

Ser. 4
S27

2^e ed.

Belasting van constructies door gasexplosies

Een verkennende studie

Uitgevoerd in opdracht van het Directoraat-Generaal van
de Arbeid door het prins maurits laboratorium TNO

Directoraat-Generaal van de Arbeid



S 27

614.833.4:624.059.22
explosie

gratis jc

Belasting van constructies door gasexplosies

Een verkennende studie

Uitgevoerd in opdracht van het Directoraat-Generaal van
de Arbeid door het prins maurits laboratorium TNO

**Nederlands Instituut voor
Arbeidsomstandigheden NIA**
bibliotheek-documentatie-informatie
De Boelelaan 30, Amsterdam-Buitenvertoeg

ISN-nr. 13557
plaats Ser. 4 S 27: 2^e ex
datum

oktober 1986

SAMENVATTING

Een onderzoek is uitgevoerd naar tengevolge van gasexplosies ontstane dynamische belastingen op constructies. Hiertoe werden twee situaties onderscheiden, te weten:

- de explosie vindt plaats in het inwendige van de constructie of
- de explosie vindt plaats buiten de constructie.

Voor interne gasexplosies kan de maximaal te verwachten belasting worden bepaald met een bestaand criterium voor het ontwerpen van ontlastopeningen. Voor industriële toepassingen is dit criterium uitgebreid en wordt een minimum sterkte geëist equivalent aan een statische belasting van 30 kPa.

Bij externe gasexplosies is de aanwezigheid van compact gebouwde of gedeeltelijk opgesloten installaties van groot belang. Staat de constructie hier vlakbij dan dient rekening te worden gehouden met een invallende druk van 100 kPa. Staat de constructie op enige afstand van dergelijke installaties dan kan de maximale belasting worden berekend met behulp van blast-simulatiemodellen. De belasting moet als dynamisch worden beschouwd. Bij het ontwerpen dient met schokgolfreflekties rekening te worden gehouden.

SUMMARY

An investigation has been performed into the dynamic loading of constructions due to gas explosions. Two situations have been distinguished, viz. the explosion takes place within the construction or the explosion takes place outside the construction.

For internal gas explosions the maximum load to be expected can be determined by using an already existing criterion for designing vent openings. For industrial applications this criterion has been extended by demanding a minimum strength equivalent to a static load of 30 kPa.

For external gas explosions the presence of compactly built or partially confined process installations plays an important part. If the construction is located close to such an installation one has to reckon with a pressure of 100 kPa. If the construction is located at some distance from such installations the maximum loading can be calculated by using blast simulation models. The loading should be regarded as a dynamic load. When designing such construction one should take of shock wave reflections.

<u>INHOUDSOPGAVE</u>	Pag.
Samenvatting	i
Summary	i
Inhoudsopgave	ii
1. Inleiding	1
2. Gasexplosies in ruimten	3
2.1 Theorie en experiment	3
2.2 Explosiebelastingen in de praktijk	14
2.3 Aanbevelingen	19
3. Vrije gaswolkexplosies	23
3.1 Explosiebelasting binnen de gaswolk	24
3.2 Explosiebelasting buiten de gaswolk	34
3.3 Schokgolffreflecties	36
3.4 Aanbevelingen	38
4. Conclusies	44
5. Referenties	46
Bijlage 1.: Literatuurbronnen bij fig. 5	55
Bijlage 2.: Literatuurbronnen bij fig. 6	57

1. INLEIDING

Jaarlijks zijn er zowel in de industrie als in de woonomgeving slachtoffers te betreuren als gevolg van gasexplosies. Een belangrijk deel van deze slachtoffers is te wijten aan het instorten van het gebouw waarin zij zich ten tijde van de explosie bevonden. Een triest voorbeeld hiervan is de vrije gaswolkexplosie welke plaatsgreep in Flixborough, Engeland in 1974. Van de 28 slachtoffers vonden er 18 de dood doordat het controlegebouw, waarin zij zich bevonden, instortte (1). Na eenzelfde explosie in Beek, Nederland in 1975 werden 6 van de in totaal 14 slachtoffers geborgen in het controlegebouw.

Overall in de industrie waar op grote schaal met brandbare vloeistoffen en gassen wordt gewerkt en waarbij dus gevaar voor explosies bestaat dient men de veiligheid van de aanwezige personen te waarborgen. Daarbij verdienen preventieve maatregelen de voorkeur. Daarnaast zou men in geval van een onverhoopt toch optredende explosie het aantal slachtoffers kunnen beperken indien met name de gebouwen waarin zich normaliter relatief veel mensen bevinden zo sterk worden gebouwd dat zij de explosiebelasting kunnen weerstaan.

Een noodzakelijke voorwaarde hiervoor is kennis over de explosiebelasting. Op verzoek van het Directoraat-Generaal van de Arbeid (DGA) is een studie uitgevoerd met als doel te bepalen welke belastingen op constructies kunnen werken in geval van een gasexplosie. De resultaten van deze studie worden in dit rapport gepresenteerd. Een apart onderdeel van de studie betrof een inventarisatie en analyse van opgetreden gasexplosies m.b.v. de TNO databank FACTS. De resultaten hiervan zijn apart gerapporteerd (2).

De studie heeft vanwege de problematiek op dit gebied een verkennend karakter. Een puur theoretische benadering van het probleem is op dit moment nog niet mogelijk, terwijl ook experimenten niet elk ongevalsscenario dekken. In de studie is derhalve veel aandacht

besteed aan explosiebelastingen welke zijn opgetreden in de praktijk, d.w.z. een studie naar schade als gevolg van opgetreden gasexplosies, waaruit een explosiebelasting kan worden afgeleid.

Het explosiegedrag en derhalve de explosiebelasting zal voor een belangrijk deel worden bepaald door de omgeving waarin de gasexplosie zich voltrekt. In het rapport is hiertoe een onderscheid gemaakt naar twee situaties :

- gasexplosies binnen een ruimte
- (vrije) gaswolkexplosies

Indien een gasexplosie binnen een gebouw plaatsvindt zal de maximale overdruk in het gebouw voor een belangrijk deel worden bepaald door de aanwezigheid van ontlastopeningen (bijv. ramen) waardoor de ontstane overdruk kan wegstromen. I.g.v. een (vrije) gaswolkexplosie zal de belasting op een gebouw allereerst afhankelijk zijn van het feit of het gebouw zich al of niet binnen de brandbare wolk bevindt. Hoe de situatie in geval van een ongeval precies zal zijn is moeilijk vast te stellen omdat ze afhankelijk is van een groot aantal factoren, zoals de windrichting, de grootte en plaats van vrijkomen van de brandbare wolk, de plaats en het tijdstip van ontsteking. Het huidige rapport gaat niet in op deze problematiek. Voor gebouwen welke zich binnen de exploderende gaswolk bevinden zal de explosiebelasting voor een groot deel afhangen van het feit of het gebouw zich wel of niet in de nabijheid van opgesloten delen bevindt of daar zelfs deel van uitmaakt. Voor gebouwen buiten de wolk zal de explosiebelasting bepaald worden door drukgolven afkomstig van de gaswolkexplosie. De afstand van het gebouw tot de wolk zal daarom de bepalende factor zijn naast de kracht van de explosie.

De explosiebelasting op een object is een dynamische belasting d.w.z. deze wordt bepaald door de kracht op het object (of druk = kracht per oppervlakte eenheid) en de tijd gedurende welke deze kracht werkzaam is.

In de studie zijn alleen gasexplosies aan de orde. Belastingen als gevolg van bijv. zelfontledingen van vloeistoffen, stofexplosies, nevelexplosies, fysische explosies, explosies van springstoffen, vliegende brokstukken, enz. zijn niet in de studie opgenomen en dit rapport doet hierover derhalve geen uitspraak. Met name geldt dit voor de effecten van een gasexplosie in een apparaat dat daardoor bezwijkt al dan niet onder vorming van brokstukken. Detonaties van gas-luchtmengsels worden uitgesloten, zowel vanwege hun zeldzame karakter als omdat er vanwege de hoge invallende drukken nauwelijks constructieve maatregelen tegen te treffen zijn.

2. GASEXPLOSIES IN RUIMTEN

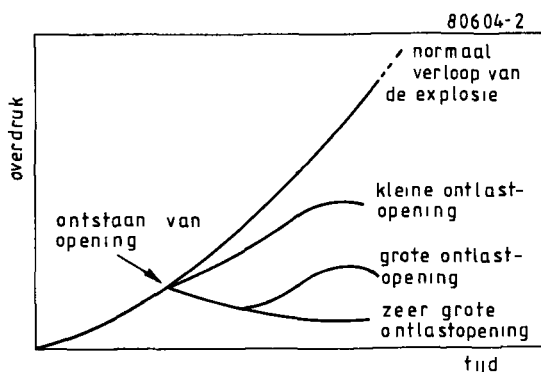
2.1 Theorie en experiment

Indien in een ruimte een brandbaar gas-luchtmengsel ontstaat en ontstoken wordt zal als gevolg van expansie van verbrandingsproducten de druk in de ruimte toenemen. In geval van een volledig gesloten ruimte kan de overdruk tot maximaal 0,7 - 1,0 MPa (7 à 10 bar) oplopen afhankelijk van het soort gas. In werkelijkheid echter zullen door openingen in het gebouw (bijv. door het bezwijken van ramen) verbrande en onverbrande gassen worden afgevoerd waardoor een lagere overdruk wordt bereikt. Het reduceren van de maximale explosiedruk middels doelbewust aangebrachte ontlastopeningen is een veel toegepaste manier van explosiebeveiliging : explosiedrukontlasting.

De maximale druk in de ruimte (gereduceerde druk) zal worden bepaald door de verhouding van enerzijds de toename van de druk

als gevolg van het zich voortschrijdende explosieproces en anderzijds de afname van de druk als gevolg van afvoer van verbrandingsgassen.

Het spreekt voor zich dat bij kleine ontlastopeningen de gereduceerde druk hoog zal zijn terwijl bij grote tot zeer grote ontlastopeningen de druk nauwelijks of niet boven de bezwijkdruk van de ontlastopening zal uitstijgen (zie fig. 1).



Figuur 1. Het druk-tijdverloop bij explosie-drukontlasting.

Bij gelijkblijvende grootte van de ontlastopening zal bij toename van de explosiesnelheid (vlamsnelheid) de gereduceerde druk ook toenemen.

Door tal van onderzoekers zijn modellen opgesteld voor de beschrijving van het explosiedrukontlastproces. De theoretisch meest juiste en meest veelzijdige modellen betreffen numerieke methoden zoals (4,5,6). In deze methoden wordt het gedrag van ontlaste explosies beschreven m.b.v. een aantal differentiaalvergelijkingen gebaseerd op de wet van behoud van massa en onder de aanname van adiabatische compressie. De modellen zijn geschikt

voor zowel subkritische als ook superkritische uitstroming. Invloed van toename van druk en temperatuur op de vlamsnelheid worden verdiskonteerd.

In (7) werden de resultaten van het numerieke model van (6) vergeleken met alle bij de auteurs bekende experimentele gegevens. Hieruit bleek dat het model nog de nodige tekortkomingen bezit en in experimenten gemeten drukken soms sterk onderschatte. Omdat dat op theoretische gronden niet mogelijk bleek werden op basis van de verzamelde experimentele gegevens twee richtlijnen opgesteld voor het dimensioneren van ontlastopeningen ter beveiliging van ruimten tegen de gevolgen van interne gasexplosies : de zogenaamde "safe recommendations" (7).

Eén richtlijn betreft ruimten met altijd open ontlastopeningen. De andere richtlijn is bedoeld voor ruimten waar eerst na het bereiken van een bepaalde druk (de aanspreekdruk) de ontlastopening vrijkomt (breekplaten; explosieluiken).

In de "safe recommendations" worden overdrukken gerelateerd aan de dimensieloze parameter \bar{A}/\bar{S}_0 . De parameter \bar{A} relateert de oppervlakte A_v van de aanwezige ontlastopeningen aan de totale wandoppervlakte A_s van de te beschermen ruimte. \bar{S}_0 is gebaseerd op brand- en geluidssnelheden bij atmosferische condities :

$$\bar{A} = C_d A_v / A_s \quad (1)$$

met C_d = contractiecoefficient

$$\bar{S}_o = \frac{S_o}{a_o} \left(\frac{\rho u}{\rho b} - 1 \right) \quad (2)$$

met S_o = brandsnelheid

a_o = geluidssnelheid

ρu = dichtheid van het onverbrande gasmengsel

ρb = dichtheid van het verbrande gasmengsel

De "recommendations" zijn opgesteld voor bijna kubische of sferische ruimten (lengte - diameterverhouding $L/D < 5$), waarin zich geen obstakels bevinden.

In de figuren 2 en 3 zijn de "safe recommendations" weergegeven als lijnen. Deze lijnen zijn zo geconstrueerd dat ze alle in (7) verzamelde experimentele gegevens en de numerieke oplossingen uit (6) omvatten.

Algebraïsch kan men de lijnen elk met twee vergelijkingen beschrijven.

- Voor ontlastopeningen welke altijd open zijn :

Om er zeker van te zijn dat de explosiedruk een bepaalde waarde ΔP_m niet overschrijdt moet men de ontlastopening zo kiezen dat geldt :

$$\bar{A}/\bar{S}_o \geq \exp \left\{ \left(0,64 \cdot 10^5 - \Delta P_m \right) / 2 \cdot 10^5 \right\} \quad (3)$$

voor $\Delta P_m > 10^5$ Pa (ΔP_m is overdruk)

$$\text{en } \bar{A}/\bar{S}_o \geq \left(0,7 \cdot 10^5 / \Delta P_m \right)^{0,5} \quad (4)$$

voor $\Delta P_m < 10^5$ Pa

- Voor initieel gesloten ontlastopeningen:

Opdat de aanspreekdruk ΔP_v van de breekplaat (of ontlastluik) niet wordt overschreden in het verdere verloop van

de explosie (verg. fig. 1) moet men de ontlastopening zodanig kiezen dat geldt :

$$\bar{A}/\bar{S}_o \geq \left(2,4 \cdot 10^5 / \Delta P_v \right)^{1,43} \quad (5)$$

voor $\Delta P_v > 10^5$ Pa (ΔP_v is overdruk)

$$\text{en } \bar{A}/\bar{S}_o \geq \left(12,3 \cdot 10^5 / \Delta P_v \right)^{0,5} \quad (6)$$

voor $\Delta P_v < 10^5$ Pa

In de figuren 2 en 3 zijn ook de theoretische voorspellingen opgenomen uit (6), waaruit de ernstige onderschatting van experimenteel gevonden overdrukken blijkt vooral bij initieel gesloten ontlastopeningen. De onderschatting is een direkt gevolg van toename van de vlamsnelheid tijdens het drukontlastingsproces die niet beschreven wordt door de druk - en temperatuurafhankelijkheid van de brandsnelheid. Deze toename kan door een aantal mogelijk gelijktijdig werkende processen worden veroorzaakt. De belangrijkste hiervan zijn :

- Taylor instabiliteit (8)

Als het scheidingsvlak tussen twee fluidums met verschillende dichtheden wordt versneld in de richting van het zwaardere fluidum ontstaat op het scheidingsvlak een instabiliteit. De instabiliteit manifesteert zich bij een vlam (het scheidingsvlak tussen lichte verbrandingsgassen en zware onverbrande gassen) door welvingen. De hierdoor toegenomen vlamoppervlakte resulteert in een toename van de vlamsnelheid.

Het ontstaan van zeer hoge drukken gemeten in experimenten beschreven in (7) wordt aan deze instabiliteit toegeschreven. Zoals fig. 2 laat zien worden deze drukken deels zelfs door de "safe recommendation" onderschat.

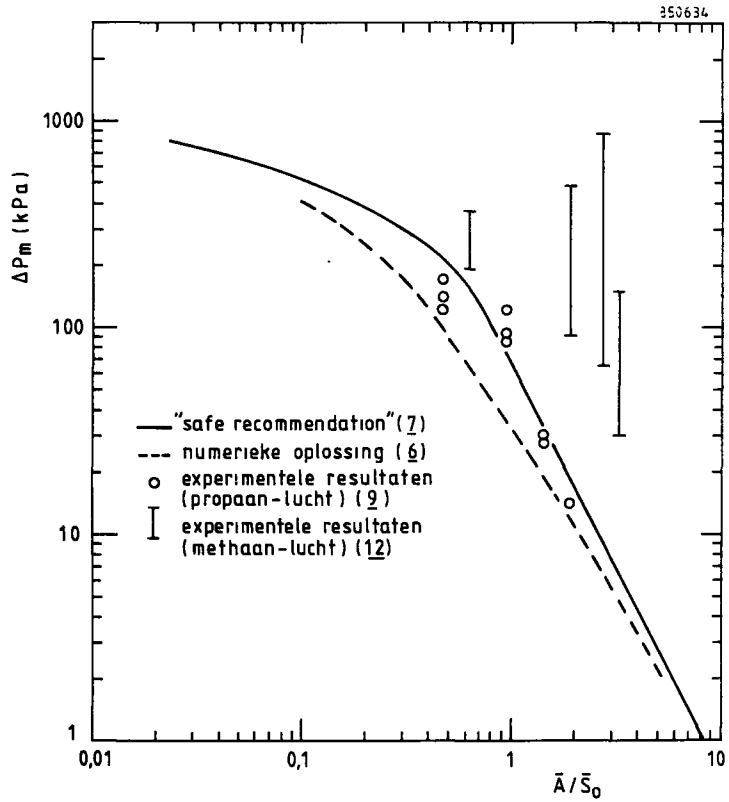
- Instabiliteit door een koppeling tussen de vlam en een akoestische trilling

Deze vlaminstabiliteit kan ontstaan als in de te beschermen ruimte een akoestische trilling ontstaat (10). De vlaminstabiliteit (een oppervlakte vergrotende celstructuur op de vlam) wordt onderhouden door interactie met de trilling, terwijl de trilling wordt onderhouden door energie opgewekt door de vlam. Een positieve terugkoppeling tussen vlam en trilling heeft een exponentiële toename van de vlamsnelheid tot gevolg. In (11) wordt aangetoond dat de door de werking van deze vlaminstabiliteit ontstane hoge drukken door de "safe recommendation" worden onderschat (zie ook fig. 3).

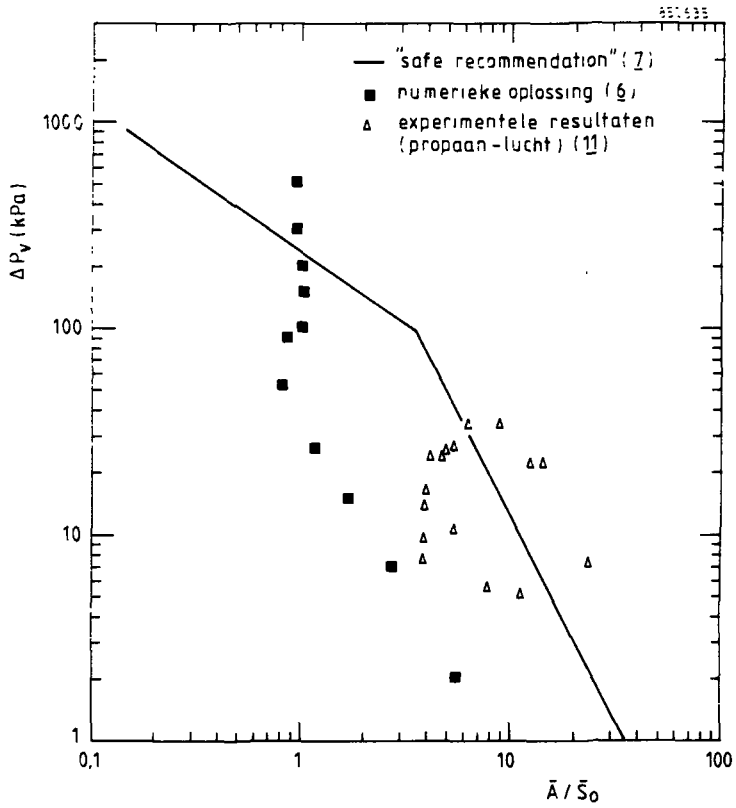
- Turbulentie

Door het drukverschil binnen en buiten de ontlaste ruimte ontstaat in de ruimte een stromingsveld met de grootste stroomsnelheden ter plaatse van de ontlastopening. Als verbrande gassen uitstromen neemt de stroomsnelheid nog meer toe. In de schuiflaag tussen de snel uitstromende verbrandingsgassen en onverbrande gassen binnen de ruimte kan turbulentie ontstaan hetgeen vlamversnellend werkt (9).

Ook achter obstakels welke zich in de ruimte bevinden kan turbulentie ontstaan, waardoor vlamsnelheden en derhalve de inwendige druk drastisch kunnen stijgen. In fig. 2 zijn ter vergelijking met de safe recommendation de drukniveaus opgenomen welke werden gevonden in een buisachtige ruimte (lengte-diameter-verhouding $L/D = 4$) van ongeveer 50 m^3 met een ontlastopening aan één zijde van de buis (12). In de buis waren op regelmatige afstanden van elkaar obstakels geplaatst. De drukken die in de buis werden gemeten overtreffen de safe recommendation bijna



Figuur 2. "Safe recommendation" voor ruimten met altijd open ontlastopeningen.



Figuur 3. "Safe recommendation" voor ruimten met initieel gesloten ontlastopeningen.

een orde van grootte. Indien de buis nog iets langer zou zijn geweest zou waarschijnlijk een overgang van deflagratie naar detonatie hebben plaatsgevonden.

Praktijk situaties zoals deze buis zullen echter zelden voorkomen. Uitzonderingen zijn bijvoorbeeld liftschachten en cascade-explosies in onderling verbonden scheepsruimen (13). Zoals reeds opgemerkt worden dit soort situaties niet door de "safe recommendations" gedekt (obstakels en $L/D > 5$) en ze mag hiervoor dan ook niet worden toegepast.

De meeste experimenten waarop de "safe recommendations" zijn gebaseerd betreffen centraal in de ruimte ontstoken gasmengsels, waarbij het gasmengsel de gehele ruimte vult. Onderzoek uitgevoerd ter bepaling van de invloed van ongevalsparameters zoals de plaats van ontsteking en het slechts deels gevuld met brandbaar mengsel zijn van de ruimte laat zien dat centraal ontstoken explosies in geheel gevulde ruimten de meest gevaarlijke zijn. Uiteraard geldt dit alleen voor ruimten waarin zich geen obstakels bevinden.

Iets waar de "safe recommendation" voor initieël gesloten ontlastopeningen geen uitspraak over doet is het gewicht van explosieluiken. De recommendation is opgesteld m.b.v. experimenten waarin folies en breekplaten zijn gebruikt (d.w.z. bij het bereiken van de aanspreekdruk van het folie of de plaat komt de gehele ontlastopening op vrijwel hetzelfde moment vrij). Als gevolg van massatraagheid kan de effectieve aanspreekdruk (de aanspreekdruk waarbij de ontlastopeningen geheel vrijkomt) bij gebruik van explosieluiken aanzienlijk hoger liggen dan de druk waarbij het luik zich begint te openen. In (14) wordt aanbevolen explosieluiken zo licht mogelijk te bouwen (Voor toepassing van ontlastcriteria beschreven in (14) wordt

aangeraden de massa van explosieluiken kleiner te kiezen dan 10 kg/m^2).

Uit bovenstaande blijkt dat reeds veel onderzoek is gedaan naar de bepaling van belastingen door gasexplosies in ruimten voorzien van ontlastopeningen. Desalniettemin blijven er nog veel vragen open. Zo is gebleken dat vlaminstabiliteiten belangrijker worden bij toename van de schaal van de experimenten (9), zodat drukken in praktijk situaties (ruimten in de orde van 1000 m^3) tot hogere waarden kunnen oplopen, dan op grond van kleine schaal experimenten ($\leq 60 \text{ m}^3$, waarop o.m. de "safe recommendations" zijn gebaseerd) zou worden verwacht.

De rol van obstakels is niet goed bekend. Obstakels kunnen soms voorkomen dat akoestische trillingen worden versterkt en derhalve een koppeling tussen vlam en trilling voorkomen (15,16). Hetzelfde kan overigens worden bereikt door de wanden van de ruimte te bekleden met een geluid-dempend materiaal (10). De invloed van obstakels op de vlampropagatie uit het oogpunt van turbulentiegeneratie is ook nog onduidelijk.

Om deze reden is besloten om als aanvulling op de theoretische en experimentele gegevens onderzoek te doen naar explosiebelastingen welke in de praktijk in ongelukken zijn opgetreden. In de praktijk zullen vele parameters welke in experimenteel onderzoek naar voren zijn gekomen een rol hebben gespeeld, zoals bijv. de invloed van obstakels maar ook het niet geheel met een brandbaar mengsel gevuld zijn van de ruimte.

Alvorens hiertoe over te gaan eerst nog het volgende. Zoals in de inleiding is beschreven is een explosiebelasting een dynamische belasting d.w.z. de belasting wordt bepaald door een kracht en

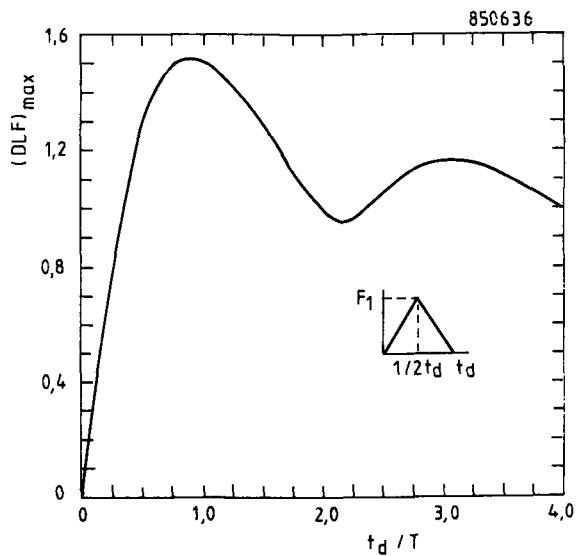
de tijd gedurende welke deze kracht werkzaam is.

Bij explosies in ruimten wordt de grootte van de kracht als ook de tijd t_d gedurende welke de kracht werkzaam is voor een belangrijk deel bepaald door de afmetingen van de ruimte en de grootte van de ontlastopeningen. Op grond van metingen uitgevoerd in ruimten voorzien van relatief grote ontlastopeningen bedraagt $t_d = 0,075 V^{1/3}$ (met V = volume van de ruimte). Uit de metingen blijkt verder dat, bij afname van de ontlastopeningsgrootte, t_d toeneemt.

Het gedrag van de ruimte onder invloed van een zekere dynamische belasting wordt mede bepaald door de verhouding van t_d en de eigentrillingstijd T van de ruimte. Man kan hiervoor uitgaan van de eigentrillingstijd van de wanden. Volgens (54) bedraagt de eigen frequentie van een wand met normale afmetingen ongeveer 15 Hz wat neerkomt op een eigentrillingstijd $T = 67$ ms. Voor ruimten met "slaapkamerafmetingen" ($V = 50 \text{ m}^3$) bedraagt de verhouding $t_d/T = 4$. Voor grotere ruimten zal de verhouding t_d/T alleen maar verder toenemen.

Indien de belasting wordt gezien als een driehoeksbelasting mag de belasting als statisch worden beschouwd zoals fig. 4 laat zien. (uit (53)). In deze figuur is DLF de dynamische belastingsfactor. Deze geeft aan de factor waarmee een dynamische piekkracht moet worden vermenigvuldigd om de kracht als statisch te beschouwen. Bij $t_d/T > 2$ is de factor bij benadering gelijk aan 1.

Op grond van bovenstaande kan de belasting op een ruimte van normale afmetingen t.g.v. een inwendige explosie als statisch worden beschouwd.



Figuur 4. Dynamische belastings factor DLF als een functie van de verhouding tussen tijdsduur (t_d) van de belasting en eigentrillingstijd (T) van een constructie (53).

2.2 Explosiebelastingen in de praktijk

De belasting van gebouwen als gevolg van accidentele interne gasexplosies is onderzocht op grond van de schade welke aan deze gebouwen werd teweeggebracht. Uit de schade werd een statische

druk geschat welke deze schade zou kunnen hebben veroorzaakt (m.b.v. de druk-impuls verbanden gegeven in (3)). De drukken zijn gerelateerd aan de in (6) gedefinieerde parameter \bar{A}/\bar{S}_0 (met $C_d = 0,6$) om de relatie met de grootte van de aanwezige ontlastoppervlakte te kunnen onderzoeken en omdat de factor \bar{S}_0 de mogelijkheid biedt voor verschillende gassoorten één relatie te vinden.

Het aantal gasexplosies dat plaatsvindt binnen gebouwen en installaties is enorm groot. Dit blijkt o.m uit de inventarisatie m.b.v. de TNO-databank FACTS (2) en uit (17) waar melding wordt gemaakt van 595 gasexplosies in niet-industriële panden over een periode van 2 jaar alleen al in Groot-Brittannië.

Het aantal incidenten waarvan een dermate gedetailleerde beschrijving voorhanden is dat ze in de huidige studie kan worden gebruikt blijkt echter zeer beperkt.

Voor de huidige studie is kennis van de volgende aspecten noodzakelijk:

- afmetingen van de ruimte waarin de explosie plaatsvond
- afmetingen van de zwakste delen van de ruimte welke bij een explosie in eerste instantie weg kunnen klappen, waardoor ontlastopeningen vrijkomen
- gassoort
- schadebeeld (inherent hieraan is kennis van de constructievorm) of eventueel een schatting van de opgetreden equivalente statische drukken.

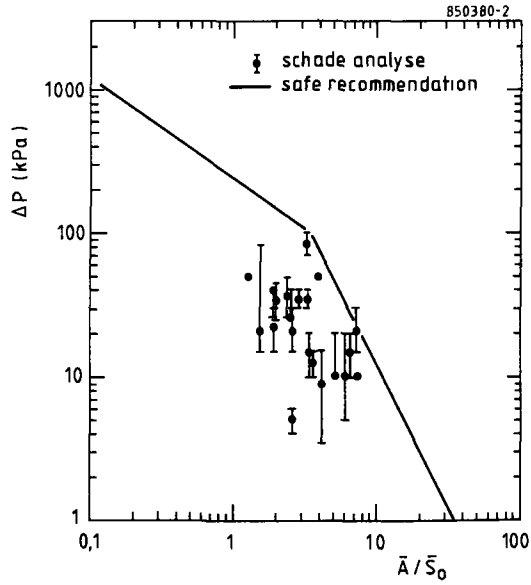
Slechts in enkele gevallen was alle benodigde informatie aanwezig zoals in (18). Van een iets groter aantal incidenten, waren niet-aanwezige gegevens nog te schatten uit foto's, plattegronden e.d. Van twee incidenten (waarbij het gebouw waarin de explosie plaatsvond volledig werd vernield) werd de maximale druk in het

gebouw geschat op grond van schade in de omgeving (blast). Het zal duidelijk zijn dat de geschatte maximale drukken bij deze incidenten niet erg nauwkeurig zijn.

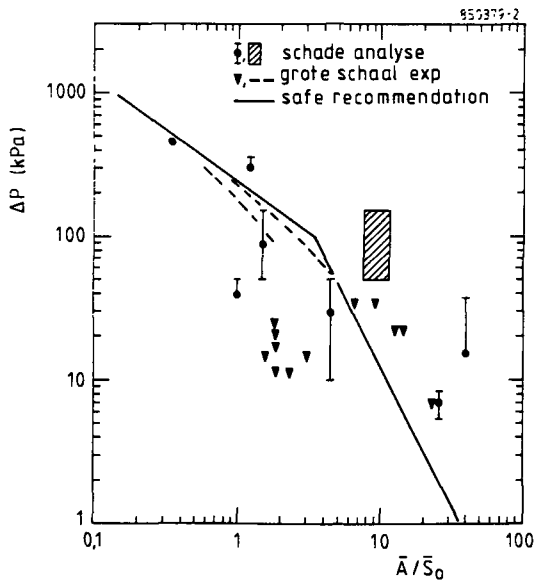
De resultaten zijn weergegeven in de figuren 5 en 6. Omdat een groot aantal van goed beschreven incidenten gasexplosies in woonhuizen betrof is een onderscheid gemaakt tussen niet-industriële panden (fig. 5) en industriële panden (fig. 6). De onnauwkeurigheid van de geschatte druk is aangegeven met een foutenbalk. In één geval waren ook de dimensies van de constructie niet bekend. Dit geval is aangegeven als een rechthoek waarbij de zijden van de rechthoek de foutengrenzen aangeven. Als geen schatting van de fout kon worden gemaakt is het geval slechts als een punt aangegeven. Ter vergelijking is ook de "safe recommendation" voor ruimten met initieel gesloten ontlastopeningen in de figuren opgenomen. Fig. 5 laat zien dat explosiebelastingen in niet-industriële objecten zich goed door de "safe recommendation" laten beschrijven. Uit de figuur blijkt dat slechts in een geval een druk hoger dan 50 kPa is waargenomen. Dit stemt overeen met drukniveau's genoemd in (17).

In sommige situaties zijn wel degelijk hogere drukniveau's bereikt dan in figuur 5 zijn aangegeven. In deze gevallen betrof het explosies in kruipruimten, muurspouwen, kelders e.d. waar nauwelijks sprake was van een ontlastmogelijkheid ($\bar{A}/\bar{S}_0 \approx 0$). Theoretisch zou hier een druk van ongeveer 0,8 MPa kunnen worden bereikt, waartegen in de praktijk niet kan worden beveiligd. De ravage als gevolg van dit soort explosies was derhalve veelal enorm.

Explosiebelastingen in de industrie laten zich minder goed m.b.v. de "safe recommendation" beschrijven. Een van de belangrijkste redenen hiervoor is de invloed van obstakels op de vlampropagatie tijdens de explosies. Een voorbeeld hiervan is een explosie in een chemische fabriek in Attleboro in de V.S. (19). Een explosie



Figuur 5. Vergelijking van explosiebelastingen voorgekomen in niet-industriële panden (woonhuizen, scholen, stookruimten e.d.) met de safe recommendation voor ruimten met initiëel gesloten ontlastopeningen. Voor gebruikte referenties zie bijlage 1.



Figuur 6. Vergelijkingen van explosiebelastingen voorgekomen in de industrie met de "safe recommendation" voor ruimten met initieel gesloten ontlastopeningen. Voor gebruikte referenties zie bijlage 2.

van een vinylchloride-luchtmengsel verwoestte een gebouw bestaande uit twee via veel openingen met elkaar verbonden verdiepingen elk geheel gevuld met procesinstallaties. Alhoewel ook in niet-industriële objecten obstakels voorkomen (bijv. meubilair in woonhuizen) zullen in industriële situaties vlamversnellingen veel belangrijker zijn, daar ze gezien de grotere schaal (volumina zijn 10 - 100 x groter dan die van niet-industriële panden) langer op het explosieproces kunnen doorwerken. Om eenzelfde reden zullen vlaminstabiliteiten in industriële situaties belangrijker zijn.

Daarnaast zijn in de industrie meer ongevalsscenario's denkbaar waarbij het brandbare gas in de ruimte wordt ontstoken door een brandende, turbulente vrijstraal; deze kan worden veroorzaakt door ontsteking in een gedeeltelijk omsloten procesinstallatie opgesteld in die ruimte, zoals bijv. een oven.

In één in figuur 6 opgenomen geval (de rechthoek) was de graad van turbulentie in de ruimte tentijde van de explosie zeer hoog als gevolg van het krachtig inspuiten van water door de brandweer (20).

2.3 Aanbevelingen

Op grond van zowel explosiebelastingen gemeten tijdens experimenten als explosiebelastingen bepaald uit ongevallen kan voor gasexplosies optredend binnen ruimten een schatting worden gemaakt van de maximaal te verwachten explosiebelasting (d.w.z. maximale overdruk).

Een goed hanteerbare methode hierbij is de "safe recommendation" opgesteld in (7). Deze methode heeft als voordeel dat zowel de grootte van de aanwezige ontlastopeningen in verhouding tot de

grootte van de ruimte als ook de reaktiviteit van het brandbare gas in rekening kunnen worden gebracht. De op basis van experimenten opgestelde "safe recommendation" voor initieel gesloten ruimten is vergeleken met maximale drukniveau's afgeleid uit schade aan gebouwen door interne gasexplosies. Hierbij blijkt de recommendation voor maximale drukken optredende in betrekkelijk lege gebouwen zoals woonhuizen, scholen en stookruimten goed te voldoen en kan als zodanig worden aanbevolen.

De drukken berekend uit schadeanalyses van industriële explosies blijken echter minder goed te worden beschreven door de "safe recommendation". Met name voor grote ontlastopeningen worden de maximaal opgetreden drukken onderschat. Mogelijkerwijs zijn vlamversnellingen onder invloed van obstakels in de ruimte hier debet aan. De niet door de "safe recommendation" gedekte experimentele gegevens uit (12) zijn hier een extreem voorbeeld van. Door de vele obstakels en inefficiënte plaats van ontlasting werden zeer hoge drukken bereikt. Situaties als in de experimenten beschreven in (12) zullen in de praktijk zelden voorkomen en dienen ook zoveel mogelijk worden vermeden. Voor de aanbeveling is met dit soort situaties dan ook geen rekening gehouden.

Op bepaalde plaatsen in een ruimte kunnen deze situaties echter wel bestaan met eventueel de kans van een felle ontsteking vanuit deze plaats naar het mengsel in de rest van de ruimte waardoor hogere drukken kunnen ontstaan.

Vanwege de uitzonderlijke omstandigheden tijdens het ongeval beschreven in (20; het rechthoekje in fig. 6) zijn de effecten van dit ongeval niet betrokken in onderstaande aanbevelingen. Onderstaande aanbevelingen zijn dan ook niet van toepassing op gebouwen waarbinnen onder normale omstandigheden een hoge mate van turbulentie heerst (bijv. door snel draaiende grote ventilatoren in deze gebouwen).

Op grond van bovenstaande wordt aanbevolen voor ruimten welke lijken op woonhuizen, scholen en stookruimten (bijv. kantoren) te dimensioneren volgens de "safe recommendation" voor initieël gesloten ontlastopeningen : d.i. als P_s de maximale statische overdruk is die de constructie kan weerstaan dimensioneer de ontlastopening dan volgens :

- Voor maximale sterkten equivalent aan een statische overdruk

$$P_s \geq 10^5 \text{ Pa} :$$
$$\bar{A}/\bar{S}_o \geq (2,4 \cdot 10^5 / P_s)^{1,43} \quad (7)$$

- Voor maximale sterkten equivalent aan een statische overdruk

$$P_s \leq 10^5 \text{ Pa} :$$
$$\bar{A}/\bar{S}_o \geq (12,3 \cdot 10^5 / P_s)^{0,5} \quad (8)$$

Voor meer op industriehallen gelijkende gebouwen moet de maximale sterkte minimaal equivalent zijn aan het kunnen weerstaan van een statische overdruk van $P_s = 3 \cdot 10^4 \text{ Pa}$. Dit minimum is voldoende indien

$$\bar{A}/\bar{S}_o \geq 6,4 \quad (9)$$

Relatie (9) is als eis toegevoegd om de voor industriële installaties gevonden drukken hoger dan de "safe recommendation" voor grote ontlastopeningen te kunnen dekken (fig. 6).

In tegenstelling tot de "safe recommendations" uit (7) is het ook mogelijk bovenstaande relaties omgekeerd te gebruiken. Dit kan bijvoorbeeld nodig zijn indien in een ruimte met bekende eigenschappen een explosiebestendige constructie dient te worden gebouwd (bijv. een controlekamer of een scheidingsmuur).

De sterkte van deze constructie moet minimaal equivalent zijn aan de volgende statische overdrukken (met (\bar{A}/\bar{S}_o) betrokken op de omhullende ruimte) :

Voor $\bar{A}/\bar{S}_0 < 3,5$:

$$P_s \geq 2,4 \cdot 10^5 (\bar{A}/\bar{S}_0)^{-0,7} \quad \text{Pa} \quad (10)$$

Voor $\bar{A}/\bar{S}_0 \geq 3,5$:

$$P_s \geq 12,3 \cdot 10^5 (\bar{A}/\bar{S}_0)^{-2} \quad \text{Pa} \quad (11)$$

Voor industriële installaties wordt als eis hieraan toegevoegd dat als

$$\bar{A}/\bar{S}_0 > 6,4$$

$$P_s \geq 0,3 \cdot 10^5 \text{ Pa} \quad (12)$$

Opgemerkt moet worden dat de explosiebestendig te bouwen constructies binnen een omhullende ruimte aanzienlijk sterker moeten zijn dan de bezwijkdruk van de muren van de omhullende ruimte. Door de grote massatraagheid van de muren en door eventuele toename van turbulentie binnen de ruimte als gevolg van het wegvallen van muren, zal de druk blijven toenemen zoals ook uit de schadeanalyses bleek. Indien voldaan wordt aan bovenstaande relaties is de constructie veilig.

Verder dient het volgende te worden gesteld :

- De gegeven aanbevelingen zijn alleen geldig voor bijna kubische ruimten (lengte - diameter verhouding $L/D < 5$)
- De ontlastopeningen moeten van zo licht mogelijke explosiepanelen (massa $< 10 \text{ kg/m}^2$) en bij voorkeur van breekplaten worden voorzien
- De effectieve aanspreekdruk van deze panelen of breekplaten moet zo laag mogelijk zijn en ruim onder de bezwijkdruk van de te ontlasten ruimte liggen

- De plaats van de ontlastopeningen moet zodanig zijn dat ze zo effectief mogelijk kunnen werken (korte weglengte tussen plaats van ontsteking en plaats van ontlasting; gebruik meerdere ontlastopeningen)
- Het aantal obstakels in de ruimte moet zo klein mogelijk worden gehouden. Ook moet een hoge mate van initiële turbulentie worden vermeden
- In de relaties is geen rekening gehouden met belastingen door vliegende brokstukken en scherven

Een aspect dat nog niet aan de orde is gekomen en waarover ook nog niet zoveel bekend is is de sterkte van drukgolven afkomstig van drukontlaste ruimten.

Bekend is dat er in de nabijheid van de ontlastopening sprake is van een sterk richtingseffect (21). Bij onderzoek aan drukontlasting van stofexplosies is gevonden dat bij relatief langzaam verlopende explosieprocessen buiten de ruimte hogere drukken optreden dan binnen de ruimte als gevolg van ontbranding van een door het drukontlastproces naar buiten gedrongen turbulente brandbare wolk (22). Het verdient aanbeveling aan dit aspect in de toekomst meer aandacht te besteden.

3. VRIJE GASWOLKEXPLOSIES

Als een brandbaar gas vrijkomt in de atmosfeer (dus niet in een gebouw maar daarbuiten) en explodeert kan men voor wat de explosiebelasting op gebouwen betreft twee situaties onderscheiden.

1. het gebouw bevindt zich ten tijde van de explosie in de brandbare gaswolk
2. het gebouw bevindt zich ten tijde van de explosie niet in de brandbare gaswolk

De explosie belasting zal in het eerste geval het grootste zijn.

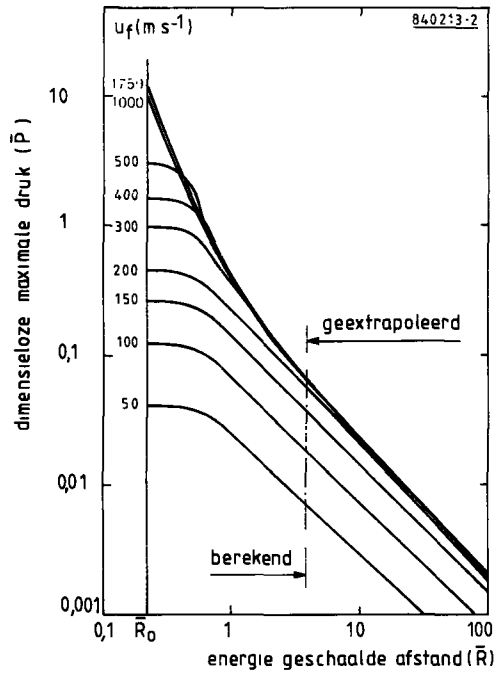
Bij eenzelfde explosie zal in het tweede geval (gebouwen welke zich buiten de gaswolk bevinden) de explosiebelasting afnemen met toenemende afstand tot het explosiecentrum. Het beoordelen of een gebouw zich ten tijde van een gaswolkexplosie al of niet binnen de brandbare gaswolk zal bevinden is moeilijk. Diverse parameters zijn van invloed, zoals de hoeveelheid vrijgekomen gas, aard van de bron (instantaan of continu), windrichting en windsnelheid, weertype, ontstekingsstijdstip, aanwezigheid van obstakels etc. Deze problematiek valt echter buiten het raamwerk van dit rapport.

3.1 Explosiebelasting binnen de gaswolk

Explosiebelastingen zullen in het geval dat het gebouw zich ten tijde van de explosie binnen het brandbare gedeelte van de gaswolk bevindt het grootste zijn. Buiten de wolk zullen in de wolk gegenereerde overdrukken doorsferische expansie afnemen vanwege het ontbreken van een onderhoudende chemische reactie.

Modellen welke de maximale druk binnen een exploderende gaswolk in een omgeving met gegeven installaties adequaat kunnen berekenen bestaan nog niet, hoewel ontwikkelingen in die richting gaande zijn (23).

Modellen welke op grond van gegeven al of niet constante vlam-snelheden maximale drukken zowel binnen als buiten de wolk kunnen berekenen zijn inmiddels wel beschikbaar (zoals CLOUD (24) en BLAST (25)). Deze modellen lossen de gasdynamische behouds-vergelijkingen op onder aanname van bolsymmetrie (d.w.z. halfbolvormige wolken). In fig. 7 is voor enkele constante vlam-snelheden aangegeven hoe de maximale druk verloopt als functie van de afstand zoals berekend met de 'BLAST'-code. De figuur laat zien dat bij constante vlam-snelheid de maximale druk op



Figuur 7. Dimensieloze druk \bar{P} als functie van de dimensieloze afstand \bar{R} zoals berekend met de BLAST-code voor verschillende constante vlamsnelheden

$$\bar{P} = \frac{P - P_0}{P_0}$$

met P = piekdruk
 P_0 = omgevingsdruk

$$\bar{R} = \frac{R}{(E/P_0)^{1/3}}$$

met R = afstand tot het explosiecentrum
 E = verbrandingsenergie van het gas in de wolk

U_f = vlamsnelheid

alle punten binnen de wolk dezelfde is (tot aan $2 R_0$, met R_0 als oorspronkelijke wolkstraal; door expansie is bij halfbolvormige wolken de uiteindelijke wolkstraal ongeveer twee keer zo groot als de oorspronkelijke wolkstraal).

Indien echter de vlam versnelt of vertraagt, hetgeen in de praktijk veelal het geval zal zijn is de maximale druk binnen de wolk niet overal gelijk (26).

De vereiste invoergegevens van deze modellen, de vlamsnelheden zijn a priori echter niet bekend. Daarnaast is de aanname van bolsymmetrie zelden terecht, daar de meeste gassen zwaarder zijn dan lucht en een platte, pannekoekvormige wolk zullen vormen (27). Het gebied dat binnen de wolk komt te liggen is derhalve aanzienlijk groter dan bij een halfbolvormige wolk. Toename van de wolkstraal tijdens de explosie als gevolg van expansie van verbrandingsprodukten is echter nihil.

Schadeanalyses n.a.v. accidentele vrije gaswolkexplosie zoals (28,29 en 30) geven aanwijzingen voor het optreden van plaatselijk zeer hoge drukken en derhalve hoge vlamsnelheden in de wolk. Experimenteel onderzoek heeft zich daarom het laatste decenium toegespitst op het zoeken van karakteristieke omstandigheden waarbij hoge vlamsnelheden verwacht kunnen worden. Zowel klein als grootschalig onderzoek hebben aangetoond dat indien een platte gaswolk liggend op een vlak en open terrein wordt ontstoken (laag energetische ontstekingsbron) vlamsnelheden laag blijven (max. 30 ms^{-1} (31,32)).

Indien kunstmatig obstakels en gedeeltelijke opsluiting (door bijv. twee evenwijdige vlakken waartussen de obstakels zijn geplaatst) worden aangebracht nemen de vlamsnelheden daarentegen als functie van de afgelegde afstand exponentieel toe. Dit vlamversnellingsmechanisme kan als volgt worden beschreven. De vlam creëert voor zich uit een stromingsveld. In dit stromingsveld ontstaan bij obstakels en begrenzingen snelheidsgradienten. Achter de obstakels ontstaat turbulentie. De vlam

versnelt bij aankomst in het verstoorde stromingsveld door toename van vlamoppervlakte (zowel door de snelheidsgradient, als door de turbulentie). Hierdoor neemt ook de stromings-snelheid van het gas voor de vlam toe waardoor turbulentie intenser en snelheidsgradiënten groter worden. Hierdoor zal de vlamsnelheid opnieuw toenemen, etc. Bij vergaande vlamsnel-lingen zal het gehele stromingsveld vlak voor de vlam tur-bulent zijn en zal (bij een voldoende kleine turbulentieschaal) het vlamversnellingsproces geheel door turbulente transport-verschijnselen worden bepaald (d.w.z. de vlamoppervlakte vergrotingen spelen geen rol meer; de vlamsnelheid is op-gebouwd uit een expansiesnelheid en een turbulente brandsnel-heid) (33,34,35).

Indien de divergentie van het voor de vlam uit gegenereerde stromingsveld wordt beperkt doordat de vlam gedeeltelijk is opgesloten (bijv. een vlam voortplantend in een systeem be-staande uit twee evenwijdige vlakken of een buisvormige con-structie) zullen verstoringen in het stromingsveld groter en in-tenser zijn dan in het niet-opgesloten geval. Bovendien zal de invloed van deze verstoringen op de vlam relatief groot zijn omdat de vlamoppervlakte beperkt is. In geval van gedeeltelijke opsluiting zullen derhalve over eenzelfde afstand veel hogere vlamsnelheden worden bereikt dan in niet-opgesloten obstakel-configuraties (32,36 en 37).

Indien obstakels en opsluiting in voldoende mate aanwezig blijven kan omslag naar detonatie plaatsvinden (38). Dat een detonatie na uittreden van de gedeeltelijk opgesloten con-figuratie ook doorloopt in de rest van de (niet-opgesloten) gaswolk is zeer onwaarschijnlijk. Slechts onder zeer stabiele atmosferische omstandigheden waarbij het gasmengsel in de wolk zeer homogeen gemengd is zou een gaswolkdetonatie kunnen ontstaan en in het geval van zeer reactieve gassen (acetyleen, ethyleenoxide). (39).

Indien geen omslag naar detonatie plaatsvindt in de gedeeltelijk opgesloten configuratie omdat zijn afmetingen hiervoor te gering zijn zal de vlamsnelheid na uittreden weer afnemen door sterke divergentie van het stromingsveld voor de vlam en afwezigheid van obstakels om verstoringen in het stromingsveld te veroorzaken (zie bijv. (33).) Hoge drukken worden derhalve alleen gegenereerd op plaatsen met ruimtelijke vrij compacte configuraties van objecten en plaatsen waar sprake is van gedeeltelijke opsluiting van de wolk.

Op niet opgesloten plaatsen in de gaswolk zullen maximale overdrukken worden bepaald door druk- en schokgolven (blast) afkomstig van de gedeeltelijk opgesloten delen van de wolk en niet door verbranding van de gaswolk terplekke. Dit is als zodanig herkend en dat heeft geleid tot de zogenaamde Multi-Energie methode (40). M.b.v. deze methode kan de blast afkomstig van opgesloten gedeelten worden berekend. Explosies in opgesloten gedeelten worden hiertoe gemodelleerd door een ideale gas-explosie. Het omsloten gedeelte wordt voorgesteld als een halve bol op het aardoppervlak met een equivalente inhoud. Het gasmengsel wordt stoechiometrisch ondersteld en de vlamsnelheid constant. Blast op een gegeven afstand kan dan worden berekend met behulp van methoden zoals "BLAST" (25). Afstanden zijn dimensieloos gemaakt m.b.v. de in de gasexplosie betrokken hoeveelheid verbrandingsenergie zoals in fig. 7 is aangegeven. Een probleem is nog de bepaling van de initiële sterkte van de blast d.w.z. de maximale druk aan de rand van de modelgaswolk (voorstellende het gas in het opgesloten gedeelte). Zoals reeds eerder opgemerkt kunnen experimenten hiertoe een belangrijke bijdrage leveren. In tabel 1 zijn voor een aantal experimentele configuraties met gedeeltelijke opsluiting de maximale drukken waargenomen in deze systemen weergegeven.

Tabel 1. Maximale drukken zoals waargenomen in diverse experimenten uitgevoerd in configuraties met obstakels en gedeeltelijke opsluiting

Configuratie	gassoort	max. druk (kPa)	referentie
Buis met obstakels			
(L/D = 4)	methaan	400	(12)
Idem (L/D = 4)	propaan	1400	(41)
Idem (L/D = 19)	methaan	1000	(43)
Idem (L/D = 220)	waterstof	detonatie	(38)
Twee evenwijdige platen met obstakels			
(L/D = 15)	methaan	300	(42)
Idem (L/D = 17)	etheen	70	(35)
Idem (L/D = 21)	methaan	64	(34)

Uit de tabel blijkt dat met name in buisachtige systemen zeer hoge drukken bereikt kunnen worden (nauwelijks divergentie van het stromingsveld voor de vlam; kleine vlamoppervlakte). In obstakelconfiguraties bestaande uit twee evenwijdige platen met obstakels daartussen kunnen afhankelijk van de opstelling van obstakels drukken groter dan 50 kPa verwacht worden.

De in fig. 7 weergegeven druk-afstandsrelaties voor diverse vlamsnelheden c.q. maximale druk in de gaswolk laten zien dat voor drukken hoger dan ca. 50 kPa de maximale druk op enige afstand van de wolk min of meer onafhankelijk is van de initiele sterkte. Deze eigenschap maakt het mogelijk de maximale druk buiten de modelgaswolk (d.w.z. buiten omsloten en/of met obstakels gevulde gedeelten) redelijk nauwkeurig te schatten mits aanname van hoge initiele sterkte (>50 kPa) gerechtvaardigd is (40)

Gezien de hoge drukken bereikt in de experimentele opstellingen lijkt dit inderdaad het geval. Om te zien of de praktijk aan deze verwachting voldoet is een onderzoek gedaan naar maximale drukken berekend uit schade opgetreden als gevolg van gaswolkexplosies in de industrie. De resultaten van dit onderzoek zijn weergegeven in tabel 2.

Tabel 2. Maximale drukken opgetreden binnen de gaswolk tijdens gaswolkexplosies in de industrie

Jaartal	plaatsaanduiding	stofnaam	max. druk in wolk (kPa) (kPa)	pos. fase- duur (ms)	ref
1954	Portland (V.S.)	LPG	24-28	-	(44)
1961	Freeport (V.S.)	cyclohexaan	13,7	-	(44,45)
1966	Raunheim (W. Duitsland)	methaan	<10	-	(46)
1968	Pernis (Nederland)	lichte kool- water stoffen	>30	-	(46)
1970	Port Hudson (V.S.)	propaan	detonatie	-	(47)
1974	Flixborough (Gr.-Britt)	cyclohexaan	135-200	~ 200	(29,45)
1975	Roosendaal (Nederland)	benzine	25	-	(48)
1975	Beek (Nederland)	propeen	50-100	~ 75	(30)
1978	Dahran (Saoudi-Arabie)	LPG	52	-	(45)

Uit deze tabel blijkt dat ook in vrije gaswolkexplosies overdrukken van ongeveer 50 kPa en hoger kunnen optreden. Met name werden hoge drukken bereikt in de explosies van Beek en Flixborough op plaatsen waarbij sprake was van veel opsluiting (29,30).

Hieruit kan men opmaken dat voor gebouwen welke weliswaar in de wolk, maar op enige afstand van configuraties met partiele opsluiting zijn gelegen de maximale druk kan worden bepaald m.b.v. de bovenlijn van de curves gegeven in fig. 7. De energie welke gebruikt wordt om de afstand te schalen is de verbrandings-energie van het gedeelte gaswolk dat binnen de configuratie met partiele opsluiting hangt.

De maximale druk op gebouwen vlakbij of deel uitmakend van compact gebouwde of gedeeltelijk opgesloten procesapparatuur kan getuige de getallen gegeven in de tabellen 1 en 2 liggen tussen 0 en 2000 kPa (detonatedruk).

Voor een aantal installaties zal de maximale druk gegenereerd door een explosie in en om de installatie lager zijn dan 50 kPa omdat zijn omvang gering is of door zijn open structuur. Zo is bijv. in (32) aangetoond dat tankparken als geheel geen hoge explosiedrukken teweeg zullen brengen. Op grond van de huidige kennis echter is voor de meeste installaties nog niet aan te geven hoe hoog de maximale druk binnen de installatie zal zijn. Het verdient derhalve aan te bevelen de meeste installaties als compact gebouwd en gedeeltelijk opgesloten te beschouwen.

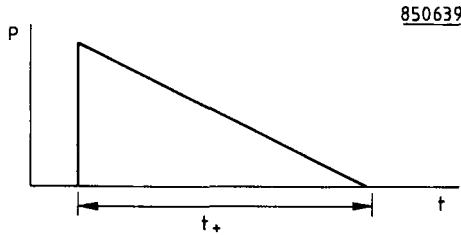
In tabel 2 is een ongeval genoemd waarbij volgens de onderzoekers de enig mogelijk verklaring van waargenomen effecten een detonatie is: ondanks afwezigheid van voldoende opsluiting en obstakels werden zeer hoge drukken bereikt (47)

In (39) wordt beschreven dat gaswolkdetonaties alleen mogelijk zijn onder speciale condities. Deze condities betreffen met name de homogeniteit van het gasmengsel dat qua samenstelling uiteraard binnen de detonatiegrenzen moet liggen. In Port Hudson zou de gaswolkdetonatie (na een zeer krachtige ontsteking) zich inderdaad hebben kunnen instandhouden door de "ideale" gasmengselcondities

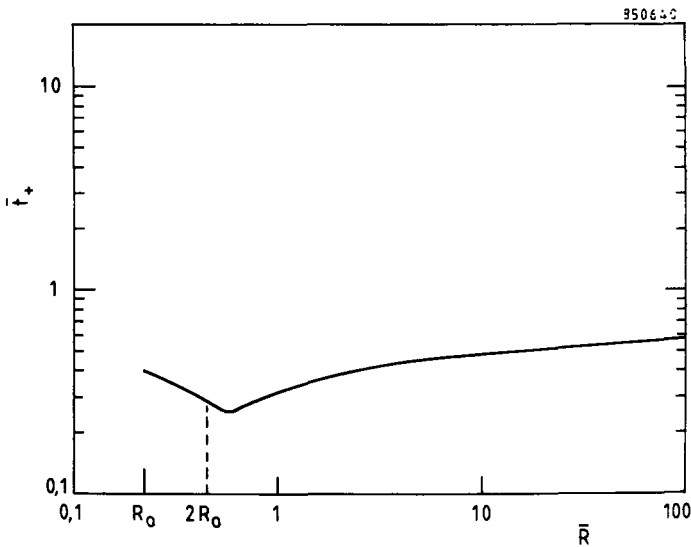
ten tijde van ontsteking (spray release, rustig weer, een dal waarin het zware gas zich ophoopte).

In de Multi-Energie methode wordt volgens de voorlopig gedefinieerde criteria een gaswolkdetonatie alleen voor mogelijk gehouden voor gassen met een brandsnelheid $> 1 \text{ ms}^{-1}$, zoals acetyleen en waterstof. Dat in de Port Hudson explosie propaan mogelijk toch detoneerde wordt geweten aan de speciale omstandigheden ter plekke ten tijde van het vrijkomen. Deze condities worden in de Multi-Energie methode uitgesloten geacht en daarom wordt ook in dit rapport gaswolkdetonaties voor gewone koolwaterstoffen (inclusief propaan) als niet waarschijnlijk beschouwd. Wel kan in sterk opgesloten en met obstakels gevulde delen van de wolk een detonatie ontstaan. Deze loopt echter niet door in het resterende deel van de gaswolk en word qua explosiedruk op enige afstand gevoeld als een snelle deflagratie (fig. 7).

In tegenstelling tot explosies binnen bepaalde constructies is de tijdsduur van de explosiebelasting t.g.v. vrije gaswolk-explosies niet gerelateerd aan de eigentrillingstijd van explosiebestendig te bouwen constructies. Derhalve dienen zowel de vorm van de belasting als zijn tijdsduur bekend te zijn. Uitgaande van hoge initiele drukken op grond van het voorgaande, kan worden aangenomen dat de belasting een schokgolf is waarvan de vorm in fig. 8 is aangegeven. Behalve een positieve fase t_+ bezit de schokgolf ook een negatieve fase. Deze laatste wordt echter niet beschouwd. Net als de overdruk kan ook de positieve faseduur van de schokgolf m.b.v. blastsimulatiemodellen zoals BLAST (25) worden berekend. In Fig. 9 is het berekende verband tussen positieve faseduur en afstand tot het explosiecentrum voor een schokgolf met een initiele sterkte van 100 kPa weergegeven. In de berekening is de gaswolk weer als halfbolvormig ondersteld.



Figuur 8. Vorm van een schokgolf



Figuur 9. Dimensieloze positieve faset₊ van een schokgolf (initieel 100 kPa) veroorzaakt door een ideale gaswolkexplosie als functie van de door de schokgolf afgelegde afstand tot het explosiecentrum \bar{R} .

$$\bar{t}_+ = \frac{t_+ \cdot C_0}{(E/P_0)^{1/3}}$$

$$\bar{R} = \frac{R}{(E/P_0)^{1/3}}$$

C_0 = geluidssnelheid

t_0^+ = positieve faset

E^+ = verbrandingsenergie in de gaswolk

P_0 = omgevingsdruk

R = afstand tot het explosiecentrum

In twee van de ongevallen vermeld in tabel 2 (Beek en Flixborough) is een schatting gemaakt van de positieve fase-duur van de druk-golf dicht bij het explosiecentrum.

Op grond van de hoeveelheid gas betrokken in de felle explosie, dus de explosie van het sterk opgesloten en binnen compact gebouwde installaties hangende deel van de gaswolk kan de positieve fase-duur worden terugberekend m.b.v. fig. 9. Uit deze berekening volgt voor de Beek explosie een positieve fase-duur van 76 ms en voor Flixborough een positieve fase-duur van 176 ms hetgeen goed overeenkomst met de geschatte waarden.

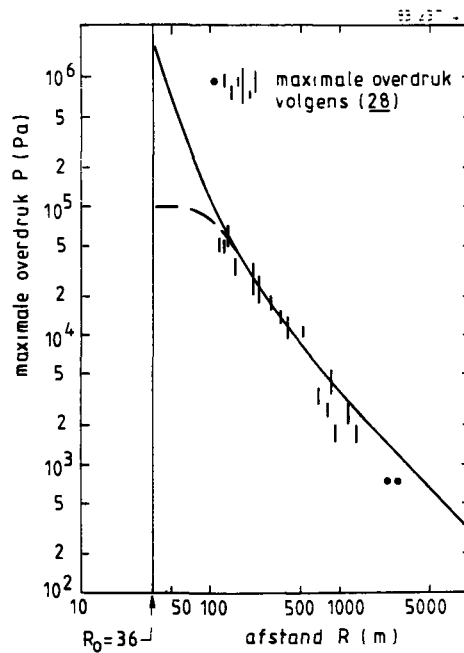
3.2 Explosiebelasting buiten de gaswolk

Constructies welke zich ten tijde van de explosie buiten de wolk bevinden kunnen voor wat explosiebelasting betreft gelijk worden behandeld als constructies binnen de wolk op enige afstand van partieel opgesloten wolkdelen. Uitgaande van de verbrandingsenergie van het opgesloten wolkgedeelte en een initiele maximale explosiedruk van meer dan 50 kPa kan op een gegeven afstand de maximaal invallende druk worden berekend met één overdruk-afstandsrelatie (bovenlijn fig. 7).

In het algemeen verloopt de druk als functie van de afstand akoestisch, d.w.z. bij een verdubbeling van de afstand tot het explosiecentrum zal de druk zijn gehalveerd. In een grafiek waarin uitstaat $\log \bar{P}$ als functie van $\log \bar{R}$ zoals fig. 7, is dit een lijn onder een hoek van 135° met de \bar{R} -as.

In fig. 10. is de maximale statische overdruk veroorzaakt door de Flixborough explosie (geschat op grond van schade (28)) als functie van de afstand vergeleken met het theoretische verband tussen druk en afstand. Uitgaande van een initiele druk van 100 kPa en een hoeveelheid brandbare stof gemengd met lucht in een volume, overeenkomend met het volume van een dichtgepakte

configuratie van procesapparatuur, in (28) aangeduid als centrum van de explosie blijken theorie en praktijk goed met elkaar overeen te stemmen zowel qua maximale overdruk als overdruk-afstandsrelatie (40).



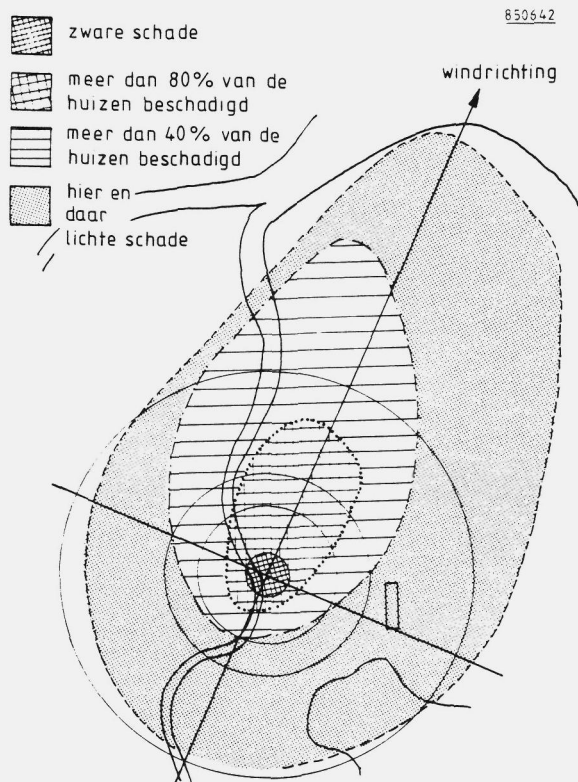
Figuur 10. Overdruk-afstandsrelatie voor de Flixborough-
- explosie in vergelijking met de theoretische
relatie.

De overdruk-afstandsrelatie kan echter van zijn akoestisch gedrag afwijken om een tweetal redenen :

- a) asymmetrie van het vlamfront, d.w.z. door bijv. opsluiting wijkt de vorm van het vlamfront van de bolsymmetrie af, waardoor ook de gegenereerde blast initieel asymmetrisch is: in bepaalde richtingen neemt de maximale overdruk sneller of langzamer af dan akoestisch (49). Over dit verschijnsel is echter nog niet veel bekend en het is derhalve niet in rekening gebracht.
- b) inversie; In blastsimulatiemodellen zoals BLAST (25) is de atmosfeer voorgesteld als zijnde in rust en qua temperatuur uniform. In werkelijkheid echter zal er sprake zijn van wind en een windprofiel en een temperatuur die als functie van de hoogte varieert. Door wind en windprofiel bijvoorbeeld kan een schadebeeld een asymmetrische vorm krijgen zoals bijvoorbeeld in fig. 11. te zien is.
- Ook kunnen door temperatuurinversie in hogere luchtlagen divergerende en oorspronkelijk van de aarde afbewegende drukgolven weer naar aarde terugkeren, convergeren en op grotere afstanden dan op grond van het blastsimulatiemodel kon worden verwacht schade veroorzaken (51).
- De drukk niveau's waarbij dit soort effecten belangrijk worden zijn echter dermate laag dat ze voor de huidige studie niet van belang worden geacht en derhalve niet in rekening zijn gebracht.

3.3 Schokgolfreflecties

In tegenstelling tot explosies in ruimten waar de druk zich uniform opbouwt moet bij vrije gaswolkexplosies rekening worden gehouden met druk - en schokgolfreflecties op objecten.



Figuur 11. Asymmetrisch schadepatroon door invloed van de wind bij de Flixborough explosie (50).

Gezien de mogelijke sterkte van opgewekte drukgolven zal al gauw opsteiling tot schokgolven plaatsvinden, zodat op schokgolf-reflekties moet worden gerekend.

Als een schokgolf loodrecht op een bepaald vlak invalt wordt de bewegingsrichting van deeltjes welke zich in het schokfront bevinden abrupt omgekeerd. De snelheid van de gereflekteerde deeltjes blijft gelijk aan de oorspronkelijke snelheid en er ontstaat een nieuw schokfront welke door een door de invallende schok voorgecomprimeerd medium beweegt. De piekoverdruk aan de wand kan worden berekend onder de aanname dat het medium zich als een ideaal gas gedraagt (52):

$$\bar{P}_r = 2 \bar{P}_s + \frac{(\gamma + 1)\bar{P}_s^2}{(\gamma - 1)\bar{P}_s + 2\gamma} \quad (13)$$

$$\text{met } \bar{P}_r = \frac{\Delta P_r}{P_o} \quad \begin{array}{l} \text{dimensieloze gereflekteerde} \\ \text{piekoverdruk} \end{array}$$

$$\bar{P}_s = \frac{\Delta P_s}{P_o} \quad \text{dimensieloze piekoverdruk}$$

$$\Delta P_r = \text{gereflekteerde piekoverdruk}$$

$$\Delta P_s = \text{piekoverdruk invallende schok}$$

$$\gamma = \text{verhouding specifieke warmten}$$

Bij dimensionering van explosiebestendig te bouwen constructies dient ter dege met schokgolffreflecties te worden rekening gehouden.

3.4 Aanbevelingen

Samengevat moge uit voorgaande blijken dat voor explosiebelasting het feit of een explosiebestendig te bouwen constructie wel of niet binnen een brandbare gaswolk staat van ondergeschikt belang is. Wel van belang is de afstand van deze constructie tot dichte configuraties van objecten (compact gebouwde procesapparatuur) en configuraties waarin een gaswolk gedeeltelijk opgesloten kan

zijn (portaalconstructie). Als de explosiebestendig te bouwen constructie vlakbij een dergelijke installatie staat of daar zelfs deel van uitmaakt moet de constructie bestand zijn tegen de druk welke maximaal binnen de configuratie zou kunnen optreden. Staat de constructie op enige afstand van compact gebouwde configuraties dan dient ze bestand te zijn tegen de druk- en schokgolven (blast) welke opgewekt binnen deze configuratie zich in de omgeving uitbreiden en qua amplitude als functie van de afstand afnemen. Detonatie van de gehele gaswolk wordt uitgesloten geacht.

Bij de dimensionering dient rekening te worden gehouden met druk- en schokgolfreflecties.

Voor de te verwachten explosiebelasting kan men dus twee situaties onderscheiden t.w.

1. de explosiebestendig te bouwen constructie staat dichtbij of maakt deel uit van compact gebouwde installaties
2. de constructie staat op enige afstand van compact gebouwde configuraties.

Voor de eerste situatie kan men op grond van met name casuïstiek een maximale overdruk van ongeveer 100 kPa verwachten. Experimenten laten zien dat onafhankelijk van de gassoort nog veel hogere drukken mogelijk zijn, terwijl in een aantal situaties slechts veel lagere maximale overdrukken te verwachten zijn. Het voorspellen van hoe hoog de maximale druk binnen een gegeven configuratie zal zijn is op grond van de huidige stand van de wetenschap veelal niet mogelijk. Daarom wordt aanbevolen te dimensioneren op een invallende overdruk van 100 kPa. Omdat in deze situaties veelal goed aan te geven zal zijn van welke kant de schokgolf de constructie zal treffen behoeven alleen deze muren gedimensioneerd te worden op schokgolfreflecties.

Uitgaande van een invallende overdruk van 100 kPa is dit volgens formule (13) een druk van 275 kPa. Dak en overige muren behoeven slechts gedimensioneerd te zijn op een druk van 100 kPa, mits deze muren parallel van de voortplantingsrichting van de schokgolf zijn gebouwd. Daarnaast dient voor deze muren rekening te worden gehouden met mogelijke schokgolven afkomstig van andere al of niet dichtbij gelegen compact gebouwde of gedeeltelijk omsloten installaties. De reflekterende piekoverdruk zou de ontwerpdruk van 100 kPa kunnen overtreffen.

De vorm van de belasting is een schokgolf waarvan de druk na het bereiken van de piekoverdruk lineair met de tijd afneemt (zie fig. 8). De positieve fase duur van de belasting bedraagt: op grond van fig. 9 :

$$t_+ = \frac{0,3 (E/P_0)^{1/3}}{C_0} \quad (14)$$

met E = verbrandingsenergie in de model
gaswolk. Voor de verbrandingsenergie
van gewone koolwaterstoffen geldt bij
benadering $E = 3,5 \text{ MJ/m}^3$
 C_0 = geluidssnelheid
 P_0 = omgevingsdruk

Hierbij is gekozen voor de positieve fase duur gegenereerd aan de rand van de geëxpandeerde modelgaswolk.

Om het begrip "dichtbij" in deze nader te specificeren :

Dichtbij is als de explosiebestendige constructie tegen een compacte of gedeeltelijk opgesloten configuratie is aangebouwd of als de constructie op een afstand gemeten tot het centrum (op grondniveau) van de compacte configuratie staat kleiner dan de diameter van de compacte configuratie.

Staat de explosiebestendige constructie op enige afstand van compact gebouwde en/of gedeeltelijk omsloten installaties (situatie 2) dient "slechts" met schokgolven afkomstig van deze installaties rekening te worden gehouden.

De maximaal te verwachten druk kan m.b.v. de M.E. methode worden berekend (40). Voor de druk in compact gebouwde of gedeeltelijk omsloten installaties gaat men uit van 100 kPa (zoals hiervoor al werd aangenomen). Bij deze of hogere inwendige drukken is de maximale druk in een schokgolf op enige afstand van de compacte configuratie gelijk aan de bovenste lijn van de druk-afstands relaties gegeven in fig. 7 (voor $\bar{R} > 1$).

In formule kan de maximale druk op een bepaalde afstand worden berekend m.b.v. :

$$\begin{aligned} \bar{P} &= 4,7 \cdot 10^4 \bar{R}^{-0,92} && \text{voor } 0,44 < \bar{R} < 1,1 \\ \bar{P} &= 4,87 \cdot 10^4 \bar{R}^{-1,316} && \text{voor } 1,1 < \bar{R} < 3,3 \\ \bar{P} &= 3,33 \cdot 10^4 \bar{R}^{-1} && \text{voor } \bar{R} > 3,3 \end{aligned} \quad (15)$$

met $\bar{P} = \frac{P - P_0}{P_0}$ met P de maximale druk
en P_0 de omgevingsdruk

en $\bar{R} = R / (E/P_0)^{1/3}$ met R de afstand tot het centrum
v.d. wolk
en E de totale verbrandingsenergie
van het gas in de modelwolk
(= het gas in de gedeeltelijk
omsloten of compact ge-
bouwde installatie)

Voor $\bar{R} < 0,44$ is de druk gelijk aan 100 kPa. In dit geval hebben we situatie 1: De constructie staat vlakbij of maakt deel uit van een compact gebouwde of gedeeltelijk omsloten installatie.

De bij de op een bepaalde afstand gegenereerde schokgolf behorende positieve faseduur kan worden afgeleid uit fig. 9. In de berekening van de positieve faseduur als functie van de afstand zoals gegeven in deze figuur is uitgegaan van een initiële druk van 100 kPa evenals bij de druk-afstandsrelaties gegeven door formule (15).

Het verband van fig 9 kan door de volgende relaties worden benaderd :

$$\begin{aligned} \bar{t}_+ &= 0,34 \bar{R}^{0,24} && \text{voor } 0,44 < \bar{R} < 3,3 \\ \text{en } \bar{t}_+ &= 0,41 \bar{R}^{0,074} && \text{voor } \bar{R} \geq 3,3 \end{aligned} \quad (16)$$

$$\text{met } \bar{t}_+ = \frac{t_+ c_o}{(E/p_o)^{1/3}} = \text{dimensieloze positieve faseduur}$$

De vorm van de schokgolfbelasting is gegeven in fig. 8.

Voor blastschaling is de grootte van de installatie (zijn volume) van belang. Hierbij speelt derhalve de vraag wanneer bepaalde installaties als één of als afzonderlijke bronnen van blast moeten worden beschouwd (het is onwaarschijnlijk dat twee als afzonderlijk te beschouwen installaties tegelijkertijd exploderen).

Een explosie qua sterkte toegenomen in een installatie kan in een naburige installatie in kracht blijven toenemen als hun onderlinge afstand voldoende klein is. Is de afstand te groot dan zal de explosie zijn sterkte verliezen en pas bij aankomst bij de naburige installatie weer fel worden. Hoe groot een afstand moet zijn om twee "klappen" te krijgen i.p.v. één is op dit moment nog moeilijk te zeggen. Aanbevolen wordt echter dat als installaties op een afstand staan kleiner dan de grootste

diameter van de twee installaties ze als één installatie dienen te worden beschouwd. Bij grotere afstanden kunnen de installaties als afzonderlijk worden beschouwd.

Bij het dimensioneren van de explosiebestendige constructie dienen alle afzonderlijke installaties in de omgeving welke mogelijkerwijs een bron van blast kunnen zijn te worden betrokken.

Wederom is het wenselijk schokgolfreflekties in rekening te brengen gebruikmakend van formule (13). Berekening van de belasting bij scheve inval van de schokgolf als ook inval in t.o.v. de explosieconcave hoeken e.d. is zeer ingewikkeld. Ter simplificatie wordt aanbevolen om als de hoek van inval bekend is te dimensioneren op loodrechte inval als deze hoek minder dan $\pm 45^\circ$ afwijkt van loodrechte inval. Bij grotere hoeken kan gedimensioneerd worden op alleen de invallende piekoverdruk. Bij de bouw van explosiebestendige constructies dienen t.o.v. de explosie concave hoeken zoveel mogelijk te vermijden.

In het totaal bezien is het uit het oogpunt van explosiebelasting aan te bevelen explosiebestendig te bouwen constructies zoveel mogelijk uit de buurt van compacte en gedeeltelijk omsloten configuraties van procesinstallaties te plaatsen.

Hoewel het probleem van de plaats van de vrije gaswolk voor explosiebelasting (van buitenaf) van minder groot belang is, is het voor ventilatie van de constructie uiteraard wel van belang. Explosieve gassen kunnen via het ventilatiesysteem de constructie binnendringen en ontsteken met alle gevolgen vandien. Uiteraard dient binnendringen van gassen ook uit toxicologisch oogpunt worden vermeden.

Daarnaast zou een gaswolk kunnen verbranden i.p.v. exploderen alsmede branden in de buurt van de constructie veroorzaken zodat ook met brandbelasting rekening dient te worden gehouden.

Aanbevolen wordt verdere onderzoekingen te starten naar de bepaling van de maximale druk te bereiken in installaties afhankelijk

van hun vorm, compactheid, afmetingen e.d. Ook dient bepaald te worden bij welke onderlinge afstanden twee installaties als één geheel of als afzonderlijk moeten worden beschouwd.

4. CONCLUSIES

In dit rapport zijn de resultaten beschreven van een studie naar de dynamische belasting van constructies door gasexplosies. Hiertoe werden twee situaties onderscheiden, t.w. belastingen door interne gasexplosies en belastingen teweeggebracht door vrije gaswolkeexplosies. In de studie werden theorieën, resultaten van uitgevoerde experimenten als ook resultaten van schadeanalyses betrokken. Belastingen door brokstukken, springende vaten, stofexplosies e.d. zijn niet in ogenschouw genomen. Gasetonaties zijn uitgesloten.

De belastingen op constructies door interne gasexplosies kunnen als statisch worden beschouwd. De maximaal te verwachten druk in een constructie met gegeven afmetingen (waaronder de groote van de na het bereiken van een zekere druk vrijkomende openingen in de constructie) en gevuld met een gegeven gas-luchtmengsel blijkt goed m.b.v. een voor gasexplosies bestaand criterium voor het ontwerpen van ontlastopeningen te kunnen worden afgeschat. Voor industriële toepassing echter dient het criterium te worden uitgebreid. Gebouwen met grote ontlastopeningen moeten minimaal een druk van 30 kPa kunnen weerstaan.

Bij belasting op constructies als gevolg van vrije gaswolkeexplosies dient men twee situaties te onderscheiden: t.w. :

de in de gaswolkstaande constructie maakt deel uit van of staat vlakbij een compact gebouwde of gedeeltelijk opgesloten installatie of de constructie staat op enige afstand hiervan. In dit laatste geval is het feit of de constructie al of niet in de gaswolk staat van ondergeschikt belang.

Op grond van experimenteel onderzoek als ook schadeanalyses worden hoge drukken alleen gegenereerd in gebieden waar sprake is van veel obstakels en opsluiting. In de eerste situatie dient men derhalve te rekenen op hoge drukken (> 50 kPa). Aanbevolen wordt te dimensioneren op een invallende schokgolf van 100 kPa.

Voor constructies op enige afstand van compact gebouwde installaties kan men de maximaal invallende druk berekenen m.b.v. blastsimulatiemodellen. Hiertoe beschouwd men de installatie als een halfbolvormige wolk met een equivalente inhoud. De maximale druk in de wolk wordt gelijk gesteld aan 100 kPa.

In tegenstelling tot belastingen t.g.v. interne gasexplosies kan men de belastingen t.g.v. vrije gaswolkexplosies niet als statisch beschouwen. Zowel de vorm als de positieve fase duur van de op de constructie invallende schokgolf dienen bekend te zijn. Beide grootheden zijn m.b.v. blastsimulatiemodellen te berekenen.

Bij het dimensioneren van explosiebestendige constructies dient rekening te worden gehouden met schokgolflreflekties.

Nader onderzoek naar blast t.g.v. explosies in drukontlaste ruimten en de maximaal te verwachten druk binnen compact gebouwde of gedeeltelijk opgesloten installaties bij vrije gaswolkexplosies is noodzakelijk.

5. REFERENTIES

- (1) Marshall, V.C.
The siting and construction of control buildings- A strategic approach,
I. Chem. E. Symposium Series No. 47
Institution of Chemical Engineers, 1976.
- (2) Bockholts, P.en Herpers, H.J.
Inventarisatie en analyse van gaswolkexplosies ten behoeve van het onderzoek naar de explosiebelasting van explosiebestendige constructies,
MT-TNO rapport nr. 84-012720, 1984.
- (3) Baker, W.E., Cox, P.A., Westine, P.S.,Kulesz, J.J and Strehlow, R.A.
Explosion Hazards and Evaluation. Fundamental studies in Engineering, 5,
Elsevier Scientific Publishing Company, 1983.
- (4) Yao, C.
Explosion venting of low-strength equipment and structures, Loss Prevention, vol. 8, pp. 1-9, 1974.
- (5) Paman, H.J., Groothuizen, Th. M.and De Gooyer, H.
Design of pressure relief vents,
Proceedings of the First International Symposium on Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industries, pp. 185-189, 1974.
- (6) Bradley, D. and Mitcheson, A.
The venting of gaseous explosions in spherical vessels I - Theory,
Combust. Flame, vol. 32, pp. 221-236, 1978.

- (7) Bradley, D. and Mitcheson A.
The venting of gaseous explosions in spherical vessels
II - Theory and experiment
Combust. Flame, vol. 32, pp. 237-255, 1978.
- (8) Taylor, G.I.
The instability of liquid surfaces when accelerated in
a direction perpendicular to their planes I.
Proc. Roy. Soc. A, 201, pp. 192-196, 1950.
- (9) Solberg, D.M., Pappas, J.A. and Skramstad, E.
Observations of flame instabilities in large-scale
vented gas explosions,
Eighteenth Symposium (International) on Combustion,
pp.1607-1614, The Combustion Institute, 1981.
- (10) Van Wingerden, C.J.M. and Zeeuwen, J.P.
On the role of acoustically driven flame instabilities
in vented gas explosions and their elimination,
Combust. Flame, vol. 51, pp. 109-111, 1983.
- (11) Van Wingerden, C.J.M. and Zeeuwen, J.P.
Venting of gas explosions in large rooms,
Proceedings of the Fourth International Symposium on
Loss Prevention and Safety Promotion in the Process
Industries, pp. F38-F47, 1983.
- (12) Moen, I.O., Lee, J.H.S., Hjertager, B.H., Fuhre, K.,
and Eckhoff, R.K.,
Pressure development due to turbulent flame propagation
in large-scale methane-air explosions,
Combust. Flame, vol. 47, pp. 31-52, 1982.

- (13) Halvorsen, F.H.
Inerting could prevent some tanker explosions,
Loss Prevention, vol. 9, pp. 76-81, 1975.
- (14) Bartknecht, W.
Explosionen, Ablauf und Schutzmassnahmen,
Springer Verlag, 1980.
- (15) Zalosh, R.G.
Gas explosion tests in room-size vented enclosures,
Loss Prevention, vol. 13, pp. 98-110, 1980.
- (16) Harris, R.J.
The investigation and control of gas explosions in
buildings and heating plant,
E & FN Spon Ltd., 1983.
- (17) Taylor, N. and Alexander, S.J.
Structural damage in buildings caused by gaseous
explosions and other accidental loadings,
Building Research Establishment Current Paper
CP 45/74, 1974.
- (18) Howard, W.N.
Interpretation of a building explosion accident,
Loss Prevention vol. 6, pp. 68-73, 1972.
- (19) Walls, W.L.
Vinyl chloride explosion,
NFPA Quarterly, vol. 57, pp. 352-362, 1964.
- (20) Groothuizen, Th.M.en Van de Putte, T.
Technologisch Laboratorium TNO,
rapport opdracht 9315, 1971. (Confidentieel).

- (21) Palmer, K.N. and Tonkin, P.S.
External pressures caused by venting gas explosions
in a large chamber,
Proceedings of the Third International Symposium on
Loss Prevention and Safety Promotion in the Process
Industries, pp. 16/1275-16/1294, 1980.
- (22) Bartknecht, W.
Private communications, 1984.
- (23) Hjertager, B.H.
Simulation of transient compressible turbulent
reactive flows,
Comb. Sci. Techn., vol. 27, pp. 157-170, 1982.
- (24) Oppenheim, A.K.
Elementary blast wave theory and computations,
Proceedings of the Conference on Mechanisms of Explosions
and Blast Waves, Yorktown, Virginia, 1973.
- (25) Van den Berg, A.C.
"BLAST" - A 1-D variable flame speed blast simulation
code using a Flux-Corrected Transport algorithm,
Prins Maurits Laboratorium TNO,
rapport no. PML 1980-162, 1980.
- (26) Strehlow, R.A. Lukritz, R.T., Adamczyk, A.A.,
and Shimpi, S.A.
The blast wave generated by spherical flames,
Combust. Flame, vol. 35, pp. 297-310, 1979.

- (27) Van Ulden, A.P.
On the spreading of a heavy gas released near
the ground,
Proceedings of the First International Symposium on
Loss Prevention and Safety Promotion in the
Process Industries, pp. 221-226, 1974.
- (28) Sadee, C., Samuels, D.E. and O'Brien, T.P.
The characteristics of the explosion of cyclohexane
at the Nypro (U.K.) Flixborough plant on 1st. June 1974,
J. Occ. Acc., vol. 1, pp. 203-235, 1976/1977.
- (29) Roberts, A.F. and Pritchard, D.K.
Blast effect from unconfined vapour cloud explosions,
J. Occ. Acc., vol. 3, pp. 231-247, 1982.
- (30) Rapport over de explosiebij DSM te Beek (L)
7 november 1975,
Directoraat-Generaal van de Arbeid,
Ministerie van Sociale Zaken, 1976.
- (31) Blackmore, D.R., Eyre, J.A. and Summers, G.G.
Dispersion and combustion behaviour of gas clouds
resulting from large spillages of LNG and LPG on
to the sea,
Trans. I. Mar. E. (TM), vol. 94, paper 29, 1982.
- (32) Zeeuwen, J.P. Van Wingerden, C.J.M. and Dauwe, R.M.
Experimental investigation into the blast effect produced
by unconfined vapour cloud explosions,
Proceedings of the Fourth International Symposium on
Loss Prevention and Safety Promotion in the Process
Industries, pp. D20-D29, 1983.

- (33) Moen, I.O., Donato, M., Knystautas, R. and Lee, J.H.
Flame acceleration due to turbulence produced by
obstacles,
Combust. Flame, vol. 39, pp. 21-32, 1980.
- (34) Moen, I.O., Donato, M., Knystautas, R., Lee J.H.
and Wagner, H. Gg.
Turbulent flame propagation and acceleration in the
presence of obstacles,
Progress in Astronautics and Aeronautics:
Gasdynamics of Detonations and Explosions,
Bowen, J.R. et al (eds), vol. 75, pp. 33-47,
AIAA, New York, N.Y., 1982.
- (35) Van Wingerden, C.J.M.
CEC Contract no. 008 SRN. Final report, part 2,
Experimental study of the influence of obstacles and
partial confinement on flame propagation,
Prins Maurits Laboratorium TNO,
rapport no. PML 1984-C67, 1984.
- (36) Van Wingerden, C.J.M. and Zeeuwen, J.P.
Flame propagation in the presence of repeated obstacles:
influence of gas reactivity and degree of confinement,
J. Haz. Mat. vol. 8, pp. 139-156, 1983.
- (37) Chan, C., Moen, I.O. and Lee, J.H.S.
Influence of confinement on flame acceleration due
to repeated obstacles,
Combust. Flame, vol. 49, pp. 27-39, 1983.

- (38) Lee, J.H.S., Knystautas, R. and Freiman, A.
High speed turbulent deflagration and transition
to detonation in H₂-air mixtures,
Combust. Flame, vol. 56, pp. 227-239, 1984.
- (39) Van den Berg, A.C.
On the possibility of vapour cloud detonation,
Prins Maurits Laboratorium TNO,
rapport in voorbereiding, 1985.
- (40) Van den Berg, A.C.
The Multi-Energy method - a framework for vapour cloud
explosion blast prediction,
J. Haz. Mat. vol.12, pp 1 - 10, 1985
- (41) Hjertager, B.H., Fuhre, K., Parker, S.J. and Bakke, J.R.
Flame acceleration of propane-air in a large-scale
obstructed tube,
Paper presented at the Ninth International Colloquium
on Dynamics of Explosions and Reactive Systems,
Poitiers, 1983.
- (42) Hjertager, B.H.
Influence of turbulence on gas explosions,
Paper presented at the International Symposium on
Control and Prevention of Gas Explosions,
London, U.K., 1983.
- (43) Chan, C., Lee, J.H.S., Moen, I.O. and Thibault, P.
Turbulent flame acceleration and pressure development
in tubes,
Proceedings of the First Specialist Meeting of the
Combustion Institute, pp. 479-484, 1981.

- (44) Davenport, J.A.
A survey of vapour cloud incidents,
Loss Prevention, vol. 11, pp. 39-49, 1977.
- (45) Davenport, J.A.
A study of vapour cloud incidents - An update -,
Proceedings of the Fourth International Symposium
on Loss Prevention and Safety Promotion in the
Process Industries, pp. C1-C19, 1985.
- (46) Wiekema, B.J.
Gaswolkontbrandingen, Casuïstiek en analyse,
Maatschappelijk Technologie TNO,
rapport Ref. no. 81-010557, 1981.
- (47) Burgess, D.S. and Zabetakis, M.G.
Detonation of a flammable cloud following a propane
pipeline break - The December 9, 1970, explosion in
Port Hudson,
U.S. Bureau of Mines, Report of Investigations 7752, 1973.
- (48) Trense, R.W.
Memorandum bezoek aan opslagterrein te Roosendaal
op 12 september 1975, op welk terrein zich op 5
september 1975 een benzine-lucht explosie heeft
voorgegaan,
Technologisch Laboratorium TNO, 1975.
- (49) Chiu, K.W., Lee, J.H. and Knystautas R.
The blast waves from asymmetrical explosions,
J. Fluid Mech. vol. 82, pp. 193-208, 1977.

- (50) Marshall, V.C.
TNT Equivalence - The Decatur anomaly
Chem. Eng., feb. 1980, pp. 108-109, 1980.
- (51) Cox, E.F., Plagge, H.J. and Reed, J.W.
Meteorology directs where blast will strike,
Bull. Am. Meteor. Soc., vol. 35, no. 3,
pp. 95-103, 1954.
- (52) Courant, R. and Friedrichs, K.O.
Supersonic flow and shock waves,
Applied Mathematical Sciences 21, F. John et al (eds.)
Springer Verlag, 1976.
- (53) Biggs, J.M.
Introduction to structural dynamics,
McGraw-Hill Book Company, 1964.
- (54) Dowding, C.H., Murray, P.D. and Atmatzidis, D.K.
Dynamic properties of residential structures subjected
to blasting vibrations,
J. Hydr. Div., vol. 107, no. ST7, SCE, 1981.

BIJLAGE 1.

Literatuurbronnen bij fig. 5.

- (1) Alexander, S.J. and Taylor, R.
Field observations of gaseous explosions in
buildings - A report based on the CIRIA/DOE survey -
Buildings and the Hazard of Explosion,
Proceedings of a Symposium at BRE, Garston, 1972.
- (2) Report of the inquiry into the collapse of flats at
Ronan Point, Canning Town,
Her Majesty's Stationery Office, 1968.
- (3) National Transportation Safety Board,
Pipeline Accident Report - Washington
Gas Light Company, natural gas explosion,
215 Third Street SE, Washington, D.C.
October 30, 1979,
NTSB-PAR-80-4, 1980.
- (4) National Transportation Safety Board,
Pipeline Accident Report- Union Light,
Heat and Power Company, natural gas
explosion and fire, Simon Kenton High
School, Independence, Kentucky,
October 9, 1980,
NTSB-PAR-81-1, 1981.
- (5) National Transportation Safety Board,
Pipeline Accident Report - Lone Star
Gas Company, North Richland Hills,
Texas, October 4, 1971,
NTSB-PAR-72-3, 1972.

- (6) Mainstone, R.J.
Accidental explosions and impacts:
some lessons from recent incidents,
Building Research Establishment
Current Paper CP 58/78, 1978.
- (7) Bockholts, P. en Herpers, H.J.
Inventarisatie en analyse van gaswolkexplosies
ten behoeve van het onderzoek naar de explosie-
belasting van explosiebestendige constructies,
MT-TNO rapport nr. 84-012720, 1984.
Bijlage 1: ACC 2746
ACC 3911
ACC 3395
- (8) Flatwoning verwoest bij gasexplosie,
Algemeen Dagblad, 16-8-1979.
- (9) Drie gewonden na gasexplosie,
Zoetermeersche Courant, 18-12-1981.

BIJLAGE 2

Literatuurbronnen bij fig. 6

Ongevallen

- (1) Howard, W.N.
Interpretation of a building explosion accident,
Loss Prevention, vol. 6, pp. 68-73, 1972.
- (2) Groothuizen, Th.M., en Van de Putte, T.
Technologisch Laboratorium TNO,
rapport opdracht 9315, 1971. (Confidentieel).
- (3) Walls, W.L.,
Vinyl chloride explosion,
Quarterly National Fire Protection Association,
vol. 57, april 1964.
- (4) Groothuizen, Th.M. en Van de Putte, T.
Technologisch Laboratorium TNO,
rapport opdracht 9372, 1972. (Confidentieel).
- (5) Schippers, J. en Wiekema, B.J.
Technologisch Laboratorium TNO,
rapport opdracht G 6228, 1976. (Confidentieel).
- (6) Van de Putte, T. en Groothuizen, Th. M.
Technologisch Laboratorium TNO,
rapport opdracht 9388, 1971 (Confidentieel).
- (7) Best, R.L.
Fire Journal, pp. 25 e.v., May 1979.
- (8) Health and Safety Executive,
The explosion and fire at Chemstar Limited
6 september 1981,
Her Majesty's Stationery Office.

BIJLAGE 2 (Vervolg)

Grote schaal experimenten

- (1) Van Wingerden, C.J.M. en Zeeuwen, J.P.
Venting of gas explosions in large rooms,
Proceedings of the Fourth International Symposium
on Loss Prevention and Safety Promotion in the
Process Industries, pp. F38-F47, 1983.
- (2) Solberg, D.M., Skramstad, E. and Pappas, J.
Experimental investigations on partly confined gas
explosions - Analysis of pressure loads, part I,
Det Norske Veritas report no. DNV 79-0483, 1979.
- (3) Zalosh, R.G.
Gas explosion tests in room-size vented enclosures,
Loss Prevention, vol. 13, pp. 98-110, 1980.
- (4) Bartknecht, W.
Ablauf von Gas- und Staubexplosionen und deren Bekämpfung,
Sichere Arbeit, Jahrgang 27, Nr. 1, 1974.

<p>SAMENVATTING:</p> <p>Een onderzoek is uitgevoerd naar t.g.v. gasexplosies ontstane dynamische belastingen op constructies. Hiertoewerden twee situaties onderscheiden t.w. de explosie vindt plaats in het inwendige van de constructie of de explosie vindt plaats buiten de constructie.</p> <p>Voor interne gasexplosies kan de maximaal te verwachten belasting worden bepaald met een bestaand criterium voor het ontwerpen van ontlastopeningen. Voor industriële toepassingen is dit criterium uitgebreid en wordt een minimum sterkte geëist equivalent aan een statische belasting van 30 kPa. Bij externe gasexplosies is de aanwezigheid van compact gebouwe of gedeeltelijk opgesloten installaties van groot belang. Staat de constructie hier vlakbij dan dient rekening te worden gehouden met een invallende druk van 100 kPa. Staat de constructie op enige afstand van dergelijke installaties dan kan de maximale belasting worden berekend m.b.v. blast-simulatiemodellen. De belasting moet als dynamisch worden beschouwd. Bij het ontwerpen dient met schokgolffreflekties rekening te worden gehouden.</p>	<p>SAMENVATTING</p> <p>Een onderzoek is uitgevoerd naar t.g.v. gasexplosies ontstane dynamische belastingen op constructies. Hiertoewerden twee situaties onderscheiden t.w. de explosie vindt plaats in het inwendige van de constructie of de explosie vindt plaats buiten de constructie.</p> <p>Voor interne gasexplosies kan de maximaal te verwachten belasting worden bepaald met een bestaand criterium voor het ontwerpen van ontlastopeningen. Voor industriële toepassingen is dit criterium uitgebreid en wordt een minimum sterkte geëist equivalent aan een statische belasting van 30 kPa. Bij externe gasexplosies is de aanwezigheid van compact gebouwe of gedeeltelijk opgesloten installaties van groot belang. Staat de constructie hier vlakbij dan dient rekening te worden gehouden met een invallende druk van 100 kPa. Staat de constructie op enige afstand van dergelijke installaties dan kan de maximale belasting worden berekend m.b.v. blast-simulatiemodellen. De belasting moet als dynamisch worden beschouwd. Bij het ontwerpen dient met schokgolffreflekties rekening te worden gehouden.</p>																																																																						
<p>Prms Maurits Laboratorium</p> <p>Rapportnummer. PML 1985-C-102</p> <p>Opdrachnummer(s). H 4313</p> <p>Datum. juni 1985</p> <p>Titel: Belasting van constructies door gasexplosies.</p> <p>Een verkennende studie.</p> <p>Auteur. C.J.M. van Wingerden</p> <p>Trefwoorden:</p> <table border="0"> <tr> <td>explosions</td> <td>1904</td> <td>vents</td> <td>1301</td> <td>damage</td> </tr> <tr> <td>containers</td> <td>1304</td> <td>dynamic response</td> <td>1407</td> <td>control</td> </tr> <tr> <td>flammable gases</td> <td>1107</td> <td>damage</td> <td>1407</td> <td>safety</td> </tr> <tr> <td>investigations</td> <td>1402</td> <td>dynamic structural</td> <td></td> <td>1312</td> </tr> <tr> <td>blast effects</td> <td>1905</td> <td>analysis</td> <td>1315</td> <td></td> </tr> <tr> <td>venting</td> <td>1301</td> <td>simulation</td> <td>1407</td> <td></td> </tr> <tr> <td>shock waves</td> <td>2001</td> <td>explosion effects</td> <td>1904</td> <td></td> </tr> </table>	explosions	1904	vents	1301	damage	containers	1304	dynamic response	1407	control	flammable gases	1107	damage	1407	safety	investigations	1402	dynamic structural		1312	blast effects	1905	analysis	1315		venting	1301	simulation	1407		shock waves	2001	explosion effects	1904		<p>Prms Maurits Laboratorium</p> <p>Rapportnummer. PML 1985-C-102</p> <p>Opdrachnummer(s) H 4313</p> <p>Datum: juni 1985</p> <p>Titel: Belasting van constructies door gasexplosies.</p> <p>Een verkennende studie.</p> <p>Auteur. C.J.M. van Wingerden</p> <p>Trefwoorden:</p> <table border="0"> <tr> <td>explosions</td> <td>1904</td> <td>vents</td> <td>1301</td> <td>damage</td> </tr> <tr> <td>containers</td> <td>1304</td> <td>dynamic response</td> <td>1407</td> <td>control</td> </tr> <tr> <td>flammable gases</td> <td>1107</td> <td>damage</td> <td>1407</td> <td>safety</td> </tr> <tr> <td>investigations</td> <td>1402</td> <td>dynamic structural</td> <td></td> <td>1312</td> </tr> <tr> <td>blast effects</td> <td>1905</td> <td>analysis</td> <td>1315</td> <td></td> </tr> <tr> <td>venting</td> <td>1302</td> <td>simulation</td> <td>1407</td> <td></td> </tr> <tr> <td>shock waves</td> <td>2001</td> <td>explosion effects</td> <td>1904</td> <td></td> </tr> </table>	explosions	1904	vents	1301	damage	containers	1304	dynamic response	1407	control	flammable gases	1107	damage	1407	safety	investigations	1402	dynamic structural		1312	blast effects	1905	analysis	1315		venting	1302	simulation	1407		shock waves	2001	explosion effects	1904	
explosions	1904	vents	1301	damage																																																																			
containers	1304	dynamic response	1407	control																																																																			
flammable gases	1107	damage	1407	safety																																																																			
investigations	1402	dynamic structural		1312																																																																			
blast effects	1905	analysis	1315																																																																				
venting	1301	simulation	1407																																																																				
shock waves	2001	explosion effects	1904																																																																				
explosions	1904	vents	1301	damage																																																																			
containers	1304	dynamic response	1407	control																																																																			
flammable gases	1107	damage	1407	safety																																																																			
investigations	1402	dynamic structural		1312																																																																			
blast effects	1905	analysis	1315																																																																				
venting	1302	simulation	1407																																																																				
shock waves	2001	explosion effects	1904																																																																				