



Lego® en explosietesten op schaal: een ogenschijnlijk vreemde combinatie die levens kan redden

DAVID LECOMPTE

Majoor dr. ir. David Lecompte is domeinbeheerder “*Mobility, Systems & Protection*” binnen het Departement Wetenschappelijk en Technologisch Onderzoek van Defensie van het Koninklijk Hoger Instituut voor Defensie. Hij is deeltijds docent aan het departement Bouwkunde en Materialen van de Koninklijke Militaire School en kwaliteitscoördinator van het Laboratorium voor de Analyse van Explosie-effecten, waar hij een deel van het onderzoek begeleidt.



Depuis une dizaine d'années, la protection de bâtiments et d'infrastructures critiques contre des attentats à la bombe est une des priorités européennes de la recherche scientifique et technologique en matière de sécurité. L'onde de choc produite par une explosion a souvent un effet dévastateur sur les structures ciblées. En vue de mieux comprendre son comportement et d'en déterminer les actions néfastes sur les bâtiments en objet, des expériences sont souvent nécessaires. Vu que les tests aux explosifs à échelle réelle sont coûteux en temps et en argent, et souvent simplement impossibles à réaliser, une alternative attrayante est offerte par des expériences à échelle réduite. Ces expériences peuvent être effectuées dans des conditions de laboratoire avec des quantités d'explosifs équivalentes, largement inférieures à celles rencontrées en réalité. Cependant, la construction des maquettes peut être relativement complexe. De ce fait, un système modulaire simple, commercialement disponible, peu coûteux et facile à utiliser est proposé : des briques Lego®. Dans une première phase, le système proposé est testé et validé sur base de tests de référence effectués par le Laboratoire canadien de recherche sur les explosifs. Finalement, le concept est utilisé dans l'étude comparative de deux types d'abris de survie, utilisés au sein des cantonnements militaires en opération à l'étranger.

Na de aanslagen op de Twin Towers in New York op 11 september 2001 is een betere bescherming van kritische infrastructuur wereldwijd een prioriteit geworden. Ook Europa heeft het onderzoek naar een betere bescherming tegen en het voorkomen van aanslagen boven aan de agenda geplaatst. Getuige hiervan zijn de middelen die overeenkomstig het zesde en het zevende Europese kaderprogramma voor onderzoek en technologische ontwikkeling werden vrijgemaakt voor onderzoeksprojecten op het gebied van de veiligheid. Het voorbije decennium hebben verschillende terroristische aanslagen op Europese bodem aangetoond dat vooral gebouwen en infrastructuur met een grote sociale, economische of politieke waarde als potentieel doelwit worden gekozen. Telkens is ook pijnlijk duidelijk hoe kwetsbaar de geviseerde infrastructuur is ten opzichte van de onvoorziene en uitzonderlijke acties die het gevolg zijn van een of meerdere explosies.

Meer en meer wordt tegenwoordig voor kritische infrastructuur (ziekenhuizen, overheidsgebouwen, transport, communicatie ...) rekening gehouden met de mogelijkheid van een explosiebelasting, en dit al vanaf de ontwerpfase. Er wordt dan niet uitsluitend gekeken naar de bescherming van de structurele integriteit van de gebouwen zelf, maar ook naar de bescherming van het personeel en de installaties die zich in die gebouwen bevinden.

Om te achterhalen of een gebouw al dan niet zal weerstaan aan de gevolgen van een explosie, moet in eerste instantie een weloverwogen dreigingsscenario worden aangenomen. Een dergelijk scenario gaat uit van een welbepaalde hoeveelheid springstof op een welbepaalde positie en afstand van het betreffende gebouw. Met deze gegevens en met de vorm en de inplanting van het gebouw tracht men de drukken te achterhalen waaraan het gebouw zal worden onderworpen.

In het geval van een explosie in een stedelijke omgeving wordt de studie van het gedrag van de schokgolf en de berekening van de uiteindelijke drukken en krachten op het betreffende gebouw bemoeilijkt door de vele weerkaatsingen van de schokgolf op de grond en de wanden van de overige gebouwen in de buurt. Het is in die omstandigheden niet langer mogelijk om een beroep te doen op eenvoudige analytische modellen. Alternatieven die in dergelijke situaties wel uitkomst kunnen bieden zijn computersimulaties en experimentele testen.

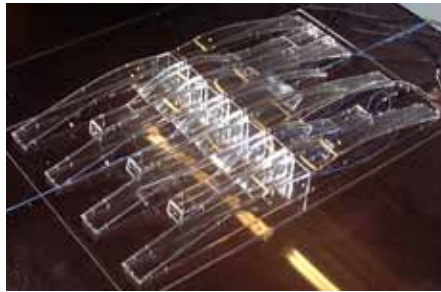
Testen op werkelijke schaal zijn misschien wel de meest effectieve oplossing, goedkoop en tijdsefficiënt zijn ze allerm minst en daardoor, voor wat België betreft, geen optie. Een aantal andere landen waaronder Canada, het Verenigd Koninkrijk, Australië en de Verenigde Staten, voeren dit soort van experimenten wel uit, gezien de beschikbaarheid van uitgestrekte testlocaties in onbewoond gebied.

EXPLOSIETESTEN OP SCHAAL

Interessante alternatieven zijn simulaties met computermodellen en testen op kleine schaal in labo-omstandigheden. Het voordeel van computersimulaties is dat een soms zeer complexe realiteit kan worden nagebootst en dat de benodigde ruimte voor uitvoering niet groter hoeft te zijn dan de harde schijf van de computer waarop de simulatiesoftware werd geïnstalleerd. Het nadeel van deze methode is echter dat het meestal gissen is naar de betrouwbaarheid van de berekeningen en resultaten. Het is daarom aangewezen om de computermodellen te verifiëren en te valideren aan de hand van experimentele data. Proeven op gereduceerde schaal bieden deze mogelijkheid aan een zeer beperkte kostprijs, zowel in tijd als in geld. Hoewel ze minder geschikt zijn om het gedrag van gebouwen en andere structuren realistisch na te bootsen, kunnen ze wel inzicht verschaffen in het verloop van de schokgolf en de effecten ervan.

Zo werd het departement Bouwkunde en Materialen in het verleden gevraagd om zijn medewerking te verlenen aan de veiligheidsanalyse van het nieuwe NAVO-hoofdkwartier. Een gerenommeerd Amerikaans ingenieursbureau stond in voor het computermodel van het gebouw en de berekening van de drukken op de wanden en daken van het gebouw in het geval van een explosie. De opdracht bestond erin een testcampagne op te zetten waarmee de berekende drukken gevalideerd konden worden. Daartoe werd een model van het gebouw in plexiglas gebouwd en voorzien van de nodige druksensoren.

© SOM + assar architects



© Bruno Reijnen

Impressie van het nieuwe NAVO-hoofdkwartier (links)
en de maquette op schaal 1/250 (rechts)

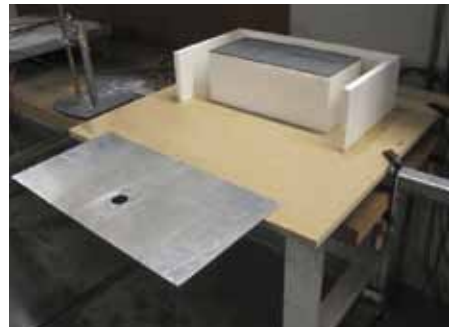
De bouw van de maquette werd uitgevoerd door een gespecialiseerde firma en vraagt op zich al de nodige specifieke kennis. De bekomen experimentele resultaten hebben het nodige vertrouwen gegeven in de resultaten van de computerberekeningen en zijn mee opgenomen in de beschermingsanalyse van het gebouw.

HET LEGO®-EXPERIMENT

122

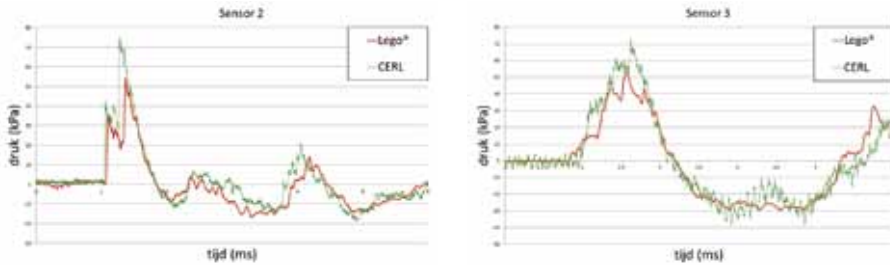
Twee jaar geleden werd het idee geopperd om de expertise op het gebied van kleinschalige explosieproeven verder uit te breiden. Het is duidelijk dat het hier een niche-expertise betreft waarin maar een handvol andere Europese laboratoria ook bedreven zijn. Het opzet was de ontwikkeling van een economisch, herbruikbaar, eenvoudig en snel inzetbaar modulair bouwsysteem, waarmee vrijwel elke mogelijk bebouwde omgeving op gereduceerde schaal kan worden gemodelleerd. De bedoeling is het model te onderwerpen aan een welbepaald explosiescenario om zo de acties op de constructies te kunnen meten en de eventuele reële risico's te kunnen inschatten.

Na een periode van trial and error werd een eerste explosieproef op schaal uitgevoerd met behulp van een kleine constructie opgetrokken uit Lego®-bouwstenen. Om een idee te krijgen van de bruikbaarheid van de commercieel beschikbare blokken voor explosieproeven op schaal werd een referentieproef uitgekozen en nagebouwd. Dankzij contacten met het *Canadian Explosives Research Laboratory* (CERL) kon de hand worden gelegd op de meetresultaten van een studie die eerder door hen was uitgevoerd. In de betrokken studie werden een aantal geselecteerde stedelijke configuraties experimenteel op schaal gesimuleerd. De afbeelding hieronder links geeft een impressie van het gebruikte schaalmodel van een gebouw met aanpalende corridors weer. De proef werd uitgevoerd om de gevolgen van een welbepaalde dreiging in de vorm van een *improvised explosive device* (IED) te bepalen voor een als kritisch beschouwd overheidsgebouw. De Canadese maquette werd opgebouwd uit speciaal daartoe ontworpen aluminium platen, elk met een lengte en hoogte van ongeveer 40 cm en een dikte van 8 cm. Geïntegreerde sensoren stonden in voor het opmeten van de gegenereerde drukken.



De CERL- opstelling (links) en de Lego®-opstelling (rechts) met de cirkelvormige uitsparing voor de positionering van de explosieve lading

De testen op het Lego®-model werden uitgevoerd in de bunker van het Laboratorium voor de *Analyse van Explosie-effecten* (LAEE), dat deel uitmaakt van het departement Bouwkunde en Materialen aan de Koninklijke Militaire School. De explosieve lading bestaat uit een elektrische detonator die een kleine aanzetlading bevat. Boven op deze detonator wordt, afhankelijk van de behoefte, een zekere hoeveelheid kneedbare springstof aangebracht. De maquette wordt vervolgens uitgerust met de nodige druksensoren die op dezelfde posities worden aangebracht als in het CERL-model.



Drukverloop opgemeten door twee sensoren op identieke posities in het Lego®- (rode curve) en het CERL-model (groene curve)

Uit de grafieken hierboven is af te leiden dat de resultaten van de metingen op het Lego®-model in identieke omstandigheden uitstekend blijken overeen te komen met de resultaten die werden bekomen op het veel grotere en loggere gelijkaardige model gebruikt door het CERL. Het modulaire bouwsysteem waarnaar werd gezocht diende niet meer ontwikkeld te worden, het bestond reeds veel langer, sinds 1958 om precies te zijn. De belangrijkste argumenten om de Lego®-bouwblokken te gebruiken zijn hun beperkte kostprijs, hun modulaire karakter, de verscheidenheid aan maten en vormen en hun stevigheid. De proeven kunnen daarenboven omwille van de beperkte hoeveelheid benodigde springstof in uiterst gecontroleerde labo-omstandigheden worden uitgevoerd.

DE SURVIVAL SHELTER

Na de validatie van het hiervoor beschreven experimentele concept kan het worden gebruikt in het kader van een probleem dat ook de militaire gemeenschap interesseert, namelijk de optimale configuratie van een survival shelter. Deze shelters komen gewoonlijk voor in militaire kantonnementen tijdens buitenlandse operaties en dienen als toevluchtsoord voor het personeel bij mogelijke vijandelijke aanvallen. In de meeste gevallen wordt gebruik gemaakt van standaard containers van 20 voet die worden ommuurd met Hesco Bastion®-

elementen gevuld met grond, zand of kiezel. De verschillende NAVO-landen hebben elk hun eigen versie van deze shelter.

124

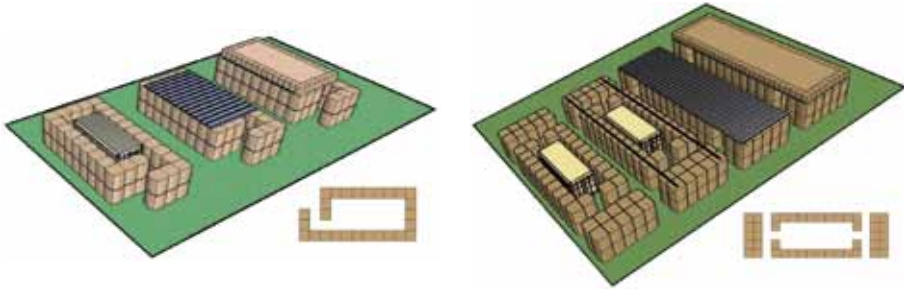


© Onbekend

Een Hesco Bastion®-shelter

De Hesco Bastion®-elementen bestaan uit een schanskorf met daarin een geotextiel dat dient om het geselecteerde vulmiddel op zijn plaats te houden. Aan de structuur kan flexibel vorm worden gegeven, waarbij de elementen eenvoudig kunnen worden geschakeld en gestapeld om de gewenste shelteropstelling te bekomen. De ervaring heeft geleerd dat deze elementen uitstekend weerstand bieden aan de impact van scherven en klein-kaliberprojectielen. Het gedrag van de schokgolf doorheen de shelter hangt echter vooral af van zijn vormgeving. De kortstondige drukverhoging die bij een explosie gepaard gaat met de voortplanting van een schokgolf kan niet alleen schadelijk zijn voor gebouwen en installaties, maar ook voor het menselijke lichaam. Daar de shelter voornamelijk wordt gebruikt voor de bescherming van personeel, moet worden vermeden dat de inwendige druk voor de mens gevaarlijke waarden bereikt. Een beter ontworpen shelteropstelling kan de kritische drukwaarden die ontstaan door opsluiting en reflecties van de schokgolf in de shelter reduceren.

Hiertoe kunnen, zoals hiervoor beschreven, proeven worden uitgevoerd op schaalmodellen van mogelijke shelteropstellingen. Dit maakt een evaluatie van de beschermende werking van een welbepaalde shelterconfiguratie met betrekking tot de impact van een schokgolf mogelijk. Twee opstellingen werden voor de testcampagne uitgekozen; voor de eenvoud worden ze de hoekconfiguratie en de doorloopconfiguratie genoemd. De Belgische Defensie gebruikt de hoekconfiguratie. Beide configuraties werden onderworpen aan een aantal geselecteerde scenario's op basis van het gewicht van de explosieve lading en de positie en de afstand van de detonatie ten opzichte van de ingang van de shelter. Ze worden beoordeeld op hun capaciteit om het drukeffect van de schokgolf na een explosie te reduceren.

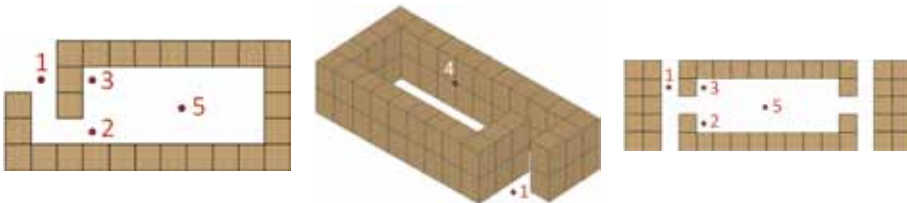


De hoek- (links) en de doorloopconfiguratie (rechts)

Bij de hoekconfiguratie is er slechts een enkele ingang die in een rechte gesloten hoek naar de container leidt. De doorloopconfiguratie gebruikt meerdere ingangen die twee aan twee in rechte lijn met elkaar zijn verbonden. In deze opstelling wordt opsluiting van de schokgolf ter hoogte van de ingang vermeden. De proeven op schaal bieden de mogelijkheid om uit te maken in welk geval de druk in de shelter en dus het gevaar voor het personeel het kleinst is.

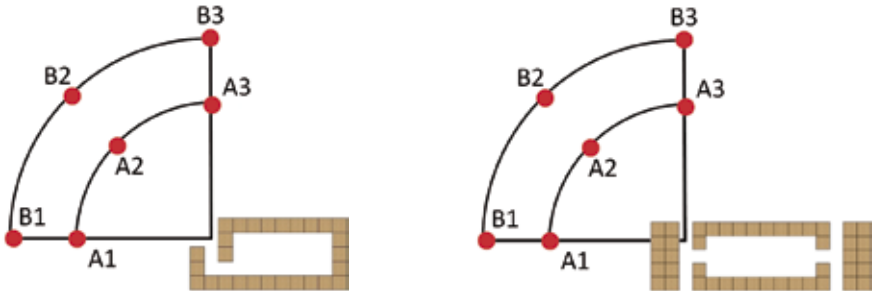
PROEFOPSTELLING EN RESULTATEN

Met behulp van de Lego®-bouwstenen werden beide shelterconfiguraties op 1/33-schaal nagebouwd. In de testopstelling werden vijf druksensoren geïntegreerd zoals aangegeven in onderstaande afbeelding.



Positie van de druksensoren, genummerd van 1 tot 5 voor de hoekconfiguratie (links en midden) en de doorloopconfiguratie (rechts)

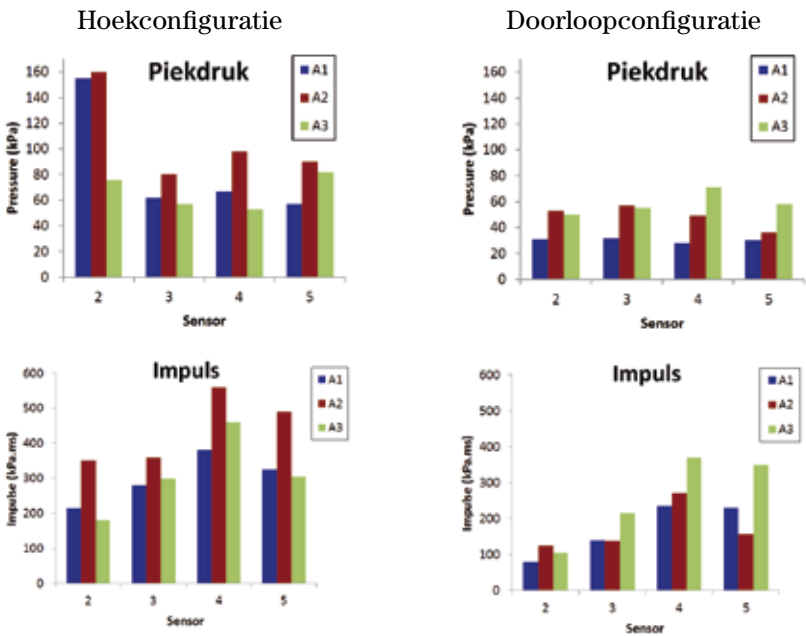
Er werden zes posities voor de explosieve lading voorzien (A1 tot A3 en B1 tot B3), die in een hoek van respectievelijk 0°, 45° en 90° ten opzichte van de shelteringang liggen. De afbeelding hieronder geeft de verschillende posities van de explosieve ladingen ten opzichte van de ingang weer.



Beschouwde posities van de explosieve ladingen voor beide shelters

De kracht en het potentieel vernietigende effect van een schokgolf wordt uitgedrukt door twee grootheden, i.e. de piekdruk en de impuls. De piekdruk (eenheid: kPa) is de hoogste drukwaarde die op een welbepaalde positie wordt gemeten. De impuls (eenheid: kPa.ms) geeft een idee van de energetische inhoud van de schokgolf.

Voor beide shelteropstellingen werden deze twee grootheden opgemeten in functie van de verschillende aanzetposities van de explosieve ladingen. De staafdiagrammen in de volgende afbeelding geven de gemeten piekdruk en impuls ter hoogte van de verschillende sensoren voor de ladingposities A1 tot A3 weer.



Piekdruk en impuls opgemeten door sensoren 2 tot 5 voor de drie ladingsposities A1 tot A3 in het geval van de hoekconfiguratie (links) en de doorloopconfiguratie (rechts)

De vergelijking van zowel druk als impuls voor beide shelterconfiguraties toont dat de doorloopconfiguratie een over het algemeen lagere waarde van beide parameters toelaat. Dit betekent dat deze configuratie op basis van de voorgestelde resultaten de veiligste is.

CONCLUSIE

Het gebruik van Lego® bij de bouw van modellen voor explosietesten op schaal blijkt een betrouwbare en kostefficiënte experimentele methode. Het modulaire karakter van het bouwsysteem maakt een snelle opbouw en aanpassing van modellen op schaal mogelijk en de experimentele resultaten zijn in overeenstemming met de resultaten van de computersimulaties. Het experimentele concept blijkt een realistisch alternatief voor grootschalige explosieproeven en laat toe om het gedrag van de schokgolf te wijten aan explosies in complexe configuraties te voorspellen. Op basis van de hiervoor beschreven resultaten kan worden gesteld dat de shelter met doorloopconfiguratie een betere bescherming biedt tegen de impact van een schokgolf veroorzaakt door een explosie. De vorm van de ingang zorgt voor het vermijden van weerkaatsing en opsluiting van de schokgolf en, daardoor, ook voor lagere druk- en impulswaarden. Internationale samenwerking is in dit soort van gevoelige materies onnoemelijk belangrijk. De referentieresultaten die in deze studie werden gebruikt waren essentieel ter validatie van het voorgestelde experimentele concept.

De auteur wenst volgende personen te bedanken voor hun kostbare bijdrage: onderluitenant Robin De Schepper, labo-ingenieur Bruno Reymen, professor dr. ir. John Vantomme, hoofd van het departement bouwkunde en materialen, dr. Bert von Rosen, hoofd van de “*Explosion Effects Group*” van het CERL en dr. John Anderson, hoofd van de “*Military Engineering Section*” van het Canadese “*DRDC-Suffield Research Centre*”.



Trefwoorden: terrorisme, explosies, veiligheid, schokgolf, labotesten, kleine schaal, survival shelter