

# Vaste raketstuwstoffen

Dr. J. Trommel<sup>1)</sup> en Drs. J. van Ham<sup>2)</sup>

## Samenvatting

*Ontstaan en ontwikkeling van de diverse typen vaste raketstuwstoffen worden nagegaan en een aantal hinderpalen in deze ontwikkeling worden nader toegelicht. De voornaamste fysico-chemische eigenschappen van vaste stuwstoffen worden besproken en op hun belang voor de toepassing in de raket wordt nader ingegaan.*

In de wereld van vandaag kan men zeggen, dat de raket een vanzelfsprekende plaats inneemt tussen de vele specimina van de technische vooruitgang. Begonnen als een ontwikkeling voor miliaire doeleinden heeft vooral de ruimtevaart een zeer grote bijdrage geleverd tot de popularisering van de raket. Het zal begrijpelijk zijn, dat intensieve research voor alles wat met de raket verband houdt, nodig is geweest en nog nodig is. Een essentieel onderdeel van de raket is zijn stuwstof en dit artikel beoogt een overzicht te geven van de ontwikkeling van de vaste raketstuwstoffen. De *vloeibare* raketstuwstoffen, gewoonlijk een combinatie van een oxydans en een oxydabele stof, bijv.:

LOX (= liquid oxygen) + kerosine  
salpeterzuur + hydrazine, enz.

zijn op zichzelf geen stoffen die een interessante ontwikkelingsgeschiedenis achter de rug hebben. Hier hebben problemen als raketconstructie, ontwerpen van stromingsmeters en doseerpompen en de opslag van de vloeistoffen om een oplossing gevraagd en deze ook vaak gekregen. Voor de chemisch-technologisch geïnteresseerde is de historie van de ontwikkeling van de vaste stuwstoffen meer de moeite waard en bepaald spectaculair te noemen. Onder een raket verstaan we een voorwerp dat snelheid verkrijgt, doordat materie, in de meeste gevallen in de vorm van gasmoleculen, met grote snelheid uit een opening stroomt, een zg. straalpijp, die voor het richten van de gasmassa zorg draagt en tevens de uitstroomsnelheid verhoogt. Zo'n straalpijp bestaat uit een convergent en een divergent deel en zijn geometrie moet aan een aantal stringente eisen voldoen, waarop we nog nader terug komen. Verder willen we een definitie geven van een *kruit* (kruit op te vatten als verzamelnaam van o.a. raketstuwstoffen, geweerkruit, enz.): een *kruit* is een mengsel van stoffen, dat zonder toetreding van luchtzuurstof kan verbranden en daarbij in het algemeen een groot aantal gasvormige producten oplevert. In tegenstelling tot de vrij recente vloeibare

## Summary

*Historical origin and development of the various types of solid rocket propellants are reviewed and some obstacles in this line of progress are discussed. The principal physico-chemical properties of solid propellants and their significance in rocketry are outlined.*

brandstoffen moeten we ver in de geschiedenis teruggaan om de eerste vertegenwoordiger van de vaste stuwstof tegen te komen. Het blijkt, dat reeds omstreeks de tiende eeuw van onze jaartelling de Chinezen vuurpijlen en andere op raketprincipe berustende projectielen konden maken. De lading hiervan bestond uit het z.g. zwarte buskruit, een mengsel van zwavel, salpeter en kool, dat de Chinezen reeds in de 7e of 8e eeuw kenden! De Arabieren verhandelden het buskruit in de middeleeuwen westwaarts, waar toepassing vooral in de zich in die tijd voorspoedig ontwikkelende kanonnen plaats vond. Maar ook aan raketten werd toen gedacht, getuige overgeleverde tekeningen van Leonardo da Vinci.

In het Oosten heeft de raketontwikkeling zich meer doorgezet dan in het Westen, hetgeen de Engelsen tot hun schade in India ondervonden tegen het einde van de 18e eeuw (de raket was toen in onze streken al lang weer vergeten). Deze ervaring heeft geleid tot de oprichting van een studiecentrum voor raketten in Engeland door de Engelse officier Sir William Congreve en tot de snelle invoering van raketten in de meeste Europese legers. De slag bij Waterloo en het beleg van Kopenhagen kunnen genoemd worden als wapenfeiten, waarbij raketten werden gebruikt. Gedurende de 19e eeuw worden de raketten dan nog wat verbeterd en vooral vergroot. Bij het beleg van Sebastopol overbrugt men met raketten van ca 40 kg een afstand van 7 à 8 km. Tegen 1870 krijgen door een tweetal vindingen toch de gewone kanonnen weer meer belang; het z.g. achterladen en de vinding van de trekken en velden, waarmee men het projectiel een draaiende beweging geeft in de loop.

Tot die tijd waren richtvermogen zowel als bediening van het kanon hoogst ongelukkig en de nieuwe vindingen verbeterden dit aanmerkelijk. De vinding van de trekken en velden werd ook wel toegepast op de raket, maar had daar relatief minder effect, in de eerste plaats omdat het zwarte buskruit enkele voor een raketstuwstof slechte eigenschappen in zich verenigt. Wij komen hier nog op terug. Om kort te gaan, de raket geraakte wéér op de achtergrond en speelde ook in de eerste wereldoorlog nog een ondergeschikte rol. Het rookzwakke buskruit,

<sup>1)</sup> Koninklijke Nederlandsche Springstoffenfabrieken N.V. te Muiden.

<sup>2)</sup> Centraal Laboratorium TNO te Delft.

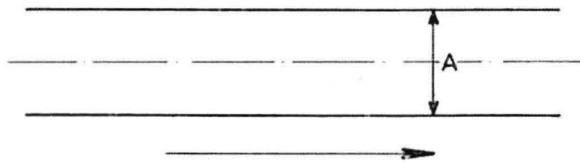


Fig. 1. Stroming van gas door cilindrische buis.

dat toen reeds bekend was, vermocht hier nog niets aan te veranderen. In de jaren vóór de tweede wereldoorlog begon de ontwikkeling van berekende raketten en deze heeft zich tijdens deze en erna stormachtig voortgezet tot op de huidige dag.

Om hier wat nader op te kunnen ingaan is het van belang te weten hoe een stuwstof gekarakteriseerd kan worden.

Een raket levert bij werking gedurende een bepaalde tijd een stuwkracht en bezit derhalve een impuls die gelijk is aan het produkt van stuwkracht en werktijd:

$$I = F \cdot t. \quad (1)$$

Deze impuls (dimensie: kgfsec) hangt af van de energieinhoud van het kruit en het kruitgewicht. Men definieert nu een *specifieke impuls* als het quotiënt van impuls en kruitgewicht:

$$I_{sp} = \frac{I}{m} \quad (2)$$

welke wordt uitgedrukt in seconden en ons in feite vertelt gedurende hoeveel seconden dat kruit een stuwkracht kan leveren gelijk aan zijn eigen gewicht.

De  $I_{sp}$  staat in verband met de uitstroomsnelheid ( $= v_{ex}$ ) van de verbrandingsgassen:

$$I_{sp} \sim \frac{v_{ex}}{g} \quad (g = \text{zwaartekrachtversnelling}) \quad (3)$$

Deze  $v_{ex}$  is op zijn beurt weer evenredig met  $\sqrt{\frac{T}{M_g}}$ , waarin  $T$  de temperatuur in  $^{\circ}K$  is en  $M_g$  het gemiddelde moleculairgewicht der verbrandingsgassen.

Om dit in te zien, beschouwen we eerst de straalpijp van een raket tijdens werking en stellen ons deze in eerste instantie voor als een cilindrische buis (zie fig. 1). Voor de hoeveelheid gas die er doorheen stroomt geldt:

$$\frac{\delta m}{\delta t} = \rho A v \quad (4)$$

waarin  $\rho$  = dichtheid van het gas  
 $A$  = diameter buis  
 $v$  = snelheid van het gas.

Gaan we nu de invloed van de variatie van de diameter op de snelheid na (differentiatie van  $v$  naar  $A$ ), dan vinden we de relatie van Hugoniot:

$$\frac{dA}{A} = \frac{dv}{v} \quad (M^2 = 1) \quad (5)$$

$M = \frac{v}{a}$  noemt men het Mach-getal;  $a$  is de geluidssnelheid in het betreffende gas.

Uit (5) volgt nu dat voor een verhoging van de snelheid van de gassen een verkleining van de diameter noodzakelijk is:

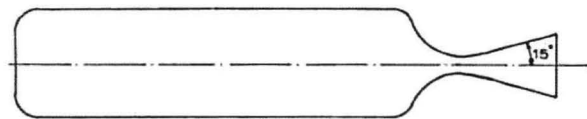


Fig. 2.

Fig. 2. Straalpijp van een raket (divergentiehoek  $30^{\circ}$ ).

$dv > 0$  als  $dA < 0$ , d.w.z. convergentie tot  $M = 1$  wordt bereikt. Wordt maar even het geval bereikt, waarin  $M > 1$ , dan geldt  $dv > 0$  als  $dA > 0$ , m.a.w. divergentie.

In het divergente deel van de straalpijp expandeert het gas in het gunstigste geval tot de buitendruk bereikt is. De verhouding tussen de keeldiameter en de diameter aan het eind van de straalpijp wordt bepaald door de verhouding van de buitendruk en de kamerdruk. Om de straalpijp niet te lang en dus te zwaar te maken, wordt de divergentiehoek op een  $30^{\circ}$  gehouden. (Zie fig. 2).

In de keel van de straalpijp geldt:

$$a^2 = \gamma \frac{p}{\rho} \quad (6)$$

waarin  $\gamma$  een constante is.

Bij de hoge temperatuur van de verbrandingsgassen is de algemene gaswet een goede benadering:

$$\frac{p}{\rho} = \frac{R}{M_g} T$$

waarin  $R$  = algemene gasconstante,  $M_g$  = moleculairgewicht gas.

Gesubstitueerd in (6):  $a^2 = \frac{\gamma RT}{M_g}$

Wat voor  $a$  geldt, geldt evenzeer voor de daarvan afgeleide uitstroomsnelheid  $v_{ex}$ , m.a.w.

$$I_{sp} \sim v_{ex} \sim a \sim \sqrt{\frac{T}{M_g}}$$

Een tweede belangrijke stuwstofgrootheid is de *verbrandingssnelheid*. Verbrandt men kruit aan de lucht, dan ziet men dit rustig opbranden, anderzijds vindt men bij toepassing in een bom een zeer snelle verbranding. Men heeft door bestudering van de verbranding gevonden, dat kruit een lineaire verbrandingssnelheid heeft, die gericht is loodrecht op het oppervlak en die sterk drukafhankelijk is. Dit wordt vastgelegd in de wet van Vieille:

$$r = c p^n \quad (7)$$

waarin  $r$  de verbrandingssnelheid is (burning rate),  $p$  de druk en  $c$  en  $n$  kruitconstanten zijn. Voor  $n$  geldt:  $0 < n < 1$ .

Daar de verbranding aan het oppervlak van het kruit plaats vindt, is dus tevens de *vorm van het kruit* in de raket van groot belang. Voor een constante stuwkracht is een bij verbranding gelijk blijvend oppervlak noodzakelijk. Men heeft door toepassing van „inhibitors”, waarmee men de kruitstaaf aan een of meer kanten belet te branden, dit op verschillende wijzen kunnen verwezenlijken. In fig. 3a ziet men een z.g. „cigaret burning”-kruit. Als deze raket echter lang wordt, zal hij nauwelijks genoeg stuwkracht leveren om zichzelf op te heffen.

Bij b ziet men een kruitstaaf die, zowel in- als uitwendig in de lengterichting brandt. Een bezwaar is hier echter, dat de hete gassen gedurende de hele brandtijd met de kamerwand in contact zijn, zodat deze veel dikker zal moeten zijn.

Voorbeelden c en d branden alleen inwendig en zijn

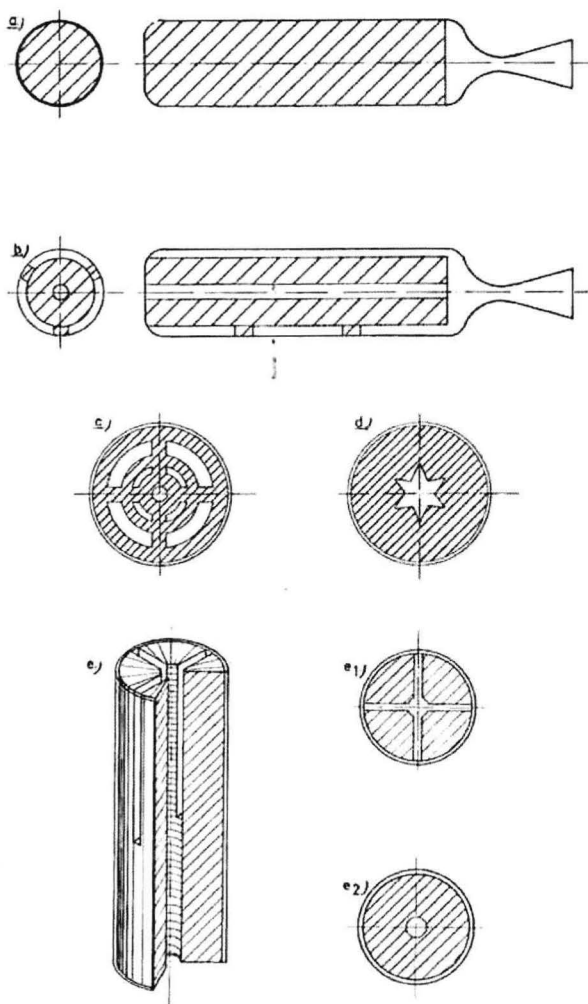


Fig. 3a. Een „cigarette burning“-kruit.

3b. In- en uitwendig in de lengte brandende kruitstaaf.

3c. en d. Alleen inwendig brandende kruitstaven met constant blijvend oppervlak.

3e. Van buiten geïnhibiteerd sleufkruit.

zo berekend dat ook hier het oppervlak constant blijft.

In geval e is een sleufkruit getekend, dat van buiten geïnhibiteerd is. Het gedeelte waarvan  $e_1$  de doorsnede is brandt *degressief* (brandend oppervlak neemt af), het gedeelte  $e_2$  brandt *progressief* (brandend oppervlak neemt toe). Door de lengte van de sleuven goed te kiezen, kan men ook op deze wijze een neutraal brandende kruitstaaf maken.

Toetsen we nu het zwart kruit aan deze eigenschappen, dan blijkt waarom hiermee nooit een raket gemaakt kon worden die werkelijk bevredigende resultaten gaf. Zwart kruit is een poeder, dat met moeite eventueel tot korrels van 1 cm groot geperst kan worden. Deze korrels, die vrijwel tegelijk op het moment van ontsteking van de raket zullen gaan branden, vertonen het beeld van een sterk *degressief* brandend kruit, waarbij de stuwkracht spoedig afneemt en de brandtijd steeds gering is. Daar komt nog bij dat de verbrandingsprodukten van zwart

kruit een gemiddeld moleculairgewicht hebben, dat aan de hoge kant is ( $K_2O$ ,  $SO_2$ , o.a.). De Specifieke Impuls bedraagt dan ook maar 70 seconden en dit verklaart, dat men met zwart-kruit-raketten slechts relatief geringe afstanden kan afleggen, welke bovendien nog moeilijk te reproduceren zijn.

Bij de toepassing van *rookzwak kruit* voor raketten zijn veel betere resultaten te voorschijn gekomen. Onder rookzwak buskruit verstaat men kruit op basis van nitrocellulose (= N.C.) (single-base kruit) of met nitrocellulose en nitroglycerine (= N.G.) (double-base kruit). Dit double-base (D.B.) kruit, als energierijker kruit speciaal voor de grotere kanonnen ook toegepast, is ook in de raketchemie het interessantst. Nitrocellulose (eigenlijk moeten we spreken van cellulosenittraat) wordt verkregen door nitreren van cellulose in een mengsel van  $H_2SO_4$  en  $HNO_3$ . Hiervoor wordt over het algemeen katoen van goede kwaliteit gebruikt, zodat N.C. of schietkatoen in witte vlokken verkregen wordt.

Het stikstofgehalte is van groot belang voor de oplosbaarheids- en geleereigenschappen en is te variëren door de samenstelling van het nitrerend zuur te wijzigen. Nitroglycerine wordt bereid door nitreren van glycerine en is, zoals bekend, een zeer schokgevoelige vloeistof. De nitrering is hier altijd volledig. N.C. geleert met N.G. en in principe kan op deze manier een homogeen stuwstof gemaakt worden met een specifieke impuls van 180 seconden.

Het mengen brengt echter grote moeilijkheden mee. Men deed dit daarom wel in een oplosmiddel, toegevoegd aan de pasta, die dan gewalst wordt en geëxtrudeerd. Men moet dan echter genoeg nemen met kruit, dat maximaal 1 cm dik is, daar anders het oplosmiddel er niet meer uit te krijgen is. Het kruit zou een tijdeffect gaan vertonen, wat funest is. Het is ook mogelijk zonder oplosmiddel, maar met verwarming te walsen, maar de pasta die op die manier verkregen wordt is zeer taai, zodat met veel krachtiger en dus kostbaarder persen gewerkt moet worden en ook onder verwarming, een niet ongevaarlijke bewerking, waarbij afstandsbediening achter dikke muren of wallen moet worden toegepast. In Amerika heeft men op deze wijze diameters tot 15 cm verkregen.

Het bezwaar van de geringe diameter bleef op die manier toch nog bestaan. Het dokteren hieraan heeft echter tot een heel interessante ontdekking geleid. Men had ontdekt dat loodstearaat een goed glijmiddel was bij het persen.

Toen men echter van op deze wijze gemaakt perskruit verbrandingseigenschappen ging meten, vond men dat de wet van Vieille voor dit kruit niet meer opging. Voor het bepalen van de exponent  $n$  in de kruitverbrandingswet zet men  $\log r$  uit tegen  $\log p$  en vindt dan gewoonlijk een rechte (curve 1 in fig. 4), waarvan de helling de waarde van  $n$  oplevert. Bevatte het kruit nu een loodzout, dan kon  $n = 0$  (curve 2) en zelfs  $n < 0$  (curve 3) worden, voor welke gevallen men respectievelijk de uitdrukkingen *plateaukruit* en *mesabrandend* kruit invoerde. Voor toepassing in de raket was deze ontdekking van groot belang. Immers een kleine verandering van de kamerdruk verandert de verbrandingssnelheid van een plateaukruit niet.

Een nog belangrijker voordeel is, dat de temperatuurcoëfficiënt van een plateaukruit heel klein is, d.w.z. de begintemperatuur van het kruit oefent in dit geval geen invloed uit op de verbrandingssnelheid, als men de raket maar laat werken bij een druk die valt in het gebied van het plateau. Het mechanisme van dit verschijnsel is nog vrijwel onopgehelderd.

Evenmin was hiermee de kwestie van de te geringe diameter opgelost en zo is men, mede dankzij de ontwikkeling van de kunststoffenindustrie, gekomen tot een nieuw type stuwstof, het „composiet-kruit”. Composiet-stuwstoffen bestaan uit een anorganische oxydator, een nitraat of perchloraat, — in zoverre geen verschil met zwart kruit — maar verkrijgen een hechte structuur doordat als brandstof een stof met uitstekende bindereigenschappen wordt gekozen.

Op deze wijze kan men aanzienlijk beter verpersbare massa's krijgen dan met D.B.-perskruit. Men heeft het eerste composiet-kruit gemaakt op asfaltbasis en dat was al met al nog geen groot succes. Om op alle klimatologische omstandigheden voorbereid te zijn, moeten de mechanische eigenschappen van een kruit tussen  $-40^{\circ}\text{C}$  en  $+50^{\circ}\text{C}$  aan bepaalde eisen voldoen, d.w.z. binnen dit temperatuurgebied mag geen vloeï optreden, evenmin mag het kruit bros worden. Zelfs moet het kruit, ook met een vulstofpercentage van 80-90, binnen dit temperatuurgebied nog rubberachtige eigenschappen behouden om het verschil in uitzetting tussen metalen motorkamer en kruit op te vangen. Dit is bij asfaltkruit geenszins het geval, hetgeen aan het wegdek wel vaak valt waar te nemen.

Maar in Amerika waren intussen een aanzienlijk aantal kunststoffabrikanten die zich toen het algemene principe van composiet-kruit bekend was, elk voor zich op de ontwikkeling van de juiste binder(s) hebben geworpen. Het  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  werd vervangen door  $\text{NH}_4\text{ClO}_4$  en er zijn weinig plastics en synthetische rubbers die niet beproefd zijn op hun toepassingsmogelijkheid voor composiet-kruit. Daarbij zijn drie typen te onderscheiden:

1. Men gaat uit van reeds gepolymeriseerd materiaal, mengt dit in kneders met het perchloraat en verperst dit mengsel. De persen stellen hier weer een limiet aan de diameter. Als binder heeft hier o.a. thiokol-rubber dienst gedaan:  $(-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{S}_4-)_n$ , maar meer dan 70% vulstof kan men hier niet in krijgen. Daardoor treedt onvolledige verbranding op, hetgeen voor de  $I_{sp}$  niet zo gunstig is; die bedraagt hier ongeveer 180 seconden. Deze methode wordt weinig meer toegepast.
2. Een andere methode gaat ook uit van polymeer waaraan echter weekmakers worden toegevoegd en waarmee dan het oxydatiemiddel wordt gemengd. Polyvinylchloride is hiervan een voorbeeld. Men kan op deze wijze een pasta verkrijgen die nog te gieten is, zodat hier een mogelijkheid lijkt te liggen tot ongelimiteerde diameters. Ook is een specifieke impuls van 220 seconden met deze soort te bereiken. Echter moet het kruit nog worden gezeleerd, waarbij een harde massa ontstaat. Hiervoor is een temperatuur van

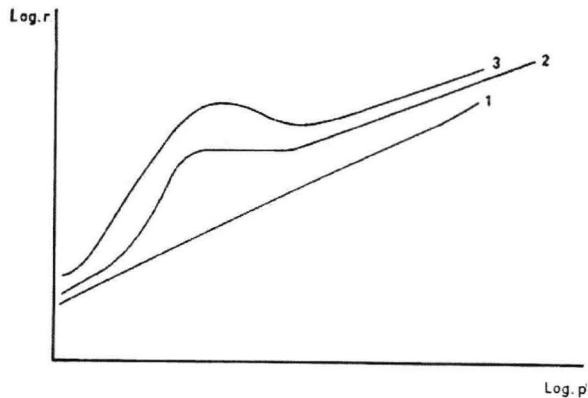


Fig. 4. Curven voor het bepalen van de exponent  $n$  in de kruitverbrandingswet.

160-170 $^{\circ}\text{C}$  vereist, dicht bij de ontvlamtemperatuur (180 $^{\circ}\text{C}$ ), hetgeen dus zeer gevaarlijk is. Daarnaast duurt het bij grotere diameters te lang voor dat een staaf van binnen op temperatuur is. Gevolg: spanningen en mogelijk scheuren. De methode wordt echter voor de middelgrote raketten wel toegepast.

Wanneer een composiet-kruit een  $I_{sp}$  van 220 seconden heeft dan kunnen we uitrekenen dat dit kruit minimaal 80%  $\text{NH}_4\text{ClO}_4$  bevat en dan is de gietbaarheid van de pasta geen vanzelfsprekende zaak. Om dit te bereiken past men een bimodale deeltjesgrootteverdeling toe. Bij één uniforme deeltjesgrootte zit nog ongeveer 34% aan gaten tussen de deeltjes. De 20% vloeïstof kan dus het geheel niet goed aan elkaar binden, maar met een fractie kleinere deeltjes erbij wordt de ruimte beter benut. Als we hierbij bedenken dat een van de belangrijkste variabelen in de verbrandingssnelheid van een composiet-kruit deze deeltjesgrootte van het perchloraat is, dan is te begrijpen dat het beheersen van het gedrag van het composiet-kruit ook op dit punt nog heel wat gevegd heeft.

3. Bij de meest recente composiet-soorten gaat men voor de binder uit van polymeer van laag moleculairgewicht en voegt tijdens het mengen met perchloraat katalysator voor de verdere polymerisatie toe, alsook een beperkte hoeveelheid van een „cross-linking agent”, waardoor een netwerk ontstaat, hetgeen de mechanische eigenschappen ten goede komt. De polymerisatie kan men vaak bij kamertemperatuur laten verlopen. Voorbeelden vindt men in de volgende tabel:

Dit procédé is niet aan bepaalde afmetingen gebonden. Met de laatste vertegenwoordiger van dit type is men in staat „case-bonded” te werken. Dit Flexadyne-kruit hecht op de wand van de motorkamer en behoudt ook bij lage temperaturen nog enige elasticiteit, mits men het „cross-linking agent” zeer nauwkeurig doseert.

Dat wil echter niet zeggen dat hiermee voor het *double-base* kruit de markt voorgoed verdwenen zou zijn, want er is ook een oplossing gevonden om het



a) <i>de polyesters</i> (—O—R—CH=CH—R—CO—O—R—CH=CH—) <sub>n</sub>	styreen + katalysator	200 seconden
b) <i>de polyurethanen</i> HO—R <sub>1</sub> —OH + OCN—R <sub>2</sub> —NCO → H(—O—R <sub>1</sub> —O—CO—NH—R <sub>2</sub> —NH—CO—) <sub>n</sub> O—R <sub>1</sub> —OH	driewaardige alkohol	230 seconden
c) <i>de polybutadiëenacrylzure esters</i> H <sup>2</sup> C=CHCOOR + H <sub>2</sub> C=CH—CH—CH <sub>2</sub> → (—CH <sub>2</sub> —CHCOOR—CH <sub>2</sub> —CH=CH—CH <sub>2</sub> —) <sub>n</sub>	butadiëen + katalysator	240 seconden

double-base kruit in alle gewenste maten te kunnen vervaardigen. Men maakt hiervoor eerst pellets van schietkatoenkruit, dat zijn korreltjes van 1 x 1 mm, waarmee men de mal van de te maken kruitstaaf vult, waarna de holten met nitroglycerine worden vol gegoten en het geheel uitgehard.

Er is nog een nieuw type vaste raketstuwstof bijgekomen, n.l. het plastisol-type, ook wel „composite-double-base” kruit genoemd, dat een aantal eigenschappen van beide kruitsoorten in zich verenigt. Bij de bereiding gaat men uit van schietkatoen en een organisch nitraat, bijv. pentaerythritoltrinitraat, die samen de — double-base — binder vormen en waaraan dan worden toegevoegd NH<sub>4</sub>ClO<sub>4</sub> en ook aluminium. Deze samenstelling komt dus neer op een composiet-kruit met een energierijkere binder.

De  $I_{sp}$  die hiermee bereikt kan worden is 255 seconden. Het aluminium wat hier genoemd werd wordt tegenwoordig aan de meeste kruitsoorten wel toegevoegd, tot double-base-gietkruit toe. De bereiding van het plastisol-kruit geschiedt op een wijze analoog aan de bereiding van een composiet-kruit.

Er schijnen ook wel proeven gedaan te worden met genitreeerde plastics, maar van toepassingen hiervoor is nog niets gebleken. Wel wordt i.p.v. aluminium, beryllium toegepast, waardoor het gemiddeld moleculairgewicht van de verbrandingsgassen omlaag gaat. Dit kan echter alleen voor de latere trappen van een meertrapsraket, omdat beryllium giftige verbrandingsprodukten levert.

De bereiding van de stuwstoffen van het composiet-type is altijd een riskante onderneming, in het bijzonder het innemen van het perchloraat in de binder. Men krijgt n.l. plaatselijk zeer hoge concentraties perchloraat in de pasta, zodat men moet vermijden daar al te grote krachten op uit te oefenen. Men gebruikt hiervoor speciale kneders, die achter dikke muren zijn opgesteld en op afstand bediend worden. Echter is ook bij gehomogeniseerd uitgehard kruit grote voorzichtigheid geboden.

Een probleem, dat hiermee in verband staat, was het transport van de grote staven voor ruimtevaart-raketten, dat ook om de kans op het ontstaan van scheuren, een tijdlang een onoverkomelijk probleem leek. Men ging wel als volgt te werk: men bracht de staaf in stukken ter plaatse en lijmden die dan in de raket aan elkaar, de z.g. „segmented rocket”, een kritiek procédé, daar, als één vlak niet geheel zou hechten, tijdens de werking een plotselinge vergro-

ting van het brandend oppervlak zou plaatsvinden, waardoor de raket zou kunnen exploderen en zeker niet in zijn berekende baan terecht zou komen. Men nam daarop zijn toevlucht tot een rijdend fabriekje op vrachtwagens, van waaruit men het kruit ter plaatse in de raket goot en dan uithardde. Dit was echter uit veiligheidsoverwegingen een ongewenste werkwijze. Men maakt nu gebruik van een nieuwe produktiemethode, het z.g. „slurry process”, waarbij men mengt in suspensie en de „carrier” door verdampen in vacuo verwijdert. De mengfase is bij dit proces veel minder gevaarlijk geworden.

Een vraag die men zich vele malen gesteld heeft, is: hoe ben ik er zeker van dat binnen in een kruitstaaf geen gaten of gaatjes voorkomen, doordat een luchtbelletje tijdens het gieten werd ingesloten (een z.g. gietgal), of dat geen barstjes zijn ontstaan bijv. door spanningen tijdens het uitharden.

Röntgenografisch onderzoek of blootstellen aan ultrasone trillingen geven alleen informatie tot een bepaalde diameter, wegens grenzen aan het doordringend vermogen van de röntgenstraling en omdat de ultrasone trillingen in een elastomere binder spoedig gedempt worden.

De barstjes kan men soms aan het licht brengen door het vele malen laten doorlopen van een temperatuurcyclus. Voor een afdoend antwoord voor de grotere diameters heeft men toch altijd zijn toevlucht moeten nemen tot een destructieve methode, in het bijzonder het statisch beproeven van de raket. Daar men hierbij statistisch te werk moet gaan om een redelijke zekerheid te hebben dat een bepaald procédé voldoet, is dit een zeer kostbare methode. Heeft men echter deze proeven voor een bepaalde kruitsamenstelling een voldoende aantal malen gedaan, dan heeft men voor het functioneren van een raket althans een eerste aanwijzing in de mechanische eigenschappen van het kruit. De belangrijkste zijn de treksterkte, de rek bij breuk en het gedrag bij afschuiving en isotrope compressie, die elk bij verschillende temperatuur en snelheid van belasting bepaald moeten worden.

Deze mechanische eigenschappen staan in duidelijk verband met het percentage vulstof en de deeltjes-grootteverdeling van deze vulstof. Men kan zich dus veel kosten besparen door van een nieuwe kruitsamenstelling eerst na te gaan of de mechanische eigenschappen aan de minimum eisen voldoen, alvorens tot lanceerproeven over te gaan.

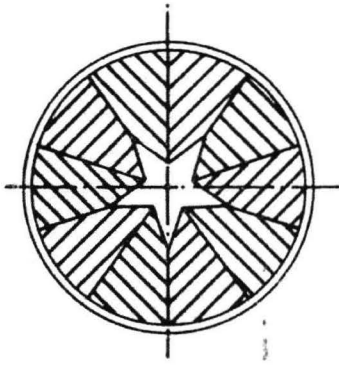


Fig. 5. Een „segmented rocket“.

In dit verband is het interessant melding te maken van een op het Centraal Laboratorium TNO verricht onderzoek, waarbij voor modelstoffen deze mechanische eigenschappen in afhankelijkheid van percentage vulstof en deeltjesgrootteverdeling werden bepaald [1]. Het is slechts een kleine stap deze uitkomsten toe te passen op vergelijkbare stuwstoffen.

Men die dieper geïnteresseerd zijn in raketten en hun brandstoffen, willen wij in de eerste plaats verwijzen naar de uitstekend gedocumenteerde artikelenreeks van Lindcijer [2] van de Rijksverdedigingsorganisatie TNO, gepubliceerd in *De Ingenieur* in 1961. Verder zijn enige boeken hier gekozen uit de veelheid die in de loop der jaren over dit onderwerp is verschenen [3, 4, 5, 6].

Een heel scala van vaste stuwstoffen is reeds bereikbaar geworden en men heeft in bepaalde gevallen de keus uit meer dan één kruit om tot een gesteld doel te geraken. In zoverre mag men met voldoening op wat bereikt is terugzien. Het toepassingsgebied brengt echter met zich mee, dat de bedrijfszekerheid in vrijwel alle gevallen een levensbelang is en uit dat oogpunt bezien zal de kruitmaker zich niet gauw kunnen veroorloven met de armen over elkaar te zitten, maar steeds zal hij met sterke kritische zin zich moeten bezig houden met de perfectionering van raketten en stuwstoffen.

#### Literatuur

- 1) F. R. Schwarzl, H. W. Bree en C. J. Nederveen: *Mechanical Properties of Highly Filled Elastomers*. Wordt gepubliceerd in: *Proceedings Fourth Intern. Congr. Rheology*, Providence, 1963.
- 2) E. W. Lindcijer: *Raketmotor en Stuwstof en Stuwstoffen voor Raketten*. *De Ingenieur* 73, 0 75-91, Ch 37-52, 53-68 (1961).
- 3) G. P. Sutton: *Rocket Propulsion Elements*. Wiley (1957).
- 4) F. A. Warren: *Rocket Propellants*. Reinhold (1958).
- 5) A. J. Zachringer: *Solid Propellant Rockets*. American Rocket Co., Wyandotte, Michigan (1958).
- 6) P. Tavernier en J. Boisson: in *The Chemistry of Propellants*. AGARD-publikatie, p. 265-284, Pergamon (1960).

Met ingang van 1 januari 1964  
bedraagt de abonnementsprijs van TNO-nieuws  
f 12,50 per jaar