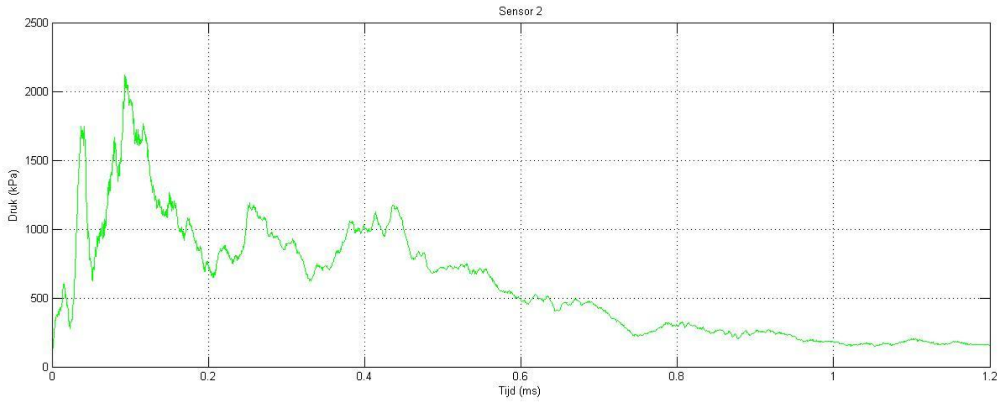
Alternatively, if only impulse is known,	$x_{max,p} = f_E/2 + [(P_0^2 \cdot t_0^2) / (8 \cdot K_{LM} . M_b . R_{mb})]$
one might prefer to use the following equation:	$x_{max,p} = f_E/2 + [(0.5 \cdot i^2) / (K_{LM} . M_b . R_{mb})]$

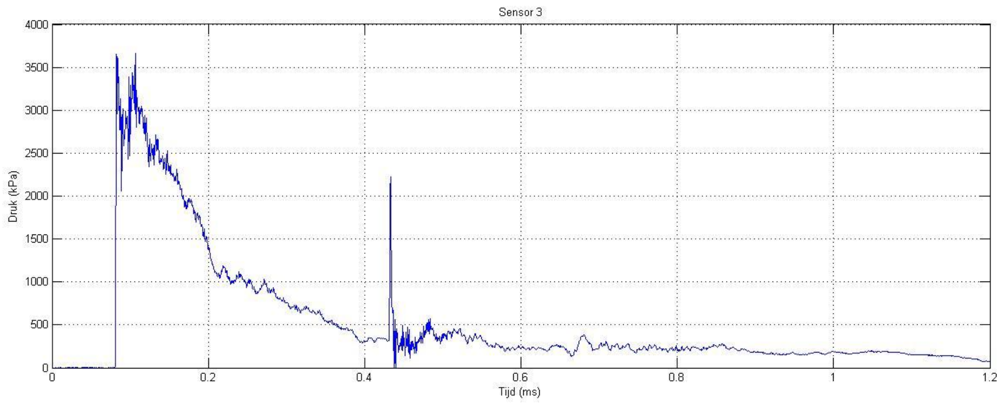
Bijlage 4 Drukverloop Tunnelexperiment 1

Waarbij:

Sensor 1 op 2,5 centimeter van de balk, sensor 2 op 17,5 centimeter op de balk , sensor 3 op 37,5 centimeter van de balk . De gegevens van de druksensoren zijn in het programma Matlab verwerkt en geplot in de onderstaande grafieken, de berekende piekoverdruk en impuls staan weergeven in tabel 5.5:



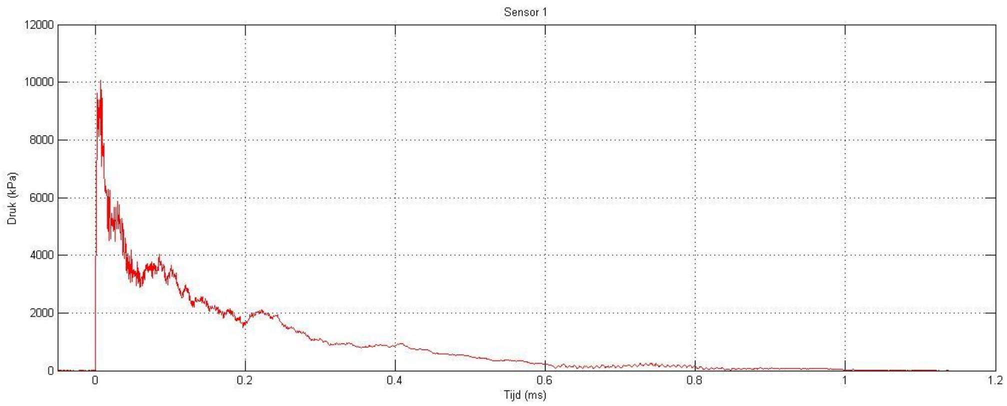


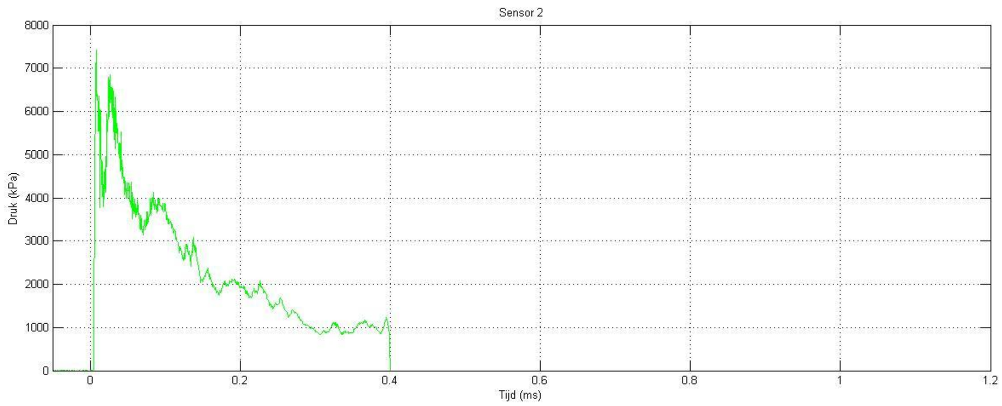


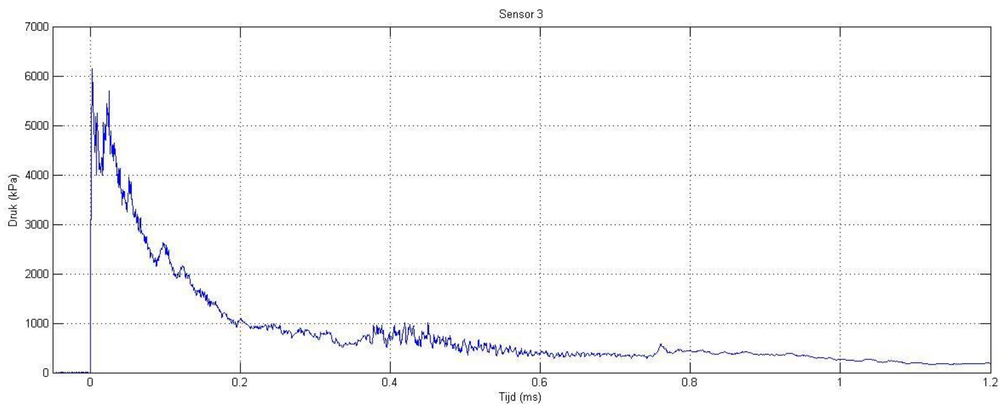
Bijlage 5 Drukverloop tunnelexperiment 2

Waarbij:

Sensor 1 op 2,5 centimeter van de balk, sensor 2 op 17,5 centimeter op de balk , sensor 3 op 37,5 centimeter van de balk . De gegevens van de druksensoren zijn in het programma Matlab verwerkt en geplot in de onderstaande grafieken, de berekende piekoverdruk en impuls staan weergeven in tabel 5.5:







Bijlage 6 Drukverloop Tunnelexperiment 3

Waarbij:

Sensor 1 op 2,5 centimeter van de balk, sensor 2 op 17,5 centimeter op de balk , sensor 3 op 37,5 centimeter van de balk . De gegevens van de druksensoren zijn in het programma Matlab verwerkt en geplot in de onderstaande grafieken, de berekende piekoverdruk en impuls staan weergeven in tabel 5.5: