



explosieveiligheid

TNO

Bureau Explosieveilgheid TNO

Hoofd: Dr. J. G. A. de Graaf.

Adres: Lange Kleiweg 159, Rijswijk (Z.H.), tel. 01730-38222.

Postadres: postbus 45, Rijswijk (Z.H.).

TNO en Explosieveiligheid

Er wordt niets nieuws gezegd, maar wel een actueel thema aangesneden, als wij opmerken dat de voortschrijdende industrialisatie in Nederland, en in het bijzonder de groeiende chemische industrie, ons voor problemen plaatst inzake een gezond en veilig leefmilieu. Terwijl onderwerpen als milieu-vervuiling en lawaai-bestrijding al sterk de aandacht hebben gekregen is dit veel minder het geval met een ander belangrijk probleemgebied: de beveiliging tegen explosiegevaaren. Enerzijds betreft dit fabricage, opslag, transport en gebruik van in dit opzicht gevaarlijke produkten; anderzijds het treffen van zodanige maatregelen dat, mocht er onverhoopt een explosie plaats vinden, de gevolgen daarvan zo goed mogelijk binnen de perken worden gehouden.

TNO heeft — deels op eigen initiatief, deels op basis van door overheid en industrie voorgelegde problemen — in de loop der jaren veel werk verricht met betrekking tot explosieverschijnselen en op dit gebied een brede ervaring opgebouwd. Aanvankelijk lag die ervaring vrijwel uitsluitend bij de Rijksverdedigingsorganisatie (RVO) later ook bij een aantal instituten van de Nijverheidsorganisatie (NO). Om de nadelen verbonden aan het verspreid liggen van ervaring tegen te gaan hebben beide bijzondere organisaties besloten een samenwerkingsverband in het leven te roepen tussen de betrokken instituten. Er is een *Commissie Explosieveiligheid-TNO (CEV-TNO)* ingesteld, waarin de directeuren van deze instituten zitting hebben. Deze commissie heeft tot taak periodiek een werkprogramma op te stellen — enerzijds met betrekking tot explosieveiligheidsaspecten en anderzijds met het oog op nuttige toepassingen van explosies in de civiele sector —, verder de werkzaamheden binnen TNO op dit gebied te volgen en tevens zorg te dragen voor een passende coördinatie.

Tegelijkertijd zijn de binnen TNO bestaande activiteiten op het gebied van explosieveiligheid formeel gebundeld in de zogenaamde „*Coördinatiegroep Explosieveiligheid TNO*” zodat een technisch-wetenschappelijk centrum van deskundigheid met ervaren personeel en uiteenlopende onderzoekfaciliteiten verkregen is. Daarbij is enerzijds de zelfstandigheid van de samenwerkende instituten gehandhaafd, en anderzijds de coördinatie gewaarborgd in de behandeling van opdrachten van derden en in opzet en uitvoering van het onderzoekprogramma. De hierbij thans betrokken instituten zijn het Centraal Technisch Instituut (CTI), het Instituut voor Bouwmaterialen en Bouwconstructies (IBBC), het Instituut voor Werktuigkundige Constructies (IWECO) en het Technologisch Laboratorium (TL).

Als sluitstuk is een *Bureau Explosieveiligheid* in het leven geroepen, dat optreedt als een orgaan van de Nijverheidsorganisatie. Dit bureau fungeert als centrale ingang voor degenen die advies of voorlichting wensen, en die de weg binnen TNO op het gebied van de explosieveiligheid niet kennen; de bestaande relaties van de instituten kunnen onveranderd gecontinueerd blijven. Het bureau moet verder de samenwerking tussen de gescheiden werkende research-teams bevorderen, en van die samenwerking naar buiten doen blijken.

Deze maatregelen — waarmee de NO en de RVO gestalte hebben gegeven aan hun samenwerking op het gebied van explosieveiligheid in de civiele sector — vormen een concreet voorbeeld van het streven van TNO om in werkgebieden te denken, en de beschikbare faciliteiten in een bepaald werkgebied zo doelmatig mogelijk te gebruiken.

Een van de eerste resultaten van de bereikte samenwerking is dit themanummer *Explosieveiligheid*, dat — zonder compleet te willen zijn — een overzicht biedt van activiteiten van TNO op dit gebied.

Doel van dit nummer is de belangstelling bij bedrijfsleven en overheid voor dit werkgebied aan te wakkeren, en de band met geïnteresseerden te verstevigen. Dit laatste is ook voor de TNO-medewerkers van belang. Want, wil TNO zijn rol goed kunnen spelen, dan zijn goede kennisoverdracht over en weer met geïnteresseerden van buiten en het ingespeeld zijn op elkaars problemen volstrekt onmisbaar.

Bij het spreken over explosieveiligheid ligt het voor de hand te stellen dat degene, die aanleiding geeft tot het ontstaan van explosiegevaar gehouden is dat gevaar te beteugelen door het tot een aan-

vaardbaar risico terug te brengen; de bewijslast voor „wij handelen niet onveilig” berust primair bij de onderneming. De overheid heeft hierbij een controlerende taak en zal voor passende wetgeving en voorschriften moeten zorgen ter bevordering van het „welzijn”; d.i. het beschermen van de samenleving tegen calamiteiten. Ook zal de overheid over een objectieve instantie moeten kunnen beschikken die de oorzaak van explosies kan opsporen en analyseren.

Verscheidene Nederlandse industrieën verrichten werk van betekenis op het gebied van explosieveiligheid. Er wordt echter relatief weinig over gepubliceerd, wellicht omdat dit werk voor een belangrijk deel het karakter heeft van „trouble-shooting”. Zeker is dat in het Nederlandse bedrijfsleven en bij de overheid waardevolle gesprekspartners op het gebied van explosieveiligheid aanwezig zijn, waarmee — wil het betreffende werk van TNO zijn volle ontplooiing krijgen — het contact moet worden verstevigd. Vermelding verdient in dit verband het feit dat momenteel op geen enkele universiteit of hogeschool in Nederland het onderwerp explosieverschijnselen als apart vak in het studieprogramma is opgenomen, hetgeen de taak die voor TNO op dit gebied is weggelegd onderstreept.

TNO meent daarom het algemeen belang te dienen door intern de bundeling van wetenschappelijk-technische deskundigheid tot stand te brengen. De groep van instanties in overheid en bedrijfsleven, die betrokken zijn in of belang hebben bij explosieveiligheid, is zo gevarieerd en complex dat het gewenste samenspel niet eenvoudig is.

Aan concentratie van de belanghebbenden, die zich nu nog in een verbrokkelde structuur bevinden, valt op korte termijn niet te denken. De bundeling van het TNO-potentieel kan als een eerste stap worden gezien in de richting van een betere organisatie van de totaliteit van de bij explosieveiligheid betrokken bedrijven, organisaties en instellingen.

Ook in verband met het groeiend belang van de door Nederland te leveren bijdrage in het opstellen van internationale regelingen en afspraken — b.v. in het kader van de integratie van Europa — is de verkregen coördinatie van belang. Hoe beter de betreffende autoriteiten geïnformeerd zijn, des te beter zullen ze in staat zijn voorbereidingen te treffen voor een zinvol wettelijk kader inzake calamiteiten-preventie en voor een verantwoord toezicht op explosieveiligheid.

Tot nu toe is onderzoek op het gebied van explosieveiligheid in hoofdzaak verricht door het Technologisch Laboratorium in het kader van of in aansluiting op het onderzoek aan explosieve stoffen ten behoeve van de krijgsmacht. De laatste jaren is de belangstelling van civiele zijde onmiskenbaar gegroeid, hetgeen tot gevolg had dat het researchwerk in dit gebied in de verschillende TNO-instituten is toegenomen. De belangrijkste facetten van dit werk zijn:

- veiligheidsvoorzieningen aan technische installaties, zoals branders en ketels (Centraal Technisch Instituut, CTI-TNO)
- constructieve maatregelen om de gevolgen van explosies in gebouwen te beteugelen (Instituut voor Bouwmaterialen en Bouwconstructies, IBBC-TNO)
- onderzoek van de invloed van schokken en trillingen op werktuigkundige constructies (Instituut voor Werktuigkundige Constructies, IWECO-TNO)
- onderzoek van explosiegevaar van chemische produkten en van de omstandigheden waaronder fabricage, opslag, transport en gebruik plaats vinden (Technologisch Laboratorium, TL-TNO).

Naast het uitvoeren van opdrachten van derden heeft het eigen speurwerk in TNO een zekere omvang verkregen. Speciaal betreft dit de studie inzake het verloop van verschillende typen van explosies, de initiatie en het effect. Er liggen echter nog veel onopgeloste vragen; een beter inzicht in de verschijnselen bij explosies en het uitwerken van voorzieningen ter bescherming tegen explosiegevaaren zijn dringend nodig. Een verdere uitbouw van het speurwerkprogramma is daarom gewenst, bij voorkeur in overeenstemming met de belangstelling van de kant van het bedrijfsleven.

Voor ingewijden is het bekend hoe moeilijk het is om verworven kennis en kunde ingang te doen vinden in de praktijk. Het verkregen inzicht moet doordringen tot de personen en instanties, die daarbij belang hebben en tot een juiste toepassing gebracht worden om calamiteiten te voorkomen. Dit uit-

dragen van kennis en kunde is een onderdeel van de taak van de organisatie TNO die immers moet bevorderen dat resultaten van onderzoek worden toegepast.

Door de wijze waarop TNO werkt en gefinancierd wordt neemt deze organisatie de gewenste tussenpositie in; de overheid financiert een deel, het andere deel moet van het bedrijfsleven komen. Naast het algemene onderzoek, dat gepubliceerd wordt en dus voor ieder beschikbaar is, kan TNO — ook op confidentiële basis — rechtstreeks adviezen aan bedrijfsleven en overheid geven inzake concrete praktische problemen, en zo de nieuwste inzichten en gegevens in de praktijk tot hun recht doen komen.

Voor een optimaal profijt bij dit werk is het uitwisselen van gegevens over en weer via persoonlijke contacten tussen overheid en bedrijfsleven enerzijds en TNO anderzijds de beste weg.

De vier eerder genoemde TNO-instituten, die samenwerken op het gebied van explosieveiligheid staan niet alleen klaar om advies en voorlichting te geven, maar vanzelfsprekend ook om elk voor zich — en waar dit passend is in nauwe onderlinge samenwerking — onderzoek te verrichten ten behoeve van industrie en overheid. Door het leggen en onderhouden van contacten en door het voortdurend verkennen van ontwikkelingen elders wordt ernaar gestreefd een zo volledig mogelijke informatie beschikbaar te hebben over de technische stand van zaken op het gebied van explosieveiligheid en over de mogelijkheden en wensen tot verbeteringen en vernieuwingen. De ca. 20 medewerkers die zich binnen TNO momenteel met explosieveiligheidsproblemen bezig houden kunnen zo nodig terugvallen op de ca. 4000 medewerkers van heel TNO.

Het uiteindelijke doel is vragenstellers op het gebied van explosieveiligheid maatregelen te kunnen adviseren, die het uitblijven van explosies of het beteugelen van het effect ervan garanderen; ook is het nodig — sneller dan thans vaak mogelijk is — de oorzaak van explosies te achterhalen. Nadruk zal bij het te entameren onderzoek moeten vallen op het ontwikkelen van beproevingsmethoden, waarvan de meetresultaten direct in praktische termen kunnen worden geïnterpreteerd.

Wat betreft stoffen, waarbij explosieveiligheid een probleem vormt, is het aantal categorieën relatief beperkt. De belangrijkste zijn ammoniumnitraat-houdende stoffen, organische peroxiden, nitroverbindingen, nitraatesters, brandbare gassen en dampen en stof-lucht mengsels. Een moeilijkheid is dat de industrie, die met deze gevaarlijke stoffen of mengsels te maken heeft, in het algemeen geen gemeenschappelijke spreekbuis heeft. Door dit themanummer en door de op 27 april a.s. te houden informatiedag poogt TNO aan deze moeilijkheid tegemoet te komen.

Wij weten dat er nog geen pasklare oplossingen zijn voor alle problemen samenhangend met explosieveiligheid en het beperken van de gevolgen van explosies. Aan onderzoek op dit gebied komt daarom een hoge prioriteit toe. TNO stelt het op prijs door zulk onderzoek zijn bijdrage te leveren aan een belangrijk aspect van de industriële ontwikkeling en van de bescherming van ons leefmilieu.

H. W. Slotboom

Voorzitter Nijverheidsorganisatie TNO

Explosieveiligheid, een groeiend gebied van onderzoek

E. W. LINDEIJER

Technologisch Laboratorium TNO

De jaarlijkse materiële schade door brand is veel groter dan die door explosies. Explosies zijn nl. minder frequent dan branden; evenwel stellen ze ons dikwijls voor gecompliceerde vragen.

In tegenstelling tot een „gewone” brand, is bij een explosie geen toevoer van luchtzuurstof nodig; de energie wordt geleverd door de exploderende stof zelf. Een onderzoek naar de explosieveiligheid zal zich dus moeten richten op de chemische eigenschappen van de stof en wel speciaal op de vraag of de stof een zódanige omzetting kan ondergaan, dat daarbij veel energie vrijkomt. Voor een eventueel vernielend effect is het beslissend hoe snel deze energie vrijkomt en of er veel gas bij ontstaat. Dat deze snelheid niet alleen van de stof afhangt, maar vooral ook van het type explosie dat de stof ondergaat, wordt in het hierna volgende artikel van H. J. Pasman nader toegelicht.

Het onderzoek op het gebied van de explosieveiligheid wordt verder gecompliceerd door de grote invloed die de omstandigheden hebben op de gevaarlijkheid van een situatie. Dit laatste omvat zowel de kans op een explosie als het mogelijke effect ervan. Tot de omstandigheden kan men rekenen: de wijze van verpakking, de positie van het opgeslagen produkt t.o.v. de omgeving, de aard van het vervoermiddel, de getroffen voorzorgsmaatregelen en de deskundigheid van het personeel. Weliswaar spelen de stoffeigenschappen een belangrijke rol, maar eigenlijk heeft men in de praktijk steeds te maken met de veel ruimere vraag naar de gevaarlijkheid van een situatie.

Vanzelfsprekend weerspiegelt zich deze gecompliceerdheid in de aard van het onderzoek; echter ook in de aard van de opdrachtgevers en contactpersonen.

Ruim 20 jaar geleden begon het Technologisch Laboratorium RVO-TNO zich bezig te houden met explosieveiligheid op verzoek van verschillende industrieën. Steunend op de reeds aanwe-

zige kennis van explosieve stoffen en op de beschikbare faciliteiten konden de incidentele vragen vanuit de industrie worden behandeld.

Niettemin moesten nieuwe methoden van onderzoek worden ontwikkeld ten einde een eventueel explosiegevaar te kunnen vaststellen en, zo mogelijk, te kwantificeren en in karakteristieke getallen uit te drukken.

De eerste produkten die onderzocht werden, waren ammoniumnitraathoudende kunstmest. In het buitenland hadden bepaalde soorten tot grote explosierampen geleid. Nog steeds worden nieuwe samenstellingen in de handel gebracht. In de loop der jaren is de controle op de veiligheid verscherpt. Hetzelfde geldt voor vele produkten op basis van cellulosenitraat, voor bepaalde organische peroxiden, insecticiden, kleurstoffen e.a.

Een belangrijke uitbreiding onderging het explosieveiligheidsonderzoek op het Technologisch Laboratorium, nadat men zich (ca. 10 jaar geleden) ging bezighouden met de thermische explosie, in het bijzonder met de homogene explosie van vloeistoffen. Daarbij is ook de veiligheid van de chemische reactor in het geding. In diezelfde periode is het onderzoek op het gebied van gasexplosies en stofexplosies sterk toegenomen.

Naast het incidenteel verlenen van adviezen en voorlichting moet de meer algemene voorlichting worden genoemd, zoals het verzorgen van publikaties en het organiseren van symposia (in 1963 te Utrecht en in 1969 te Den Haag). Verder wordt samengewerkt met het Veiligheidsinstituut te Amsterdam (cursus Hoger Veiligheidskundige) en de Stichting Postacademiale Vorming Gezondheidstechniek.

Het is vooral de wereldhandel die noopt tot het opstellen van een internationaal aanvaarde classificatie van explosieve en andere gevaarlijke stoffen, alsmede tot het ontwikkelen van gestandaardiseerde controle-proeven. Ondanks het vele werk dat reeds is verricht door de Verenigde Naties en an-

dere internationale organisaties zal nog veel onderzoek nodig zijn en ervaring moeten worden verzameld. De wassende stroom van chemische producten stelt nieuwe vragen en leidt tot nadere precisering van eisen.

Op initiatief van de Organisation for Economic Cooperation and Development (OECD) houdt een internationale groep van specialisten zich bezig met zowel de wetenschappelijke achtergrond van de explosieveiligheid als met de verdere ontwikkeling van nieuwe methodieken waarvan de resultaten een betrouwbaar inzicht geven in de gevaren van praktische situaties.

Veelal zijn de hier samenwerkende specialisten tevens de adviseurs van hun regeringen. Nederland neemt aan deze studiegroep actief deel voor zover dit financieel mogelijk is.

Bij de in de jaren gegroeide contacten is gebleken, dat naast de industrie ook, en zelfs steeds meer, de overheid behoefte gevoelt aan een centrum van deskundigheid met de mogelijkheden tot onderzoek over explosieveiligheidsvragen. Zij ziet zich gesteld tegenover vragen van nationale aard zoals

het opstellen van hinderwetsvoorwaarden, het verlenen van vergunning voor bepaalde transporten, de planning van een nieuwe industrie of de oorzaak van een explosie. Daarnaast heeft zij behoefte aan advies bij het tot stand komen van regelingen voor het internationale vervoer van produkten met explosieve eigenschappen. Het betreft hier vooral de ministeries van Sociale Zaken en Volksgezondheid (Arbeidsinspectie), van Verkeer en Waterstaat (Afd. Gevaarlijke Goederen en de Scheepvaartinspectie) en van Justitie.

Explosieveiligheid is een zaak van algemeen belang. Onderzoek van explosieveiligheid past geheel in de doelstelling van TNO. De nu binnen TNO tot stand gebrachte bundeling van bestaande en nog te verwerven kundigheden en faciliteiten zal de efficiency in de behandeling van de problemen kunnen bevorderen. Vanzelfsprekend is het niet de bedoeling dat de bestaande contacten hierdoor worden aangetast. De verschillende facetten van het lopende explosieveiligheidsonderzoek binnen TNO, worden in de navolgende artikelen behandeld.

Typen explosies en verschijnselen

Types of explosions and phenomena

H. J. P A S M A N

Technologisch Laboratorium TNO

Samenvatting

Meestal associeert men een explosie met een knal en met weggeslingerde, rondliggende scherven. Dit veronderstelt echter een explosie waarbij gas onder hoge druk plotseling expandeert. Evenwel kunnen explosies op zeer verschillende manieren verlopen. Het springen van een vat dat met gas wordt volgepompt, wordt een fysische explosie genoemd. Bij een chemische explosie verloopt een snelle, exotherme chemische omzetting en deze kan de vorming veroorzaken van gas onder hoge druk en temperatuur. Indien de ontleding begint als een langzame reactie overal in de stof en deze zich voortdurend versnelt doordat de vrijgekomen reaktiewarmte de temperatuur doet stijgen, dan spreekt men van een thermische explosie. Bij een explosieve verbranding (of deflagratie) en bij een detonatie vindt de reactie plaats in een zone die door de stof voortschrijdt (grootte-orde van de snelheden resp. mm/s-m/s en km/s). De explosieve verbranding wordt in stand gehouden door warmteoverdracht naar de nog niet reagerende laag vóór de reactiezone. Bij de detonatie wordt de stof doorlopen door een schokgolf. De exotherme ontleding als gevolg van de compressie en verbitting achter het schokfront onderhoudt de schok. Beschreven zullen worden de specifieke verschijnselen die zich voordoen bij explosies van gassen, vloeibare en vaste stoffen. De begrippen stabiliteit en gevoeligheid zullen worden behandeld, en de verschillende typen explosies en hun effecten (blast, verscheuring) worden beschreven.

Summary

More often than not an explosion is associated with a bang and with flung-away fragments. However, this presupposes an explosion resulting from a sudden expansion of gas under high pressure. Yet explosions may proceed in very different ways. The explosion of a vessel that is being filled with pressurized gas is called a physical explosion. In a chemical explosion a rapid and exothermal chemical conversion takes place which mostly causes gas of high pressure and temperature to be formed.

If the decomposition starts as a slow reaction which takes place throughout the substance and is continuously accelerated by the rise in temperature resulting from the heat of reaction released, then we speak of a thermal explosion.

If a substance deflagrates (explosive burning) or detonates the reaction takes place in a zone which proceeds through this substance (order of magnitude of velocities mm/s-m/s and km/s respectively). The explosive burning is maintained by heat-transfer to the unreacted layer in front of the reaction zone. In the case of detonation a shockwave passes through the substance. The exothermal decomposition resulting from compression and heating behind the shock front maintains the shock.

A description is given of the specific phenomena occurring in explosions of gases, liquids and solids. The concepts of stability and sensitiveness will be explained and the several types of explosions (blast, fragmentation) described.

1. Grondbegrippen

Voor de praktijk is het tamelijk onnodig een definitie te geven van het verschijnsel explosie. Bij het horen van een knal of doffe klap, het opflitsen van een vuurverschijnsel en de vorming van een krater met er om heen verwrongen staal en gebroken glasruiten, zal niemand een discussie beginnen over de vraag of het hier al of niet een explosie betreft.

Wetenschappelijk gezien is het interessant het verschijnsel explosie te analyseren en te trachten er zekere criteria voor te geven. Kwalitatief blijkt dan dat het hierbij dikwijls gaat om een gas onder hoge druk dat plotseling expandeert. Wil men dit kwantificeren, dan blijkt men in moeilijkheden te

geraken. Weliswaar is de korte tijd steeds een kwestie van milli- of zelfs microseconden, maar de vragen hoeveel gas en welke druk zijn niet in algemene zin te beantwoorden. Al naar de aard van de vrijkomende energie maakt men onderscheid tussen een *fysische* en een *chemische* explosie.

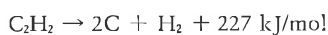
Voorbeelden van fysische explosies zijn een kernexplosie, het uit elkaar barsten van een stoomketel, een elektrische doorslag (bliksem).

Een chemische explosie ontstaat als gevolg van een heftige chemische reactie waardoor in korte tijd energie, de *explosiewarmte*, wordt vrijgemaakt en hete, meestal gasvormige reactieproducten ontstaan.

Een *explosieve stof* is een enkelvoudige stof of een mengsel waarin een dergelijke reactie kan verlopen zonder dat energie, zuurstof of andere stoffen behoeven te worden toegevoerd tijdens de reactie.

In het algemeen heeft de reactie plaats tussen een oxiderend en een reducerend bestanddeel, die bijvoorbeeld bij organische nitro-verbindingen ($\equiv \text{C} - \text{NO}_2$), nitraat-esters ($\equiv \text{C} - \text{ONO}_2$) of peroxiden (o.a. $\equiv \text{C} - \text{OOC} \equiv$), maar ook in sommige anorganische stoffen, zoals ammoniumnitraat (NH_4NO_3) of ammoniumperchloraat (NH_4ClO_4) zelfs in één molecuul zijn verenigd. Enkele voorbeelden zijn gegeven in fig. 1. Toch is de vereniging in één molecuul geen voorwaarde. De oudst bekende explosieve stof, zwart buskruit, is een mengsel van koolstof, zwavel en kaliumnitraat (gew. verhouding ongeveer 14 : 11 : 75).

Ook endotherme verbindingen kunnen explosief zijn. Een bekend voorbeeld is acetyleen dat zowel in de gas-, vloeistof- als vaste fase kan exploderen:



Het al of niet explosief zijn is niet alleen afhankelijk van de hoeveelheid energie die kan vrijkomen. Belangrijk is in het algemeen ook dat de reactiesnelheid hoog is. Illustratief is verder het feit dat de verbrandingswarmte van de springstof trotyl meer dan driemaal hoger is dan de explosiewarmte.

De wijze waarop de reactie verloopt, kan zeer sterk verschillen. Onderscheid wordt daarom gemaakt tussen drie hoofdtypen van chemische explosie:

- a. *Thermische explosie*
- b. *Explosieve verbranding* of deflagratie
- c. *Detonatie*

Bij de thermische explosie is geen bepaalde reactiezone aan te wijzen; de stof ontleedt zich overal tegelijkertijd. Bij de explosieve verbranding en de detonatie daarentegen vindt de reactie plaats in een reactiezone, die zich bij gelijkblijvende omstandigheden met constante snelheid door de stof voortplant. De explosieve verbranding heeft een zuiver thermisch voortplantingsmechanisme, d.w.z. de stof wordt tot reactie gebracht door opwarming als gevolg van de hoge temperatuur in de naderende reactiezone. Bij de detonatie wordt de stof doorlopen door een schokgolf d.w.z. een drukstoot. Door de hoge temperatuur en druk achter het schokfront wordt de reactie geïnitieerd, terwijl de vrijkomende energie de schokgolf in stand houdt. De voortplantingssnelheid wordt detonatiesnelheid genoemd. Detonatiesnelheden liggen tussen 1 en 9 km/sec.

Een stof die kan detoneren, kan meestal ook explosief branden en een thermische explosie geven, maar *omgekeerd geldt dit niet*.

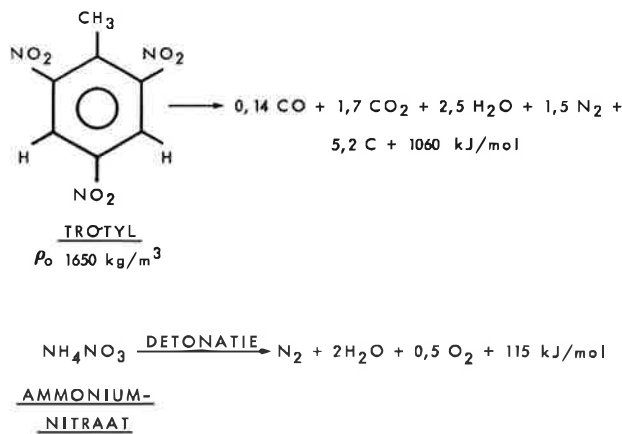


Fig. 1. Enkele voorbeelden van reacties bij explosieve stoffen.

Welk type explosie begint, hangt af van de wijze van initiëren. Bij geleidelijke verwarming begint een thermische explosie, bij plaatselijke verhitting door een vonk, vlam of brandende sigaret een explosieve verbranding, en bij plotselinge sterke compressie door slag of stoot een detonatie. Onder bepaalde omstandigheden kan een thermische explosie een explosieve verbranding tot gevolg hebben en kan deze laatste weer in een detonatie overgaan.

We zullen nu een aantal kenmerken van deze drie explosietypen nader bekijken en ten slotte enige aandacht geven aan de uitwerking van een explosie. Voor het verkrijgen van een overzicht is tabel 1 gemaakt, die voornamelijk betrekking heeft op explosies in vaste stoffen en vloeistoffen.

2. Thermische explosie

Dit type explosie komt voornamelijk voor in vloeistoffen en vaste stoffen, maar is ook in gassen niet uitgesloten.

Een thermische explosie heeft een verraderlijk karakter. Het begint vaak als een langzame, nauwelijks waarneembare exotherme ontleding in een opgeslagen partij stof. De warmte die per tijds-eenheid wordt geproduceerd, stroomt gedeeltelijk naar de omgeving weg en wordt voor de rest gebruikt om de stof op te warmen.

Warmtebalans

$$q \text{ (Wtts/kg)} = \Phi_w + c \frac{\partial T}{\partial t}$$

waarin

T = temperatuur, t = tijd en c = soortelijke warmte

Doorgaans neemt de reactiesnelheid met de temperatuur toe. In zijn eenvoudigste vorm kan dit

Tabel 1. Enkele kenmerken van de voornaamste typen van explosie

Thermische explosie	Explosieve verbranding (deflagratie)	Detonatie
<p>Geen reactiezone</p> <p>Ontleding overall in de stof. Reaktiesnelheid neemt toe door ontwikkelde ontledingswarmte (zelfopwarming). Tijdverloop tot explosie wordt inductieperiode genoemd. Duur van inductieperiode afhankelijk van warmteverlies, begintemperatuur en reactiekinetiek.</p> <p>Indien aktiveringsenergie en reactiewarmte groot zijn en de temperatuurgradiënt in de stof klein is, soms heftige explosie, gepaard gaande met knal.</p> <p>Bij grote temperatuurgradiënt door plaatselijke thermische explosie deflagratie van de rest van de stof mogelijk.</p>	<p>Reactiezone</p> <p>Voortplantingssnelheid wordt lineaire brandsnelheid genoemd. $10^5 - 100$ m/sec.</p> <p>Energieoverdracht naar nog niet gereageerde laag door warmtegeleiding, konvektie en straling.</p> <p>Gasvormige reactieproducten stromen i.h.a. van de reactiezone weg.</p> <p>Lineaire brandsnelheid is sterk afhankelijk van begintemperatuur en druk.</p> <p>Bij stof, vrijliggend aan lucht, wel vaak vuurverschijnsel maar geen knal. Bij opsluiting kan heftige ontploffing volgen.</p> <p>Ontsteking door verhitting. Gevoeligheid steeds groot.</p> <p>Deflagratie kan soms in detonatie overgaan.</p>	<p>Reactiezone</p> <p>Voortplantingssnelheid wordt detonatiesnelheid genoemd. 1-9 km/sec.</p> <p>Energieoverdracht naar nog niet gereageerde laag d.m.v. schokgolf met piekdrukken van 25-400 kbar.</p> <p>Gasvormige reactieproducten bewegen zich in de richting van de reactiezone.</p> <p>Detonatiesnelheid is bijna niet afhankelijk van begintemperatuur en druk.</p> <p>Effekt steeds sterk vernielend. Detonatie gaat in lucht altijd gepaard met knal.</p> <p>De inleiding geschiedt door schok. De gevoeligheid voor detonatie loopt sterk uiteen.</p>

met de vergelijking van Arrhenius voor een nulde-orde-reactie worden aangegeven:

$$q = Q \cdot k_0 \exp(-E/RT)$$

waarin

Q = explosiewarmte (J/kg), k_0 = reaktiesnelheidsconstante (sec^{-1})

E = aktiveringsenergie en R = gaskonstante.

Zolang $q > \Phi_w$, zal op deze wijze de temperatuur van de stof versneld stijgen.

Het gevolg is dat na een *inductieperiode*, die weken kan duren en waarbij de temperatuur bijv. slechts enkele tientallen graden stijgt, in korte tijd de temperatuur tot hoge waarden (1000°C of meer) kan oplopen. In fig. 2 is hiervan een voorbeeld gegeven.

In het adiabatische geval is de maximale temperatuurstijging Q/c , terwijl voor de inductieperiode kan worden afgeleid:

$$t_{\text{ind}} = (RT_0^2/E) \cdot (c/q_0)$$

waarin q_0 de warmteproductiesnelheid bij de begintemperatuur T_0 voorstelt. Ter illustratie wordt het volgende getalvoorbeeld gegeven. Bij een

begintemperatuur van 27°C ($=300^\circ\text{K}$), een aktiveringsenergie van 40 kcal/mol, een soortelijke warmte van 300 cal/kg (≈ 1200 J/kg) is de adiabatische inductieperiode bij $q_0 = 10$ mW/kg (d.i. slechts 10W/ton!) 150 uur, dus ruim zes dagen. Bij een tweemaal grotere initiële warmteproductie wordt de inductieperiode half zo groot.

Vooraf door de Russische onderzoekers Semenov, Frank-Kamenetzki en later Merzhanov is getracht het verloop van de thermische explosie mathematisch te beschrijven [1, 2, 3]. Door het invoeren van geschikt gekozen dimensieloze grootheden en enkele approximaties is men er bijv. in geslaagd de kritische hoeveelheid en de omgevingstemperatuur waarbij warmteproductie en -verlies juist nog gelijk kunnen worden en het dus niet tot een explosie komt (fig. 3, a en b), te berekenen in samenhang met de isolatie.

In de praktijk blijkt een begrip als de kritische hoeveelheid (straal) moeilijk hanteerbaar, aangezien verondersteld wordt, dat de warmteproductie alleen afhankelijk is van de temperatuur. Vele stoffen, zoals nitro-verbindingen en nitraatesters vertonen sterke autokatalytische effecten. Dit wil

zeggen dat de warmteproductie niet alleen met de temperatuur toeneemt maar ook door volgreakties met stijgende conversie. (In feite is dus $q = Q \cdot k_0 \cdot \exp(-E/RT) \cdot f(\eta)$, waarin $\eta =$ conversie.) Zo kan bij trotyl bij gelijkblijvende temperatuur de warmteproductiesnelheid met een factor 100 toenemen.

Uit het bovenstaande vloeit voort dat van een stationaire toestand, zoals in de kritische situatie, eigenlijk geen sprake kan zijn. Men doet er beter aan steeds de inductieperiode te bepalen, zodat men tijdig kan ingrijpen, nl. vóórdat de temperatuur en de druk een explosieve stijging vertonen.

Het experimentele onderzoek aan de thermische explosie is begonnen toen in de vorige eeuw na de uitvinding van het schietkatoen of cellulosenitrat (vaak foutief nitrocellulose genoemd) het nogal eens voorkwam dat een kruitmagazijn ontplofte.

Gevonden werd, dat de ontwikkeling van NO₂-gas volgreakties veroorzaakt die het ontledingsproces aanzienlijk versnellen en dat door het toevoegen van stoffen die snel met NO₂ reageren zoals difenylamine, het NO₂-gehalte laag gehouden kon worden. Dergelijke stoffen worden stabilisatoren genoemd. De klassieke stabiliteitsproeven zijn dan ook bijna alle gebaseerd op het aantonen van NO₂-gas of althans op het meten van een gasontwikkeling.

De groei van de chemische industrie maakte echter dat er allerlei produkten kwamen, die tijdens een produktiefase, bij opslag of bij (bulk)transport op een temperatuur kunnen komen, waarbij zich zelfopwarming kan voordoen en er gevaar voor een thermische explosie bestaat. Voorbeelden hiervan zijn de organische peroxiden, waarvan de toepassing in de verf- en kunststofindustrie juist berust op het minstabele karakter nl. het initiëren van radikaal-polymerisatiereakties. Een toenemend aantal van deze peroxiden wordt met het oog op voortijdige ontleding gekoeld bewaard en vervoerd (-10°C).

Deze ontwikkeling vereiste een nieuwe aanpak. Er kwamen calorische beproevingsmethoden voor de thermische stabiliteit zoals de differentiële thermische analyse (DTA) en de differential scanning calorimeter (DSC). Deze technieken misten echter verre de gevoeligheid (orde van grootte gevoeligheid bestaande apparatuur 1W/kg) om uit een gemeten warmteproductie de inductieperiode te kunnen berekenen.

In de afgelopen vijf jaar is het op het Technologisch Laboratorium TNO gelukt twee methoden te ontwikkelen, waarmee een warmteproductie van 1mW/kg nog kan worden aangetoond. Bij de eerste methode wordt de stof adiabatisch bewaard (geen warmteverlies, inductieperiode minimaal, gevaarlijkste situatie); bij de tweede blijft de stof op konstante temperatuur (isotherme meting, alle ontwikkelde warmte wordt afgevoerd); hiermee

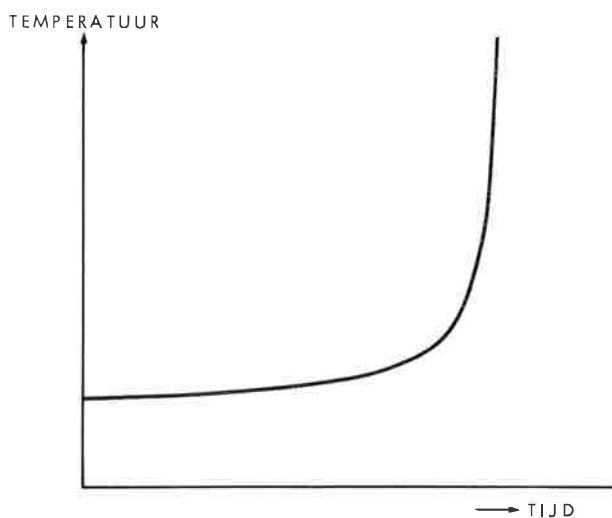


Fig. 2. Temperatuur-tijdverloop bij een thermische explosie.

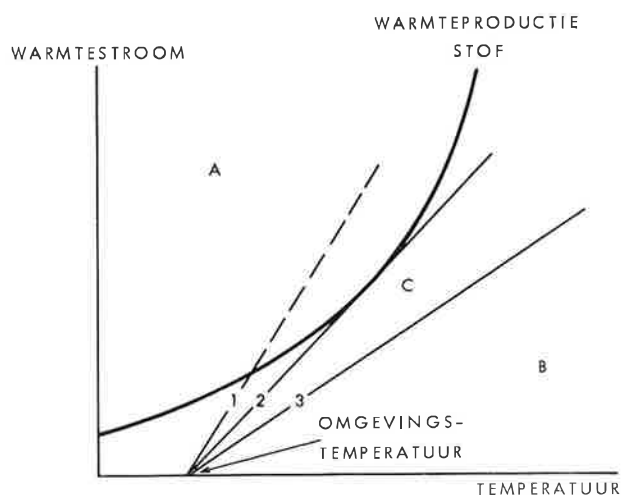


Fig. 3a.

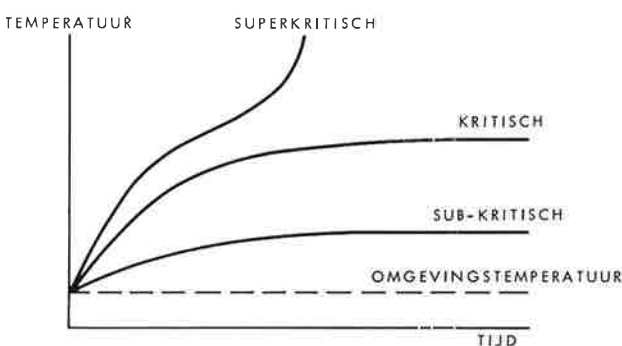


Fig. 3b.

Fig. 3a en b. Kritische situatie bij thermische explosie.
1, 2 en 3
Warmteverlieslijnen bij toenemende hoeveelheid stof of betere isolatie.
A = subkritisch gebied
B = superkritisch gebied
C = kritische situatie.

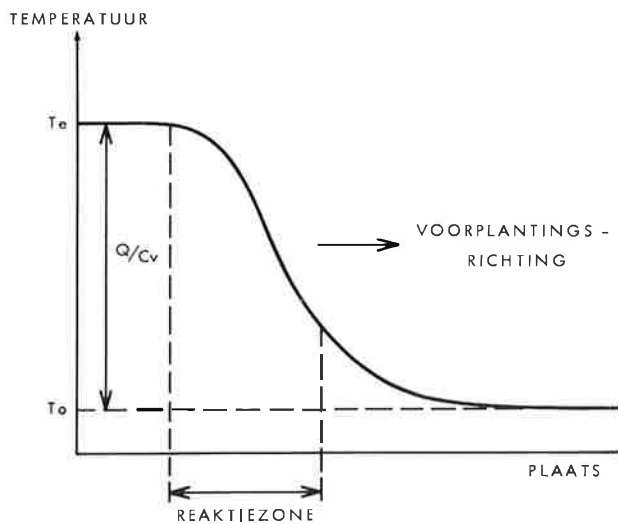


Fig. 4. Temperatuurprofiel reaktiezone bij explosieve verbranding.

kan bij uitstek het conversie-effect worden bestudeerd. (In het artikel van T. v. d. Putte en Th. M. Groothuizen worden beide methoden beschreven.) Het effect van een thermische explosie kan sterk uiteenlopen. Zo zal bij een vloeistof (diverse organische peroxiden, gesmolten ammoniumnitraat, nitromethaan, etheenoxide) door convectie en roering door opstijgende gasbellen de temperatuurgradiënt gering blijven. Het warmteverlies wordt volledig bepaald door de condities aan de wand van het vat:

$$\Phi_w = \frac{H \cdot O}{V \cdot \rho} (T - T_a)$$

waarin H = warmteoverdrachtscoëfficiënt, O = oppervlakte wand, V = volume vloeistof, ρ = soortelijke massa, T = temperatuur vloeistof, T_a = omgevingstemperatuur.

Aangezien de temperatuur overal gelijk is in de vloeistof, zal de reaktiesnelheid ook overal dezelfde zijn. Dit bijzondere geval van thermische explosie noemt men een *homogene explosie*. De heftigheid van een dergelijke explosie kan groot zijn, in het bijzonder bij hoge waarden van Q en E en bij een hoge gasproductie. In extreme gevallen zal het effect wellicht vergelijkbaar zijn met dat van een detonatie. De homogene explosie is experimenteel nog slechts weinig onderzocht, ook niet in het buitenland en het is dus van belang hieraan onderzoek te doen.

Mengsels van een brandbaar gas en lucht kunnen ook tot een thermische en zelfs tot een homogene explosie komen, maar de begintemperatuur moet dan meestal vrij hoog liggen (300 - 500°C). Deze temperatuur kan worden bereikt door snelle (adiabatische compressie.) Hierop berust de werking van de dieselmotor. De damp van organische peroxiden kan reeds bij veel lagere temperaturen tot explosie komen.

Bij vaste stoffen en vooral bij goed isolerende stoffen zoals kunstmest (warmtegeleidingscoëfficiënt 0,20 W/m.°C tegen die van glaswol 0,05 W/m.°C) komt meestal een temperatuurgradiënt voor met de hoogste temperatuur in het centrum van de stof. Het warmteverlies wordt dan vrijwel uitsluitend bepaald door de geleiding in de stof:

$$\Phi_w = - \frac{\lambda}{\rho} \nabla^2 T$$

waarin

λ = warmtegeleidingscoëff., en

∇^2 = Laplace-operator.

Het effect van een dergelijke lokale thermische explosie is zelfontbranding gevolgd door explosieve verbranding van de rest van de stof. Locale thermische explosies zijn ook wel eens het gevolg van een inhomogeniteit in de stof bijv. door een foutie-

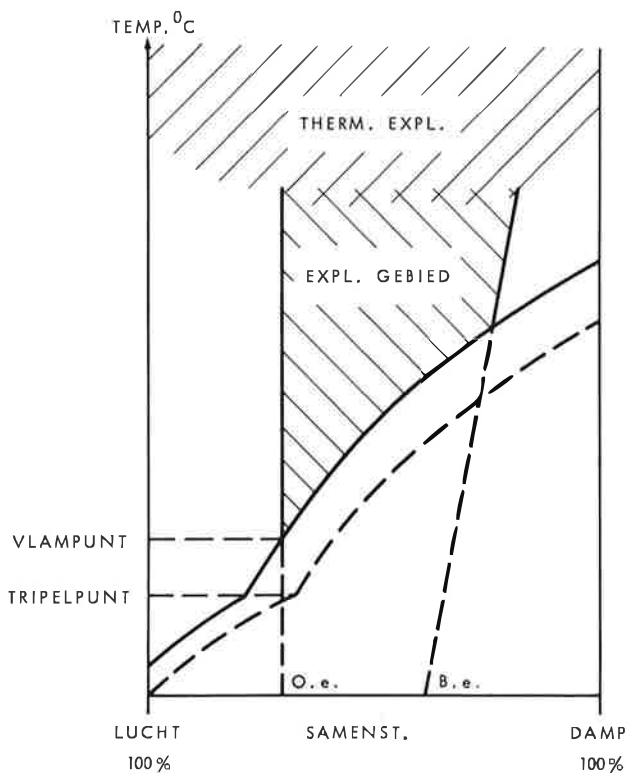


Fig. 5. Explosiegebied brandbaar damp-luchtmengsel, schematisch.

ve dosering van een grondstof of een andere proces-storing of door een incidentele verontreiniging. Zelfontbranding kan ook bij niet-explosieve stoffen voorkomen, zoals bij de zg. broei in partijen copra, vismeel, cellulose of licopodiumpoeder, waar de reactie plaatsvindt tussen een (veelal onverzadigd) organisch molecuul en luchtzuurstof. Toevoer van deze zuurstof door convectie of diffusie is dan essentieel, zodat deze broei in feite sterk verschilt van een thermische explosie. Deze broei is niet een explosiegevaar, maar een brandgevaar.

3. Explosieve verbranding

Wanneer een explosieve stof plaatselijk door verhitting tot reactie wordt gebracht, kan deze reactie zichzelf in stand houden, waarbij zich een reactiezone vormt die door de stof voortschrijdt. Door de hoge temperatuur in de reactiezone wordt warmte naar voren getransporteerd, de volgende laag stof vóór de reactiezone tot ontleding gebracht enz. Het temperatuurprofiel in de reactiezone is schematisch gegeven in fig. 4.

De snelheid waarmee de reactiezone zich voortplant heet *lineaire brandsnelheid* of bij een gas *vlamsnelheid*.

De explosieve verbranding van kunstmest, die nagenoeg nooit met explosie-effecten gepaard gaat, wordt dikwijls deflagratie genoemd. Bij de explosieve verbranding van een vrij aan de lucht liggende stof neemt men nooit een knal waar. Alleen bij gassen kan de vlamsnelheid zó groot zijn, dat men bij een zo klein mogelijke opsluiting (bijv. een zeepbel met explosief gas gevuld) reeds een knal hoort. Dit geldt ook voor stofexplosies.

Men heeft geprobeerd verband te leggen tussen de warmtegeleidbaarheid, reactiewarmte, ontledingskinetiek en de lineaire brandsnelheid. Ook op dit gebied zijn Russische onderzoekers actief geweest [4].

3.1. Gas- en stofexplosies

Hierbij gaat het meestal om mengsels van brandbaar gas, damp of stof met lucht (uitzondering bijv. H_2-Cl_2). Vandaar dat we hier met explosiegrenzen te maken hebben. Beneden de ondergrens is er een tekort aan brandbaar materiaal, terwijl boven de bovengrens door de afkoelende werking van de overmaat brandstof eveneens geen vlamvoortschrijding meer mogelijk is, met welk krachtig middel men het mengsel ook tracht te ontsteken. Tussen de explosiegrenzen ligt het explosiegebied. Dit wordt wijder bij toenemende temperatuur en vooral bij toenemende druk.

Bij een brandbare damp ziet het explosiegebied eruit als geschetst in fig. 5.

Er is een zekere minimale temperatuur, waar beneden de dampspanning te laag wordt om nog een

explosie te kunnen geven: *vlampunt*. (In de praktijk is het vlampunt iets hoger dan hier is aangegeven door het niet-ideaal zijn van de bepalingsmethoden). Bij lagere totale druk verschuift de dampspanningsbegrenzing naar omlaag. Boven een bepaalde hoge temperatuur is een thermische explosie mogelijk (zelfontbrandingstemperatuur) en bestaan er geen explosiegrenzen meer. Ter onderscheiding van het thermische explosiegebied zou men het gebied tussen de explosiegrenzen het zone-explosiegebied kunnen noemen.

In tabel II zijn voor enkele bekende mengsels de explosiegrenzen gegeven.

Tabel 2. *Explosiegrenzen [8] en minimale ontstekingsenergieën voor enkele gas-luchtmengsels*

	Explosiegrenzen		Minimale ontstekingsenergie (in J)
	Onder	Boven	
Waterstof	4,0%	75,0%	0,019
Methaan	5,3	15,0	0,29
Ethaan	3,0	12,5	0,24
Etheen	3,1	32,0	0,12
Acetyleen	2,5	80,0	0,02
Etheenoxide	3,0	80,0	—
Ammoniakgas	15,0	28,0	—

De minimale ontstekingsenergie kan voor gasexplosies zeer gering zijn. (Elektrische vonk met energie van mJ.) De grootte hangt af van de betrokken componenten en van de mengverhouding. In de buurt van de stoechiometrische mengverhouding is de ontstekingsenergie het laagst. Een voorbeeld is gegeven in tabel 2.

Indien een gasexplosie in een gesloten ruimte plaatsvindt, hangen de einddruk en temperatuur samen volgens de relatie:

$$\frac{p_e}{p_o} = m \frac{T_e}{T_o}$$

waarin p_o en p_e = resp. begin- en einddruk, m = de verhouding in molen reactieproduct en uitgangsmengsel, en T_o en T_e = begin- en eindtemperatuur. De eindtemperatuur volgt uit:

$$T_e = T_o + Q/c_v$$

waarin c_v = de soortelijke warmte bij constant volume.

Bij koolwaterstof-luchtmengsels en bij waterstof/lucht is p_e/p_o ca. 8 bij de stoechiometrische mengverhouding en 4 à 5 in de buurt van de explosiegrenzen.

Uitgaande van atmosferische druk is de einddruk bij een explosieve verbranding dus hoogstens ca. 8 ata.

Ook de lineaire brandsnelheid hangt af van de mengverhouding en varieert van enkele tientallen

cm/s tot m/s. Bovendien hebben temperatuur en druk nog invloed hierop.

Indien in een gesloten ruimte het gas puntvormig wordt ontstoken door bijv. een vonk, dan zal het vlamfront zich aanvankelijk bolvormig uitbreiden, ongeacht de vorm van de ruimte. Aangezien de druk zich vereffent over het verbrande en niet-verbrande deel van het gasmengsel, bestaat de snelheid van het vlamfront t.o.v. de wand van het vat uit twee componenten nl. de lineaire brandsnelheid (d.i. snelheid vlamfront t.o.v. het gas) en de stroomsnelheid van het gas t.o.v. de wand. Het niet-verbrande deel wordt daarbij adiabatisch gecomprimeerd. De druk in de ruimte zal voortdurend sneller stijgen, alleen al doordat de vlamfrontoppervlakte voortdurend toeneemt. De totale explosieduur (orde van grootte 0,1-1 sec) wordt groter bij toenemend volume van de ruimte (zie ref. 5 en het hierna volgende artikel van R. W. Trense).

Explosies van kolen-, suiker-, zetmeel- of kunstharststof en van nog diverse andere soorten stof zijn geen zeldzaamheid. De explosies kunnen omvangrijk zijn en veel schade aanrichten, ook al doordat de stroming en de drukgolf vóór het vlamfront uit stof van de vloer doen opwarrelen. Indien door een of andere oorzaak een kleine hoeveelheid stof wordt verspreid en ontstoken, kan op deze wijze de stofexplosie zichzelf voeden. In het artikel van Van Galen zal op de stofexplosie nader worden ingegaan.

Naast stofexplosies kent men nog nevelexplosies (fijn verdeelde brandbare vloeistof in lucht).

Preventie van gas- en stofexplosies komt neer op het voorkómen van explosieve concentraties. Volledige elimineren van ontstekingsoorzaken is vooral in niet-gesloten systemen moeilijk. Wrijvingsvonken en vonken door ontlading van statische elektriciteit hebben in het algemeen voor ontsteking van een explosief gasmengsel ruim voldoende energie.

Zoals gezegd vereisen stofexplosies meer energie, maar indien het stof vluchtige bestanddelen bevat die brandbaar zijn, kan een vonk het stof via een gasexplosie toch tot ontbranding brengen.

Op verschillende manieren is het mogelijk een reeds begonnen gas- of stofexplosie te stoppen of het effect ervan te verminderen. Zo kan men bijv. op het signaal van een voor druk gevoelige detector een container bluspoeder (NaHCO_3 onder druk) zich laten ledigen op het moment dat het vlamfront passeert. Veel simpeler werken vlamdovers in de vorm van bijv. opgerold metaalgaas, doch die zijn alleen geschikt voor gasexplosies in pijpen en bovendien moet men van tevoren bij de bouw van de installatie al weten van welke kant een explosie te verwachten is. De werking berust op afkoeling van de vlam. Door middel van explosieluiken of breekmembranen kan men trachten

de druk in een ruimte niet te hoog te laten oplopen en daarmee de schade te beperken. In de volgende artikelen van Trense, Snellink en Dragosavic zal aan deze materie de nodige aandacht worden gegeven.

De overgang van de explosieve verbranding in de veel sterker vernielende detonatie wordt nog besproken (punt 4).

3.2. Explosieve verbranding vaste stof en vloeistof

Bij atmosferische druk is de lineaire brandsnelheid bij vaste stoffen en vloeistoffen meestal zo laag dat men niet de indruk van een explosie krijgt; een uitzondering hierop is fijn zwart buskruit. Diverse industriële produkten kunnen explosief branden, waaronder een aantal organische peroxiden: droog benzooylperoxide (brandt heftig), cellulosenitraatgrondstof voor de verfindustrie, vuurwerk en luciferkoppelen, ammoniumpersulfaat, caporiet (calciumhypochloriet), etc. Testmethoden voor het onderzoek naar de mogelijkheid van explosieve verbranding worden behandeld in een artikel van Van Galen en Groothuizen.

Bij ammoniumnitraat-houdende kunstmeststoffen is de lineaire brandsnelheid extreem laag, nl. meestal 10-50 cm/uur. Ook de temperatuur in de reactiezone blijft betrekkelijk laag (400-500°C), zodat, in tegenstelling tot de meeste andere gevallen, geen vuurverschijnsel te zien is.

Het vuurverschijnsel is bij vrij aan de lucht liggende stoffen vaak omvangrijk en kan de indruk van een normale verbranding wekken, doordat gasvormige reactieprodukten ontstaan, die nog oxideerbaar zijn en aan de lucht branden. Sluit men de luchttoevoer af, dan blijft echter de explosieve verbranding doorgaan. Deze laatste kan men slechts blussen door sterke afkoeling van de reactiezone bijv. met water. Wanneer de druk kan oplopen, bijv. in een gesloten vat, dan heeft dit tot gevolg dat de reacties dichter bij het brandende oppervlak plaatsvinden en dat de warmte-overdracht door geleiding naar de nog niet-gereageerde stof toeneemt. Hierdoor stijgt de lineaire brandsnelheid. Verder is de lineaire brandsnelheid groter bij hogere begintemperatuur.

De relatie tussen de lineaire brandsnelheid r en de druk p wordt meestal geformuleerd als

$$r = A + Bp^n$$

waarin A , B en n constanten zijn. De waarde van n is meestal ≤ 1 .

In een gesloten vat zal de druk dus voortdurend sneller stijgen, totdat de stof grotendeels is verbrand. Een voorbeeld is gegeven in fig. 6.

Bij atmosferische druk heeft rookzwak kruit een brandsnelheid van ongeveer 10 mm/sec.

Alleen indien het vat niet voldoende sterk is, zal er een explosie van het vat volgen. De lineaire brand-

zeggen dat de warmteproductie niet alleen met de temperatuur toeneemt maar ook door volgreactionen met stijgende conversie. (In feite is dus $q = Q \cdot k_0 \cdot \exp(-E/RT) \cdot f(\eta)$, waarin $\eta =$ conversie.) Zo kan bij trotyl bij gelijkblijvende temperatuur de warmteproductiesnelheid met een faktor 100 toenemen.

Uit het bovenstaande vloeit voort dat van een stationaire toestand, zoals in de kritische situatie, eigenlijk geen sprake kan zijn. Men doet er beter aan steeds de inductieperiode te bepalen, zodat men tijdig kan ingrijpen, nl. vóórdat de temperatuur en de druk een explosieve stijging vertonen.

Het experimentele onderzoek aan de thermische explosie is begonnen toen in de vorige eeuw na de uitvinding van het schietkatoen of cellulosenitrat (vaak foutief nitrocellulose genoemd) het nogal eens voorkwam dat een kruitmagazijn ontplofte.

Gevonden werd, dat de ontwikkeling van NO_2 -gas volgreactionen veroorzaakt die het ontledingsproces aanzienlijk versnellen en dat door het toevoegen van stoffen die snel met NO_2 reageren zoals difenylamine, het NO_2 -gehalte laag gehouden kon worden. Dergelijke stoffen worden stabilisatoren genoemd. De klassieke stabiliteitsproeven zijn dan ook bijna alle gebaseerd op het aantonen van NO_2 -gas of althans op het meten van een gasontwikkeling.

De groei van de chemische industrie maakte echter dat er allerlei produkten kwamen, die tijdens een produktiefase, bij opslag of bij (bulk)transport op een temperatuur kunnen komen, waarbij zich zelfopwarming kan voordoen en er gevaar voor een thermische explosie bestaat. Voorbeelden hiervan zijn de organische peroxiden, waarvan de toepassing in de verf- en kunststofindustrie juist berust op het minstabele karakter nl. het initiëren van radikaal-polymerisatiereacties. Een toenemend aantal van deze peroxiden wordt met het oog op voortijdige ontleding gekoeld bewaard en vervoerd (-10°C).

Deze ontwikkeling vereiste een nieuwe aanpak. Er kwamen calorische beproevingsmethoden voor de thermische stabiliteit zoals de differentiële thermische analyse (DTA) en de differential scanning calorimeter (DSC). Deze technieken misten echter verre de gevoeligheid (orde van grootte gevoeligheid bestaande apparatuur 1W/kg) om uit een gemeten warmteproductie de inductieperiode te kunnen berekenen.

In de afgelopen vijf jaar is het op het Technologisch Laboratorium TNO gelukt twee methoden te ontwikkelen, waarmee een warmteproductie van 1mW/kg nog kan worden aangetoond. Bij de eerste methode wordt de stof adiabatisch bewaard (geen warmteverlies, inductieperiode minimaal, gevaarlijkste situatie); bij de tweede blijft de stof op konstante temperatuur (isotherme meting, alle ontwikkelde warmte wordt afgevoerd); hiermee

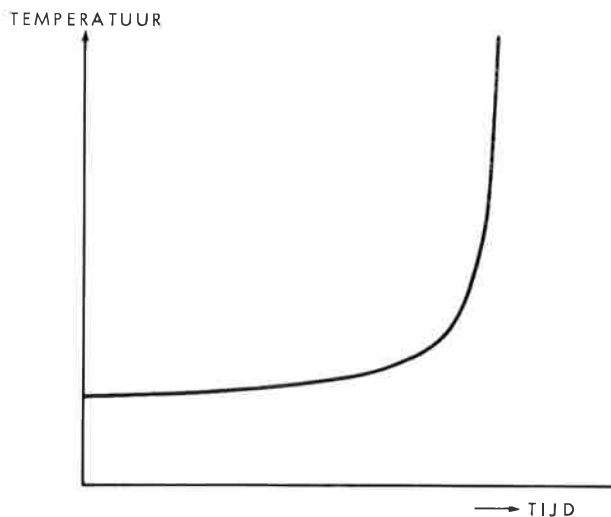


Fig. 2. Temperatuur-tijdverloop bij een thermische explosie.

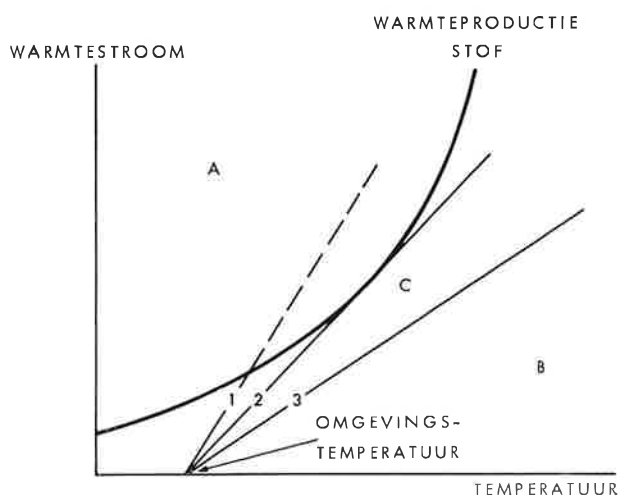


Fig. 3a.

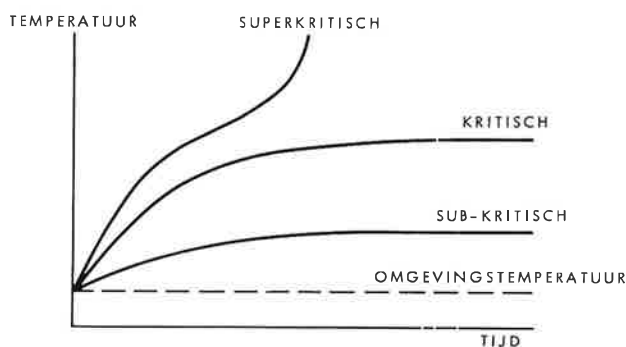


Fig. 3b.

Fig. 3a en b. Kritische situatie bij thermische explosie.
1, 2 en 3
Warmteverlieslijnen bij toenemende hoeveelheid stof of betere isolatie.
A = subkritisch gebied
B = superkritisch gebied
C = kritische situatie.

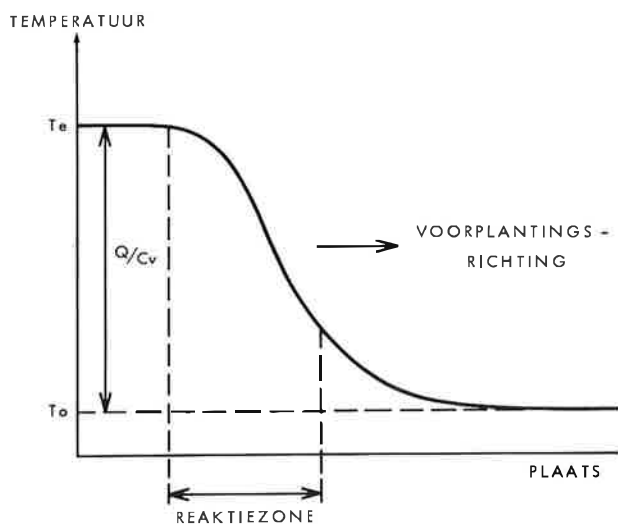


Fig. 4. Temperatuurprofiel reactiezone bij explosieve verbranding.

kan bij uitstek het conversie-effect worden bestudeerd. (In het artikel van T. v. d. Putte en Th. M. Groothuizen worden beide methoden beschreven.) Het effect van een thermische explosie kan sterk uiteenlopen. Zo zal bij een vloeistof (diverse organische peroxiden, gesmolten ammoniumnitraat, nitromethaan, etheenoxide) door convectie en roering door opstijgende gasbellen de temperatuurgradiënt gering blijven. Het warmteverlies wordt volledig bepaald door de condities aan de wand van het vat:

$$\Phi_w = \frac{H \cdot O}{V \cdot \rho} (T - T_a)$$

waarin H = warmteoverdrachtscoëfficiënt, O = oppervlakte wand, V = volume vloeistof, ρ = soortelijke massa, T = temperatuur vloeistof, T_a = omgevingstemperatuur.

Aangezien de temperatuur overal gelijk is in de vloeistof, zal de reactiesnelheid ook overal dezelfde zijn. Dit bijzondere geval van thermische explosie noemt men een *homogene explosie*. De heftigheid van een dergelijke explosie kan groot zijn, in het bijzonder bij hoge waarden van Q en E en bij een hoge gasproductie. In extreme gevallen zal het effect wellicht vergelijkbaar zijn met dat van een detonatie. De homogene explosie is experimenteel nog slechts weinig onderzocht, ook niet in het buitenland en het is dus van belang hieraan onderzoek te doen.

Mengsels van een brandbaar gas en lucht kunnen ook tot een thermische en zelfs tot een homogene explosie komen, maar de begintemperatuur moet dan meestal vrij hoog liggen (300 - 500°C). Deze temperatuur kan worden bereikt door snelle (adiabatische compressie.) Hierop berust de werking van de dieselmotor. De damp van organische peroxiden kan reeds bij veel lagere temperaturen tot explosie komen.

Bij vaste stoffen en vooral bij goed isolerende stoffen zoals kunstmest (warmtegeleidingscoëfficiënt 0,20 W/m.°C tegen die van glaswol 0,05 W/m.°C) komt meestal een temperatuurgradiënt voor met de hoogste temperatuur in het centrum van de stof. Het warmteverlies wordt dan vrijwel uitsluitend bepaald door de geleiding in de stof:

$$\Phi_w = - \frac{\lambda}{\rho} \nabla^2 T$$

waarin

λ = warmtegeleidingscoëff., en

∇^2 = Laplace-operator.

Het effect van een dergelijke lokale thermische explosie is zelfontbranding gevolgd door explosieve verbranding van de rest van de stof. Locale thermische explosies zijn ook wel eens het gevolg van een inhomogeniteit in de stof bijv. door een foutie-

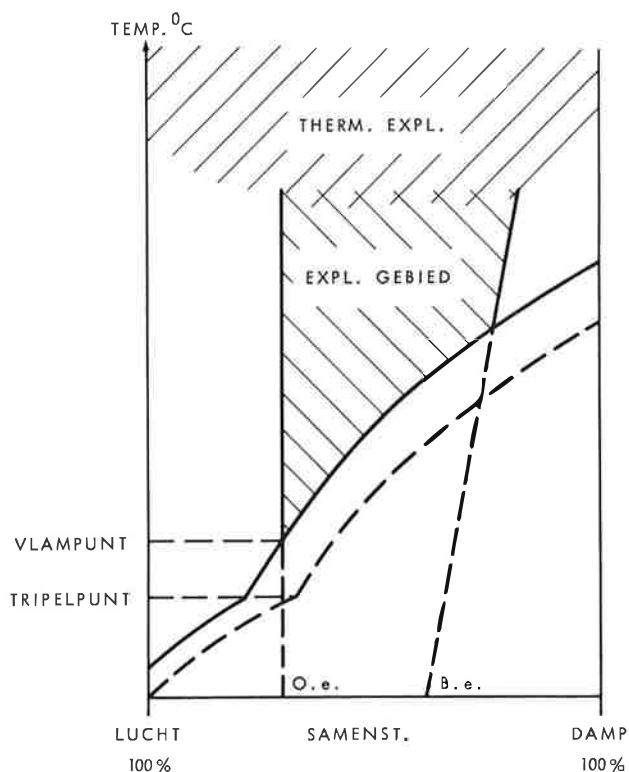


Fig. 5. Explosiegebied brandbaar damp-luchtmengsel, schematisch.

ve dosering van een grondstof of een andere proces-storing of door een incidentele verontreiniging. Zelfontbranding kan ook bij niet-explosieve stoffen voorkomen, zoals bij de zg. broei in partijen copra, vismeel, cellulose of licopodiumpoeder, waar de reactie plaatsvindt tussen een (veelal onverzadigd) organisch molecuul en luchtzuurstof. Toevoer van deze zuurstof door convectie of diffusie is dan essentieel, zodat deze broei in feite sterk verschilt van een thermische explosie. Deze broei is niet een explosiegevaar, maar een brandgevaar.

3. Explosieve verbranding

Wanneer een explosieve stof plaatselijk door verhitting tot reactie wordt gebracht, kan deze reactie zichzelf in stand houden, waarbij zich een reactiezone vormt die door de stof voortschrijdt. Door de hoge temperatuur in de reactiezone wordt warmte naar voren getransporteerd, de volgende laag stof vóór de reactiezone tot ontleding gebracht enz. Het temperatuurprofiel in de reactiezone is schematisch gegeven in fig. 4.

De snelheid waarmee de reactiezone zich voortplant heet *lineaire brandsnelheid* of bij een gas *vlamsnelheid*.

De explosieve verbranding van kunstmest, die nauwelijks met explosie-effekten gepaard gaat, wordt dikwijls deflagratie genoemd. Bij de explosieve verbranding van een vrij aan de lucht liggende stof neemt men nooit een knal waar. Alleen bij gassen kan de vlamsnelheid zó groot zijn, dat men bij een zo klein mogelijke opsluiting (bijv. een zeepbel met explosief gas gevuld) reeds een knal hoort. Dit geldt ook voor stofexplosies.

Men heeft geprobeerd verband te leggen tussen de warmtegeleidbaarheid, reactiewarmte, ontledingskinetiek en de lineaire brandsnelheid. Ook op dit gebied zijn Russische onderzoekers actief geweest [4].

3.1. Gas- en stofexplosies

Hierbij gaat het meestal om mengsels van brandbaar gas, damp of stof met lucht (uitzondering bijv. H_2-Cl_2). Vandaar dat we hier met explosiegrenzen te maken hebben. Beneden de ondergrens is er een tekort aan brandbaar materiaal, terwijl boven de bovengrens door de afkoelende werking van de overmaat brandstof eveneens geen vlamvoortschrijding meer mogelijk is, met welk krachtig middel men het mengsel ook tracht te ontsteken. Tussen de explosiegrenzen ligt het explosiegebied. Dit wordt wijder bij toenemende temperatuur en vooral bij toenemende druk.

Bij een brandbare damp ziet het explosiegebied eruit als geschetst in fig. 5.

Er is een zekere minimale temperatuur, waar beneden de dampspanning te laag wordt om nog een

explosie te kunnen geven: *vlampunt*. (In de praktijk is het vlampunt iets hoger dan hier is aangegeven door het niet-ideaal zijn van de bepalingmethoden). Bij lagere totale druk verschuift de dampspanningsbegrenzing naar omlaag. Boven een bepaalde hoge temperatuur is een thermische explosie mogelijk (zelfontbrandingstemperatuur) en bestaan er geen explosiegrenzen meer. Ter onderscheiding van het thermische explosiegebied zou men het gebied tussen de explosiegrenzen het zone-explosiegebied kunnen noemen.

In tabel II zijn voor enkele bekende mengsels de explosiegrenzen gegeven.

Tabel 2. Explosiegrenzen [8] en minimale ontstekingsenergieën voor enkele gas-luchtmengsels

	Explosiegrenzen		Minimale ontstekingsenergie (in J)
	Onder	Boven	
Waterstof	4,0%	75,0%	0,019
Methaan	5,3	15,0	0,29
Ethaan	3,0	12,5	0,24
Etheen	3,1	32,0	0,12
Acetyleen	2,5	80,0	0,02
Etheenoxide	3,0	80,0	—
Ammoniakgas	15,0	28,0	—

De minimale ontstekingsenergie kan voor gasexplosies zeer gering zijn. (Elektrische vonk met energie van mJ.) De grootte hangt af van de betrokken componenten en van de mengverhouding. In de buurt van de stoechiometrische mengverhouding is de ontstekingsenergie het laagst. Een voorbeeld is gegeven in tabel 2.

Indien een gasexplosie in een gesloten ruimte plaatsvindt, hangen de einddruk en temperatuur samen volgens de relatie:

$$\frac{p_e}{p_o} = m \frac{T_e}{T_o}$$

waarin p_o en p_e = resp. begin- en einddruk, m = de verhouding in molen reactieproduct en uitgangsmengsel, en T_o en T_e = begin- en eindtemperatuur. De eindtemperatuur volgt uit:

$$T_e = T_o + Q/c_v$$

waarin c_v = de soortelijke warmte bij constant volume.

Bij koolwaterstof-luchtmengsels en bij waterstof/lucht is p_e/p_o ca. 8 bij de stoechiometrische mengverhouding en 4 à 5 in de buurt van de explosiegrenzen.

Uitgaande van atmosferische druk is de einddruk bij een explosieve verbranding dus hoogstens ca. 8 ata.

Ook de lineaire brandsnelheid hangt af van de mengverhouding en varieert van enkele tientallen

cm/s tot m/s. Bovendien hebben temperatuur en druk nog invloed hierop.

Indien in een gesloten ruimte het gas puntvormig wordt ontstoken door bijv. een vonk, dan zal het vlamfront zich aanvankelijk bolvormig uitbreiden, ongeacht de vorm van de ruimte. Aangezien de druk zich vereffent over het verbrande en niet-verbrande deel van het gasmengsel, bestaat de snelheid van het vlamfront t.o.v. de wand van het vat uit twee componenten nl. de lineaire brandsnelheid (d.i. snelheid vlamfront t.o.v. het gas) en de stroomsnelheid van het gas t.o.v. de wand. Het niet-verbrande deel wordt daarbij adiabatisch gecomprimeerd. De druk in de ruimte zal voortdurend sneller stijgen, alleen al doordat de vlamfrontoppervlakte voortdurend toeneemt. De totale explosieduur (orde van grootte 0,1-1 sec) wordt groter bij toenemend volume van de ruimte (zie ref. 5 en het hierna volgende artikel van R. W. Trense).

Explosies van kolen-, suiker-, zetmeel- of kunstharsstof en van nog diverse andere soorten stof zijn geen zeldzaamheid. De explosies kunnen omvangrijk zijn en veel schade aanrichten, ook al doordat de stroming en de drukgolf vóór het vlamfront uit stof van de vloer doen opdwarrelen. Indien door een of andere oorzaak een kleine hoeveelheid stof wordt verspreid en ontstoken, kan op deze wijze de stofexplosie zichzelf voeden. In het artikel van Van Galen zal op de stofexplosie nader worden ingegaan.

Naast stofexplosies kent men nog nevelexplosies (fijn verdeelde brandbare vloeistof in lucht).

Preventie van gas- en stofexplosies komt neer op het voorkómen van explosieve concentraties. Volledige eliminering van ontstekingsoorzaken is vooral in niet-gesloten systemen moeilijk. Wrijvingsvonken en vonken door ontlading van statische elektriciteit hebben in het algemeen voor ontsteking van een explosief gasmengsel ruim voldoende energie.

Zoals gezegd vereisen stofexplosies meer energie, maar indien het stof vluchtige bestanddelen bevat die brandbaar zijn, kan een vonk het stof via een gasexplosie toch tot ontbranding brengen.

Op verschillende manieren is het mogelijk een reeds begonnen gas- of stofexplosie te stoppen of het effect ervan te verminderen. Zo kan men bijv. op het signaal van een voor druk gevoelige detector een container bluspoeder (NaHCO_3 onder druk) zich laten ledigen op het moment dat het vlamfront passeert. Veel simpeler werken vlamdovers in de vorm van bijv. opgerold metaalgaas, doch die zijn alleen geschikt voor gasexplosies in pijpen en bovendien moet men van tevoren bij de bouw van de installatie al weten van welke kant een explosie te verwachten is. De werking berust op afkoeling van de vlam. Door middel van explosieluiken of breekmembranen kan men trachten

de druk in een ruimte niet te hoog te laten oplopen en daarmee de schade te beperken. In de volgende artikelen van Trense, Snellink en Dragosavic zal aan deze materie de nodige aandacht worden gegeven.

De overgang van de explosieve verbranding in de veel sterker vernielende detonatie wordt nog besproken (punt 4).

3.2. Explosieve verbranding vaste stof en vloeistof

Bij atmosferische druk is de lineaire brandsnelheid bij vaste stoffen en vloeistoffen meestal zo laag dat men niet de indruk van een explosie krijgt; een uitzondering hierop is fijn zwart buskruit. Diverse industriële produkten kunnen explosief branden, waaronder een aantal organische peroxiden: droog benzoylperoxide (brandt heftig), cellulosenitratgrondstof voor de verfindustrie, vuurwerk en luciferkoppen, ammoniumpersulfaat, caporiet (calciumhypochloriet), etc. Testmethoden voor het onderzoek naar de mogelijkheid van explosieve verbranding worden behandeld in een artikel van Van Galen en Groothuizen.

Bij ammoniumnitraat-houdende kunstmeststoffen is de lineaire brandsnelheid extreem laag, nl. meestal 10-50 cm/uur. Ook de temperatuur in de reactiezone blijft betrekkelijk laag ($400-500^\circ\text{C}$), zodat, in tegenstelling tot de meeste andere gevallen, geen vuurverschijnsel te zien is.

Het vuurverschijnsel is bij vrij aan de lucht liggende stoffen vaak omvangrijk en kan de indruk van een normale verbranding wekken, doordat gasvormige reactieprodukten ontstaan, die nog oxideerbaar zijn en aan de lucht branden. Sluit men de luchttoevoer af, dan blijft echter de explosieve verbranding doorgaan. Deze laatste kan men slechts blussen door sterke afkoeling van de reactiezone bijv. met water. Wanneer de druk kan oplopen, bijv. in een gesloten vat, dan heeft dit tot gevolg dat de reacties dichter bij het brandende oppervlak plaatsvinden en dat de warmte-overdracht door geleiding naar de nog niet-gereageerde stof toeneemt. Hierdoor stijgt de lineaire brandsnelheid. Verder is de lineaire brandsnelheid groter bij hogere begintemperatuur.

De relatie tussen de lineaire brandsnelheid r en de druk p wordt meestal geformuleerd als

$$r = A + Bp^n$$

waarin A , B en n constanten zijn. De waarde van n is meestal ≤ 1 .

In een gesloten vat zal de druk dus voortdurend sneller stijgen, totdat de stof grotendeels is verbrand. Een voorbeeld is gegeven in fig. 6.

Bij atmosferische druk heeft rookzwak kruit een brandsnelheid van ongeveer 10 mm/sec.

Alleen indien het vat niet voldoende sterk is, zal er een explosie van het vat volgen. De lineaire brand-

Wat betreft de schokgolf zullen we ons beperken tot een korte beschouwing van de schokgolf in lucht. Bepalend voor het effect ervan zijn de piekdruk en de positieve impuls. Beide zijn sterk afhankelijk van het type explosie, de hoeveelheid exploderende stof en de afstand tot het explosiepunt. In het algemeen is ook de detonatie weer de krachtigste schokgolfverwekker. Over de schokgolfuitbreiding bij een detonerende trotyllading is veel bekend, zodat de neiging bestaat schokgolven van geheel andere bron bijv. door gasexplosie (deflagratie) of een thermische explosie uit te drukken in trotylequivalenties. Dit is niet steeds verantwoord, door verschil in schokgolfprofiel. Bij de verwerking van de gegevens maakt men veelvuldig gebruik van schaalwetten. De schokgolfeigenschappen worden daarin gegeven als functie van $r/G^{1/3}$, waarin r = afstand tot het explosiepunt en G = ladingsgewicht.

Het effect van schokgolven op personen, gebouwen en installaties hangt sterk af van de situatie en kan moeilijk in een enkel getal worden uitgedrukt. Om een globale indruk te geven worden de volgende piekoverdrukken genoemd. (Hier is bedoeld de piekoverdruk van de invallende schokgolf, dus niet de reflektiedruk.) Beneden 0,2 bar is er bij eenmaal blootstellen bij personen geen schadelijk gevolg. Vensterruiten kunnen reeds breken beneden deze druk (bijv. 0,05 bar, zie artikel Huysmans).

Trommelvliezen scheuren bij 0,5-1 bar en longbeschadiging komt voor bij 1 bar en meer. Dodelijk kunnen drukken zijn van 3 bar en hoger. Schade aan gebouwen begint meestal met het dak: 0,1-0,2 bar. Het is overigens goed mogelijk voor een gegeven situatie beschermingen te maken en na te gaan of bepaalde wanden en constructies voldoende sterk zijn. Daarbij moet rekening gehouden worden met het puls vormig verloop van de druk: dynamische rekenwijze. (Statisch rekenen is beslist ontoereikend.)

Ter illustratie worden hier enkele waarden gegeven van de piekoverdrukken bij het bolvormig uitbreidende schokfront bij de detonatie van 1 kg trotyl ($d = 1,52$) vrij in de lucht. Op een afstand van 1 m is de piekoverdruk 11 bar, op 2 m 1,8 bar, op 5 m 0,3 bar, en op 10 m 0,114 bar [9].

Schokgolven in grond en water en hun effect is weer een onderwerp apart. Een typisch effect kan optreden bij reflectie van een schokgolf in een vaste stof (metaal) van een vrij uiteinde. Er loopt dan een rekgolf terug die, mits van voldoende intensiteit, de treksterkte van het materiaal kan overschrijden, zodat er een schotelvormig deel afspringt. Dit verschijnsel heet afscherving (scabbing of spalling).

Reeds werd opgemerkt dat bij de detonatie van een stof in bijv. een stalen vat scherven ontstaan. Door de gasdruk krijgen de scherven een hoge

snelheid die afhankelijk van de massaverhouding springstof-metaal en het type springstof ligt tussen 500 en 1500 m/sec. Tijdens de vlucht verliezen de scherven hun snelheid. Aangenomen wordt dat een stalen scherf met een kinetische energie van 100 Nm (bijv. scherf van 1 g met een snelheid van 315 m/sec) een ernstige en soms dodelijke verwonding teweeg brengt. Van een glasscherf van 10 g met een snelheid van 100 m/s (d.i. eveneens 100 Nm energie) wordt hetzelfde gezegd.

Heeft men te maken met verscheidene verpakkingseenheden, dan bestaat soms de kans op een *massaexplosie*. Hieronder verstaat men een explosie die zich zo snel van de ene verpakkingseenheid naar de andere uitbreidt, dat het effect naar buiten zich voordoet als één gelijktijdige explosie. Dit kan door scherven of schokgolven. Meestal hebben we daarbij te maken met de zg. *sympatische detonatie*: de detonatie van één lading leidt die van de andere in. Vooral scherven zijn daarbij effectief.

Veilige afstanden worden uitgedrukt in de vorm:

$$r = k \sqrt[3]{G}$$

Bij r in meters, G in kg is k een empirische konstante van de grootte-orde 0,5, afhankelijk van het te beschermen objekt.

Een aarden wal, een muur e.d. beschermen goed tegen scherven maar niet goed tegen schokgolven. Weliswaar heeft reflectie plaats wanneer de schokgolf een wal passeert, maar na een afstand van enkele malen de hoogte van de wal heeft de schokgolf zich hersteld en heeft ze ook dichtbij de grond praktisch weer haar oorspronkelijke sterkte terug.

Referenties

- [1] Rapport Technologisch Laboratorium RVO-TNO. Adiabatische bewaarproef, methode voor de bepaling van de inductieperiode bij thermische explosies, dd. 17 dec. 1968, opdr. 8638-II.
- [2] J. L. C. van Geel. Dissertatie Delft. 1969.
- [3] Rapport Technologisch Laboratorium, Ir. Blanker.
- [4] A. G. Merzhanov: The theory of stable homogeneous combustion of condensed substances. *Combustion and Flame* 13 (1969) 143.
- [5] W. Bartknecht: *Erprobung von Explosionssicherungen an Rohrleitungen und Behältern*. Moderne Unfallverhütung Heft. 12. Winterhalbjahr 67/68. pp. 36-49.
- [6] Th. M. Groothuizen, E. W. Lindeijer en H. J. Pasman. *Stikstof*, 14 (1970).
- [7] M. Held: Struktur der Detonationsfront, *Explosivstoffe*, nr. 11/12 (1969) 241
- [8] B. Lewis and G. Von Elbe: *Combustion, Flames and Explosions of Gases*. Acad. Press. Inc. 2e druk 1968.
- [9] Sune A. Granström: Loading characteristics of air blasts from detonating charges. (1956).

Thermische explosies van vaste stoffen en vloeistoffen

Thermal explosions of solids and liquids

T. VAN DE PUTTE en Th. M. GROOTHUIZEN

Technologisch Laboratorium TNO

Samenvatting

Zelfopwarming treedt op wanneer een enkelvoudige stof of mengsel op een zodanige temperatuur bewaard of verwerkt wordt, dat de warmteontwikkeling, veroorzaakt door exotherme chemische reacties, groter is dan de warmte-afvoer. Indien de warmteontwikkeling voortdurend groter is dan de warmteverliezen kan de zelfopwarming aanleiding geven tot een thermische explosie. De tijd (inductieperiode) speelt bij deze explosie een grote rol.

Het effect van een thermische explosie varieert sterk. Enerzijds kan een thermische explosie een plaatselijke ontleding veroorzaken, anderzijds kan het effect lijken op het effect van een detonatie. Het effect zal tevens sterk afhangen van de situatie waarin de stof zich op het moment van de explosie bevindt.

In dit artikel worden enkele thermische explosies besproken die in het verleden zijn opgetreden. Vervolgens wordt een overzicht gegeven van de methoden van onderzoek zoals deze op het ogenblik in gebruik zijn bij TNO voor de bepaling van de thermische stabiliteit van vaste stoffen en vloeistoffen en het effect van een thermische explosie. Ten slotte wordt een overzicht gegeven hoe met de gemeten stoffeigenschappen praktijksituaties berekend kunnen worden.

Inleiding

Zelfopwarming vindt plaats wanneer een enkelvoudige stof of een mengsel van stoffen op een zodanige temperatuur bewaard of verwerkt wordt, dat de warmteontwikkeling, veroorzaakt door exotherme chemische reacties, groter is dan de warmteafvoer. Deze zelfopwarming kan aanleiding geven tot een thermische explosie. De tijd (inductieperiode) speelt hierbij een grote rol. Gedurende het grootste gedeelte van deze inductieperiode is de zelfopwarming nauwelijks waar te nemen. Slechts gedurende het allerlaatste gedeelte stijgt de temperatuur snel. Hierdoor heeft de thermische explosie vaak een verraderlijk karakter. Vooral in die gevallen, waarbij de warmteafvoer in de beginfase bijna even groot is als de warmteproductie van de stof of wanneer autokatalyse of volgreacties optreden, kan de temperatuur zeer plotseling stijgen.

Summary

Self-heating occurs when a substance or a mixture of substances is stored or processed at such a temperature that the heat-generation caused by exothermal reactions continuously exceeds the heat-losses. This self-heating may result in a thermal explosion. In this explosion the induction period plays an important part.

The effect of a thermal explosion may vary a great deal. On the one hand a thermal explosion may cause a localized decomposition, on the other hand the effect may be similar to that of a detonation. Moreover the effect depends in a great measure on the quantity and the extent of the confinement of the substance at the moment of the explosion.

In this article a few thermal explosions are discussed which occurred in the past. Then a survey is given of the methods of investigating the thermal stability of solids and liquids and the effect of thermal explosions as applied at present at the Technological Laboratory.

Finally a survey is given how practical situations can be calculated from the measured characteristics of a substance.

Het effect van de uiteindelijke explosie kan sterk variëren. Het wordt namelijk niet alleen bepaald door de stoffeigenschappen maar ook door de aard van de situatie waarin de stof zich bevindt. In het algemeen zullen vaste stoffen zichzelf niet-homogeen (temperatuursgradiënt in de stof) opwarmen, terwijl vloeistoffen zichzelf meestal homogeen (geen temperatuursgradiënt in de stof) zullen opwarmen, doordat de gasvormige ontledingsproducten de vloeistof mengen, waardoor temperatuursverschillen grotendeels worden opgeheven. Het is duidelijk, dat naarmate de thermische explosie van een bepaalde stof homogener verloopt, het effect van de explosie op de omgeving heviger zal zijn. De heftigheid van zowel de homogene als van de niet-homogene thermische explosie is ten slotte sterk afhankelijk van de aard van de situatie. Opsluiting kan enerzijds scherfwerking ver-

oorzaken, terwijl anderzijds warmteverliezen, die bij open opslag kunnen optreden door verdamping of dissociatie, sterk worden verminderd.

Een zelfopwarmingsproces behoeft, vooral bij vaste stoffen, niet altijd te leiden tot een thermische explosie van de gehele hoeveelheid stof. Indien de zelfopwarming ten gevolge van een inhomogeniteit (verontreiniging) in de stof zich alleen plaatselijk voordoet, of de zelfopwarming niet-homogeen is, kan een plaatselijke thermische explosie een explosieve verbranding in de rest van de stof veroorzaken.

Voor de beoordeling van de mogelijkheid van zelfopwarming en de bepaling van de grootte van de inductieperiode en het effect van de thermische explosie, dient naast de stoffeigenschappen ook de aard van de situatie bekend te zijn.

Overzicht van enige accidentele thermische explosies

Alle stoffen en stofmengsels die bij normale opslag- of produktietemperatuur een exotherme chemische reactie vertonen, zullen aanleiding geven tot zelfopwarming, mits de afgevoerde warmte niet groter is dan de geproduceerde warmte. Indien voldoende energie beschikbaar is kan de zelfopwarming een thermische explosie veroorzaken. In de praktijk vertonen vele stoffen deze eigenschap. Voorbeelden zijn:

organische peroxiden
organische nitroverbindingen en nitraatesters
ammoniumnitraathoudende stoffen

In het verleden zijn vele ongelukken gebeurd, welke veroorzaakt zijn door thermische explosies. In het algemeen zijn deze in de volgende kategoriën onder te verdelen.

1. Thermische explosie bij opslag en vervoer

Bij opslag en vervoer kunnen stoffen of stofmengsels bloot staan aan temperaturen, die aanleiding geven tot exotherme ontleding. Afhankelijk van de warmteverliezen via de verpakking kan deze exotherme ontleding zelfopwarming van de stof tot gevolg hebben, die kan leiden tot een thermische explosie. Bekend is onder andere dat bij een buitentemperatuur van circa 25°C door directe zonnestraling de temperatuur in stilstaande treinwagons of in opslagruimten gemakkelijk tot 50 à 60°C kan oplopen (in Nederland). Een recent voorbeeld is de explosie van een vat cellulosenitraatwol, met als gevolg het uitbranden van een deel van een verffabriek. Schade: f 425.000 [1].

2. Thermische explosie bij procesvoering

Bij de normale procesvoering kan het voorkomen, dat een reaktant of het hele reaktiemengsel tot een exotherme ontleding komt. Dit kan veroorzaakt

worden doordat het proces zich afspeelt bij een zodanige temperatuur dat bij een geringe verhoging hiervan de reactie uit de hand loopt. Ook door schaalvergroting of viskositeitsverandering kan het evenwicht tussen warmteproduktie en warmteafvoer verstoord worden. Door accumulatie van verontreinigingen of afzettingen op koellichamen kan men langzamerhand een proces krijgen, dat niet meer adequaat geregeld kan worden. Ten slotte kunnen katalytische invloeden de zelfopwarming bevorderen.

Als voorbeeld hiervan kan de explosie genoemd worden van een indamper, gevuld met 6 à 7 m³ 35% cumeenhydroperoxide bij 109°C [2]. Het cumeenhydroperoxide was een tussenprodukt voor de bereiding van fenol en aceton. De oxidatie van cumeen geschiedde met zuurstof tot een circa 15% peroxideoplossing was verkregen. Daarna werd het peroxide in drie trappen onder vacuum gekoncentreerd tot een 50 à 60% produkt. De explosie vond plaats in de tweede trap bij 109°C, nadat het indampen hierin al 5 uur eerder was beëindigd en het produkt onder stikstof was gezet. De oorzaak van deze thermische explosie is onbekend, katalytische invloeden worden niet uitgesloten.

3. Thermische explosie veroorzaakt door bedieningsfouten

Regelmatig komt het voor dat bij de bediening van chemische installaties verkeerde afsluiters worden opengedraaid of verkeerde vaste stoffen worden gedoseerd. Als gevolg hiervan kunnen exotherme reacties een heftige thermische explosie veroorzaken. Een voorbeeld hiervan is de explosie van een kookvat met een mengsel chloornitrotoluenen door de abusievelijke toevoer van een kaustische sodaoplossing [3]. Stalen onderdelen (o.a. pijpen) van enkele honderden kilo's werden door de explosie over enige honderden meters weggeslingerd.

4. Thermische explosie veroorzaakt door brand

Ook door externe verwarming (bijv. als gevolg van brand) kan een stof of een mengsel van stoffen zodanig in temperatuur stijgen, dat een exotherme reactie tot een thermische explosie kan leiden. Een katastrofale explosie, veroorzaakt door brand, heeft zich in 1947 voorgedaan in Texas City. In de haven van deze stad lag een schip, geladen met 2300 ton kunstmestgranules in zakken.

De kunstmest bestond uit circa 95% ammoniumnitraat, 0,9% was en 3,3% klei. Nadat aan boord brand was waargenomen van het papier van de zakken, duurde het een uur voordat het ammoniumnitraat het schip opblies. Waarschijnlijk is het hier geen thermische explosie van de gehele massa geweest, maar een detonatie, die is ingeleid door een plaatselijke thermische explosie van gesmolten ammoniumnitraat. Door de explosie van dit schip brak enige tijd later (de hele omgeving brandde) een identieke brand uit op een tweede 150 meter

verderop gelegen schip met dezelfde lading. Ook dit schip explodeerde. De gevolgen waren: 600 doden, 3000 gewonden en 275 miljoen gulden schade [4].

5. Thermische explosie veroorzaakt door ongewilde polymerisaties

Zowel bij opslag, vervoer als produktie kunnen ongewilde polymerisaties optreden, die thermische explosies tot gevolg kunnen hebben. Bij de produktie van ethanolamine uit ammoniak en etheenoxide kwam bijvoorbeeld door moeilijkheden bij de dosering een weinig ammoniak in de etheenoxide-opslagtank, waardoor in deze tank een door ammoniak gekatalyseerde exotherme polymerisatie plaats vond, met als gevolg een thermische explosie. De schade bedroeg 16 miljoen gulden [5].

Onderzoekmethoden voor de thermische stabiliteit

Voor de bepaling van de thermische stabiliteit van een stof worden twee technieken toegepast, die beide op het Technologisch Laboratorium zijn ontwikkeld: de adiabatische bewaarproef en de isotherme bewaarproef. Beide proeven vormen de grensgevallen voor praktijksituaties. Bij de adiabatische bewaarproef wordt namelijk (nagenoeg) alle warmte die door de stof geproduceerd wordt, gebruikt voor de opwarming van de stof zelf, terwijl bij de isotherme bewaarproef alle geproduceerde warmte volledig wordt afgevoerd. De praktijksituaties zullen hier altijd tussen in liggen.

Met de adiabatische bewaarproef wordt het temperatuur-tijdverloop van een stof bepaald bij zelfopwarming zonder warmteverlies [6]. De afwezigheid van warmteverlies betekent, dat de gevaarlijkste situatie wordt onderzocht. Het zelfopwarmingsproces verloopt dan in de kortst mogelijke tijd zodat de minimale inductieperiode wordt gevonden.

Dit wordt gerealiseerd door de stof in een dewarvat van 1,5 liter te brengen. Het vat is geplaatst in een oven, waarvan de temperatuur met behulp van een elektronisch regelsysteem zo goed mogelijk gelijk gehouden wordt aan de temperatuur in het centrum van de stof. Omdat aan het begin van het zelfopwarmingsproces de ontwikkelde hoeveelheid warmte uiterst gering is, moet de gevoeligheid van de proef zeer groot zijn. Zo kan met het huidige apparaat (fig. 1) met voldoende nauwkeurigheid een warmteproduktie worden gemeten van 10 mW/kg stof. Hierdoor is het mogelijk inductieperioden te vinden van circa 14 dagen tot een maand (bij een aktiveringsenergie van 30 à 40 kcal/mol).

Het in de oven geplaatste dewarvat is afgesloten met een deksel. In dit deksel is een teflon slangetje (lengte 2 m, inwendige diameter 1,35 mm) aan-

gebracht, dat de enige open verbinding vormt tussen de inhoud van het dewarvat en de omgeving. Door het slangetje wordt een drukopbouw in het dewarvat voorkomen, terwijl het verdampen van vluchtige componenten (bijvoorbeeld water) uit de te onderzoeken stof slechts mogelijk is door diffusie door het kapillair.

In het dewarvat is een verwarmingsspiraal aangebracht waarmee de stof op de gewenste begintemperatuur kan worden gebracht. Uit de opwarmkurve kan de soortelijke warmte van de stof berekend worden. Gedurende het zelfopwarmingsproces wordt het temperatuurtijdverloop gemeten. Uit dit temperatuur-tijdverloop kan met behulp van de soortelijke warmte van de stof de warmteproduktiesnelheid als functie van de temperatuur berekend worden met de volgende formule:

$$q = \frac{(g \cdot c + ww)}{g} \cdot dT/dt \quad (1)$$

waarin:

q = warmteproduktiesnelheid per gewichtseenheid

g = massa

c = soortelijke warmte

ww = waterwaarde = warmtekapaciteit van de binnenwand van het dewarvat.

Met een in de stof aangebrachte koelspiraal kan bij de adiabatische bewaarproef de zelfopwarming juist vóór de uiteindelijke explosie gestopt worden. Indien autokatalytische effecten verwacht worden, kan het gekoelde monster nogmaals op de begintemperatuur van de oorspronkelijke proef worden gebracht, waarna de proef voor een tweede maal kan worden uitgevoerd. De inductieperiode zal dan aanzienlijk korter zijn. Uit de warmteproduktiesnelheid en de temperatuur aan het einde van de eerste proef en in het begin van de tweede proef kan de aktiveringsenergie berekend worden. Beide stoffen hebben immers dezelfde graad van veroudering.

De isotherme bewaarproef [7] dient voor een nadere analyse van het zelfopwarmingsproces en in het bijzonder voor het achterhalen van de reaktiekinetiek. Het apparaat (fig. 2) is in eerste instantie ontwikkeld om de thermische stabiliteit van kruit op een meer wetenschappelijke wijze te kunnen onderzoeken en de bewaking van de stabiliteit van het kruit in de munitiemagazijnen te vereenvoudigen [8]. Gemeten wordt het verloop van de warmteproduktiesnelheid bij een bepaalde temperatuur. De hoeveelheid monster bedraagt 50 g. De warmtestroommeters in het apparaat bestaan uit een zeer groot aantal in serie geschakelde thermoelementen. De meters zijn vervaardigd door de Technisch Fysische Dienst TNO-TH [9]. De gevoeligheid is 0,5 mW/kg.

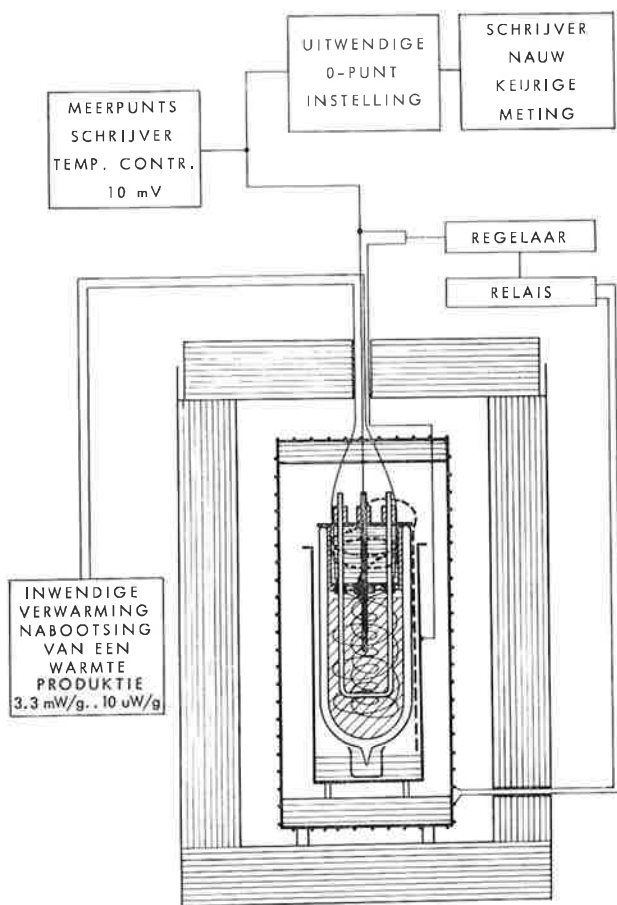


Fig. 1. Adiabatische bewaarproef.

Het glazen monstervat is meestal afgesloten met een deksel waarin een teflon slangetje (lengte 1 m, inwendige diameter 0,3 mm) is aangebracht. Soms echter wordt het monster in een afgesloten, roestvast stalen vat onderzocht.

De reactiekinetiek kan door het ontstaan van autokatalytische effecten gekompliceerd zijn. Vaak vertoont een warmteontwikkelingsdiagram dan ook aanvankelijk een sterke stijging van de warmteproductie door volgreactionen en autokatalyse, ten slotte gevolgd door een daling, veroorzaakt door het opraken van de stof.

Bepalingsmethoden voor het effect van de thermische explosie

Behalve door de inductieperiode wordt een thermische explosie getypeerd door het effect. Zoals reeds in de inleiding is gesteld, kan het effect van de thermische explosie van stof tot stof sterk variëren, terwijl ook de aard van de situatie waarin de stof zich bevindt het effect sterk beïnvloedt. Juist hierom kan men voor de bepaling van dit effect op het laboratorium niet volstaan met één of enkele standaardproeven om elke gewenste praktijk situatie te onderzoeken. Het effect wordt op

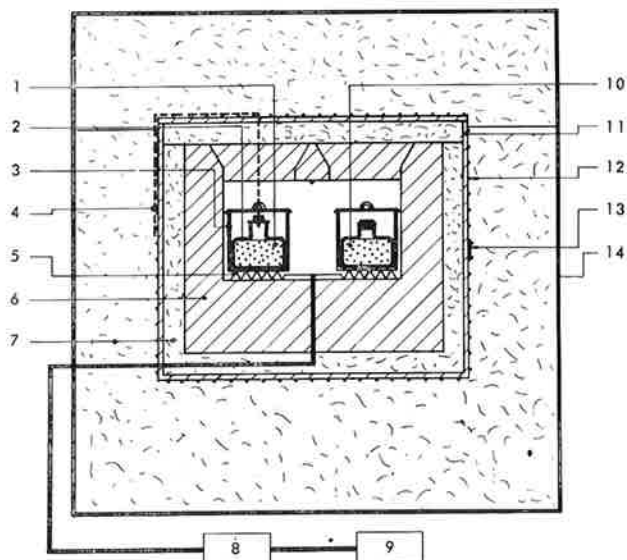


Fig. 2. Isotherme bewaarproef.

1. Monster
2. Monstervat
3. Houder monstervat
4. Teflon slangetje
5. Warmtestroommeter
6. Aluminium binnenblok
7. Glaswolisolatie
8. Versterker
9. Schrijver
10. Kompensatievat
11. Verwarmingsmantel
12. Verwarmingsdraden
13. Platina weerstandsthermometer (regeling)
14. Buitenmantel.

het ogenblik bepaald met twee oriënterende proeven, die internationaal geaccepteerd zijn in het RID [10]. Dit zijn de z.g.n. drukvatproef (fig. 3), welke ontwikkeld is door TNO en het „Stahlhül-senverfahren“, dat ontwikkeld is door de BAM (fig. 4).

Beide proeven zijn speciaal ontwikkeld voor het onderzoek van organische peroxiden. Extrapolatie van de resultaten van beide proeven naar praktijk-situaties is een delikate zaak, hetgeen mede wordt veroorzaakt door het feit, dat niet precies bekend is hoe de explosie van de stof bij beide proeven plaats vindt.

Bepalingsmethoden die een beter beeld van de praktijk situatie moeten geven, zijn in ontwikkeling. Onder andere wordt bij TNO speciaal voor organische peroxiden een gemodificeerde adiabatische bewaarproef ontwikkeld, waarbij de verwarmingsmantel als drukcilinder is uitgevoerd en met behulp van een piëzo-elektrische drukopnemer het drukverloop bij de explosie aan het einde van het zelfopwarmingsproces wordt gemeten. Bij deze proef is het volume van de stof klein ten opzichte van het volume van het drukvat. Hiernaast wordt gewerkt aan een proefopstelling waarbij de stof in een kleiner volume is opgesloten.

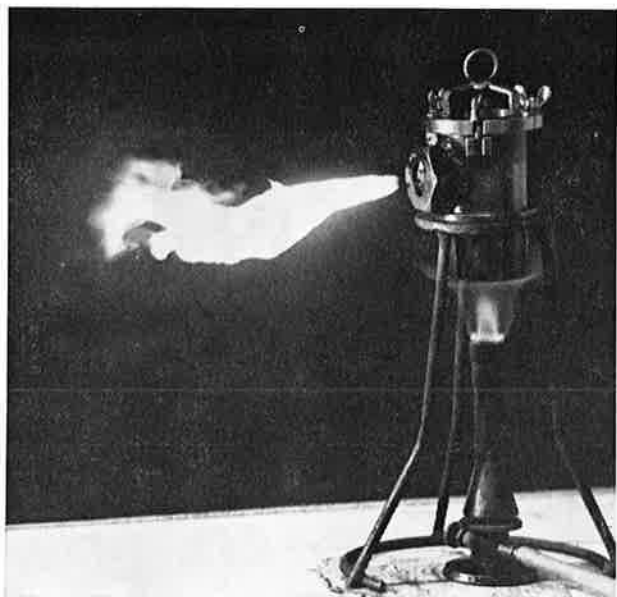


Fig. 3. Drukvatproef.

Berekening van de kritische parameters bij zelfopwarming^{*)}

Zoals reeds door H. J. Pasma is beschreven, kunnen de kritische parameters (hoeveelheid en temperatuur) met behulp van dimensieloze grootheden en enkele approximaties berekend worden in samenhang met de warmteverliezen. Onder de kritische omgevingstemperatuur verstaat men de temperatuur waarbij de warmteproductie- en de warmteverlieskurve elkaar raken. Men heeft dan een kritische situatie. De temperatuur die behoort bij het raakpunt is de kritische stoftemperatuur. Hierbij is verondersteld dat er geen temperatuurgradiënt in stof bestaat. Wordt de stof opgeslagen bij een temperatuur, die lager is dan de kritische omgevingstemperatuur, dan zal door zelfopwarming de temperatuur van de stof stijgen tot een temperatuur, waarbij de warmteproductie gelijk is aan het warmteverlies. Deze evenwichtstemperatuur is steeds lager dan de kritische stoftemperatuur. Wordt de stof in dezelfde situatie opgeslagen bij een temperatuur, die hoger is dan de kritische temperatuur, dan zal de stof zich volledig ontleiden en eventueel een thermische explosie tot gevolg hebben (fig. 5).

Berekening van de kritische parameters bij homogene zelfopwarming [11, 12 en 13]

Bij homogene zelfopwarming treedt in de stof geen temperatuurgradiënt op (dit wordt bij vloeistoffen dicht benaderd). De warmteafvoer wordt volledig bepaald door de warmteafvoer van de wand. Door Semenov werd reeds in 1935 de volgende warmtebalans opgesteld:

$$\rho \cdot c \cdot dT/dt = \rho \cdot C \cdot \exp(-E/RT) - \frac{H \cdot O \cdot (T - T_a)}{V} \quad (2)$$

waarin:

- ρ = soortelijke massa
- c = soortelijke warmte
- T = temperatuur
- t = tijd
- E = aktiveringsenergie
- R = gaskonstante
- H = warmteoverdrachtscoëfficiënt
- O = oppervlakte
- T_a = omgevingstemperatuur
- V = volume

Voor systemen met één plaatscoördinaat kan men voor de oppervlaktevolume-verhouding schrijven:

$$\frac{O}{V} = \frac{m'}{r} \quad (3)$$

^{*)} Opgemerkt wordt, dat bij de volgende berekeningen geen rekening wordt gehouden met verouderingseffekten. Methodes om deze effekten hierin wel te betrekken zijn op het ogenblik in ontwikkeling.

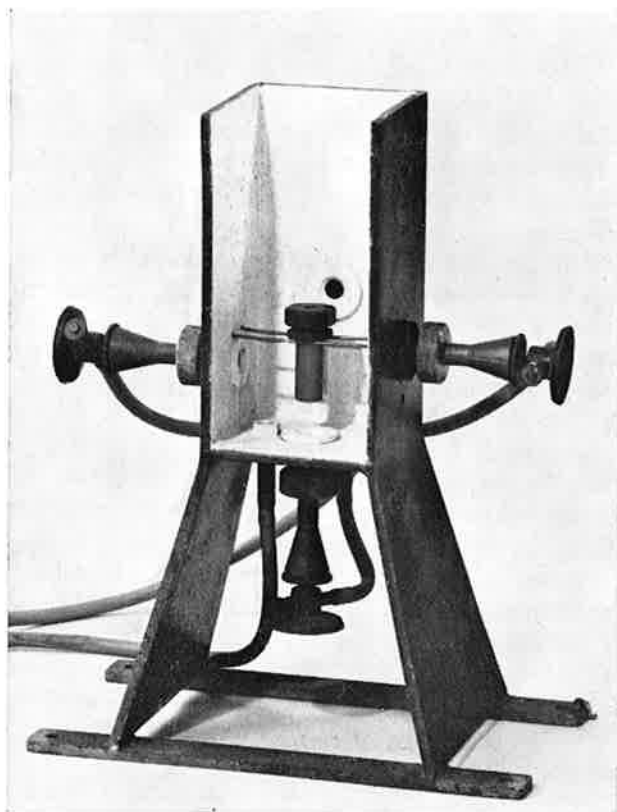


Fig. 4. Stahlhülsenverfahren.

waarin:

$m' =$ geometrische konstante:

$m' = 1$ voor een vlakke laag

$m' = 2$ voor een oneindig lange cilinder

$m' = 3$ voor een bol en voor een cilinder die even hoog is als breed

$r =$ straal

Omwerking van (2) met (3) levert:

$$\frac{E}{RT_a^2} \cdot \frac{\rho cr}{H} \cdot dT/dt = \frac{E}{RT_a^2} \cdot \frac{\rho r}{H} \cdot C \cdot \exp(-E/RT) - m' \cdot \frac{E}{RT_a^2} (T - T_a) \quad (4)$$

Men voert de volgende dimensieloze grootheden in:

$$\tau' = \frac{H \cdot t}{\rho cr} \quad (\text{dimensieloze tijd})$$

$$\theta = \frac{E}{RT_a^2} \cdot (T - T_a) \quad (\text{dimensieloze temperatuurverschil met de omgeving})$$

$$\delta' = \frac{E}{RT_a^2} \cdot \frac{\rho r}{H} \cdot C \cdot \exp(-E/RT_a) \quad (\text{dimensieloze warmteproductie bij omgevingstemperatuur})$$

$$\beta = RT_a/E \quad (\text{dimensieloze omgevingstemperatuur})$$

Direkt is in te zien:

$$d\theta/dt = \frac{E}{RT_a^2} \cdot dT/dt \quad \text{en:} \quad d\theta/d\tau' = \frac{E}{RT_a^2} \cdot \frac{\rho cr}{H} \cdot dT/dt$$

Voorts is:

$$\beta\theta = \frac{T - T_a}{T_a} \quad \text{dus} \quad 1 + \beta\theta = \frac{T}{T_a}$$

$$\begin{aligned} \text{En: } \frac{-E}{RT} &= \frac{-E}{RT_a} + \frac{E}{RT_a} \left(1 - \frac{T_a}{T}\right) = \\ &= \frac{-E}{RT_a} + \frac{E}{RT_a^2} (T - T_a) \frac{T_a}{T} = \frac{-E}{RT_a} + \frac{\theta}{1 + \beta\theta} \end{aligned} \quad (5)$$

Uit (5) volgt:

$$\exp(-E/RT) = \exp(-E/RT_a) \cdot \exp\left(\frac{\theta}{1 + \beta\theta}\right) \quad (6)$$

Substitutie van het voorgaande in vergelijking (4) levert:

$$d\theta/d\tau' = \delta' \cdot \exp\left(\frac{\theta}{1 + \beta\theta}\right) - m' \cdot \theta \quad (7)$$

Vergelijking (7) is niet analytisch op te lossen. Voor een niet te grote temperatuurstijging is echter een goede benadering mogelijk, omdat $\beta\theta (= (T - T_a) / T_a \ll 1)$ verwaarloosd kan worden:

$$d\theta/d\tau' = \delta' \cdot \exp\theta - m' \cdot \theta \quad (8)$$

In de kritische situatie raakt de lijn van warmteaf-

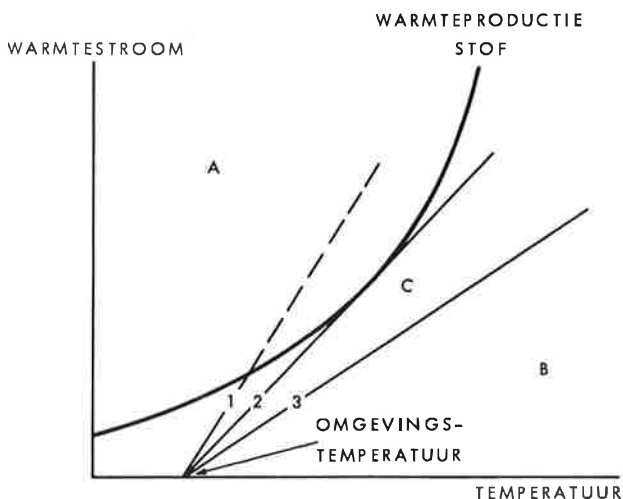


Fig. 5. Kritische situatie bij thermische explosie.

1, 2, 3, = warmteverlieslijnen bij toenemende hoeveelheid stof.

A = subkritisch gebied.

B = superkritisch gebied

C = kritische situatie.

voer de kurve van de warmteproductie (fig. 5), zodat warmteafvoer en warmteproductie gelijk zijn en gelijke helling hebben. Dit levert respectievelijk op:

$$d\theta/d\tau' = 0, \text{ dus: } \delta' \cdot \exp\theta = m' \cdot \theta \quad (9)$$

$$\text{En: } d(\delta' \cdot \exp\theta)/d\theta = d(m' \cdot \theta)/d\theta \text{ zodat } \delta' \cdot \exp\theta = m' \quad (10)$$

$$\text{Uit (9) en (10) volgt: } \theta_c = 1,0 \text{ (theta kritisch)} \quad (11)$$

$$\delta'_c = m'/e = m'/2,72 \quad (12)$$

Voor het verschil tussen de kritische stoftemperatuur en de kritische omgevingstemperatuur volgt hieruit:

$$\frac{E}{RT_c^2} (T_c - T_a) = 1, \text{ dus: } T_c = \frac{RT_a^2}{E} + T_a \quad (13)$$

En voor de kritische straal:

$$\delta'_c = \frac{E}{RT_a^2} \cdot \frac{\rho r_c}{H} \cdot C \cdot \exp(-E/RT_a), \text{ dus:}$$

$$r_c = \frac{RT_a^2}{E} \cdot \frac{H}{\rho C} \cdot \frac{m'}{2,72 \exp(-E/RT_a)} \quad (14)$$

Berekening van de kritische parameters bij niet-homogene zelfopwarming [14 en 15]

Bij niet-homogene zelfopwarming is het warmte-transport binnen de stof bepalend voor de warmteafvoer. De warmtebalans hiervoor luidt:

$$\rho \cdot c \cdot \partial T / \partial t - \lambda \cdot \nabla^2 T + \rho \cdot C \cdot \exp(-E/RT) \quad (15)$$

waarin:

$\lambda =$ warmtegeleidingscoëfficiënt

Voor systemen met één plaatscoördinaat gaat (15) over in:

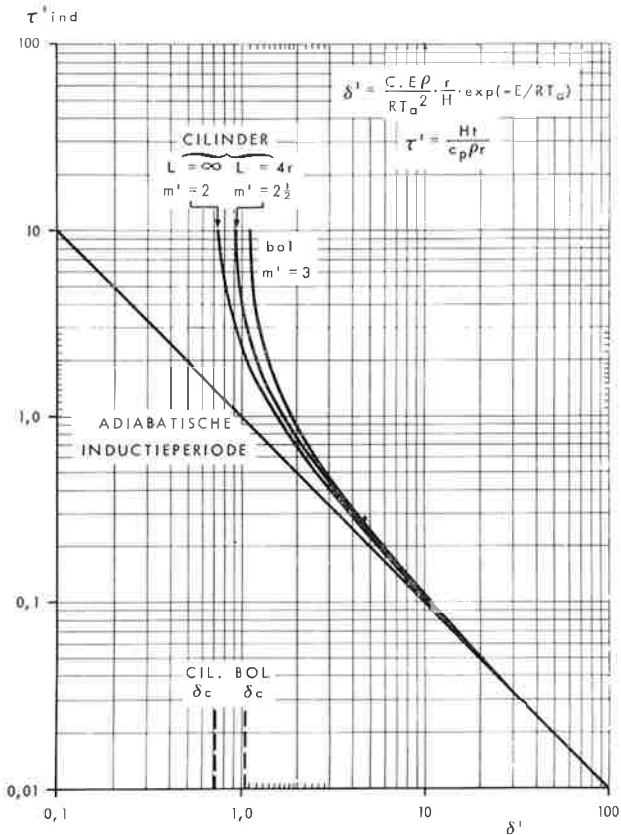


Fig. 6. τ - δ grafiek voor homogene zelfopwarming.

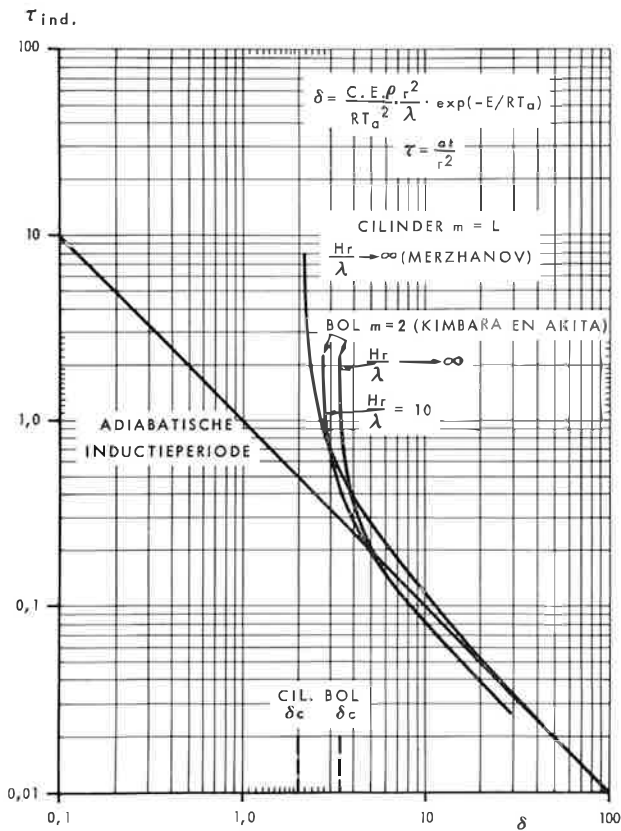


Fig. 7. τ - δ grafiek voor niet-homogene zelfopwarming.

$$\rho \cdot c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{m}{z} \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \rho \cdot C \cdot \exp(-E/RT) \quad (16)$$

waarin:

m = geometrische konstante:

$m = 0$ voor een vlakke laag

$m = 1$ voor een oneindig lange cilinder

$m = 2$ voor een bol en voor een cilinder die even hoog is als breed

z = eendimensionale coördinaat

Omwerken van (16) levert:

$$\frac{\rho \cdot c \cdot E \cdot r^2}{\lambda \cdot R \cdot T_a^2} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{E \cdot r^2}{R T_a^2} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{m}{z} \cdot \frac{E \cdot r^2}{R T_a^2} \cdot \frac{\partial T}{\partial z} + \frac{\rho}{\lambda} \cdot \frac{E}{R T_a^2} \cdot r^2 \cdot C \cdot \exp(-E/RT) \quad (17)$$

Indien de stof met een begintemperatuur T_0 wordt geplaatst in een omgeving met een temperatuur T_a , dan luiden de randvoorwaarden:

$$t = 0 \quad 0 \leq z \leq r \quad T = T_0$$

$$t > 0 \quad z = 0 \quad dT/dz = 0$$

(symmetrie-overwegingen)

$$t > 0 \quad z = r \quad -dT/dz = H(T - T_a)$$

(warmtebalans)

De dimensieloze grootheden zijn hier:

$$\tau = \frac{\lambda t}{\rho c r^2} \quad (\text{dimensieloze tijd})$$

$$\theta = \frac{E}{R T_a^2} (T - T_a) \quad (\text{dimensieloze temperatuurverschil met de omgeving})$$

$$\delta = \frac{E}{R T_a^2} \cdot \frac{\rho}{\lambda} \cdot r^2 \cdot C \cdot \exp(-E/RT_a)$$

(dimensieloze warmteproductie bij omgevingstemperatuur)

$$\beta = \frac{R T_a}{E} \quad (\text{dimensieloze omgevingstemperatuur})$$

$$\xi = \frac{z}{r} \quad (\text{dimensieloze coördinaat})$$

Verder geldt vergelijking (6):

$$\exp(-E/RT) = \exp(-E/RT_a) \cdot \exp\left(\frac{\theta}{1 + \beta\theta}\right) \quad (6)$$

Direkt is in te zien:

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{E}{R T_a^2} \cdot \frac{dT}{dt}, \quad \text{dus:} \quad \frac{d\theta}{d\xi} = \frac{\rho \cdot c}{\lambda} \cdot \frac{E r^2}{R T_a^2} \cdot \frac{dT}{dt}$$

$$\frac{d^2\theta}{d\xi^2} = \frac{E}{R T_a^2} \cdot \frac{d^2T}{d\xi^2} = \frac{E r^2}{R T_a^2} \cdot \frac{d^2T}{dz^2}$$

$$\frac{m}{\xi} \frac{d\theta}{d\xi} = \frac{m r}{z} \cdot \frac{E}{R T_a^2} \cdot \frac{dT}{d\xi} = \frac{m}{z} \cdot \frac{E r^2}{R T_a^2} \cdot \frac{dT}{dz}$$

Substitutie van de dimensieloze grootheden en van vergelijking (6) in vergelijking (17) geeft:

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 \theta}{\partial \xi^2} + \frac{m}{\xi} \frac{\partial \theta}{\partial \xi} + \delta \cdot \exp\left(\frac{\theta}{1 + \beta \theta}\right) \quad (18)$$

Met als randvoorwaarden:

$$\begin{aligned} \tau = 0 & & \theta = \theta_0 \\ \tau > 0 & \quad \xi = 0 & \quad d\theta/d\xi = 0 \\ \tau > 0 & \quad \xi = 1 & \quad d\theta/d\xi = \frac{Hr}{\lambda} \theta \end{aligned}$$

Door toepassing van dezelfde verwaarlozing als bij de warmtebalans bij de homogene zelfopwarming (bij geringe temperatuurstijging is $\beta\theta \ll 1$), volgt uit (18) voor de stationaire toestand ($\delta\theta/\delta\tau = 0$):

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial \xi^2} + \frac{m}{\xi} \frac{\partial \theta}{\partial \xi} = -\delta \cdot \exp \theta \quad (19)$$

De oplossing van (19) voor de centrumtemperatuur, $v_m = f(\delta)$, blijkt een extreem te hebben en wel in de kritische toestand: v_{mc} bij δ_c .

Voor gevallen van oneindige warmteoverdracht aan de wand ($Hr/\lambda \rightarrow \infty$) zijn δ_c en θ_{mc} door Frank-Kamenetzky voor een laag langs analytische weg, voor een cilinder en een bol langs numerieke weg berekend. De resultaten zijn in de tabel verzameld met ter vergelijking de overeenkomstige waarden bij homogene zelfopwarming.

		laag	cilinder ($L = \infty$)	bol
niet-homogene zelfopwarming $Hr/\lambda \rightarrow \infty$	δ_c	0,88	2,00	3,32
	θ_{mc}	1,20	1,37	1,60
homogene zelfopwarming $Hr/\lambda = 0$	δ'_c	0,37	0,74	1,10
	θ_c	1,00	1,00	1,00

Berekening van de inductieperiode bij adiabatische zelfopwarming

Voor adiabatische zelfopwarming (geen warmteverlies) volgt de warmtebalans uit vergelijking (2):

$$dT/dt = \frac{C}{c} \exp(-E/RT) \quad (20)$$

De inductieperiode wordt dan gegeven door:

$$t_{ind} = \int_{T_0}^{\infty} \frac{c}{C \cdot \exp(-E/RT)} \cdot dT \quad (21)$$

Evenals de differentiaalvergelijkingen bij de afleiding van de kritische parameters kan deze vergelijking niet analytisch worden opgelost. Wel is het mogelijk een benaderde analytische oplossing te

verkrijgen door dezelfde aanpak als bij de berekeningen van de kritische parameters.

Berekening van de inductieperiode bij homogene en niet-homogene zelfopwarming

Ook bij homogene en niet-homogene zelfopwarming kan de inductieperiode berekend worden. Het zou in dit verband te ver voeren deze gekompliceerde berekening hier te vermelden. Ook dan wordt weer gebruik gemaakt van de dimensieloze grootheden, zoals bij de berekening van de kritische parameters.

Als resultaat van deze berekeningen is voor homogene zelfopwarming in fig. 6 voor verschillende waarden van m' (geometrische faktor) de τ'_{ind} , uitgezet als functie van δ' . Uit de adiabatische bewaarproef met de stof en de warmteweerstand van het vat, waarin de stof is opgeslagen, kan δ' berekend worden. τ'_{ind} volgt dan direkt uit fig. 6. Uit τ'_{ind} , kan t_{ind} , berekend worden.

Voor niet-homogene zelfopwarming zijn in fig. 7 de resultaten van de berekeningen van Merzhanov en Kimbara en Aktiva [16 en 17] op soortgelijke wijze weergegeven als bij de homogene zelfopwarming.

Literatuur

- [1] Onderzoek van het Technologisch Laboratorium, dat spoedig gepubliceerd zal worden.
- [2] Manufacturing Chemists Association, Inc. Case History No. 906.
- [3] Manufacturing Chemists Association, Inc. Case History No. 907.
- [4] G. Armistead, Report to John G. Simmonds and Co., Inc., on the ship explosions at Texas City, Texas on April 16 and 17, 1947, and their results (Geo. Armistead, Jr., chemical engineer, Washington, D.C.).
- [5] Quarterly of the National Fire Protection Association, vol. 56, No. 4, April 1963, pp. 398-399.
- [6] Rapport Technologisch Laboratorium No. 8636-II, 17 december 1968.
- [7] J. L. C. van Geel, Ind. Eng. Chem. 58 (1), 25 (1966).
- [8] J. L. C. van Geel, Dissertatie Delft 1969.
- [9] De Jong en Margueni, Instrument Practice, 1, 45 (1962).
- [10] Règlement international concernant le transport des marchandises dangereuses par chemins de fer (RID), april 1967.
- [11] N. Semenov, Chemical Kinetics and Chain Reactions, Oxford Press, London (1935).
- [12] P. Thomas, Trans. Far. Soc. 54, 60 (1958).
- [13] P. Thomas, Brit. J. Appl. Phys. 12, 222 (1961).
- [14] C. F. H. Tipper, Oxidation and Combustion Reviews Vol. 2, Elsevier Publ. Cy., Amsterdam (1967).
- [15] D. Frank-Kamenetzky, Acta Physico Chimica (USSR) 10, 365 (1939).
- [16] T. Kimbara, K. Akita, Combustion and Flame 4, 173 (1960).
- [17] A. Merzhanov e.a., Dokl. Akad. Nauk. USSR 148 (1), 156 (1963).

Explosieve verbranding van vaste stoffen en vloeistoffen

Explosive burning of solids and liquids

P. A. J. VAN GALEN en Th. M. GROOTHUIZEN

Technologisch Laboratorium TNO

Samenvatting

Na een overzicht van de eigenschappen van de explosieve verbranding worden de methoden van onderzoek behandeld, zoals deze bij TNO gebruikt worden. In het laatste gedeelte wordt getracht een indruk te geven van de gecompliceerdheid van de theoretische achtergrond van de explosieve verbranding. Enige theoretische modellen uit de literatuur worden vermeld.

Summary

After a survey of the characteristics of explosive burning the authors treat the methods of investigating this type of explosion as applied by TNO. In the last part an attempt is made to give an impression of the complexity of the theoretical background of explosive burning. A few models from literature are presented.

Inleiding

De explosieve verbranding is die vorm van explosie, waarbij zich een reactiezone door middel van warmte-overdracht door een stof voortplant. De snelheid waarmee deze reactiezone zich voortplant, is altijd kleiner dan de geluidssnelheid in het medium en varieert in de praktijk van 10^5 tot 1 m/s. Wanneer de reactiezone zich met een snelheid groter dan de geluidssnelheid door een stof voortplant, spreekt men van detonatie. De energie-overdracht vindt dan plaats door een schokgolf die door de reactie in stand gehouden wordt.

De snelheid waarmee de reactiezone zich voortplant bij de explosieve verbranding wordt lineaire brandsnelheid genoemd en is in de meeste gevallen afhankelijk van druk en temperatuur. Of een stof al dan niet explosief kan branden hangt af van de grootte van de reactiewarmte, de reactiesnelheid en de warmte-afvoer.

De reactieproducten bij de explosieve verbranding zijn merendeels gasvormig. Bij organische stoffen zijn zij veelal aan de lucht brandbaar en kunnen door de reactiezone worden ontstoken. Hierdoor ontstaat dan een vlam. Bij explosief brandende kunstmest ontstaan geen brandbare gassen. Ook in de reactiezone worden geen vuurverschijnselen waargenomen, doordat de temperatuur in de reactiezone laag blijft (400 à 500°C).

De lineaire brandsnelheid van een homogene vaste stof is kleiner dan van hetzelfde produkt in korrelvorm. Bovendien wordt bij korrelvormige stoffen de brandsnelheid groter wanneer de hete reaktiegassen vóór de reactiezone uit langs nog niet gereageerde korrels kunnen wegstromen. Naast een verhoging van de warmte-overdracht kan een katalyserende werking van de ontledingsgassen op het oorspronkelijke produkt optreden.

Uit het voorgaande blijkt dat de omstandigheden waaronder de explosieve verbranding plaats vindt, invloed hebben op de lineaire brandsnelheid en de mogelijkheid van explosieve verbranding.

Bij vloeistoffen kan de reactie alleen plaats vinden aan het oppervlak, zodat de voortplantingsrichting bij deze stoffen steeds naar beneden is gericht. Gezien de gecompliceerde invloed van de gasvormige reactieproducten op de lineaire brandsnelheid, wordt voor de bestudering van de explosieve verbranding meestal een model gekozen waarbij de gassen (indien aanwezig) niet door de te onderzoeken stof wegstromen.

De reaktiegassen die bij een explosieve verbranding worden gevormd, kunnen zowel vergiftig zijn als brandstichtend werken. In opgesloten toestand kan de explosieve verbranding aanleiding geven tot een heftige explosie. De verscherving van het

vat waarin de explosieve verbranding plaats vindt, blijft echter beperkt.

Een explosieve verbranding is te stoppen door de ontwikkelde warmte snel af te voeren bijv. blussen met water. Treedt er sterke gasvorming op dan is het echter moeilijk het water tot de reactiezone te laten doordringen.

In het algemeen kunnen explosief brandbare stoffen gemakkelijk ontstoken worden. Bij ontsteking aan de lucht veroorzaakt de „gewone” verbranding een explosieve verbranding.

Methoden van onderzoek

Een eenvoudig proefje om te zien of een stof explosief kan branden, is de doorbrandingsproef. Bij deze proef wordt getracht de te onderzoeken stof in buisjes met toenemende diameter van boven te ontsteken waarna de snelheid van een eventueel optredende explosieve verbranding wordt gemeten. De vergroting van de diameter (dus van de brandoppervlakte) heeft geringere warmteverliezen per gewichtseenheid tot gevolg. Hierdoor neemt de brandsnelheid toe, waardoor de verliezen nog meer afnemen. Als bij een toenemende diameter dezelfde snelheid wordt gevonden, dan is deze snelheid de lineaire brandsnelheid naar beneden. De gevonden lineaire brandsnelheid is afhankelijk van temperatuur, druk en fysische eigenschappen.

Naast de lineaire brandsnelheid kunnen bepaald worden de temperatuur in de reactiezone (maat voor de reactiewarmte), het specifiek gasvolume (bepalend voor het effect van de explosie) en de eigenschappen van dit gas (vooral vergiftigheid en brandbaarheid).

Bij langzaam brandende stoffen is het uit praktische overwegingen niet meer mogelijk de diameter van de proefbuis te vergroten. Dat bezwaar kan worden opgeheven door dezelfde proef uit te voeren onder verhoogde druk. Een eigenschap van de lineaire brandsnelheid is namelijk dat deze toeneemt bij verhoging van de druk. Sinds kort is hiervoor bij TNO apparatuur beschikbaar (zie fig. 1).

Het is een gesloten systeem bestaande uit een kleine verbrandingsruimte en een bufferruimte (totaal volume 50 l). De apparatuur is bruikbaar tot 100 atmosfeer en kan op konstante druk geregeld worden. Meestal worden de proeven in een stikstofatmosfeer uitgevoerd. De verbrandingsruimte is uitgevoerd in roestvast staal en voorzien van pyrex vensters voor fotografische doeleinden. In de verbrandingsruimte kunnen proefbuisjes tot een diameter van 7 cm geplaatst worden. Het monster wordt elektrisch ontstoken en de brandsnelheid bepaald met behulp van thermokoppels of smeltdraden. In fig. 2 wordt een overzicht gegeven van de gemeten brandsnelheden van droog korrelvormig benzoylperoxide als functie van de druk. De

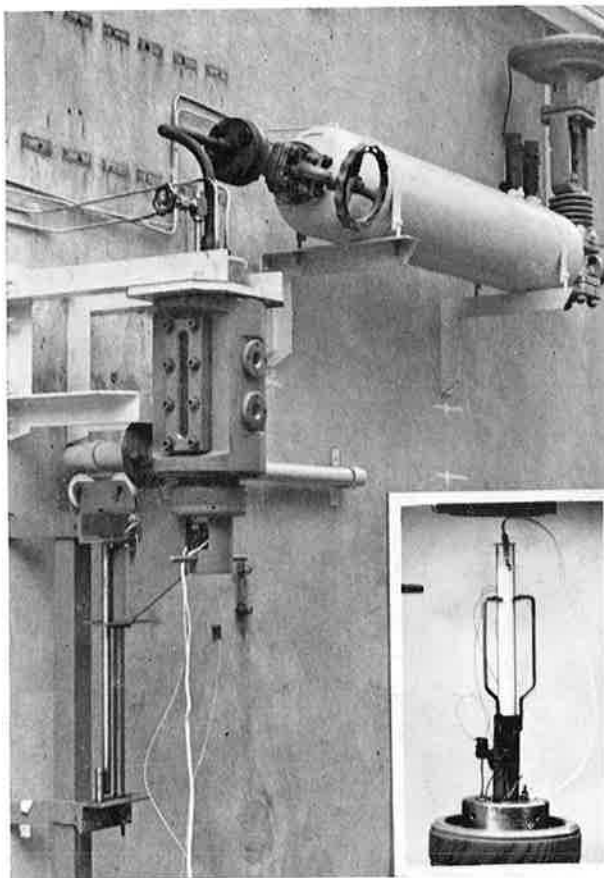


Fig. 1. Apparatuur waarin de lineaire brandsnelheid van vaste stoffen en vloeistoffen als functie van de druk wordt bepaald. In de inzet van de foto is het monsterbuisje te zien.

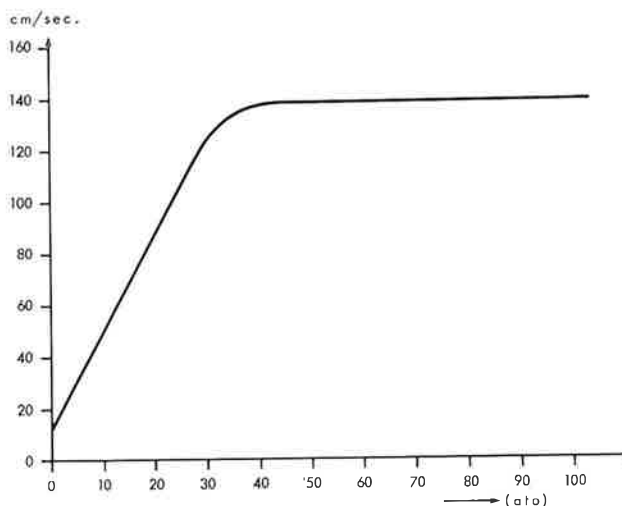


Fig. 2. Brandsnelheid van benzoylperoxide als functie van de druk.

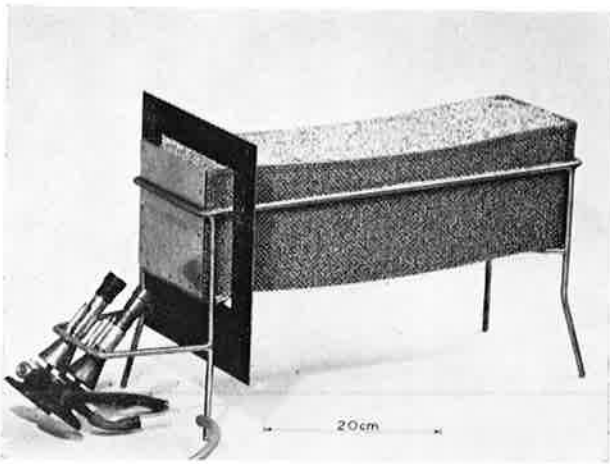


Fig. 3. Gootproef voor de bepaling van de lineaire brandsnelheid van ammoniumnitraathoudende kunstmeststoffen.

DEFLAGRATIE
SNELHEID (cm/h)

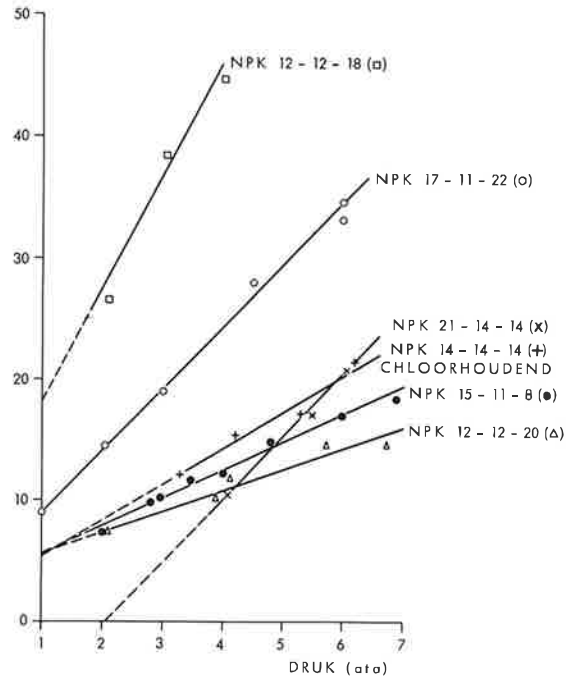


Fig. 5. Brandsnelheid als functie van de druk van enige kunstmesten, bepaald met de drukcilinderproef. De globale samenstelling van de kunstmesten is gegeven in tabel I.

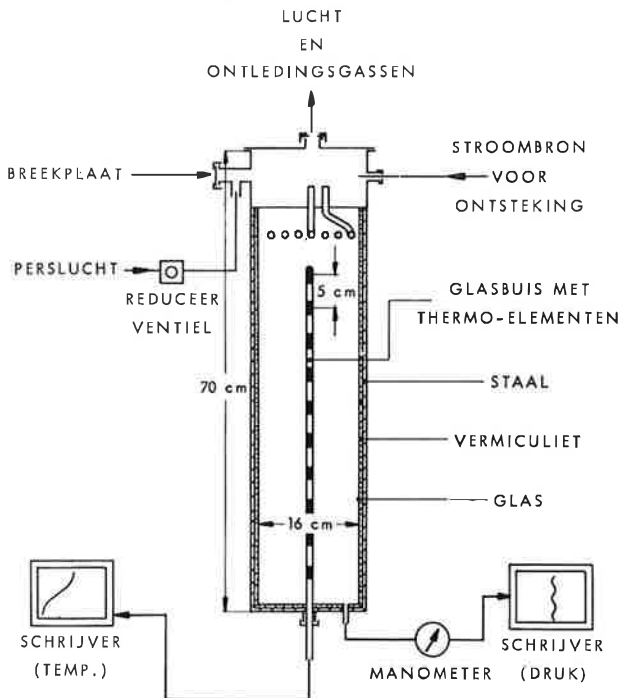


Fig. 4. Drukcilinderproef voor de bepaling van de brandsnelheid van kunstmeststoffen als functie van de druk.

proeven zijn uitgevoerd in een glazen buisje met een diameter van 8 mm. Speciaal voor ammoniumnitraathoudende kunstmesten is door Huygen en Perbal [1] de gootproef ontwikkeld (fig. 3).

Bij deze proef kan de lineaire brandsnelheid bepaald worden mits deze groter is dan ca. 5 cm/h. Bij geringere snelheden is het warmteverlies te groot, waardoor de explosieve verbranding stopt. De goot is gemaakt van roestvast staalgaas en heeft een vierkante dwarsdoorsnede van 15 cm en een lengte van 50 cm. Ontsteking van de kunstmest vindt plaats door een aan het uiteinde aangebrachte roestvast stalen plaat gedurende 10 min. te verwarmen met twee gasbranders.

Als aanvulling op de gootproef is door TNO een proef ontwikkeld waarbij de brandsnelheid van boven naar beneden bepaald kan worden als functie van de druk [2]. De druk (max. 10 atm) wordt in stand gehouden door regeling van een persluchtstroom die de reactiegassen verdunt, waarna het gasmengsel via een afblaasopening uit de drukcilinder ontsnapt (fig. 4).

De drukcilinder heeft een inwendige diameter van 18 cm en een lengte van 70 cm. De kunstmest wordt ontstoken met een elektrische verwarmings-spiraal en de brandsnelheid wordt gemeten m.b.v. thermokoppels die op regelmatige afstanden in de kunstmest zijn geplaatst. Met deze thermo-elementen wordt het temperatuur/tijdverloop gemeten.

Tabel I. Samenstelling van enkele kunstmesten en hun brandsnelheid

Kunstmest NPK	Samenstelling %			Resultaat gootproef (cm/h)	Snelheid drukrelatie (cm/h)*	ge-extrapoleerde snelheid bij 1 atm (cm/h)
	N-NH ₃	N-NH ₃	Cl			
17-11-22	10,1	6,1	18,8	8,9	r = 4,0+5,1p	9,1
15-11- 8	8,5	6,5	Clh***	stopt	r = 3,2+2,3p	5,5
14-14-14	8,3	5,9	Clh	stopt	r = 2,4+3,0p	5,4
21-14-14	12,9	7,8	10,9	stopt	r = 10,7+5,1p	negatief
14-14-14	7,3	7,4	≤0,1	stopt	brand niet bij 7 atm	—
12-10-18**	7,0	6,0	0,9	16	r = 9+9p	18
12-12-20	6,7	5,0	0,8	stopt na 2 uur	r = 4,0+1,7p	5,7

* r = brandsnelheid in cm per uur, p = druk in atmosferen

** bevat sporenelementen waaronder kobalt en koper

*** Clh = chloorhoudend, gehalte onbekend

Bij de gebruikte opstelling is het mogelijk de druk een of twee keer te wijzigen waardoor meerdere bepalingen met één kunstmestvulling kunnen worden uitgevoerd. Enige resultaten zijn weergegeven in fig. 5.

Door extrapolatie naar atmosferische druk kan de mogelijkheid van explosieve verbranding van de kunstmest worden bepaald. In tabel I zijn deze waarden gegeven. Tevens zijn in deze tabel de resultaten van de gootproef vermeld.

Theorie van het verbrandingsproces

De explosieve verbranding is een reactie die zich voortplant door warmteoverdracht. Theoretisch is deze reactie voor de explosieve verbranding in de gasfase behandeld door Lewis en Von Elbe [3].

Voor een explosieve verbranding van vaste stoffen en vloeistoffen waarbij eventuele gasvormige reactieproducten niet door de nog niet gereageerde stof worden afgevoerd, kan het volgende schematische temperatuurtijdverloop in de stationaire reactiezone worden gegeven (fig. 6).

Mathematisch kunnen voor de explosieve verbranding in één richting de volgende twee vergelijkingen worden opgesteld, indien wordt aangenomen dat het coördinatenstelsel zich met dezelfde snelheid als de verbranding door de stof verplaatst, er geen warmte-afvoer naar de omgeving is en warmteoverdracht door straling verwaarloosd mag worden.

Warmtebalans

$$\sqrt{\frac{dT}{dx^2}} - c_p U \rho \frac{dT}{dx} + Q \rho (T, \eta) k_{oo} \exp(-E/RT) (1-\eta)^n = 0$$

Massabalans

$$D \rho (T, \eta) \frac{d^2n}{dx^2} - U \rho \frac{d\eta}{dx} + \rho (T, \eta) k_{oo} \exp(-E/RT) (1-\eta)^n = 0$$

waarin:

- λ = warmtegeleidingscoëfficiënt
- T = temperatuur
- x = plaatscoördinaat
- c_p = soortelijke warmte
- $U \rho$ = massa verbrandingssnelheid
- $Q \rho$ = reaktiewarmte per massa-eenheid
- ρ = dichtheid
- k_{oo} = frequentiefactor
- E = activeringsenergie
- R = gasconstante
- η = conversiegraad betrokken op de reactanten
- n = reactie-orde
- D = diffusiecoëfficiënt

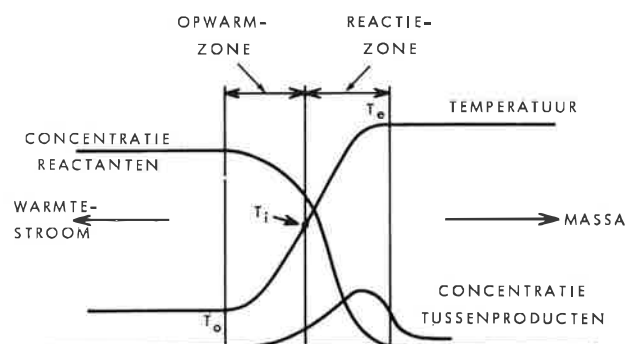


Fig. 6. Schematische voorstelling van de explosieve verbrandingsreactie.

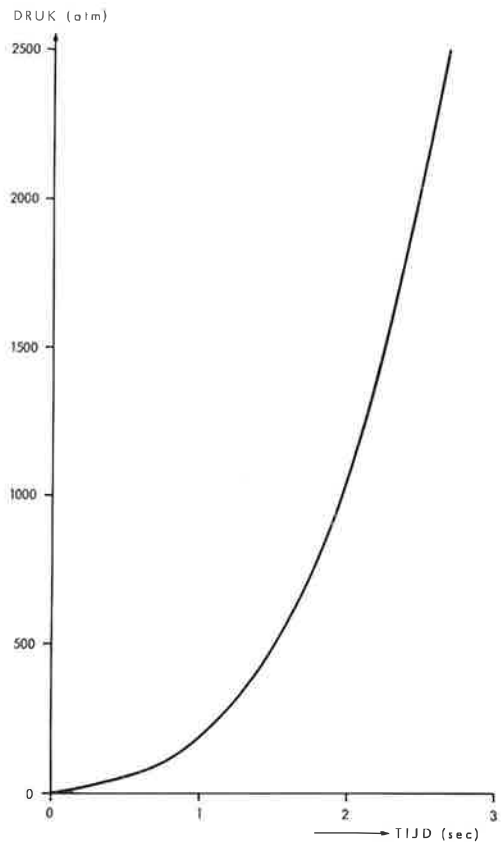
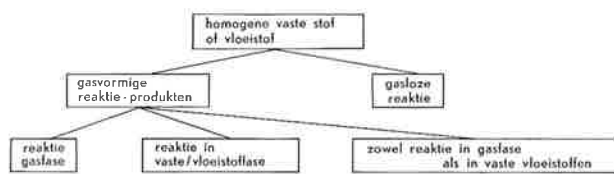


Fig. 7. Berekend druk-tijdverloop tijdens de explosieve verbranding van homogeen raketkruit in een afgesloten vat, dat voor de helft met kruit is gevuld.

Voor het oplossen van deze differentiaalvergelijking moeten de randvoorwaarden worden opgesteld.

Dit is echter alleen mogelijk wanneer het mechanisme van de explosieve verbranding bekend is. Voor de mechanismen die bij de explosieve verbranding van een homogene stof kunnen optreden kan het volgende schema worden opgesteld.



Door Merzhanov [4] zijn de differentiaalvergelijkingen o.a. opgelost voor de reactie in de gasfase. Hij vindt voor de brandsnelheid:

$$U_p = \sqrt{2n!(C_p RT_m^2 / Q^2 E)^{n+1} (\lambda \rho / c_p) k_{00} \exp(-E/RT_m)}$$

$$\text{en voor } \nu = \frac{d(\ln U_p)}{d(\ln \rho)} = \frac{n}{2}$$

Waarin T_m de adiabatische eindtemperatuur is ($T_m = T_0 + Q\rho/c_p$) en

ν de exponentiële constante van de drukafhankelijkheid van de lineaire brandsnelheid; algemene

vergelijking $r = a + bp^\nu$ (r is snelheid, a , b en ν zijn constanten).

Voor de gasloze reactie vindt hij

$$U_p = \sqrt{\sigma_0 (\lambda \rho / Q\rho) (RT_m^2 / E) K_{00} \exp(-E/RT_m)} \text{ en } \nu = 0$$

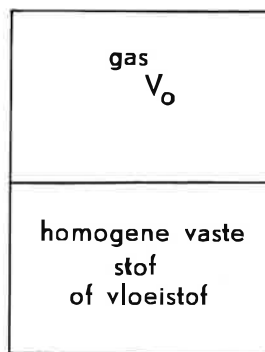
$$\text{waarin } \sigma_0 = 2 \left[\Gamma \left(\frac{n}{2} + 1 \right) \right]^{(1 - \frac{n}{2})} \left(\frac{n}{2e} \right)^{\frac{n^2}{4}}$$

$$\Gamma(Z) = \int_0^\infty e^{-t} t^{Z-1} dt$$

Voor de nulde orde reactie is $\sigma_0 = 2$, voor de eerste orde reactie $\sigma_1 \approx 1,1$ en voor de tweede orde reactie $\sigma_2 \approx 0,73$.

Aan de oplossing van de differentiaalvergelijkingen voor niet homogene stoffen (bijv. korrels) is men nog niet toe.

Berekening van het effect van een explosieve verbranding in een gesloten systeem



Indien wordt aangenomen dat een homogene vaste stof of een vloeistof explosief brandt in een afgesloten systeem, en de reactieproducten gasvormig zijn, dan kunnen de volgende vergelijkingen opgesteld worden:

$$r = \frac{dh}{dt} = a + bp^\nu \quad (1)$$

$$N = (h_0 - h) \cdot A \cdot \rho \cdot n + N_0 \quad (2)$$

$$\rho (V_0 + (h_0 - h) \cdot A) = N \cdot R \cdot T_m \quad (3)$$

waarin

r = lineaire brandsnelheid

h = hoogte van de niet gereageerde stof

t = tijd

a, b, ν = konstante

p = druk

N = aantal molen in de gasfase

A = brandend oppervlak

ρ = dichtheid vaste stof

M = molecuulgewicht

n = aantal molen gas dat uit een mol oorspronkelijke stof gevormd wordt

V_0 = beginvolume gas

R = gaskonstante

T_m = temperatuur gasvormige reactieproducten

Als verondersteld wordt dat de reaktiewarmte konstant is, de temperatuur van het gas onmiddellijk de eindwaard bereikt en geen warmteverliezen naar de omgeving optreden dan kan het druk-tijdverloop worden afgeleid.

Gebruik makende van

$$\frac{dp}{dt} = \frac{dp}{dN} \cdot \frac{dN}{dh} \cdot \frac{dh}{dt}$$

wordt gevonden

$$\frac{dp}{dt} = \frac{A \cdot (RT_m \rho n - Mp)^2}{MRT_m(\rho V_o n - MN_o)} (a + bp^\nu)$$

Bij berekening blijkt dat $Mp \ll RT_m \rho n$ is en $MN_o \ll \rho V_o n$ is, dus

$$\frac{dp}{dt} = \frac{A}{M} \cdot \frac{RT_m \rho n}{V_o} (a + bp^\nu)$$

Met behulp van deze vergelijking kan het druk-tijdverloop van de explosieve verbranding van

bijv. raketkruit worden berekend. Stel het kruit bevindt zich in een vat van 100 liter dat voor de helft is gevuld met kruit ($\rho = 1600 \text{ kg/m}^3$, $M = 1,200 \text{ kg/mol}$, $n = 30$ en $T_m = 2000^\circ\text{K}$). Indien aangenomen wordt dat de formule $r = a + bp^\nu$ opgaat voor het gehele drukgebied ($a = 2 \times 10^{-3}$, $b = 6 \times 10^{-4}$ en $\nu = 0,75$) dan ziet het druk-tijdverloop er uit als getekend in fig. 7. (Aangenomen is dat de explosieve verbranding niet over gaat in detonatie.)

Literatuur

- [1] D. C. Huygen en G. Perbal: ISMA Technical Conference Edinburgh 14th to 16th September 1965.
- [2] Th. M. Groothuizen, E. W. Lindeijer and H. J. Pasman. Stikstof 14 (1970).
- [3] B. Lewis and G. von Elbe: Combustion, Flames and Explosions of Gases. Academic Press 2^e ed., 1968
- [4] A. C. Merzhanov. Combustion and Flame 13 (1969) pp. 143-156.

Stofexplosies

P. A. J. VAN GALEN

Technologisch Laboratorium TNO

Dust explosions

Samenvatting

In de inleiding wordt aangegeven welke stoffen een stofexplosie kunnen veroorzaken en ingegaan op de gevaren die er aan verbonden zijn. Hierna worden de in de praktijk gebruikte karakteristieke grootheden uitgewerkt.

Vervolgens worden enige methoden besproken, die gebruikt worden om deze kenmerkende grootheden te bepalen. Tenslotte wordt summier ingegaan op de mogelijkheid het gevaar van stofexplosies te beperken.

Summary

In the introduction it is indicated which substances may cause a dust explosion and the hazards connected with it. Next the characteristic quantities used in practice are worked out.

Then a few methods are discussed which are employed to determine these characteristic quantities. Finally the possibility of limiting the dust explosion hazard is tentatively treated.

Inleiding

Een stofexplosie is een explosieve verbranding van een vaste stof/gasmengsel. De vaste stof is hierbij fijn verdeeld in het gas aanwezig. Bepalend voor de mogelijkheid van een explosieve verbranding van een dergelijk mengsel zijn de reactiewarmte, reactiesnelheid en de warmte-overdracht naar de omringende deeltjes. De reactiesnelheid is sterk afhankelijk van de grootte van het aanrakingsoppervlak van de vaste stof met het gas. Dus niet de gewichtsconcentratie van de stofdeeltjes is bepalend, maar de oppervlakteconcentratie. Gemakshalve wordt echter meestal toch de gewichtsconcentratie gebruikt, met vermelding van de deeltjesgrootte. De kleine deeltjes in voldoende hoge concentratie worden derhalve het gemakkelijkst ontstoken en hebben de grootste uitwerking op de omgeving.

Nagenoeg alle brandbare stoffen kunnen aanleiding geven tot een stofexplosie, zodat vooral veel organische producten in dit opzicht gevaarlijk zijn. Als voorbeelden kunnen genoemd worden maizena, suiker, cacao, houtstof, vele plastics, kunstharsen, metaalpoeders en steenkoolstof. Aan deze laatste stof heeft Faraday het verschijnsel¹ het eerst onderkend. Hij kwam namelijk bij een mijnexplosie tot de conclusie dat het onmogelijk was dat alleen methaangas de katastrofale explosie had veroorzaakt [1].

Het effect van een stofexplosie is sterk afhankelijk

van de aard van de stof en van de grootte van de stofdeeltjes. De bereikte maximale einddruk varieert van 7 tot 12 ato, terwijl de brandsnelheid tot enige meters per seconde kan bedragen. Het zeer heftig reagerende aluminiumpoeder kan zelfs een detonatie veroorzaken. Bij een gesloten installatie, die ten gevolge van de explosie vernield wordt, bestaat bovendien nog het gevaar van een tweede stofexplosie buiten het apparaat. Dit gevaar is bij gasexplosies veel geringer.

Behalve de aanwezigheid van een explosief stof/gasmengsel (in de meeste gevallen is het gas/lucht) is een ontstekingsbron vereist om de explosieve verbranding te doen beginnen. Dit kan zijn een vonk, een warm oppervlak, een warmtestraler of een andere energiebron.

Aangezien vele stoffen verwerkt worden in de vorm van poeders (b.v. bij pneumatisch transport, malen, drogen etc.) is de mogelijkheid om steeds buiten het explosiegebied te werken vrijwel nihil.

Het voorkómen van een stofexplosie dient dan te geschieden door het vermijden van ontstekingsbronnen, hoewel natuurlijk ook het langer dan noodzakelijk aanwezig zijn van een explosieve stof/luchtmengsel zal moeten worden vermeden. Soms kan dit bereikt worden door de zuurstofconcentratie van het omringende gas te verlagen.

Het effect van een stofexplosie in een bedrijf kan ook ten gevolge van secundaire factoren katastro-

fale gevolgen hebben. Door de door de reactie veroorzaakte drukgolf kan namelijk het soms overvloedig buiten de installatie aanwezige stof gemakkelijk worden opgewerveld, zodat de explosie als het ware zelf voor een explosief mengsel zorgt. Hierdoor kunnen andere installaties bereikt worden met alle gevolgen van dien.

Karakteristieke grootheden

Een stofexplosie is een gas/vast reactie die door warmtetoevoer van een uitwendige energiebron op een bepaalde plaats begint, om zich vervolgens door het gehele mengsel voort te zetten. Het gas of één van de componenten van het gas reageren met de vaste stof, waarbij zoveel warmte wordt geproduceerd dat ook de aangrenzende stofdeeltjes met de omringende lucht beginnen te reageren. De warmte-overdracht van de reagerende naar de nog niet gereageerd hebbende stofdeeltjes speelt derhalve een belangrijke rol in de voortplanting van de explosie. Het warmtetransport vindt plaats door geleiding, straling en convectie. Aangenomen wordt dat vooral straling een belangrijke bijdrage levert.

Om de gevaarlijkheid van een stof/luchtmengsel te beschrijven wordt gebruik gemaakt van een aantal kenmerkende grootheden.

De energie die bij de verbranding van een deeltje vrijkomt, zal een aangrenzend deeltje op een zo hoge temperatuur moeten brengen, dat het deeltje zelf als een warmtebron kan gaan fungeren. De afstand tussen de deeltjes onderling moet dus beneden een bepaalde waarde zijn. Dit betekent dat er een minimaal aantal deeltjes per volume-eenheid aanwezig moet zijn. Deze minimale concentratie is de onderste explosiegrens. Voeren we de stofconcentratie geleidelijk op dan zal er op een bepaald ogenblik de bovenste explosiegrens bereikt worden, waarboven geen voortschrijding meer plaatsvindt. Tussen beide grenzen bevindt zich het explosiegebied.

Bij een stofexplosie in lucht vindt de reactie plaats in een drie-componenten-systeem: stikstof, zuurstof en de vaste stof. Voor de explosieve verbranding zijn echter alleen de hoeveelheden zuurstof en vaste stof van belang.

De stikstof is inert ten opzichte van de reactie en consumeert warmte. Het is vaak van belang te weten bij welke zuurstofconcentratie in de lucht de verbranding nog kan voortschrijden.

Een ander belangrijk gegeven is de energie die nodig is om een explosief stof/luchtmengsel te ontsteken. Deze energie is afhankelijk van de samenstelling van het explosief mengsel. Wordt voor verschillende stofconcentraties de minimaal vereiste ontstekingsenergie bepaald, dan blijkt een minimum op te treden in de buurt van de stoichiometrische samenstelling. De in de praktijk voorkomende ontstekingsbronnen variëren sterk.

Het is zeer moeilijk te bepalen hoe groot de energie is, die per volume-eenheid en per tijdseenheid door een bepaalde energiebron aan een stofwolk wordt toegevoerd. Daarom worden verschillende energiebronnen op gestandaardiseerde wijze beproefd. Gewoonlijk wordt opgegeven de minimale vonkenergie van een capacatieve vonk en de minimale ontstekingstemperatuur (heet oppervlak).

Het effect van een stofexplosie op de omgeving wordt bepaald door de snelheid waarmee de verbrandingsreactie voortschrijdt, door de reactiewarmte en door het bij de reactie gevormde gasvolume. Karakteristieke grootheden voor het effect zijn de snelheid van drukstijging en de maximale einddruk die in een bepaalde situatie bereikt kan worden.

Belangrijk voor de secundaire uitwerking van een stofexplosie op de omgeving zijn de temperatuur (brandgevaar) en de giftigheid van de gevormde eindproducten.

Resumerend kunnen we de volgende grootheden opsommen die gebruikt worden om de gevaarlijkheid van een bepaalde stof te karakteriseren.

- onderste en bovenste explosiegrens
- minimale zuurstofconcentratie in lucht
- minimale ontstekingsenergie — vonkenergie
 - ontstekingstemperatuur
- maximale explosiedruk
- maximale snelheid van drukstijging
(— temperatuur en giftigheid van de verbrandingsgassen).

Bij het onderzoek aan stofexplosies is het maken van een bekend en reproduceerbaar stof/luchtmengsel zeer moeilijk.

Door het Bureau of Mines is voor het stofexplosie-onderzoek ontwikkeld het zogenaamde Hartmann-apparaat [2], (figuur 1), een apparaat dat ook door TNO gebruikt wordt.

Het stof bevindt zich in een bakje en wordt door een plotselinge drukstoot opgewerveld. Vervolgens zorgt een vonk voor de ontsteking. Het druk-tijdverloop tijdens de explosie wordt gemeten. Voor vele stof/luchtmengsels zijn op deze wijze de explosie-eigenschappen bepaald [3, 4, 5, 6].

Een bezwaar van deze methode is het niet gedefinieerd zijn van de stofconcentratie. Aangenomen wordt dat de concentratie gelijk is aan de hoeveelheid stof die in het bakje aanwezig was, gedeeld door het totale volume van de buis. Gezien de wijze van verstuiving is het stof/luchtmengsel niet homogeen. Om metingen te kunnen doen aan een beter gedefinieerd stof/luchtmengsel is bij TNO een apparaat aanwezig, waarbij de explosiviteit gemeten wordt aan een stromend stof/luchtmengsel.

Door een constante stofdosering kan een homo-

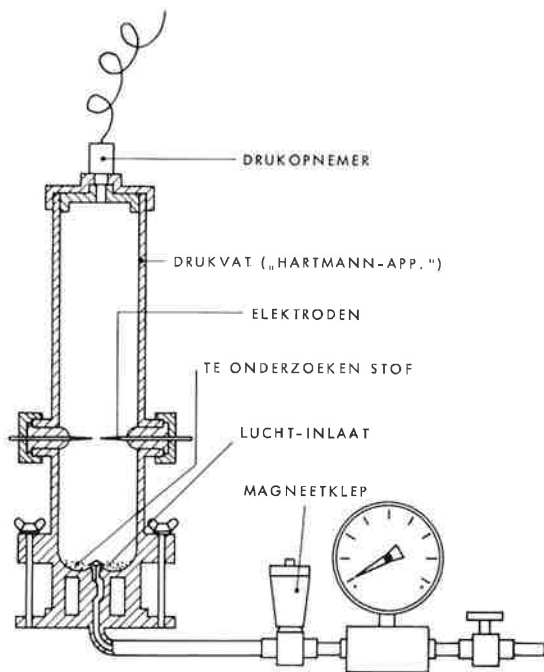


Fig. 1. Hartmann-apparaat.

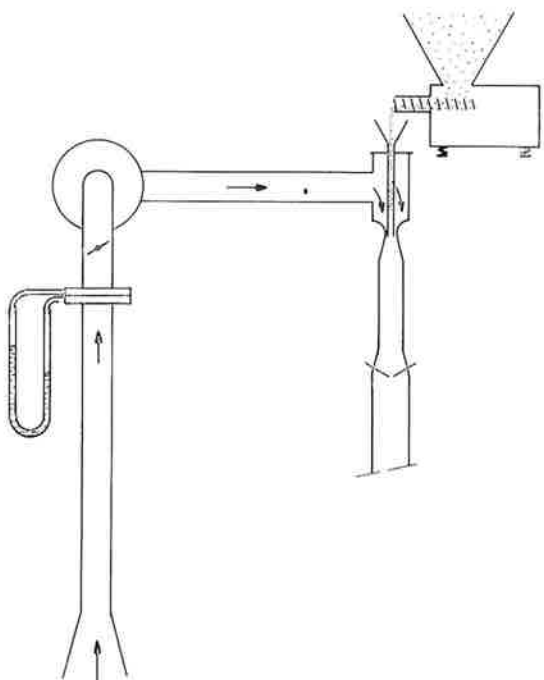


Fig. 2. Apparatuur voor het onderzoek aan stromende stof/ luchtmengsels.

geen stof/luchtmengsel bereikt worden (figuur 2).

Met behulp van een ventilator wordt de lucht aanzogen. Het debiet (tot circa 500 m³/h) wordt gemeten met een meetflens. Het stof wordt door de naar beneden stromende lucht aanzogen uit een trechter, die het stof krijgt toegevoerd door een roterende schroef. Hierdoor kan een nauwkeurige dosering bereikt worden.

Het stof/luchtmengsel wordt hierna ontstoken door een capacitieve vonk die tussen twee in de stroming geplaatste elektroden overspringt. In de glazen pijp kan de voortschrijdende verbranding geconstateerd worden.

Het is mogelijk de lucht te verwarmen, zodat de invloed van de temperatuur op de explosieve eigenschappen van een stof bepaald kan worden.

Een bezwaar van het apparaat is, dat de minimum-ontstekingsenergie alleen bepaald kan worden in een stromend medium.

Wanneer echter deze waarde voor verschillende stroomsnelheden wordt bepaald kan door extrapolatie de minimum-ontstekingsenergie in een stilstaand stof/luchtmengsel gevonden worden.

Ook bij het Hartmann-apparaat is het de vraag in hoeverre het stof/luchtmengsel op het moment van ontsteken stilstaat.

Met een soortgelijk apparaat als bij TNO gebruikt wordt is gewerkt door Palmer en Tonkin [7]. Zij vinden dat stoffen die in het Hartmann-apparaat wel een „stofexplosie” kunnen geven onder invloed van een grote ontstekingsenergie, in de door hen gebruikte apparatuur geen stabiele verbranding vertonen. Dit wordt veroorzaakt doordat in een sterke ontstekingsbron alle stoffen een soort onvolledige verbranding zullen geven.

Het voorkomen en temmen van stofexplosies

Indien bekend is dat een bepaald product een stofexplosie kan veroorzaken, dan zal men trachten de werkcondities zodanig te kiezen, dat normaliter geen stofexplosies kunnen optreden. Bovendien kan men maatregelen treffen om een onverhoopt toch optredende stofexplosie te temmen.

Enige maatregelen die genomen kunnen worden om een stofexplosie te voorkomen zijn:

- werken met stofconcentraties buiten het explosiegebied
- het verlagen van de zuurstofconcentratie (te bereiken door b.v. stikstofbimenging, rookgasen van stookinstallaties)
- het vermijden van ontstekingsbronnen.

Het temmen van stofexplosies in een installatie kan gebeuren door breekplaten, explosiekleppen of chemische dovers. Veel onderzoek op dit gebied is verricht door Bartknecht [2, 8]. Hieruit blijkt dat het gebruik van breekplaten en explosiekleppen soms is af te raden omdat na het functioneren

hiervan, buiten de apparatuur nog een heftige stofexplosie kan plaatsvinden.
De auteur betuigt gaarne zijn dank aan de heren J. F. van Elteren (IBBC-TNO) en J. de Vries (CTI-TNO) voor hun medewerking bij de samenstelling van dit artikel.

Literatuur

- [1] H. M. Cassel: Some fundamental aspects of dust flames. R.I. 6551 (1964).
- [2] W. Bartknecht: Erprobung von Explosionssicherungen an Rohrleitungen und Behältern. Moderne Unfallverhütung, Heft 12, (1968).
- [3] M. Jacobson, J. Nagy, A. R. Cooper & F. J. Bell: Explosibility of agricultural dusts. R.I. 5753 (1961).
- [4] M. Jacobson, J. Nagy & A. R. Cooper: Explosibility of dusts used in the plastic industry. R.I. 5971 (1962).
- [5] M. Jacobson, A. R. Cooper & J. Nagy: Explosibility of metal powders. R.I. 6516 (1964).
- [6] H. G. Dorsett & J. Nagy: Dust explosibility of chemicals, drugs, dyes and pesticides. R.I. 7132 (1968).
- [7] K. W. Palmer & Tonkin, P. S.: The explosibility of dusts in small scale tests and large-scale industrial plant, I. Chem. E. Symp. Ser. No. 25 (1968), 66.
- [8] W. Bartknecht: Sicherheitsmassnahmen gegen die ungehinderte Ausbreitung von Explosionen und gegen Explosionsauswirkungen in Rohrstrecken. Moderne Unfallverhütung, Heft 11, (1967).

Proeven met explosies in met aardgas gevulde ruimten

Tests with explosions in natural gas-air mixtures in enclosed spaces

G. SNELLINK

Centraal Technisch Instituut TNO, afd. Warmtetechniek

Samenvatting

Een proefopstelling is gebouwd om de verschijnselen die optreden bij explosies van aardgas-luchtmengsels te bestuderen. Vooral de vlamfrontuitbreiding en het drukverloop als functie van de tijd zijn belangrijk om de berekening te controleren. De proeven worden voortgezet onder meer om de breuk van wanden en de werking van explosie-ontlastconstructies te bestuderen.

Summary

The preliminary results of a series of tests on a 1 m³ space in which explosions in a natural gas/air mixture are initiated are discussed. Special attention is paid to the displacement of the combustion zone and the pressure rise during the explosion. The tests are being continued to study the way in which walls of various materials are destroyed and to study the working of explosion-relief constructions.

Inleiding

De kennis van de eigenschappen en het verloop van een explosie in een afgesloten ruimte is nodig om te komen tot een verantwoorde bestrijding van de gevolgen ervan. Met name het verloop van de druk in de ruimte als functie van de tijd is een belangrijk gegeven voor bijvoorbeeld de dimensionering van drukontlastkleppen (z.g. explosieluiken) op installaties.

Met behulp van een aantal aannamen is het mogelijk dit druk-tijdverloop te berekenen. Proeven zijn echter nodig om de gebruikte aannamen te controleren en eventueel te corrigeren. Uit de literatuur zijn weinig proeven bekend van metingen van de drukstijging als tijdsfunctie, terwijl deze meestal dan nog zijn uitgevoerd aan kleine opstellingen zoals gebruikt voor het meten van de verbrandingssnelheid met de methode van de gesloten bol. Een onderzoekprogramma is daarom opgesteld om een beter inzicht te verkrijgen in de verschijnselen die optreden bij een aardgasexplosie.

Voor het verrichten van metingen tijdens een explosie is een proefopstelling gebouwd waarbij de verschijnselen tijdens de explosie vastgelegd kunnen worden met behulp van een ultra-snelle filmcamera, terwijl tevens het druk-tijd-verloop kan worden geregistreerd.

Meetopstelling

De opstelling bestaat uit een kubus met een inhoud van 1 m³. De kubus (figuur 1) is opgebouwd uit hoekprofiel, aan de onderzijde voor-

zien van zwenkwielen voor transport. De onderzijde en het deksel zijn vervaardigd van plaatstaal. Het deksel is aan de buitenzijde op het hoekprofiel vastgezet met bouten, de andere wanden rusten aan de binnenzijde tegen het profiel en zijn bevestigd met een speciale kit. De voorwand is van staalglas voor visuele waarneming; voor de overige drie wanden kunnen verschillende materialen gebruikt worden, afhankelijk van het doel van de proef. Bij de hier besproken proeven was de achterwand uit staalplaat vervaardigd, terwijl de zijwanden gevormd werden door gipsplaten.

In het deksel bevinden zich de gas invoer- en uitvoeropeningen en de doorvoering voor de elektroden. De ontstekingstransformator is op het deksel geplaatst. De kubus wordt gespoeld met een aardgas-luchtmengsel dat wordt verkregen met behulp van een fles aardgas en een hogedrukinjecteur. Via de vulleiding wordt dit mengsel naar de bodem van de bak gevoerd en daar door een verdeelpijp zo gelijkmatig mogelijk verdeeld. De uitgedreven gassen kunnen door de uitvoeropening ontsnappen. Met behulp van een „Riken” gasindicator (werkend volgens het principe van de brekingsindexmeting) wordt het methaangehalte bepaald en het vullen voortgezet tot de aardgasconcentratie ongeveer 10 vol. % bedraagt. De kranen in invoer- en uitvoerleiding worden vervolgens gesloten.

Bij de inleidende proeven bleek dat deze gasconcentratie niet voldoende lang gehandhaafd kon worden als gevolg van de snelle diffusie van het

aardgas door de gipsplaten. Een afdoende verbetering werd bereikt door de wanden met blanke lak te bespuiten, terwijl, met uitzondering uiteraard van de voorwand, de wanden aan de binnenzijde zwart werden geschilderd ten behoeve van een betere zichtbaarheid van de reactiezone tijdens de filmopnamen.

De ontsteking van het mengsel geschiedt met behulp van twee elektroden in het middelpunt van de bak.

Drukmeting vindt plaats met behulp van een „Kistler” piëzo-elektrische druknemer die in het midden van de bodem is gemonteerd.

Om direct contact met de verbrandingszone te voorkomen ligt het membraan van de druknemer iets onder het bodemoppervlak. Het daardoor gevormde kamertje wordt gevuld met olie. Het signaal van de achter de opnemer geschakelde ladingversterker wordt geregistreerd op een instrumentatie tape-recorder. Tevens worden op de recorder vastgelegd het bekrachtigingssignaal voor de ontsteking, een tijdreferentiesignaal (meestal een 100 Hz-blokspanning), een referentiesignaal van de filmcamera en het signaal van een microfoon die op enige afstand van de kist is opgesteld. Door een afspeelsnelheid te gebruiken die lager is dan de opnamesnelheid kunnen de signalen met behulp van een snelle UV-recorder worden uitgeschreven. Tevens kan met behulp van een identieke instrumentatie-tape-recorder het signaal 32 tot 32² maal vertraagd worden en digitaal worden uitgelezen voor verwerking in een rekenmachine.

Berekening van het druk-tijdverloop

Voor de berekening van het drukverloop als functie van de tijd is een aantal aannamen nodig. De belangrijkste aannamen hier gebruikt zijn:

1. Er is sprake van een explosieve verbranding (deflagratie). Het is duidelijk dat hier geen sprake kan zijn van een thermische explosie doordat plaatselijk ontstoken wordt, terwijl aan de conditie van overgang in detonatie niet is voldaan.
2. De reactiezone breidt zich bolvormig uit waarbij de verbrandingssnelheid konstant en laminair is. Voor mengelsterkten die dicht bij de explosiegrenzen liggen zal de verbrandingssnelheid wel richtingafhankelijk zijn, maar deze zijn tot nu toe nog niet in het onderzoek betrokken. Ook zijn door de aanwezigheid van de breekwanden de drukken voldoende laag om de drukinvloed op de verbrandingssnelheid te verwaarlozen, terwijl over het al dan niet laminair blijven van de verbranding de visuele waarnemingen een uitsluitsel moeten geven.

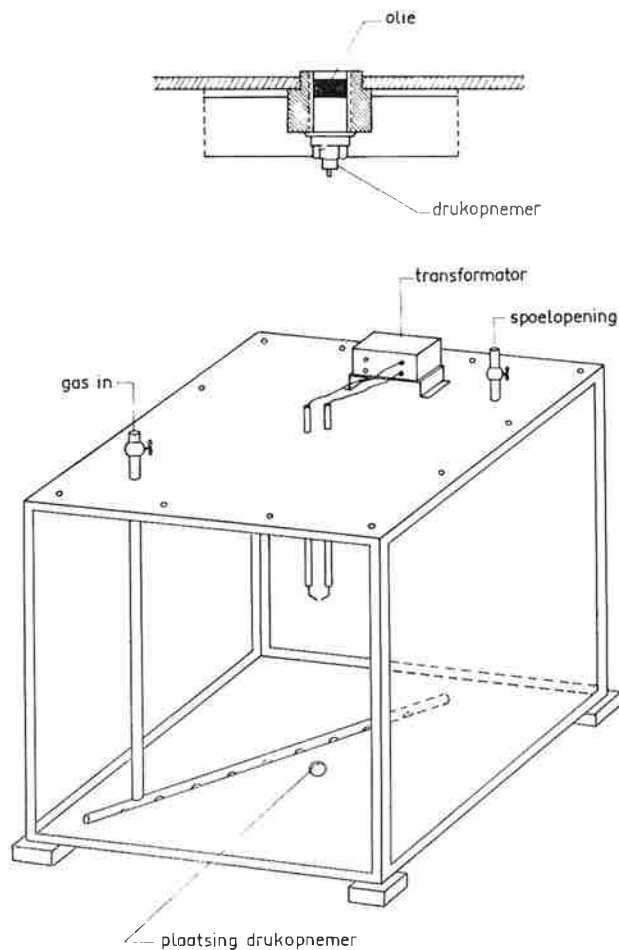


Fig. 1. Proefopstelling voor de explosiemetingen.

3. Voor de compressie van het nog niet verbrande gas wordt aangenomen dat de gaswet als $PV = RT$ mag worden toegepast en het proces van de compressie isotherm verloopt. Dit laatste is beslist niet juist, maar is ingevoerd om de formules zo ver te kunnen vereenvoudigen dat de onbekenden op te lossen zijn. Door het adiabatische proces zullen de drukken verder oplopen dan berekend met het isotherme geval. De wanden van de bak, met name de gipsplaten, zijn echter niet star, zodat een druktoename in de bak in dit geval gepaard gaat met een volumetoename, zodat de werkelijke drukstijging tussen die voor het isotherme en die voor het adiabatische geval in zal liggen.

Ten tijde t omvat het vlamfront een bol met straal r , zodat

$$V_{fl,t} = 4/3 \pi r^3$$

Als de aanvangsdruk P_0 is, de druk ten tijde t gelijk aan P , en de verhouding van de temperaturen ná de verbranding en vóór de verbranding E is,

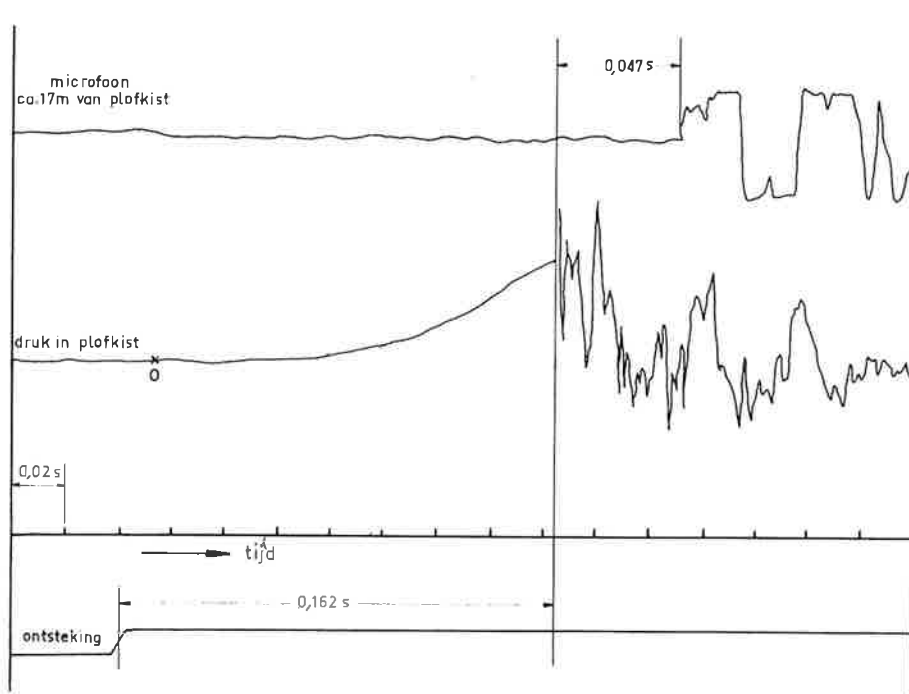


Fig. 2. Druk-tijd diagram tijdens proef met wand uit gipsplaat.

volgt dat dit volume voor de verbranding gelijk was aan

$$V_{fi_0} = 4/3 \pi r^3 P/P_0 \frac{1}{E}$$

Er is aan onverbrand mengsel, onder uitgangscodities, derhalve nog aanwezig (als het totale volume van de bak V is):

$$V_{on} = V - 4/3 \pi r^3 P/P_0 \frac{1}{E}$$

Hiervoor is een volume ter beschikking van

$$V_{on_t} = V - 4/3 \pi r^3$$

zodat de druk P volgt uit

$$P_0 (V - 4/3 \pi r^3 P/P_0 \frac{1}{E}) = P (V - 4/3 \pi r^3) \quad (1a)$$

of

$$P = P_0 \frac{V}{V - 4/3 \pi r^3 \frac{E-1}{E}} \quad (1)$$

De toename van het volume van de vlambol volgt uit

$$dV_{fl} = 4 \pi r^2 v_{fl} dt$$

waarin v_{fl} de snelheid van de reactiezone is loodrecht op het oppervlak.

De hoeveelheid die wordt omgezet is gelijk aan

$$4 \pi r^2 v_b dt$$

waarin v_b de normale verbrandingssnelheid loodrecht op het oppervlak is. Door de verbranding vormt deze omgezette hoeveelheid een volume

$$dV_{fl} = 4 \pi r^2 v_b E dt = 4 \pi r^2 dr \quad (2b)$$

waaruit volgt

$$dr/dt = E v_b$$

en

$$r_t = \int_0^t E v_b dt = E v_b t \quad (3)$$

Substitutie van (3) in (1) levert

$$P = P_0 \frac{V}{V - 4/3 \pi E^3 v_b^3 t^3 \frac{E-1}{E}}$$

of met

$$c = 4/3 \pi E^3 v_b^3 \frac{E-1}{E} / V \quad (4)$$

$$P = P_0 \frac{1}{1 - ct^3}$$

De drukstijging $\Delta P = P - P_0$ kan nu als relatieve drukstijging worden uitgedrukt met behulp van (4) n.l.

$$\frac{\Delta P}{P_0} = \frac{c t^3}{1 - c t^3} \quad (5)$$

De vlamfrontuitbreiding volgt uit (2a) en (2b) n.l.

$$v_{fl} = dr/dt = E v_b \quad (6)$$

Opmerking:

Uitgaande van een polytrope toestandsvergelijking in (1a) n.l.

$$P_0 (V - 4/3 \pi r^3 P/P_0 \frac{1}{E})^\gamma = P (V - 4/3 \pi r^3)^\gamma$$

blijkt deze voor het aanloopgedeelte, n.l. daar waar het volume van de vlambol t.o.v. het volume van

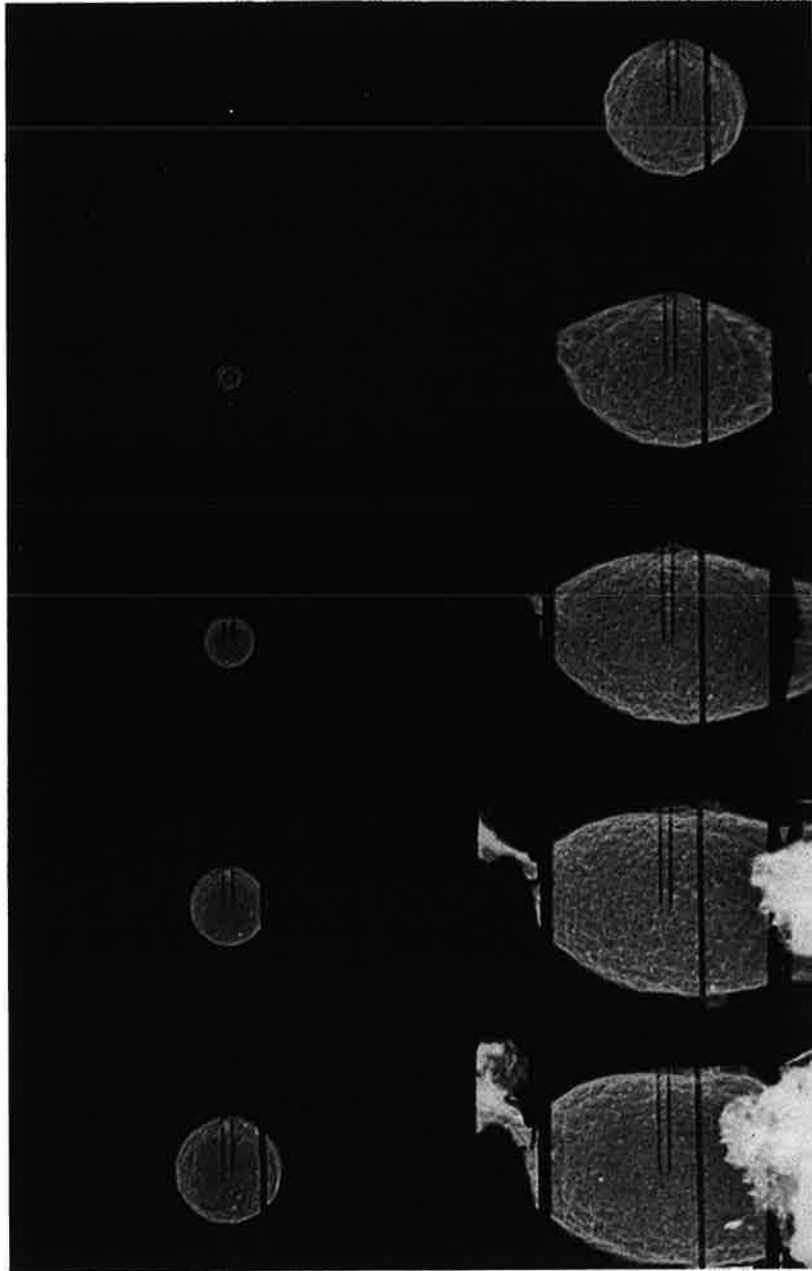


Fig. 3. Filmopnamen van vlamfrontuitbreiding (0,02 s interval).

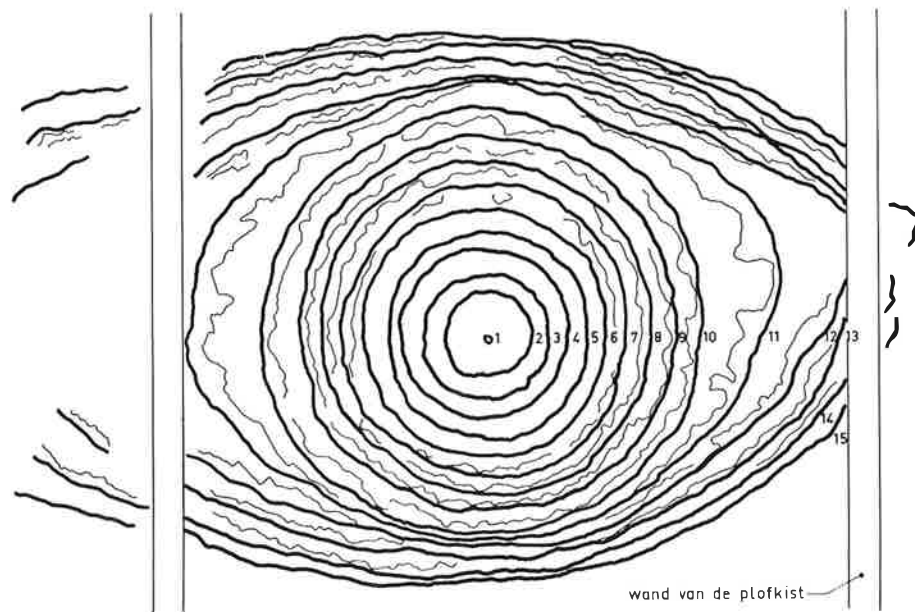


Fig. 4. Vlamfrontcontour (0,012 s interval).

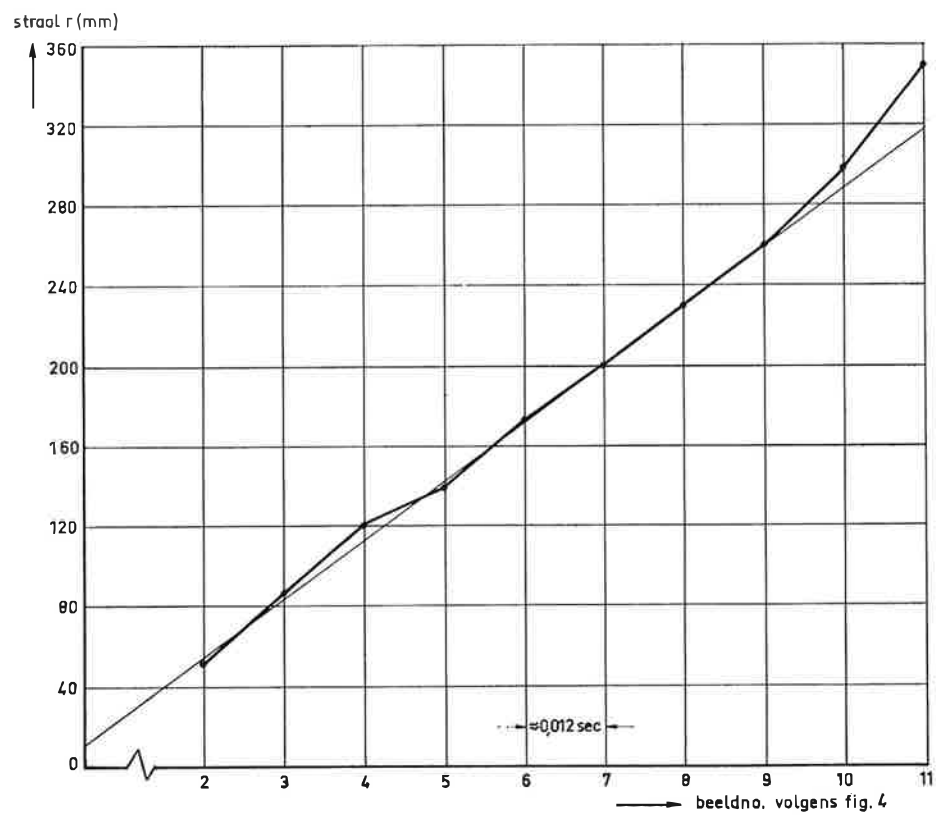


Fig. 5. Vlamfrontuitbreiding als functie van de tijd.

de kist nog klein is, eveneens toch nog tot een eenvoudig antwoord te leiden. De volumetermen zijn namelijk door reeksontwikkeling te benaderen, waarbij blijkt dat het antwoord gelijk is aan vergelijking (5) mits c nu wordt gedefinieerd als

$$c = \gamma \frac{4}{3} \pi E^3 v_b^3 \frac{E-1}{E} \sqrt{V}$$

Dit is hetzelfde resultaat als ir. Trense uit de asymptotische benadering voor dit gebied vindt.

Enige resultaten van de experimenten

In figuur 2 zijn de waarnemingen weergegeven van een van de proeven. Het bovenste signaal is van de microfoon die op ca. 17 meter afstand van de kist is opgesteld. Geluidsgolven van de explosie zullen bij een geluidssnelheid van ongeveer 340 m/s derhalve een tijdsvertraging ondervinden van ongeveer $17/340 = 0,05$ s is voor zij de microfoon bereiken.

Het is te verwachten dat, gezien de gevoeligheid waarop de combinatie microfoon-taperecorder is afgesteld, eerst bij het breken van de wanden een signaal zal worden opgevangen. Uit de afgeplatte toppen blijkt de microfoon toch nog te zijn uitgestuurd.

De druk in de kist vertoont een stijging even nadat de ontsteking is ingeschakeld. Doordat de vergelijking een derdegraads tijdterm bevat, is het niet uit dit diagram te zien waar de drukstijging inzet. Er zijn derhalve in vergelijking (5) twee onbekenden, n.l. de waarde van c en het tijdstip $t = 0$. Dit probleem wordt opgelost door de met behulp van een datalogger uitgelezen digitale waarden te verwerken met een op de „methode van de kleinste kwadraten” berustende rekenmethode, waarin c en t_0 als onbekenden worden gehanteerd.

In dit geval levert dit een begintijdstip van de explosie op dat op 0,012 s na de bekrachtiging van de ontsteking valt. De waarde van c die hierbij hoort bedraagt 23,63. Deze waarde kan geschat

worden uit de waarden v_b en E bij 100% (vol.) aardgas in het mengsel, n.l.

$$v_b \approx 0,24 \text{ m/s en } E \approx 7,6 \text{ waaruit volgt}$$

$$c = \frac{4}{3} \pi E^3 v_b^3 \frac{E-1}{E} \sqrt{V} \approx 22,1$$

hetgeen een goede overeenstemming geeft. Een betere vergelijking wordt mogelijk als het produkt $E v_b$ uit de film als vlamsnelheid wordt gemeten. Alleen E hoeft dan te worden geschat en de grootte van de nu nog verwaarloosde polytroopexponent γ kan dan tevens worden bepaald.

Aan de drukdaling na het breken van de wanden valt in dit geval nog niet te rekenen, daar het verloop van de gevormde openingen in de wand als functie van de tijd hier niet bekend is.

Een indruk van de resultaten van de filmregistratie bij dit soort proeven geeft figuur 3. Deze beelden zijn opgenomen met een snelheid van 50 beelden/s.

Van filmbeelden opgenomen met 416 beelden/s. en een belichtingstijd van 1/1000 s. zijn om de 5 beelden, met behulp van een motion-analyser, de grenzen van de explosiebol overgenomen en vervolgens opgemeten (zie figuur 4).

Het verloop van de straal van de bol als functie van de tijd is weergegeven in figuur 5. Hieruit blijkt dat tot en met beeld no. 9 de vlamsnelheid nagenoeg constant is, zodat de gestelde aanname hierover juist is. Bij beeld 10 blijkt een afwijking op te treden, hier breidt de bol zich links sterk uit, waarschijnlijk onder invloed van breuk van de linker wand; tot dat moment blijft de explosiebol gecentreerd op de verticale as. Een verplaatsing in verticale zin treedt wel op. Dit kan tweërlei oorzaken hebben n.l. een verplaatsing van de bol naar boven onder invloed van opwaartse krachten als gevolg van temperatuurseffecten en het hiermee nauw verwante verschijnsel van de richtingsafhankelijke verbrandingssnelheid.

De proeven met deze opstelling worden voortgezet, onder meer om de breuk van wanden van verschillende materialen te bestuderen.

De gasexplosie in een gesloten vat

The gas explosion in a closed vessel

R. W. TRENSE

Technologisch Laboratorium TNO

Samenvatting

Om de afleiding van het druk-tijdverloop voor een gasexplosie in een gesloten vat wat gemakkelijker te laten verlopen gaat men wel eens uit van de aanname, dat het proces isotherm verloopt met de motivering, dat dit voor het begin van het proces accepteerbaar zou zijn. Laat men het resultaat van de ietwat ingewikkelde adiabatiscbe afleiding asymptotisch naderen tot een uitkomst geldig voor het kleine drukgebied dan blijkt dit niet helemaal in overeenstemming met de uitkomst van de isotherme afleiding. De verkregen asymptotische formule is, zoals blijkt gemakkelijk hanteerbaar en kan voor de berekening van de beveiligingselementen van constructies worden gebruikt, waarvan de toelaatbare druk in het bovengenoemde kleine drukgebied is gelegen.

Summary

In order to get a comparatively smooth running derivation of the pressure-time course of a gas explosion in a closed vessel the assumption is sometimes made that the process proceeds isothermally on the motivation that this would be acceptable for the initial stage of the process.

It appears, however, that the results of the isothermal derivation is not entirely in agreement with that of the somewhat complex adiabatic derivation even if the latter is allowed to approach asymptotically towards a result valid for this narrow pressure range. The asymptotic formula is easy in operation as is shown and can be used for calculating the safety devices of constructions whose permissible pressure lies within the narrow pressure range mentioned above.

1. Voor de bepaling van de effectieve openingsgrootte van breekmembranen, ontlastingskleppen en breekwanden moet men de drukopbouw kennen die door de explosie van een gasmengsel in een gesloten vat tot stand komt.

Deze toestand treedt immers op tot aan het openen van de ontlastingselementen, terwijl de kennis hiervan ook van uitermate belang is voor de uit te voeren berekeningen van de drukafbraak in de daaropvolgende periode.

Vooropgesteld zij, dat er in dit artikel geen sprake zal zijn van detonaties, die immers behandeld zullen worden door Ir. Broekstra. Men hoede zich bij de bepaling van drukopbouwformules voor gemakkelijker lopende edoch onzorgvuldige afleidingen. Zo gaat men wel eens uit van de aanname, dat het proces isotherm verloopt met de motivering, dat dit voor het begin van het proces accepteerbaar zou zijn. Laat men het resultaat van een wat ingewikkelder afleiding, waarbij het proces als adiabatiscb verlopend wordt gedacht asymptotisch naderen tot een uitkomst geldig voor het kleine drukgebied zo blijkt dit niet helemaal in overeenstemming te zijn met het isotherme verloop (zie formules (42) en (43)).

Een afleiding van de adiabatiscbe formule waar weinig tegen in te brengen valt is afkomstig van Flamm en Mache [1].

Wat moderner van opzet is de afleiding van V. S. Babkin en Yu. G. Kononenko [2]. We zullen deze op de voet volgen en hierna de uitkomst (formule (31)) nader uitwerken en uitbreiden.

Er wordt immers verondersteld, dat de lineaire brandsnelheid konstant zou zijn. Nu kan zulks zonder grote fout aangenomen worden voor de aanzet van het proces. Als de drukken echter gestegen zullen zijn tot waarden, die men bij explosies in vuurhaarden als toelaatbaar veronderstelt, is dit geenszins meer het geval. Men zou hierbij dan althans voor aardgas-luchtmengsels kunnen uitgaan van formule (35). Nodig is, dat de hypothese, die aan deze formule ten grondslag ligt wordt geverifieerd. Onder meer om deze reden wordt er bij het Technologisch Laboratorium TNO een explosiebol geconstrueerd en binnenkort in gebruik genomen. Er zullen tenslotte nog enkele voor de praktijk handige formules worden afgeleid n.l. de formules (39) en (40).

Om de formules (31) danwel (35) numeriek te kunnen integreren moet rekening worden gehou-

den met de singulariteit ten tijde $t = 0$. Hiertoe kan dankbaar gebruik gemaakt worden van de asymptotische benadering waarop hierboven reeds gewezen werd.

We gaan nu over op de wiskundige afleiding welke zal plaats vinden langs lijnen van geleidelijkheid met vermijding van te grote sprongen.

2. Het gasmengsel bevindt zich in een bolvormig vat met straal a . De ontsteking heeft in het centrum plaats. Er treedt nu voortdurend een drukvereffening op, die zich met de geluidssnelheid voortplant. Ten aanzien van de betrekkelijk lange duur van het proces betekent dit, dat deze vereffening als momentaan is op te vatten.

Zij m de gasmassa, v zijn volume, ρ zijn dichtheid en betekenen de indices u, b, i resp. *unburned, burned en initieel*. Verder betekent $\langle \rangle$ gemiddeld over een volume.

Met Babkin en Kononenko voeren we de volgende dimensieloze grootheden in.

$$\langle \sigma_b \rangle = \frac{\langle \rho_b \rangle}{\rho_i}; \quad \sigma = \frac{\rho_u}{\rho_i}; \quad n = \frac{m_b}{m_i}; \quad n_u = \frac{m_u}{m_i}; \quad \omega_b = \frac{v_b}{v_i}$$

$$\omega_u = \frac{v_u}{v_i}; \quad \pi = \frac{p}{p_i}$$

Onmiddellijk volgt hieruit:

$$n = \omega_b \langle \sigma_b \rangle \text{ en } n_u = \omega_u \sigma \quad (1)$$

Door optelling vindt men:

$$n + n_u = \frac{m_b + m_u}{m_i} = 1 \quad (2)$$

ofwel volgens (1)

$$\omega_b \langle \sigma_b \rangle + \omega_u \sigma = 1 \quad (2a)$$

Verder zien we eveneens door optelling, dat

$$\omega_b + \omega_u = \frac{v_b + v_u}{v_i} = 1 \quad (3)$$

Uit (2a) en (3) is ω_b op te lossen

$$\omega_b = \frac{1 - \sigma}{\langle \sigma_b \rangle - \sigma} \quad (4)$$

Uit (4) volgt:

$$\omega_b \langle \sigma_b \rangle - \omega_b \sigma = 1 - \sigma$$

zodat in verband met (1)

$$\omega_b = \frac{\sigma + n - 1}{\sigma} \quad (5)$$

Als a -dimensionale grootheid voeren we nog in de verhouding van de straal r_b van de bolvormige vlam tot de straal a van het bolvormige vat.

$$r = \frac{r_b}{a}$$

Maar dan is (5) als volgt om te vormen

$$\omega_b = \frac{\frac{4}{3} \pi r_b^3}{\frac{4}{3} \pi a^3} = \left(\frac{r_b}{a}\right)^3 = r^3 = \frac{\sigma + n - 1}{\sigma} \quad (5a)$$

In verband met (1) wordt (5a)

$$\langle \sigma_b \rangle = \frac{n}{\omega_b} = \frac{\sigma + n - 1}{\sigma} \quad (6)$$

Naast het behoud aan stof hebben we het behoud aan energie.

Zij:

$$\left. \begin{aligned} U_u &= \text{specifieke inw. energie van het} \\ &\text{verse mengsel} \\ U_b &= \text{specifieke inw. energie van de} \\ &\text{verbrandingsprodukten} \\ U_i &= \text{specifieke inw. energie van het} \\ &\text{verse mengsel} \\ U_{bi} &= \text{specifieke inw. energie van de} \\ &\text{verbrandingsprodukten} \end{aligned} \right\} \begin{array}{l} \text{bij een} \\ \text{druk } p \\ \\ \text{bij een} \\ \text{druk } p_i \end{array}$$

$$\varphi = \text{specifieke bij de verbranding} \\ \text{vrijgekomen energie}$$

Voor de energiebalans is hiermee te schrijven

$$\int_0^n U_b \, dn + \int_0^1 U_u \, dn = U_i + \int_0^n \varphi \, dn \quad (7)$$

Uit de veronderstelling dat alle processen adiabatisch verlopen volgt

$$U_u - U_i = \frac{c_{vu}}{m_i} (T_u - T_i) \quad (8)$$

$$U_b - U_{bi} = \frac{c_{vb}}{m_b} (T_b - T_{bi}) \quad (9)$$

Verder geldt voor de verbranding de energievergelijking

$$U_{bi} + p_i \Delta v = U_i + \varphi \quad (10)$$

$$U_{bi} - U_i = -R_b \frac{T_{bi}}{m_b} + R_i \frac{T_i}{m_i} + \varphi$$

Door (9) en (10) bij elkaar op te tellen ontstaat nu

$$U_b - U_i = \frac{c_{vb}}{m_b} (T_b - T_{bi}) - R_b \frac{T_{bi}}{m_b} + R_i \frac{T_i}{m_i} + \varphi \quad (11)$$

We substitueren nu (8) en (11) in (7) en vinden

$$\int_0^n \left\{ \frac{c_{vb}}{m_b} (T_b - T_{bi}) - R_b \frac{T_{bi}}{m_b} + R_i \frac{T_i}{m_i} \right\} dn + \int_n^1 \frac{c_{vu}}{m_i} (T_u - T_i) dn = 0$$

Nu is

$$R_b = c_{pb} - c_{vb}$$

en

$$R_i = c_{pi} - c_{vi}$$

zodat

$$c_{vb} \int_0^n \frac{T_b}{m_b} dn = n c_{pb} \frac{T_{bi}}{m_b} - n c_{pi} \frac{T_i}{m_i} - (1-n) c_{vu} \frac{T_u}{m_i} + c_{vu} \frac{T_i}{m_i} = 0 \quad (12)$$

Geven we het gemiddelde over n aan door $\langle \rangle_n$ zo volgt uit:

$$\frac{p}{\langle \rho_b \rangle} = R_b \langle \frac{T_b}{m_b} \rangle_n \text{ en } \frac{p_i}{\rho_i} = \frac{R_i T_i}{m_i} \rightarrow$$

$$\pi = \frac{p}{p_i} = \langle \sigma_b \rangle \langle \frac{T_b}{m_b} \rangle_n \frac{m_i}{T_i} \frac{c_{pb} - c_{vb}}{c_{pi} - c_{vi}}$$

We gaan nu van de veronderstelling uit, dat

$$\nu_b = \frac{c_{pb}}{c_{vb}} = \nu_u = \frac{c_{pu}}{c_{vu}} = \nu \quad (13)$$

$$\left\langle \frac{T_b}{m_b} \right\rangle_n = \frac{T_i}{m_i} \frac{\pi}{\langle \sigma_b \rangle} \frac{c_{pu} - c_{vu}}{c_{pb} - c_{vb}} = \frac{T_i}{m_i} \frac{\pi}{\langle \sigma_b \rangle} \frac{c_{vu}}{c_{vb}}$$

uit

$$p = C \rho_u^{\nu} \pi \quad p_i = C \rho_i^{\nu} \pi = \frac{p}{\rho_i} = \left(\frac{\rho_u}{\rho_i} \right)^{\nu} = \sigma^{\nu} \quad (14)$$

(13) geeft met (14) en (6)

$$c_{vb} \left\langle \frac{T_b}{m_b} \right\rangle_n = c_{vu} \frac{T_i}{M_i} \sigma^{\nu-1} \frac{\sigma+n-1}{n} \quad (15)$$

Bij substitutie van (15) en (12) en vermenigvuldiging van de verkregen vergelijking met $\frac{m_i}{T_i} \frac{1}{c_{vu}}$ ontstaat

$$\sigma^{\nu-1} (\sigma+n-1) = n \nu \frac{c_{vb}}{c_{vu}} \frac{m_i T_{bi}}{m_b T_i} - (n \nu - 1) - (1-n) \frac{T_u}{T_i} \quad (17)$$

Bij deling van

$$\frac{p}{\rho_u} = \frac{c_{pu} - c_{vu}}{m_i} T_u$$

door

$$\frac{p}{\rho_u^{\nu}} = C$$

krijgen we

$$\left. \begin{aligned} \rho_u^{\nu-1} &= \frac{1}{C m_i} c_{vu} (\nu-1) T_u \\ \rho_i^{\nu-1} &= \frac{1}{C m_i} c_{vu} (\nu-1) T_i \end{aligned} \right\} \sigma^{\nu-1} = \left(\frac{\rho_u}{\rho_i} \right)^{\nu-1} = \frac{T_u}{T_i} \quad (18)$$

We kunnen nu (18) in (17) substitueren. Met behulp van het begrip expansiecoëfficiënt

$$E_i = \frac{c_{vb}}{c_{vu}} \frac{m_i T_{bi}}{m_b T_i} \quad (19)$$

ontstaat hieruit de betrekking

$$n = \frac{\sigma^{\nu-1} - 1}{\nu (E_i - 1)} \quad (20)$$

Aangezien voor $n = 1$, $\sigma = \sigma_e$ en $\pi = \pi_e$ ontstaat uit (20)

$$n = \frac{\sigma_e^{\nu-1} - 1}{\sigma_e^{\nu-1}} \quad (21)$$

ofwel:

$$n = \frac{\left(\frac{\rho_u}{\rho_i} \right)^{\nu-1} - 1}{\left(\frac{\rho_u}{\rho_i} \right)^{\nu-1} - 1} = \frac{\frac{p}{p_i} - 1}{\frac{p_e}{p_i} - 1} = \frac{\pi - 1}{\pi_e - 1} = \frac{p - p_i}{p_e - p_i} \quad (22)$$

$$1 - n = 1 - \frac{p - p_i}{p_e - p_i} = \frac{p_e - p}{p_e - p_i} \quad (23)$$

Uit (21) ontstaat door differentiatie

$$\frac{dn}{d\sigma} = \frac{\nu \sigma^{\nu-2}}{\sigma_e^{\nu-1}} = \frac{\nu \pi^{1-\frac{1}{\nu}}}{\pi_e - 1} \quad (24)$$

Teruggrijpend op de begindefinities, opereren we verder als volgt:

$$n_u = \frac{m_u}{m_i} = \frac{\rho_u \nu_u}{\rho_i \nu_i} = \sigma \omega_u \quad (25)$$

$$dn_u = \sigma d\omega_u + \omega_u d\sigma \quad (26)$$

Met S_u als brandsnelheid is

$$dm_u = -4 \pi r_b^2 \rho S_u dt$$

$$dn_u = \frac{dm_u}{m_i} = -\frac{4 \pi r_b^2 \rho_u S_u dt}{\frac{4}{3} \pi a^3 \rho_i} = -3 \left(\frac{r_b}{a} \right)^2 \frac{\sigma}{a} S_u dt$$

$$\frac{dn_u}{dt} = -\frac{3 r^3}{a} \sigma S_u \quad (27)$$

Aangezien uit (2) volgt

$$\frac{dn}{dt} = -\frac{dn_u}{dt} \quad (28)$$

geven (27) en (28):

$$\frac{dn}{dt} = \frac{3 r^2}{a} \sigma S_u$$

$$S_u = \frac{a}{3 r^2} \frac{dn}{dt} = \frac{a}{3 r^2 \sigma} \frac{dn}{d\sigma} \frac{d\sigma}{dt} \quad (29)$$

$$\frac{d\sigma}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{\rho_u}{\rho_i} \right) = \frac{d}{dt} \pi^{\frac{1}{\nu}} = \frac{1}{\nu} \pi^{\frac{1}{\nu}-1} \frac{d\pi}{dt}$$

Uit (24) volgt:

$$\frac{dn}{d\sigma} \cdot \frac{d\sigma}{dt} = \frac{\nu \pi^{1-\frac{1}{\nu}}}{\pi_e - 1} \frac{1}{\nu} \pi^{\frac{1}{\nu}-1} \frac{d\pi}{dt} = \frac{1}{\pi_e - 1} \frac{d\pi}{dt} \quad (30)$$

Formule (29) wordt nu in verband met (5a) en (30)

$$S_u = \frac{a}{3 (\sigma+n-1)^{2/3} \sigma^{1/3}} \frac{1}{\pi_e - 1} \frac{d\pi}{dt}$$

Uit formule (23) en (24) volgt:

$$S_u = \frac{a}{3} \left[1 + \frac{p - p_e}{p_e - p_i} \frac{p_i^{\frac{1}{\nu}}}{p} \right]^{\frac{2}{3}} \frac{p_i^{\frac{1}{\nu}}}{p} \frac{1}{p_e - p_i} \frac{dp}{dt} \quad (31)$$

Formule (31) werd het eerst door Flamm en Maché afgeleid.

3. Met S_u konstant kan (31) zonder meer worden geïntegreerd. Evenwel is dit slechts met enige benadering geldig voor p weinig afwijkend van p_i dat wil zeggen slechts in het beginstadium van de explosie.

Bij voortschrijdende verbranding kan men voor een aardgas-luchtmengsel stellen [3, 4].

$$\left. \begin{aligned} S_u &= \beta T_u^2 \\ S_{ui} &= \beta T_i^2 \end{aligned} \right\} \rightarrow \frac{S_u}{S_{ui}} = \left(\frac{T_u}{T_i} \right)^2 \quad (32)$$

In verband met (18) wordt (32)

$$\frac{S_u}{S_{ui}} = \sigma^{2(\nu-1)} \quad (33)$$

Uit (33) en (14) krijgen we

$$S_u = S_{ui} \pi^{\frac{2(\gamma-1)}{\gamma}} \quad (34)$$

Tenslotte geven (34) en (31)

$$\frac{dp}{dt} = \frac{3S_{ui}}{a} \left\{ 1 + \frac{p - p_e}{p_e - p_i} \cdot \frac{p_i}{p} \right\}^{\frac{2}{3}} \frac{p_i^{\frac{2\gamma-1}{\gamma}}}{p_i} (p_e - p_i) \quad (35)$$

Een formule, die in de literatuur vaak voorkomt en van praktisch nut is kan als volgt worden afgeleid:

Uit (26) en (1) volgt

$$\left. \begin{aligned} dn_u &= \omega_u d\sigma + \sigma d\omega_u \\ \omega_u &= 1 - \omega_b \\ d\omega_u &= -d\omega_b \\ \omega_b &= \left(\frac{r_b}{a}\right)^3 \rightarrow d\omega_b = \frac{3r_b^2}{a^3} dr_b \\ dn_u &= (1 - \omega_b) d\sigma - \frac{3r_b^2}{a^3} \sigma dr_b \end{aligned} \right\} \rightarrow \quad (36)$$

(36) en (27) voeren tezamen tot

$$S_u = \frac{dr_b}{dt} - \frac{1 - \frac{r_b^3}{a^3}}{2} \frac{d\sigma}{dt} - \frac{3r_b^2}{a^3} \sigma \quad (37)$$

Verder geeft (14):

$$\ln \sigma = \frac{1}{\gamma} \ln \pi \rightarrow \frac{1}{\sigma} \frac{d\sigma}{dt} = \frac{1}{\gamma} \frac{1}{\pi} \frac{d\pi}{dt} = \frac{1}{\gamma} \frac{1}{p} \frac{dp}{dt} \quad (38)$$

Uit (37) en (38) volgt:

$$S_u = \frac{dr_b}{dt} - \frac{1}{\gamma} \frac{1 - \left(\frac{r_b}{a}\right)^3}{\frac{3r_b^2}{a^3}} \frac{1}{p} \frac{dp}{dt} \quad (39)$$

of ook:

$$\frac{d \ln p}{dt} = \frac{3\gamma r_b^2}{a^3} \left(\frac{dr_b}{dt} - S_u \right) \left(1 - \frac{r_b}{a} \right)^3 \quad (40)$$

Als we een vat hebben, dat niet bolvormig is en dat een volume V bezit kunnen we met Heinrich in de bovenafgeleide formules voor a de waarde $\sqrt[3]{\frac{3V}{4\pi}}$ substitueren. Men verkrijgt hiermee goede resultaten zie [5].

4. Bij sommige toepassingen komt het voor, dat p niet veel boven p_i uitstijgt en wel doordat er door het in werking treden van een afblaasinrichting een ontlasting optreedt. We zullen nagaan of er voor zulke gevallen door approximatie uit de af-

geleide formules geen eenvoudiger te verkrijgen zijn.

Zo geeft (31) met $p = p_i + p^*$

$$\begin{aligned} \frac{dp}{dt} = \frac{dp^*}{dt} &= \frac{3S_u(p_e - p_i)}{a} \left(1 + \frac{p^*}{p_i} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \left\{ 1 + (-1 + \right. \\ &+ \left. \frac{p^*}{p_e - p_i} \right) \left(\frac{1}{1 + \frac{p^*}{p_i}} \right)^{\frac{2}{3}} \Big\}^{\frac{2}{3}} \\ &\sim \frac{3S_u(p_e - p_i)}{a} \left[\frac{1}{\gamma} \frac{1}{p_i} + \frac{1}{p_e - p_i} \right]^{\frac{2}{3}} [p^*]^{\frac{2}{3}} \end{aligned}$$

$$\frac{dp^*}{[p^*]^{\frac{2}{3}}} = \frac{3S_u(p_e - p_i)}{a} \left[\frac{1}{\gamma} \frac{1}{p_i} + \frac{1}{p_e - p_i} \right]^{\frac{2}{3}} dt$$

Integratie geeft:

$$\begin{aligned} \frac{p^*}{p_i} &= c t^3 \\ c &= \frac{S_u(p_e - p_i)^{\frac{3}{2}}}{p_i a^{\frac{3}{2}}} \left[\frac{1}{\gamma} \frac{1}{p_i} + \frac{1}{p_e - p_i} \right]^2 \end{aligned} \quad (41)$$

Nu is volgens (20) met $n = 1$ en $\sigma = \sigma_c$

$$\sigma_c^{\gamma-1} = \gamma [E_i - 1] \rightarrow p_e - p_i = \gamma p_i [E_i - 1]$$

Maar dan is:

$$c = \gamma \frac{S_u^{\frac{3}{2}} E_i^2 [E_i - 1]}{a^{\frac{3}{2}}} \quad (42)$$

Vergelijken we (42) met wat Ir. G. Snellink aan geeft in zijn artikel „Proeven aan explosies in met aardgas gevulde ruimten” zo zien we dat c behoudens een factor γ overeenkomt met wat hij vond. De asymptotische benadering heeft verder het voordeel, dat de numerieke integratie van (31) en (35) nu goed mogelijk is. Immers geven beide dezelfde aanloop, die weergegeven wordt door formule (41). Men kan nu gemakkelijk de tijd berekenen waarin vanuit p_i een waarde p_o bereikt wordt

$$t_o = \sqrt[3]{\frac{p_o - p_i}{c p_i}} \quad (43)$$

Hierna kan men de integratie van (31) en (35) laten verlopen vanaf $p = p_o$ en vermijdt men de moeilijkheid, dat $\frac{dp}{dt}(p = p_i) = 0$, hetgeen een numerieke integratie vanaf $p = p_i$ eigenlijk onmogelijk zou maken.

Overigens doet zich de vraag voor of de ontsteking op zich al niet reeds een waarde p_o doet ontstaan, die iets groter is dan p_i . Dit zal experimenteel en theoretisch nog onderzocht moeten worden.

Literatuur

- [1] R. Lewis and G. von Elbe: Combustion, Flames and Explosions of Gases. Academic Press Inc., New York and London, 1961.
- [2] V. S. Babkin and Yu. G. Kononenko: Equations for determining normal flame velocity in a constant spherical bomb. Fizika Goreniyo i Vzryva 1967 No. 2, pp. 268-275.
- [3] E. Bartholomé. 1949 Naturwissenschaften 36, 171-206
- [4] A. G. Gaydon, H. G. Wolfhard: Flames, their structure, radiation and temperature. Chapman & Hall Ltd., London, 1960.
- [5] Dr. H. J. Heinrich: Bemessung von Druckentlastungsöffnungen zum Schutz explosionsgefährdeter Anlagen in der chemischen Industrie. Zeitschrift für technische Chemie, Verfahrenstechnik und Apparatewesen, Nov. 1966, Heft 11 Seite 1125-1228.
-

De werking van breekmembranen en explosiekleppen bij gasexplosies

R. W. TRENSE

Technologisch Laboratorium TNO

The functioning of rupture membranes and explosion valves in gas explosions

Samenvatting

Wanneer men ruimten waarin gasexplosies kunnen optreden wil beveiligen met behulp van breekmembranen of kleppen, is de keuze van de toelaatbare druk van groot belang. Hier van hangt af of men van een asymptotische gasdruk opbouwformule kan uitgaan of dat men de uitgebreide formule van Flamm en Mache moet toepassen.

Bovendien heeft deze keuze tot gevolg, dat het begin van de uitstroming superkritisch dan wel subkritisch zal zijn.

Uit de analyse van het probleem blijkt, dat een asymptotische benadering een ontwerpformule kan opleveren. Het blijkt echter gewenst om na vaststelling van de maten van het ontlastingselement, het complete stelsel van differentiaalvergelijkingen te integreren met behulp van een voorwaartse integratie.

Summary

Compartments in which gas explosions may occur are safeguarded by means of rupture disks or explosion valves. The selection of the permissible pressure is of great importance in this connection because it determines whether an asymptotic gas-pressure-build-up formula or the more elaborate formula of Flamm and Mache is to be applied.

Moreover this selection results in a supercritical resp. subcritical beginning of the out-flow. From the analysis of the problem it appears that an asymptotic approach will yield a concept formula. It is advisable, however, to integrate the complete system of differential equations with the aid of a progressive integration after the assessment of the measurements of the safety device.

1. Voor de bepaling van de opening van breekwanden en explosiekleppen voor de ontlasting van de bewanding van een ruimte waarbinnen zich een gasexplosie voor kan doen bestaan er diverse formules van de meest primitieve tot de meest geavanceerde toe. Zo geeft Wehnelt in [1] de volgende vrij eenvoudige formule van Höppner aan die welhaast op een soort vuistregel lijkt.

Als F_{entl} het breekwand- dan wel klep-oppervlak voorstelt, V de volume van de ruimte, die moet worden beschermd zo is

$$\ddot{o}_s = \frac{F_{entl}}{V} = 0,3 \quad (1)$$

De formule geldt voor de meter als lengtemaat. Een wel geavanceerde methode treffen we aan bij Heinrich [2].

We zullen in de beschouwingen van dit artikel Heinrichs methodiek gebruiken. Evenwel zullen we ons niet beperken tot eindtoestanden maar trachten de differentiaalvergelijkingen, die het verschijnsel beschrijven te integreren.

We onderscheiden hierbij berekeningen voor een ontlasting, die reeds aan het eerste begin optreedt, waarvan de uitkomst toepasbaar is op de constructie van de breekwanden van ketelhuizen en flats (zie § 2 formules (6) en (10)) en berekeningen, waarbij de drukafbraak zich pas bij een grotere druk voordoet, en die enigszins anders verlopen naargelang deze druk kleiner of groter is dan de kritische druk (zie § 3 en § 4 formules (26) en (31)).

2. Voor de drukopbouw gaan we bij kleine druk-

ken uit van formule (41) van het artikel in dit nummer „De gasexplosie in een gesloten vat”

$$\frac{p^*}{p_i} = ct^3, \quad c = \frac{S_v^3 [p_0 - p_i]^3}{p_i a^3} \left(\frac{1}{\gamma p_i} + \frac{1}{p_0 - p_i} \right)^2 \quad (2)$$

Voor de uitstroming door een breekwandopening geldt voor een sub-kritische stroming

$$-\frac{dp}{dt} = \frac{\alpha F}{V} \gamma p_i \left(\frac{p}{p_i} \right)^{\frac{3(\gamma-1)}{2\gamma}} c_i \sqrt{\frac{2}{\gamma-1}} \sqrt{\left\{ 1 - \left(\frac{p}{p_i} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right\}} \quad (3)$$

$$c_i = \sqrt{\frac{\gamma p_i}{\rho_i}}$$

(α = contractiecoëfficiënt, F = oppervlakte breekwand, V = volume van de te beschermen ruimte).

Zij weer $p = p_i + p^*$
Benaderend is dan te schrijven

$$-\frac{dp^*}{dt} = \frac{\alpha F}{V} \sqrt{2\gamma} c_i p_i \left(\frac{p^*}{p_i} \right)^{1/2} \quad (4)$$

We kunnen nu voor deze kleine overdrukken nagaan wat de invloed van een plotseling ontstane opening is op de drukopbouw in de ruimte. Na het berekenen van de barstoverdruk p_0^* wordt de drukopbouw beheerst door de differentiaalvergelijking

$$\frac{dp^*}{dt} = k_1 (p^*)^{2/3} - k_2 (p^*)^{1/2}$$

$$k_1 = \frac{3 S_v (p_0 - p_i)}{a} \left[\frac{1}{\gamma} \frac{1}{p_i} + \frac{1}{p_0 - p_i} \right]^{2/3} \quad (5)$$

$$k_2 = \frac{\alpha F}{V} c_i \sqrt{2\gamma} p_i$$

$$a = \sqrt[3]{\frac{3}{4\pi}} V$$

Door de substitutie $p^* = \zeta^6$, $p_0^* = \zeta_0^6$ is (5) zonder meer te integreren, waarbij de uitkomst ontstaat

$$t = t_0 + \frac{6}{k_1} \left[\frac{1}{2} (\zeta^2 - \zeta_0^2) + \frac{k_2}{k_1} (\zeta - \zeta_0) + \left(\frac{k_2}{k_1} \right)^2 \ln \frac{1 - \frac{k_1}{k_2} \zeta}{1 - \frac{k_1}{k_2} \zeta_0} \right] \quad (6)$$

De formule (6) is voor $\zeta_0 < \frac{k_1}{k_2}$ in een reeks te ontwikkelen

$$t = t_0 + \frac{6}{k_1} \left[\frac{1}{3} \frac{k_1}{k_2} (\zeta_0^3 - \zeta^3) + \frac{1}{4} \left(\frac{k_1}{k_2} \right)^2 (\zeta_0^4 - \zeta^4) + \dots \right] \quad (7)$$

Uit deze reeks zien we, dat ζ kleiner moet zijn dan ζ_0 opdat $t > t_0$ zij, dat wil zeggen dat in dit geval de druk afneemt.

De waarde $\zeta = 0$ dit is $p^* = 0$ wordt hierbij bereikt ten tijde

$$t_e(6) = t_0 + \frac{6}{k_1} \left[-\frac{1}{2} \zeta_0^2 - \frac{k_2}{k_1} \zeta_0 - \left(\frac{k_2}{k_1} \right)^2 \ln \left[1 - \frac{k_1}{k_2} \zeta_0 \right] \right] \quad (8)$$

Is $\zeta_0 > \frac{k_2}{k_1}$ zo zien we uit (6), dat $t > t_0$ zo $\zeta > \zeta_0$. Tevens zien we dat t met ζ onbepaald aangroeit. De breekmembraan heeft in dit geval geen effect meer.

Als we $\zeta = \beta \frac{k_2}{k_1}$ stellen volgt uit (5)

$$\frac{dp^*}{dt} = k_1 \left(\frac{k_2}{k_1} \right)^4 \beta^3 (\beta - 1) \quad (9)$$

$\frac{dp^*}{dt} = 0$, voor $\beta = 0$ en voor $\beta = 1$

In het geval $\zeta_0 < \frac{k_2}{k_1}$ is $\beta = 0$ voor $t = t_0$ op dit tijdstip is dus tevens $\frac{dp^*}{dt} = 0$

$\beta = 1$ komt slechts voor zo $\zeta_0 = \frac{k_2}{k_1}$

In dit geval blijft verder $\zeta = \zeta_0 = \frac{k_2}{k_1} = \frac{dp^*}{dt} = 0$

Al met al kunnen we voor de beschouwde gevallen schetsmatig de grafieken voor het $p^*(t)$ verloop aangeven, zie fig. 1.

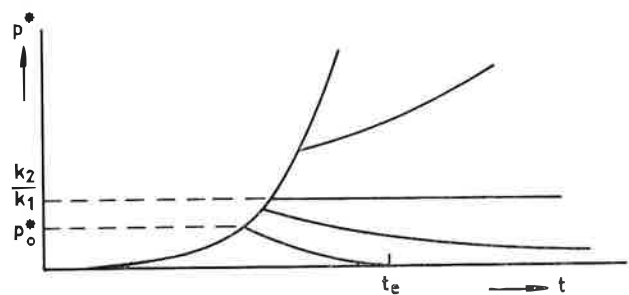


Fig. 1. Verloop van $p^*(t)$ voor een vat met afblaasopening.

Noemen we p^* de breekoverdruk zo blijkt een breekwand slechts effectief te zijn zo

$$(p^*)^{1/6} \leq \frac{k_2}{k_1} = \frac{\frac{\alpha F}{V} c_i \sqrt{2\gamma} p_i}{3 S_v \frac{[p_0 - p_i]}{\sqrt[3]{\frac{3}{4\pi}} V} \left[\frac{1}{\gamma} \frac{1}{p_i} + \frac{1}{p_0 - p_i} \right]^{2/3}} \quad (10)$$

Maar dan moet

$$\frac{F}{V^{2/3}} \geq \frac{3 \sqrt[3]{36\pi} (p_0^*)^{1/6} S_v [p_0 - p_i] \left[\frac{1}{\gamma} \frac{1}{p_i} + \frac{1}{p_0 - p_i} \right]^{2/3}}{\alpha c_i \sqrt{2\gamma} p_i}$$

Opm.: (10) is dimensiejuist, (1) nauwelijks.

3. In tegenstelling met wat kan worden aangenomen bij de constructie van breekmembranen voor ketelhuizen en flats, zullen we bij de beschouwing van explosiekleppen voor vuurhaarden gebruik moeten maken van de gewijzigde formule van Flame & Mache zoals afgeleid in „De gasexplosie in een gesloten vat” met name form. (35).

$$\frac{dp}{dt} = \frac{3 S_{vi}}{a} \left\{ 1 + \frac{p - p_0}{p_0 - p_i} \left(\frac{p_i}{p} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \right\}^{2/3} \frac{p}{p_i} (p_0 - p_i) \quad (11)$$

Voor de uitstroming door de klepopening moeten

we onderscheid maken tussen de sub-kritische toestand, waarop de form. (3) van toepassing is en de super-kritische, waarvoor geldt:

$$-\frac{dp}{dt} = \frac{\alpha F}{V} \gamma \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}} c_i p_i^{\frac{1-\gamma}{2}} \frac{p^{3\gamma-1}}{p^{2\gamma}} \quad (12)$$

In beide gevallen is aangenomen, dat de begin-drukken binnen en buiten de haard aan elkaar gelijk zijn en wel gelijk aan p_i .

Beginnen we met het sub-kritische geval. Na het inzetten van een explosie zal na een klein tijdsverloop de werkdruk p_w worden bereikt, waarbij de klep in werking komt. Analyse van p_w voert tot

$$p_w = p_i + p_w^* \quad (13)$$

$$p_w = p_{w1}^* + p_{w2}^* + p_{w3}^* \quad (14)$$

Hierbij is p_w^* de werkoverdruk, p_{w1}^* de initiële door de veer of veren per kleppoppervlakte uitgeoefende tegendruk, p_{w2}^* is de glijdende weerstand, p_{w3}^* de rustweerstand minus de glijdende, beide per oppervlakte-eenheid. Met l gelijk aan de slag van de veer of veren, en K gelijk aan de totale veerconstante gedeeld door het kleppoppervlak, is de statische einddruk p_u^* die optreedt als de klep versnellingsloos op de zitting terecht komt gelijk aan

$$p_u^* = p_{w1}^* + p_{w2}^* + Kl \quad (15)$$

We onderzoeken nu of er een kritische klepwerking optreden kan, waarbij de beweging zo langzaam gaat, dat de versnellingskrachten te verwaarlozen zijn en dat op het moment, dat de klep op zijn zitting is gedrukt en op slot raakt de druk net zijn maximale waarde bereikt

$$p_u^* = p_m^*$$

Als x de afstand is, die de klep afgelegd heeft, geldt bij de gemaakte veronderstelling van versnellingsvrijheid, dat

$$\left. \begin{aligned} p^* - p_{w1}^* - p_{w2}^* &= Kx \\ p_u^* - p_{w1}^* - p_{w2}^* &= Kl \end{aligned} \right\} \rightarrow \frac{x}{l} = \frac{F}{F_u} = \frac{p^* - p_{w1}^* - p_{w2}^*}{p_u^* - p_{w1}^* - p_{w2}^*} \quad (16)$$

$$F_u = \text{de grootste klepopening} = 2 \pi R l \quad (17)$$

We approximeren (16) als volgt

$$\frac{F}{F_u} = \frac{p^* - p_w^* + p_{w3}^*}{p_u^* - p_w^* + p_{w3}^*} \sim \frac{p^* - p_w^*}{p_u^* - p_w^*} \quad (18)$$

De drukopbouw in de vuurhaard benaderen we nu als volgt

$$\left(\frac{dp}{dt} \right)_u = \left(\frac{dp^*}{dt} \right)_u = \frac{3S_{vi}(p_e - p_i)}{\alpha} \left(\frac{p_u}{p_i} \right)^{\frac{2\gamma-1}{\gamma}} \left\{ 1 + \frac{p_u - p_e}{p_e - p_i} \left(\frac{p_i}{p_u} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \right\}^{\frac{2}{3}}$$

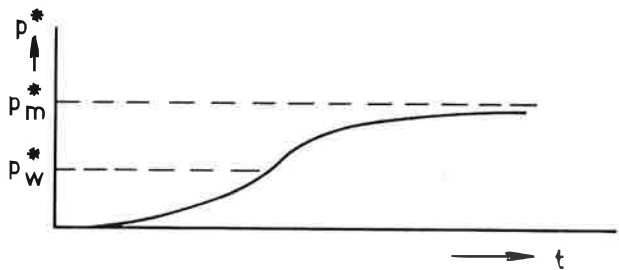


Fig. 2. $2p^*(t)$ verloop bij kritische werking van een explosieklep.

Approximatief schrijven we nu

$$\frac{dp^*}{dt} = \left(\frac{dp}{dt} \right)_u \frac{p^*}{p_u^*} = k_1 \cdot p^* \quad (19)$$

$$k_1 = \frac{3S_{vi}(p_e - p_i)}{\alpha p_u^*} \left(\frac{p_u}{p_i} \right)^{\frac{2\gamma-1}{\gamma}} \left\{ 1 + \frac{p_u - p_e}{p_e - p_i} \left(\frac{p_i}{p_u} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \right\}^{\frac{2}{3}}$$

De drukafbraak ten gevolge van de klepwerking is analoog hieraan als volgt te berekenen. Uit (3) volgt:

$$\left(\frac{dp^*}{dt} \right)_w / F = \frac{\alpha}{V} \gamma c_i \sqrt{\frac{2}{\gamma-1}} p_i \left(\frac{p_w}{p_i} \right)^{\frac{\gamma-1}{2}} \sqrt{1 - \left(\frac{p_i}{p_w} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}} = k_2 \quad (20)$$

De drukafbraakformule bouwen we nu met (18) op tot

$$-\frac{dp^*}{dp} = k_2 \frac{p^* - p_w^*}{p_u^* - p_w^*} F_u \frac{p^*}{p_w^*} = k_2 (p^{*2} - k_3 p^*) \quad (21)$$

waarbij

$$k_2 = \frac{k_3}{p_w^*} = \frac{\alpha F_u}{V(p_u^* - p_w^*) p_w^*} \gamma c_i \sqrt{\frac{2}{\gamma-1}} p_i \left(\frac{p_u}{p_i} \right)^{\frac{3}{2}} \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{p_i}{p_u} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}}} \quad (22)$$

Maar dan geldt na het inwerking treden van de klep

$$\frac{dp^*}{dt} = k_1 p^* + k_2 (p^*)^2 - k_3 p^* \quad (23)$$

of na integratie

$$t = t_w + \frac{1}{k_1 + k_2} \ln \frac{p^*}{1 - \frac{k_2}{k_1 + k_3} p^*} - \frac{1 - \frac{k_2}{k_1 + k_3} p_w^*}{p_w^*} \quad (24)$$

Uit (16) en (23) volgt

$$p_m^* = \frac{k_1 + k_2}{k_3} \quad (25)$$

Schematisch krijgen we het drukverloop als in fig. 2 aangegeven.

Uit (25) is een ontwerpformule te verkrijgen

$$k_1 + k_3 = k_2 p_m^*$$

Uit (21) volgt

$$k_1 + k_3 p_w^* = k_2 p_m^* \rightarrow k_1 = k_2 (p_m^* - p_w^*)$$

Uit (22) volgt

$$\frac{3S_{vi}(p_e - p_i)}{\alpha p_u^*} \left(\frac{p_u}{p_i} \right)^{\frac{2\gamma-1}{\gamma}} \left\{ 1 + \frac{p_u - p_e}{p_e - p_i} \left(\frac{p_i}{p_u} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \right\}^{\frac{2}{3}} =$$

$$= \alpha \frac{F_u}{V p_w^*} \gamma c_i \sqrt{\frac{2}{\gamma-1}} p_i \left(\frac{p_u}{p_i} \right)^{\frac{3}{2}} \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{p_i}{p_u} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}}} \quad (26)$$

$$p_u^* = p_m^* \quad \alpha = \left[\frac{3}{4\pi} V \right]^{1/3}$$

Voorbeeld

Zij: $S_{ui} = 0,35$ m/sec; $p_e = 7,2$ Atm (aardgas)
 $\gamma = 1,4$ $p_i = 330$ m/sec
 $p_w = 0,6$ atm $p_{kr} = \left(\frac{\gamma+1}{2} \right)^{\gamma/\gamma-1} p_i = 1,893$ atm
 $p_u^* = p_m^* = 0,8$ atm $V = 9,5$ m³
 $\alpha = 0,6$

Het resultaat bedraagt $F_u = 0,1595$ m². Bij een diameter van 50 cm geeft dit een slaglengte van 10 cm.

Nadat de klep verder is gedimensioneerd ten aanzien van de sterkte van de veer (veren) is het zinvol na te gaan hoe de beweging exact bepaald kan worden zonder verwaarlozing van de versnellingskrachten. Voor de klep geldt de D.V.

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + Cx = O(\dot{p}^* - p_{w1}^* - p_{w2}^*) \quad (27)$$

m = massa van klep + steel, C = veerconstante, O = kleppoppervlak. Nu is $F = 2\pi R x \rightarrow x = \frac{F}{2\pi R}$
 Substitutie hiervan in (27) geeft

$$\frac{dF}{dt} = G \quad (28)$$

$$\frac{dG}{dt} = -\frac{C}{m} F + \frac{2\pi RO}{m} (p^* - p_{w1}^* - p_{w2}^*) \quad (29)$$

waaraan we toevoegen:

$$\frac{dp^*}{dt} = \frac{3S_{ui}}{\alpha} (p_e - p_i) \left(1 + \frac{p^*}{p_i}\right)^{\frac{2\gamma-1}{\gamma}} \left\{ 1 + \left(1 + \frac{p^*}{p_e - p_i}\right) \left(\frac{1}{1 + \frac{p^*}{p_i}}\right)^{\frac{1}{\gamma}} \right\}^{2/3} - \frac{\alpha F}{V} p_i \left(1 + \frac{p^*}{p_i}\right)^{\frac{3}{2}} \frac{p_i^{-1}}{p_i^{\gamma-1}} \sqrt{\frac{2}{\gamma-1}} c_i \sqrt{\left\{ 1 - \left(\frac{1}{1 + \frac{p^*}{p_i}}\right)^{\frac{(\gamma-1)\gamma}{\gamma}} \right\}} \quad (30)$$

Het stelsel (28), (29), (30) is op te lossen met een voorwaartse integratie, b.v. met de methode van Runge-Kutta, met de beginwaarden $t = t_w$, $p^* = p_w^*$, $F = 0$. De berekening gaat zodra $F = F_u$ is bereikt over in een enkele D.V., die men uit (30) verkrijgt met $F = F_u$ en welke is op te lossen met een mechanische kwadratuur.

4. Bekijken we hierbij het geval, dat zowel p_w^* als $p_u^* = p_m^*$ boven de kritische druk van 0,893 atm zijn gelegen. In plaats van de ontwerpformule (26) is nu in verband met de superkritische uitstroming, waarvoor formule (12) geldt te stellen

$$\frac{3S_{ui}(p_e - p_i)}{\alpha p_u^*} \left(\frac{p_u^*}{p_i}\right)^{\frac{2\gamma-1}{\gamma}} \left\{ 1 + \frac{p_u - p_e}{p_e - p_i} \left(\frac{p_i}{p_u^*}\right)^{\frac{1}{\gamma}} \right\}^{2/3} = \frac{\alpha F_u}{V p_w^*} p_i \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}} c_i p_i^{\frac{\gamma-1}{2\gamma}} \left(p_w^*\right)^{\frac{3\gamma-1}{2\gamma}} \quad (31)$$

$$p_u^* = p_m^* \quad \alpha = \left[\frac{3}{4\pi} V \right]^{1/3}$$

Voorbeeld. Bekijken we nogmaals de vuurhaard van het vorige voorbeeld, zodat weer

$$S_{ui} = 0,35$$
 m/sec $p_e = 7,2$ atm (aardgas)
 $\gamma = 1,4$ $c_i = 330$ m/sec
 $\alpha = 0,6$ $V = 9,5$ m³

en zij nu $p_w^* = 1$ atm $> 0,893$ atm
 $p_u^* = p_m^* = 1,5$ atm $> 0,893$ atm

Het resultaat bedraagt $F_u = 0,22$ m². Bij een diameter van 60 cm geeft dit een slaglengte van 12 cm.

Nadat de klep op sterkte en veerkracht verder is gedimensioneerd is het weer aan te bevelen om met behulp van een numerieke rekenwijze de beweging exact te bepalen.

Hiertoe zal het stelsel differentiaalvergelijkingen (28), (29), (30) eveneens in verband met (12) moeten worden gewijzigd tot:

$$\frac{dp^*}{dt} = \frac{3S_{ui}}{\alpha} (p_e - p_i) \left(1 + \frac{p^*}{p_i}\right)^{\frac{2\gamma-1}{\gamma}} \left\{ 1 + \left(1 + \frac{p^*}{p_e - p_i}\right) \left(\frac{1}{1 + \frac{p^*}{p_i}}\right)^{\frac{1}{\gamma}} \right\}^{2/3} - \frac{\alpha F}{V} \gamma \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}} c_i p_i^{\frac{\gamma-1}{2\gamma}} (p_i + p_w^*)^{\frac{3\gamma-1}{2\gamma}} \quad (32)$$

$$\frac{dF}{dt} = G \quad (33)$$

$$\frac{dG}{dt} = -\frac{C}{m} F + \frac{2\pi RO}{m} (p^* - p_{w1}^* - p_{w2}^*) \quad (34)$$

op te lossen met b.v. de methode van Runge Kutta vanuit de beginwaarden.

Voor $t = t_w$ $p^* = p_w^*$ $F = 0$

De berekening loopt totdat $F = F_u$ bereikt is. Hierna gaat het systeem over in

$$\frac{dp^*}{dt} = \frac{3S_{ui}}{\alpha} (p_e - p_i) \left(1 + \frac{p^*}{p_i}\right)^{\frac{2\gamma-1}{\gamma}} \left\{ 1 + \left(1 + \frac{p^*}{p_e - p_i}\right) \left(\frac{1}{1 + \frac{p^*}{p_i}}\right)^{\frac{1}{\gamma}} \right\}^{2/3} - \frac{\alpha F_u}{V} \gamma \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}} c_i p_i^{\frac{\gamma-1}{2\gamma}} (p_i + p^*)^{\frac{3\gamma-1}{2\gamma}} \quad (35)$$

Op te lossen met een mechanische kwadratuur en met beginwaarden, die overeenstemmen met de eindwaarden van de oplossing van het vorige stelsel van differentiaalvergelijkingen.

Zodra p^* gedaald is tot 0,893 atm gaat de vergelijking over in (30) met $F = F_u$ welke geïntegreerd moet worden vanuit de eindwaarden van de oplossing van (35).

(Vervolg op blz. 82)

Aardgasexplosies in hoge woongebouwen

M. DRAGOSAVIC

Instituut TNO voor Bouwmaterialen en Bouwconstructies

Natural-gas explosions in multi-storied dwelling-houses

Samenvatting

Aardgasexplosies (of andere soortgelijke belastingen) die in een hoog woongebouw kunnen optreden stellen de bouwconstructeurs voor twee problemen:

- a) op welke belasting moeten de dragende wanden en vloeren worden berekend, opdat bij een explosie een dragend element niet bezwijkt;
- b) hoe zou de draagconstructie van een hoog woongebouw als geheel zo kunnen worden ontworpen dat wanneer door een plaatselijke explosie, een dragend element toch bezwijkt dit bezwijken slechts een beperkte schade tot gevolg heeft en niet een aanleiding geeft tot instorting van vele woningen of zelfs van het gehele woongebouw.

In een desbetreffend onderzoek worden beide problemen bestudeerd. In dit artikel worden echter hoofdzakelijk het eerstgenoemde probleem behandeld.

De uitgevoerde proeven met aardgasexplosies in een proefobject hebben resultaten opgeleverd over de optredende drukken. Het verdere onderzoek is nog op gang maar het laat zich reeds aanzien dat met betrekkelijk lichte eisen t.a.v. de sterkte van de wand-vloerverbindingen zal kunnen worden volstaan om de kans van instorting door explosies zeer te verminderen.

Inleiding

De belastingen, berekeningsmethoden en specifieke eisen betreffende het ontwerpen en berekenen van bouwwerken zijn voor de verschillende constructiematerialen min of meer uitgebreid in voorschriften en richtlijnen geregeld. Voor hoge woongebouwen waarvan de draagconstructie veelal in beton wordt uitgevoerd heeft men in dit verband te maken met de Gewapend Beton Voorschriften

Summary

Natural-gas explosions, or other similar loads that may arise in a high, e.g. multi-storied, dwelling-house confront building designers and constructors with two problems:

- (a) What is the load that supporting walls and floors should be calculated to withstand, in order to avoid failure of any supporting element in the case of an explosion?
- (b) With reference to the overall requirements for the construction of such a high building, how should its load-carrying capacity be designed in order that — when some local explosion destroys a supporting element — such failure generates only limited damage and does not lead to collapse of several dwellings, nor in the extreme case, that of the entire building.

These two problems are being studied, through experiments simulating explosion conditions, by a team of experts in the Netherlands. This article deals with problem (a) chiefly. Experiments performed at a trial set-up, in which natural-gas explosions were effected, have yielded results about pressures then occurring.

Although further investigations are on stream, it need not be premature to expect that probably fairly „mild“ requirements in terms of strength of wall-to-floor connections may suffice to reduce drastically the hazard of collapse by explosions.

(GBV 1962) en de Voorlopige richtlijnen voor constructieve wanden van in het werk gestort ongewapend beton en/of de Richtlijnen voor Prefab beton (RPB 1967), terwijl men de soort en de grootte van de belastingen aanhoudt volgens de Technische Grondslagen voor Bouwvoorschriften (TGB 1955). Alle betonvoorschriften en ook de TGB 1955 worden inmiddels herzien.

(Vervolg van blz. 81)

Literatuur

- [1] H. H. Freitag: Handbuch der Raumexplosionen.
- [2] Dr. H. J. Heinrich: Bemessung von Druckentlastungsöffnungen zum Schutz explosionsgefährdeter Anlagen der chemischen Industrie. Chemie-Ing-Techn. 38. Jahrg. 1966 Heft 11.
- [3] Dr. Ing. W. Straumann: Dimensionierung von Druckentlastungs-Öffnungen gegen Explosionen in Chemischen Apparaten. Chemie-Ing-Techn. 37. Jahrg. 1965 Heft 3.

Een konstruktie, of een element ervan, kan voortijdig bezwijken om twee redenen: omdat de sterkte ervan geringer is dan men in de berekening had aangenomen, of omdat de belasting anders en/of groter blijkt dan waarop men had gerekend.

Bij het hier behandelde probleem van aardgas-explosies in hoge woongebouwen is sprake van andere en mogelijk grotere belasting dan waarop men had gerekend.

Het berekenen van bouwkonstrukties op het eigen gewicht, een voorgeschreven nuttige belasting, windbelasting en sneeuwbelasting heeft bouwwerken opgeleverd die in hun levensduur voldoende veilig bleken te zijn tegen *die* belastingen.

Weliswaar waren er altijd nog andere soorten belastingen die *wel* eens tot het bezwijken van een bouwwerk of een deel ervan aanleiding gaven, bijvoorbeeld brand, explosie, windhoos e.a. Deze zijn echter, vergeleken met de eerder genoemde belastingen, vrij zeldzaam en plaatselijk. Voegt men daaraan toe dat de bouwwerken in het verleden kleiner waren, dan was bovendien de schade t.g.v. die bijzondere belastingen klein. Die bijzondere belastingen en de daardoor geleden schade rekende men dan ook terecht tot „aanvaardbare” ongelukken.

De snelle schaalvergroting die de moderne samenleving op alle gebieden meemaakt heeft o.a. ook de verhoudingen in belangrijkheid van verschillende belastingen van bouwkonstrukties gewijzigd, waarbij nu vooral aan brandgevaar, maar ook aan explosies en andere bijzondere belastingen meer aandacht moet worden besteed.

Het concept van de nieuwe TGB voorziet al in de volgende bepaling:

„In bepaalde gevallen moet rekening worden gehouden met mogelijke plaatselijke beschadigingen aan het gebouw ten gevolge van brand, explosies, aanrijdingen, trillingen enz. Hierbij moet de dragende konstruktie zodanig worden gekonstrueerd dat deze plaatselijke beschadigingen geen katastrofale gevolgen kunnen hebben”.

Wat de gasexplosies in woningen betreft is het uit de schaarse gegevens uit de praktijk niet af te leiden of de kans op het optreden van een gasexplosie en/of de omvang ervan is toe- of afgenomen. Wel is de kans dat een gasexplosie ergens in een flatgebouw van 100 woningen voorkomt groter dan in een huisje van één woning. Dit op zich betekent nog geen vergroting van (de kans op) schade, indien deze ook in een flatgebouw beperkt blijft tot die ene woning waar de explosie is opgetreden. Wel neemt zowel de kans op schade als de grootte daarvan toe wanneer een explosie in één van de woningen in een flatgebouw aanleiding kan geven tot het instorten van meerdere woningen — of in extreem geval het gehele woongebouw. (Zie meer over de verschillende aspecten van dit probleem in de artikelen van Ir. F. K. Ligtenberg in



Fig. 1. Het gebouw van Ronan Point na instorting. De gasexplosie heeft plaatsgevonden op de 18e verdieping.

TNO-Nieuws nr. 3 (1969) en nr. 3 (1971).

Van het feit dat een vroeger onbelangrijke belasting als een gasexplosie in een woning nu wel een belangrijke belasting kan zijn (niet op zich, maar door spectaculaire instorting in een kettingreactie) is men zich vooral bewust geworden na de instorting van een flatgebouw op Ronan Point in Londen (zie fig. 1).

Het rapport over dit geval vermeldt de mogelijkheid dat bij de (stads)gasexplosie die op de 18^e verdieping heeft plaatsgevonden luchtdrukken zijn opgetreden tot 0,35 ato, dat is 3,5 tonf/m² en plaatselijk zelfs veel meer.

Verrast door de gevolgen van deze explosie, stelden de betreffende instanties in Engeland als eis: de wand-vloerverbindingen in soortgelijke ge-

bouwen te versterken en in het vervolg de nieuwe te ontwerpen, rekening houdend met een explosiebelasting van 3,5 tonf/m².

Ook in Nederland schrok men, zowel van wat met het flatgebouw op Ronan Point is gebeurd, als van de genoemde maatregel van 3,5 tonf/m². Bij ons staan immers ook woongebouwen die in vele opzichten overeenkomen met die op Ronan Point in Londen en ze worden steeds meer gebouwd. Ook wij verbruiken gas in onze keukens, en het konsekwent in rekening brengen van een alzijdige explosiebelasting van 3,5 tonf/m² op wanden en vloeren zou diep grijpen in onze portemonnees en bouwmethoden. Er waren echter ook verschillpunten tussen de situatie in Londen en in ons land.

Om deze reden had de KOMO-kommissie voor het opstellen van richtlijnen voor de beoordeling van bouwsystemen behoefte aan een advies over te nemen maatregelen. In dit kader zijn ook explosieproeven uitgevoerd.

De „Stichting Bouwresearch” is bereid gevonden het onderzoek te financieren en vertrouwde dit werk toe aan haar commissie B 16 die al soortgelijke problemen bestudeerde. De uitvoering van het onderzoek werd opgedragen aan het Instituut TNO voor Bouwmaterialen en Bouwconstructies (IBBC), waar deze en aanverwante problemen o.a. in verband met de herziening van de voorschriften al enige jaren sterk de aandacht hebben.

Proeven

De belangrijkste redenen tot het nemen van proeven met aardgasexplosies onder met de praktijk overeenkomende omstandigheden waren:

- dat alleen enige literatuur te vinden was over fundamentele proeven in zeer kleine ruimten (minder dan 1 m³);
- dat het aardgas dat in ons land nu algemeen wordt toegepast een andere samenstelling en daardoor een lagere verbrandingssnelheid heeft dan het stadsgas dat op Ronan Point explodeerde. Bij aardgasexplosies hoopte men daarom op lagere explosiedrukken;
- dat behalve de schaarse gegevens van Ronan Point er zeer weinig bekend is over de luchtdrukken die bij gasexplosies in woningen kunnen optreden;
- dat men over de elders opgetreden explosies niet meer kan achterhalen dan de krantenberichten vermelden, en deze besteden aan de technische aspecten juist de minste aandacht;
- dat over het gedrag van de bouwconstructies bij een (kortstondige) explosiebelasting nauwelijks iets bekend is.

Dit gebrek aan gegevens, en de vele variabele factoren die van invloed zijn op de grootte van de explosiedruk, hebben de keuze van een representatieve proef zeer bemoeilijkt; dat is de proef

waarbij de omstandigheden zo ongunstig worden gekozen, dat de kans dat in een gebouw een nog gevaarlijker toestand ontstaat, zeer klein is.

Roeiend met de riemen die wij hadden, dat is het weinige wat over de tot nu toe voorgekomen explosies in gebouwen bekend was, en de basiskennis over de explosie-eigenschappen van gassen, kwamen wij tot proeven waarbij combinaties van ongunstige omstandigheden zijn toegepast, die naar ons oordeel in de praktijk hoogst zelden gelijktijdig aanwezig kunnen zijn; proeven dus met explosies van een intensiteit, die in werkelijkheid met aardgas in woningen zelden kan worden bereikt. De daarbij behorende hoge belasting moet echter wel als karakteristieke belasting in rekening worden gebracht.

Een proefobject werd gebouwd, voorstellende een keuken en een kamer in een flatgebouw — zie de plattegrond in fig. 2. De keuken heeft een oppervlakte van 2 × 4 meter, de kamer 3,50 × 4 meter, daartussen bevindt zich een deuropening. Beide vertrekken zijn zoals gebruikelijk 2,60 meter hoog. De open zijde, met een stippellijn aangegeven, stelt het gevelvlak voor waarin willekeurig beglazingen en gevelconstructies kunnen worden gemonteerd. De zijwand van de kamer is eveneens opengelaten om eventueel verschillende in de praktijk voorkomende draagwanden te kunnen aanbrengen. Bij de proeven (in de kamer) bevond zich hier steeds een éénsteens baksteenmuur.

De overige wanden en de vloeren zijn van 40 cm dik zwaar gewapend beton, goed voor een statische belasting tot ongeveer 40 tonf/m².

In figuur 3 ziet men het proefobject na één van de 26 proeven waarbij de explosie alleen in de keuken werd teweeggebracht. De deuropening naar de kamer was daartoe met een zware stalen deur afgesloten. Bij deze proeven was de bedoeling dat alleen het glas kapot zou gaan, waarbij de oppervlakte van het glas 1, 2 of 3 m² bedroeg en de dikte van het glas 3, 5 of 8 mm.

Drie proeven zijn genomen met een gasexplosie alleen in de kamer, en een normale praktijkpui in de gevel met een borstwering van baksteen (zie figuur 4). In twee van deze gevallen bevond zich in de kamer nog een tussenwandje van 9 cm dikke gasbetonblokken, waardoor alleen het gedeelte tussen de eerder genoemde baksteenwand en dat tussenwandje met het explosief gas/luchtmengsel was gevuld. De foto toont de toestand vóór de explosie. In figuur 5 ziet men het proefobject aangekleed voor de laatste proef waarbij zich het ideale gas/luchtmengsel zowel in de kamer als in de keuken bevond. In de gevel werd een normale praktijkpui aangebracht met een baksteenborstwering en overal 8 mm dik glas. Tussen de keuken en de kamer werd een normale deur geplaatst. Het gas werd in het midden van de keuken aangestoken. Onder deze extreme praktijkomstandigheden zou de dra-

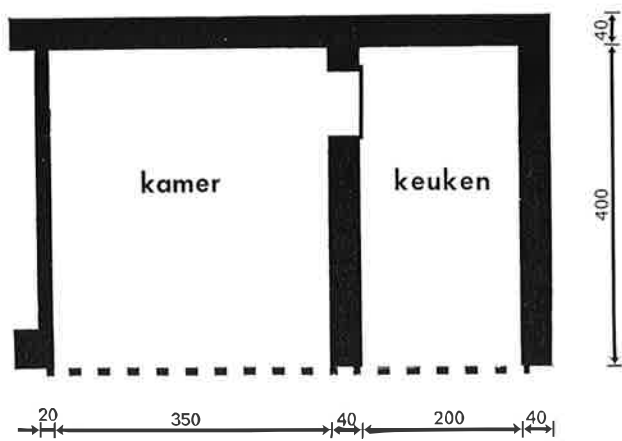


Fig. 2. Plattegrond van het proefproject.

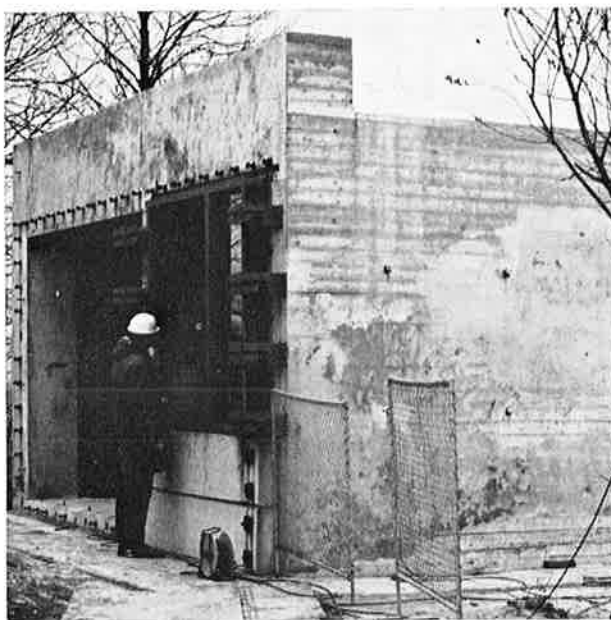


Fig. 3. Het proefobjekt na een aardgasexplosie in de „keuken”.

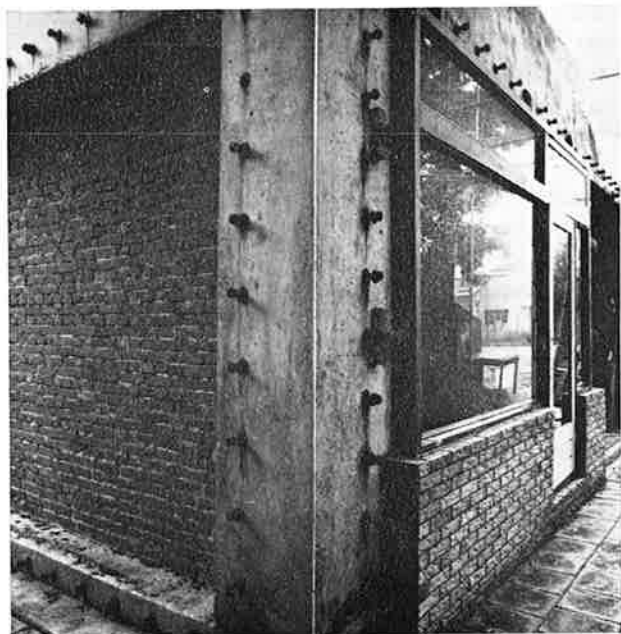


Fig. 4. Een praktische gevelconstructie gemonteerd voor een proef in de „kamer”.



Fig. 5. Het explosieve gasluchtmengsel bevindt zich in beide vertrekken; de ontsteking is geplaatst midden in de keuken.

gende baksteenmuur (in figuur 4 links zichtbaar) het zwaarst worden belast.

De grootte van de explosiedruk, en dus van de belasting, hangt af van zowel de vorm en de aard van de constructie als van het daarin aanwezige gas/luchtmengsel. Dit laatste omvat:

- het gaspercentage in de ruimte;
- wel of geen goede menging met de lucht;
- de plaats van de ontsteking.

Bij de proeven is de ongunstige combinatie van de-

ze factoren toegepast die de meest intensieve explosie geeft en dus de hoogste explosiedruk kan veroorzaken. Dat is ongeveer 10% aardgas in de lucht, goed gemengd met de lucht zodat dit percentage overal in het vertrek aanwezig was, en in het midden van de ruimte (bij onze proeven elektrisch) ontstoken.

Alleen bij vier proeven is een gas/luchtverhouding van meer of minder dan 10% toegepast om na te gaan hoeveel lager de explosiedruk daarbij kan zijn.

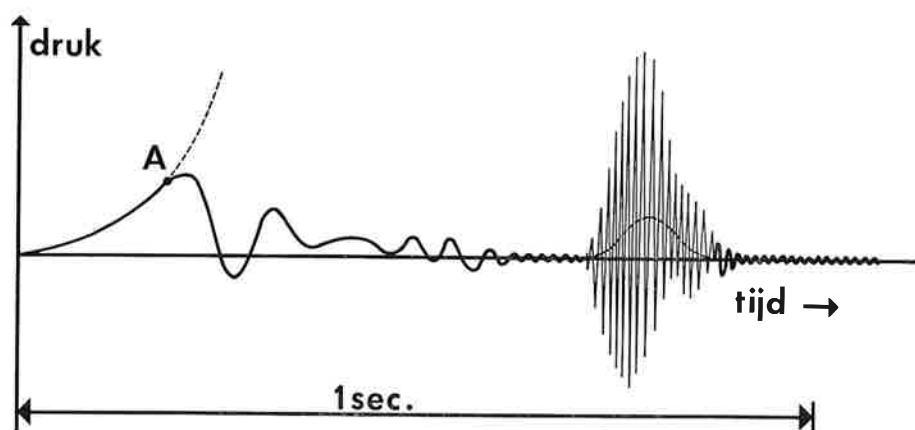


Fig. 6. Voorbeeld van een druk-tijd diagram (enigszins geschematiseerd weergegeven) zoals bij de meeste proeven is geregistreerd.

Wat het percentage betreft is het goed te weten dat wanneer zich ergens in het vertrek minder dan 6% of meer dan 15% aardgas in de lucht bevindt, dit mengsel niet kan worden aangestoken en dus niet kan exploderen.

Een gasexplosie is niets anders dan een snelle verbranding van een gas/luchtmengsel die ook bij het aansteken van een gaspitt, maar dan in zeer beperkte omvang plaatsvindt.

De verbrandingssnelheid is het grootst en de explosie optimaal wanneer zich overall in een vertrek ongeveer 10% aardgas bevindt. In dat ideale geval vindt een plotselinge temperatuursverhoging plaats waarbij het verbrande gas/luchtmengsel acht maal de oorspronkelijke inhoud wil innemen. Wordt deze expansie geheel verhinderd doordat de explosie wordt teweeggebracht in een volkomen gesloten ruimte met sterke wanden, die niet open breken, dan ontstaat in die ruimte een overdruk van 7 ato, dit is een druk van 70.000 kgf/m² op de wanden.

Laat men echter reeds bij een zeer lage overdruk een deel van de omsluiting, in ons geval b.v. de beglazing of eventueel ook de hele niet dragende pui, bezwijken zodat er een opening ontstaat, waardoor de expansie naar buiten kan plaatsvinden, dan blijft de overdruk in het vertrek, en dus ook de belasting op de dragende wanden ver beneden 70 ton/m². Dit zwakste deel van de omsluiting, dat bij explosie mag en bij voorkeur moet bezwijken noemen wij voortaan *breekwand*.

Maar *hoe* beperkt blijft in dat geval de druk? Loopt de druk na het bezwijken van de breekwand verder helemaal niet op, of wordt de druk toch nog twee of meer keer zo hoog?

Een vraag overigens waarin, in verband met het dynamische karakter van de belasting, niet alleen de maximale druk (= drukamplitude) maar ook de frequentie en het aantal drukwisselingen behoren te worden betrokken.

Na een aantal aanloopprouwen, waarbij vooral de meetapparatuur, de gastoevoer en de vereiste men-

ging van het gas met de lucht werden getest, zijn 30 explosieproeven uitgevoerd onder eerder genoemde (variërende) omstandigheden. De optredende explosiedrukken werden steeds gemeten op 10 verschillende plaatsen langs de wanden en het plafond. (Een beschrijving van de benodigde meetinstrumenten e.d. wordt in het kader van dit artikel niet gegeven omdat dit op zich al een omvangrijk verhaal vereist.)

Van de 30 proeven zijn $10 \times 30 = 300$ druk-tijd diagrammen verkregen, waaruit de nodige informatie in het rapport dat de „Stichting Bouwresearch” in samenwerking met het IBBC-TNO zal uitbrengen, zal worden behandeld, en vergeleken met de sterkte van de in de praktijk in hoge woongebouwen gebruikelijke dragende wanden en vloeren.

Hier wordt slechts het globale beeld van de proefresultaten aangegeven dat bij de meeste proeven is verkregen, en voorts gewezen op de problematiek die een vergelijking van de (dynamische) explosiebelasting met de (bekende statische) sterkte van een konstruktiedeel meebrengt.

Explosiedruk en de sterkte van wanden en vloeren

Het algemene beeld van de druk-tijd diagrammen die bij de proeven met aardgasexplosies zijn gevonden is in figuur 6 aangegeven.

De horizontale as geeft de tijd aan na de ontsteking van het gas (luchtmengsel); de tijd van 1 seconde is aangegeven. Vertikaal is de opgetreden druk uitgezet (de drukschaal op de verticale as is echter opzettelijk weggelaten, omdat die voor verschillende proeven verschillend zou moeten zijn, en afhankelijk is van de druk waarbij de breekwand bezwijkt).

Het nulpunt van dit diagram geeft het ogenblik van de ontsteking aan. De gestippelde lijn links wijst op het verloop dat men kan verwachten indien de keuken hermetisch was afgesloten met zeer sterke wanden, het verloop dus naar een druk tot 70 tonf/m².

Punt A geeft aan het tijdstip en de druk waarbij de breekwand, een glasruit op de hele pui, bezwijkt. Daarna neemt de druk nauwelijks meer toe, even later ontstaat er zelfs een onderdruk.

Na ongeveer een halve seconde lijkt de explosie afgelopen, maar het nabranden van het overgebleven gas gaat nog steeds door en geeft aanleiding tot het ontstaan van een serie hoogfrequente drukwisselingen, waarvan de drukamplituden aanzienlijk boven de sterkte van de breekwand (tot viermaal zo hoog als A) uitlopen. Dit laatste was een verrassing en kan worden verklaard als resonantie van de in de keuken tussen de twee zijwanden en tussen de vloer en het plafond opgesloten lucht-massa, tengevolge van een turbulente verbranding van het nog overgebleven gas.

Deze konklusie trokken wij uit het feit dat de frequenties van deze snelle drukwisselingen van ongeveer 160 en 200 Hz juist overeenkomen met de eigen frequentie van de lucht tussen het plafond en de vloer, resp. tussen de twee zijwanden. Voor het gemak noemen wij dit een „orgelpijpeffekt”.

De eerste drukgolf neemt ongeveer 0,3 seconde in beslag. Om dit uit te drukken in het begrip frequentie denken wij deze drukgolf vervangen door een halve sinus. Een hele sinuslijn zou 0,4 à 0,6 sek. in beslag nemen, en als deze sinusvormige drukwisseling aanhield, dan zouden ongeveer 2 golven met de amplitude A in één seconde optreden. We kunnen dus zeggen, dat de eerste drukgolf een frequentie heeft van ongeveer 2 Hz.

Het orgelpijpeffekt bereikt 160 en 200 Hz, dat is ongeveer 100 maal zo veel als bij de eerste drukgolf. Bovendien is de eerste drukgolf éénmalig, terwijl bij het orgelpijpeffekt ongeveer 50 drukwisselingen optreden met eerst aangroeiende en daarna afnemende amplitude.

Een belangrijke ondervinding was dat de top A van de eerste drukgolf overal in de ruimte gelijktijdig optreedt en overal even hoog is. Ditzelfde geldt ook voor de gestippeld aangegeven gemiddelde drukverhoging tijdens het orgelpijpeffekt, maar geldt niet voor de drukpieken boven en onder de gestippelde lijn. Nog sterker: deze pieken zijn zelfs niet gelijktijdig geregistreerd op verschillende meetplaatsen op éénzelfde wand. Deze fase-verschillen hebben tot gevolg dat de gemiddelde belasting op één wand lager is dan de hier aangegeven maximum-amplituden geven.

De globale konklusie: bij een aardgasexplosie in een woning treedt eerst één drukgolf op met de drukamplitude ongeveer gelijk aan de sterkte van de breekwand (frequentie in de orde van 2 Hz). Daarna ongeveer 50 drukwisselingen met aangroeiende en weer aflopende amplituden, waarvan de grootste tot 4 maal zo hoog is als de druk waarbij de breekwand bezweek (frequentie in de orde van 200 Hz).

De explosiedruk (= amplitude) is dus afhankelijk

van de sterkte van de breekwand; de frequenties worden bepaald door de vorm en de grootte van het vertrek.

Stel nu dat de sterkte van de beglazing of de hele gevelwand in de praktijk bezwijkt bij een (kortstondige explosie)belasting van maximum 1000 kgf/m². Dit is een zeer globale aanname, die blijkens de uitgevoerde explosieproeven veilig lijkt. Dit zou betekenen dat de draagwanden en vloeren belast worden eerst tot ongeveer 1000 kgf/m² en even later plaatselijk met drukpieken tot 4000 kgf/m².

Hoewel beide genoemde waarden een reële belasting loodrecht op een wand en vloer zijn, mogen zij uiteraard niet worden beschouwd als een statische belasting die de constructie langdurig moet kunnen dragen. Daarmee rijst ook het volgende probleem.

Bij bouwconstructies wordt onder „sterkte” verstaan de belasting die de constructie langdurig kan weerstaan. Als wij nu dit als uitgangspunt handhaven, dan moet de explosiebelasting eerst vertaald worden naar een „equivalente statische belasting” wil men de optredende belasting en de sterkte van een constructie (deel) met elkaar kunnen vergelijken.

De equivalente statische belasting is echter afhankelijk van de drukamplitude(n) en frequentie(s) van de belasting zelf, maar ook zeer afhankelijk van de eigen frequentie en demping van de constructie die wordt belast.

Over de dynamische eigenschappen en het dynamisch gedrag van wanden en vloeren en ook van de verbindingen is zeer weinig bekend. Ook dit aspect van het explosieprobleem wordt nog bestudeerd.

Er zijn echter reeds enige aanwijzingen dat de genoemde drukamplituden (vooral die behorend bij het orgelpijpeffekt) in de meeste praktische gevallen tot een equivalente statische belasting zullen kunnen worden gereduceerd die geen (of in ieder geval geen ingrijpende) economische gevolgen behoeven te hebben voor de hoogbouw.

Een reden tot deze verwachting is ook dat de 20 cm dikke baksteenmuur bij onze proeven vier optimale gasexplosies goed heeft kunnen weerstaan, zonder ook maar één scheur te vertonen.

Een dynamische berekening van de bouwconstructies komt weinig voor, in het geval van een explosiebelasting is dat noodzakelijk. Er is literatuur over dergelijke berekeningen, bovendien is er reeds een computerprogramma beschikbaar waarmee de frequentieanalyse van een ingewikkeld druk-tijd diagram vrij gemakkelijk kan worden uitgewerkt en de werkelijk optredende drukwisselingen worden omgezet in een equivalente statische belasting. Bij het IBBC wordt in voorkomende gevallen een dergelijke berekening toegepast.

De CUR-kommissie „Dynamische problemen in de bouw” heeft een rapport in voorbereiding dat de constructeur op dit gebied wat meer wegwijs zal maken.

Het grootste knelpunt bij de dynamische berekening is echter het invoeren van de juiste (dynamische) eigenschappen van de bouwkonstrukties omdat die maar matig zijn onderzocht.

Slotwoord

Er zijn uit het hiervoor staande geen definitieve konklusies te trekken, omdat het onderzoek nog aan de gang is en de vraag: op welke (equivalente statische) explosiebelasting men de wanden en vloeren in hoge woongebouwen moet berekenen, niet kan worden beantwoord alleen aan de hand van de reeds uitgevoerde metingen bij de gasexplosieproeven, maar ook de dynamische eigenschappen van de konstruktie zelf in de beschouwing moeten worden betrokken.

Een dynamische berekening van de konstruktie is in de bouwwereld weinig gebruikelijk. Daarom zal worden getracht in het eindrapport van dit onderzoek de belasting door aardgasexplosies in woningen uit te drukken in een equivalente statische belasting.

Vermoedelijk zal het eindresultaat tot gevolg hebben dat de verbindingen tussen de dragende wan-

den en vloeren aan een aanvullende doch geen economisch ingrijpende eis zullen moeten voldoen, een konstruktieve maatregel waartoe men inmiddels in de nieuwbouw is overgegaan.

Geen gebouw is voor honderd procent bestand tegen alle denkbare (bijzondere) belastingen. Wel kan men door het voorschrijven van een aanvullende eis in verband met explosie bereiken dat de kans dat bij een explosie of een andere even grote belasting een element van de draagkonstruktie uitvalt belangrijk vermindert.

Dit probleem en het voorkomen van een instorting door kettingreactie hebben zo vele aspecten dat het niet doenlijk is in een artikel als dit op al die aspecten in te gaan.

Het rapport dat over dit onderzoek wordt opgesteld, de andere rapporten van de kommissie B 16 van de „Stichting Bouwresearch” die aanverwante problemen zullen behandelen en de groeiende belangstelling voor statische en economische berekeningen van de moderne steeds grotere bouwwerken zijn allemaal bijdragen tot verstandiger (d.i. veilig en economisch) konstrueren.

De proeven met de aardgasexplosies op zich hebben het inzicht in deze belastingvorm zeer verruimd, terwijl wij in het kader van dat onderzoek ook nog over de dynamische eigenschappen van de bouwelementen een en ander hopen te achterhalen.

Enige aspecten van detonatiegolfmodellen

Some aspects of detonation wave models

G. BROEKSTRA

Technologisch Laboratorium TNO

Samenvatting

De detonatiegolf in gassen, vaste stoffen en vloeistoffen is in de loop der tijden door een aantal modellen beschreven. Een kort overzicht van de ontwikkeling van deze modellen zal in het volgende gegeven worden. Er wordt begonnen met het C-J- en ZND-model. Moderne opvattingen over de structuur van een detonatiegolf zullen daarna kort aangegeven worden.

Summary

The detonation wave in gases, solids and liquids has been described by means of a number of models in the course of years. In the present paper a short survey of the development of these models is given, beginning with the C-J and the ZND model. Then the modern views on the structure of a detonation wave are shortly indicated.

1. Niet-reaktieve schokgolven

Het verschijnsel detonatie is het eenvoudigst te beschrijven aan de hand van een korte samenvatting van de eigenschappen van een stationaire niet-reaktieve schokgolf, d.w.z. een schokgolf die zich met constante snelheid U beweegt door een medium (gas, vloeistof of vaste stof) zonder hierin chemische reacties te veroorzaken.

Stationaire schokgolven kunnen bij benadering worden beschouwd als sprongdiscontinuïteiten. Vóór de schokgolf bevindt zich het ongestoorde medium (index 0) met uniforme eigenschappen, d.w.z. konstante druk p_0 , dichtheid ρ_0 of specifiek volume τ_0 en specifieke inwendige energie e_0 . Er wordt hier steeds verondersteld dat de materie- of stromingssnelheid vóór de schokgolf gelijk nul is. Onmiddellijk achter de sprongdiscontinuïteit

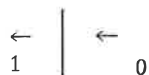
heeft het medium eveneens uniforme eigenschappen (index 1). Voorts wordt de materiesnelheid V gerekend ten opzichte van een coördinatensysteem, dat met dezelfde constante snelheid U als de schokgolf beweegt, of anders gezegd, gerekend ten opzichte van een waarnemer, die zich in het schokgolfvront bevindt (dus $V_0 = -U$ en $V_1 = U_1 - U$, waarin U_1 de materiesnelheid achter het schokgolfvront ten opzichte van een laboratorium-coördinatenstelsel is).

Met behulp van de wetten van behoud van massa, hoeveelheid beweging en energie kunnen een drietal relaties worden opgesteld tussen de thermo- en hydrodynamische parameters vóór en achter de schokgolf (zie tabel 1).

Deze relaties kunnen op eenvoudige wijze worden

Tabel 1. Behoudswetten voor niet-reaktieve en reaktieve stationaire schokgolven.

Niet-reaktieve schokgolf



Massa $\rho_0 V_0 = \rho_1 V_1 = m$

Impuls $p_0 + \rho_0 V_0^2 = p_1 + \rho_1 V_1^2$

Energie $e_0^{(0)} + p_0 \tau_0 + 1/2 V_0^2 = e_1^{(0)} + p_1 \tau_1 + 1/2 V_1^2$

Rayleighlijn $U_1 = \tau_0 \sqrt{\frac{p_1 - p_0}{\tau_0 - \tau_1}}$

$$U_1 = \sqrt{(p_1 - p_0) (\tau_0 - \tau_1)}$$

Hugoniot $e_1^{(0)} - e_0^{(0)} = 1/2 (p_1 + p_0) (\tau_0 - \tau_1)$

Reaktieve schokgolf



Massa $\rho_0 V_0 = \rho_2 V_2 = m$

Impuls $p_0 + \rho_0 V_0^2 = p_2 + \rho_2 V_2^2$

Energie $E_0^{(0)} + p_0 \tau_0 + 1/2 V_0^2 = E_2^{(1)} + p_2 \tau_2 + 1/2 V_2^2$

D $D = \tau_0 \sqrt{\frac{p_2 - p_0}{\tau_0 - \tau_2}}$

$$U_1 = \sqrt{(p_2 - p_0) (\tau_0 - \tau_2)}$$

Hugoniot $E_2^{(1)} - E_0^{(0)} = 1/2 (p_2 + p_0) (\tau_0 - \tau_2)$

Hugoniot $e_2^{(1)} - e_0^{(0)} = Q + 1/2 (p_0 + p_2) (\tau_0 - \tau_2)$

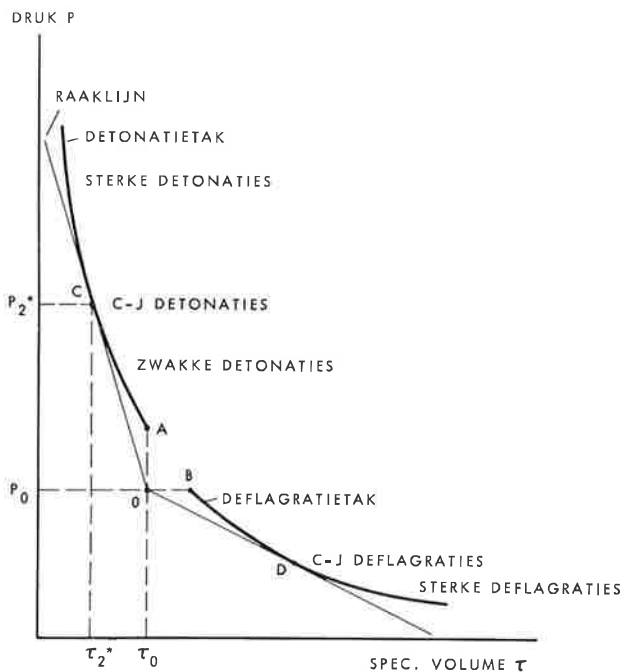


Fig. 1. De hugoniotkromme voor een reactiediscontinuïteit.

afgeleid; de wet van behoud van massa, bijvoorbeeld, eist dat de hoeveelheid massa die per tijds-eenheid door een eenheid van doorsnede stroomt, d.w.z. de massastroom m , vóór en achter het schokgolffront gelijk is.

Door de materiesnelheid V_1 uit de wetten van behoud van massa en impuls te elimineren ontstaat de vergelijking van de zgn. rayleighlijn. Volgens deze relatie bestaat er een lineair verband tussen de druk p_1 en het specifiek volume τ_1 achter de schokgolf bij gegeven begintoestand en gegeven schokgolfsnelheid U .

Door zowel V_0 als V_1 uit de drie behoudswetten te elimineren ontstaat een verband tussen de thermodynamische grootheden e , p en τ , dat bekend staat als de hugoniotvergelijking. Volgens deze vergelijking is de sprong in de specifieke inwendige energie gelijk aan de gemiddelde druk vóór en achter de schokgolf maal de sprong in specifiek volume. Indien de toestandsvergelijking van het medium gegeven is in de vorm $e = e(p, \tau)$, geven zowel de vergelijking van Hugoniot als van Rayleigh bij gegeven begintoestand en schokgolfsnelheid een relatie tussen de druk p_1 en specifiek volume τ_1 achter het schokgolffront. Er bestaat dan een enkelvoudige oplossing voor de eindtoestand. Deze oplossing kan ook worden gevonden door de rayleighlijn en de hugoniotkromme in het p, τ -vlak te construeren.

2. Reactieve schokgolven met oneindig grote reactiesnelheid-C-J model

We zullen nu veronderstellen dat de schokgolf zich met een (nader te bepalen) constante snelheid

beweegt door een medium, waarin ten gevolge van de passage van de schokgolf exotherme reacties optreden, d.w.z. reacties waarbij energie vrijkomt. Voor het ogenblik zullen we veronderstellen dat deze energie, ook wel explosiewarmte Q genoemd, momentaan en volledig bij passage van de schokgolf vrijkomt. Dit betekent, dat we veronderstellen dat de reactiesnelheid oneindig groot is en dat de breedte van de zone direct achter het schokgolffront, waarin ruimtelijk gezien de reacties plaatsvinden, gelijk nul is. Een dergelijke golf wordt een detonatiegolf genoemd. Historisch was dit het eerste model van de detonatiegolf dat door Chapman en Jouguet werd voorgesteld rond de laatste eeuwwisseling (C-J model).

Voor dit detonatiegolfmodel zijn een drietal relaties af te leiden uit de behoudswetten (zie tabel 1). Deze vergelijkingen hebben nu betrekking op de toestand van het ongestoorde medium (index 0) en op de toestand van de reactieproducten direct achter de detonatiegolf (index 2).

De wetten van behoud van massa en impuls zijn equivalent met die van de niet-reaktieve schokgolf. De vorm van de wet van behoud van energie dient echter gewijzigd te worden en wel door de termen $E_0^{(0)}$ en $E_2^{(1)}$, welk verschil gelijk is aan het verschil in specifieke inwendige energie minus het verschil in vormingswarmte van reactieproducten en reaktanten. Dit laatste verschil is gelijk aan de explosiewarmte Q . De toevoeging van de term Q aan de wet van behoud van energie vormt dus het essentiële verschil tussen de vergelijkingen voor niet-reaktieve en reaktieve schokgolven of detonatiegolven.

Op equivalente wijze als voor de niet-reaktieve schokgolf kunnen twee belangrijke relaties worden afgeleid. Deze zijn de vergelijking van de rayleighlijn, die een lineair verband geeft tussen p_2 en τ_2 voor gegeven begintoestand en gegeven detonatiesnelheid D en de vergelijking van Hugoniot, die een verband geeft tussen p_2 en τ_2 bij gegeven toestandsvergelijking $e = e(p, \tau)$, gegeven begintoestand en gegeven explosiewarmte Q .

Voor gassen wordt meestal de ideale gaswet als toestandsvergelijking gebruikt, terwijl voor vaste en vloeibare springstoffen vaak de toestandsvergelijking van Abel wordt gebruikt, waarin het covolume als constante of als functie van het specifiek volume wordt genomen.

In fig. 1 zijn in het p, τ -vlak twee stukken van een hugoniotkromme geschetst. De boventak van de hugoniotkromme stelt de meetkundige plaats voor van de mogelijk eindtoestanden (p_2, τ_2) , die vanuit de begintoestand $(p_0, \tau_0; \text{punt } O)$ door een volledige reactiediscontinuïteit volgens de behoudswetten bereikt kunnen worden. Uit de figuur blijkt dat op deze boventak de eindtoestanden gegeven zijn door een grotere druk p_2 en een kleiner specifiek volume τ_2 dan de begindruk p_0 en

specifiek volume τ_0 respectievelijk. Deze processen worden detonaties genoemd. De rayleighlijnen die vanuit punt O getrokken kunnen worden, snijden in het algemeen deze detonatietak van de hugoniotkromme in twee punten. Alleen in punt C raakt de rayleighlijn aan de hugoniotkromme.

De helling van de rayleighlijn bepaalt de detonatiesnelheid: hoe steiler de lijn des te groter is de snelheid.

De rayleighlijn OC bepaalt dus de minimaal mogelijke detonatiesnelheid. Chapman en Jouguet stelden vast, dat het deze minimale detonatiesnelheid is die experimenteel in detoneerbare media wordt waargenomen. Voor hun C-J model van een reaktiediscontinuïteit is dit niet in te zien. Om deze reden wordt de stelling, dat de in de natuur voorkomende detonaties overeenkomen met de minimale detonatiesnelheid, zoals deze mogelijk zijn volgens de behoudswetten, de Chapman-Jouguet hypothese genoemd. Het moge duidelijk zijn, dat de detonatiesnelheid niet eenduidig kan worden vastgesteld uit de drie gegeven behoudswetten plus de toestandsvergelijking, die tezamen een stelsel van vier vergelijkingen met vijf onbekenden vormen. De C-J hypothese verschaft dan de ontbrekende vijfde vergelijking, die het mogelijk maakt de detonatiesnelheid en toestand achter de detonatiegolf éénduidig te bepalen.

De C-J hypothese kan nog iets explicieter uitgewerkt worden door de geluidssnelheid van de detonatieproducten te beschouwen. In fig. 2 zijn in het p, τ -vlak de detonatietak van de hugoniotkromme en twee rayleighlijnen geschetst. Eén van deze lijnen snijdt de hugoniotkromme in twee punten (resp. G en F), terwijl de andere raakt aan de hugoniotkromme in punt C. In dezelfde figuur zijn de adiabaten, die aangeven hoe de druk als functie van het specifiek volume verandert bij konstant blijvende entropie, door de punten F, C en G geschetst, waarvan het verloop op algemene wijze kan worden afgeleid.

De raaklijn aan een adiabaat is een maat voor de geluidssnelheid voor het gegeven toestandspunt en wel zodanig dat hoe steiler deze raaklijn is, des te groter is de geluidssnelheid.

In punt F heeft de adiabaat een grotere helling dan de rayleighlijn door dit punt. Hieruit is af te leiden dat de materiesnelheid achter de reaktiediscontinuïteit en ten opzichte daarvan kleiner is dan de geluidssnelheid in de reactieproducten. Ten opzichte van het front van de detonatiegolf is deze materiesnelheid dus subsoon. Een dergelijk verschijnsel wordt een sterke detonatie genoemd. In punt G is de materiesnelheid van de detonatieproducten ten opzichte van het front van de golf supersoon. In punt C is op algemene wijze af te leiden dat de snelheid van de reactieproducten ten opzichte van het front gelijk is aan de geluidssnelheid.

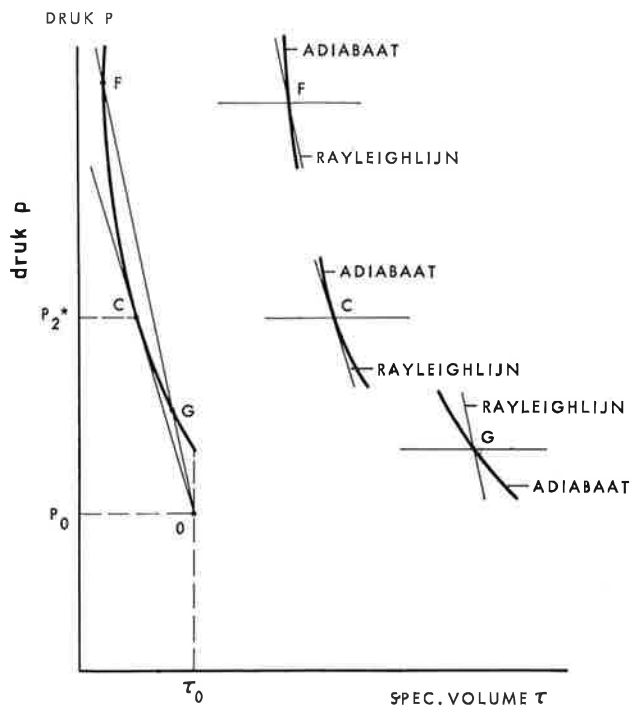


Fig. 2. De detonatietak van de hugoniotkromme voor een reaktiediscontinuïteit met rayleighlijnen voor C-J detonatie en sterke detonatie en adiabaten.

Het onderzoek van de besproken vergelijkingen leidt tot de conclusie dat de hugoniotkromme een tak heeft (fig. 1), waarvan de punten, die mogelijke eindtoestanden volgens de behoudswetten voorstellen, beneden en rechts van punt O liggen. Deze processen worden deflagraties genoemd. We zullen ons hier niet mee bezighouden. De hugoniotkromme is onderbroken tussen de punten A en B. Eindtoestanden gegeven door punten tussen A en B op de hugoniotkromme zouden een drukverhoging en volumevergroting als mede imaginaire snelheden betekenen. Dit is beslist geen ervaringsfeit.

3. Het ZND-model

De C-J hypothese is een hypothese gebleven tot het begin der jaren veertig, toen onafhankelijk van elkaar Zeldovich, von Neumann en Doering [1] het C-J model uitbreidden tot een meer realistisch model. Deze onderzoekers wezen terecht op het feit dat chemische reacties een eindige snelheid hebben en dat er derhalve ruimtelijk een reactiezone moest bestaan waarin de explosiewarmte Q geleidelijk vrijkomt. Stel dat door één reactievariabele ϵ ($0 \leq \epsilon \leq 1$) de fraktie van de reactie voorgesteld kan worden, die voltooid is op een bepaalde plaats in de reactiezone van de detonatiegolf. Met gedeeltelijk voltooide reactie wordt dan bedoeld, dat een gedeelte van de explosiewarmte, ϵQ , is vrijgekomen. We kunnen nu een $E^{(v)}$ -waarde definiëren, die de inwendige energie

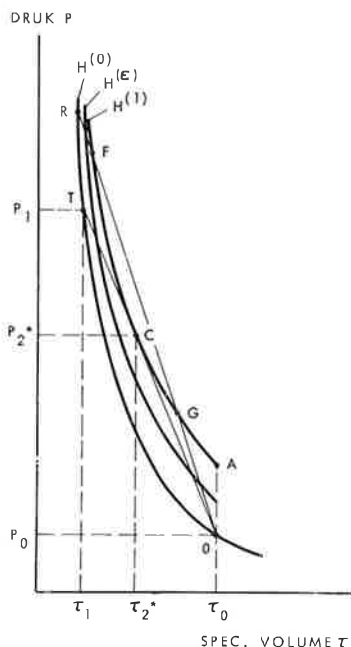


Fig. 3. De hugoniotkrommen voor het ZND-model met rayleighlijnen voor C-J detonatie en sterke detonatie.

plus vormingswarmte voorstelt voor een mengsel van reactieproducten en reaktanten. Dus

$$E^{(\epsilon)} = (1-\epsilon) E^{(0)} + \epsilon E^{(1)} \quad (1)$$

Op deze wijze is voor gegeven ϵ een hugoniotvergelijking te definiëren

$$E^{(\epsilon)} - E^{(0)} = 1/2 (p_{\epsilon} + p_0) (\tau_0 - \tau_{\epsilon}) \quad (2)$$

In het p, τ -vlak kan nu voor elke waarde van ϵ een hugoniotkromme geconstrueerd worden. In fig. 3 zijn drie hugoniotkrommen geschetst. De kromme $H^{(0)}$ ($\epsilon = 0$) is de hugoniot van een niet-reaktieve schokgolf. Het punt O ligt op deze kromme. De hugoniotkromme voor volledige reactie $H^{(1)}$ ($\epsilon = 1$) ligt geheel boven $H^{(0)}$. Tevens is een kromme $H^{(\epsilon)}$ voor een tussenliggende waarde van ϵ geschetst. Men kan bewijzen dat deze hugoniotkrommen een familie van elkaar niet snijdende krommen vormen, die concaaf naar boven zijn gericht in het p, τ -vlak, zoals schematisch in fig. 3 is aangegeven. Verder zijn in fig. 3 dezelfde twee rayleighlijnen als in fig. 2 getrokken, de lijn OCT en OGFR respectievelijk.

Volgens het Zeldovich, von Neumann, Doering (ZND) model van een detonatiegolf wordt het medium bij passage van het front van de golf eerst gecompriemd door de niet-reaktieve schokgolf, die het front van de golf vormt. Dit gedeelte van de detonatiegolf wordt wel von-Neumann piek genoemd.

In het p, τ -vlak betekent dit, dat de toestand van het medium onmiddellijk na passage van de schokgolf gegeven wordt door punt T (of R) op de niet-reaktieve schokgolfhugoniot $H^{(0)}$. Ten gevol-

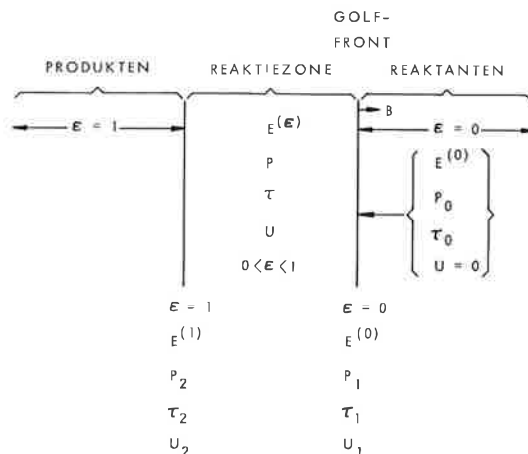


Fig. 4. Detonatiegolf volgens ZND-model.

ge van de compressie en daarmee de temperatuurverhoging achter het schokgolf front begint de chemische reactie. In de reactiezone worden alle toestanden gegeven door punten op de rayleighlijnen, omdat de wetten van behoud van massa en impuls onveranderlijk blijven gelden bij voortschrijding van de reactie. Het moge duidelijk zijn dat, wanneer ϵ van 0 naar 1 gaat, de druk en dichtheid dalen, waarbij de toestandspunten op de lijn T tot C (of R tot F) liggen. In punt C (of F) is de reactie voltooid, d.w.z. alle explosiewarmte is vrijgekomen.

In fig. 4 is de één-dimensionale stationaire detonatiegolf (alle punten in de reactiezone hebben dezelfde snelheid D naar richting en grootte) volgens de ZND-opvatting nogmaals ruimtelijk geschetst.

De C-J hypothese verdient in het licht van het ZND-model een nadere beschouwing. Alle punten op de zwakke-detonatietak CGA kunnen als mogelijke eindtoestanden uitgesloten worden; dit zou immers betekenen dat van toestandspunt F een sprongvormige verandering naar een lagere druk en dichtheid (punt G) zou optreden zonder dat er warmte vrijkomt of gedissipeerd wordt. Dergelijke „omgekeerde” schokgolven komen niet voor.

In punt F is de stroming achter de detonatiegolf subsoon ten opzichte van het front. Expansie- of compressiegolfjes planten zich voort met geluidssnelheid ten opzichte van het medium. Indien door kleine onregelmatigheden in de stroming achter de detonatiegolf expansie- of compressiegolfjes ontstaan, zijn ze in staat de detonatiegolf in te halen en te penetreren in de reactiezone, waar het verloop van de chemische reactie beïnvloed wordt. Dit heeft tot resultaat dat de voortplantingssnelheid van de detonatiegolf voortdurend zou veranderen. In het bijzonder zal de expansiegolf (de zgn. Taylorwave), die de detonatiegolf meestal volgt, in staat zijn het detonatiegolf front in te halen en daarmee de snelheid te verlagen tot de minimale C-J detonatiesnelheid

(punt C) is bereikt. In punt C heersen sonische condities, zodat geen enkele beïnvloeding van de reactiezone vanuit het stromingsgebied achter de golf mogelijk is. Dan is een stationaire detonatiegolf mogelijk, hetgeen ook in de praktijk wordt waargenomen.

4. Reaktiekinetiek; brandende-korrelmodel van Eyring

Uit het bovenstaande is gebleken dat de toestandspunten van de reactiezone de rayleighlijn TC (fig. 3) volgen. Hiermede is nog niets gezegd over de snelheid waarmee de rayleighlijn doorlopen wordt, m.a.w. de bovenstaande analyse inhoudt zich van enige uitspraak omtrent de reactiesnelheid. Voor een gedetailleerde studie van de structuur van de reactiezone moeten we een beroep doen op de reaktiekinetiek.

In gassen wordt de structuur van de reactiezone van een detonatiegolf bepaald door de simultane oplossing van de hydrodynamische vergelijkingen van behoud van massa, impuls en energie en reaktiekinetische vergelijkingen.

Duff [2] integreerde numeriek een stelsel van kinetische vergelijkingen, waarbij de toestandspunten beperkt bleven tot een beweging langs de rayleighlijn voor de berekening van de structuur van de reactiezone van een $2\text{H}_2 + \text{O}_2 + \text{Xe}$ detonatie bij een begindruk van 30 mm Hg. Experimentele metingen van het dichtheidsprofiel in deze detonatiegolf zijn gedaan door Kistiakowsky en Kydd [3] met een X-ray densitometer. De resultaten van de berekeningen van Duff suggereerden dat althans kwalitatief alle eigenschappen van het experimenteel waargenomen detonatiegolfprofiel verklaard kunnen worden in termen van bekende reaktie-kinetische vergelijkingen met redelijke reaktiesnelheidsconstanten. Men stelde vast dat het grootste gedeelte van de reactiezone van een detonatiegolf in gassen beheerst wordt door de inductiezone, waarbij praktisch geen verandering optreedt in de thermo- en hydrodynamische parameters. Vertakkende kettingreacties bepalen de inductiezone-structuur. Hierdoor wordt een groot aantal vrije atomen en radicalen geproduceerd, terwijl de totale verandering van de energie-inhoud klein is ten gevolge van de stochiometrie van de kettingreacties.

De rest van het reaktieprofiel en bijna alle bijzonder snelle veranderingen van de parameters worden beheerst door de snelheid van recombinitie van de geproduceerde atomen en radicalen.

Cook en Keyes [4] en Soloukhin [5] kwamen tot overeenkomstige conclusies voor het ZND-model. Men stelde vast dat de duur van de inductieperiode meer dan 90% van de totale chemische reaktietijd bedroeg, als de activeringsenergie E van de detonatie voldoende groot is ($E = 20$ tot

40 kcal/mole), zoals het geval is voor de meeste bekende gasdetonaties.

Voor niet-homogene vaste springstoffen, die meestal granulaire substanties zijn, en dus bestaan uit korrels met daartussen lucht, ligt de zaak geheel anders. Hier neemt men meestal aan dat de reactie verloopt als een (snelle) verbranding van de korrels ten gevolge van de temperatuurverhoging door de schokgolf.

Eyring [6] veronderstelde dat de reactie voortschrijdt (fig. 4) van buiten naar binnen, als we de korrels van de springstof opvatten als bolletjes met straal R_k en de inleiding van de reactie over het gehele oppervlak van het bolletje tegelijkertijd tot stand is gekomen. De lengte van de reactiezone wordt dan bepaald door de tijd die nodig is om een één-korrel dikke laag te verbranden.

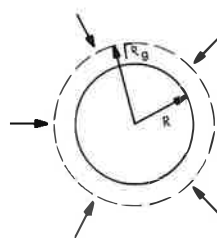


Fig. 5. Brandende-korrelmodel van Eyring.

Het aantal moleculen n van een korrel dat per seconde reageert, wordt gegeven door het product van de reaktiesnelheid van ieder molecule, K_r , en het aantal moleculen op het oppervlak van de korrel, volgens

$$\frac{dn}{dt} = K_r \frac{4 \pi R^2}{S} \quad (3)$$

met S = effectieve dwarsoppervlakte van een molecule

R = korrelradius op ieder tijdstip

K_r = specifieke reaktiesnelheid voor een molecule

Het aantal moleculen dat per seconde reageert, wordt ook gegeven door de verandering per tijdseenheid van het aantal moleculen in de bol, volgens:

$$-\frac{dn}{dt} = \frac{d}{dt} \left[\frac{4 \pi R^3}{3 v} \right] = \frac{4 \pi R^2}{v} \frac{dR}{dt} \quad (4)$$

met v het volume per molecule.

Vergelijking (3) en (4) gecombineerd, geeft

$$\frac{dR}{dt} = -K_r \frac{v}{S} = K_r \lambda \quad (5)$$

met λ de effectieve diameter van het molecule. In

termen van ε wordt de voortgang van de reactie ook aangeduid door

$$\varepsilon = 1 - \left(\frac{R}{R_k} \right)^3 \quad (6)$$

Uit vergelijkingen (5) en (6) volgt de zgn. tweederdemachtswet voor het verloop van de reactie in heterogene springstoffen.

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{3 K_R \lambda}{R_k} (1 - \varepsilon)^{2/3} \quad (7)$$

5. Moderne opvatting over structuur van detonatiegolven in gassen

Tot ongeveer de jaren zestig is het ZND-model bijzonder succesvol toegepast voor de verklaring van een veelheid van detonatiegolfverschijnselen. In de laatste decade is echter overtuigend bewijsmateriaal geleverd dat de stroming van de gassen in en achter de reactiezone van een gasdetonatie verre van één-dimensionaal en laminair is, maar wordt bepaald door intensieve transversale verstoringen.

Reeds in 1926 ontdekten Campbell en Woodhead [7] de spinnende detonatiegolf (Eng. „spinning detonation”). Dit fenomeen paste geheel niet in het ZND-model en werd jarenlang beschouwd als een exceptionele vorm van detonatie. Het werd onder andere door verscheidene Russische onderzoekers aangetoond dat spindetonatie altijd optreedt en in alle gasmengsels in de buurt van de voortplantingsgrenzen van de detonatie, hoe deze ook verkregen worden: door de diameter van de buis waarin de detonatiegolf loopt te verkleinen, door de begindruk van het gas te verlagen of door de concentratie van de componenten van het gasmengsel te veranderen.

Spindetonatie is een niet-vlak proces. De verbranding plant zich voort in de vorm van een verbrandingskern in de voorwaartse richting langs de buisas, die tegelijkertijd roteert om de buisas, zodat een spiraalbeweging wordt waargenomen. Later werd gevonden dat een spinnende detonatiegolf bestaat uit een complexe mach-configuratie, achter het front waarvan de verbranding wordt geïnitieerd. Indien we ons verwijderen van de detonatievoortplantingsgrenzen kan worden waargenomen dat het aantal spinkernen en het aantal mach-configuraties toeneemt. Uiteindelijk wordt de detonatiegolf „normaal” en „vlak”. Het bleek dat niet alleen spindetonatie, maar ook de „normale” detonatiegolf in feite een drie-dimensionale structuur heeft. White [8] publiceerde een aantal interferogrammen van een detonatiegolf waaruit het scheen alsof de golf een turbulent karakter had, maar later zijn distincte transversale golven aangetoond.

De structurele stabiliteit van het ZND-model

werd geanalyseerd door Shchelkin [9]. Hij vond dat, ten gevolge van de exponentiële temperatuurafhankelijkheid van de chemische reactietijd, een detonatiegolf volgens de ZND-opvatting structureel instabiel is.

Verstoringen die in de reactiezone ontstaan dempen niet uit, maar worden versterkt totdat ze het front van de detonatiegolf bereiken, waar veelvoudige mach-configuraties ontstaan, die zich in transversale richting over het front van de golf voortplanten. De vorm van het front van de detonatiegolf ondergaat hierdoor periodieke veranderingen die het gevolg zijn van de periodieke botsingen van deze transversale golven. De verbranding van de gassen gebeurt in de buurt van deze botsingspunten. Deze verbrandingskernen lopen transversaal over het schokfront en men heeft gevonden dat ze de eigenschap hebben om een karakteristiek cellenpatroon op een beroet oppervlak te „schrijven”.

6. Conclusies

Een mathematische analyse van het gehele detonatieprofiel schijnt thans onmogelijk. Ondanks de gecompliceerde structuur van een detonatiegolf is het ZND-model van een één-dimensionale stationaire detonatie nog steeds de meest bruikbare opvatting voor een kwantitatief begrip van het gedrag van detonatiegolven. Men dient er echter, meer dan ooit, voor te zorgen dat theoretische analyses gebaseerd op het ZND-model bevestigd dienen te worden door experimenten. Een bijzonder mooi voorbeeld van de toepassing van het ZND-model werd verkregen in de analyse van het proces van de initiatie van detonatie (de vlamnaar-detonatieovergang) achter een gereflekteerde schokgolf in een conventionele schokgolfbuis. De gasdynamica van dit gecompliceerde multi-dimensionale proces werd door Gilbert en Strehlow [10] theoretisch onderzocht. De resultaten van deze analyse kwamen bijzonder goed overeen met experimentele waarnemingen. Op het Technologisch Laboratorium TNO bestudeert de auteur [11] de interactie van detonatiegolven met grensvlakken. Ook hier blijkt de toepassing van het klassieke ZND-model tot waardevolle resultaten te leiden.

Literatuur

- [1] Evans, M. W., C. M. Ablow: Chem. Rev. 61, 129 (1961).
- [2] Duff, R. E.: J. Chem. Phys. 28, 1193 (1958).
- [3] Kistiakowsky, G. B., Kydd, P. H.: J. Chem. Phys. 25, 824 (1956).
- [4] Cook, M. A., Keyes, R. T., Filler, A. S.: Trans. Far. Soc., 52, 369 (1956).
- [5] Soloukhin, R. I.: „Shock waves and detonations in gases”. M no Book Corp., Baltimore, 1966.

Het effect van schokgolven op ruiten

G. W. C. HUYSMANS

Technologisch Laboratorium TNO

Effect of shockwaves on window-panes

Samenvatting

Het gedrag van een ruit onder invloed van een belasting hangt af van de lengte-dikte verhoudingen van de ruit. Deze bepalen namelijk of men de ruit als een dikke plaat dan wel als een membraan mag beschouwen.

Uitgaand van het model dat voor de beschouwde ruit geldt, kan men relaties opstellen tussen de in de ruit opgewekte spanningen en de op de ruit aangebrachte belasting. Het blijkt dat de duur van de belasting van invloed is op deze spanningen. Men moet dan ook onderscheid maken tussen statische en dynamische belastingen van de ruit. In het gebied van de dynamische belastingen moet dan weer rekening gehouden worden met de mogelijkheid van optredende resonanties. Uit het voorgaande is duidelijk dat het effect van een schokgolf op een ruit afhankelijk is van het druk-tijdverloop van de schok. Een nuttig hulpmiddel bij de bestudering van het gedrag van ruiten die door schokgolven getroffen worden is de schokgolfbuis. Met behulp van dit instrument is het mogelijk gevarieerde snelle belastingen op ruiten aan te brengen, hetgeen in te zien is aan de hand van een korte beschouwing over de in de buis optredende stromingsverschijnselen.

Bij explosies is een kenmerkend verschijnsel dat er een zeer sterke expansie van gassen optreedt. Deze expansie is de oorzaak van het optreden van schokgolven. Het expanderende gas zal het medium rond de explosie comprimeren. Nu is het een eigenschap van compressiegolven dat ze de neiging vertonen in de loop van de tijd een steeds steiler drukfront op te bouwen, dit in tegenstelling tot verdunningsgolven, die juist de neiging hebben de drukgradiënt kleiner te maken. Het een en ander is in te zien met behulp van een model van een zuiger in een buis. De zuiger wordt versneld en geeft aanleiding tot een serie compressiegolven. Omdat een compressiegolf de temperatuur verhoogt, neemt de geluidssnelheid achter iedere compressiegolf toe. Dit betekent dat de golven elkaar zullen inhalen en daardoor een steil drukfront opbouwen.

Summary

The behaviour of a window-pane under the influence of a load is dependent on the length-gauge ratio, for this ratio determines whether the pane is to be considered as either a thick sheet or a membrane.

Starting from a model that holds for the pane under consideration relations can be drawn up between tensions generated in the pane and the load applied. The duration of the load appears to affect these tensions. One has to distinguish, therefore, between static and dynamic loads on the pane. In the dynamic load range the possibility of the occurrence of resonances has to be included in the considerations.

From the foregoing it is clear that the effect of a shock-wave on a pane of glass is dependent on the time-pressure course of the shock.

An effective expedient in the study of the behaviour of panes hit by shockwaves is the shock tube. This instrument enables the application of a variety of rapid loads on panes as is shown with the help of a short dissertation on the flow phenomena occurring in the tube.

Wanneer dit proces voltooid is hebben we een schokgolf gekregen. Als de versnelling van de zuiger van teken verandert, krijgen we een serie verdunningsgolven. Achter iedere verdunningsgolf is echter een temperatuuurdaling. De geluidssnelheid gaat dus omlaag. De verdunningsgolven zullen daardoor steeds verder bij elkaar achterblijven. Een belangrijk onderscheid tussen compressiegolven en verdunningsgolven in gassen is dus dat de eersten een steil drukfront opbouwen, terwijl de laatsten het drukverschil steeds geleidelijker laten worden. Het is deze eigenschap van compressiegolven die verklaart waarom er bij explosies schokgolven optreden.

De drukgradiënt in het front van de schokgolf is bijzonder groot. De afstand waarover de druk-sprong wordt gerealiseerd is in de orde van de gemiddelde vrije weglengte van de moleculen van het

[6] Eyring, H., e.a.: Chem. Rev. 45, 69 (1949).

[7] Campbell, C., Woodhead, D.: J. Chem. Soc. 129, 3010 (1926).

[8] White, D. R.: Phys. Fluids 4, 465 (1961).

[9] Shchelkin, K.: I Soviet Physics USP 8, 780 (1966).

[10] Gilbert, R. B., Strehlow, R. A.: AIAA J., 4, 1777 (1966).

[11] Broekstra, G.: De Ingenieur 82, 033 (1970).

ongestoorte gas. Mathematisch wordt het schokfront dan ook vaak als een discontinuïteit beschouwd.

Wanneer nu een object door een schokgolf getroffen wordt, moeten we, vanwege de bijzonder snelle verandering in de belastingstoestand, uitgaan van een dynamische beschouwing van het object, om een inzicht te krijgen in de responsie.

Zo ook voor het gedrag van ruiten die door een schokgolf getroffen worden. Het gedrag van de ruit is sterk afhankelijk van zijn afmetingen. Men kan de ruit als een dikke plaat, als een membraan, of als een mengsel van beide mogelijkheden beschouwen. Algemeen kan gezegd worden dat, wanneer de doorbuiging van de ruit groter is dan de halve dikte, de ruit als een membraan beschouwd mag worden. Voor het merendeel van de ruiten in de huidige gebouwen en huizen, zal bij kleine belasting aan deze voorwaarde voldaan zijn.

In het vervolg zal de ruit dan ook als een membraan beschouwd worden. De differentiaalvergelijking voor een vrij bewegend membraan luidt in een cartesisch coördinatenstelsel

$$T_x \frac{\partial^2 Z}{\partial x^2} + T_y \frac{\partial^2 Z}{\partial y^2} = \gamma \frac{\partial^2 Z}{\partial t^2}$$

Hierin zijn T_x en T_y de spanningen in de x en y richting, Z de uitwijking van het membraan en γ de massa per oppervlakte eenheid. Opgemerkt moet worden dat de trekspanningen T_x en T_y functies van de uitwijking zijn. Hierdoor is de differentiaalvergelijking niet lineair en zal de trillingstijd van het membraan afhankelijk zijn van de beginvoorwaarde [1]. Voor een rechthoekig membraan (afmetingen $a \times b$) kan men voor de uitwijking Z de functie:

$$Z = A \sin \frac{\pi x}{a} \sin \frac{\pi y}{b}$$

als oplossing aannemen, waar bij $A = A(t)$ een functie van de tijd is. Met de wet van Hooke volgt dan voor de trekspanningen:

$$T_x = E h \frac{A^2 \pi^2}{4a^2} \sin^2 \frac{\pi y}{b}$$

$$T_y = E h \frac{A^2 \pi^2}{4b^2} \sin^2 \frac{\pi x}{a}$$

Hierin is E de elasticiteitsmodulus en h de dikte van het membraan. De trillingstijd kan worden verkregen door de oplossing Z in de vergelijking te substitueren. Dit levert dan een differentiaalvergelijking voor de functie $A = A(t)$.

Een benadering voor de trillingstijd wordt dan:

$$T = \frac{8,85}{\frac{\pi}{l} \left(\frac{Eh}{2\gamma}\right)^{1/4} \sqrt{V_0}} \quad \text{met } V_0 = \left(\frac{\partial A}{\partial t}\right)_{t=0} = \text{beginsnelheid van het membraan}$$

$$\text{en } \frac{1}{V_0} = \frac{1}{a^4} + \frac{1}{b^4}$$

De trillingstijd van een systeem dat door de schokgolf getroffen wordt, is een belangrijke grootte, omdat het gedrag van het systeem afhangt van de verhouding tussen de duur van de belasting en zijn trillingstijd. Een complicatie in dit geval is dat de trillingstijd ook weer van de grootte van de belasting afhangt. De belasting heeft namelijk invloed op de beginvoorwaarde van de differentiaalvergelijking.

Om een kwalitatief inzicht te krijgen in de responsie van het membraan kunnen we het vervangen denken door een massa-veersysteem. Zowel het massa-veersysteem als het membraan voldoen aan een tweede orde differentiaalvergelijking. Bij een dergelijk systeem is er een groot verschil tussen de responsie op een pulsformige en een stapformige belasting. De pulsformige belasting geeft de massa een beginsnelheid ter grootte van

$$V_0 = \frac{I}{m}$$

waarin I impuls is van de belasting.

De stapformige belasting geeft het systeem echter een voortdurende versnelling zolang de evenwichtsstand nog niet bereikt is. De maximale uitwijking is daardoor veel groter dan bij de pulsformige belasting. Fig. 1 geeft een kwalitatief verloop van de uitwijking in de tijd.

De maximale uitwijking bij de pulsbelasting wordt:

$$Z_m = \frac{I}{mw_0} \quad \text{hier is } w_0 \text{ de resonantiefrequentie.}$$

Bij een stapformige belasting wordt de maximale uitwijking

$$Z_m = \frac{2P}{K}$$

hierin is P de stapgrootte en k de veerconstante.

Bij een stap is de uitwijking dus tweemaal zo groot als de statische waarde.

Een analoge beschouwing is te geven voor het membraan. Op deze wijze verkrijgen we dan de maximumspanningen die in het membraan kunnen optreden ten gevolge van een puls of een sprongbelasting.

Voor de pulsbelasting wordt dit:

$$\int p dt = I = 0,887 \frac{\sqrt{a^4 + b^4}}{b^2} \left(\frac{\gamma h}{E}\right)^{1/2} \sigma_t$$

waarin I weer de impuls is en σ_t de maximumspanning in het membraan.

Voor een sprongbelasting zoals van bv. een atoomexplosie wordt deze relatie:

$$P = \frac{\pi^3}{32} \cdot \frac{1}{E^{1/2}} \cdot \frac{h}{a} \left(1 + \frac{a^4}{b^4}\right) \sigma_1^{3/2}$$

De puls en de sprong zijn twee belastingsvormen waarmee het mathematische model van de ruit experimenteel kan worden getoetst. De schokgolfbuis kan hierbij een zeer nuttig instrument zijn, aangezien men daarin gevarieerde drukprofielen kan maken, waaronder benaderingen voor de puls- en sprongbelasting.

De schokgolfbuis is een buis waarvan een deel door een membraan is afgescheiden (zie fig. 2).

Dit gedeelte wordt opgepompt tot een barstdruk van het membraan. Wanneer het membraan barst zal het gas in het hogedruk gedeelte expanderen. Geheel analoog aan de al eerder gegeven beschrijving van de schokvorming, zal deze expansie het gas in het lage druk gedeelte tot een schokgolf comprimeren.

Tegelijk zal vanaf het membraan een serie verdunningsgolven de hoge druk sectie inlopen. Het stromingsbeeld dat ontstaat is weergegeven in een plaatstijddiagram (fig. 3a) waarin de plaats van de schokgolf, de verdunningsgolven en het contactoppervlak tussen het gas van het hoge en het lage druk gedeelte, als functie van de tijd is getekend.

Het drukverloop op een tijdstip t als functie van de plaats in de buis is er onder getekend (fig. 3b). Op het tijdstip t , heeft de schokgolf de plaats x_4 bereikt. Er is daar een plotselinge drukstijging. Het contactoppervlak is dan op plaats x_3 .

Voor dit oppervlak geldt dat de druk en de deeltjessnelheid ervoor en erachter gelijk zijn. De laatste verdunningsgolf is op de plaats x_2 en van daar is er een geleidelijk drukstijging tot x_1 , alwaar de eerste verdunningsgolf is aangekomen.

Het verschil in snelheid tussen de eerste en laatste verdunningsgolf wordt weergegeven door het verschil in helling in het x - t diagram.

Men kan bewijzen dat een verdunningsgolf tegen een vaste wand als een verdunningsgolf wordt gereflecteerd. Dit betekent dat de verdunningsgolven na tegen de eindwand van de hoge druk sectie te zijn gereflecteerd de schokgolf gaan inhalen. Het druk-tijdverloop in de buis wordt hierdoor beïnvloed. Door het feit dat de verdunningsgolven niet allemaal even snel zijn, is deze invloed afhankelijk van de plaats in de buis. Naarmate men verder in de buis meet is de drukafval geleidelijker.

Fig. 4 geeft een geïdealiseerd beeld van twee mogelijke drukprofielen in de buis.

Het horizontale stuk in fig. 4a ontstaat doordat achter de schokgolf een gebied is met constante druk en deeltjessnelheid. Pas als de eerste gereflecteerde verdunningsgolf aankomt begint de druk af te nemen. Dat in fig. 4b een dergelijk horizontaal stuk niet aanwezig is, komt omdat een dergelijk profiel veel verder in de buis gemeten wordt. De verdunningsgolf heeft de schokgolf daar dan ingehaald. De drukafname begint dan direct na de

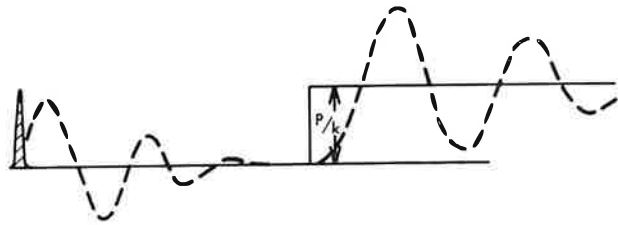


Fig. 1. Het verschil tussen de sprong en de pulsresponsie bij eenzelfde piekdruk. Het pulsoppervlak $I = \int p dt$ wordt gelijkgesteld aan het oppervlak van de dirac puls, dus $I = \int \delta(t) dt$. De stapgrootte bij de sprongfunctie is P .

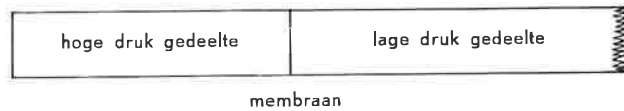


Fig. 2. Schematische voorstelling van de schokgolfbuis.

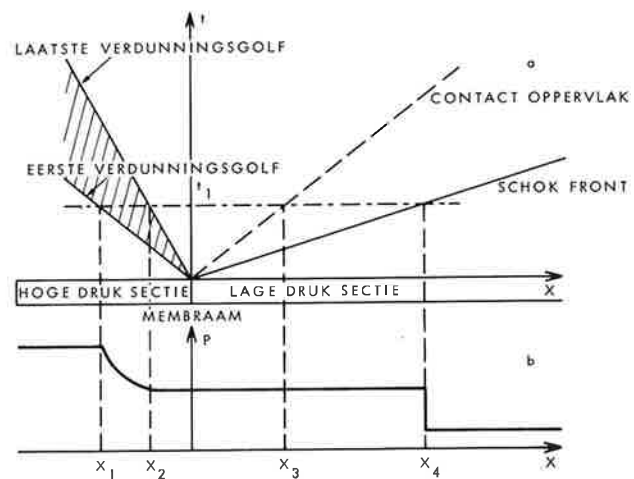


Fig. 3a. X - t diagram.

Fig. 3b. Drukverloop in de buis ten tijde $t=t_1$.

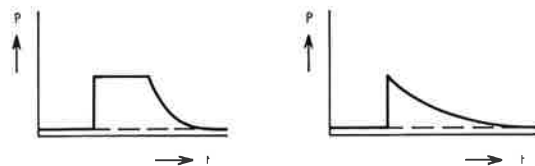


Fig. 4. Geïdealiseerde voorstelling van twee mogelijke drukprofielen in de buis.

shok. De positieve duur van de druk duurt hier echter langer, omdat de laatste verdunning steeds verder bij de eerste achterblijft. Aan de hand van het voorgaande is direct in te zien dat men het drukprofiel kan beïnvloeden door de afmetingen van de buis te variëren. Wanneer men het hoge druk gedeelte lang maakt, komt de gereflecteerde verdunning later en krijgen we een drukverloop dat op een sprongfunctie lijkt.

Als we de hoge druk sectie zeer kort maken, zal de verdunningsgolf de schokgolf snel ingehaald hebben en ontstaat een profiel als in fig. 4b. De drukafname is te beïnvloeden door de afstand tot het membraan te variëren. Er wordt dan gebruik gemaakt van het divergerende karakter van de verdunningsgolven.

Het is in het bestek van dit artikel niet mogelijk in te gaan op de vele mogelijkheden om de schokgolfbuis te dimensioneren. De afmetingen van de buizen kunnen zeer sterk variëren in afhankelijkheid van de eisen en wensen welke men ten aanzien van het stromingsbeeld stelt.

In de praktijk komen schokgolfbuizen voor met een lengte van enkele meters en een diameter in de orde van een tiental centimeters, welke in een laboratorium kunnen worden opgesteld. Er bestaan echter ook grote blastsimulatoren, waarvan de

lengte tot honderden meters kan oplopen en waarvan de diameter een paar meter is. In deze laatste tunnels worden de schokgolven met behulp van springstoffen of raketten opgewekt.

In het algemeen kan men zeggen dat in de kleine buizen een meer kwalitatief onderzoek naar de blastverschijnselen geschiedt, terwijl de resultaten van dit onderzoek in de grote tunnels geverifieerd kunnen worden.

In de kleine buizen is het eenvoudiger en goedkoper de interactie van de schokgolf met een schaalmodel van het te onderzoeken object te bestuderen. Hiervoor zijn optische technieken zoals de schaduw- en sliertenmethodes in combinatie met ultrasnelle filmtechnieken beschikbaar. Het is echter niet zonder meer mogelijk naar de ware grootte te extrapoleren, omdat een aantal verschijnselen een sterk niet lineair karakter hebben (viscositeit, plastische vervorming (niet bij glas)). Met een relatief klein aantal experimenten zou de extrapolatie in grote schokgolftunnels opgelost kunnen worden.

Literatuur

- [1] R. W. Trensse: De dynamische berekening van membranen met als toepassing de breukanalyse van glaspanelen. Dl. I. Intern rapport Technologisch Laboratorium TNO.

Detonaties van vaste en vloeibare industriële produkten

Detonations of solid and liquid industrial products

Th. M. GROOTHUIZEN

Technologisch Laboratorium TNO

Samenvatting

Na een summier overzicht van de eigenschappen van de detonatie worden enkele accidentele detonaties besproken. Vervolgens worden de onderzoekingsmethoden behandeld, die op het ogenblik bij TNO worden gebruikt voor de bepaling van de detonatiemogelijkheid en van de gevoeligheid voor detonatie.

Summary

After a compendious survey of the characteristic of detonation a few accidental detonations are discussed. Subsequently a description is given of the methods of investigation the capability and sensitiveness of detonation as applied at present at TNO.

Inleiding

Een detonatie is een heftige vorm van explosie. Er wordt gebruik van gemaakt bij springstoffen. Enkele civiele toepassingen van springstoffen zijn: seismologie, opruimingswerkzaamheden en vooral in het buitenland mijnbouw, tunnelbouw en wegenaanleg.

Zoals reeds door H. J. Pasman beschreven is, plant zich bij de detonatie een reactiezone door de stof voort met een snelheid van 1000 tot 9000 meter/seconde. De energie-overdracht vindt plaats door middel van een schokgolf, die voor de reactiezone uitloopt en door de reactiezone in stand wordt gehouden. Ook sommige industriële produkten hebben de eigenschap dat zij kunnen detoneren. Vooral waar het om grote hoeveelheden gaat, worden deze produkten echter dikwijls verdund met inerte stof in de handel gebracht.

Door deze toevoeging van inerte stoffen kan enerzijds een produkt verkregen worden dat niet meer kan detoneren, anderzijds kan door deze toevoeging de gevoeligheid voor detonatie sterk worden verkleind. Beide effecten kunnen soms ook verkregen worden door een wijziging van de fysische toestand van de stof. Zo kan geprild (\varnothing 3 mm) ammoniumnitraat niet detoneren, terwijl het kristallijne produkt wel kan detoneren. De detonatie van gegoten trotyl is veel moeilijker in te leiden dan van geperst trotyl.

In het onderstaande zal alleen aandacht worden besteed aan het onderzoek van de detonatiemoge-

lijkheid en de inleidingsgevoeligheid van industriële produkten. Onderzoekingsmethoden voor militaire en civiele springstoffen worden niet behandeld.

Overzicht van enkele accidentele detonaties

In het verleden zijn een groot aantal industriële produkten ongewenst tot detonatie gekomen. Een van de grootste rampen was de detonatie van een kunstmest bestaande uit ammoniumnitraat en ammoniumsulfaat (beide ca. 50%) in Oppau (bij Mannheim) op 21-9-1921 [1]. In een opslagloods was 4500 ton van deze kunstmest opgeslagen. Gedurende de opslag waren de kunstmestkorrels aan elkaar gebakken, waarna men met behulp van springstofpatronen de massa wilde losmaken. Vóór men springstof ging gebruiken heeft men de detonatiemogelijkheid van dit type kunstmest onderzocht. Uit dit onderzoek werd afgeleid dat deze kunstmest niet kon detoneren. Ook was minstens 20.000 maal in een kunstmest van deze samenstelling gesprongen. Dat een groot deel van het materiaal op de ongeluksdag wel tot detonatie kwam, kan veroorzaakt zijn door een afwijking in de samenstelling of in de fysische toestand (bv. dichtheid) van de kunstmest.

De gevolgen van de detonatie waren 509 doden, 1952 gewonden en een geschatte schade van DM 150.000.000,—. De krater, door de explosie

Tabel I

Overzicht resultaten van enkele indeukingsproeven

Stof	Fysische toestand van de stof	Dichtheid g/cm ³	Resultaat
NH ₄ NO ₃	Kristallijn	1,0	Detonatie
NH ₄ ClO ₄	Kristallijn	1,2	Detonatie
(NH ₄) ₂ S ₂ O ₈	Kristallijn	1,1	Geen detonatie
74% KClO ₃ + 26% suiker	Poeder	1,3	Detonatie
Guanidinenitraat	Poeder	0,9	Detonatie
Nitroguanidine	Poeder	0,4	Detonatie
m-Dinitrobenzeen	Kristallijn	0,9	Detonatie
Cellulosenitraat	Chips	0,6	Detonatie
94% Ureumnitraat + 6% water	Poeder	0,8	Detonatie
Benzoylperoxide + 10% water	Poeder	0,8	Geen detonatie
Benzoylperoxide + 5% water	Poeder	0,8	Detonatie

veroorzaakt, had een diameter van 75 meter en een diepte van 15 meter.

Ook door een thermische explosie (homogene explosie) kan een detonatie worden ingeleid. In Engeland brak brand uit in de lading van een vrachtwagen waarop vaten met 60% methylethylketonperoxide waren geladen. Door de brand kwam een van de vaten tot een homogene explosie, waardoor de detonatie van het peroxide in de andere vaten werd ingeleid (massa-explosie).

Door de explosie van het trotyl in de smeltketel bij de KNSF (Muiden) op 2 juni 1966 kwam eveneens op een drietal nabijgelegen plaatsen trotyl tot detonatie [2]. Opgemerkt wordt hierbij dat trotyl niet alleen voor militaire doeleinden wordt gebruikt maar ook als grondstof dient voor de bereiding van andere organische nitroverbindingen.

Bepaling van de mogelijkheid van detonatie

Een eenvoudige methode voor de bepaling van de detonatiemogelijkheid is de indeukingsproef (fig. 1).

Met deze proef bepaalt men de mogelijkheid en de mate van ontleding van een stof onder invloed van een schokgolf, uitgaande van een detonerende trotylpatroon (30 g). De beoordeling geschiedt aan de hand van een getuigeplaat, waarop het blikken busje met de stof is geplaatst.

Bij een detonatie van de te onderzoeken stof (ca 300 ml) wordt een rond gat in de plaat geponst. Dit is het gevolg van de brisante werking van de detonatie. Eventueel kan de rand van het gat nog

inscheuren en de rest van de plaat worden verbogen door de gasdrukwerking. Wanneer de te onderzoeken stof niet kan detoneren, wordt de plaat slechts ingedeukt. Het volume van deze indeuking is een maat voor de detonatieve ontleding. Vanzelfsprekend geeft ook een inerte stof een kleine indeuking, doordat de schokgolf, uitgaande van de detonerende trotylpatroon, nog niet volledig is gedempt na het doorlopen van de 4 cm stof tussen patroon en bodem van het busje. Het volume van deze indeuking hangt af van de fysische toestand en het vulgewicht van de stof. Voor deze indeuking kan gecorrigeerd worden. In alle gevallen waarbij het effect op de plaat ligt tussen een indeuking (geen detonatie) en een rond gat (detonatie) geeft deze proef geen uitsluitsel over de detonatiemogelijkheid en dient een buisproef uitgevoerd te worden. Vloeistoffen, die soms zeer moeilijk ingeleid kunnen worden, kunnen beter direct met een buisproef worden onderzocht. In tabel I wordt een overzicht gegeven van de resultaten met enkele industriële produkten.

Een bezwaar van de indeukingsproef is dat er geen stationaire toestand kan worden aangetoond. Dit bezwaar treedt niet op bij de buisproef (fig. 2).

Bij de door TNO ontwikkelde buisproef wordt de stof opgesloten in een sterke stalen buis (volume ca. 2 liter) waarna getracht wordt de detonatie in te leiden met een springstofpatroon (pentriet) die een gelijke diameter heeft als die van de te onderzoeken stof. Het al of niet detoneren van de stof wordt vastgelegd met behulp van een axiaal in de

buis aangebrachte drukgevoelige meetdraad. Met deze meetdraad kan zowel de detonatiesnelheid (reactie schokgolf) gemeten worden als de snelheid van een niet-reaktieve schokgolf, die zich door de stof voortplant, nadat de detonatieve ontleding gestopt is. De snelheid van deze niet-reaktieve schokgolf neemt dan continu af totdat de geluidssnelheid in de stof bereikt is.

De buisproeven worden uitgevoerd in een bunker. Bij vaste stoffen wordt de buis horizontaal op een laag zand (50 cm) gelegd en daarna bedekt met een laag zand van 75 cm. Bij vloeistoffen wordt de buis vertikaal in zand geplaatst met de springstofpatroon aan de bovenzijde. Bij deze laatste proeven wordt meestal een kortere buis gebruikt (lengte 75 cm).

De drukgevoelige meetdraad [3] is opgebouwd uit een blanke koperdraad, waarom met grote slagen een partieel met nylon omgeven weerstandsdraad is gewonden. Aan de zijde van de springstofpatroon zijn beide draden met elkaar verbonden. De andere einden van de draden zijn verbonden met een voedingsbron die een konstante stroom door de draden levert. De meetdraad wordt ter plaatse van de schokgolf kortgesloten. Hierdoor zal gedurende de proef de spanning over het einde van de meetdraad dalen. Dit spanningsverloop wordt vastgelegd met behulp van een oscilloscoop en is rechtvenredig met de schokgolf-snelheid in de buis. In fig. 3 is het resultaat te zien van een snelheidsmeting met deze meetdraad in een buis die het eerste gedeelte gevuld is met pentriet en voor de rest met zand.

In tabel II wordt een overzicht gegeven van enkele resultaten van buisproeven [4].

Bepaling van de inleidingsgevoeligheid voor detonatie

Wanneer bekend is dat een stof kan detoneren, is het belangrijk te weten of deze stof al of niet gemakkelijk tot detonatie kan komen. Detonaties kunnen door verschillende oorzaken ontstaan. Voorbeelden hiervan zijn stoot-, wrijving, schokgolven en vonkoverslag. In het nu volgende gedeelte zal nader worden ingegaan op de gevoeligheid voor schokgolven. Andere ontstekingsoorzaken worden in het volgende artikel behandeld.

Voor het inleiden van een detonatie door een schokgolf zal de schokgolf een minimale sterkte dienen te hebben. Hoe geringer deze minimale sterkte, hoe gevoeliger de stof. Onderscheid dient hierbij gemaakt te worden tussen het inleiden door een niet-reaktieve schokgolf en door een reaktieve schokgolf (schokgolf plus hete deeltjes, b.v. afkomstig van een detonerende springstofpatroon). Ook is de vorm van de schokgolf bepalend voor het al dan niet inleiden van een detonatie. Uitersten hierbij zijn de schokgolf, afkomstig van een puntlading en de vlakke schokgolf.

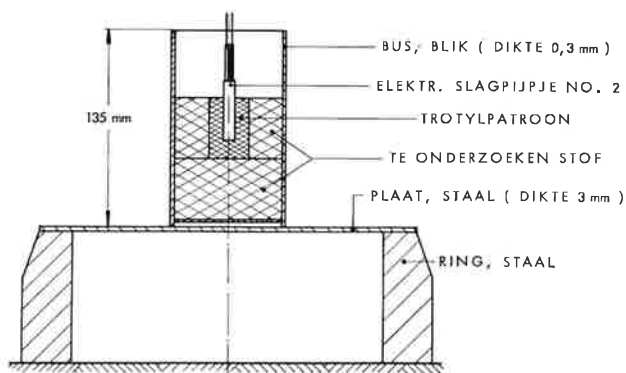


Fig. 1. Indekingsproef.

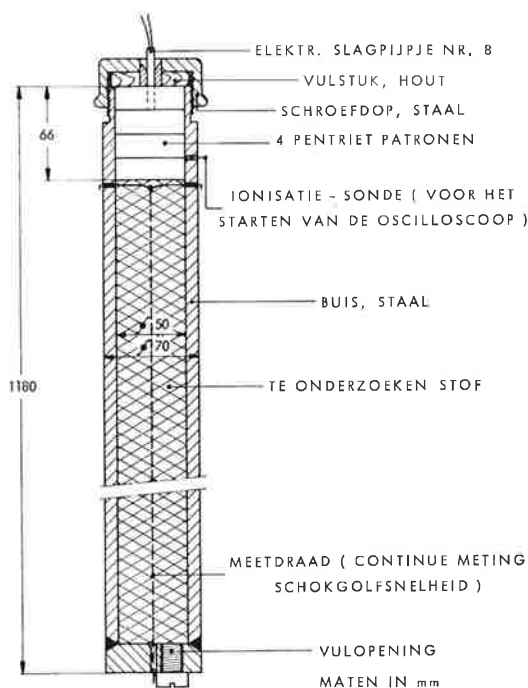


Fig. 2. Buisproef.

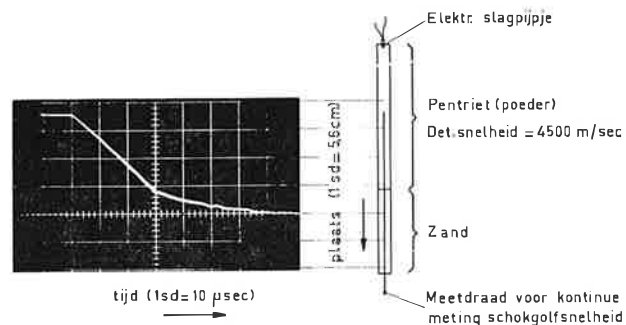


Fig. 3. Voorbeeld van een snelheidsmeting in een buis met pentriet (reaktieve schokgolf) en zand (niet-reaktieve schokgolf).

Tabel II

Overzicht resultaten van enkele buisproeven

Stof	Fysische toestand van de stof	Dichtheid g/cm ³	Resultaat	Gemeten detonatiesnelheid
NH ₄ NO ₃	Kristallijn	0,97	Detonatie	1200 m/sec
NH ₄ NO ₃	Prils	1,08	Geen detonatie	
NH ₄ NO ₃ + 0,4% olie	Prils	1,05	Detonatie	830 m/sec
NH ₄ NO ₃ (69,3%) KCl (30,7%) + 0,4% olie	Granules	0,34	Detonatie	1100 m/sec
NH ₄ NO ₃ (70,5%) CaHPO ₄ (29,5%) + 0,4% olie	Granules	0,94	Detonatie	840 m/sec
NH ₄ NO ₃ (79,3%) Kalk (20,7%) + 0,4% olie	Granules	0,84	Detonatie	1290 m/sec
NH ₄ ClO ₄	Kristallijn	1,30	Detonatie	1800 m/sec
(NH ₄) ₂ S ₂ O ₈	Kristallijn	1,12	Geen detonatie	
m-Dinitrobenzeen	Kristallijn	0,62	Detonatie	3400 m/sec
Nitromethaan	Vloeistof	1,13	Detonatie	6700 m/sec
Isopropylnitraat	Vloeistof	1,04	Detonatie	5700 m/sec

Tabel III

Overzicht van enkele resultaten over de bepaling van de inleidingsgevoeligheid voor een vlakke reactieve schokgolf

Stof	Fysische toestand van de stof	Dichtheid g/cm ³	Minimum % pentriet voor detonatie
NH ₄ NO ₃ + 0,4 olie	Granules	0,84	< 8%
NH ₄ NO ₃ (69,3%)/KCl (30,7%) + 0,4% olie	Granules	0,92	< 8%
m-Dinitrobenzeen	Poeder	0,72	< 8%
Trotyl	Schilfers	0,85	< 8%
Trotyl	Geperst	1,55	9%
Trotyl	Gegoten	1,56	12%
Isopropylnitraat*)	Vloeistof	1,04	75%

*) De gevoeligheid van vloeistoffen wordt sterk vergroot indien kleine gasbelletjes in de vloeistof aanwezig zijn. Bij deze proeven met isopropylnitraat is daarom uiterste zorg besteed om deze gasbelletjes te voorkomen. Een systematisch onderzoek over de invloed van dit effect zal nog worden uitgevoerd.

Tabel IV

Overzicht van enkele resultaten van de bepaling van de inleidingsgevoeligheid voor een puntlading (reaktief) met een diameter van 15,85 mm.

Stof	Fysische toestand van de stof	Dichtheid g/cm ³	Minimum % pentriet voor detonatie
NH ₄ NO ₃	Poeder (< 0,5 mm)	0,92	75%
NH ₄ NO ₃ + 0,4% olie	Granules	0,83	30%
NH ₄ NO ₃ + 0,4% olie	Prils	1,06	60%
NH ₄ NO ₃ (69,3%)/KCl (30,7%) + 0,4% olie	Granules	0,90	60%
m-Dinitrobenzeen	Poeder (< 0,5 mm)	0,64	20%
Trotyl	Geperst	1,55	20%

*) Bij de variatie van het pentrietgehalte in de patronen werden stappen van 5% genomen.

Een methode voor het onderzoek van de gevoeligheid van een stof voor niet-reaktieve schokgolven is de „Card gap test” [3]. Bij deze proef, die ontwikkeld is door het U.S. Bureau of Mines, bevinden zich plastic plaatjes (cards) tussen een detonerende tetrylpatroon en de te onderzoeken stof. Door de plastic plaatjes worden de hete deeltjes van de detonatiegolf tegengehouden, zodat de stof slechts wordt getroffen door een niet-reaktieve schokgolf. Bij de proef wordt het aantal plastic plaatjes en dus de dikte van de „gap” gevarieerd totdat men volgens de Bruceton, „up-and-down” methode de grens heeft vastgesteld voor 50% inleiding. De aldus gevonden dikte van de „gap” is een maat voor de gevoeligheid. Beoordeling van al of geen detonatie vindt plaats via een getuigeplaat. Voor het onderzoek van de gevoeligheid van stoffen voor reaktieve schokgolven zijn bij TNO twee methoden ontwikkeld. Deze ontwikkeling is geschied op verzoek van de Nederlandse Kunstmestindustrie [4]. Bij beide methoden wordt gebruik gemaakt van dezelfde buis als bij de bepaling van de detonatiemogelijkheid. De inleiding van de eerste proef geschiedt, evenals bij de buisproef, over de gehele dwarsdoorsnede van de buis (vlakke schokgolf), en bij de tweede proef (fig. 4) over een klein gedeelte hiervan (simulatie puntlading).

Bij beide proeven wordt de sterkte van de springstoflading gevarieerd door het pentriet te verdunnen met verschillende hoeveelheden KCl [5]. Bij de grote springstofpatronen is dit verdunnen mogelijk tot 8% pentriet. Deze patronen detoneren met een snelheid van 2200 m/s en leveren een detonatiedruk van ongeveer 19 kbar. De kleine patronen kunnen verdund worden tot 15% pentriet. Het minimale gehalte pentriet in de springstofpatroon, dat nodig is voor het inleiden van de detonatie, is de maat voor de inleidingsgevoeligheid

van de te onderzoeken stof. Het al of niet detoneren van de stof wordt weer bepaald met de weerstandsdraad axiaal in de buis. Om het begin van de inleiding niet te verstoren, begint deze draad pas op 10 cm van de springstofpatroon in de stof. In de tabellen III en IV wordt een overzicht gegeven van de resultaten van beide proeven.

Tot slot nog enkele opmerkingen over de druk die bij de detonatie van industriële produkten optreedt. In vergelijking met de detonatiedrukken bij springstoffen zijn deze meestal laag, vooral voor de ammoniumnitraathoudende stoffen. Deze detonatiedruk (d.w.z. de druk in het Chapman-Jou-

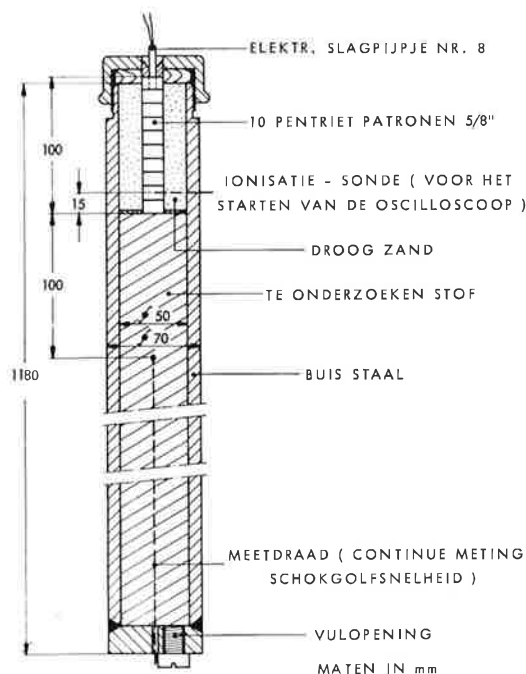


Fig. 4. Inleidingsgevoeligheidsproef (puntlading).

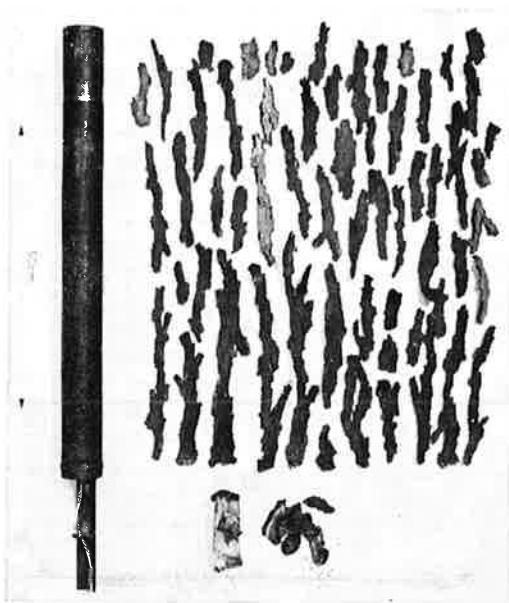


Fig. 5. Verscherving van de buis bij een proef met nitromethaan, ingeleid met een pentriet/KCl patroon (40% pentriet), detonatiesnelheid 6500 m/s, detonatiedruk ca. 120 kbar.



Fig. 6. Verscherving van de buis bij een proef met nitromethaan, ingeleid met een pentriet/KCl patroon (15% pentriet), detonatiesnelheid 1800 m/s (geluidssnelheid ca. 1350 m/s), detonatiedruk 9 kbar.

quet-vlak) kan berekend worden volgens de formule

$$P = \frac{1}{4} \rho_0 D^2$$

waarin P = druk in N/m^2

ρ_0 = dichtheid in kg/m^3

D = detonatiesnelheid in m/s

Voor een springstof met een dichtheid van $1500 kg/m^3$ en een detonatiesnelheid van $8000 m/s$ is de detonatiedruk ongeveer 240 kbar. Voor ammoniumnitraat (zie tabel II) dat een dichtheid heeft van $970 kg/m^3$ en een detonatiesnelheid van $1200 m/s$ is de detonatiedruk slechts ca 3,5 kbar. Daar de verscherving van de buis door deze detonatiedruk bepaald wordt, varieert de grootte van de scherven bij deze industriële produkten sterk. Het komt zelfs voor dat de buis in het geheel niet door de detonatie verscherfd wordt maar alleen wordt

opgebeld. In de figuren 5 en 6 wordt de verscherving van twee buizen gegeven van proeven met nitromethaan bij verschillende detonatiesnelheden. Bij nitromethaan treedt namelijk het verschijnsel op van een „low velocity detonation (LVD)”. De LVD [6] is een soort van detonatie die bij sommige vloeibare detonatiestoffen wordt waargenomen wanneer deze in een metalen buis door een zwakke donorklading wordt ingeleid. De snelheid van de LVD is altijd lager dan de geluidssnelheid in het metaal, zodat de schokgolven die via het metaal van de buiswand lopen en daardoor vóór het detonatiefront in de vloeistof kunnen komen, meehelpen de LVD in stand te houden. Bij de LVD treden andere ontledingsreacties op als bij de gewone detonatie. Bij isopropylnitraat werd geen LVD waargenomen. Onder bepaalde kondities is overgang van een LVD naar een gewone detonatie mogelijk.

Literatuur

- [1] H. Kast: Die Explosion in Oppau am 21. September 1921 und die Tätigkeit der Chemisch-Technischen Reichsanstalt. Sonderbeilage bei Z.f.d. Schiesz- und Sprengstoffwesen, 20 (1925) Nr. 11 en 12, 21 (1926), Nr. 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 en 9.
- [2] Th. M. Groothuizen, E. W. Lindeijer, H. J. Pasman. Explosivstoffen 18 (1970) pp. 97-108.
- [3] J. Ribovich, R. W. Watson, F. C. Gibson. A.I.A.A. Journal 6 (1968) p. 1260-1263.
- [4] Th. M. Groothuizen, E. W. Lindeijer, H. J. Pasman. Stikstof 14 (1970).
- [5] H. Ahrens. Explosivstoffe 12 (1964) 35 en 55.
- [6] R. W. Watson, C. R. Summers, F. C. Gibson en R. W. Van Dolah. Reprint of the fourth symposium on detonation Oct. 12-15-1965. U.S. Naval Ordnance Laboratory, White Oak, Silver Spring, Md 1 (A) pp. 121-128.

Bepaling van de gevoeligheid van een stof; zowel voor een detonatie als voor een explosieve verbranding

Th. M. GROOTHUIZEN
Technologisch Laboratorium TNO

Determination of the sensitiveness of a substance; both for detonation and deflagration

Samenvatting

Zowel de detonatie als de explosieve verbranding van een stof kunnen ontstoken worden door interne en externe oorzaken. De enige interne oorzaak van ontsteking is de plaatselijke thermische explosie. Externe oorzaken zijn er echter veel. Voorbeelden hiervan zijn stoot, wrijving, schokgolven, hete oppervlakken en vonken. Een overzicht wordt gegeven hoe de gevoeligheid van stoffen ten aanzien van enkele van deze externe oorzaken wordt onderzocht.

Summary

Detonations as well as deflagrations can be initiated by both internal and external causes. The internal cause of a detonation can only be the localized thermal explosion, but there is a variety of external causes such as impact, friction, shock-waves, hot surfaces and sparks. A survey is given of some methods of investigating the sensitiveness of substances in terms of these external causes.

Inleiding

Nadat gevonden is dat een stof kan detoneren en/of explosief kan branden, rijst de vraag of deze stof gemakkelijk of moeilijk tot een van deze twee typen van explosie kan komen. Met andere woorden: hoe gevoelig is de stof. In het algemeen kan gesteld worden dat de gevoeligheid voor het beginnen van een explosieve verbranding veel groter is dan die voor het beginnen van een detonatie.

Vele explosief brandbare organische stoffen branden bij ontsteking dikwijls eerst aan de lucht waardoor veel warmte wordt toegevoerd aan de stof, waarna deze normale verbranding meestal plotseling overgaat in een explosieve verbranding.

Onder het begrip „gevoeligheid” wordt verstaan het al dan niet gemakkelijk tot detonatie of explosieve verbranding komen van een stof door uitwendige oorzaken. Voorbeelden van deze uitwendige oorzaken zijn stoot, wrijving, schokgolven, hete gassen en voorwerpen en vonken. De bepaling van de gevoeligheid voor het inleiden van een detonatie door schokgolven is reeds behandeld in het vorige artikel. In dit artikel zullen de bepalingmethoden voor de gevoeligheid voor stoot, wrijving en elektrostatische vonken worden gegeven, welke op het ogenblik bij TNO gebruikt worden. Zowel de bepalingmethode voor de stootgevoeligheid als voor de wrijvingsgevoelig-

heid is opgenomen in het internationale „Reglement voor het vervoer over de spoorweg van gevaarlijke stoffen” (RID) [1] en de daaruit afgeleide reglementen voor het vervoer over de weg (ADR) en per binnenschip (ADN).

Een algemeen bezwaar van de hierna gegeven bepalingmethoden is dat er met een zeer klein monster wordt gewerkt. Extrapolatie van de verkregen resultaten naar praktijkomstandigheden is daardoor dikwijls niet mogelijk. De interpretatie geschiedt daarom veelal door vergelijking van de verkregen resultaten met die van een stof waarvan men in de praktijk het veilig gebruik heeft leren kennen.

Bepaling van de stootgevoeligheid

De gevoeligheid voor stoot wordt meestal bepaald met een valhamer (fig. 1).

Door de verschillende laboratoria worden allerlei soorten valhamers gebruikt. Alle valhamers werken volgens het principe dat men een gewicht al dan niet tussen geleiderails laat vallen op een kleine hoeveelheid van de te onderzoeken stof, die op een aambeeld is geplaatst. Het belangrijkste verschil tussen de valhamers is de wijze waarop de te onderzoeken stof op het aambeeld is aange-

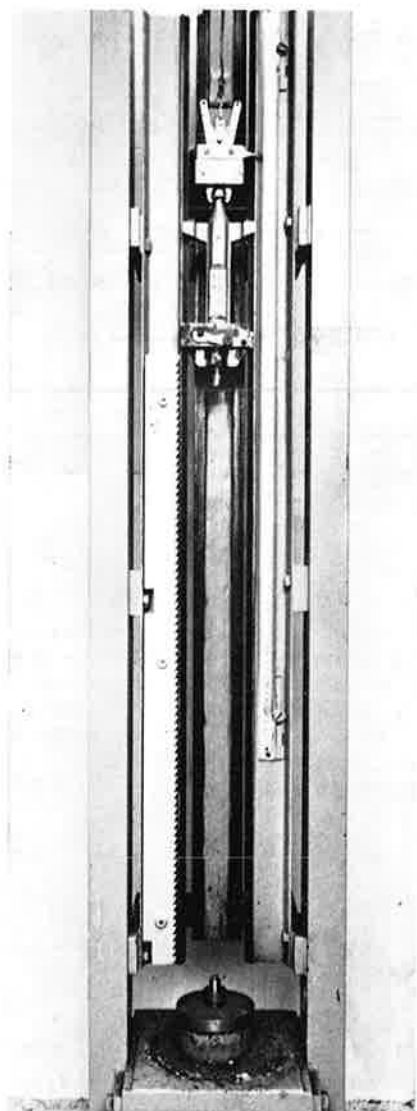


Fig. 1. Valhamer met BAM-stempels.

bracht. Andere verschillen zijn de grootte van het monster, de voorbereiding van het monster voor de proef, de beoordeling van het al of niet plaats vinden van de explosie en het vastleggen van de gevoeligheidsgrens (0% of 50% grens).

Een belangrijke eis bij een valhamer is dat het aambeeld of het gedeelte daarvan waarop de stof ligt en het metalen oppervlak dat de stof treft ge-



Fig. 2. Stempelapparaat waartussen de stootgevoeligheid van een stof wordt onderzocht volgens de BAM-methode.

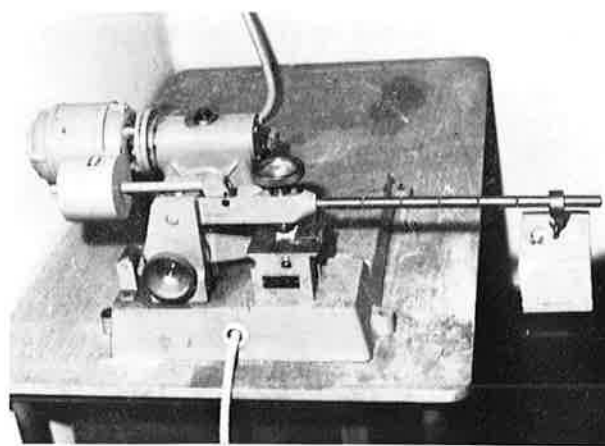


Fig. 3. Wrijvingsapparaat (BAM).

makkelijk verwisselbaar moeten zijn, omdat deze door een explosie beschadigd kunnen worden. Daar er per stof dikwijls veel proeven moeten worden uitgevoerd, moeten beide onderdelen ook niet duur zijn. De valhamer die op het ogenblik redelijk aan deze eisen voldoet, is de BAM-valhamer [2]. Deze valhamer is sinds 1967 opgenomen in het RID [1] (randnummer 1155b) en wordt op het ogenblik in vele laboratoria in West-Europa gebruikt.

Bij de BAM-valhamer wordt de stootgevoeligheid van een stof onderzocht in een stempelapparaat, bestaande uit twee stalen rollagers (diameter 10 mm) in een stalen ring (holle cilinder) (zie fig. 2). Per proef wordt 40 mm³ stof gebruikt.

Volgens het voorschrift van de proef moeten poedervormige stoffen worden gezeefd en de zeeffractie < 0,5 mm voor de proeven worden gebruikt. Niet-poedervormige stoffen moeten worden kleingemaakt, waarna de zeeffractie tussen 0,5 en 1 mm wordt gebruikt. Bij produkten die uit meerdere componenten zijn samengesteld, kan deze methode van monstervoorbereiding niet letterlijk gevolgd worden daar er een monster kan ontstaan met een andere samenstelling dan het oorspronkelijke. Bij de valhamer worden gewichten van 1, 5 en 10 kg gebruikt. Als maat voor de stootgevoeligheid van een stof wordt opgegeven het valgewicht (in kg) en de laagste valhoogte waarbij uit 6 proeven ten minste 1 explosie (knal) optreedt. Dikwijls wordt hieruit de valenergie berekend. Daar het gewicht de stof slechts eenmaal mag treffen, is naast het valgewicht een tandheugel aangebracht. Door de botsing van het gewicht schiet uit de zijkant van het gewicht een pal die in de heugel wordt opgevangen.

In tabel I wordt een overzicht gegeven van enkele resultaten van de BAM-valhamer met vaste industriële produkten.

Bij het onderzoek van vloeistoffen met de BAM-valhamer hangt het resultaat dikwijls af van de methode waarop de vloeistof in het stempelapparaat is aangebracht. Wordt de vloeistofdruppel

Tabel I

Overzicht resultaten BAM-valhamer met enkele vaste explosieve stoffen

Stof	Valgewicht	Kleinste valhoogte waar bij minstens 1x explosie uit 6 proeven	Min. Val-energie
m-Dinitrobenzeen	10 kg	>50 cm	>5 kgm
Ammoniumnitraat	10 kg	>50 cm	>5 kgm
Ammoniumnitraat + 2% papier	5 kg	50 cm	2,5 kgm
Benzoylperoxide	1 kg	20 cm	0,2 kgm
Benzoylperoxide + 5% water	1 kg	30 cm	0,3 kgm
Benzoylperoxide + 10% water	5 kg	30 cm	1,5 kgm

Tabel II

Overzicht resultaten BAM-valhamer met enkele vloeistoffen¹⁾

Stof	Minimale valenergie	
	Methode I (vloeistofcilinder met lucht er omheen)	Methode II (luchtbel met vloeistof er omheen)
Isopropylnitraat	>5 kgm	<0,1 kgm
Nitromethaan	0,7 kgm	<0,1 kgm
Methylethylketonperoxide 50%	>5 kgm	0,2 kgm
Tert-butylperbenzooat	>5 kgm	0,06 kgm
Bis (3.5.5-trimethylhexanoyl) peroxide	>5 kgm	>5 kgm
Tert-butylperdiethylacetaat	>5 kgm	2,0 kgm

¹⁾ Dit onderzoek is uitgevoerd in samenwerking met het Veiligheidslaboratorium van Noury en v. d. Lande.

bijv. met een pipet midden op het onderstempel aangebracht dan ontstaat, nadat het bovenstempel volgens voorschrift op 1 mm boven het onderstempel is aangebracht, een vloeistofcilinder tussen beide stempels. Om deze vloeistofcilinder is dan een ring van lucht aanwezig. Indien echter de vloeistof met de pipet via de stalen ring in het stempelapparaat wordt aangebracht, ontstaat na het aanbrengen van de bovenstempel precies het tegenovergestelde. Daar de vloeistofring in dit laatste geval de luchtcilinder geheel omsluit, zal bij het treffen van het bovenstempel door het valgewicht de lucht adiabatisch gekomprimeerd worden.

De hierdoor ontstane luchtbel van zeer hoge temperatuur kan een (gedeeltelijke) ontleding van de vloeistof veroorzaken, waardoor een knal wordt

veroorzaakt. In tabel II worden de resultaten gegeven van beide methoden van vullen van het stempelapparaat met enkele vloeistoffen.

Bepaling van de wrijvingsgevoeligheid

Ook voor de bepaling van de wrijvingsgevoeligheid van explosieve stoffen wordt apparatuur gebruikt die door de BAM ontwikkeld is [3]. Bij dit apparaat (fig. 3) wordt 10 mm³ van de te onderzoeken stof op wrijving belast tussen een porseleinen plaatje en een porseleinen stift.

De belasting op de porseleinen stift kan gevarieerd worden tussen 0,5 en 36 kgf. Bij de proef wordt het porseleinen plaatje met daarop de te onderzoeken stof over een afstand van 10 mm eenmaal heen en weer verplaatst. Als maat voor de gevoe-

Tabel III

Overzicht resultaten BAM-wrijvingsapparaat met enkele vaste explosieve stoffen

Stof	Minimale belasting porseleinen stift waarbij minstens 1 positieve waarneming uit 6 proeven
m-Dinitrobenzeen	> 36 kgf
Ammoniumnitraat	> 36 kgf
Ammoniumnitraat + 2% papier	> 36 kgf
Benzoylperoxide	16 kgf
Benzoylperoxide + 5% water	36 kgf
Benzoylperoxide + 10% water	> 36 kgf

ligheid van een stof wordt de minimale belasting van de stift opgegeven, waarbij uit zes proeven ten minste eenmaal een ontvlaming, knetteren of explosie optreedt. De monstervoorbereiding is gelijk aan die bij de BAM-valhamer. Bij vloeistoffen en pasta's treedt bij het apparaat een smerende werking op terwijl laagvisceuze vloeistoffen dikwijls in het porselein van het plaatje dringen. De wrijvingsgevoeligheid van deze stoffen kan daarom niet onderzocht worden volgens deze methode.

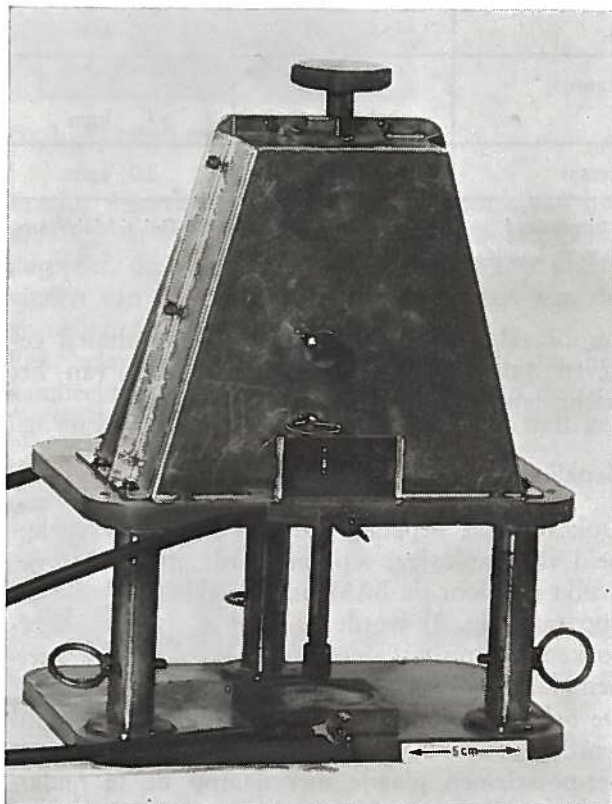


Fig. 4. Vonkdoorslagapparaat.

In tabel III wordt een overzicht gegeven van enkele resultaten met vaste stoffen.

Bepaling van de gevoeligheid van een stof voor elektrostatische vonken

De bij TNO gebruikte apparatuur voor de bepaling van de gevoeligheid voor elektrostatische vonken is afgeleid van soortgelijke apparatuur van het Bureau of Mines [4].

De te onderzoeken stof wordt bij deze proef in een pvc ringetje (volume 150 mm³) op een geaarde stalen plaat gebracht. Boven de stof bevindt zich een elektrode die verbonden is met een opgeladen condensator. De elektrode wordt met een konstante snelheid naar beneden verplaatst totdat de vonkoverslag plaats vindt. Fig. 4 geeft een afbeelding van het gebruikte vonkdoorslagapparaat.

De elektrode is een grammofoonnaald en is dus gemakkelijk verwisselbaar. Bij de proeven kunnen zowel de spanning over de condensatoren als de capaciteit van de condensatoren gevarieerd worden. Uit de spanning en de capaciteit kan de energie ($\frac{1}{2} CV_0^2 - \frac{1}{2} CV_e^2$) berekend worden. De minimale energie die nodig is voor de ontsteking van de explosieve stof is een maat voor de gevoeligheid. Voor droog benzoylperoxide ligt deze energie tussen 0,06 J (geen ontsteking) en 0,07 J (ontsteking) en voor m-dinitrobenzeen tussen 2,3 J en 2,4 J.

Literatuur

- [1] Règlement international concernant le transport des marchandises dangereuses par chemin de fer.
- [2] H. Koenen, K. H. Ide en K. H. Swart. Explosivstoffe 2 (1961) pp. 34-37.
- [3] H. Koenen, K. H. Ide en K. H. Swart. Explosivstoffe 2 (1961) pp. 32-34.
- [4] Test procedures. Rapport Explosives Research Laboratory van het Bureau of Mines, Pittsburgh PA, februari 1963.

Beveiliging tegen het ontstaan van explosies in stookinstallaties

G. SNELLINK

Centraal Technisch Instituut TNO, afd. Warmtetechniek

Safety aspects of preventing explosions in firing installations

Samenvatting

Bij stookinstallaties wordt gewerkt met explosieve brandstof-lucht mengsels in de aanwezigheid van ontstekingsbronnen. Uitgaande van de verschillende bedrijfsomstandigheden kunnen de omstandigheden waardoor gevaar voor een explosie optreedt worden onderkend. Dit leidt tot eisen ten aanzien van de bedrijfsvoering en de benodigde beveiligingsapparatuur.

Summary

In firing installations explosive fuel-air mixtures are handled in the presence of ignition sources. Starting from the various operating conditions it is possible to detect the conditions that may give rise to explosions. This leads to the formulation of requirements with regard to operating procedures and safety appliances.

Inleiding

Voor het ontstaan van een explosie van het deflagratie-type moet aan twee voorwaarden zijn voldaan, n.l. er moet een explosief mengsel aanwezig zijn en er moet een ontstekingsinleiding plaatsvinden. Bij stookinstallaties worden brandstof en verbrandingslucht in een nagenoeg stoechiometrische verhouding toegevoerd, gemengd en door de vlam tot ontsteking gebracht. Hierbij treedt een verbranding op van het type diffusieve verbranding (indien brandstof en lucht in de vlam gemengd worden) of van het type progressieve explosieve verbranding (indien de componenten reeds gemengd zijn voor het bereiken van het verbrandingsfront.)

Doordat er doelbewust voor gezorgd wordt dat, onder bedrijfscondities, de hoeveelheid gevormd mengsel direct wordt verbrand, kan zich nagenoeg geen volume mengsel opbouwen, zodat een discontinuïteit in het verbrandingsproces niet tot een deflagratie en de bijbehorende snelle drukstijging kan leiden.

Discontinuïteiten in het bedrijf zoals onder andere een regelstop, een start of een langere periode van stilstand kunnen echter wel de mogelijkheden tot de vorming van grotere hoeveelheden mengsel leveren. Aan een van de beide voorwaarden voor het ontstaan van een explosie is dan reeds voldaan. Aangezien de ontstekingsbron, onder voor ontsteking gunstige omstandigheden, slechts zeer weinig energie ($< 1 \text{ MJ}$) hoeft toe te voeren voor

een ontstekingsinleiding, is de controle hiervan moeilijk. Bovendien zal voor het starten van het verbrandingsproces een ontstekingsbron gebruikt worden met een energietoevoer die enige orden van grootte hoger is dan de bovengenoemde, omdat de zekerheid van ontsteken wordt geëist.

Het is hieruit duidelijk dat de beveiligingsmaatregelen gebaseerd dienen te zijn op voorkoming van de vorming van een volume explosief mengsel, met als belangrijke nevenvoorwaarde dat er voor gezorgd wordt dat op het moment dat er een ontstekingsbron wordt geactiveerd geen volume explosief mengsel aanwezig is.

De beveiligingen laten zich het duidelijkst demonstreren aan de hand van een gasgestookte installatie, zodat deze als voorbeeld is genomen. Hoewel gas door zijn eigenschap van het snel mengen met lucht gemakkelijk een explosief mengsel kan vormen, houdt het gebruik van een gasgestookte installatie als voorbeeld niet in dat alleen gas tot explosies aanleiding zou kunnen geven en er bij andere vormen van brandstof niet met de mogelijkheid van explosies rekening moet worden gehouden. Een aantal van de bij stookinstallaties toegepaste filosofieën en daaruit resulterende werkwijzen en beveiligingen kan ook met succes worden toegepast op andere situaties.

Normaal bedrijf

Tijdens normaal bedrijf worden een hoeveelheid gas en de benodigde verbrandingslucht aan de in-

stallatie toegevoerd. De hoeveelheid lucht is enigszins groter dan voor stoichiometrische verbranding nodig is. De luchtvermaat (ongeveer 5 tot 15%) wordt bepaald door het feit dat enerzijds bij de stoichiometrisch juiste hoeveelheid de kans op onverbrande resten (hoofdzakelijk CO) aanwezig is, terwijl anderzijds bij een toenemende luchtvermaat de warmteverliezen in de verbrandingsgassen die door de schoorsteen worden afgevoerd, toenemen.

De brander, die verbrandingstechnisch gezien het hart van de installatie vormt, heeft tot taak te zorgen dat de brandstof en de lucht die aan de installatie worden toegevoerd goed gemengd en zo snel mogelijk verbrand worden. Het is echter begrijpelijk dat dit alleen binnen bepaalde grenzen mogelijk is. De vlam wordt namelijk gestabiliseerd daar waar de snelheid en richting van het toegevoerde mengsel gelijk doch tegengesteld zijn aan de snelheid waarmee de vlam zich door het mengsel wil verplaatsen.

Deze laatste snelheid, de zogenaamde verbrandingssnelheid, is een fundamentele eigenschap van het gas-lucht mengsel; de grootte ervan wordt echter wel beïnvloed door de temperatuur en vooral de turbulentie.

Verandert nu de uitstroomsnelheid uit de brander, b.v. door belastingsvariaties, dan zal ook dit stabilisatiepunt (of zone) verschuiven en daarmee het punt waar het mengsel continu ontstoken wordt. Om de accumulatie van onverbrand explosief mengsel tegen te gaan dient de stabilisatiezone dicht op de brander te liggen. Bereikt de snelheid een te grote waarde, dan zal de vlam niet langer bij de brander gestabiliseerd worden maar afblazen en daarbij meestal doven. Een onderwaarde van de snelheid waarmee gas en lucht uitstromen is gegeven door of de onmogelijkheid nog goed te mengen met als gevolg de vorming van onverbrande componenten of doordat de vlam zich stroomopwaarts tegen het mengsel in beweegt en dooft bij de branderopening (eventueel zich terugtrekt in de brander, z.g. vlamterugslag) bij branders waar de menging reeds in of vóór de brander plaatsvindt.

De brander dient als belangrijkste onderdeel van de beveiligingsketen derhalve zo geconstrueerd te zijn dat bij alle gewenste belastingen, en uiteraard het gehele tussenliggende gebied, een stabiele vlam gevormd wordt in de nabijheid van de brandermond.

Doven van de vlam

Er blijven echter, ondanks een juiste branderkeuze, toch mogelijkheden bestaan dat de vlam op een ongewenst ogenblik dooft. Dit is uiteraard de gevaarlijkste situatie, omdat het aangevoerde mengsel niet meer wordt ontstoken en accumuleert in de vuurhaard en de overige ruimten van de installatie waardoor normaal de verbrandingsgassen stromen. Een aantal oorzaken voor het doven van de vlam

ligt voor de hand. Als de verbrandingsluchtventilator uitvalt of de gastoevoer tijdelijk wordt onderbroken is het duidelijk dat de samenstelling van het mengsel dat wordt aangeboden buiten de brandbaarheidsgrenzen (de explosiegrenzen) komt te liggen en de vlam dooft. Dit probleem zou kunnen worden opgelost door het toepassen van een vlamwaarnemingsorgaan, een zogenaamde vlambeveiliging, dat bij het wegvallen van de vlam direct de brandstoftoevoer stopt.

Hoewel de vlambeveiliging een essentieel onderdeel van het beveiligingssysteem is, is dit niet zijn functie. Alle storingen in de vlam die door duidelijke oorzaken van buitenaf teweeggebracht worden, mogen niet eerst dan gesignaleerd worden als ze reeds tot het doven van de vlam aanleiding gegeven hebben, doch moeten in een zo vroeg mogelijk stadium worden gesignaleerd en ingrijpen op de brandstoftoevoer. Deze overweging is in de beveiligingsschema's voor de wat grotere installaties terug te vinden, b.v. luchtgebrekschakelaars, schakelaars voor te lage gasdruk, idem voor te hoge gasdruk (overbelasting), enz.

De functie van de vlambeveiliging blijft dan beperkt tot het constateren van de aanwezigheid van de vlam bij de start en beveiliging tegen vlamstoring door andere, minder voor de hand liggende, invloeden (b.v. defect van de brander) tijdens bedrijf.

De snelheid waarmee de gastoevoer moet worden afgesloten volgt uit de mogelijkheid dat na een vlamstoring toch een nagenoeg stoichiometrisch mengsel aan de verbrandingsruimte zou kunnen worden toegevoerd, b.v. doordat de vlam dooft onder invloed van een tijdelijke verstoring in een van de condities. Dit mengsel kan bij het instromen in de verbrandingsruimte weer ontstoken worden. Onder gunstige omstandigheden is de benodigde ontsteekenergie in de orde van grootte van 1 millijoule en het is duidelijk dat een nagloeiende vuurhaardbemetseling of een idem koolstofafzetting op een wand daarom voldoende energie kan leveren voor een ontsteking. De grootte van de drukstijging die het gevolg is van de hierdoor ingeleide deflagratie wordt bepaald door de mate waarin de verbrandingsruimte zich inmiddels heeft kunnen vullen met een explosief mengsel, derhalve door het tijdsverloop tussen het doven van de vlam en het afgesloten zijn van de brandstoftoevoer. Deze tijd is voor gasgestookte installaties op praktische gronden gekozen op 3 seconden. Hierbij is 1 seconde gereserveerd voor het signaleren van de afwezigheid van de vlam door de vlambeveiliging. Zowel bij optische vlambeveiligingen als bij systemen waarbij gebruik gemaakt wordt van de ionisatie in de vlam is deze tijd realiseerbaar. De bestaande apparatuur blijft in het algemeen hier duidelijk onder. (Het minimum van de reactietijd van de beveiliging wordt bepaald door de wens dat

niet iedere fluctuatie in de vlam tot ingrijpen moet leiden; kleine fluctuaties komen namelijk steeds voor, onder meer door de hevige turbulentie die wordt opgewekt door de snelle menging van gas en lucht.)

De 2 overige seconden zijn bestemd voor de sluit-tijd van de gastoevoerkleppen. Weliswaar kan dit sluiten met een veel grotere snelheid gebeuren, maar de wens tot het vermijden van drukstoten in de gasleiding als gevolg van een plotseling afsluiten van de gasroom, vergt een beperkte sluitsnelheid. (Ook het vermijden van drukstoten in de gasleiding is een veiligheidsaspect, namelijk ten opzichte van andere apparatuur die op hetzelfde voedingsnet is aangesloten. Hierbij kan namelijk ten gevolge van een drukstoot de schakelaar voor te hoge gasdruk, die dient om overbelasting te voorkomen, in werking treden en tot ongewenste uitschakeling leiden.)

Starten van de brander

Het starten van een stookinstallatie moet uit veiligheidsoogpunt gezien wel als de meest precaire toestand worden aangemerkt¹⁾. Tijdens de startperiode wordt namelijk doelbewust een ontstekingsbron in de vuurhaard gebracht, veelal door bekrachtiging van de elektrische ontsteking. Dit nu is in principe alleen geoorloofd indien er een absolute zekerheid bestaat dat de verbrandingsruimte niet gevuld is met een explosief mengsel. Deze zekerheid is echter op een willekeurig moment tijdens de stilstand niet aanwezig.

Het stoppen van de installatie tijdens de voorafgaande periode kan namelijk verschillende oorzaken hebben, niet alleen een normale stop omdat er geen warmtevraag meer bestond, maar ook de mogelijkheid van een stop als gevolg van het ingrijpen van beveiligingsapparatuur, waaronder de vlambeveiliging. Het is derhalve niet bekend welke condities in de verbrandingsruimte heersten toen de vlam werd gedoofd. Daarnaast bestaat tevens de mogelijkheid dat de brandstoftoevoer in de rustperiode niet geheel is afgesloten als gevolg van lekkende of defecte afsluiters.

De beveiligingsprocedure bevat daarom drie onderdelen die deze gevaren elimineren; namelijk

- het vergrendelen van de installatie indien het doven van de vlam is waargenomen door de vlambeveiliging, of het ingrijpen van een aantal beveiligingsschakelaars. Dit vergrendelen betekent dat de installatie niet automatisch meer gestart kan worden, doch slechts na een menselijke ingreep;

¹⁾ Uit de analyse van explosies die, over een groot aantal jaren verspreid, in Amerika zijn opgetreden is gebleken dat in ruim 90% van de gevallen de explosie optrad gedurende de startfase of de daarop volgende fase van lage belasting van de installatie.

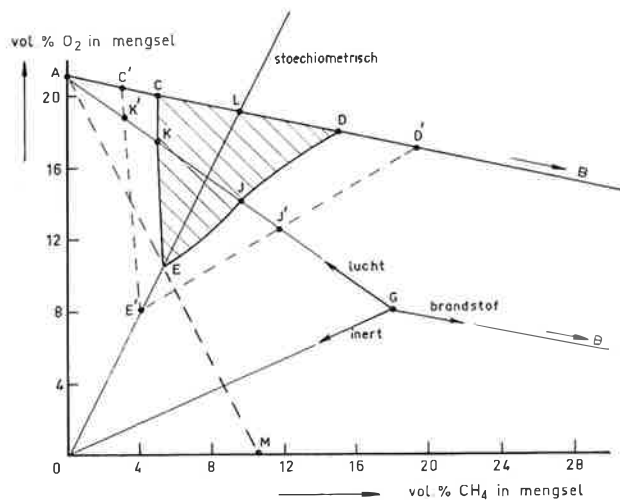


Fig. 1. Explosiediagram voor methaan. (Mengen.)

- het gebruik van een „gasslot” in de gastoevoer;
- het spoelen van de vuurhaard met lucht direct voorafgaande aan de start.

Het gasslot wordt gevormd door twee achter elkaar geschakelde gaskleppen. Omdat de kans dat beide gelijktijdig defect raken zeer klein is, geeft dit een grote mate van veiligheid tegen het inlekkende van gas in de verbrandingsruimte tijdens stilstand. Tussen beide afsluiters in wordt het systeem drukloos gemaakt door een derde afsluiter, die opent als de beide andere gesloten zijn, en die een verbinding met de atmosfeer tot stand brengt.

Daar de verhoogde veiligheid alleen gewaarborgd is zolang niet een van beide afsluiters lekt, is een regelmatige controle hierop noodzakelijk. Er zijn ook systemen ontwikkeld waarbij deze controle automatisch wordt uitgevoerd, hetgeen vooral van belang is voor installaties die slechts weinig worden geïnspecteerd, zoals bijv. grote CV-installaties in scholen en kantoren.

Spoelen van de vuurhaard

Om het spoelen van de vuurhaard te beoordelen is het nuttig het explosiediagram te bekijken zoals weergegeven in figuur 1. Het explosiediagram vormt een gedeelte van het driehoeksdiagram voor zuurstof-methaan-inert mengsels. Het gearceerde gebied C E D geeft de explosieve mengsels weer bij 20°C. C en D zijn punten van de lijn waarop alle aardgas-lucht mengsels liggen en vormen de onderste en bovenste explosiegrens (respectievelijk 5 en 15 vol.% voor SH₄-lucht-mengsels). Indien inertie worden toegevoegd, bijvoorbeeld CO₂ bij verbranding, schuiven de explosiegrenzen naar elkaar en blijven daarbij ongeveer symmetrisch liggen rond

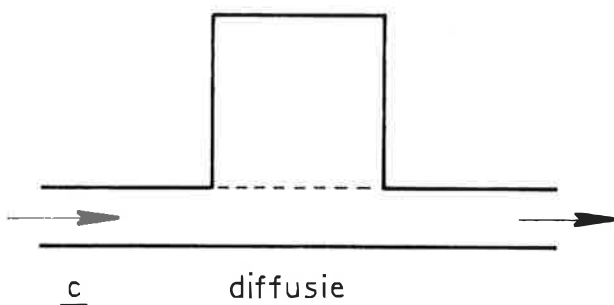
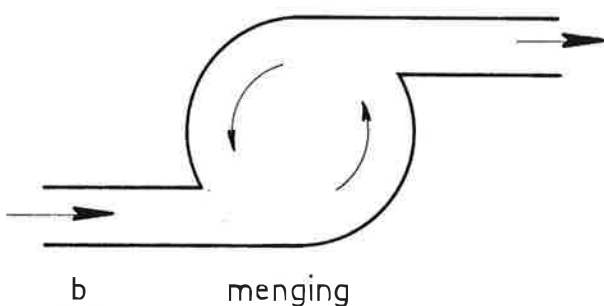
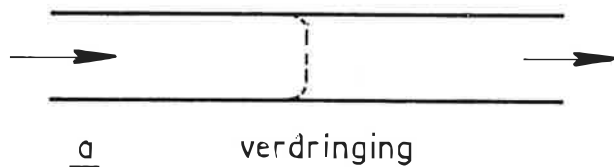


Fig. 2. Spoelprocessen.

de lijn voor stoechiometrische gas-lucht mengsel, n.l. de lijn die L met de oorsprong verbindt.

Bij hogere temperaturen schuiven de grenzen naar buiten, bijvoorbeeld naar C' E' D'. Uitgaande van een willekeurige samenstelling van de vuurhaardvulling, bijvoorbeeld het niet-explosieve mengsel dat door G wordt weergegeven, zijn er drie mogelijkheden om de uitgangscondities op bekende punten te brengen. Dit zijn spoelen van de vuurhaard met brandstof, met lucht en met inert gas.

Spoelen met brandstof komt uiteraard niet ter sprake. Wel kan de uitgangsconditie van niet-explosief worden bereikt, namelijk punt B, waarin de vuurhaard geheel met gas is gevuld, maar dit betekent alleen het verplaatsen van de moeilijkheden enerzijds naar de schoorsteentop en anderzijds naar een fase tijdens bedrijf, omdat daarbij toch weer lucht wordt toegevoerd en het explosiediagram moet worden doorlopen om uiteindelijk in A, de normale toestand bij niet in bedrijf zijnde installaties, te komen.

Spoelen met een inert gas, G O in explosiediagram, eventueel gevolgd door spoelen met lucht, O A, blijkt de enige goede oplossing, daar hierbij het gebied van de explosieve mengsels niet wordt doorlopen. Toch wordt dit systeem niet toegepast en wel om twee redenen. Ten eerste is voor een dergelijke bedrijfsvoering een grote voorraad inert gas nodig, hetgeen een aanzienlijke investering in drukvaten en dergelijke betekent, terwijl een storing in de aanvoer betekent dat de installatie niet kan worden gestart.

Dit laatste werkt het overbruggen van beveiligingen of procedures in de hand, hetgeen uiteraard ten enenmale ontoelaatbaar is. Ten tweede zal in een normale vuurhaard door de invloed van thermische trek of van de door de wind opgewekte schoorsteentrek steeds een doorspoelen met lucht plaatsvinden, zodat het proces van doorspoelen met een inert gas niet zal verlopen volgens G O, maar van G naar een punt tussen O en A, afhankelijk van de toevoersnelheden van lucht en inert. Indien de menging van lucht en inert slecht is, is het plaatselijk bereiken van het explosiegebied toch mogelijk.

Bij het spoelen met lucht wordt in dit geval het explosiegebied doorlopen, namelijk tussen de punten J en K op de lijn G A. Dit zal echter niet het geval zijn indien het punt G links van de lijn LO is gelegen, dus als het mengsel meer lucht bevat dan voor stoechiometrische verbranding nodig is.

Doven van de vlam zal in dit diagram optreden bij het bereiken van de grenzen van het explosiegebied, op de lijn CE (of C'E') voor luchtrijke mengsels en op de lijn DE voor brandstofrijke mengsels. Hieruit volgt derhalve dat het stoken met een geringe luchtvermaat niet alleen nuttig is voor een economisch brandstofverbruik, maar ook een duidelijk veiligheidsaspect heeft, n.l. om de samenstel-

ling van de vuurhaardvulling bij doven van de vlam links van de lijn L E O af te beelden in het explosiediagram.

Bij het spoelen zijn drie hoofdtypen te onderkennen (zie figuur 2):

- a. verdringing;
- b. volledige menging;
- c. diffusie.

ad. a. In dit geval zal de toegevoerde lucht het in de vuurhaard aanwezige mengsel geheel voor zich uitdrukken. Er is daarbij een scherp scheidingsvlak tussen spoellucht en de oorspronkelijk aanwezige vulling. Het is duidelijk dat een dergelijk geval zich zelden zal voordoen, behalve in nauwe kanalen en bij lage snelheden.

ad. b. Hier stroomt verse lucht de vuurhaard binnen en mengt zich geheel met de inhoud die dus wordt verdund. De stroom die de vuurhaard verlaat, heeft een samenstelling gelijk aan het verdunde mengsel in de vuurhaard. Dit is het type spoelproces dat we kunnen verwachten bij grote snelheden (wervels) en ruime kanalen.

ad. c. Er is hier een duidelijke kortsluiting voor de spoelluchtstroom van ingang naar uitgang. De rest van de ruimte vormt een „dood watergebied”. Slechts concentratieverschillen tussen de samenstelling van de vuurhaard en de spoellucht leveren een drijvende kracht om de verandering van samenstelling te weeg te brengen.

Het is duidelijk dat in geval a. een hoeveelheid spoellucht gelijk aan de inhoud van de te spoelen ruimte voldoende is voor algehele verversing. Voor geval b. valt af te leiden dat de samenstelling in de te spoelen ruimte zal veranderen volgens

$$\frac{C_t}{C_0} = e^{-a}$$

waarin a = het verversingsvoud, de verhouding van toegevoerde spoellucht tot vuurhaardinhoud.

Van geval c. is het verloop van de samenstelling als functie van de tijd nauwelijks voor berekening toegankelijk daar zowel vorm als afmeting van de ruimte een rol speelt. Bovendien zijn er in een praktische situatie nog andere drijvende krachten die zowel mee als tegen kunnen werken, zoals verschil in soortelijk gewicht en verschil in temperatuur bij een nog warme installatie.

Voor het eenvoudige geval van een laag mengsel die aan een zijde aan de wand en aan de andere zijde aan de spoellucht grenst, geldt:

$$\frac{C_w}{C_0} = f \left(\frac{D \cdot t}{X^2} \right)^*$$

waarin

C_w = de concentratie aan de wand

C_0 = de beginconcentratie

D = de diffusiecoëfficiënt (cm²/sec)

t = de tijd (sec)

X = de laagdikte (cm)

Voor $C_w/C_0 = 0,1$, een nog hoge waarde, wordt $D \cdot t/X^2 = 1$ zodat met $D \approx 0,3$ cm²/sec voor een laagdikte van 20 cm reeds een spoeltijd wordt gevonden van ongeveer 1300 seconden, dus ruim 20 minuten.

De conclusie die hieruit getrokken moet worden, is dat een installatie waarin delen voorkomen die niet goed gespoeld kunnen worden, beslist onveilig is.

Het is duidelijk dat in praktische gevallen niet één systeem afzonderlijk zal voorkomen maar steeds combinaties. In een goed ontworpen installatie zal de aanwezigheid van gebieden met stromingsstilstand nauwelijks voorkomen, doordat in deze gebieden de warmteoverdracht zeer gering is en de installatie daardoor nodeloos groot en duur zou worden. Voor goed ontworpen installaties kan het spoelvoud daarom bepaald worden met behulp van geval b. Uitgaande van de ongunstigste begincondities nl. de gehele ruimte met gas gevuld $C_0 = 100\%$, dient het spoelvoud zodanig te zijn dat de concentratie bij beëindiging van het spoelen ver beneden de onderste explosiegrens ligt.

Bij een spoelvoud van 8, zoals algemeen aanvaard, is de gasconcentratie derhalve gedaald tot beneden 0,05%. Deze concentratie ligt, ook bij hogere temperatuur, ver buiten de explosiegrenzen. De volledige menging wordt daarbij nagestreefd door een grote spoelluchtsnelheid voor te schrijven, dus turbulentie met bijbehorende wervels. Tevens wordt een minimumspoelperiode voorgeschreven die, tezamen met de veiligheidsmarge die in het spoelvoud van 8 is opgesloten, kleine plaatselijke stagnatiegebiedjes afdoende kan verversen. Dit geldt echter alleen zeer kleine dode hoeken, die altijd kunnen voorkomen.

Slotopmerkingen

De veiligheidsaspecten van het stoken van aardgas zijn in ons land het onderwerp van voortdurende studie. Doordat er slechts een beperkt aantal leveranciers optreedt, die onderling niet in een concurrentiepositie verkeren, kunnen de maatregelen die uit veiligheidsoverwegingen moeten worden getroffen worden vastgelegd in voorschriften. Voor

* Vanwege de analogie van diffusieprocessen met warmtegeleiding is gebruik gemaakt van warmtegeleidingsoplossingen (b.v. VDI-Wärme atlas).

kleinere installaties betreft het voorschriften van het VEG-Gasinstituut, terwijl voor installaties met capaciteiten groter dan 600 kJ/s de voorschriften worden opgesteld door de VISA (Commissie Veiligheid van Installaties voor het Stoken van Aardgas).

Voor andere brandstoffen liggen de problemen ingewikkelder. Ook hier echter wordt door commissies samengesteld uit fabrikanten, leveranciers, verbruikers en vertegenwoordigers van TNO, Arbeidsinspectie en Stoomwezen, aan het formuleren van veiligheidseisen gewerkt (o.a. door de Commissie Veiligheid Olie- en Gasgestookte Ketels en de Commissie Veiligheid Stoken in de *Proces Industrie*).

Uit de eerder genoemde Amerikaanse onderzoeken naar explosieoorzaken is tevens gebleken dat in tenminste 90% van de gevallen de oorzaak

is gelegen in fouten van het bedienend personeel of in niet goed werkende apparatuur.

De eerste oorzaak kan grotendeels worden weggenomen door automatisering van de veiligheidsprocedures, zoals bijvoorbeeld de volgorde van de handelingen bij het starten van een installatie.

De tweede oorzaak, n.l. het niet goed functioneren van apparatuur, kan worden bestreden door keuring van belangrijke componenten van het beveiligingssysteem. Een belangrijke stap op dit gebied is bijvoorbeeld het vergelijkende onderzoek naar de eigenschappen van vlambeveiligingsapparatuur werkend volgens het principe van de detectie van door de vlam uitgezonden UV-straling.

Dit onderzoek is in het C.T.I.-TNO uitgevoerd in opdracht van de W.I.B. (Werkgroep Instrumenten Beoordeling), waarvan een aantal grootverbruikers lid is.

niet iedere fluctuatie in de vlam tot ingrijpen moet leiden; kleine fluctuaties komen namelijk steeds voor, onder meer door de hevige turbulentie die wordt opgewekt door de snelle menging van gas en lucht.)

De 2 overige seconden zijn bestemd voor de sluit-tijd van de gastoevoerkleppen. Weliswaar kan dit sluiten met een veel grotere snelheid gebeuren, maar de wens tot het vermijden van drukstoten in de gasleiding als gevolg van een plotseling afsluiten van de gastroom, vergt een beperkte sluitsnelheid. (Ook het vermijden van drukstoten in de gasleiding is een veiligheidsaspect, namelijk ten opzichte van andere apparatuur die op hetzelfde voedingsnet is aangesloten. Hierbij kan namelijk ten gevolge van een drukstoot de schakelaar voor te hoge gasdruk, die dient om overbelasting te voorkomen, in werking treden en tot ongewenste uitschakeling leiden.)

Starten van de brander

Het starten van een stookinstallatie moet uit veiligheidsoogpunt gezien wel als de meest precaire toestand worden aangemerkt¹⁾. Tijdens de startperiode wordt namelijk doelbewust een ontstekingsbron in de vuurhaard gebracht, veelal door bekrachtiging van de elektrische ontsteking. Dit nu is in principe alleen geoorloofd indien er een absolute zekerheid bestaat dat de verbrandingsruimte niet gevuld is met een explosief mengsel. Deze zekerheid is echter op een willekeurig moment tijdens de stilstand niet aanwezig.

Het stoppen van de installatie tijdens de voorafgaande periode kan namelijk verschillende oorzaken hebben, niet alleen een normale stop omdat er geen warmtevraag meer bestond, maar ook de mogelijkheid van een stop als gevolg van het ingrijpen van beveiligingsapparatuur, waaronder de vlambewaking. Het is derhalve niet bekend welke condities in de verbrandingsruimte heersten toen de vlam werd gedoofd. Daarnaast bestaat tevens de mogelijkheid dat de brandstoftoevoer in de rustperiode niet geheel is afgesloten als gevolg van lekkende of defecte afsluiters.

De beveiligingsprocedure bevat daarom drie onderdelen die deze gevaren elimineren; namelijk

- het vergrendelen van de installatie indien het doven van de vlam is waargenomen door de vlambewaking, of het ingrijpen van een aantal beveiligingsschakelaars. Dit vergrendelen betekent dat de installatie niet automatisch meer gestart kan worden, doch slechts na een menselijke ingreep;

¹⁾ Uit de analyse van explosies die, over een groot aantal jaren verspreid, in Amerika zijn opgetreden is gebleken dat in ruim 90% van de gevallen de explosie optrad gedurende de startfase of de daarop volgende fase van lage belasting van de installatie.

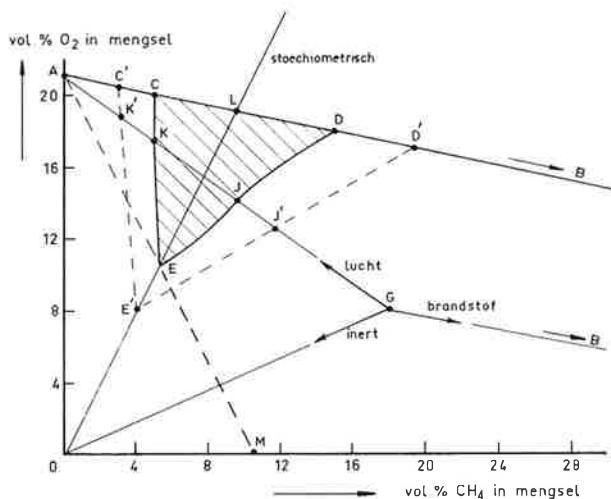


Fig. 1. Explosiediagram voor methaan. (Mengen.)

- het gebruik van een „gasslot” in de gastoevoer;
- het spoelen van de vuurhaard met lucht direct voorafgaande aan de start.

Het gasslot wordt gevormd door twee achter elkaar geschakelde gaskleppen. Omdat de kans dat beide gelijktijdig defect raken zeer klein is, geeft dit een grote mate van veiligheid tegen het inleken van gas in de verbrandingsruimte tijdens stilstand. Tussen beide afsluiters in wordt het systeem drukloos gemaakt door een derde afsluiter, die opent als de beide andere gesloten zijn, en die een verbinding met de atmosfeer tot stand brengt.

Daar de verhoogde veiligheid alleen gewaarborgd is zolang niet een van beide afsluiters lekt, is een regelmatige controle hierop noodzakelijk. Er zijn ook systemen ontwikkeld waarbij deze controle automatisch wordt uitgevoerd, hetgeen vooral van belang is voor installaties die slechts weinig worden geïnspecteerd, zoals bijv. grote CV-installaties in scholen en kantoren.

Spoelen van de vuurhaard

Om het spoelen van de vuurhaard te beoordelen is het nuttig het explosiediagram te bekijken zoals weergegeven in figuur 1. Het explosiediagram vormt een gedeelte van het driehoeksdiagram voor zuurstof-methaan-inert mengsels. Het gearceerde gebied C E D geeft de explosieve mengsels weer bij 20°C. C en D zijn punten van de lijn waarop alle aardgas-lucht mengsels liggen en vormen de onderste en bovenste explosiegrens (respectievelijk 5 en 15 vol.% voor SH₄-lucht-mengsels). Indien inerten worden toegevoegd, bijvoorbeeld CO₂ bij verbranding, schuiven de explosiegrenzen naar elkaar en blijven daarbij ongeveer symmetrisch liggen rond

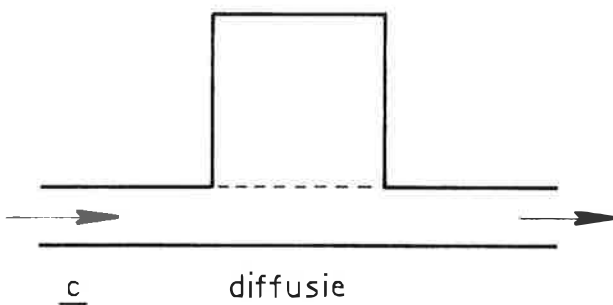
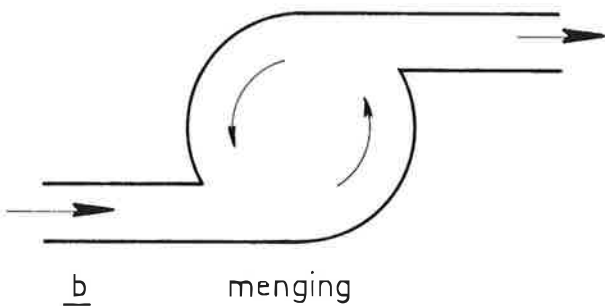
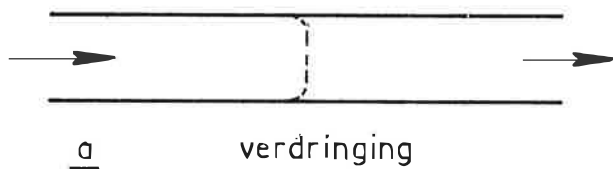


Fig. 2. Spoelprocessen.

de lijn voor stoechiometrische gas-lucht mengsel, n.l. de lijn die L met de oorsprong verbindt.

Bij hogere temperaturen schuiven de grenzen naar buiten, bijvoorbeeld naar C' E' D'. Uitgaande van een willekeurige samenstelling van de vuurhaardvulling, bijvoorbeeld het niet-explosieve mengsel dat door G wordt weergegeven, zijn er drie mogelijkheden om de uitgangscondities op bekende punten te brengen. Dit zijn spoelen van de vuurhaard met brandstof, met lucht en met inert gas.

Spoelen met brandstof komt uiteraard niet ter sprake. Wel kan de uitgangsconditie van niet-explosief worden bereikt, namelijk punt B, waarin de vuurhaard geheel met gas is gevuld, maar dit betekent alleen het verplaatsen van de moeilijkheden enerzijds naar de schoorsteentop en anderzijds naar een fase tijdens bedrijf, omdat daarbij toch weer lucht wordt toegevoerd en het explosiediagram moet worden doorlopen om uiteindelijk in A, de normale toestand bij niet in bedrijf zijnde installaties, te komen.

Spoelen met een inert gas, G O in explosiediagram, eventueel gevolgd door spoelen met lucht, O A, blijkt de enige goede oplossing, daar hierbij het gebied van de explosieve mengsels niet wordt doorlopen. Toch wordt dit systeem niet toegepast en wel om twee redenen. Ten eerste is voor een dergelijke bedrijfsvoering een grote voorraad inert gas nodig, hetgeen een aanzienlijke investering in drukvaten en dergelijke betekent, terwijl een storing in de aanvoer betekent dat de installatie niet kan worden gestart.

Dit laatste werkt het overbruggen van beveiligingen of procedures in de hand, hetgeen uiteraard ten enenmale ontoelaatbaar is. Ten tweede zal in een normale vuurhaard door de invloed van thermische trek of van de door de wind opgewekte schoorsteentrek steeds een doorspoelen met lucht plaatsvinden, zodat het proces van doorspoelen met een inert gas niet zal verlopen volgens G O, maar van G naar een punt tussen O en A, afhankelijk van de toevoersnelheden van lucht en inert. Indien de menging van lucht en inert slecht is, is het plaatselijk bereiken van het explosiegebied toch mogelijk.

Bij het spoelen met lucht wordt in dit geval het explosiegebied doorlopen, namelijk tussen de punten J en K op de lijn G A. Dit zal echter niet het geval zijn indien het punt G links van de lijn LO is gelegen, dus als het mengsel meer lucht bevat dan voor stoechiometrische verbranding nodig is.

Doven van de vlam zal in dit diagram optreden bij het bereiken van de grenzen van het explosiegebied, op de lijn CE (of C'E') voor luchtrijke mengsels en op de lijn DE voor brandstofrijke mengsels. Hieruit volgt derhalve dat het stoken met een geringe luchtovermaat niet alleen nuttig is voor een economisch brandstofverbruik, maar ook een duidelijk veiligheidsaspect heeft, n.l. om de samenstel-

ling van de vuurhaardvulling bij doven van de vlam links van de lijn L E O af te beelden in het explosiediagram.

Bij het spoelen zijn drie hoofdtypen te onderkennen (zie figuur 2):

- a. verdringing;
- b. volledige menging;
- c. diffusie.

ad. a. In dit geval zal de toegevoerde lucht het in de vuurhaard aanwezige mengsel geheel voor zich uitdrukken. Er is daarbij een scherp scheidingsvlak tussen spoellucht en de oorspronkelijk aanwezige vulling. Het is duidelijk dat een dergelijk geval zich zelden zal voordoen, behalve in nauwe kanalen en bij lage snelheden.

ad. b. Hier stroomt verse lucht de vuurhaard binnen en mengt zich geheel met de inhoud die dus wordt verdund. De stroom die de vuurhaard verlaat, heeft een samenstelling gelijk aan het verdunde mengsel in de vuurhaard. Dit is het type spoelproces dat we kunnen verwachten bij grote snelheden (wervels) en ruime kanalen.

ad. c. Er is hier een duidelijke kortsluiting voor de spoelluchtstroom van ingang naar uitgang. De rest van de ruimte vormt een „dood watergebied”. Slechts concentratieverschillen tussen de samenstelling van de vuurhaard en de spoellucht leveren een drijvende kracht om de verandering van samenstelling te weeg te brengen.

Het is duidelijk dat in geval a. een hoeveelheid spoellucht gelijk aan de inhoud van de te spoelen ruimte voldoende is voor algehele verversing.

Voor geval b. valt af te leiden dat de samenstelling in de te spoelen ruimte zal veranderen volgens

$$\frac{C_t}{C_0} = e^{-a}$$

waarin a = het verversingsvoud, de verhouding van toegevoerde spoellucht tot vuurhaardinhoud.

Van geval c. is het verloop van de samenstelling als functie van de tijd nauwelijks voor berekening toegankelijk daar zowel vorm als afmeting van de ruimte een rol speelt. Bovendien zijn er in een praktische situatie nog andere drijvende krachten die zowel mee als tegen kunnen werken, zoals verschil in soortelijk gewicht en verschil in temperatuur bij een nog warme installatie.

Voor het eenvoudige geval van een laag mengsel die aan een zijde aan de wand en aan de andere zijde aan de spoellucht grenst, geldt:

$$\frac{C_w}{C_0} = f \left(\frac{D \cdot t}{X^2} \right)^*$$

waarin

C_w = de concentratie aan de wand

C_0 = de beginconcentratie

D = de diffusiecoëfficiënt (cm^2/sec)

t = de tijd (sec)

X = de laagdikte (cm)

Voor $C_w/C_0 = 0,1$, een nog hoge waarde, wordt $D \cdot t/X^2 = 1$ zodat met $D \approx 0,3 \text{ cm}^2/\text{sec}$ voor een laagdikte van 20 cm reeds een spoeltijd wordt gevonden van ongeveer 1300 seconden, dus ruim 20 minuten.

De conclusie die hieruit getrokken moet worden, is dat een installatie waarin delen voorkomen die niet goed gespoeld kunnen worden, beslist onveilig is.

Het is duidelijk dat in praktische gevallen niet één systeem afzonderlijk zal voorkomen maar steeds combinaties. In een goed ontworpen installatie zal de aanwezigheid van gebieden met stromingsstilstand nauwelijks voorkomen, doordat in deze gebieden de warmteoverdracht zeer gering is en de installatie daardoor nodeloos groot en duur zou worden. Voor goed ontworpen installaties kan het spoelvoud daarom bepaald worden met behulp van geval b. Uitgaande van de ongunstigste begincondities nl. de gehele ruimte met gas gevuld $C_0 = 100\%$, dient het spoelvoud zodanig te zijn dat de concentratie bij beëindiging van het spoelen ver beneden de onderste explosiegrens ligt.

Bij een spoelvoud van 8, zoals algemeen aanvaard, is de gasconcentratie derhalve gedaald tot beneden 0,05%. Deze concentratie ligt, ook bij hogere temperatuur, ver buiten de explosiegrenzen. De volledige menging wordt daarbij nagestreefd door een grote spoelluchtsnelheid voor te schrijven, dus turbulentie met bijbehorende wervels. Tevens wordt een minimumspoelperiode voorgeschreven die, tezamen met de veiligheidsmarge die in het spoelvoud van 8 is opgesloten, kleine plaatselijke stagnatiegebiedjes afdoende kan verversen. Dit geldt echter alleen zeer kleine dode hoeken, die altijd kunnen voorkomen.

Slotopmerkingen

De veiligheidsaspecten van het stoken van aardgas zijn in ons land het onderwerp van voortdurende studie. Doordat er slechts een beperkt aantal leveranciers optreedt, die onderling niet in een concurrentiepositie verkeren, kunnen de maatregelen die uit veiligheidsoverwegingen moeten worden getroffen worden vastgelegd in voorschriften. Voor

* Vanwege de analogie van diffusieprocessen met warmtegeleiding is gebruik gemaakt van warmtegeleidingsoplossingen (b.v. VDI-Wärme atlas).

kleinere installaties betreft het voorschriften van het VEG-Gasinstituut, terwijl voor installaties met capaciteiten groter dan 600 kJ/s de voorschriften worden opgesteld door de VISA (Commissie Veiligheid van Installaties voor het Stoken van Aardgas).

Voor andere brandstoffen liggen de problemen ingewikkelder. Ook hier echter wordt door commissies samengesteld uit fabrikanten, leveranciers, verbruikers en vertegenwoordigers van TNO, Arbeidsinspectie en Stoomwezen, aan het formuleren van veiligheidseisen gewerkt (o.a. door de Commissie Veiligheid Olie- en Gasgestookte Ketels en de Commissie Veiligheid Stoken in de *Proces Industrie*).

Uit de eerder genoemde Amerikaanse onderzoeken naar explosieoorzaken is tevens gebleken dat in tenminste 90% van de gevallen de oorzaak

is gelegen in fouten van het bedienend personeel of in niet goed werkende apparatuur.

De eerste oorzaak kan grotendeels worden weggenomen door automatisering van de veiligheidsprocedures, zoals bijvoorbeeld de volgorde van de handelingen bij het starten van een installatie.

De tweede oorzaak, n.l. het niet goed functioneren van apparatuur, kan worden bestreden door keuring van belangrijke componenten van het beveiligingssysteem. Een belangrijke stap op dit gebied is bijvoorbeeld het vergelijkende onderzoek naar de eigenschappen van vlambeveiligingsapparatuur werkend volgens het principe van de detectie van door de vlam uitgezonden UV-straling.

Dit onderzoek is in het C.T.I.-TNO uitgevoerd in opdracht van de W.I.B. (Werkgroep Instrumenten Beoordeling), waarvan een aantal grootverbruikers lid is.

NAMEN EN ADRESSEN TNO

CENTRALE ORGANISATIE TNO

Dagelijks Bestuur: Prof. Dr. H. W. Julius, voorzitter; Ir. E. F. Boon, ondervoorzitter; Ir. J. van Mameren, Prof. Dr. G. J. Sizoo, Prof. Ir. H. W. Slotboom; Prof. Dr. J. W. Tesch,

Adres: Juliana van Stolberglaan 148, 's-Gravenhage, tel. 070-814481.
Postadres: Postbus 297, 's-Gravenhage.

I. Nijverheidsorganisatie TNO

Dagelijks Bestuur: Prof. Ir. H. W. Slotboom, voorzitter; Drs. J. C. Hooykaas, ondervoorzitter;

Mr. J. C. van Alphen de Veer, Ir. W. C. Reij, Ir. Drs. H. Kuiper, Mr. G. van der Flier, Prof. Ir. D. A. A. Koolen, Ir. H. Rinia, Prof. Dr. J. J. Went, Ir. A. F. van Weele.

Adres: Juliana van Stolberglaan 148, 's-Gravenhage, tel. 070-814481.
Postadres: Postbus 297, 's-Gravenhage.

II. Voedingsorganisatie TNO

Voorzitter: Ir. J. van Mameren.

Adres: Juliana van Stolberglaan 148, 's-Gravenhage, tel. 070-814481.

Postadres: Postbus 297, 's-Gravenhage.

III. Rijksverdedigingsorganisatie TNO

Dagelijks Bestuur: Prof. Dr. G. J. Sizoo, voorzitter; Prof. Jhr. Ir. J. L. W. C. von Weiler, ondervoorzitter, Brig. Gen. Ir. E. van Herwaarden, Kol. Ir. C. J. Pluygers, Ktz. R. H. Kerkhoven.

Adres: Koningin Marialaan 21, 's-Gravenhage, tel. 070-814481.
Postadres: Postbus 208, 's-Gravenhage.

IV. Gezondheidsorganisatie TNO

Dagelijks Bestuur: Prof. Dr. J. W. Tesch, voorzitter; Mr. P. H. Valentgoed, ondervoorzitter; Dr. P. S. Blom, Dr. A. J. Piekaar, Dr. P. Siderius, Prof. Dr. N. Speijer,

Adres: Juliana van Stolberglaan 148, 's-Gravenhage, tel. 070-814481.
Postadres: Postbus 297, 's-Gravenhage.

Hoofdkantoor van de Organisatie TNO:

Juliana van Stolberglaan 148, Postadres: Postbus 297, 's-Gravenhage, tel. 070-814481.

Secretariaat

Algemeen Secretaris: Drs. J. Jonker.
Adjunct-secretaris der Centrale Organisatie: Drs. J. Stelpstra.
Adjunct-secretaris voor bijzondere opdrachten: Mej. M. B. van Lennep.
Sectie Landbouwkundig Onderzoek CO-TNO
Hoofd: Mej. A. Hoetink.
Secretaris van de Nationale Raad voor Landbouwkundig Onderzoek: Ir. G. Wansink;
Secretaris der Nijverheidsorganisatie: Mr. H. R. Wegerif.
Adjunct-secretarissen: Mej. Mr. F. A. Westra van Holthe en E. Schreuder.
Secretaris der Gezondheidsorganisatie: Mej. M. W. H. Slag;
Adjunct-secretaris: Mevr. E. de Boer-Schreuder.
Secretaris der Voedingsorganisatie: E. J. Meis.
Secretaris der Rijksverdedigingsorganisatie: Drs. J. L. Jansen; Adjunct-secretaris: Mr. C. I. Nommensen.
(Adres: Koningin Marialaan 21, 's-Gravenhage, tel. 070-814481, telex 31660).

Afdelingen van het Secretariaat

Afd. In- en Externe Betrekkingen:
Hoofd: A. H. Meissner.
Redactie TNO-nieuws: Drs. F. W. B. Engler.
Afd. Archief en Bibliotheek:
Hoofd: T. van de Graaf.
Afd. Personeelszaken:
Hoofd: Ir. Ph. H. Huisman.
Plv. Hoofd: C. A. van Malsen.
Adviseur voor de opzet van onderzoeken
Dr. E. F. Drion.

Geldelijk Beheer en Administratie

Algemeen Penningmeester en Penningmeester der Bijzondere Organisaties: Drs. F. H. J. Essenstam.

Afdeling Administratieve Organisatie: L. Ch. Schuster.
Afdeling Hoofdboekhouding: A. de Lijster.
Afdeling Kas: Mej. A. de Wekker.
Afdeling Accountantscontrole: J. Koster, register-accountant.

Gebouwen- en Terreinendienst TNO

Directeur: H. J. Schoolland.
Hoofd Algemene Zaken: Ir. J. R. de Vries.
Hoofd Bouwkundige Zaken: Ir. F. de Haas.
Hoofd Technische Installaties: Ir. P. M. A. Haanappel.

Centrale Veiligheidsdienst TNO

Hoofd: G. W. Bientjes

Geneeskundige Dienst TNO

Hoofd: Dr. Y. van der Wielen, arts.

Centraal Pensioenfonds TNO

Secretaris: J. Muetgeert.
Administratie: B. J. Veldman.

CENTRALE ORGANISATIE TNO

Nationale Raad voor Landbouwkundig Onderzoek TNO
(zie 4 blz. verder)

Raad voor Gezondheidsresearch TNO

Voorzitter: Dr. P. Siderius.
Secretaris: Drs. J. Jonker.
Adres: Juliana van Stolberglaan 148, 's-Gravenhage,
tel. 070-814481. Postadres: Postbus 297, 's-Gravenhage.

Commissie TNO voor het onderzoek ten dienste van het Milieubeheer

Voorzitter: Ir. E. F. Boon.
Secretaris: Drs. J. Jonker.
Adres: Juliana van Stolberglaan 148, 's-Gravenhage,
tel. 070-814481.
Postadres: Postbus 297, 's-Gravenhage.

Studie- en Informatiecentrum TNO voor het onderzoek ten dienste van het Milieubeheer

Directeur: Dr. L. Ginjaar.
Adres: Juliana van Stolberglaan 148, 's-Gravenhage.
Postadres: Postbus 297, 's-Gravenhage.

Coördinatiecommissie TNO voor de Visserijen

Voorzitter: Ir. Th. J. Tienstra.
Secretaris:

Adres: Juliana van Stolberglaan 148, 's-Gravenhage,
tel. 070-814481.
Postadres: Postbus 297, 's-Gravenhage.

Commissie voor Hydrologisch Onderzoek TNO

Voorzitter: Prof. Dr. Ir. J. C. van Dam;
technisch secretaris: Ir. G. Santing;
administratief secretaris: Mej. M. B. van Lennep.
Adres: Juliana van Stolberglaan 148, 's-Gravenhage,
tel. 070-814481.
Postadres: Postbus 297, 's-Gravenhage.

Werkgroep Lysimeters TNO:
voorzitter: Dr. P. K. Peerlkamp;
secretaris: Drs. G. F. Makkink;
Adres: Bornsesteeg 65, Wageningen, tel. 08370-3144.

Contactgroep Regenwaarnemingen TNO:
Voorzitter: Prof. Ir. A. Volker.
Secretaris: Dr. L. J. L. Deij.
Adres: Utrechtseweg 297, De Bilt, tel. 030-762611.

Commissie TNO voor Verkeersonderzoek

Voorzitter: Prof. Dr. H. W. Julius.
Secretariaat: Drs. J. B. Zabel, Economisch-Technische
Afdeling TNO, Koningin Marialaan 21, 's-Gravenhage,
tel. 070-814481.

Plancommissie Bouwresearch TNO

Voorzitter: Drs. B. M. Roem.
Secretaris: L. van Zetten.
Adres: Lange Kleiweg 5, Rijswijk (Z.H.),
tel. 01730-38222, Postadres: Postbus 49, Delft.

Commissie TNO voor Onderzoek inzake Nevenwerkingen van Bestrijdingsmiddelen en verwante verbindingen

Voorzitter: Prof. H. van Genderen;
secretaris: Mej. M. B. van Lennep.
Adres: Juliana van Stolberglaan 148, 's-Gravenhage,
tel. 070-814481.
Postadres: Postbus 297, 's-Gravenhage.

Contactgroep Vogels en Zoogdieren van de CNB
Voorzitter: Prof. Dr. M. F. Mörzer Bruyns;
Secretaris: Drs. J. H. Koeman;
Adres: Biltstraat 172, Utrecht, tel. 030-715544.

Gemeenschappelijke Werkgroep Gevolgen Beroepsexpositie Bestrijdingsmiddelen TNO
Voorzitter: Prof. Dr. R. L. Zielhuis.
Secretaris: G. Ragay.
Adres: Juliana van Stolberglaan 148, 's-Gravenhage,
tel. 070-814481.

Contactgroep Water van de CNB
Voorzitter:

Secretaris: Ir. J. L. Koolen.
Adres: Westeinde 3a, Voorburg, tel. 070-865255.

Contactgroep Bodem van de CNB
Voorzitter: Dr. A. M. van Doorn.
Secretaris: Dr. Ir. H. Hoestra.
Adres: Binnenhaven 15, Wageningen, tel. 08370-6111.

Contactgroep Chemische en Biochemische Omzettingen van Bestrijdingsmiddelen van de CNB
Voorzitter: Prof. Dr. G. J. M. van der Kerk.
Secretaris: Dr. J. C. Overeen.
Postadres: Croesestraat 79, Utrecht, tel. 030-882721.

Werkgroep Kwik
Voorzitter: Prof. H. van Genderen.
Secretaris: Ir. R. H. de Vos.
Adres: Utrechtseweg 48, Zeist, tel. 03404-18411.

Instituut TNO voor Wiskunde, Informatieverwerking en Statistiek

Adressen: 's-Gravenhage, Koningin Marialaan 21,
tel. 070-838503, Postbus 297. Telex 31707.
Wageningen, Staringgebouw, Lawickse Allee 136,
tel. 08370-6333, Postbus 100.
Directeur: Dr. J. P. M. de Kroon, 's-Gravenhage.
Onderdirecteuren: Drs. H. Loeven, 's-Gravenhage.
J. C. A. Zaat, Wageningen.
Hoofd Rekencentrum: A. A. Koene, 's-Gravenhage.

Rekencentrum TNO

zie: Instituut TNO voor Wiskunde, Informatieverwerking en Statistiek.

Octrooiafdeling TNO

Hoofd: Drs. E. W. van Popta;
Plaatsvervanger: Drs. K. Dijkhoff.
Adres: Bankplein 1, 's-Gravenhage, tel. 070-512571.

Afdeling Documentatie
Hoofd: J. W. Plevier.
Adres: TNO-complex Zuidpolder, Schoemakerstraat 97,
Delft. Telex: 31453 zptno-nl.

Economisch-Technische Afdeling TNO

Hoofden: Drs. J. C. Gerritsen (economische zaken) en
Dr. H. A. W. Nijveld (technische zaken).
Adres: Koningin Marialaan 21, 's-Gravenhage,
tel. 070-814481.
Postadres: Postbus 778.

Technisch Fysische Dienst TNO-TH

Directeur: Ir. H. de Zeeuw;
Plv. directeur: Ir. G. J. Beernink.
Onderdirecteuren: Dr. Ir. J. de Jong en
Ir. G. J. Kleinhoonte van Os.
Adres: Stieltjesweg 1, Delft, tel. 01730-31900.
Postadres: Postbus 155, Delft.
Telexnummer: 31614.

Organisch Chemisch Instituut TNO

Directeur: Prof. Dr. G. J. M. van der Kerk;
Onderdirecteur: Dr. G. M. van der Want
Adres: Croesestraat 79, Utrecht, tel. 030-882721.
Postadres: Postbus 5009.

Fysisch Chemisch Instituut TNO

Directeur: Dr. W. M. Smit.

Adres: Utrechtseweg 48, Zeist, tel. 03404-17444.

Postadres: Postbus 108.

Dienst Grondwaterverkenning TNO

Directeur: Dr. W. A. Visser

Plaatsvervanger van de directeur: Drs. F. Walter

Archief van Grondwaterstanden

Conservator: C. Groenewoud.

Afdeling Geofysisch Onderzoek

Hoofd: Drs. F. Walter

Afdeling Geohydrologisch Onderzoek

Hoofd: Dr. P. B. Smoor

TNO-complex Zuidpolder

Schoemakerstraat 97, Delft

Tel. 01730-37000

Postadres: Postbus 285, Delft.

I. NIJVERHEIDSORGANISATIE TNO

Voorzitter: Prof. Ir. H. W. Slotboom.
Algemeen Directeur: Dr. H. H. Mooij.
Directeur-Adviseur: Dr. H. Geldof.

Adjunct-directeuren:

Drs. H. F. J. Freutel: Beleidsinformatie.

Drs. J. Roelofsen: Personeel.

Dr. Ir. F. E. van Wely: Ontwikkeling vrij speurwerk.

W. C. L. Zegveld: Opdrachtontwikkeling.

Adviseurs: Prof. Dr. J. Hamaker.
Prof. Dr. A. J. Staverman.

Juliana van Stolberglaan 148, postbus 297,
's-Gravenhage, tel. 070-814481.

Afdeling Industrieel Contact TNO

Wvd. Hoofd: Ir. P. S. Weltevreden.

Chemische sector: Drs. F. Franken; metaalsector: P. Jes, Ing.; diverse industrietakken: H. L. van Woensel; kernenergie en ruimte-onderzoek: Ir. P. S. Weltevreden.

Adres: Schoemakerstraat 97, Delft, tel. 01730-37000.
Postadres: Postbus 215, Delft. Telex 31453 zptno nl.

Bureau Explosieveiligheid TNO

Hoofd: Dr. J. G. A. de Graaf.

Adres: Lange Kleiweg 159, Rijswijk (Z.H.), tel. 01730-38222.

Postadres: postbus 45, Rijswijk (Z.H.).

TNO-complex Zuidpolder

Directeur Algemene Diensten: Ir. F. W. R. Wijbrans
Bedrijfsingenieur: Ir. W. J. Betz.

Adres: Schoemakerstraat 97, Delft, tel. 01730-37000.

Postadres: Postbus 67, Delft. Telex 31453 zptno nl.

Analytisch Centrum TNO

Zie onder Centraal Laboratorium TNO.

Instituut TNO voor Bouwmaterialen en Bouwconstructies

(met inbegrip van het Centrum voor Brandveiligheid)

Directeur: Ir. F. K. Ligtenberg.

Onderdirecteuren: Prof. Ir. P. C. Kreijger, Ir. J. Witteveen.

Adres: Lange Kleiweg 5, Rijswijk (Z.H.),
tel. 01730-38222.

Postadres: Postbus 49, Delft.

Centraal Laboratorium TNO

(met inbegrip van het Analytisch Centrum)

Directeur: Dr. A. Schors.

Onderdirecteur: Ir. J. Heijboer.

Adres: Schoemakerstraat 97, Delft.

Postadres: Postbus 217, Delft.

Telefoon voor beide: 01730-37000.

Telex 31453 zptno nl.

Centraal Technisch Instituut TNO

Directeur: D. A. van Meel;

Adjunct-directeur: Ir. J. R. A. Ludert.

Onderdirecteur: Ir. K. A. Warschauer.

Correspondentie te richten aan: Postbus 260,
Delft.

Adressen:

Directie } Delft,
Administratie } Schoemakerstraat 97,
tel. 01730-37000.

Fysische en } Rijswijk (Z.H.),
Chemische Technologie } Lange Kleiweg 5-167,
Warmtetechniek } tel. 01730-38222.
Grafiek }

Koudetechniek } Delft,
Ultrasnelle Fotografie } Schieweg 14a,
tel. 01730-35395.

Fysische Transport-
verschijnselen
Chemisch Laboratorium

Apeldoorn,
Arnhemseweg 372,
tel. 05760-31700.

50 MW-beproeving-
circuit

Hengelo (O.),
Petroleumhavenstraat,
tel. 05400-20163.

Centrum voor Brandveiligheid TNO

Zie onder Instituut TNO voor Bouwmaterialen en
Bouwconstructies.

Centrum voor Metaalbewerking

Zie onder Metaalinstituut TNO.

Gieterijcentrum TNO

Zie onder Metaalinstituut TNO.

Houtinstituut TNO

Directeur: Drs. B. M. Roem;

Plv. directeur: Dr. K. Griffioen.

Adres: TNO-complex Zuidpolder, Schoemakerstraat 97,
Delft, tel. 01730-37000.

Postadres: Postbus 151, Delft. Telex 31453 zptno nl.

Instrumentum TNO

Hoofd: H. Plomp.

Adres: Surinamestraat 2, Delft, tel. 01730-40281.

Projectgroep Kernenergie TNO

Directeur-projectleider: Ir. A. H. de Haas van Dorsser.

Adres: Laan van Nieuw-Oost-Indië 129-135, 's-Graven-
hage, tel. 070-814821; Postadres: Postbus 614, 's-Graven-
hage.

Kunststoffen- en Rubberinstituut TNO

Directeur: Dr. Ir. P. J. Bakker.

Adres: Schoemakerstraat 97, Delft, tel. 01730-37000.

Postadres: Postbus 71, Delft. Telex 31453 zptno nl.

Instituut voor Leder en Schoenen TNO

Directeur: Ir. J. Roelofs Heyrmans.

Adres: Mr.-van-Coothstraat 55, Waalwijk,
tel. 04160-33255. Telex 50502.

Metaalinstituut TNO

(met inbegrip van het Gieterijcentrum en het Centrum
voor Metaalbewerking)

Directeur: Prof. Dr. Ir. C. A. Verbraak.

Onderdirecteuren: Ir. J. M. Nijpjes, Ir. J. L. Remmerswaal.

Bezoekadressen:

Gieterijcentrum en afd. lassen, solderen, opspuiten:
Schoemakerstraat 97, Delft;

Centrum voor Metaalbewerking: Mijnbouwstraat 16a,
Delft;

Alle andere afdelingen: Rotterdamseweg 139, Delft.

Postadres

Voor alle afdelingen: Postbus 52, Delft.

Telex 32269.

Telefoon

Gieterijcentrum: 01730-37000.

Afd. lassen, solderen, opspuiten: 01730-37000 t. 2760.

Alle andere afdelingen: 01730-21914.

Nederlands Scheepsstudiecentrum TNO

Directeur: C. A. Planten KTZT b.d.

Correspondentie-adres voor alle afdelingen (scheepsbouw, machinebouw, corrosie- en aangroeiwering):
Leeghwaterstraat 5, Delft, tel. 01730-32930.
Postadres: Postbus 29, Delft.

Projectgroep Stromingsmachines TNO

Directeur-projectleider: Ir. P. van Staveren.

Adres: Schoemakerstraat 97, Delft, tel. 01730-37000.
Postadres: Postbus 406, Delft. Telex 31453 zptno nl.

Verfinstituut TNO

Directeur: Dr. R. Bult.

Adres: TNO-complex Zuidpolder, Schoemakerstraat 97, Delft, tel. 01730-37000.
Postadres: Postbus 203, Delft. Telex 31453 zptno nl.

Instituut TNO voor Verpakking

Directeur: C. Hillenius.

Plv. directeur: Ir. W. P. Fornerod.

Adres: TNO-complex Zuidpolder, Schoemakerstraat 97, Delft, tel. 01730-37000.
Postadres: Postbus 169, Delft. Telex 31453 zptno nl.

Vezelinstituut TNO

Directeur: Dr. H. J. Selling.

Onderdirecteur: Ir. F. L. J. van Lamoen.

Adres: TNO-complex Zuidpolder, Schoemakerstraat 97, Delft, tel. 01730-37000.
Postadres: Postbus 110, Delft. Telex 31453 zptno nl.

Filiaal Vezelinstituut TNO „de Voorzorg”, Hengelosestraat 715, Enschede, tel. 05420-26861.

Documentatie- en Meetcentrum TNO: Noordhoekring 180, Tilburg, tel. 04250-26573.

Instituut voor Wegtransportmiddelen TNO

Directeur: Ir. P. D. van der Koogh.

Adres: Ezelsveldlaan 40, Delft, tel. 01730-22763 en 30353.

Instituut TNO voor Werktuigkundige Constructies

Directeur: Ir. E. J. Diehl.

Plv. directeur: Ir. H. H. 't Hart.

Adres: Leeghwaterstraat 5, Delft, tel. 01730-32930.
Postadres: Postbus 29, Delft.
Telex: 32786.

Voorlichtingscentrum Industriële Automatisering, Mechanisatie en Elektronica

Adres: Leeghwaterstraat 5, Delft, tel. 01730-32930.
Postadres: Postbus 29, Delft. Telex: 32786.

Meetcentrum TNO

Hoofd: Ir. H. Wieringa.

Adres: Leeghwaterstraat 5, Delft, tel. 01730-32930.
Postadres: Postbus 29, Delft.

AAN DE NIJVERHEIDSORGANISATIE TNO GELIEERDE STICHTINGEN

Proefstation voor Aardappelverwerking

Directeur: Dr. J. Hofstee.

Adres: Kempkensberg 56, Groningen,
tel. 050-54362.

Instituut voor Grafische Techniek TNO

Directeur: J. F. Monroy.

Adres: Ter-Gouwstraat 1, Amsterdam-Oost,
tel. 020-949525.
Postadres: Postbus 4150, Amsterdam.

Meetinstituut Bemetel-TNO

Wvd. directeur: Ir. H. Wieringa.

p.a. Leeghwaterstraat 5, Delft, tel. 01730-32930.

Postadres: postbus 29, Delft.

Nederlandsch Scheepsbouwkundig Proefstation

Directie: Prof. Dr. Ir. W. P. A. van Lammeren (voorzitter van de Directie).

Prof. Dr. Ir. J. D. van Manen. (Directeur).

A. H. Pastoor, lid N.I.v.R.A. (Adjunct-Directeur).

Ir. J. J. Muntjewerf. Onderdirecteur laboratoria zonder golven (weerstand en voortstuwing).

Ir. J. P. Hooft. Onderdirecteur laboratoria met golven (zeegang en manoeuvreren).

Ir. M. W. C. Oosterveld. Onderdirecteur research en ontwikkeling.

Adres: Haagsteeg 2, Wageningen, tel. 08370-4481*.

Postadres: Postbus 28, Wageningen. Telex 45148.

Instituut voor Textielreiniging TNO

Directeur: Drs. K. J. Nieuwenhuis.

Adres: TNO-complex Zuidpolder, Schoemakerstraat 97, Delft, tel. 01730-37000.
Postadres: Postbus 70, Delft. Telex 31453 zptno nl.

II. VOEDINGSORGANISATIE TNO

Centraal Instituut voor Voedingsonderzoek TNO

(met inbegrip van het Nederlands Centrum voor Vlees-technologie)

Directeur: Dr. C. Engel; onderdirecteur: Dr. A. Gorter.
Adres: Utrechtseweg 48, Zeist, tel. 03404-18411.

Instituut voor Graan, Meel en Brood TNO

Directeur: Dr. G. Jongh; plv. directeur: Ir. D. de Ruiter.

Adres: Lawickse Allee 15, Wageningen, tel. 08370-5251.
Postadres: Postbus 15, Wageningen.

Instituut voor Visserijproducten TNO

(Met inbegrip van de afdeling Materialen)

Directeur: Ir. J. J. Doesburg.

Plv. directeur: H. Houwing ing.

Adres: Dokweg 37, IJmuiden, tel. 02550-19022.

Postadres: Postbus 183, IJmuiden.

Researchgroep voor Vlees en Vleeswaren TNO

Voorzitter: Prof. Dr. J. H. J. van Gils.

Secretaris: Prof. Ir. B. Krol.

Adres: Utrechtseweg 48, Zeist, tel. 03404-18411.

AAN DE VOEDINGSORGANISATIE TNO GELIEERDE STICHTINGEN

Nationaal Instituut voor Brouwerij, Mout en Bier TNO

Directeur: Drs. W. J. Klopper.

Adres: Polderstraat 10, Rotterdam-25, tel. 010-176755.

Instituut voor Landbouwkundig Onderzoek van industriële biologische, biochemische en chemische producten

Directeur: Dr. Ir. P. van der Wal.

Adres: Haarweg 8, Wageningen, tel. 08370-4851.

III. RIJKSVERDEDIGINGSORGANISATIE TNO

Fysisch Laboratorium RVO-TNO

Directeur: Prof. Dr. Ir. H. Dirksen.

Plv. directeur: Ir. M. W. van Batenburg (non-actief).

Onderdirecteuren: Ir. A. J. Leenhouts, Ir. F. Möhring.

Adres: Oude Waalsdorperweg 63, 's-Gravenhage,
tel. 070-264221, Postadres: postbus 2864. Telex 32397.

Prins Maurits Laboratoria RVO-TNO

Adres: TNO-complex Plaspoelpolder

Lange Kleiweg 5-167, Rijswijk (Z.H.), tel. 01730-20330.

Postadres: Postbus 45, Rijswijk 2100.

Telex: 31101 pmtno nl.

De Prins Maurits Laboratoria RVO-TNO omvatten:

Medisch Biologisch Laboratorium RVO-TNO

Directeur: Prof. Dr. E. M. Cohen.

Plv. directeur: Prof. Dr. Ir. A. Rörsch.

Chemisch Laboratorium RVO-TNO

Directeur: Dr. A. J. J. Ooms.

Adjunct-directeuren: Dr. H. Kienhuis en Ir. M. van Zelm.

Technologisch Laboratorium RVO-TNO

Directeur: Dr. E. W. Lindeijer.

Plv. directeur: Ir. H. L. Ligtenberg.

Centraal Beheer Prins Maurits Laboratoria RVO-TNO

Directeur-beheerder: Dr. K. van Nes.

Instituut voor Zintuigfysiologie RVO-TNO

Directeur: Dr. Ir. P. L. Walraven.

Plv. directeur: Dr. Ir. R. Plomp.

Adres: Kampweg 5, postbus 23, Soesterberg,
tel. 03463-1444 en 1494.

IV. GEZONDHEIDSORGANISATIE TNO

Instituut voor Gezondheidstechniek TNO

Directeur: Ir. D. van Zuilen;
plv. directeur: Ir. M. L. Kasteleijn.
Adres: TNO-complex Zuidpolder, Schoemakerstraat 97,
Delft, tel. 01730-37000.
Postadres: Postbus 214, Delft. Telex 31453 zptno nl.

Medisch-Fysisch Instituut TNO

Directeur: Prof. Ir. D. H. Bekkering.
Adres: Da Costakade 45, Utrecht, tel. 030-935141.

Radiobiologisch Instituut TNO

Directeur: Prof. Dr. D. W. van Bekkum.
Onderdirecteur: Prof. Dr. L. M. van Putten.
Adres: Lange Kleiweg 151, Rijswijk (Z.H.),
tel. 01730-40930. Telex 32785 repgo nl.

Nederlands Instituut voor Praeventieve Geneeskunde TNO

Directeur: Prof. Dr. J. A. C. de Kock van Leeuwen;
plv. directeur: Prof. Dr. J. Koekebakker.
onderdirecteur: Dr. J. M. L. Phaff.
Adres: Wassenaarseweg 56, Leiden, tel. 01710-50940/
50944.
Postadres: Postbus 124, Leiden.

Werkgroep Tuberculine-onderzoek TNO

Hoofd: Dr. M. A. Bleiker.
Adres: Juliana van Stolberglaan 148, 's-Gravenhage,
tel. 070-814481.
Postadres: Postbus 297, 's-Gravenhage.

Werkgroep TNO Tand- en Mondziekten

Hoofd: Prof. Dr. B. Houwink.
Adres: p/a Laboratorium voor Microbiologie der Rijks-
universiteit, Catharijnesingel 59, Utrecht, tel. 030-22547.

Werkgroep Keuring van Tandheelkundige Materialen TNO

Hoofd: Ir. H. P. L. Schoenmakers.
Adres: p/a Tandheelkundig Instituut van de Rijksuni-
versiteit, Jutphaaseweg 7, Utrecht, tel. 030-881411.

Werkgroep Klinisch Geneesmiddelenonderzoek TNO

Hoofd: Dr. F. A. Nelemans.
Adres: Leyweg 291, 's-Gravenhage
tel. 070-299156 en 299157.

Atherosclerose-Werkgroep TNO

Directeur: Dr. P. Brakman.
Adres: p/a Gaubius-Instituut der Rijksuniversiteit, He-
renstraat 5d, Leiden, tel. 01710-34548.

Werkgroep Bejaardenonderzoek TNO

Hoofd: Dr. R. J. van Zonneveld.
Adres: Juliana van Stolberglaan 148, 's-Gravenhage,
tel. 070-814481. Postadres: postbus 297, 's-Gravenhage.

Werkgroep TNO Epidemiologie van CARA

Hoofd: Dr. R. van der Lende.
Adres: p/a Interne Kliniek, afd. Longziekten, Acade-
misch Ziekenhuis, Oostersingel 59, Groningen,
tel. 050-39123.

Werkgroep Experimentele Gerontologie TNO

Directeur: Dr. C. F. Hollander.
Adres: p/a Radiobiologisch Instituut TNO, Lange Klei-
weg 151, Rijswijk (Z.H.), tel. 01730-40930. Telex 32785
repgo nl.

Werkgroep TNO voor Klinische Neurofysiologie

Hoofd: Dr. O. Magnus.
Adres: p/a St. Ursulakliniek, Eikenlaan 3, Wassenaar,
tel. 01751-9441.

Commissie voor Arbeidsgeneeskundig Onderzoek TNO (CARGO)

Voorzitter: Prof. J. de Groot.
Secretariaat: Juliana van Stolberglaan 148,
's-Gravenhage, tel. 070-814481.
Postadres: Postbus 297, 's-Gravenhage.
Coördinator: Dr. J. Jongh.
Adres: p/a Medisch-Fysisch Instituut TNO, Da Costa-
kade 45, Utrecht, tel. 030-935141.
Laboratorium voor Ergonomische Psychologie TNO.
Hoofd: Dr. J. W. H. Kalsbeek.
Adres: Zuiderzeeweg 10, Amsterdam-O., tel. 020-927001.

Centraal Proefdierenbedrijf TNO

Afdeling Vermeerdering: Directeur Drs. J. C. J. van
Vliet.
Adres: Woudenbergseweg 25, Zeist, tel. 03439-448.
Postadres: Postbus 167.
Afdeling Selectie: hoofd mej. Drs. A. K. Kremer.
Adres: Zoötechnisch Instituut der R.U., Transitorium II,
„de Uithof”, Heidelberglaan 2, Utrecht, tel. 030-539111,
toestel 329.

Radiologische Dienst TNO

Hoofd: Prof. Dr. J. J. Went.
Dosimetriedienst en Whole Body Counter:
Drs. H. W. Julius Jr.
Medisch spuurwerk: Dr. L. H. M. van Stekelenburg.
Adres: Utrechtseweg 310, Arnhem, tel. 085-457057.

Nationale Raad voor Landbouwkundig Onderzoek TNO

Leden: Prof. Dr. H. Veldstra, voorzitter, Prof. Dr. G. P. Baerends, Dr. Ir. G. de Bakker, Prof. Ir. M. L. 't Hart, Prof. Dr. E. W. Hofstee, Ir. J. A. Knobbout, Ir. J. van Mameren, Drs. G. J. W. van der Meij, Ir. A. P. Minderhoud, Prof. Dr. S. R. Numans, Ir. J. Prins, Ir. J. W. Wellen, Prof. Dr. J. de Wilde, Ir. G. Wansink, secretaris.

Adres: Juliana van Stolberglaan 148, 's-Gravenhage. Telefoon 070-814481. Postbus 297, 's-Gravenhage.

De Nationale Raad heeft tot taak te bevorderen dat het toegepast wetenschappelijk onderzoek op de meest doelmatige wijze wordt dienstbaar gemaakt aan de landbouw en daartoe desgevraagd of eigener beweging te bevoegder plaatselijke advies uit te brengen.

De Nationale Raad bevordert ten aanzien van het landbouwkundig onderzoek

- een goede inrichting,
- samenwerking en overleg,
- een goede relatie met het overig wetenschappelijk onderzoek.

De Nationale Raad heeft o.m. tot taak:

- het bestuderen of doen bestuderen van de wetenschappelijke, organisatorische en economische aspecten van het landbouwkundig onderzoek,
- een systematische registratie van alle onderzoeksprojecten ten behoeve van de landbouw,
- het periodiek opstellen van een overzicht van de resultaten van het onderzoek en van de behoeften aan onderzoek,
- het tot stand komen van gemeenschappelijke voorzieningen, die voor het gehele landbouwkundig onderzoek van belang kunnen zijn.

Commissies en Werkgroepen

Adviescommissie Organisatie Technische Diensten TNO

Voorzitter: G. I. Roos.
Secretaris: Drs. A. M. K. van Beek.
Adres: Dr. S. L. Mansholtlaan 12, Wageningen, tel. 08370-4246.

Adviescommissie Analytische Toerusting TNO

Voorzitter: Prof. Dr. G. Dijkstra.
Secretaris: Drs. K. H. P. Broer.
Adres: Analytisch Chemisch Laboratorium der R.U., Croesestraat 77A, Utrecht, tel. 030-880611, toestel 96.

Commissie Fytotrons TNO

Voorzitter: Prof. Dr. Ir. J. Doorenbos.
Secretaris: Dr. Ir. H. N. Hasselo.
Adres: 1e Van den Boschstraat 4, 's-Gravenhage, tel. 070-814141.

Contactcommissie voor Bodembioogie TNO

Voorzitter: Dr. J. Doeksen.
Secretaris: Mej. Drs. S. de Boer.
Adres: Centrum voor Plantenfysiologisch Onderzoek, Bornsesteeg 47, Wageningen, tel. 08370-4641.

Coördinatiecommissie Bestrijding en Voorkoming van Ziekten en Plagen in de Bodem (Bodempathogenen) TNO

Voorzitter: Prof. Ir. M. L. 't Hart.
Secretaris: Dr. P. Bruin.
Adres: Oosterweg 92, Haren (Gr.), tel. 050-46541.

Commissie Plantenregulatoren TNO

Voorzitter: Prof. Dr. Ir. J. Doorenbos.
Secretaris: Dr. A. C. Posthumus.
Adres: Centrum voor Plantenfysiologisch Onderzoek, Bornsesteeg 47, Wageningen, tel. 08370-4641.

Coördinatiecommissie Onkruidbestrijding TNO

Voorzitter: Ir. H. J. de Bruin.
Secretaris: Dr. Ir. W. van der Zweep.
Adres: Bornsesteeg 65, Wageningen, tel. 08370-3144.

Coördinatiecommissie Grondbewerking TNO

Voorzitter: Prof. Ir. H. Kuipers.
Adres: Diedenweg 20, Wageningen, tel. 08370-6111.

Commissie Onderzoek Minerale Voeding TNO

Voorzitter: Ir. Ch. H. Henkens.
Secretaris: Ir. J. Hartmans.
Adres: Bornsesteeg 65, Wageningen.

Commissie van Overleg voor het Schapenonderzoek TNO

Voorzitter: Prof. J. Mol.
Secretaris: Drs. N. F. Werkman.
Adres: Dokter Reijersstraat 8, Leidschendam, tel. 070-694211.

Coördinatiecommissie Melkwinning TNO

Voorzitter: Prof. Ir. E. A. Vos.
Secretaris: Ir. A. P. Verkaik.
Adres: 1e Van den Boschstraat 4, 's-Gravenhage, tel. 070-814141.

Werkgroep Inwendige Therapie van Plantenziekten TNO

Voorzitter: Prof. Dr. Ir. J. Dekker.
Adres: Laboratorium voor Fytopathologie, Binnenhaven 9, Postbus 85, Wageningen, tel. 08370-6111.

Werkgroep onderzoek bestrijding Aardappelcystenaaltje TNO

Voorzitter: Dr. J. G. ten Houten.
Secretaris: J. Kort.
Adres: Geertjesweg 15, Wageningen, tel. 08370-4941.

Coördinatiecommissie geïntegreerde bestrijding van plagen TNO

Commissie van Beheer:
Voorzitter: Dr. N. van Tiel.
Secretaris: Ir. H. Veenstra.
Adres: Juliana van Stolberglaan 148, 's-Gravenhage, tel. 070-814481.
Postadres: Postbus 297, 's-Gravenhage.
Voorzitter College van Sectievoorzitters: Prof. Dr. D. J. Kuenen.
Adres: Kemperbergerweg 11, Arnhem, tel. 085-452991.

Commissie Domesticatie Paddestoelen TNO

Voorzitter: Dr. Ir. H. N. Hasselo.
Secretaris: Ir. P. J. Stadhouders.
Adres: Laboratorium Domesticatie Paddestoelen TNO, Houthei 1, Maasbree (L), tel. 04765-700.

Afdeling Diergeneeskunde TNO

Voorzitter: J. M. van den Born.
Secretaris: Drs. N. F. Werkman.
Adres: Dokter Reijersstraat 8, Leidschendam, tel. 070-694211.

Leverbotcommissie TNO

Voorzitter: Prof. Dr. D. Swierstra.
Secretaris: Drs. N. F. Werkman.
Adres: Dokter Reijersstraat 8, Leidschendam, tel. 070-694211.

Werkgroep Leucose bij Pluimvee TNO

Voorzitter: Prof. Dr. W. K. Hirschfeld.
Secretaris: Drs. N. F. Werkman.
Adres: Dokter Reijersstraat 8, Leidschendam, tel. 070-694211.

Commissie voor Steriliteitsonderzoek bij Rundvee TNO

Voorzitter: Prof. Dr. C. H. W. de Bois.
Secretaris: Drs. N. F. Werkman.
Adres: Dokter Reijersstraat 8, Leidschendam, tel. 070-694211.