

TNO-Defensieonderzoek
AD-A263 415



TD 91-4207

TNO-rapport

PML 1992-90

september 1992

Exemplaar no: 11

Simulatie van een schot van de Otomelara
76/62 met PISCES-2DELK grain burning

①

DISTRIBUTION STATEMENT A

Approved for public release;
Distribution Unlimited

APR 27 1993

TDCK RAPPORTCENTRALE

Frederikkazerne, gebouw 140
v/d Burchlaan 31 MPC 16A
TEL. : 070-3166394/6395
FAX. : (31) 070-3166202
Postbus 90701
2509 LS Den Haag



TD 91-4207

TNO-Defensieonderzoek

Lange Klew
Postbus 45
2280 AA Ri

TD 91-4207

Fax 015 - 84 39 91
Telefoon 015 - 84 28 42

TNO-rapport

PML 1992-90

september 1992

Exemplaar no: 11

Simulatie van een schot van de Otomelara
76/62 met PISCES-2DELK grain burning

DISTRIBUTION STATEMENT A

Approved for public release;
Distribution Unlimited

APR 27 1993

Auteur(s):

Dr. Ir. J.H. Hendriks
LTZSD 3 KMR Dr. M.J.G.M. Jurgens
LTZSD 3 KMR Ir. D.J. Kipping

Totaal aantal pagina's:

(excl. distr. lijst en RDP)

76

Aantal bijlagen:

5

Aantal figuren:

26

Aantal tabellen:

-

DO-opdrachtnummer:

A85/KM/118

Oplage:

26

Rubriceringen

Rapport:

ONGERUBRICEERD

Titel:

ONGERUBRICEERD

Samenvatting:

-

Bijlage(n):

ONGERUBRICEERD

Alle rechten voorbehouden.

Niets uit deze uitgave mag worden
vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt
door middel van druk, fotokopie, microfilm
of op welke andere wijze dan ook, zonder
voorafgaande toestemming van TNO.Indien dit rapport in opdracht werd
uitgebracht, wordt voor de rechten en
verplichtingen van opdrachtgever en
opdrachtnemer verwezen naar de
'Algemene Voorwaarden voor Onderzoeks-
opdrachten aan TNO', dan wel de
betreffende terzake tussen partijen
gesloten overeenkomst.
Het ter inzage geven van het TNO-rapport
aan direct belanghebbenden is toegestaan.

© TNO

Nederlandse organisatie voor
toegepast-natuurwetenschappelijk onderzoekTNO-Defensieonderzoek bestaat uit
het Fysisch en Elektronisch Laboratorium TNO.

TNO

TDCK RAPPORTENCENTRALE

Frederikkazerne, gebouw 140
v/d Burchlaan 31 MPC 16A
TEL. : 070-3166394/6395
FAX. : (31) 070-3166202
Postbus 90701
2509 LS Den Haag

93-08832

TDCK

1 INLEIDING

In dit rapport wordt het simuleren van de inwendige ballistische processen tijdens een schot van een Otomelara 76/62 behandeld. Deze simulaties zijn uitgevoerd met de variant 'Grainburning' van het programma PISCES 2DELK.

In het eerste deel zal kort worden ingegaan op dit programma. Vervolgens zullen de gegevens van de Otomelara worden behandeld, waarna met enige resultaten wordt afgesloten.

[illegible]

2 GRAINBURNING - PISCES 2DELK

2.1 Inleiding

Het PISCES 2DELK computer programma lost de vergelijkingen op die voortkomen uit de behoudswetten van materie, energie en impuls voor vloeistoffen en vaste stoffen in tweedimensionale problemen met een axiale of axiale symmetrie. Typische toepassingen zijn berekeningen op het gebied van dynamische vloeistof stromingen, structuur dynamica of combinaties hiervan.

De mechanica van verschillende processen kunnen in het programma worden beschreven met een van de vier volgende referentie kaders (of een combinatie daarvan):

De **Euler** processor werkt met een ruimtelijk constant niet-deformeerbaar grid waarin massa, energie en impuls van grid-cel naar grid-cel kunnen bewegen.

In de **Lagrange** processor wordt het grid gedefiniëerd op het materiaal. De massa kan niet van een grid-cel in een andere vloeien en het grid kan daaronder vervormen.

De **thin shell** processor is gebaseerd op het Lagrange principe, alleen in een 'dunne schaal' formulering.

De **rigid body**, tenslotte, beschrijft inerte lichamen zonder interne dynamica.

De Lagrange en Euler formuleringen zijn theoretisch equivalent, maar in de praktijk worden de toepassingsgebieden van beide beperkt door de numerieke benadering, waardoor verschillen ontstaan. Grofweg kan men stellen dat processen in vloeistoffen en gassen het best gesimuleerd worden met de Euler processor, terwijl voor deformaties in vaste stoffen de Lagrange methode het geschiktst is.

Meerdere processoren kunnen onderling gekoppeld worden, om bijvoorbeeld een systeem bestaande uit vaste stoffen en vloeistoffen te benaderen.

Omdat de te beschrijven processen zo dynamisch zijn, bepaalt het programma zelf zijn tijdstap. Dit gebeurt zodanig dat schokgolven of trillingen nooit in één cycle een hele gridcel kunnen passeren. Merk op dat daardoor naast de golfsnelheid de afmeting van de gridcellen (met name de kleinste gridcel) mede bepalend zijn voor de tijdstap.

Een speciale applicatie van PISCES 2DELK is de **Grain burning** module, waarin het mogelijk is om de overdracht van massa, energie en impuls van twee verschillende (fasen van) stoffen te beschrijven. Een voorbeeld hiervan is het verbranden van kruitkorrels (en de daarbij horende vorming van kruitgassen) in de loop van een kanon tijdens een schot.

Een uitgebreid overzicht van de theoretische structuur van PISCES 2DELK en de applicatie Grain burning is te vinden in respectievelijk: de PISCES 2DELK theoretical manual (1987) van S. Hancock [1] en het Technical Report TR 87-2118/1 'Equations and numerical solution of gas-particle flow. GRAINS level 26' (1987) van P.H.L. Groenenboom [2]. Beide rapporten komen, evenals het programma zelf, van 'The MacNeal-Schwendler Company BV.

2.2 In- en uitvoer

De gegevens die het model van het te beschrijven probleem bevatten, worden het programma op twee manieren aangeboden, namelijk via een input-file (extensie *.I2D) en via externe subroutines die aan het programma 'gelinked' worden. Met name dit laatste biedt de gebruiker de mogelijkheid om zijn model haast ongelimiteerd te verfijnen en maakt het programma bijzonder flexibel.

Er zijn verschillende manieren van uitvoer mogelijk. In de eerste plaats kan een leesbare 'print output-file' (extensie *.PRT) worden aangemaakt. Omdat zo'n print output snel enorm omvangrijk wordt, is het aan te bevelen om ook een zogenaamde 'archive-file' (extensie *.ARC) te maken, die niet direct leesbaar is maar waaruit met behulp van de post-processor 'DDARCH' snel een selectie kan worden gemaakt die wel leesbaar is. Ook kunnen met behulp van de 'DDPLOT' en 'PIPLOT' post-processoren uit de archive-file figuren (zoals grafieken, profielen en contour- en toestandsdiagrammen) worden gemaakt. Deze post-processoren zijn eenvoudig en snel te gebruiken.

Het is ook mogelijk om het hoofdprogramma direct een figuur te laten maken. Vaak is dit echter moeilijk, omdat bijvoorbeeld vóór de berekening niet altijd de geschikte tijdstippen of afmetingen bekend zijn.

Het programma biedt de mogelijkheid om een 'restart-file' (extensie *.RES) te maken, waarin alle relevante gegevens zoals die op van te voren te definiëren tijdstippen (of cycles) en/of aan het einde van de berekening waren zijn opgeslagen. Met deze file kan men de berekening laten doorgaan op een van deze momenten.

Op het moment is er (nog) geen interactieve pre- en post-processor bij het programma beschikbaar. Dit is een duidelijke handicap.

2.3 De input-file

In deze paragraaf zal de input-file worden bekeken. Omdat de manual die bij het programma wordt geleverd bijzonder uitgebreid is, zal dit beknopt worden gehouden.

De input-file is in twee stukken te verdelen. Het eerste stuk, in de manual 'global input' genoemd, bevat gegevens die van belang zijn voor de berekening in het algemeen, zoals bijvoorbeeld limieten voor de duur van het programma, de tijdstapgrootte en materiaalgegevens van de stoffen die in het probleem voorkomen. In het tweede stuk, de 'local input' genoemd, worden de subgrids gedefiniëerd, zowel wat betreft hun type, hun afmeting, de manier waarop ze aan elkaar (of de ruimte) zijn gekoppeld en de wijze waarop ze met materiaal gevuld zijn. Zowel in het 'global' als in het 'local' gedeelte zijn aanwijzingen over de vorm, frequentie en uitgebreidheid van de output te plaatsen.

Een voorbeeld van een input-file is te vinden in appendix 1, waar de input voor het Otomelara 76/62 model is gegeven. Hier is overigens te zien dat de scheiding in een 'global' en een 'local' gedeelte op het eerste gezicht niet op te merken is, de scheiding moet aan de kaarten herkend worden.

Het programma, althans de Grain burning variant, heeft een format gebonden input, de informatie dient op regels van tien plaatsen van acht characters gegeven te worden. Daarbij moeten de gegevens op een vaste, door het programma bepaalde, plaats worden

gegeven.

Waarschijnlijk heeft de basisvorm van PISCES 2DELK (in tegenstelling tot Grain burning) inmiddels een 'free format' input. Dat dit echter nog niet het comfort van een interactieve pre- en post-processor met zich meebrengt zal duidelijk zijn.

Enige speciale aandacht verdient de manier waarop de materiaaleigenschappen in het 'global' gedeelte van de input worden gegeven. In de MATERIAL kaart moet de toestandsvergelijking (equation of state) worden aangeduid. Het programma kent standaard enige modellen: de algemene gaswet (gamma wet), een polynoom vergelijking, een schokgolf model, het Tillotson model en het Jones-Wilkins-Lee model. Daarnaast is het mogelijk om met behulp van een zelf te schrijven externe subroutine een eigen model te gebruiken.

Enige regels verderop worden (alleen voor de Grain burning variant) in de GRNMISC kaarten enige materiaalparameters gegeven (in de COMMENT kaarten meteen daarboven wordt hun betekenis gegeven). Veel van deze gegevens zijn echter niet met grote nauwkeurigheid bekend, hetgeen, zoals verderop uitgebreider aan de orde zal komen, voor ons een van de grote moeilijkheden bij het simulatie proces heeft gevormd. Bijvoorbeeld over nummer vier, de proportionality constant interfacial drag tussen kruitkorrel en kruitgas, is nagenoeg geen kwantitatieve informatie beschikbaar. Nu heeft de waarde hiervan gelukkig geen dramatische invloed op het resultaat, zodat een min of meer acceptabele en werkbare waarde is genomen. Van veel groter belang zijn de burning rate parameters (nummers 11 en 12), afkomstig uit de wet van Vieille. Zij beïnvloeden de uitkomsten zodanig, dat zij tot op enkele procenten nauwkeurig bekend moeten zijn om een realistisch beeld te geven. Dat dit problematisch was en dat waarschijnlijk een via een externe subroutine gedefiniëerde alternatieve verbrandingswet geschikter is, wordt later behandeld.

Tenslotte definieert men in de input-file de geometrie van het grid en de gewenste uitvoerparameters.

2.4 De externe (user) subroutines

Het programma biedt de mogelijkheid om aan het basismodel eigen varianten of aanvullingen toe te voegen. Dit gebeurt met behulp van zelf te schrijven externe subroutines, die aan het basisprogramma 'gelinked' moeten worden. Deze faciliteit maakt het programma bijzonder plooibaar en is waarschijnlijk een van haar sterke punten in vergelijking met haar concurrenten.

In appendix 2 is als voorbeeld het pakket subroutines van het Otomelara 76/62 probleem gegeven. Het is geschreven in FORTRAN, net zoals het programma. Merk op dat de eerste 33 regels formeel het hoofdprogramma vormen en dat het werkelijke standaardprogramma als subroutine CODE wordt aangeroepen (CALL CODE). Waar in dit rapport over hoofd- of basisprogramma wordt gesproken, wordt deze subroutine CODE bedoeld.

We zullen de subroutines nu nader bekijken. Meteen valt op dat deze (kunnen) beginnen met een uitgebreid COMMON-blok, dat het mogelijk maakt om variabelen uit het hoofdprogramma te gebruiken.

De eerste subroutine is EXFLW2. Deze moet in de input-file (*.I2D) opgeroepen worden

in de BOUNDARY FLOW kaart en bevat informatie over de wijze waarop materiaal aan de randen een subgrid kunnen in- of uitstromen. Hier is hij gebruikt om de aanvuurlading in de vlampijp te simuleren. De processen in de vlampijp zelf die bestaat uit een rij ongebruikte gridcellen worden niet gesimuleerd. Aan de randen van de vlampijp wordt een polygon gedefinieerd waaruit onder de aanname van kritische stroming de hete verbrandingsgassen van de ontstekingslading de huls instromen. De gaatjes in de vlampijp worden gesimuleerd middels een porositeitsfactor.

Vervolgens komt de EXEOTW subroutine, die de toestandsvergelijking van de kruitgassen definiëert. In dit geval is daar de covolume vergelijking (ook wel bekend als Noble-Abel vergelijking) voor gebruikt. Deze subroutine hoeft niet gedeclareerd te worden in de input-file, maar vervangt, indien aanwezig, altijd de gekozen toestandsvergelijking voor het kruitgas in de input-file, die dan dus een dummy-rol vervult.

Dan volgt de subroutine TWPHIN. Deze bevat de beginwaarden van enkele gas- en kruitgrootheden, namelijk de snelheid (UX1 en 2, UY1 en 2), dichtheid (RHO1 en 2), volume fractie (VOLFR1 en 2), massa (SAM1 en 2), interne energie (SIE1 en 2, om de temperatuur te bepalen, hier is chemische energie niet in opgenomen), de hoeveelheid reeds verbrand kruit (PARDEN) en een parameter die aangeeft of het kruit al brandt (IFBRN). Deze subroutine is verplicht bij Grain burning, en de INITIAL kaarten van kruit en kruitgas zijn hier dan ook altijd dummies.

De langste subroutine in het voorbeeld is EXSGVG, waarin de oppervlakte-volume verhouding van de kruitkorrels op ieder willekeurig moment wordt berekend. Standaard is het programma namelijk alleen met een routine uitgerust die dit doet voor sferische korrels. De Otomelara gebruikt echter cilindrisch 7-gats kruit. Deze subroutine moet worden gedeclareerd in de input-file met IFSGVG, anders wordt de standaard routine (sferisch kruit) genomen. In de routine in het voorbeeld (die overigens ook voor 0-, 1- of 19-gats kruit te gebruiken is, na het wijzigen van enkele variabelen) wordt met behulp van de subroutine TABFRM een lijst van oppervlakte-volume verhoudingen berekend, waarbij ook rekening wordt gehouden met het uiteen vallen van de korrel in slivers na het doorbranden van het web (subroutines GENIS en GENOS). Vervolgens wordt voor een gegeven kruitmassa via interpolatie (subroutine DLAGR) het bijbehorende oppervlakte bepaald.

Met de subroutine EXEDIT kan additionele informatie worden geprint. In het voorbeeld wordt de maximale druk in iedere gridcel en in het hele grid gezocht en afgedrukt. Deze subroutine wordt automatisch na iedere cycle opgeroepen.

Ook de subroutine EXBDFO wordt iedere cycle gebruikt. Hierin worden extra krachten op het projectiel, ten gevolge van het loskomen uit de huls, het insnijden van de geleidingsband in de trekken en velden en de wrijving in de loop, bepaald. Over deze krachten, die overigens vaak als tegendruk worden behandeld, zijn geen bijzonder nauwkeurige gegevens bekend. De gebruikte waarden zijn dan ook naar analogie met andere wapens gekozen.

In de laatste subroutine, EXBUR, wordt een alternatieve burning rate gedefinieerd. Zoals al eerder aan bod kwam, kent het standaard programma alleen de wet van Vieille: $v = \beta \cdot p^\alpha$, waarin v de burning rate is en p de druk (het zou beter zijn om $\beta \cdot (p/p_0)^\alpha$ te gebruiken, in verband met de eenheid van β , maar helaas doet het programma dat niet). Wij gebruiken hier de wet van Muraour-Aunis: $v = c + \beta \cdot p$. Deze subroutine moet in de input-file gedeclareerd worden met IFBURN.

Er zijn nog veel meer subroutines mogelijk en het zal duidelijk zijn dat het model op deze

manier haast onbeperkt kan worden aangepast.

3 DE GEGEVENS VAN HET OTOMELARA 76/62 KANON

De Otomelara 76/62, van Italiaanse makelij, is een veel voorkomend wapen binnen de NATO. De Koninklijke Marine gebruikt ze op de S-fregatten, primair tegen lucht- en zeedoelen. In het kader van een onderzoek naar mogelijke mondingssnelheid vergroting is een simulatie model opgesteld met behulp van het in de vorige paragrafen besproken programma PISCES 2DELK Grain burning. De input-file en de gebruikte externe subroutines zijn daar ook al genoemd, en worden gegeven in de appendices 1 en 2.

3.1 Gegevens en herkomst

Wat betreft de input gegevens is het niet altijd even gemakkelijk geweest om aan de juiste informatie te komen, eenvoudigweg omdat dit soort problemen meestal veel empirischer wordt aangepakt en er daarom vaak geen fundamenteel theoretische grootheden bekend zijn. Bovendien zijn niet alle kruitlots hetzelfde, zeker niet als ze van verschillende producenten afkomstig zijn.

Alle gegevens, die gebruikt zijn, omtrent het wapen en het kruit zijn afkomstig van de Afdeling Wapen- en Communicatie Systemen/ Bureau Geschut en Munitie (DMKM/-WCS/GEMU) op de Admiraliteit in Den Haag [3], de NATO schootstafel [4], de firma Muiden Chemie BV en de firma Diehl GmbH [5], de laatste twee via bureau GEMU. Bij onderlinge inconsequenties is contact opgenomen met bureau GEMU.

Zoals de naam al zegt, heeft de Otomelara een kaliber van 76 mm, en is de loop 62 kalibers lang.

In de huls wordt 2,35 kg kruit gebruikt, met de volgende korrelgeometrie:

lengte	15.40 mm
diameter	6.78 mm
diameter gat	0.64 mm
binnen web	1.21 mm
buiten web	1.22 mm
aantal gaten	7

De samenstelling is:

nitrocellulose	83.4 %	(stikstofgehalte 13.15 %)
diphenylamine	1.2 %	
dibutylphtalaat	3.0 %	
dinitrotolueen	9.0 %	
kaliumsulfaat	2.4 %	
water	0.7 %	
ethanol (oplosmiddel)	0.3 %	
ethylcentralite	<0.05 %	(niet meegenomen in de berekening)
grafiet	sporen	(niet meegenomen in de berekening)

Het heeft een specifieke massa	1570 kg/m ³
gemeten verbrandingswarmte	3208 kJ/kg
ontstekings temperatuur	445 K (172°C)

Deze gegevens zijn afkomstig van Muiden Chemie. Diehl geeft iets kleinere afmetingen. Dit heeft enige invloed op de reactiesnelheid, omdat het brandbaar oppervlakte anders is. Als ontstekingslading wordt 157 g kruit type TR54 en 18 g zwart buskruit gebruikt. Van het TR54 kruit hebben wij geen gegevens, daar waar dit wordt gebruikt (in de subroutine EXFLW2, waar de aandrijfslading als een inflow van materiaal is gemodelleerd) is uitgegaan van zwart buskruit.

De massa van de granaat is 6.3 kg.

Wat betreft de te verwachten mondingssnelheid en de maximale druk wordt op dit moment nog exacte(re) informatie gezocht door bureau GEMU, de waarden liggen hier tussen 900 m/s en 925 m/s, respectievelijk 300 MPa en 360 MPa.

3.2 Uitwerking van de kruitgegevens

Het programma PISCES 2DELK vraagt als input de burning rate. Deze moet worden bepaald met de bovenstaande gegevens in combinatie van experimenteel bepaalde verbrandingscurves.

Eerst moet uit de samenstelling van het kruit een aantal andere grootheden worden berekend. Dit is gedaan met het thermochemische programma BLAKE [7] dat op basis van de chemische reacties en hun evenwichten de reactieproducten (hoofdzakelijk kruitgassen) bepaalt. Voor een ladingsdichtheid van 0.2 g/cm^3 zijn de resultaten:

adiabatische vlamtemperatuur	2554 K
maximale theoretische druk	232.6 MPa
force	915.2 kJ/kg
molaire massa kruitgassen	23.2 g/mol
covolume kruitgassen	$1.065 \text{ cm}^3/\text{g}$
gamma (c_p/c_v)	1.258
soortelijke warmte c_p	42.1 J/Mol*K

De kruitgassen bestaan hoofdzakelijk uit

CO	20.97 mol/kg
H ₂	7.62 mol/kg
H ₂ O	6.71 mol/kg
N ₂	4.44 mol/kg
CO ₂	3.00 mol/kg
KOH	0.23 mol/kg
H ₂ S	0.11 mol/kg

De overige kruitgassen en vaste en vloeibare reactieproducten (in totaal zijn 26 gassen en drie vaste stoffen als reactieproducten meegenomen in de berekening) beslaan tezamen minder dan 1/2%.

De burning rate wordt afgeleid uit experimenten: zogenaamde 'gesloten bom' (closed vessel) proeven. Het idee is eenvoudig: in een afgesloten bus wordt kruit aangestoken en tijdens de verbranding wordt de druk gemeten als functie van de tijd.

Omdat de NATO-standaard gesloten bom van de Koninklijke Marine nog niet operationeel is, werden wij in de gelegenheid gesteld de experimenten op de Koninklijke Militaire

School in Brussel (België) te doen in het laboratorium van professor R. Meysmans.

De experimenten zijn uitgevoerd met kruittype M6+2, lotnummer K-22/S/1-BPD-79 in twee verschillende bommen: het volume van de grootste is 682.3 cm³, dat van de kleinste 156.3 cm³. De volume-oppervlakte verhouding van beide bommen is niet hetzelfde, de kleine bom heeft relatief een grote oppervlakte. Het kruit werd aangestoken met een gasmengsel van 33% methaan en 67% zuurstof op een totale druk van 0.3 MPa (3bar), dat tot ontbranding gebracht door het doorbranden van een dun stroomdraadje (dat dus bij ieder 'schot' vernieuwd moet worden).

De volgende experimenten zijn uitgevoerd:

ladingsdichtheid (g/cm ³)	grote bom	kleine bom
0.10	M6-2	M6-11, M6-14
0.15	M6-3	M6-12, M6-15
0.20	M6-4	M6-13, M6-16
0.25	M6-5	
0.30	M6-6	

De maximale druk, gemeten bij M6-6, was 373.7 MPa.

Door de gemeten druk-tijd (p-t) curves is vervolgens een polynoom fit-curve gelegd (maximaal van de 21e graad, meestal ongeveer 10e graads). Deze fitcurves zijn daarna omgeschreven naar vivaciteits (levendigheds) curves, volgens

$$L = \frac{dp}{dt} \cdot \frac{1}{p \cdot p_0}$$

Hierin is p_0 de maximale druk.

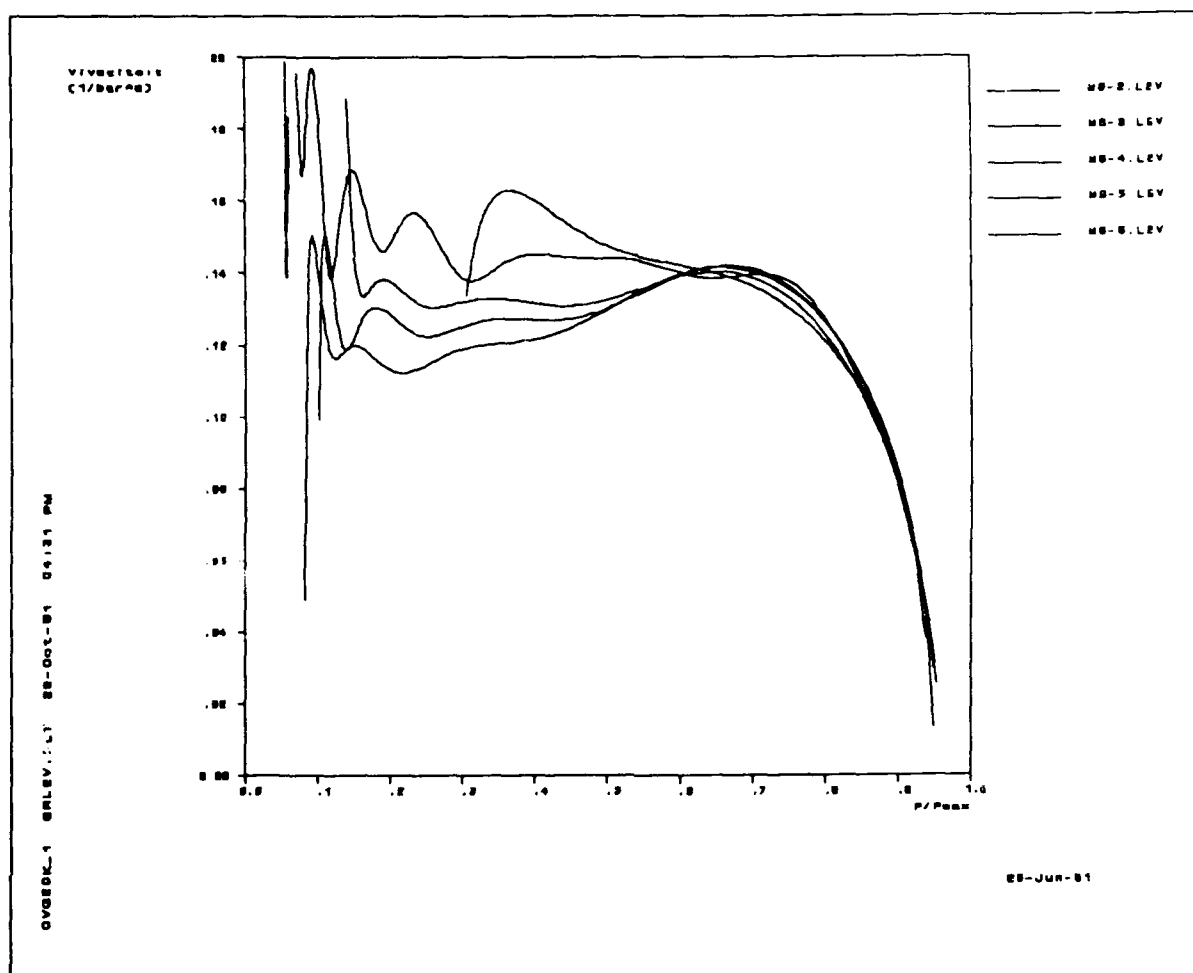
In figuren 1 en 2 is deze vivaciteitsfit L van de experimenten uitgezet tegen p/p_0 .

Vervolgens moet uit de meetwaarden de burning rate worden bepaald. Het principe hiervan is als volgt. Er vanuit gaande dat tijdens de verbranding het kruit wordt omgezet tot kruitgas met de (constante) adiabatische vlamtemperatuur, kunnen we stellen dat de toename van de druk evenredig is met de toename van de hoeveelheid kruitgas en dus met de afname van de hoeveelheid kruit. Omdat het kruit een (nagenoeg) constante dichtheid heeft, is dus het volume verbrand kruit per tijdseenheid evenredig met de druktoename per tijdseenheid. Als we nu het oppervlakte van de kruitkorrel kennen (hetgeen voor iedere geometrie is uit te rekenen) weten we ook de inbranddiepte per tijdseenheid of burning rate, omdat de inbranddiepte gelijk is aan de volumeverandering per oppervlakte.

In werkelijkheid moet ook nog rekening gehouden worden met het covolume van de kruitgassen, de onsteking (beide bekend) en warmteverliezen naar de bom. Van dit laatste kan een redelijke schatting worden gemaakt door de theoretische en de gemeten maximale druk met elkaar te vergelijken. Het verschil hiertussen is (in eerste orde) een maat voor verloren warmte.

Merk op dat deze berekening werkt met de p-t curve en niet met de vivaciteitscurve. De vivaciteit is hier slechts gebruikt om de metingen grafisch weer te geven, en de gebruikte definitie (soms komen varianten voor) doet dus in de berekening van de burning rate niet ter zake.

Wij hadden twee programma's tot onze beschikking die de burning rate berekenden uit de meetwaarden, namelijk TBI12 [7] en BRL-BR [8]. In figuur 3 zijn de resultaten te zien



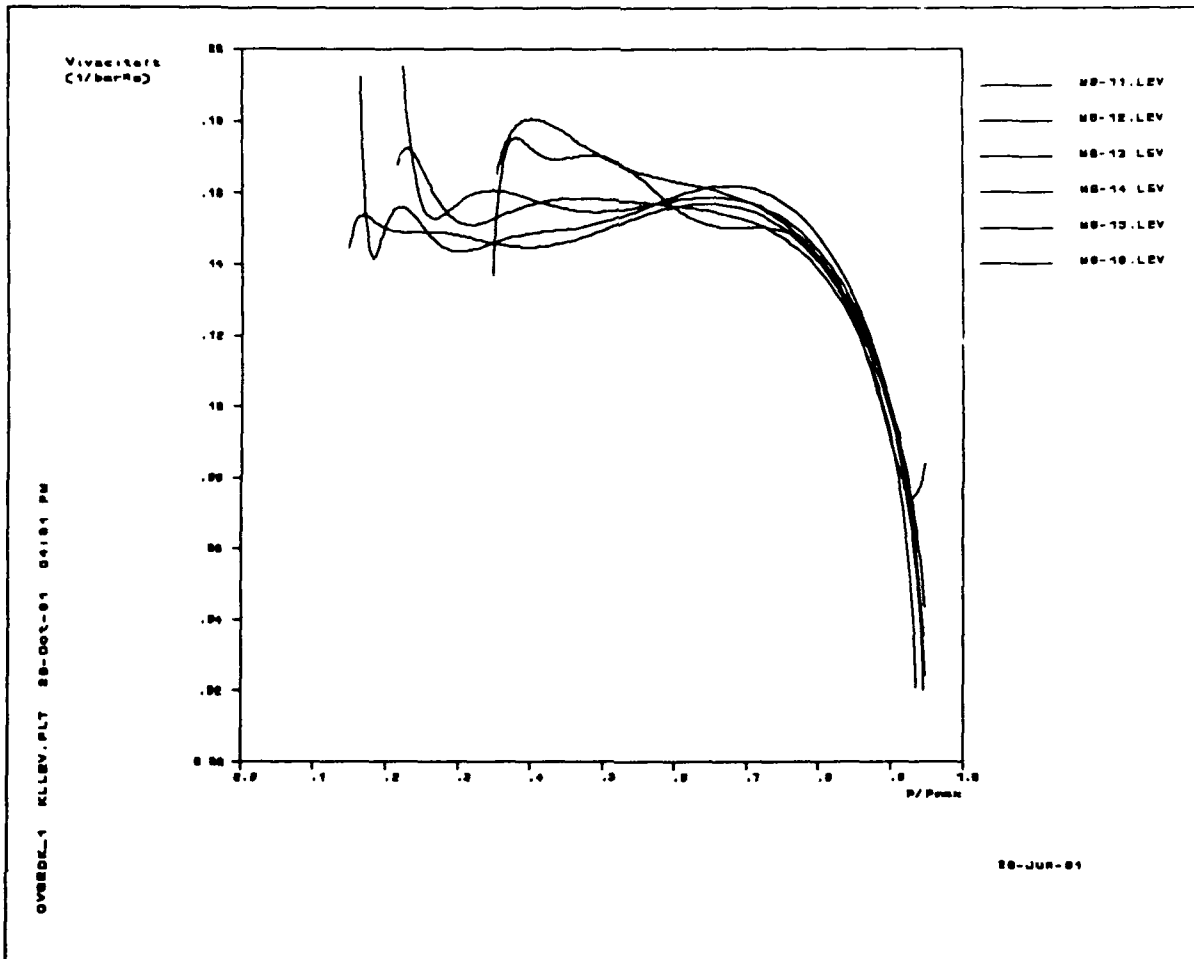
Figuur 1: Levensduurcurves van Otomelara kruit gemeten met de grote bom.

van berekeningen met BRL-BR. Hierin zijn M6-2, M6-11 en M6-14, met een ladingsdichtheid van 0.1 g/cm^3 , weggelaten voor de overzichtelijkheid van de figuur. Zij gedroegen zich geheel zoals de andere en lagen 'op' de andere curves. In appendix 5 zijn de figuren 1 t/m 3 in kleur en op A3-formaat weergegeven, zodat ook de verschillende metingen goed te onderscheiden zijn.

Burning rates berekend met TBI12 zijn vrijwel identiek.

We merken op dat aan het einde van iedere curve, nadat hij is begonnen te dalen, een vreemde 'bult' te zien is. Dit is een artefact van de berekening. De verklaring is dat de kruitkorrels op dit punt uit elkaar beginnen te vallen, alleen niet precies allemaal tegelijkertijd. Het berekende korreloppervlakte gaat dan sterk afwijken van de werkelijke waarde, zodat de daarmee berekende burning rate niet meer realistisch is. Een sterke aanwijzing hiervoor is dat de 'bult' steeds alleen op het laatst optreedt, en steeds slechtst een procent of 15 in beslag neemt. Dit is precies het volume van de kruitkorrel op het moment dat hij uiteen gaat vallen ten opzichte van de oorspronkelijke korrel (13.4%).

Ook de vorm van de bult is hieruit te verklaren. Daartoe bekijken we figuur 4, die het oppervlakte van de kruitkorrel geeft als functie van het volume, zoals dat wordt berekend door de beide programma's TBI12 en BRL-BR (en ook in de externe subroutine EXSGVG

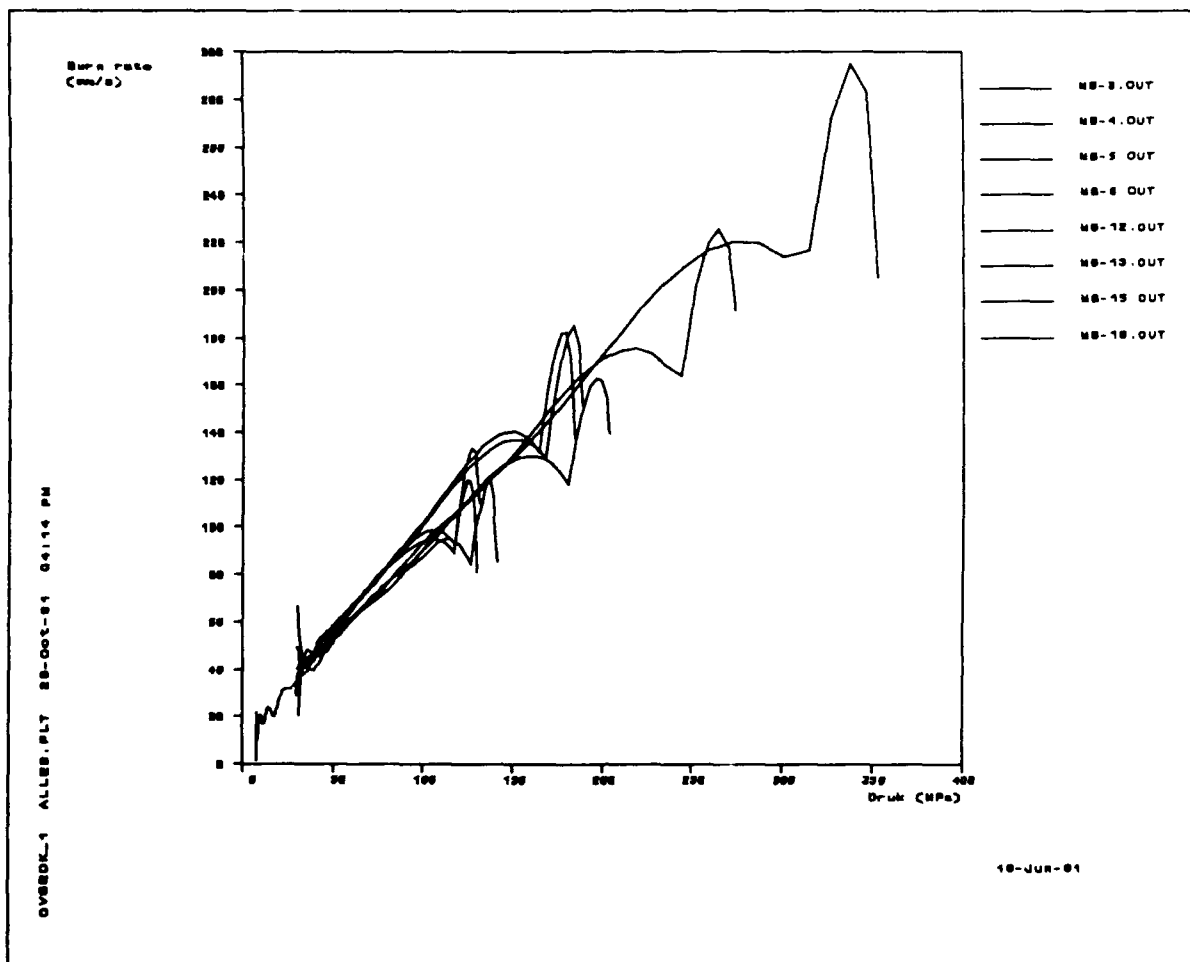


Figuur 2: Levendigheidscuurves van Otomelara kruit gemeten met de kleine bom.

in het programma PISCES 2DELK Grain burning).

We zien een zeer duidelijke knik optreden op het moment dat de (7-gats) korrel in slivers uit elkaar valt. De programma's gaan er vanuit dat dit bij alle kruitkorrels op precies hetzelfde moment gebeurt. Doordat er een zekere spreiding is in de afmetingen van de korrels is dat onjuist. Dus voordat het programma dat verwacht, zullen sommige korrels al uiteen vallen, waardoor hun oppervlakte enorm afneemt (zie figuur 4). Het berekende totale oppervlakte is dan dus groter dan het werkelijke. Omdat de burning rate het verbrande volume per oppervlakte (per tijdseenheid) is, berekent het programma dus een te kleine burning rate. Dit is te zien in figuur 3, vóór de bult daalt de burning rate. Aan de andere kant, op het moment dat het programma verwacht dat alle kruitkorrels (tegelijker-tijd) uit elkaar gevallen zijn, zullen er nog korrels intact zijn. Die hebben dus een groter oppervlakte dan het programma berekent, en, analoog met het bovenstaande, berekent het programma een te grote burning rate.

Precies dezelfde redenering is van toepassing op het opbranden van de slivers kruit. Doordat dit ook niet voor alle slivers simultaan zal gebeuren, hoewel het programma dat wel verwacht, daalt de burning rate uiteindelijk en houdt hij niet abrupt op.



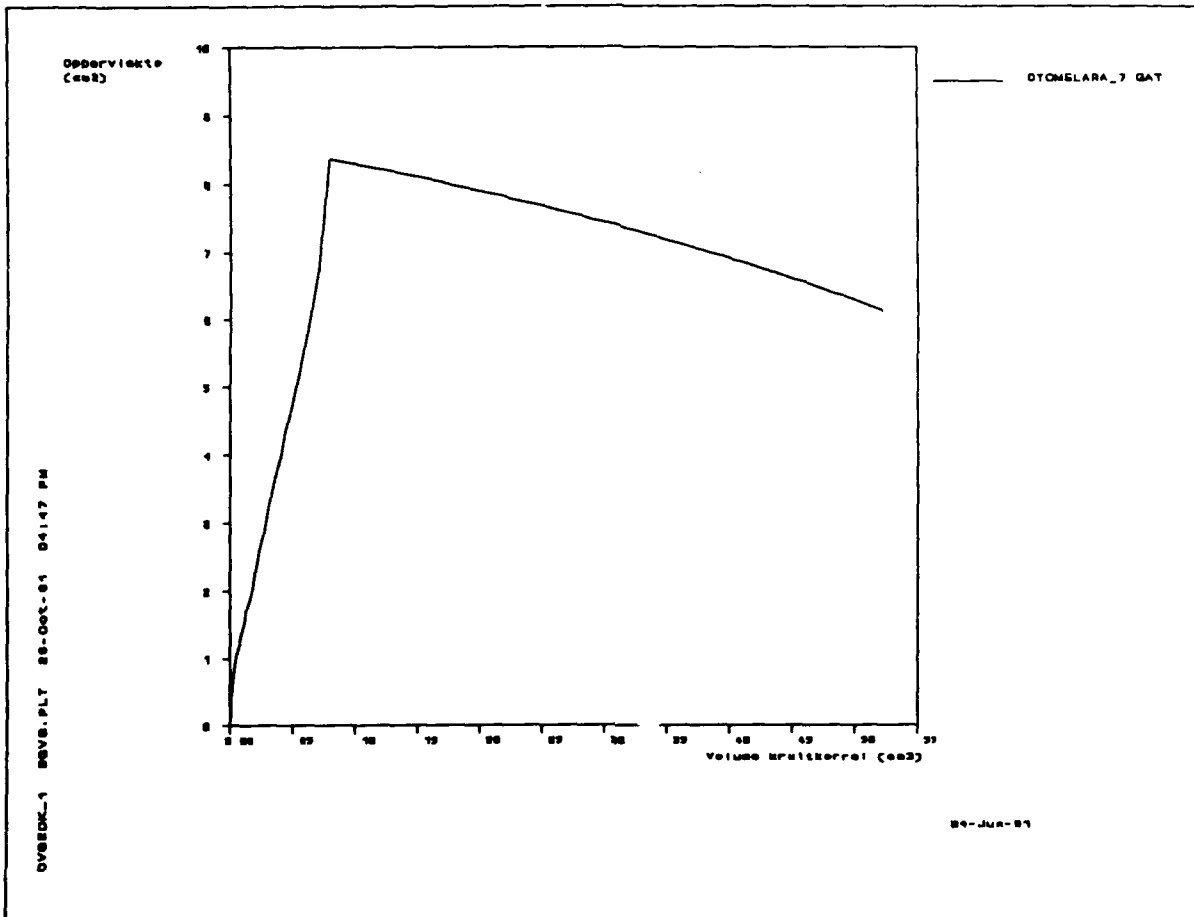
Figuur 3: Burning rate curves van Otomelara kruit.

De beide programma's TBI12 en BRL-BR bieden ook de mogelijkheid om aan de op bovenstaande manier gevonden burning rate curves een verbrandingswet te fitten. Helaas werken beide alleen met de wet van Vieille: $v = \beta \cdot p^\alpha$, waar geen constante term in mogelijk is. Wij concluderen echter uit de grafiek (figuur 3) dat een rechte lijn die niet door de oorsprong loopt geschikter is, hetgeen neerkomt op de wet van Muraour-Aunis: $v = c + \beta \cdot p$. We bepalen dan c en β als:

	c (m/s)	β (m/s*Pa)
grote bom proeven	0.01	$8.0 \cdot 10^{-10}$
kleine bom proeven	0.01	$9.0 \cdot 10^{-10}$

We zullen in de simulatie met PISCES 2DELK beide waarden gebruiken, hoewel de grote bom proeven nauwkeuriger zijn, omdat ze in veel grotere drukgebieden zijn gemeten en omdat de oppervlakte volume verhouding kleiner is en dus ook de warmteverliezen naar de wand.

In de Powder Description Sheet van Muiden Chemie is ook een vivaciteitscurve gegeven. Deze heeft waarden die iets lager liggen dan de door ons zelf gemeten curves, namelijk rond $0,1 \text{ bar}^{-1} \text{ s}^{-1}$. Het gaat hier echter om een slecht leesbare kopie. Nadere informatie was niet beschikbaar. Gewenste informatie is: de 'debulleting' kracht (om granaat uit huls los te trekken), de dimensies en het gebruikte materiaal van de geleidingsband, een diagram



Figuur 4: Oppervlakte van een Otomelara kruitkorrel als functie van het volume.

van de aandrijvende kracht en de wrijvingskracht in de loop, de vivaciteits curve van het kruit en een diagram van de gasdruk (versus tijd en afgelegde weg in de loop) met de maximum druk.

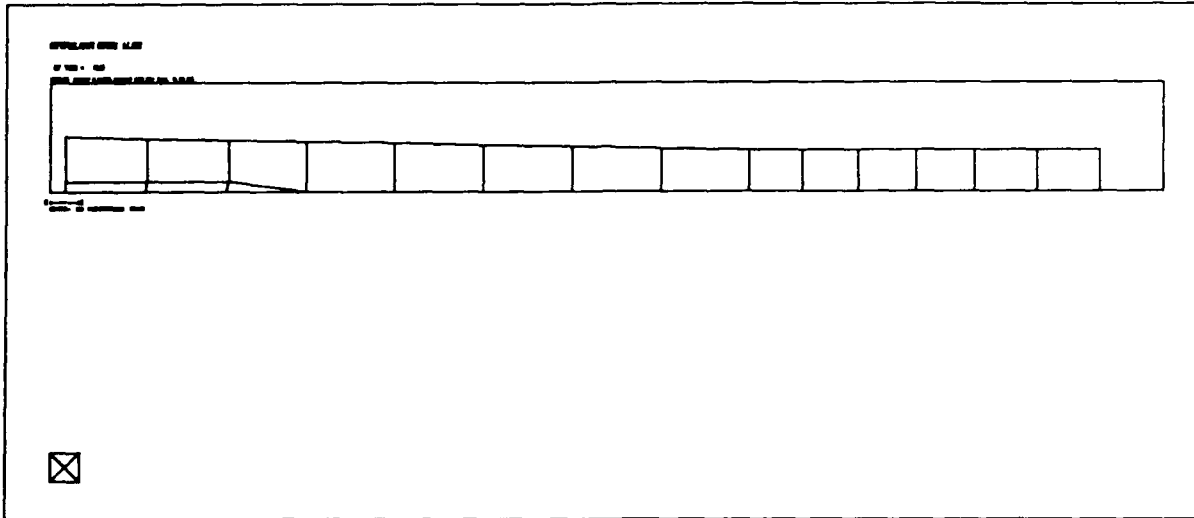
3.3 Grootheden die onvoldoende nauwkeurig bekend zijn

Behalve grootheden waarover nog niet voldoende nauwkeurigheid bestaat, zoals de lostrekkracht, de wrijving in de loop, de insnijkracht, de maximale druk, de mondingssnelheid, de overeenkomst tussen gemeten en opgegeven kruitgegevens, onstekingslading, etcetera, maar die met behulp van bureau GEMU bekend moeten worden, zijn er ook nog gegevens die binnen de Koninklijke Marine of bij de leverancier onbekend zijn. Dit zijn met name de waarden die in de input van PISCES 2DELK onder GRNMISC (zie paragraaf 2.3) vermeld moeten worden. Het is gelukt om hier enige fundamentele literatuur over te verzamelen [10], waar echter wegens onderlinge inconsistentie (en tijdgebrek om daar diep op in te gaan) nog niet genoeg gebruik van is gemaakt. De zaak is daarom pragmatischer aangepakt, en van de genoemde grootheden is bekeken in welke mate zij de uitkomsten van de berekening beïnvloeden. Gelukkig bleek geen van de onbekende gegevens van dramatische invloed op de resultaten. Dit zal in het volgende hoofdstuk worden beschreven.

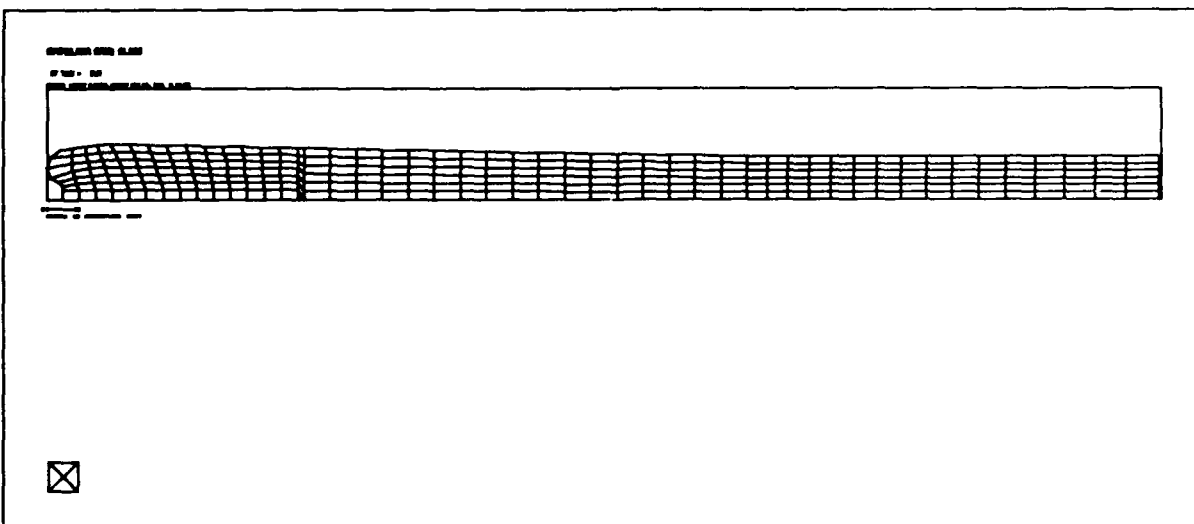
4 SIMULATIE VAN EEN SCHOT IN DE OTOMELARA 76/62

In dit hoofdstuk worden de resultaten van de simulatie met PISCES 2DELK Grain burning van de Otomelara 76/62 besproken. Het gebruikte model en de gegevens zijn in de vorige bladzijden behandeld en terug te vinden in de input-file en de externe subroutines, respectievelijk appendix 1 en 2.

De simulatie is uitgevoerd met twee verschillende grids, een grove en een fijnere. Het grove bestaat uit één enkele rij van 50 cellen (zie figuur 5), het fijne uit 6 rijen van 99 cellen (figuur 6).



Figuur 5: Het grove Otomelara grid, 1L50.



Figuur 6: Het fijne Otomelara grid, 6L100.

Het fijne grid is het grid uit appendix 1. In beide gevallen is overigens een extra rij gebruikt om de vlampijp met de ontstekingslading te modelleren. Deze wordt verder niet gebruikt. We zullen de berekeningen met beide grids aanduiden met 1L50 voor het grove

grid en 6L100 voor het fijne.

In de simulatie wordt gewerkt met de burning rate die is berekend met de gegevens uit de grote bom (paragraaf 3.2): $v=c+\beta \cdot p$ met $c=0.01$ m/s en $\beta=8.0 \cdot 10^{-10}$ m/s*Pa.

4.1 Resultaten

De resultaten zijn als volgt:

grid	duur (ms)	aantal cycles	mondings- snelheid(m/s)	max. druk (MPa)	tijdstip(ms) max.druk	hoeveelheid kruitgas(kg)
1L50	9.46	1119	950	475	4.84	2.496
6L100	9.47	7479	957	509	4.86	2.515

Merk op dat inderdaad de gemiddelde tijdstap (duur gedeeld door aantal cycles) van het grove grid veel groter is dan die van het fijne, zoals al in paragraaf 2.1 werd opgemerkt.

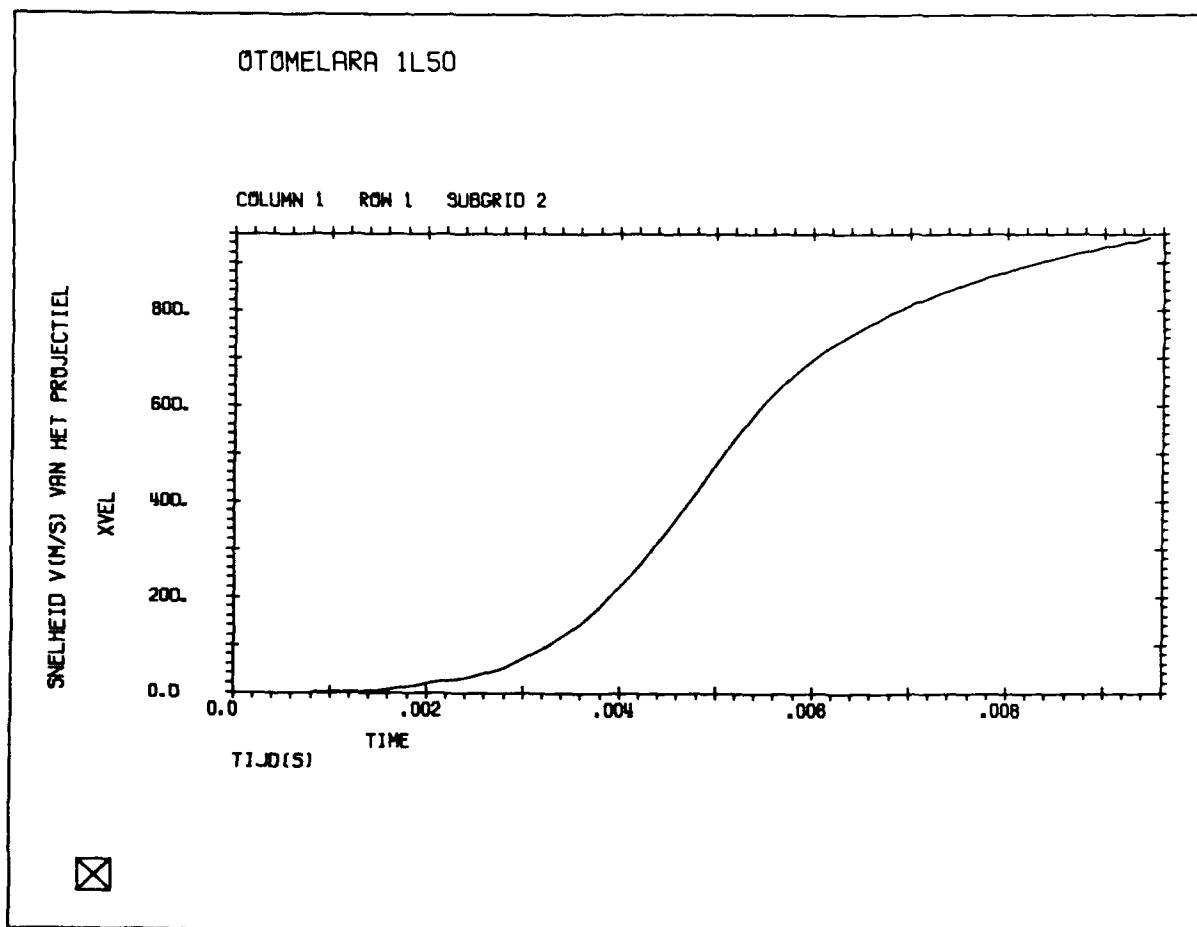
In beide gevallen treedt de maximale druk op in het begin van de huls, bij het grove grid ongeveer 15 cm van de wand, bij het fijne grid helemaal bij het begin direkt boven de vlampijp.

De mondingssnelheid van het fijne grid is iets (0.7%) groter dan die van het grove grid. Dit kleine verschil komt bijna precies overeen met het verschil in de totale hoeveelheid kruitgas (die een superpositie is van de verbrande voortdrijvende lading en de uit de vlampijp naar binnen gestroomde ontstekingsgassen).

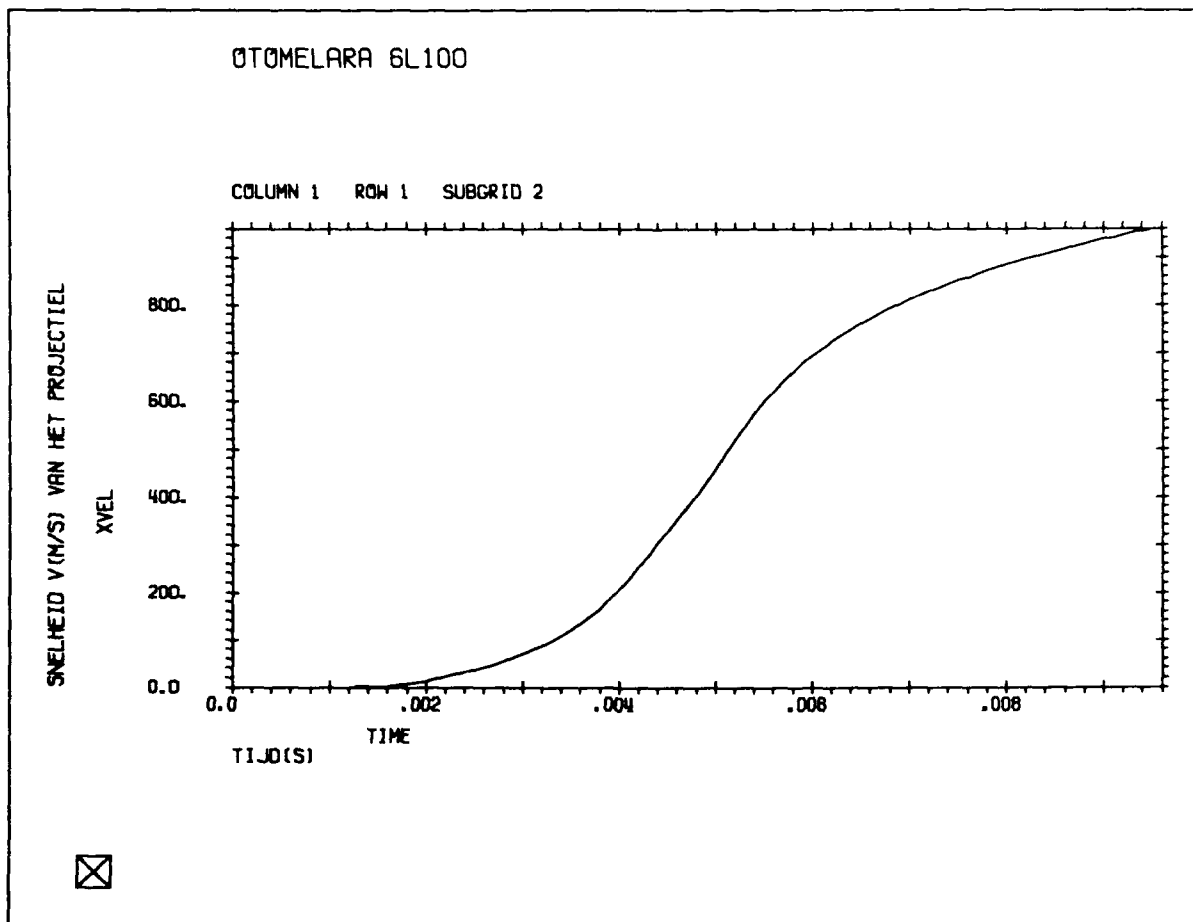
De maximale druk geeft een veel groter verschil (ruim 7%) tussen beide grids te zien: de maximale druk is een stuk groter bij het fijne grid. Dit is begrijpelijk. Bij het fijne grid wordt namelijk veel meer van het golfkarakter van de drukopbouw behouden. Bij het grove grid worden de extremen veel meer uitgemiddeld. Dit is goed te zien in de figuren 17 t/m 22 die enkele drukprofielen gesimuleerd met de 2 verschillende grids tonen.

Het zou interessant zijn om in de lengte richting met een nog fijner grid te werken. Het programma kent echter een maximum van 100 gridcellen.

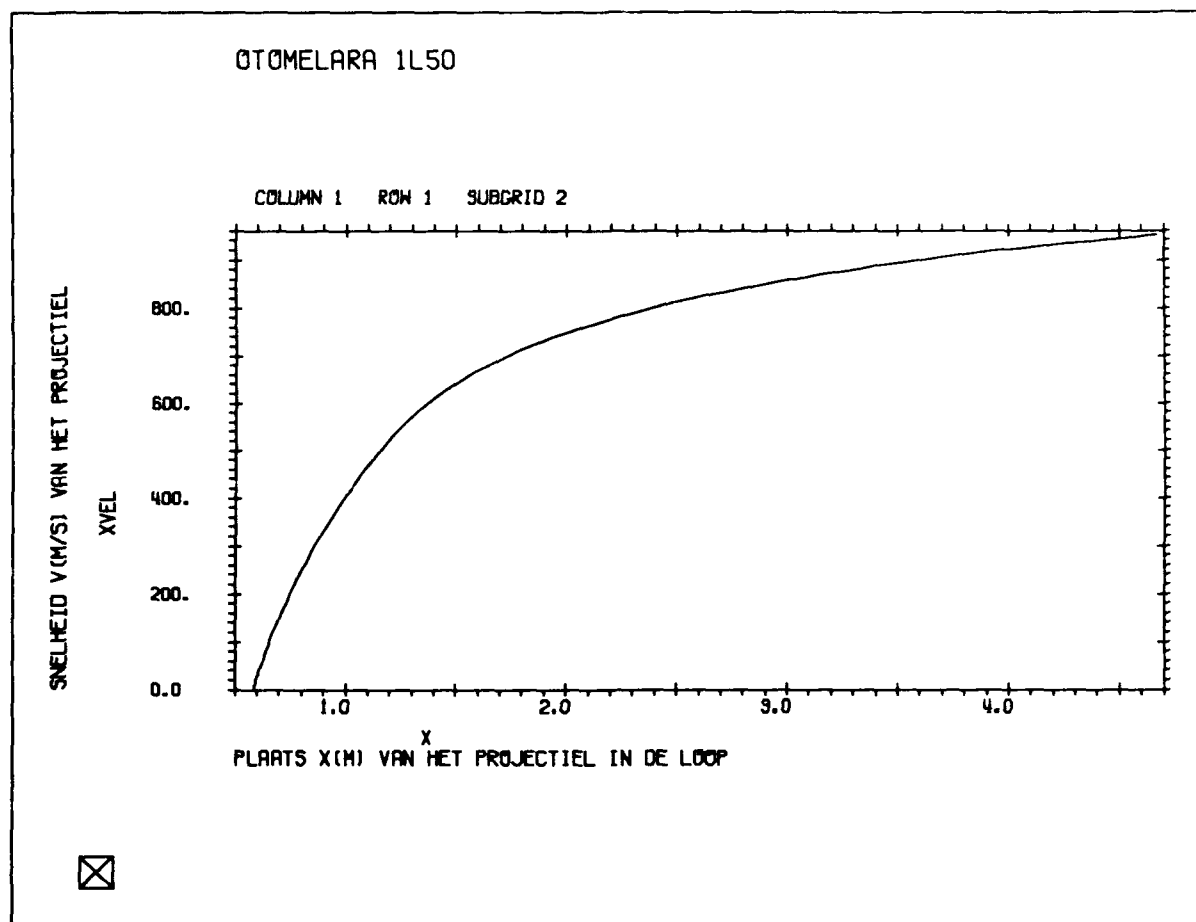
In de volgende bladzijden (figuren 7 t/m 25) worden de plots van beide grids met diverse variabelen als functie van tijd en plaats in de loop steeds naast elkaar gezet.



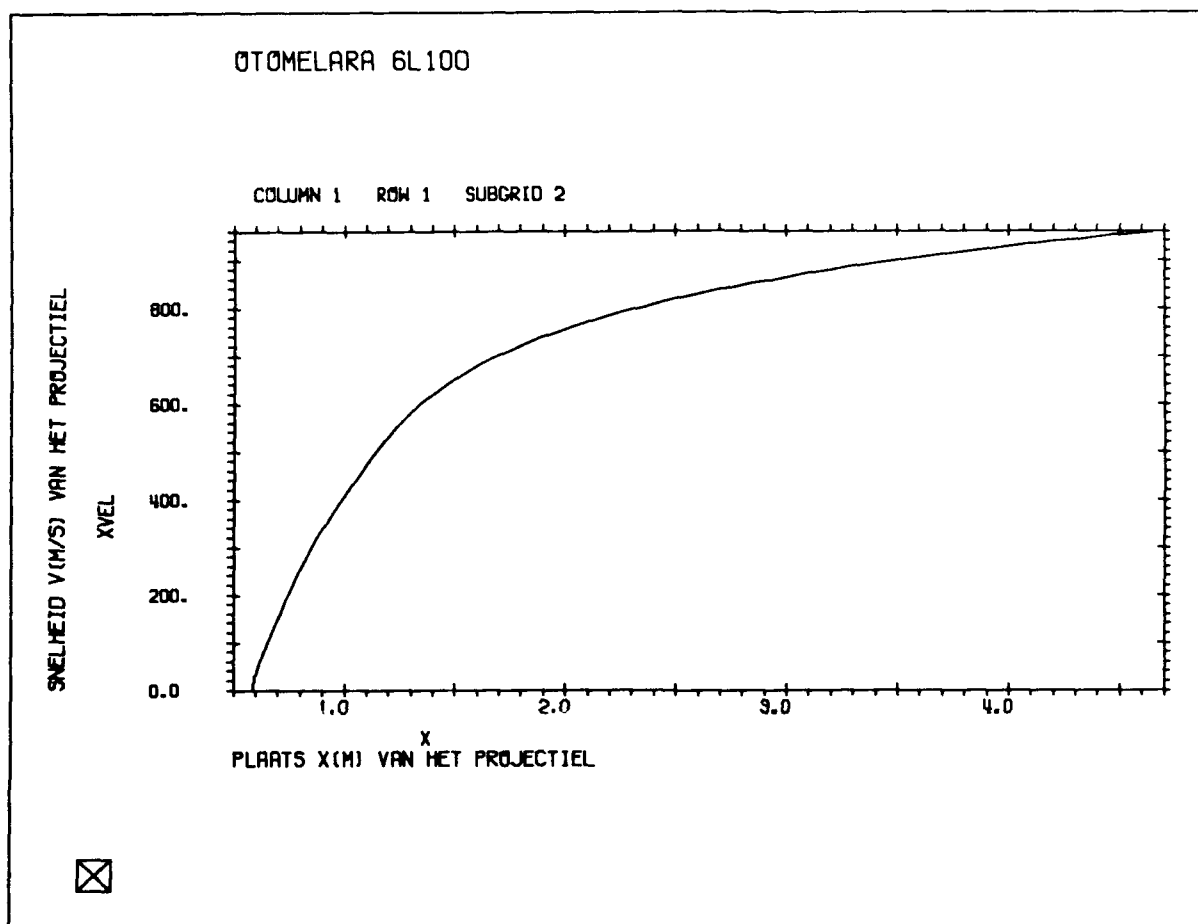
Figuur 7: De snelheid van het projectiel in de loop als een functie van de tijd (berekend met 1L50).



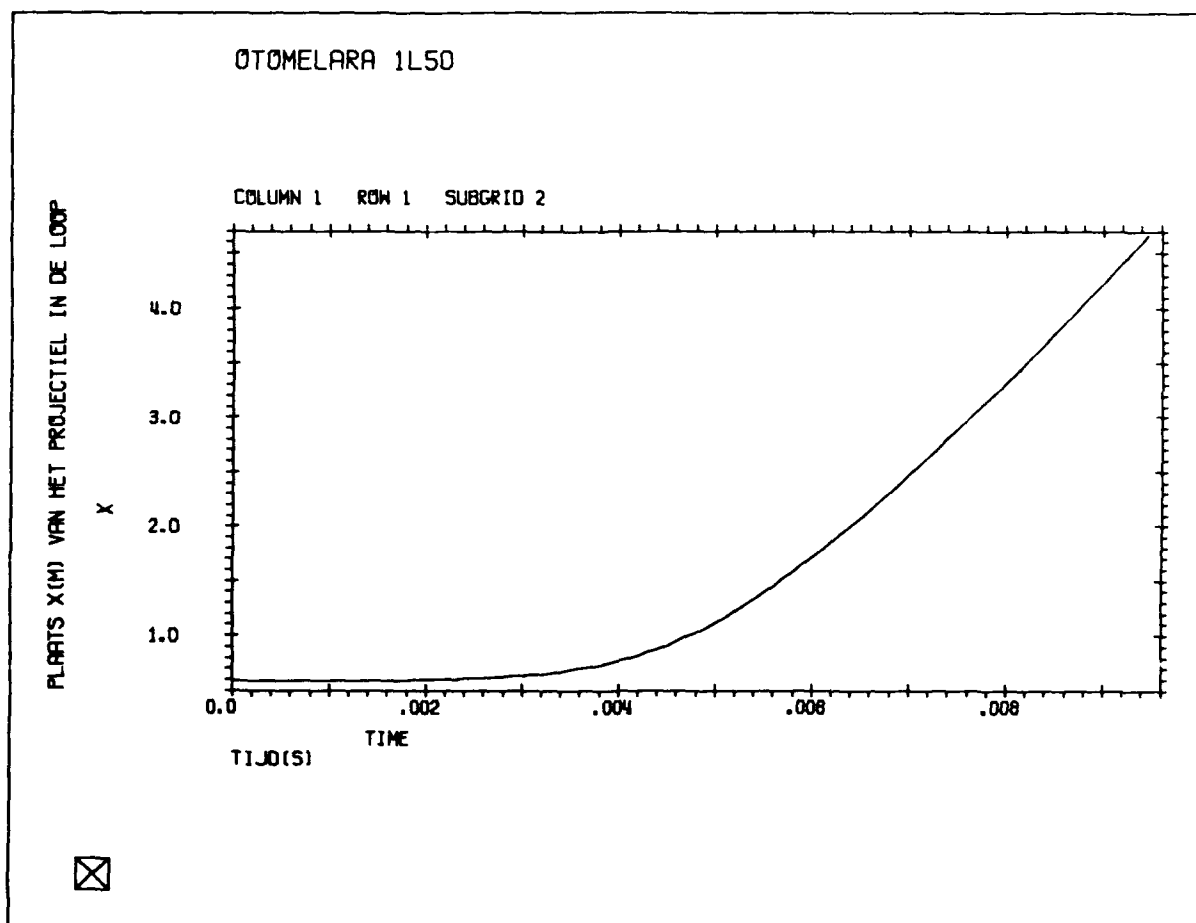
Figuur 8: De snelheid van het projectiel in de loop als een functie van de tijd (berekend met 6L100).



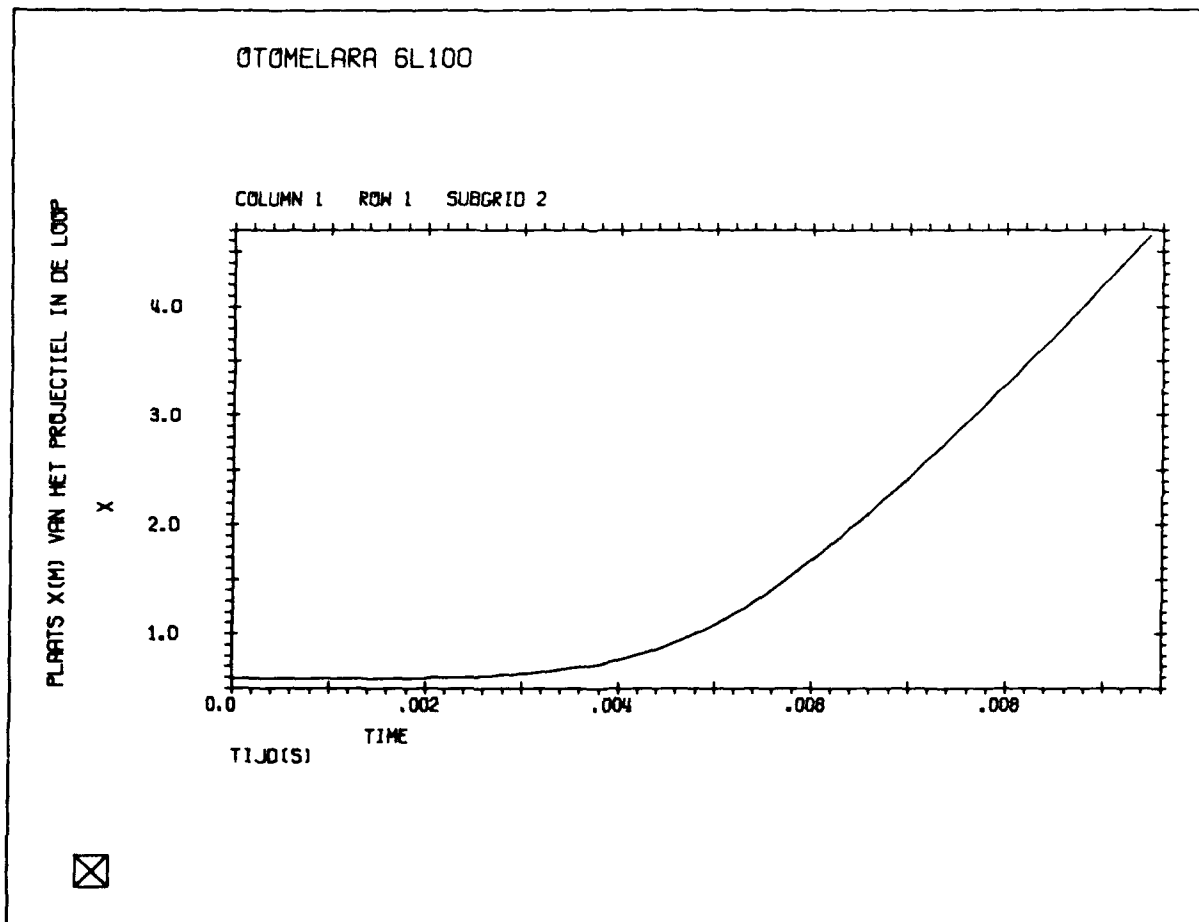
Figuur 9: De snelheid van het projectiel als functie van de plaats in de loop.



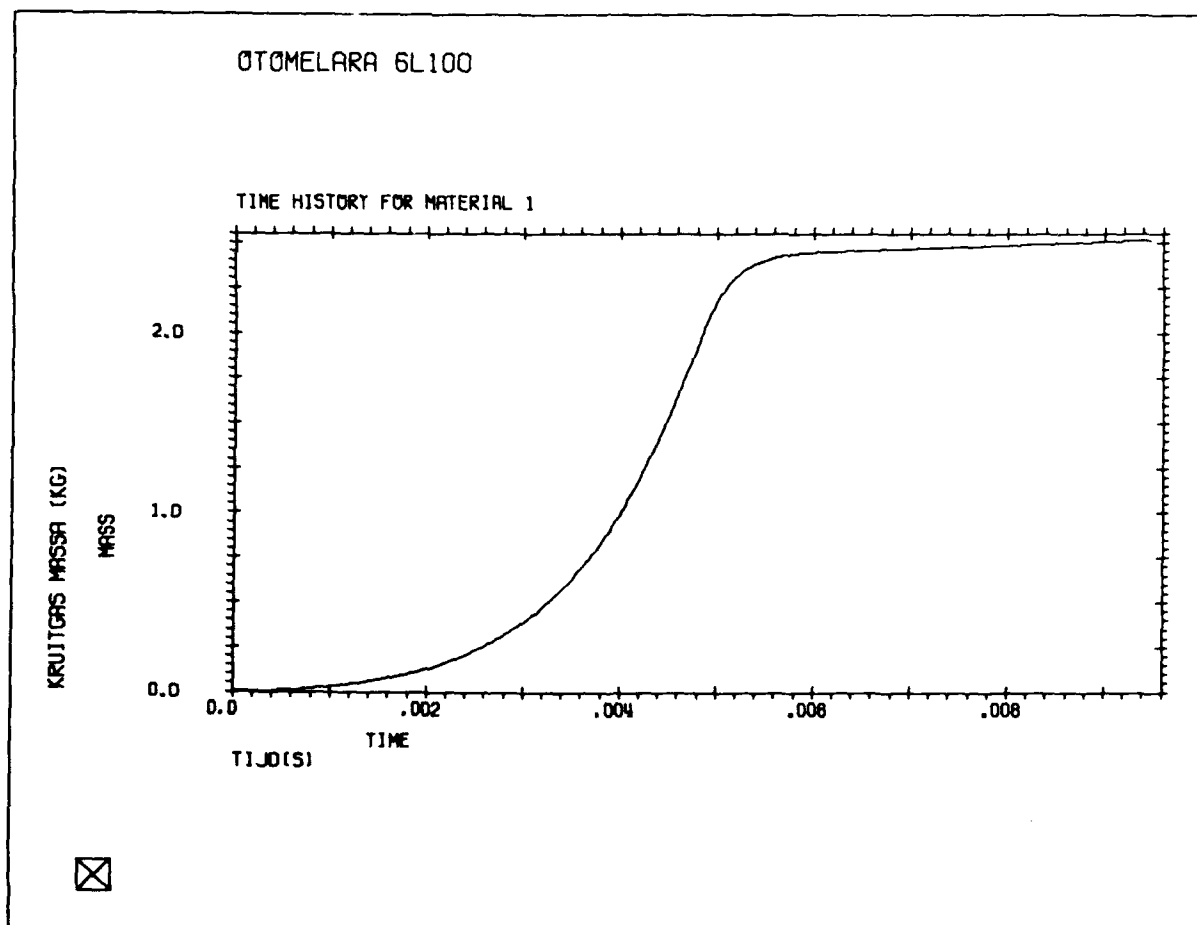
Figuur 10: Zie figuur 9.



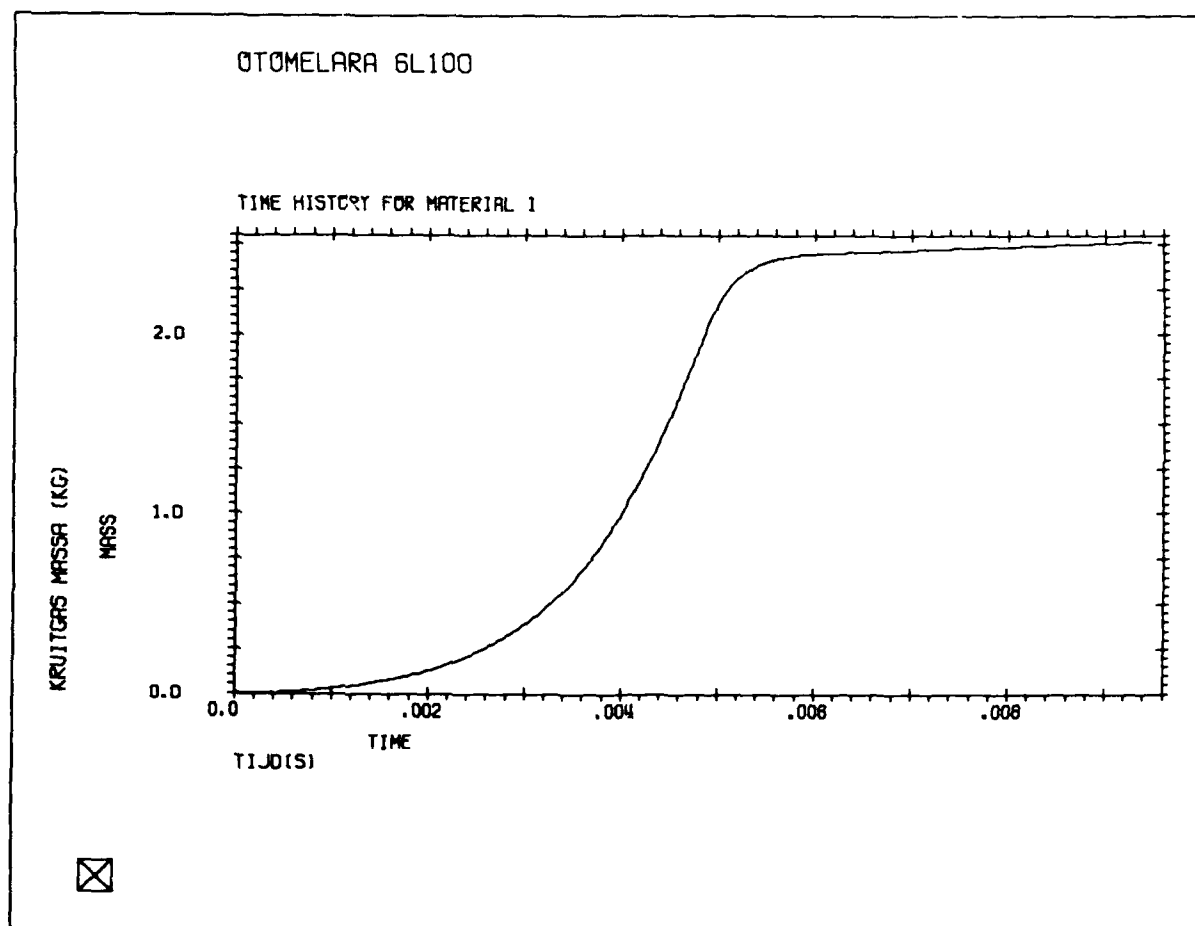
Figuur 11: De plaats van het projectiel in de loop als een functie van de tijd.



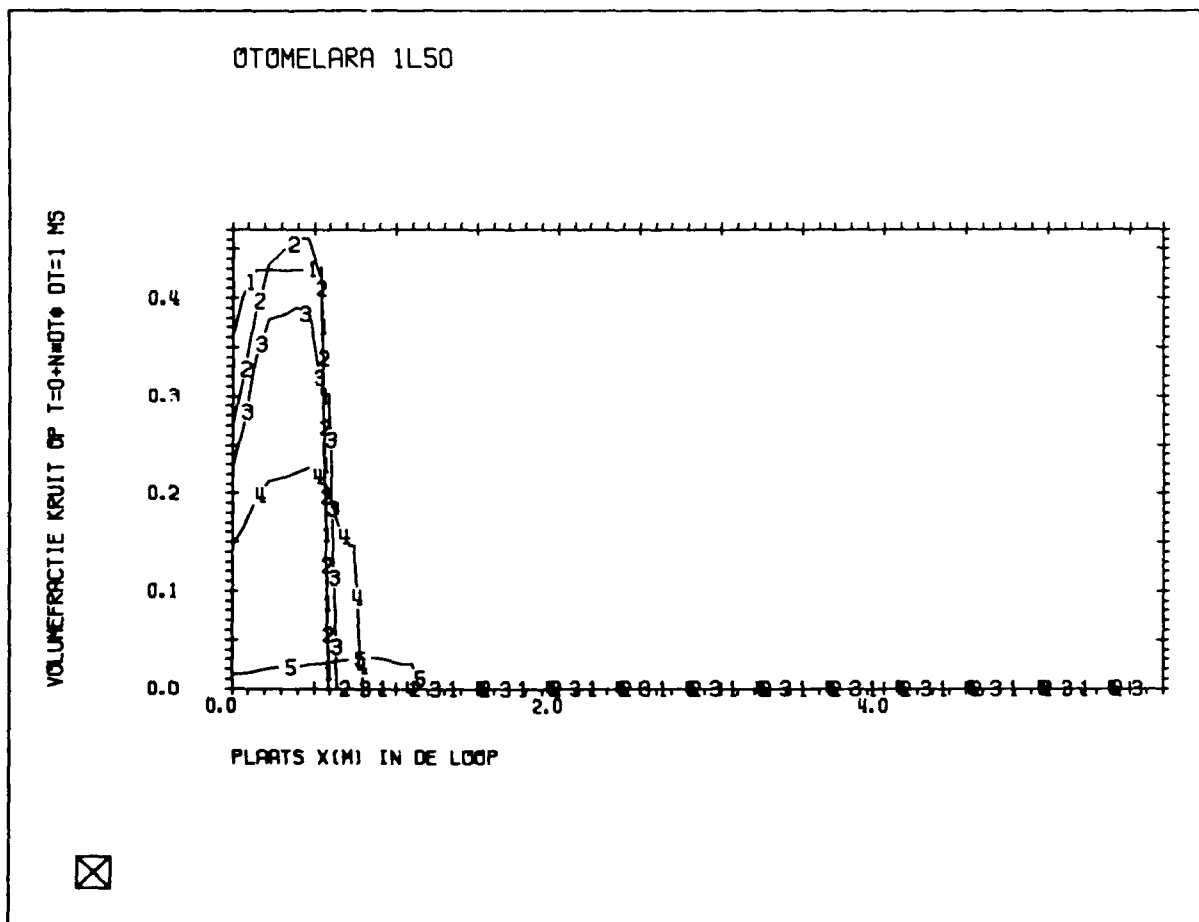
Figuur 12: Zie figuur 11.



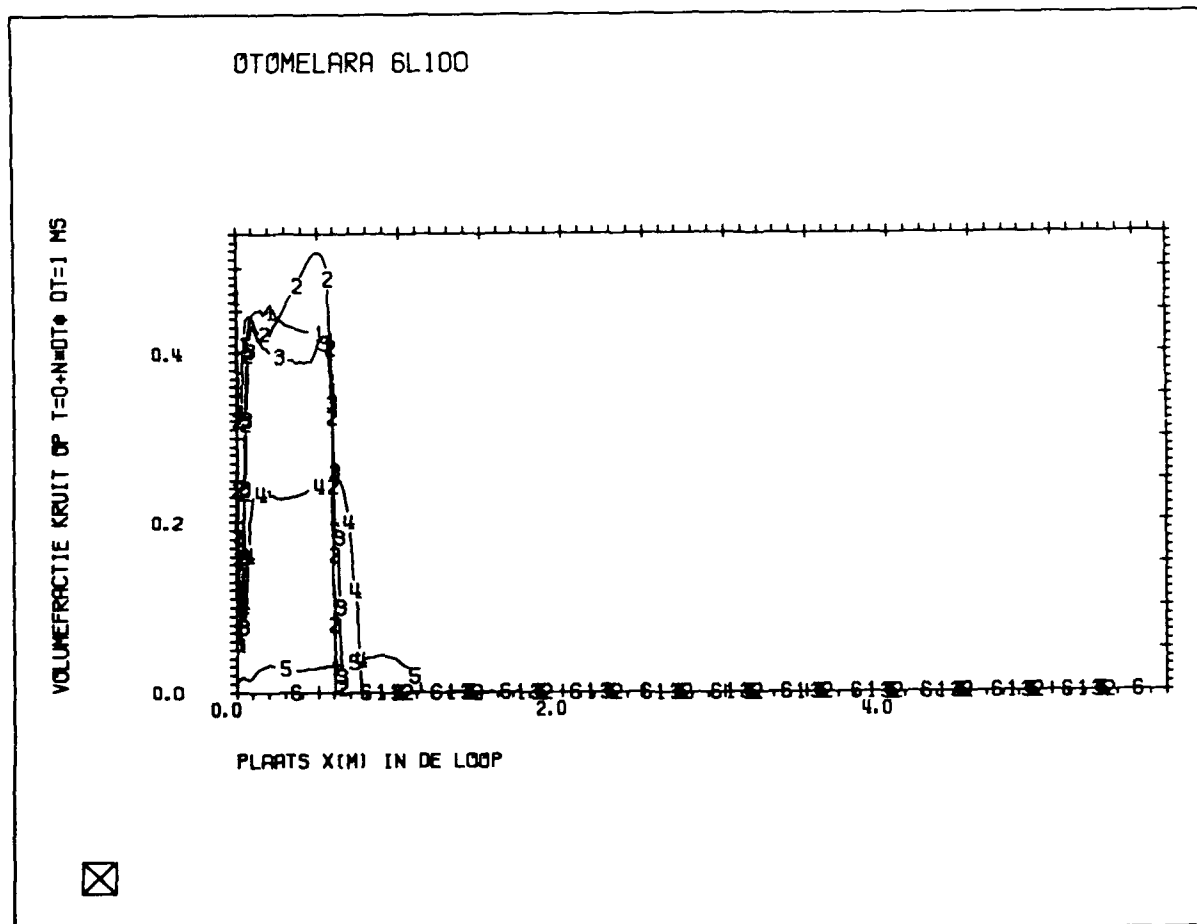
Figuur 13: Totale hoeveelheid kruitgas in de loop als functie van de tijd.



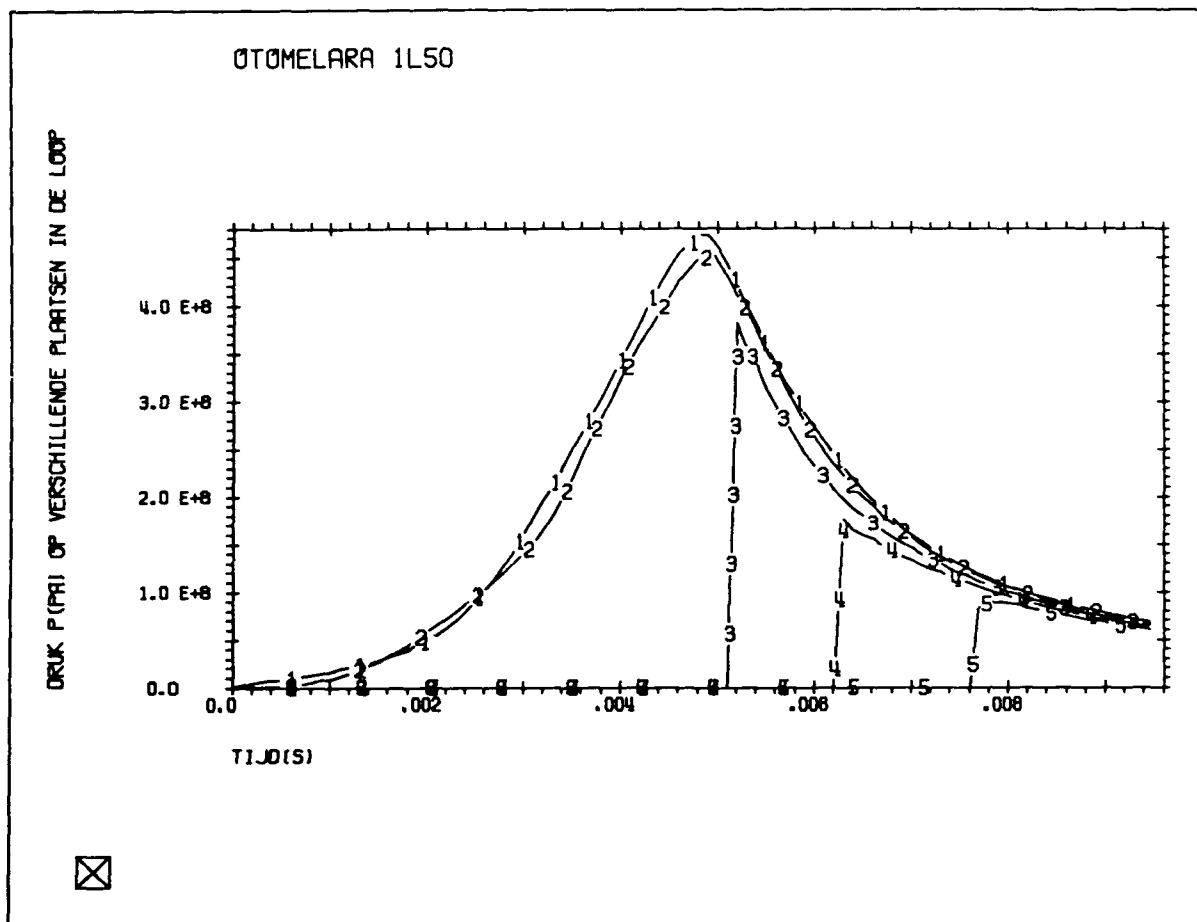
Figuur 14: Zie figuur 13.



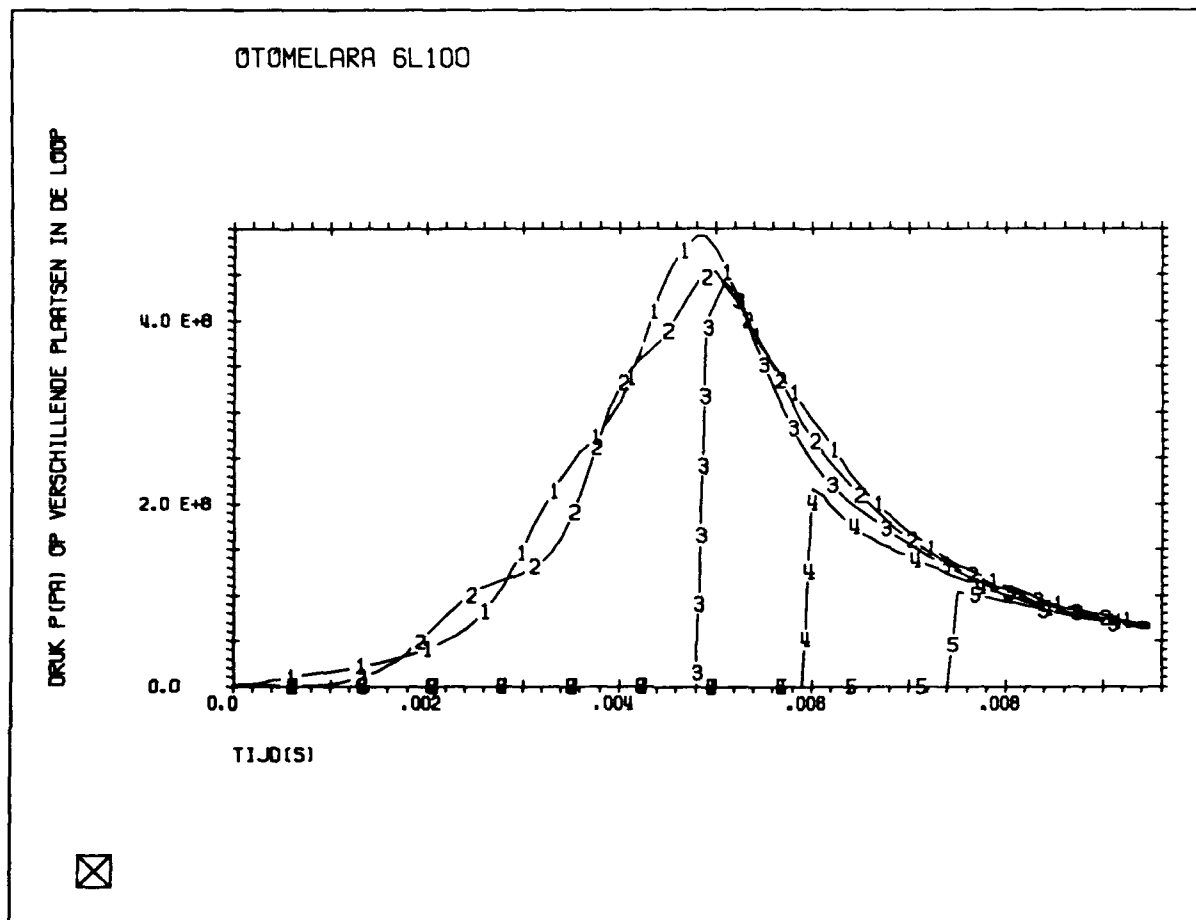
Figuur 15: Volume fractie kruit als een functie van de plaats in de loop op elke milliseconde.



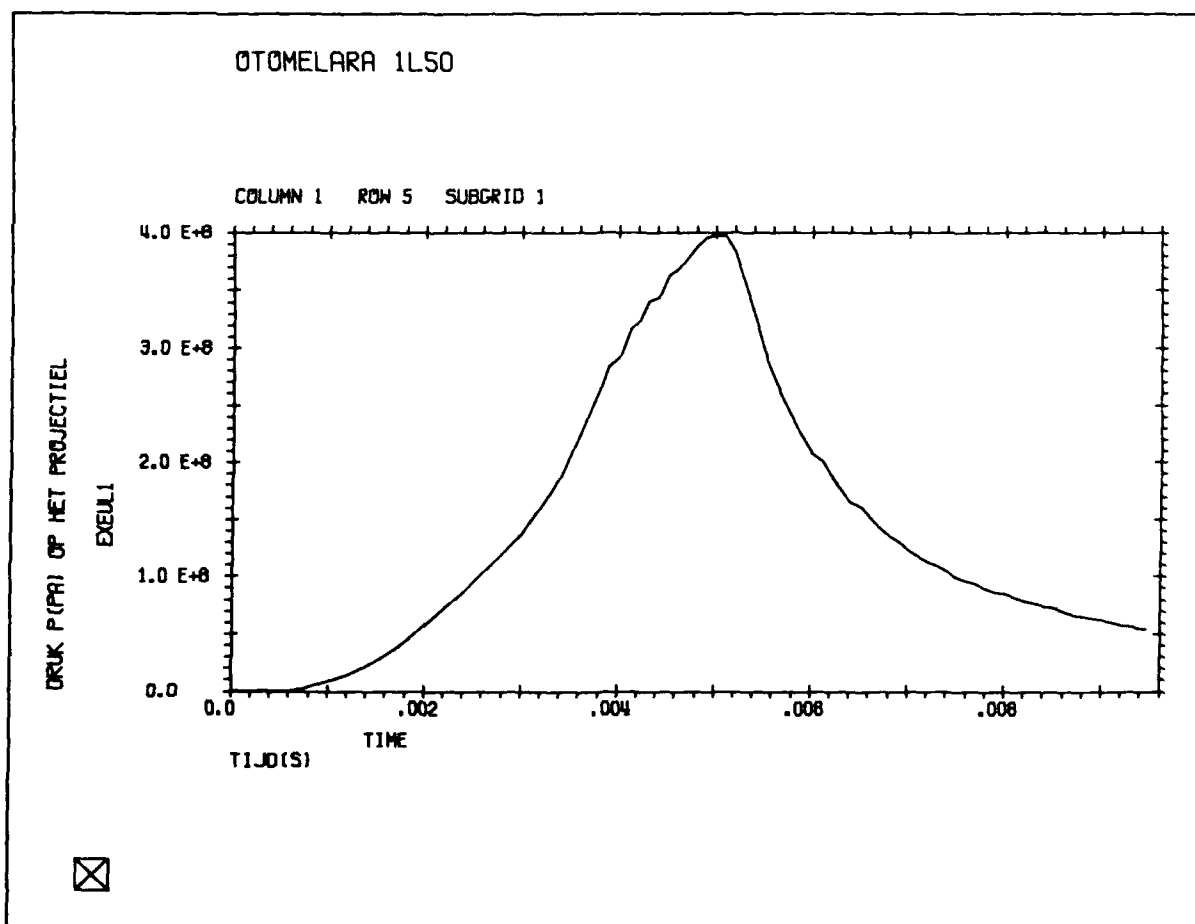
Figuur 16: Zie figuur 15.



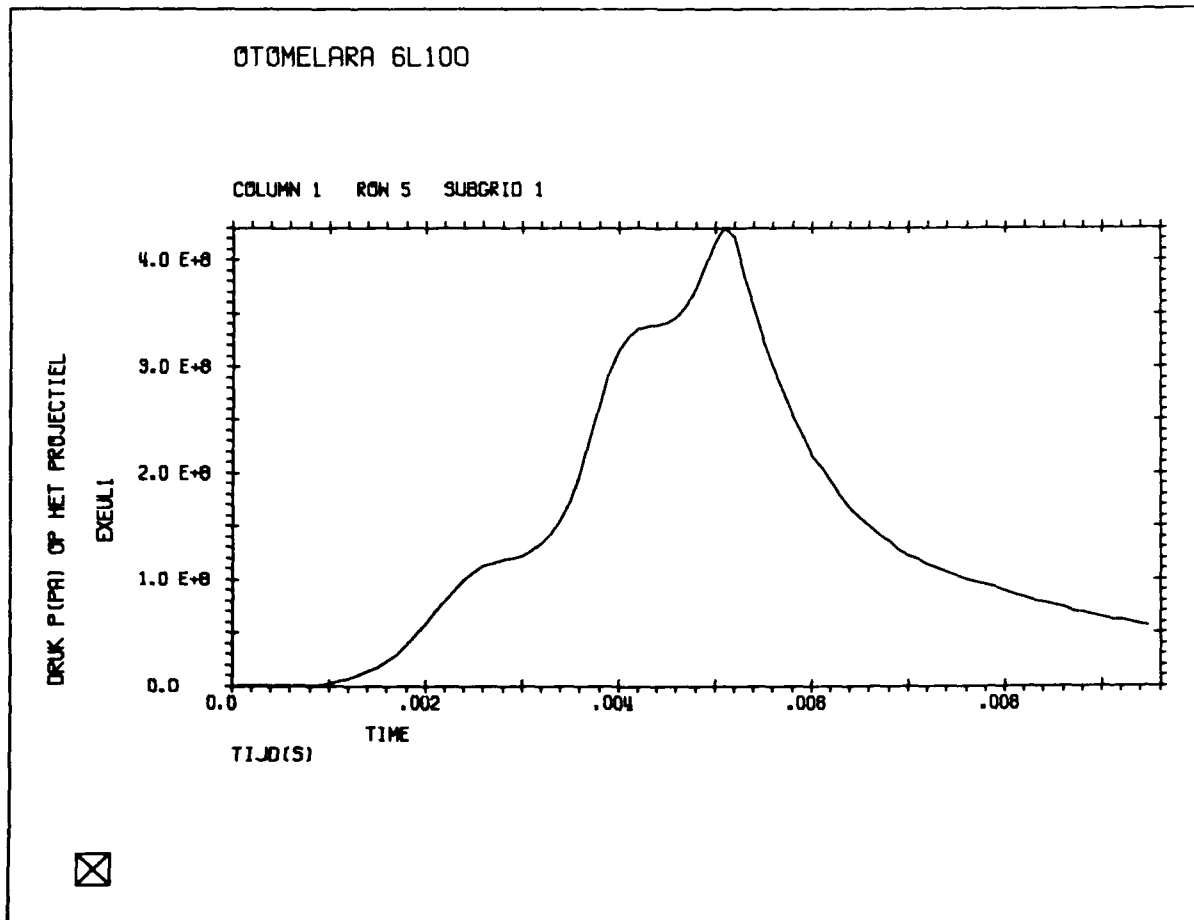
Figuur 17: Druk als een functie van tijd op verschillende plaatsen in de loop; (1) is het drukverloop in het begin van de huls, (5) op ongeveer een meter van het einde van de loop.



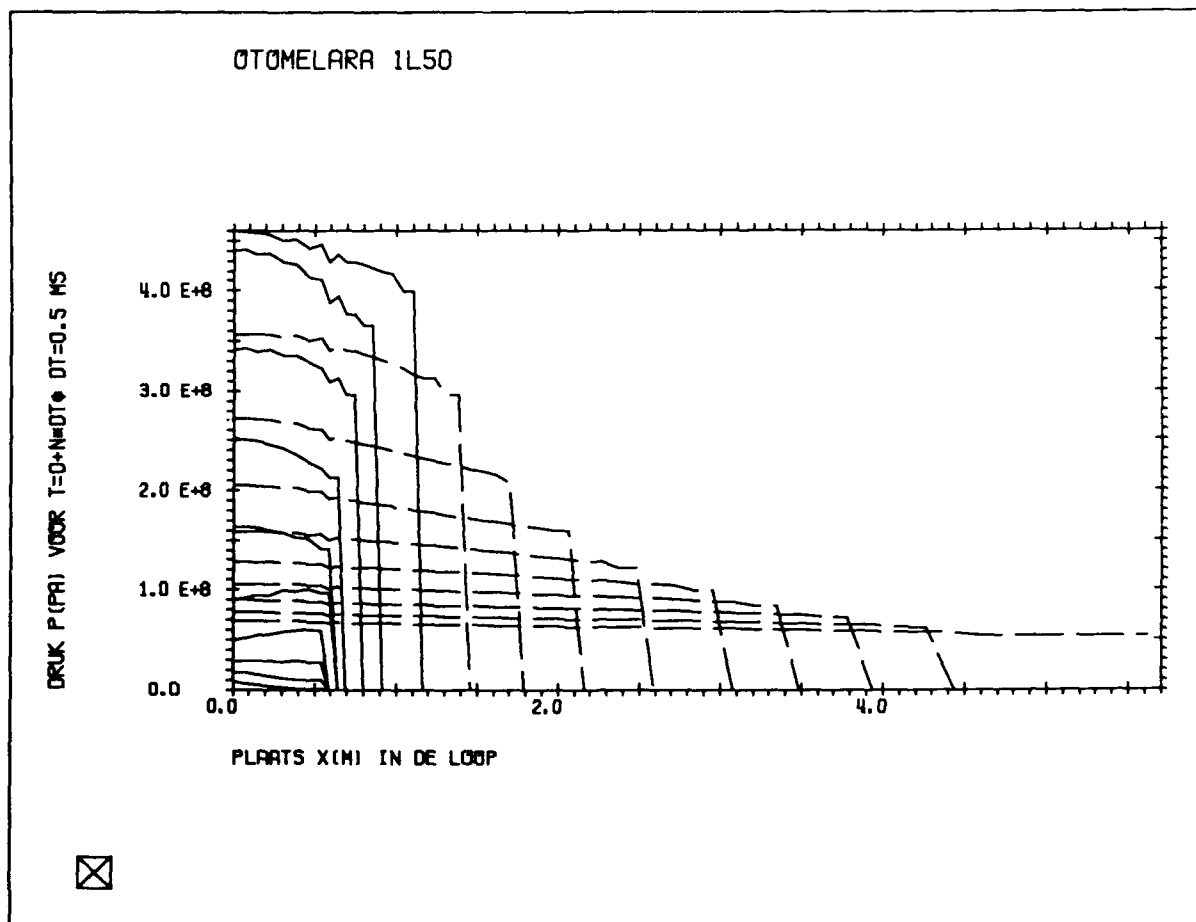
Figuur 18: Zie figuur 17; vanwege het andere grid zijn de plaatsen in de loop waarvan het drukverloop is gegeven iets anders dan in figuur 17.



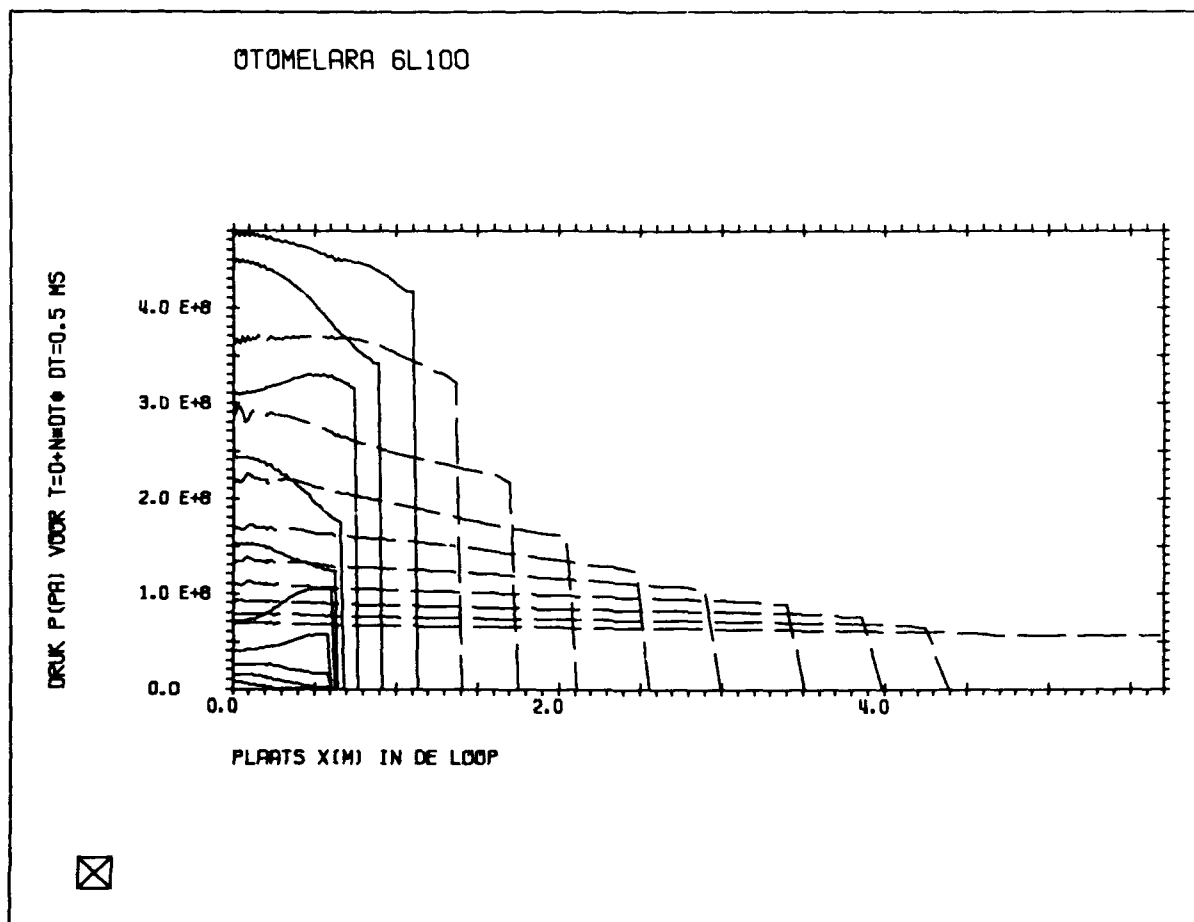
Figuur 19: De druk op het projectiel als een functie van de tijd.



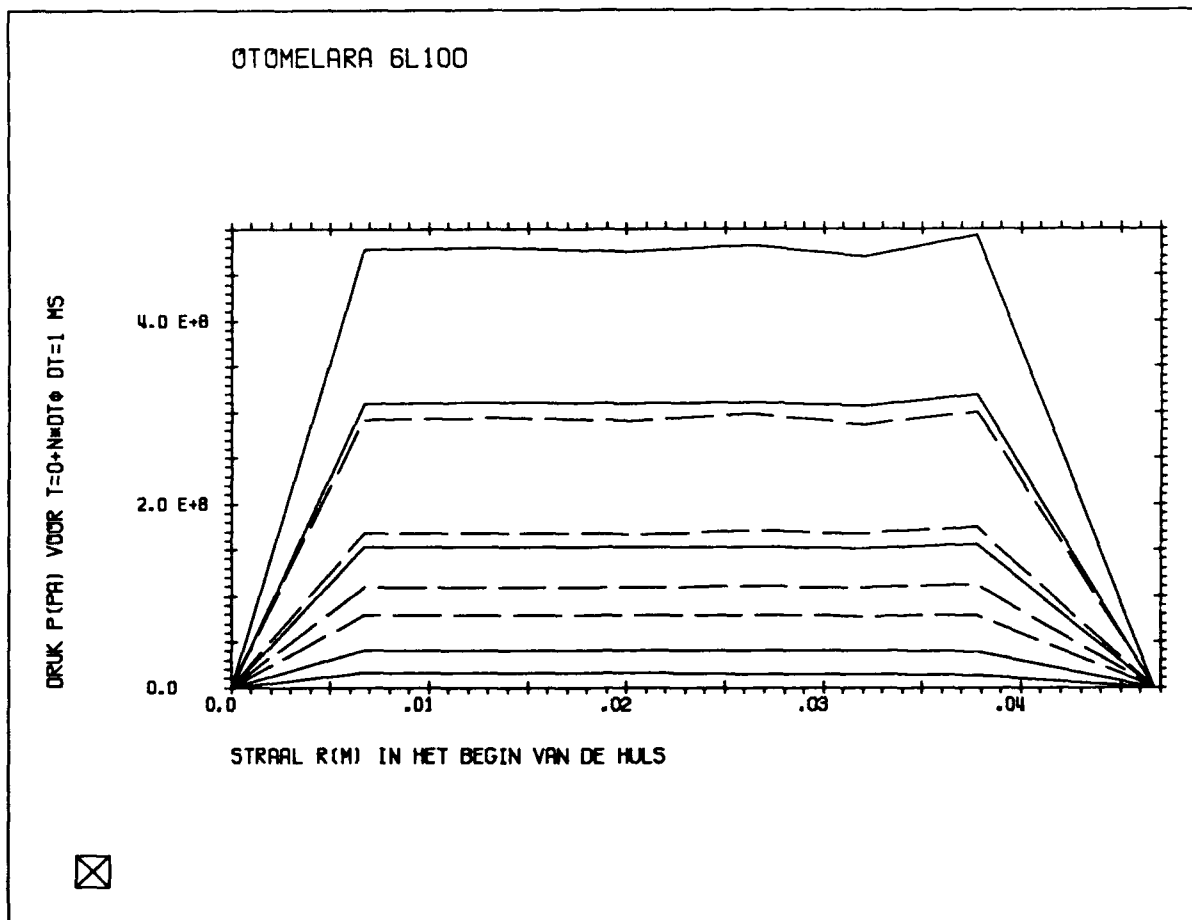
Figuur 20: Zie figuur 19.



Figuur 21: De druk als een functie van de plaats in de loop om de 0.5 ms tot het projectiel de loop verlaten heeft. (Nadat de maximum druk bereikt is, zijn de profielen gestreept weergegeven.)



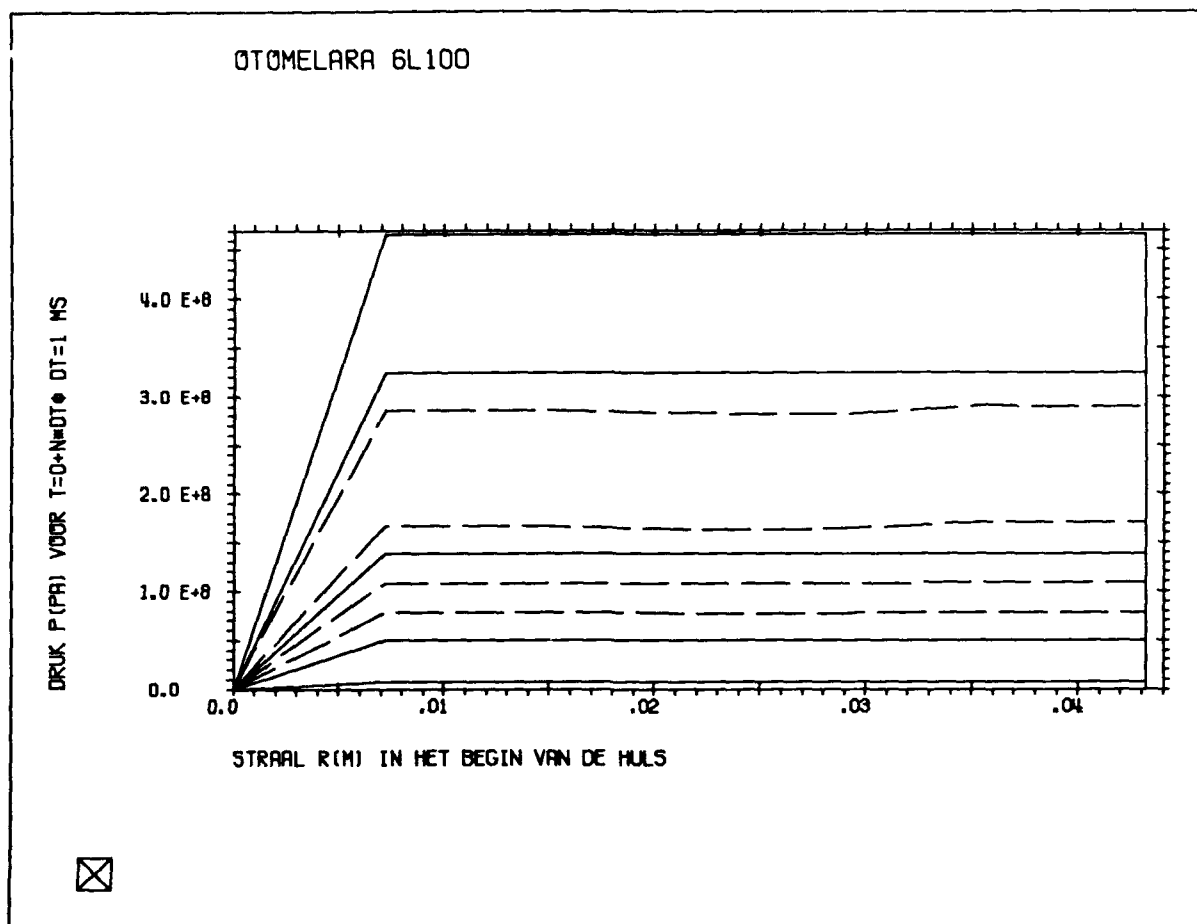
Figuur 22: Zie figuur 21.



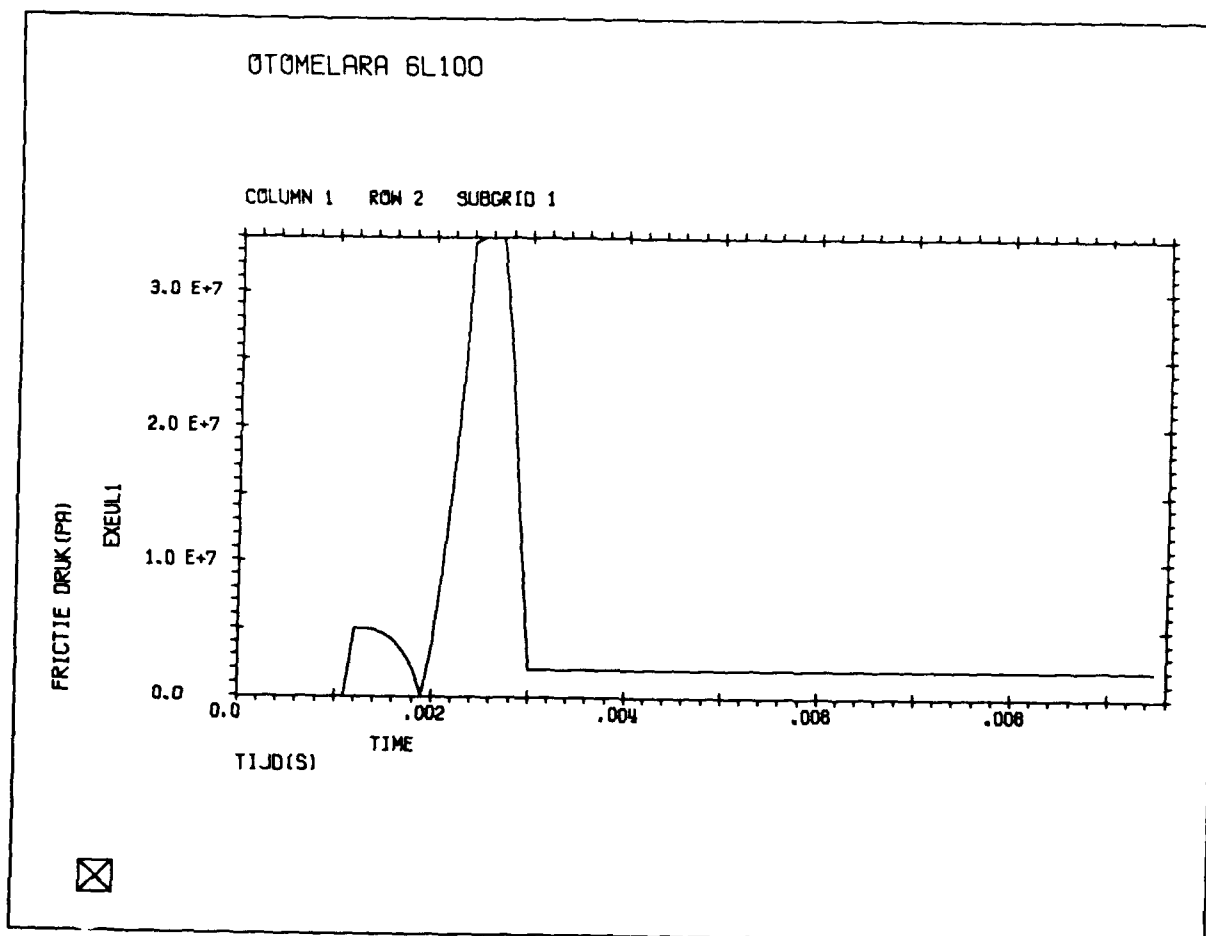
Figuur 23: De druk langs de straal van de loop (het nulpunt stemt overeen met de bovenkant in het begin van de huls) om de miliseconde; drukprofielen na het tijdstip van maximale druk zijn gestreept weergegeven.

De figuren 23 en 24 tonen radiale drukprofielen op verschillende plaatsen in de huls. Het nulpunt komt overeen met de bovenkant van de huls, het punt op ongeveer 4.5 cm met de bovenkant van de vlampijp. Deze betreffen alleen het fijne grid daar het grove grid slechts een kolom bevat.

We zien dat de profielen bijna vlak zijn (alleen boven de vlampijp zit een "verstoring") wat impliceert dat 1 kolom volstaat.



Figuur 24: Als in figuur 23 maar nu op ongeveer 40 cm van het begin van de loop.



Figuur 26: Zie figuur 25.

Zoals al eerder is besproken staan er in de input-file enkele onbekende variabelen, namelijk in de GRNMISC kaarten. We hebben daar waarden overgenomen uit een studie van MacNeal Schwendler aan het Bofors 40/70 kanon [11]. Om toch een indruk te krijgen van de mate waarop deze variabelen het resultaat beïnvloeden, hebben we het programma ook laten draaien met andere getallen. Het resultaat daarvan is als volgt:

grootheid	variatie grootheid	variatie mondingssnelheid
prop. const interfacial drag	10^6 kleiner	-3%
critical volume fraction solid	+55%	-1%
laminar viscosity gas	10^2 groter	+2%
thermal conductivity gas	10^2 groter	+2%
thermal conductivity solid	10^2 groter	+1%
bulk modulus solid	10 groter	+1%
specific heat solid	10 groter	-2%

Uit deze tabel blijkt dat deze variabelen de berekening nauwelijks beïnvloeden, en het dus niet onoverkomelijk is dat zij min of meer onbekend zijn. Aan de andere kant kunnen zij tezamen een fout van enkele procenten veroorzaken.

Een parameter die veel beter bekend is maar desondanks een grote fout in de mondingssnelheid en met name de maximale druk kan veroorzaken is het covolume. Bij een onnauwkeurigheid in deze parameter van 10% varieert de mondingssnelheid ongeveer 2% en de maximale druk 10%.

4.2 Discussie

De berekende mondingssnelheid en maximale druk zijn groter dan de experimenteel gemeten waardes. Quantitatief is dit precies wat men verwacht: er is namelijk nog geen rekening gehouden met warmteverliezen naar de kamer en de loop van het kanon. Deze warmteverliezen kunnen oplopen tot een procent of twintig [12] van de totale beschikbare energie. Hierdoor daalt zowel de mondingssnelheid als de maximale druk. Het is bovendien aannemelijk dat de maximale druk -aan de wand, want daar zit de drukopnemer- meer daalt dan de projectielsnelheid. Met de nieuwe versie van Grainburning die ook de warmteoverdracht naar de wand kan simuleren zal dit nader onderzocht worden.

Verder is het natuurlijk mogelijk dat er in de invoerparameters en dan met name de zo belangrijke kruitverbrandingssnelheid parameters nog te grote fouten zitten.

We vermelden verder dat een vereenvoudigde simulatie van de gesloten bom proeven waarmee de burning rate werd bepaald druk-tijd (of levendigheds) grafieken opleverden die zeer goed met de meetresultaten overeenkomen. In deze simulaties werd uiteraard de experimenteel bepaalde burning-rate gebruikt. Het is bemoedigend dat heen en terug rekenen met twee programma's die totaal anders van aard zijn een consistent resultaat geeft.

REFERENTIES

- [1] PISCES 2DELK theoretical manual, S.Hancock, The MacNeal-Schwendler Company BV, Groningenweg 6, 2803 PV Gouda.
- [2] Technical Report TR 87-2118/1 'Equations and numerical solution of gas-particle flow. GRAINS level 26' (1987), P.H.L. Groenenboom, adres zie [1].
- [3] DMKM/WCS/GEMU, Postbus 20702, Den Haag.
- [4] STANAG
- [5] Diehl GmbH & Co., Fischbachstrasse 16, D-8505 Röthenbach/PEGN.
- [6] BLAKE - A thermodynamics code based on TIGER, US Army Armament Research and Development Command, Ballistic Research Laboratory (BRL), Aberdeen Proving Ground, Maryland, MD 21005, USA.
- [7] TBI12 Verwerking van gesloten bomproef resultaten, Jaap Post, DMKL/AB, Postbus 90701, 2509 LS Den Haag.
- [8] Programma's PT, SURF en BR, BRL, adres zie [7].
- [9] referentie WS.21.006/10357, dd 30-5-1991.
- [10] K.K. Kuo, R. Vichnevetsky, M. Summerfield, AIAA Journal 11 444 (1973),
K.K. Kuo, J.H. Koo, T.R. Davis, G.R. Coates, Acta Astronautica 3 573 (1976),
H. Krier, S. Rajan, AIAA Paper 75-240, gepresenteerd op AIAA 13th Aerospace Sciences Meeting, Pasadena, USA, 20-22 jan. 1975,
I.H. Farag, C.J. Read, M. Trembley, Heat and Technology, 6 150 (1988),
en referenties daarin.
- [11] PISCES Paper 89-01, 'Two phase flow computation for a 40 mm granular propellant gun in comparison with experimental results', P.H.L. Groenenboom, P. Thomson, 1989, adres zie [1].
- [12] C.L. Farrar, D.W. Leeming, 'Military ballistics - a manual', Royal Military College of Science, Shrivenham, UK, 1983.

APPENDIX 1

De input file (*.I2D)

Het grove grid 1L50

```

ALLGRID 2      AXIAL  START
HEADING  OTO MELARA 25-2-91 7-GATSRoutine ENKEL GRID 1L50
COMMENT *****
COMMENT *
COMMENT *      GRAIN BURNING IN A GUN BARREL SYSTEM  *
COMMENT *
COMMENT *****
COMMENT 1234567 1234567 1234567 1234567 1234567 1234567 1234567 1234567
WRAPUP 1.0E-11 10000      900000 .2
TSTEP 5.0E-7 0.67
COMMENT -----IDEAL GAS E.O.S. FOR GASPHASE (MPN=1)----
MATERIALBASIC GAS 0.86728 0.
MATERIALEOSA GAS GAMMA 1.258
COMMENT -----IDEAL GAS E.O.S. FOR GRAINS (MPN=2)-----
MATERIALBASIC GRAIN 1570. 0.
MATERIALEOSA GRAIN GAMMA 1.258
COMMENT -----INITIAL VALUES-----
COMMENT
COMMENT -----GAS-----
INITIAL 1 DENSITY 0.86728 SIE 4.1934E5XVEL 0. YVEL 0.
COMMENT -----SOLID-----
INITIAL 2 DENSITY 1570. SIE 5.8800E5XVEL 0. YVEL 0.
COMMENT -----
COMMENT
COMMENT -----RIGID-----
INITIAL 4 XVEL 0. YVEL 0. BODYMASS6.30
COMMENT
COMMENT -----
POLYGON SETUP PROJECT 5
COMMENT -----
POLYGON SETUP FLOW 5 0.038 0.038
POLYGON POINTS FLOW 1 -.001 -.001
POLYGON POINTS FLOW 2 .23 -.001
POLYGON POINTS FLOW 3 .23 .000001
POLYGON POINTS FLOW 4 .16 .00901
POLYGON POINTS FLOW 5 -.001 .00901
COMMENT -----
ALLEDIT PRINT NEVER
ALLEDIT ARCHIVE NEVER
ALLEDIT INFSUM NEVER

```

```

ALLEDIT EBD SUM NEVER
ALLEDIT SUB SUM NEVER
ALLEDIT LAG SUM BYCYCLES 6000 WRAPUP 6000
ALLEDIT EUL SUM BYCYCLES 6000 WRAPUP 6000
ALLEDIT MAT SUM BYCYCLES 00 WRAPUP 25
ALLEDIT RESTART BYCYCLES 50000 WRAPUP 50000
COMMENT -----
CUTOFF 5.E-4 4000. 1.E-14
COMMENT -----
COMMENT -----INPUT DATA TWO PHASE FLOW-----
COMMENT -----
COMMENT ---- (1) THERMAL CONDUCTIVITY GAS
COMMENT ---- (2) SPECIFIC HEAT GAS
COMMENT ---- (3) LAMINAR VISCOSITY GAS
COMMENT ---- (4) PROPORTIONALITY CONSTANT INTERFACIAL DRAG
COMMENT ---- (5) THERMAL CONDUCTIVITY SOLID
COMMENT ---- (6) SPECIFIC HEAT SOLID
COMMENT ---- (7) BULK MODULUS SOLID
COMMENT ---- (8) CRITICAL VOLUME FRACTION SOLID
COMMENT ---- (9) INITIAL PARTICLE DIAMETER
COMMENT ---- (10) COMBUSTION ENERGY SOLID
COMMENT ---- (11) PARTICLE BURNING RATE PROPORTIONALITY CONSTANT
COMMENT ---- (12) PARTICLE BURNING RATE INDEX
COMMENT ---- (13) IGNITION TEMPERATURE
COMMENT ---- (14) QUENCHING TEMPERATURE
COMMENT -----
COMMENT 1234567 1234567 1234567 1234567 1234567 1234567 1234567 1234567
GRNMISC 1 0.2291 2 1823.6 3 8.981E-5 4 1.75
GRNMISC 5 0.2 6 2000. 7 1.3781E9 8 0.55
GRNMISC 9 0.002 10 3.21E6 11 5.8E-8 12 0.775
GRNMISC 13 445. 14 294. 15 10.
COMMENT -----
EXTRAS 1 0.5791 2 1.258 3 34.E6 4 2.E6
COMMENT EXTRA(1) IS THE INITIAL VOLFR1
COMMENT EXTRA(2) IS THE GAMMA
COMMENT EXTRA(3) AND (4) ARE THE PF2 AND PF4 FRICTION PRESSURES
COMMENT OF THE PROJECTILE IN EXBDFO
ENDECK
SUBGRID EULER TUBE 3 51
COMMENT -----
COMMENT ----- STANDARD MATERIAL MODELS TWO PHASE FLOWS
COMMENT -----
IFTWPH
IFBURN
IFSGVG
COMMENT IFTEMP *TSTNER*
COMMENT -----
ZONING POINTS 1 1 0.01350 0.05000

```

```

ZONING POINTS 2      1      0.01350 0.00900
ZONING POINTS 1      3      0.16000 0.04725
ZONING POINTS 2      3      0.16000 0.00900
ZONING POINTS 1      4      0.23000 0.04600
ZONING POINTS 2      4      0.23000 0.000001
ZONING SEGMENT ILINE 2      1      3
ZONING SEGMENT ILINE 1      1      3
COMMENT -----
ZONING POINTS 1      9      0.62840 0.03800
ZONING POINTS 2      9      0.62840 0.000001
ZONING SEGMENT ILINE 1      4      9
ZONING SEGMENT ILINE 2      4      9
COMMENT -----
ZONING POINTS 1      50     4.7000 0.03800
ZONING POINTS 2      50     4.7000 0.000001
ZONING SEGMENT ILINE 1      9      50     1.033
ZONING SEGMENT ILINE 2      9      50     1.033
COMMENT -----
ZONING POINTS 3      1      0.0135 0.00000
ZONING POINTS 3      4      0.23000 0.00000
ZONING POINTS 3      9      0.62840 0.00000
ZONING POINTS 3      50     4.7000 0.00000
ZONING SEGMENT ILINE 3      1      4
ZONING SEGMENT ILINE 3      4      9
ZONING SEGMENT ILINE 3      9      50     1.033
COMMENT -----
ZONING POINTS 1      51     5.7000 0.03800
ZONING POINTS 2      51     5.7000 0.000001
ZONING POINTS 3      51     5.7000 0.00000
COMMENT -----
REGION 2      GRAIN  RECTANG -1.  8.  0.  0.20  1
REGION 1      GAS    RECTANG -1.  8. -0.01 0.01  2
REGION 1      GAS    RECTANG -1.  8.  0.03 0.05  2
REGION 1      GAS    RECTANG -1.  8.  0.07 0.09  2
COMMENT -----
REGION      UNUSED INDEX 2      3      1      51      5
COMMENT -----
BOUNDARYFLOW ILINE 2      1      4      TWOPHA EXFLOW
BOUNDARYWRAPUP JLINE 51      1      2      XVEL 0.  0.
COMMENT -----
EDIT PRINT BYTIMES 0      WRAPUP 0.5E-3      EULPRT
EDLIST VNAMES PRESSUREVOLFR1 VOLFR2 PARDEN EXEUL1
EULPRT
EDLIST VNAMES SIE      DENSITY      EULPRT
COMMENT -----
COMMENT      GLOBAL ARCHIVE
COMMENT -----
EDIT ARCHIVE BYTIMES 0      WRAPUP 0.1E-3      EULSAV2

```

```

EDLIST VNAMES PRESSUREVOLFR2 X      Y      EULSAV2
EDLIST VNAMES TEMP1  TEMP2      EULSAV2
COMMENT -----
COMMENT -----
COMMENT          GLOBAL ARCHIVE
COMMENT -----
EDIT  ARCHIVE BYTIMES 0      WRAPUP 0.1E-3      EULSAV3
EDLIST COLS  1      EULSAV3
EDLIST ROWS  1      2      3      4      5      EULSAV3
EDLIST VNAMES EXEUL1      EULSAV3
COMMENT -----
ENDECK
SUBGRID RIGID  GESCHUT 1      5
ZONING POINTS 1      1      0.5880 0.0590
ZONING POINTS 1      2      0.5880 -0.001
ZONING POINTS 1      3      6.0000 -0.001
ZONING POINTS 1      4      6.0000 0.0590
ZONING POINTS 1      5      0.5880 0.0590
COMMENT -----
BOUNDARYINTERPOLILINE 1      1      5      PROJECT 1
COMMENT -----
REGION 4      INDEX 1      1      1      5
COMMENT -----
EDIT  PRINT BYTIMES 0      WRAPUP 0.5E-3      RIGSAV1
EDLIST COLS  1      RIGSAV1
EDLIST ROWS  1      RIGSAV1
EDLIST VNAMES X      XVEL      RIGSAV1
COMMENT -----
EDIT  ARCHIVE BYTIMES 0      WRAPUP 0.1E-3      RIGSAV2
EDLIST COLS  1      RIGSAV2
EDLIST ROWS  1      RIGSAV2
EDLIST VNAMES X      XVEL      RIGSAV2
ENDECK
ENDINPUT

```

Het fijne grid 6L100

```

ALLGRID 2      AXIAL  START
HEADING  OTO MELARA 29-1-91 7-GATSROUTINE FIJN GRID 5L100
COMMENT *****
COMMENT *
COMMENT *      GRAIN BURNING IN A GUN BARREL SYSTEM      *
COMMENT *
COMMENT *****
COMMENT 1234567 1234567 1234567 1234567 1234567 1234567 1234567 1234567
WRAPUP 1.0E-9 900000      900000 .2
TSTEP 5.0E-7 0.67
COMMENT -----IDEAL GAS E.O.S. FOR GASPHASE (MPN=1)----

```

MATERIALBASIC GAS 0.86728 0.
 MATERIALEOSA GAS GAMMA 1.258
 COMMENT -----IDEAL GAS E.O.S. FOR GRAINS (MPN=2)-----
 MATERIALBASIC GRAIN 1570. 0.
 MATERIALEOSA GRAIN GAMMA 1.258
 COMMENT -----INITIAL VALUES-----
 COMMENT
 COMMENT -----GAS-----
 INITIAL 1 DENSITY 0.86728 SIE 4.1934E5XVEL 0. YVEL 0.
 COMMENT -----SOLID-----
 INITIAL 2 DENSITY 1570. SIE 5.8800E5XVEL 0. YVEL 0.
 COMMENT -----
 COMMENT
 COMMENT -----RIGID-----
 INITIAL 4 XVEL 0. YVEL 0. BODYMASS6.30
 COMMENT
 COMMENT -----
 POLYGON SETUP PROJECT 5
 COMMENT -----
 POLYGON SETUP FLOW 5 0.038 0.038
 POLYGON POINTS FLOW 1 -.001 -.001
 POLYGON POINTS FLOW 2 .23 -.001
 POLYGON POINTS FLOW 3 .23 .000001
 POLYGON POINTS FLOW 4 .22450 .00901
 POLYGON POINTS FLOW 5 -.001 .00901
 COMMENT -----
 ALLEDIT PRINT NEVER
 ALLEDIT ARCHIVE NEVER
 ALLEDIT INFSUM NEVER
 ALLEDIT EBD SUM NEVER
 ALLEDIT SUBSUM NEVER
 ALLEDIT LAGSUM BYCYCLES 6000 WRAPUP 6000
 ALLEDIT RESTART BYCYCLES 50000 WRAPUP 50000
 COMMENT -----
 CUTOFF 5.E-4 4000. 1.E-14
 COMMENT -----
 COMMENT -----INPUT DATA TWO PHASE FLOW-----
 COMMENT -----
 COMMENT ---- (1) THERMAL CONDUCTIVITY GAS
 COMMENT ---- (2) SPECIFIC HEAT GAS
 COMMENT ---- (3) LAMINAR VISCOSITY GAS
 COMMENT ---- (4) PROPORTIONALITY CONSTANT INTERFACIAL DRAG
 COMMENT ---- (5) THERMAL CONDUCTIVITY SOLID
 COMMENT ---- (6) SPECIFIC HEAT SOLID
 COMMENT ---- (7) BULKMODULUS SOLID
 COMMENT ---- (8) CRITICAL VOLUME FRACTION SOLID
 COMMENT ---- (9) INITIAL PARTICLE DIAMETER
 COMMENT ---- (10) COMBUSTION ENERGY SOLID

COMMENT ---- (11) PARTICLE BURNING RATE PROPORTIONALITY CONSTANT
 COMMENT ---- (12) PARTICLE BURNING RATE INDEX
 COMMENT ---- (13) IGNITION TEMPERATURE
 COMMENT ---- (14) QUENCHING TEMPERATURE
 COMMENT -----
 COMMENT 1234567 1234567 1234567 1234567 1234567 1234567 1234567 1234567
 GRNMISC 1 0.2291 2 1823.6 3 8.981E-5 4 1.75
 GRNMISC 5 0.2 6 2000. 7 1.3781E9 8 0.55
 GRNMISC 9 0.002 10 3.21E6 11 5.8E-8 12 0.775
 GRNMISC 13 445. 14 294. 15 10.
 COMMENT -----
 EXTRAS 1 0.5809 2 1.258 3 34.E6 4 2.E6
 COMMENT EXTRAS(1) IS THE INITIAL VOLFR(1)
 COMMENT EXTRAS(2) IS THE GAMMA
 COMMENT EXTRAS(3) AND (4) ARE THE PF2 AND PF4 PRESSURES
 COMMENT OF THE PROJECTILE IN EXBDFO
 ENDECK
 SUBGRID EULER TUBE 8 100
 COMMENT -----
 COMMENT ----- STANDARD MATERIAL MODELS TWO PHASE FLOWS
 COMMENT -----
 IFTWPH
 IFSGVG
 IFBURN
 COMMENT IFDRAG
 COMMENT IFTEMP *TSTNER*
 COMMENT -----
 ZONING POINTS 1 1 0.01180 0.04390
 ZONING POINTS 2 1 0.00310 0.03760
 ZONING POINTS 3 1 0.00000 0.02825
 ZONING POINTS 4 1 0.00350 0.01880
 ZONING POINTS 5 1 0.01060 0.01530
 ZONING POINTS 6 1 0.01350 0.01190
 ZONING POINTS 7 1 0.01350 0.00900
 ZONING POINTS 1 3 0.03410 0.04780
 ZONING POINTS 1 5 0.05690 0.04950
 ZONING POINTS 1 15 0.22450 0.04600
 ZONING POINTS 7 15 0.22450 0.00900
 ZONING SEGMENT ILINE 7 1 15
 ZONING SEGMENT ILINE 1 1 3
 ZONING SEGMENT ILINE 1 3 5
 ZONING SEGMENT ILINE 1 5 15
 ZONING SEGMENT JLINE 15 1 7
 ZONING BLOCK AUTO 1 7 1 15
 COMMENT -----
 ZONING POINTS 7 16 0.23000 0.000001
 ZONING POINTS 1 16 0.23000 0.04600
 ZONING SEGMENT JLINE 16 1 7

```

COMMENT -----
ZONING POINTS 1      33      0.62840 0.03800
ZONING POINTS 7      33      0.62840 0.000001
ZONING SEGMENT ILINE 1      16      33
ZONING SEGMENT ILINE 7      16      33
ZONING SEGMENT JLINE 33      1      7
ZONING BLOCK IDRAW 1      7      16      33
COMMENT -----
ZONING POINTS 1      99      4.7000 0.03800
ZONING POINTS 7      99      4.7000 0.000001
ZONING SEGMENT JLINE 99      1      7
ZONING SEGMENT ILINE 1      33      99      1.033
ZONING SEGMENT ILINE 7      33      99      1.033
ZONING BLOCK IDRAW 1      7      33      99
COMMENT -----
ZONING POINTS 8      1      0.0135 0.00000
ZONING POINTS 8      15      0.22450 0.00000
ZONING POINTS 8      16      0.23000 0.00000
ZONING POINTS 8      33      0.62840 0.00000
ZONING POINTS 8      99      4.7000 0.00000
ZONING SEGMENT ILINE 8      1      15
ZONING SEGMENT ILINE 8      16      33
ZONING SEGMENT ILINE 8      33      99      1.033
COMMENT -----
ZONING POINTS 1      100      5.7000 0.03800
ZONING POINTS 7      100      5.7000 0.000001
ZONING POINTS 8      100      5.7000 0.00000
ZONING SEGMENT JLINE 100      1      7
COMMENT -----
REGION 2      GRAIN RECTANG -1.      8.      0.      0.20      1
REGION 1      GAS RECTANG -1.      8.      -0.01      0.01      2
REGION 1      GAS RECTANG -1.      8.      0.03      0.05      2
REGION 1      GAS RECTANG -1.      8.      0.07      0.09      2
COMMENT -----
REGION      UNUSED INDEX 7      8      1      100      5
COMMENT -----
BOUNDARYFLOW ILINE 7      1      15      TWOPHA EXFLOW
BOUNDARYWRAPUP JLINE 100      1      6      XVEL 0.      0.
COMMENT -----
EDIT PRINT BYTIMES 0      WRAPUP 0.5E-3      EULPRT
EDLIST COLS 3      6      EULPRT
EDLIST VNAMES PRESSUREVOLFR1 VOLFR2 PARDEN EXEUL1
EULPRT
EDLIST VNAMES SIE      DENSITY      EULPRT
COMMENT -----
COMMENT      GLOBAL ARCHIVE
COMMENT -----
EDIT ARCHIVE BYTIMES 0      WRAPUP 0.1E-3      EULSAV2

```

EDLIST VNAMES PRESSUREVOLFR2 X	Y	EULSAV2
COMMENT -----		
COMMENT	GLOBAL ARCHIVE	
COMMENT -----		
EDIT ARCHIVE BYTIMES 0	WRAPUP 0.1E-3	EULSAV4
EDLIST COLS	5	EULSAV4
EDLIST VNAMES	TEMP1 TEMP2	EULSAV4
COMMENT -----		
COMMENT -----		
COMMENT	GLOBAL ARCHIVE	
COMMENT -----		
EDIT ARCHIVE BYTIMES 0	WRAPUP 0.1E-3	EULSAV3
EDLIST COLS	1	EULSAV3
EDLIST ROWS	1 2 3 4 5	EULSAV3
EDLIST VNAMES	EXEUL1	EULSAV3
COMMENT -----		
ENDECK		
SUBGRID RIGID	GESCHUT 1 5	
ZONING POINTS	1 1 0.5880 0.0590	
ZONING POINTS	1 2 0.5880 -0.001	
ZONING POINTS	1 3 6.0000 -0.001	
ZONING POINTS	1 4 6.0000 0.0590	
ZONING POINTS	1 5 0.5880 0.0590	
COMMENT -----		
BOUNDARYINTERPOLILINE	1 1 5 PROJECT 1	
COMMENT -----		
REGION 4	INDEX 1 1 1 5	
COMMENT -----		
EDIT PRINT BYTIMES 0	WRAPUP 0.5E-3	RIGSAV1
EDLIST COLS	1	RIGSAV1
EDLIST ROWS	1	RIGSAV1
EDLIST VNAMES	X XVEL	RIGSAV1
COMMENT -----		
EDIT ARCHIVE BYTIMES 0	WRAPUP 0.1E-3	RIGSAV2
EDLIST COLS	1	RIGSAV2
EDLIST ROWS	1	RIGSAV2
EDLIST VNAMES	X XVEL	RIGSAV2
ENDECK		
ENDINPUT		

APPENDIX 2

De externe subroutines

```

PROGRAM ELK2D                                ELK2D      5
C      *(INPUT,OUTPUT,TAPE5=INPUT,TAPE6=OUTPUT,TA-
PE1,TAPE2,TAPE3,TAPE4,          ELK2D      11
C      * TAPE7,TAPE10,TAPE87,TAPE98,TAPE99)          ELK2D
12
C                                          ELK2D      14
C*****
ELK2D      15
C                                          ELK2D      16
C      THE MAIN PROGRAM IS WRITTEN BY THE USER FOR THE FOLLOWING
REASONS.          ELK2D      17
C      THE FILES NEEDED TO EXECUTE HIS PROBLEM ARE ON THE PROGRAM
CARD.          ELK2D      18
C      THE AMOUNT OF SMALL CORE MEMORY AVAILABLE IS LENSCM.
          ELK2D      19
C      THE AMOUNT OF LARGE CORE MEMORY AVAILABLE IS LENLCM.
          ELK2D      20
C      THIS IS THE DEFAULT MAIN PROGRAM IF THE USER DOES NOT SUPPLY
ONE.          ELK2D      21
C                                          ELK2D      22
C*****
ELK2D      23
C                                          ELK2D      24
C                                          ELK2D      25
COMMON /CORE/ LIMCOR, CORE(7000)          ELK2D
26
COMMON /MEMORY/ LENSCM, LENLCM, GRID
ELK2D      27
C*IF BEGIN    DEF,.(ECS.OR.LCM)          ELK2D
28
    DIMENSION GRID(30 000)          ELK2D
31
C*IF END      DEF,.(ECS.OR.LCM)          ELK2D
33
    LENSCM = 0          ELK2D      34
    LENLCM = 10 000 000          ELK2D      35
C*IF BEGIN    DEF,.(ECS.OR.LCM)          ELK2D
36
    LENSCM = 30 000          ELK2D      39
    LENLCM = 0          ELK2D      40
C*IF END      DEF,.(ECS.OR.LCM)          ELK2D
42
C                                          ELK2D      43

```

LIMCOR = 7000	ELK2D	44
CALL CODE	ELK2D	45
C	ELK2D	46
C END OF PROGRAM MAIN	ELK2D	
47		
STOP	ELK2D	48
END	ELK2D	49
SUBROUTINE EXFLW2 (UXEX,UYEX,ROEX,EINEX,		
1 UX1EX,UX2EX,UY1EX,UY2EX,RO1EX,RO2EX,		
2 SIE1EX,SIE2EX,VFR1EX,VFR2EX,PDENEX,		
3 PEX,IFUOPX,XBAR,YBAR,TIM,I,J,M,MASMOM,		
4 NAMARY,		
5 VOLTOT,FCVNEW,AREA,FCSNEW,		
6 SXUNC,SYUNC)		
DIMENSION NAMARY(2)		
C		
C		
C*****		
C		
C EXFLW2 IS THE USER SUPPLIED EXTRA EULER FLOW BOUNDARY		
C CONDITION		
C FOR TWO PHASE FLOW		
C		
C QUANTITIES TO BE COMPUTED ARE		
C PEX - PRESSURE		
C UX1EX - X COMPONENT OF FLUID(GAS) VELOCITY		
C UX2EX - X COMPONENT OF SOLID VELOCITY		
C UY1EX - Y COMPONENT OF FLUID(GAS) VELOCITY		
C UY2EX - Y COMPONENT OF SOLID VELOCITY		
C RO1EX - FLUID(GAS) MASS DENSITY		
C RO2EX - SOLID MASS DENSITY		
C SIE1EX - FLUID(GAS) SPECIFIC INTERNAL ENERGY		
C SIE2EX - SOLID SPECIFIC INTERNAL ENERGY		
C VFR1EX - FLUID(GAS) VOLUME FRACTION		
C VFR2EX - SOLID VOLUME FRACTION		
C		
C SWITCHES (ALWAYS) -		
C IFUOPX - SWITCH, INDICATING TYPE OF BOUNDARY		
C =0 - ALL FLOW VARIABLES ARE DEFINED		

```

C      =1 - PEX , VFR1EB AND VFR2EB ARE NOT DEFINED

C      =2 - UXEX AND UYEX (OR UX1EX,UX2EX,UY1EX AND UY2EX) ARE
NOT DEFINED
C
C      MASMOM - SWITCH , INDICATING COLUMN BUFFER NUMBER
C      =1 - COLUMN BUFFER NUMBER IB
C      =2 - COLUMN BUFFER NUMBER ID
C
C      INPUT ARGUEMENTS ARE -
C      XBAR    - AVERAGE X OF FLOW SEGMENT
C      YBAR    - AVERAGE Y OF FLOW SEGMENT
C      TIM     - TIME
C      I,J,M   - COLUMN, ROW, AND SUBGRID NUMBER
C
C*****

C
C      THIS COMMON BLOCK ASSUMES LIMFLO = 6 AND LIMWAL = 5
EULBND      2
C      THE DIMENSION OF THESE ARRAYS IS LIMEB = LIMFLO + LIMWAL + 1
EULBND      3
COMMON /EULBND/ NTREBD, RADOPT, GAMOUT, SSOUT, NUMFLO,
IFUOP(12), EULBND      4
1 UXEB(12), PREB(12), XIMEB(12), TXMEB(12), TMAEB(12), EINEB(12),
EULBND      5
2 UYEB(12), ROEB(12), YIMEB(12), TYMEB(12), TENEB(12), WRKEB(12),
EULBND      6
3 UX1EB(12),UX2EB(12), UY1EB(12), UY2EB(12),SIE1EB(12),SIE2EB(12),
EULBNDEX    1
4 RO1EB(12),RO2EB(12),VFR1EB(12),VFR2EB(12),PDENEB(12),
EULBNDEX    2
5 NAMEB(2,12), LIMFLO, LIMWAL, LIMEB
EULBNDEX    3
C
C      EULBND      8
C
COMMON /NCYVAR/ NCYCLE, DLTMIN, NSEXIT, NUMPLT, TIMB, DLTB,
DLTH $/NCYVAR      2
A , DDSTEP, ITSTEP, KTSTEP, NSWRAP, NUMWAG, TIME, DLTE, DLTFE
$/NCYVAR      3
B , SSSTEP, JTSTEP, MTSTEP $/NCYVAR
4
C $/NCYVAR      5
C
COMMON /COLVAR/ NCOLC, EINTC(5), XMOMC(5), IA, ID,
COLVAR      2
1 NCOLA, NCOLD, EKINC(5), YMOMC(5), IB, IE,
COLVAR      3

```

```

      2      NCOLB, NCOLE, EDISC(5), ZMASC(5), EHTRH(5), IC
COLVAR      4
C
C
C      COLVAR      5
C      THIS DIMENSION STATEMENT ASSUMES LIMROW(2)=100 AND NBCOLS(2-
)=5      EULARY      2
      COMMON /COLMEM/ LIMCOB,      EULARY
      3
      A X      (100,5), Y      (100,5), THICK (100,5), UX      (100,5),      EULARY
      4
      B UY      (100,5), XMOM      (100,5), YMOM      (100,5), VOLMAS(100,5),
EULARY      5
      C VOID      (100,5), RHO1      (100,5), RHO2      (100,5), SAM1      (100,5),
EULARY      6
      D SAM2      (100,5), SIE1      (100,5), SIE2      (100,5), P      (100,5),      EULARY
      7
      E Q      (100,5), SSPD      (100,5), DIV      (100,5), ERG1      (100,5),      EULA-
RY      8
      F ERG2      (100,5), NBTYPE(100,5), NGATES(100,5), FCOVV      (100,5),
EULARY      9
      G FCOVSI(100,5), FCOVSJ(100,5), EXXD      (100,5), EYYD      (100,5),
EULARY      10
      H EXYD      (100,5), SINW      (100,5), TXX      (100,5), TYY      (100,5),
EULARY      11
      I TXY      (100,5), SXXSUM(100,5), SYYSUM(100,5), SXYSUM(100,5),
EULARY      12
      J EXEUL1(100,5), EXEUL2(100,5), EXEUL3(100,5), NBTYP2(100,5),
EULARY      13
      K SMB1      (100,5), SMB2      (100,5),      EULARYEX
      1
      L UX1      (100,5), UY1      (100,5), UX2      (100,5), UY2      (100,5),
EULARYEX      2
      M XMOM1      (100,5), YMOM1      (100,5), XMOM2      (100,5), YMOM2      (100,5),
EULARYEX      3
      N VOLFR1(100,5), VOLFR2(100,5), TEMP1      (100,5), TEMP2      (100,5),
EULARYEX      4
      O PARDEN(100,5), PARNUM(100,5), DIV1      (100,5), DIV2      (100,5),
EULARYEX      5
      P TMPINT(100,5), IFBRN      (100,5)      EULARYEX
      6
C
      COMMON /USER/ NTRUSE, EXTRAS(100), LIMUSE
USER      3
C
      EULARY      15
      DIMENSION COLBUF(30000)      EULARYEX
      7
      DIMENSION DTHICK( 100,5)      EULARY
      17

```

EQUIVALENCE (X (1,1), COLBUF(1))

EULARY

18

EQUIVALENCE (EXEUL2(1,1), DTHICK(1,1))

EULARY 19

C

C THIS COMMON BLOCK CONTAINS MATERIAL DATA FOR GRAIN BURNING

COMMON /GRNMSC/ LIMMSC,GRNMSC(20)

C

C

DATA NCYOL/-1/,NDYNA/0/,TIMEND/14.E-3/,SAMMAX/0.175/

1, HLSVEL/100./,PHLS/300.E5/,XHLS/0./

2, SPGCN/397.11/,COVOL/0.00107/,TMPFL/2000./

DATA PCRIT/164.4E5/,UCRIT/1180./

C

GAMM=EXTRAS(2)

C

C

UXEX = 0.

UYEX = 0.

ROEX = 0.

EINEX= 0.

PEX = 0.

UX1EX = 0.

UX2EX = 0.

UY1EX = 0.

UY2EX = 0.

SIE1EX = 0.

SIE2EX = 0.

PDENEX = 0.

VFR1EX = 0.

VFR2EX = 0.

RO1EX = 0.

RO2EX = 0.

IFUOPX = 0

C

C

C

SAMACT = TMAEB(1)

C

C FOR LOW DENSITIES THE VIRIAL EOS EQUALS THE COVOLUME EOS

RHLS = 1./(SPGCN*TMPFL/PHLS + COVOL)

IF(NCYOL.EQ.NCYCLE) GOTO 10

IF(NCYCLE.LE.(NDYNA+1)) XHLS = XBAR

NCYOL = NCYCLE

XHLS = XHLS + HLSVEL*DLTH

10 CONTINUE

C

```

C
C   MASS CALCULATIONS
IF(MASMOM.EQ.1) THEN
  PEX = P(J,IB)
  VFR1EX = VOLFR1(J,IB)
  VFR2EX = VOLFR2(J,IB)
  RO1EX = RHO1(J,IB)
  RO2EX = RHO2(J,IB)
ELSE
  PEX = P(J,ID)
  VFR1EX = VOLFR1(J,ID)
  VFR2EX = VOLFR2(J,ID)
  RO1EX = RHO1(J,ID)
  RO2EX = RHO2(J,ID)
ENDIF

IF(SAMACT.GT.SAMMAX) GOTO 110
IF(TIME.GT.TIMEND) GOTO 120
IF(XHLS.LT.XBAR) GOTO 130
C   ROOT = AMAX1(0., 2.*(PHLS/RHLS - P(J,IB)/RHO1(J,IB)))
C   IF(ROOT.LE.0.) GOTO 110
C   UY1EX = SQRT( ROOT )
C   UY2EX = 0.
C   PEX = PHLS
PEX = PCRIT
VFR1EX = 1.0
VFR2EX = 0.0
RO1EX = RHLS
RO2EX = 1590.
UY1EX = UCRIT
UY2EX = 0.
SIE1EX = TMPFL*GRNMSC(2)/GAMM
SIE2EX = 0.
GOTO 140
110 CONTINUE
C   OPEN(UNIT=99,FILE=STOP.DAT,STATUS='OLD')
C   WRITE(6,111)
C 111 FORMAT('SAMMAX BEREIKT')
C   CLOSE(UNIT=99)
C   PRINT *, ' SAMMAX BEREIKT'
GOTO 140
120 CONTINUE
C   OPEN(UNIT=99,FILE=STOP.DAT,STATUS='OLD')
WRITE(6,112)
112 FORMAT('TIMEND BEREIKT')
C   CLOSE(UNIT=99)
PRINT *, ' TIMEND BEREIKT'
GOTO 140

```

```

130 CONTINUE
C   OPEN(UNIT=99,FILE=STOP.DAT,STATUS='OLD')
C   WRITE(6,113)
C 113 FORMAT('XBAR BEREIKT')
C   CLOSE(UNIT=99)
C   PRINT *, ' XBAR BEREIKT'
      GOTO 140
C   MOMENTUM CALCULATIONS
C   IF(MASMOM.EQ.2) THEN
C     PEX = P(J,ID)
C     VFR1EX = VOLFR1(J,ID)
C     VFR2EX = VOLFR2(J,ID)
C     RO1EX = RHO1(J,ID)
C     RO2EX = RHO2(J,ID)
C     IF(SAMACT.GT.SAMMAX) GOTO 120
C     IF(TIME.GT.TIMEND) GOTO 120
C     IF(XHLS.LT.XBAR) GOTO 120
C     ROOT = AMAX1(0., 2.*(PHLS/RHLS - P(J,ID)/RHO1(J,ID)))
C     IF(ROOT.LE.0.) GOTO 120
C     UY1EX = SQRT( ROOT )
C     UY2EX = 0.
C     PEX = PHLS
C     RO1EX = RHLS
C     SIE1EX = TMPFL*GRNMSC(2)/GAMM
C     SIE2EX= 0.
C 120 CONTINUE
C           ENDIF
C
C
C
C
C   TERMINATION FOR SUBROUTINE EXFLOW
C
140 CONTINUE
      RETURN
      END
      SUBROUTINE EXEOTW(AA,BB,CC,DD,TT,EZERO,RHOE,ALPE,ETA,EINTB,PB,
        2L28/J      95
1      MPN,I,J,M)                                2L28/J      96
C
C *****
C
C *
C * THE SUBROUTINE EXEOSQ ALLOWS THE USER TO MODEL A NON-
STANDARD *
C *
C * EQUATION OF STATE
C *

```

```

C      *
C      *      THE EQUATION OF STATE HAS THE FORMAT      *
C      *
C      *      PE = ( AA + BB*RHOI*EINTE)      *
C      *
C      *
C      *      NOTE THAT THIS FORMAT SHOULD BE EQUIVALENT TO THE
*
C      *
C      *      ENERGY DEPENDENCE OF THE TEMPERATURE AS DEFINED IN
EXTEMP *
C      *
C      *****
C
COMMON /USER/ NTRUSE, EXTRAS(100), LIMUSE
USER      3
C
COMMON /NCYVAR/ NCYCLE, DLTMIN, NSEXIT, NUMPLT, TIMB, DLTB,
DLTH      $/NCYVAR      2
A      , DDSTEP, ITSTEP, KTSTEP, NSWRAP, NUMWAG, TIME, DLTE, DLTFE
$/NCYVAR      3
B      , SSSTEP, JTSTEP, MTSTEP      $/NCYVAR
4
C      $/NCYVAR      5
COMMON /MSGVAR/ MSG, IMAX, NBCMAX, DTMIN, ITMIN, DDMIN,
IDSTOP,      MSGVAR      2
1      NZCYC, IDMAX, JMAX, JLIMIT, MTPRO, JTMIN, SSMIN, LIMSIG,
MSGVAR      3
2      NSBLAY,EINTG, EKing, EDISG, XMOMG, YMOMG, ZMASG, NUMSIG,
MSGVAR      4
3      EHTRG, MCHSUB,MASCAL      MSGVAR
5
C      MSGVAR      6
C
C
C      DATA NOP/6/
C
C      VIRIAL COEFFICIENTS
DATA AVIR0/1.0E00/,AVIR1/1.07E-3/,AVIR2/0.5E-6/,AVIR3/0.3E-9/
C
C      COLD CONTRIBUTION
DATA COLD/0./
C
AVIR1=1.1E-3
AA = 0.
BB = 0.
CC = 0.
DD = 0.

```



```

      TT = 0.
      RHOGAS0 = 0.86728
      GAMMA1 = EXTRAS(2)
C
      IF(ETA.LE.0.) GOTO 810
C *****
C
C       THE VIRIAL EOS
C       APROXIMATES THE COVOLUME EOS VERY WELL UP TO
C       A DENSITY OF 400.00 , SAY ,
C       1./(1.-COVOL*RHO) = 1.6667
C       A0 + A1*RHO + A2*RHO**2 + A3*RHO**3 = 1.4992
C *****
C
      POW0 = AVIR0
      POW1 = AVIR1*(RHOGAS0*ETA)**1
      POW2 = AVIR2*(RHOGAS0*ETA)**2
      POW3 = AVIR3*(RHOGAS0*ETA)**3
      AA = COLD*(ETA -1.)
      BB = (GAMMA1 - 1.)*ETA/(1-POW1)
      CC = COLD
      DD = (GAMMA1 - 1.)/(1-POW1)**2
      GOTO 900
C
C  ERRORS
810 CONTINUE
      WRITE(NOP,815) ETA,NCYCLE,I,J,M
815  FORMAT(1H,'ERROR EXEOSQ  ETA=',E13.5,4I5)
      NSEXIT = 51
      GOTO 900
C
820 CONTINUE
      WRITE(NOP,825) TERM,ETA,NCYCLE,I,J,M
825  FORMAT(1H,'ERROR EXEOSQ TERM=',2E13.5,4I5)
      NSEXIT = 52
      GOTO 900
C
C
C
C
900 CONTINUE
      RETURN
      END
      SUBROUTINE TWPHIN(UX1,UX2,UY1,UY2,
TWPHIN      2
      2 VOLFR1,VOLFR2, TWPHIN      3
      3 RHO1 ,RHO2 ,SIE1 ,SIE2 , TWPHIN      4
      4 SAM1 ,SAM2 , TWPHIN      5

```

6 PARDEN,		TWPHIN	6
6 IFBRN ,		TWPHIN	7
7 VOLMAS,		TWPHIN	8
8 I,J,M)		TWPHIN	9
C		TWPHIN	10
C	*****		
TWPHIN	11		
C *	*	TWPHIN	12
C *	SUBROUTINE TWPHINI *	TWPHIN	
13			
C *	*	TWPHIN	14
C *	INITIALISES TWOPHASE PROPERTIES *		
TWPHIN	15		
C *	*	TWPHIN	16
C *	AT PURE START RUNS *	TWPHIN	
17			
C *	*	TWPHIN	18
C	*****		
TWPHIN	19		
C		TWPHIN	20
C		TWPHIN	21
C		TWPHIN	22
C	*****		
TWPHIN	23		
C *	*	TWPHIN	24
C *	GASPHASE PROPERTIES *	TWPHIN	
25			
C *	*	TWPHIN	26
C *	RHO1 VOLFR1 UX1 UY1 SAM1 SIE1 *		
TWPHIN	27		
C *	*	TWPHIN	28
C *	*	TWPHIN	29
C *	SOLID PHASE PROPERTIES *	TWPHIN	
30			
C *	*	TWPHIN	31
C *	RHO2 VOLFR2 UX2 UY2 SAM2 PARDEN *		
TWPHIN	32		
C *	IFBRN SIE2 *	TWPHIN	33
C *	*	TWPHIN	34
C	*****		
TWPHIN	35		
C		TWPHIN	36
C		TWPHIN	37
C	*****		
TWPHIN	38		
C *	*	TWPHIN	39
C *	*	TWPHIN	40
C *	OUTPUT RHO1 RHO2 SAM1 SAM2 *		

TWPHIN	41								
C	*	UX1 UX2	*			TWPHIN	42		
C	*	UY1 UY2	*			TWPHIN	43		
C	*	VOLFR1	*			TWPHIN	44		
C	*	VOLFR2	*			TWPHIN	45		
C	*	SIE1	*			TWPHIN	46		
C	*	SIE2	*			TWPHIN	47		
C	*	PARDEN	*			TWPHIN	48		
C	*	IFBRN	*			TWPHIN	49		
C	*		*			TWPHIN	50		
C	*****								
TWPHIN	51								
C									
	COMMON /USER/ NTRUSE, EXTRAS(100), LIMUSE								
USER	3								
C						TWPHIN	52		
C	INLINE STATEMENT FUNCTION								TWP-
HIN	53								
	MIJBRN(IBTYP,IBN,IBW) = IBTYP*100 + IBN*10 + IBW								
TWPHIN	54								
C						TWPHIN	55		
C						TWPHIN	56		
C						TWPHIN	57		
C	MIJBRN = ABC			YES NO		TWPHIN			
58									
C	^ SWITCH FOR BURNING IN THE PAST		1	0					
TWPHIN	59								
C						TWPHIN	60		
C	^ SWITCH FOR BURNING AT THIS MOMENT		1	0					
TWPHIN	61								
C						TWPHIN	62		
C	^ SWITCH FOR METHOD OF INTERPHASE								
TWPHIN	63								
C	TEMPERATURE CALCULATION								
TWPHIN	64								
C						TWPHIN	65		
C						TWPHIN	66		
C	BURNING AT START , IBWAS = 1					TWPHIN			
67									
	IFBRN = MIJBRN(0,0,0)					TWPHIN	68		
C						TWPHIN	69		
	IBTYPE = MOD(IFBRN/100,10)					TWPHIN			
70									
	IBNOW = MOD(IFBRN/10,10)					TWPHIN			
71									
	IBWAS = MOD(IFBRN,10)					TWPHIN			
72									
C						TWPHIN	73		

```

C    PARTICLE DENSITY                                TWPHIN
74
    PARDEN = 1.                                TWPHIN    75
C                                TWPHIN    76
C                                TWPHIN    77
    RHO1 = 0.86728                                TWPHIN
78
    RHO2 = 1570.                                TWPHIN    79
    VOLFR1 = EXTRAS(1)                                TWPHIN
80
    VOLFR2 = 1.-VOLFR1                                TWPHIN
81
    UX1  = 0.                                TWPHIN    82
    UX2  = 0.                                TWPHIN    83
    UY1  = 0.                                TWPHIN    84
    UY2  = 0.                                TWPHIN    85
    SIE1 = 4.1934E5                                TWPHIN
86
    SIE2 = 5.8794E5                                TWPHIN
87
    SAM1  = RHO1*VOLFR1*VOLMAS
TWPHIN    88
    SAM2  = RHO2*VOLFR2*VOLMAS
TWPHIN    89
C    ALRE  =1.0
C
C                                TWPHIN    90
C                                TWPHIN    91
C                                TWPHIN    92
C                                TWPHIN    93
    RETURN                                TWPHIN    94
    END                                TWPHIN    95

SUBROUTINE EXSGVG(SGVG,DSDVFR,VFR2,VFR2NW,PDEN2,PDN2NW,RC,
1          ISWBUR,I,J,M)

REAL*8  ANGL,D,DX,GSURF,GVOLUM,L,LX,PD,PDM,PI,PX1,PX2,SIDE,
+        SSUM,TA,TV,VSUM,WEB,WI,WM,WO,X
INTEGER II,JJ,NFORMS,NPERF,NCHECK
LOGICAL SWITCH

PARAMETER (NMAX = 100 , PI = 3.1415926535897)
COMMON  /GEOMTR/ WI,WM,WO,L,PD,PDM,NPERF
COMMON  /FORMS / GSURF(NMAX),GVOLUM(NMAX),NFORMS

DATA SWITCH /.TRUE./
DATA WI /1.21E-3/, WO /1.22E-3/, L/15.4E-3/, PDM /0.64E-3/
DATA NPERF /7/

```

JJ=1

IF (SWITCH) THEN
 SWITCH=.FALSE.
 CALL TABFRM
END IF

IF (PDEN2 .GT. 1.0E-4) THEN
 VGRAIN = 5.213E-7/PDEN2
ELSE
 VGRAIN=0.
END IF

C De numerieke waarde is het beginvolume van de kruitkorrel

777 IF (GVOLUM(JJ+1) .GT. VGRAIN .AND. JJ .LT. NFORMS) THEN
 JJ=JJ+1
 GOTO 777
END IF

IF (JJ .LT. NFORMS) THEN
 SGRAIN=DLAGR(VGRAIN,GVOLUM,GSURF,MAX(1,JJ-2),MIN(JJ+3,NFORMS))
ELSE
 SGRAIN=GSURF(NFORMS)*VGRAIN/GVOLUM(NFORMS)
END IF

IF (VGRAIN .NE. 0.) THEN
 DSDVFR=SGRAIN/VGRAIN
ELSE
 DSDVFR=0.
END IF
SGVG=VFR2*DSDVFR
PDN2NW=PDEN2
VFR2NW=VFR2

RETURN
END

SUBROUTINE TABFRM

REAL*8 ANGL,D,DX,GSURF,GVOLUM,L,LX,PD,PDM,PI,PX1,PX2,SIDE,
+ SSUM,TA,TV,VSUM,WEB,WI,WM,WO,X
INTEGER II,JJ,NFORMS,NPERF,NCHECK
DIMENSION SIDE(3,4),ANGL(4,4),NCHECK(4)
EXTERNAL GENIS,GENOS
INTRINSIC DFLOAT,DMIN1,DSQRT

PARAMETER (NMAX = 100 , PI = 3.1415926535897)
COMMON /GEOMTR/ WI,WM,WO,L,PD,PDM,NPERF

```
COMMON /FORMS / GSURF(NMAX),GVOLUM(NMAX),NFORMS
DATA NCHECK / 4*-1 /
```

```
PX1 = 0.
```

```
PX2 = 0.
```

```
IF (PD .EQ. 0.) PD = PDM
```

```
IF (NPERF .EQ. 0) THEN
```

```
  D = WI
```

```
  WEB = DMIN1 (D,L)
```

```
ELSE IF (NPERF .EQ. 1) THEN
```

```
  D = WI
```

```
  WEB = DMIN1 (0.5*(D-PDM),L)
```

```
ELSE IF (NPERF .EQ. 7) THEN
```

```
  D = PDM + 2.*(WI+WO+PD)
```

```
  WEB = DMIN1 (WI,WO,L)
```

```
  SIDE(1,1) = WI + 0.5*(PDM + PD)
```

```
  SIDE(2,1) = SIDE(1,1)
```

```
  SIDE(3,1) = SIDE(1,1)
```

```
ELSE IF (NPERF .EQ. 19) THEN
```

```
  D = PDM + 4.*PD + 2.*(WI+WM+WO)
```

```
  WEB = DMIN1 (WI,WM,WO,L)
```

```
  SIDE(1,1) = WI + 0.5*(PDM + PD)
```

```
  SIDE(2,1) = SIDE(1,1)
```

```
  SIDE(3,1) = SIDE(1,1)
```

```
  SIDE(1,2) = 0.5*DSQRT(3.*(WM+PD)**2 + (WI+0.5*(PDM+PD))**2)
```

```
  SIDE(2,2) = SIDE(1,2)
```

```
  SIDE(3,2) = SIDE(1,1)
```

```
  SIDE(1,3) = 0.5*(WI+WM) + 0.25*PDM + 0.75*PD
```

```
  SIDE(2,3) = SIDE(1,2)
```

```
  SIDE(3,3) = WM + PD
```

```
  SIDE(1,4) = SIDE(1,3)
```

```
  SIDE(2,4) = 2.*SIDE(1,3)
```

```
  SIDE(3,4) = SIDE(1,3)*DSQRT(3.0D0)
```

```
END IF
```

- * Vul arrays met brandend oppervlak en resterend volume
- * i = 50 (=nmax/2) bij doorbranden van web (brand aan twee kanten)

```
DO 1 II = 1,NMAX
```

- * Bereken ingebrande geometrie variabelen
- ```
 X = DFLOAT(II-1)*WEB/NMAX
 LX = L - 2.*X
```

```

DX = D - 2.*X
SSUM = 0.
VSUM = 0.
IF (NPERF .GE. 1) PX1 = PDM + 2.*X
IF (NPERF .GE. 7) PX2 = PD + 2.*X

```

```

* Als web nog niet doorgebrand dan directe berekening
IF (2.*X .LE. WEB) THEN
 TA = 0.25*PI*(DX**2 - PX1**2 - (NPERF-1)*PX2**2)
 SSUM = 2.*TA + LX*PI*(DX + PX1 + (NPERF-1)*PX2)
 VSUM = TA*LX

* Web doorgebrand dan verder rekenen (alleen 7 en 19 gats)
ELSE IF (NPERF .EQ. 7) THEN
 CALL GENIS (SIDE(1,1),ANGL(1,1),PX1,PX2,LX,NCHECK(1),TA,TV)
 SSUM = SSUM + 6.*TA
 VSUM = VSUM + 6.*TV
 CALL GENOS (SIDE(1,1),ANGL(1,1),PX2,LX,DX/2.,NCHECK(2),TA,TV)
 SSUM = SSUM + 6.*TA
 VSUM = VSUM + 6.*TV

ELSE IF (NPERF .EQ. 19) THEN
 CALL GENIS (SIDE(1,1),ANGL(1,1),PX1,PX2,LX,NCHECK(1),TA,TV)
 SSUM = SSUM + 6.*TA
 VSUM = VSUM + 6.*TV
 CALL GENIS (SIDE(1,2),ANGL(1,2),PX2,PX2,LX,NCHECK(2),TA,TV)
 SSUM = SSUM + 6.*TA
 VSUM = VSUM + 6.*TV
 CALL GENIS (SIDE(1,3),ANGL(1,3),PX2,PX2,LX,NCHECK(3),TA,TV)
 SSUM = SSUM + 12.*TA
 VSUM = VSUM + 12.*TV
 CALL GENOS (SIDE(1,4),ANGL(1,4),PX2,LX,DX/2.,NCHECK(4),TA,TV)
 SSUM = SSUM + 12.*TA
 VSUM = VSUM + 12.*TV

END IF

GSURF(II) = SSUM
GVOLUM(II) = VSUM
IF (VSUM .EQ. 0.) GOTO 2

1 CONTINUE

2 NFORMS = II - 1

RETURN
END

```

```

*
* Function : DLAGR
* Datum V1.0 : 04 januari 1989
*
* Onderwerp : Interpolatie
* Doel : Interpoleren met methode van Lagrange
* Auteur : J.C. Post
*

```

DOUBLE PRECISION FUNCTION DLAGR(X,XTAB,YTAB,ELMNT1,ELMNT2)

```

REAL*8 X,XTAB,YTAB,PROD
INTEGER II,JJ,ELMNT1,ELMNT2
DIMENSION XTAB(*),YTAB(*)

```

```

DLAGR = 0. D+00
DO 2 II = ELMNT1,ELMNT2
 PROD = 1. D+00
 DO 1 JJ = ELMNT1,ELMNT2
 IF (JJ .NE. II) PROD = PROD*(X-XTAB(JJ))/(XTAB(II)-XTAB(JJ))
1 CONTINUE
 DLAGR = DLAGR + YTAB(II)*PROD
2 CONTINUE

RETURN
END

```

\*\*\*\*\*

SUBROUTINE GENIS (S,A,R1,R2,LX,IFLAG,SURF,VOL)

```

* subroutine *genis* : calculate surface area and volume for a
* general inner sliver of a burning grain with length = LX,
* mid perf diam = R1 and other perf diam = R2.

```

```

REAL*8 A,B2,B3,E,LX,PI,RAD,R1,R2,S,SURF,TAU12,TAU13,TAU21,
+ TAU23,TAU31,TAU32,VOL
INTEGER II,JJ,IFLAG

```

```

DIMENSION S(3),A(4)
DATA PI / 3.1415926535897 /

```

```

VOL = 0.
SURF = 0.

```

```

* initial pass : iflag was set negative by calling routine,

```



\* store angles a1,a2,a3 and area of triangle  
 \* with sides s(1),s(2),s(3) into a(1).....a(4).

IF (IFLAG .LT. 0) THEN

IFLAG = 0

A(1) = ACOS((S(2)\*\*2+S(3)\*\*2-S(1)\*\*2)/(2.\*S(2)\*S(3)))

A(2) = ACOS((S(1)\*\*2+S(3)\*\*2-S(2)\*\*2)/(2.\*S(1)\*S(3)))

A(3) = PI - A(1) - A(2)

A(4) = 0.5\*S(1)\*S(3)\*SIN(A(2))

\* check for error condition : find if triangle acceptable.

JJ = 0

DO 15 II = 1,3

IF (A(II) .LT. 0.25\*PI) JJ = JJ + 1

15 CONTINUE

IF (JJ .GT. 1) THEN

PRINT \*, ' Error at subroutine \*GENIS\* (ANGLE < PI/4) '

STOP

END IF

END IF

\* succeeding passes until burnout : find auxiliary angles.

B2 = 0.5\*(S(2) + 0.25\*(R1\*\*2 - R2\*\*2)/S(2))

B3 = 0.5\*(S(3) + 0.25\*(R1\*\*2 - R2\*\*2)/S(3))

TAU12 = ACOS(DMIN1(1.0D0,B3/(0.5\*R1)))

TAU21 = ACOS(DMIN1(1.0D0,(S(3)-B3)/(0.5\*R2)))

TAU13 = ACOS(DMIN1(1.0D0,B2/(0.5\*R1)))

TAU31 = ACOS(DMIN1(1.0D0,(S(2)-B2)/(0.5\*R2)))

TAU23 = ACOS(DMIN1(1.0D0,S(1)/R2))

TAU32 = TAU23

\* and branch if sliver fails burnout criteria.

IF (TAU12+TAU13+TAU23+TAU21+TAU31+TAU32 .LT. PI .AND.

# LX .GT. 0.) GOTO 25

\* sliver just burned out : set flag to bypass area and volume calculati

IFLAG = 1

GOTO 30

\* sliver not burned out : determine end area , volume and surface area.

25 E = A(4) - 0.25\*R2\*( S(1)\*SIN(TAU23) + S(3)\*SIN(TAU12) +

```

S(2)*SIN(TAU31)) -
(A(1)-TAU13-TAU12)/8.*R1**2 -
(A(2)-TAU21-TAU23 + A(3)-TAU31-TAU32)/8.*R2**2
VOL = E*LX
SURF = 2.*E + 0.5*LX*R1*(PI/3.-TAU12-TAU13) +
0.5*LX*R2*(2./3*PI-TAU21-TAU23-TAU31-TAU32)

```

\* and return to main

RETURN

\* sliver is burned out : return with zero volume and surface area.

```

30 VOL = 0.
 SURF = 0.

```

RETURN

END

\*\*\*\*\*

SUBROUTINE GENOS(S,A,R2,LX,RAD,IFLAG,SURF,VOL)

\* subroutine \*genos\* : calculate surface area and volume for a  
\* general outer sliver of a burning grain  
\* with length = LX , radius =RAD and  
\* perf diam = R2. , radius =RAD and

```

REAL*8 A,E,LX,RAD,R2,S,SIG,SURF,TAU1,TAU2,TAU3,TAU4,VOL
INTEGER IFLAG

```

DIMENSION S(3),A(4)

IF (IFLAG) 10,20,30

\* initial pass : iflag was set negative by calling routine,  
\* store angles a1,a2,a3 and area of triangle  
\* with sides s(1),s(2),s(3) into a(1).....a(4).

```

10 A(1) = ACOS((S(2)**2+S(3)**2-S(1)**2)/(2.*S(2)*S(3)))
 A(2) = ACOS((S(1)**2+S(3)**2-S(2)**2)/(2.*S(1)*S(3)))
 A(3) = ACOS((S(1)**2+S(2)**2-S(3)**2)/(2.*S(1)*S(2)))

 A(4) = 0.5*S(1)*S(3)*SIN(A(2))

```

\* set flag to zero to bypass initialization hereafter.

IFLAG = 0

- \* succeeding passes until burnout : first determine auxiliary angles.

```
20 TAU1 = ACOS(DMIN1(1.0D0,(S(2)**2+RAD**2-0.25*R2**2)/
(2.*S(2)*RAD)))
 TAU2 = ACOS(DMIN1(1.0D0,(S(3)**2+RAD**2-0.25*R2**2)/
(2.*S(3)*RAD)))
 TAU3 = ACOS(DMAX1(-1.0D0,(S(2)**2-RAD**2+0.25*R2**2)/
(S(2)*R2)))
 TAU4 = ACOS(DMAX1(-1.0D0,(S(3)**2-RAD**2+0.25*R2**2)/
(S(3)*R2)))
```

SIG = ACOS(DMIN1(1.0D0,S(1)/R2))

- \* then check error conditions

```
IF (TAU3 .LT. A(3) .OR. TAU4 .LT. A(2)) THEN
 STOP ' ERROR AT SUBROUTINE *GENOS* '
END IF
```

- \* if ok, branch if sliver fails burnout criteria.

IF (TAU1+TAU2 .LT. A(1) .AND. LX .GT. 0.) GOTO 25

- \* sliver just burned out : set flag to bypass area and volume calculati

IFLAG = 1  
GOTO 30

- \* sliver not burned out : determine end area , volume and surface area.

```
25 E = 0.5*RAD*(S(2)*SIN(TAU1)+RAD*(A(1)-TAU1-TAU2) +
S(3)*SIN(TAU2)) - A(4) - 0.25*R2*(S(1)*SIN(SIG) +
0.5*R2*(TAU3+TAU4-2.*SIG-A(2)-A(3)))
VOL = E*LX
SURF = 2.*E + LX*(RAD*(A(1)-TAU1-TAU2) +
0.5*R2*(TAU3+TAU4-2.*SIG - A(2) - A(3)))
```

- \* and return to main

RETURN

- \* sliver is burned out : return with zero volume and surface area.

30 VOL = 0.  
SURF = 0.

RETURN

END

SUBROUTINE EXEDIT(NCOL,NBC)

```
C
C *****
C *
C * THIS SUBROUTINE ALLOWS THE USER ADDITIONAL EDITING
C *
C *
C * 12-4-91 M. JURGENS
C *
C *****
C
C LOGICAL SSWITCH
C
C THIS COMMON BLOCK CONTAINS MATERIAL DATA FOR GRAIN BUR-
NING
COMMON /GRNMSC/ LIMMSC,GRNMSC(20)
C
COMMON /USER/ NTRUSE, EXTRAS(100), LIMUSE
USER 3
C
COMMON /CUTOFF/ NTRCUT, VELCUT, VELMAX, RHOCUT, SLLIM,
FBLEND, CUTOFF 2
1 SLLSQ, VFRCUT CUTOFF 3
C CUTOFF 4
C BDARY 8
C THIS DIMENSION STATEMENT ASSUMES LIMROW(2)=100 AND NBCOLS(2-
)=5 EULARY 2
COMMON /COLMEM/ LIMCOB, EULARY
3
A X (100,5), Y (100,5), THICK (100,5), UX (100,5), EULARY
4
B UY (100,5), XMOM (100,5), YMOM (100,5), VOLMAS(100,5),
EULARY 5
C VOID (100,5), RHO1 (100,5), RHO2 (100,5), SAM1 (100,5),
EULARY 6
D SAM2 (100,5), SIE1 (100,5), SIE2 (100,5), P (100,5), EULARY
7
E Q (100,5), SSPD (100,5), DIV (100,5), ERG1 (100,5), EULA-
RY 8
F ERG2 (100,5), NBTYPE(100,5), NGATES(100,5), FCOVV (100,5),
EULARY 9
G FCOVSI(100,5), FCOVSJ(100,5), EXXD (100,5), EYYD (100,5),
EULARY 10
H EXYD (100,5), SINW (100,5), TXX (100,5), TYY (100,5),
```

```

EULARY 11
 I TXY (100,5), SXXSUM(100,5), SYYSUM(100,5), SXYSUM(100,5),
EULARY 12
 J EXEUL1(100,5), EXEUL2(100,5), EXEUL3(100,5), NBTYP2(100,5),
EULARY 13
 K SMB1 (100,5), SMB2 (100,5), EULARYEX
1
 L UX1 (100,5), UY1 (100,5), UX2 (100,5), UY2 (100,5),
EULARYEX 2
 M XMOM1 (100,5), YMOM1 (100,5), XMOM2 (100,5), YMOM2 (100,5),
EULARYEX 3
 N VOLFR1(100,5), VOLFR2(100,5), TEMP1 (100,5), TEMP2 (100,5),
EULARYEX 4
 O PARDEN(100,5), PARNUM(100,5), DIV1 (100,5), DIV2 (100,5),
EULARYEX 5
 P TMPINT(100,5), IFBRN (100,5) EULARYEX
6
C EULARY 20
 COMMON /NCYVAR/ NCYCLE, DLTMIN, NSEXIT, NUMPLT, TIMB, DLTB,
DLTH $/NCYVAR 2
 A , DDSTEP, ITSTEP, KTSTEP, NSWRAP, NUMWAG, TIME, DLTE, DLTFE
$/NCYVAR 3
 B , SSSSTEP, JTSTEP, MTSTEP $/NCYVAR
4
C $/NCYVAR 5
 COMMON /COLVAR/ NCOLC, EINTC(5), XMOMC(5), IA, ID,
COLVAR 2
 1 NCOLA, NCOLD, EKINC(5), YMOMC(5), IB, IE,
COLVAR 3
 2 NCOLB, NCOLE, EDISC(5), ZMASC(5), EHTRH(5), IC
COLVAR 4
C COLVAR 5
 COMMON /MSGVAR/ MSG, IMAX, NBCMAX, DTMIN, ITMIN, DDMIN,
IDSTOP, MSGVAR 2
 1 NZCYC, IDMAX, JMAX, JLIMIT, MTPRO, JTMIN, SSMIN, LIMSIG,
MSGVAR 3
 2 NSBLAY,EINTG, EKING, EDISG, XMOMG, YMOMG, ZMASG, NUMSIG,
MSGVAR 4
 3 EHTRG, MCHSUB,MASCAL MSGVAR
5
C MSGVAR 6
 COMMON /RUNVAR/ NCYLIM, NCYREF, NSYM, GRAVX, LIMPAG, DATE(5),
RUNVAR 2
 1 HEAD(18), TIMLIM, ENFRAC, FRAT, GRAVY, LINEPP, HOUR(2),
RUNVAR 3
 2 NCYBEG, DLTWRP, STATIC, KENT, XBDAMP, YBDAMP, EDAMP,
RUNVAR 4
 3 METHDT, DLTMAX, MAXSCM, MAXLCM, MAXDSK, PHEAD(8),

```

```

NDELK, RUNVAR 5
 4 NILSUP, IFEVPL, IFEVPE, NSYMDF RUNVAR
 6
C RUNVAR 7
C

```

```

DATA SSWITCH/.TRUE./
DATA NPRINT/100/

```

```

IF (SSWITCH) THEN

```

```

 PPMAX=0.

```

```

 IVAR=0

```

```

 JVAR=0

```

```

 MVAR=0

```

```

 TVAR=0.

```

```

 DO 1111 JJZ=1,100

```

```

 DO 1112 IIZ=1,5

```

```

 EXEUL1(JJZ,IIZ)=0.

```

```

 EXEUL2(JJZ,IIZ)=0

```

```

 EXEUL3(JJZ,IIZ)=0.

```

```

1112 CONTINUE

```

```

1111 CONTINUE

```

```

 SSWITCH=.FALSE.

```

```

ENDIF

```

```

DO 110 JZ = 2,JMAX

```

```

IF(SAM1(JZ,NBC).LE.0. .AND. SAM2(JZ,NBC).LE.0.) GOTO 110

```

```

IF (P(JZ,NBC) .GT. PMAXX) THEN

```

```

 PMAXX=P(JZ,NBC)

```

```

 IVAR=NCOL

```

```

 JVAR=JZ

```

```

 MVAR=NCYCLE

```

```

 TVAR=TIME

```

```

ENDIF

```

```

IF (P(JZ,NBC) .GT. EXEUL1(JZ,NBC)) THEN

```

```

 EXEUL1(JZ,NBC)=P(JZ,NBC)

```

```

 EXEUL2(JZ,NBC)=NCYCLE

```

```

 EXEUL3(JZ,NBC)=TIME

```

```

ENDIF

```

```

110 CONTINUE

```

```

IF (MOD(NCYCLE,NPRINT).EQ.0) THEN

```

```

 WRITE(6,9388)TVAR,MVAR,IVAR,JVAR,PMAXX

```

```

9388 FORMAT(1H , '**INFO EXEDIT, MAXIMUM PRESSURE',E13.5,3I6,3X,E13.5)

```

```

ENDIF

```

```

C

```

```

C ***** EXTRAS(21) AND (22) ARE DEFINED IN EXBDFO *****

```

```

C
 EXEUL1(1,NBC)=EXTRAS(21)
 EXEUL2(1,NBC)=EXTRAS(22)
 EXRIG1=EXTRAS(23)
 EXRIG2=EXTRAS(24)
 EXRIG3=EXTRAS(25)
C WRITE(NOP,740) EXRIG1,EXRIG2,EXRIG3
C 740 FORMAT(/,8X,'
C 1 EXRIG1(23)',E14.5,/8X,'EXRIG2(24)=' ,E14.5,/8X,'
C 2 EXRIG3(25)=' ,E14.5/)
C
C
 RETURN
 END

C *****

 SUBROUTINE EXBDFO
C
C THIS COMMON BLOCK ASSUMES LIMBD = 500
BDARY 2
 COMMON /BDARY/ NTRBDY, XENDBD(500), XDOTBD(500), XFORBD(500),
 BDARY 3
 1 NTPYBD(500), YENDBD(500), YDOTBD(500), YFORBD(500),
BDARY 4
 2 PMASBD(500), DTDXBD(500), DTDYBD(500), AREABD(500),
BDARY 5
 3 WORKVI, XIMPVI, YIMPVI, NUMBD, LIMBD,
BDARY 6
 4 DTDXBS(500), DTDYBS(500)
BDARY
 7
C
 COMMON /NCYVAR/ NCYCLE, DLTMIN, NSEXIT, NUMPLT, TIMB, DLTB,
DLTH $/NCYVAR 2
 A , DDSTEP, ITSTEP, KTSTEP, NSWRAP, NUMWAG, TIME, DLTE, DLTFE
 $/NCYVAR 3
 B , SSSTEP, JTSTEP, MTSTEP
 $/NCYVAR
 4
C
 $/NCYVAR 5
 COMMON /MSGVAR/ MSG, IMAX, NBCMAX, DTMIN, ITMIN, DDMIN,
IDSTOP, MSGVAR 2
 1 NZCYC, IDMAX, JMAX, JLIMIT, MTPRO, JTMIN, SSMIN, LIMSIG,
MSGVAR 3
 2 NSBLAY,EINTG, EKing, EDISG, XMOMG, YMOMG, ZMASG, NUMSIG,
 MSGVAR 4
 3 EHTRG, MCHSUB,MASCAL
 MSGVAR
 5
C
 MSGVAR 6

```

```

C THIS COMMON BLOCK ASSUMES LIMUSE = 100
USER 2
COMMON /USER/ NTRUSE, EXTRAS(100), LIMUSE
USER 3
C
C
C DIMENSION LNTPRJ(4)
C
C DATA LNTPRJ/1,2,3,4/, NSWOFF/0/, IP1/1/, ARPRO/4.53646E-3/
C DATA NUMPRJ/4/, POFF/5.E6/, PATM/1.E5/, XP0/0.588/
C DATA XD1,XD2,XD3,XD4/.002,.012,.024,.040/
C DATA PF1/0./
C DATA NOP/6/, NCALL/0/
C
C PF2=EXTRAS(3)
C PF4=EXTRAS(4)
C IF (NCALL.EQ.0) THEN
C FAC0 = (PF1-POFF)/XD1
C FAC1 = (PF2-PF1)/(XD2-XD1)
C FAC2 = (PF4-PF2)/(XD4-XD3)
C ENDIF
C NCALL = NCALL + 1
C FXTOFF = ARPRO * POFF
C
C FXTOT = 0.
C DO 10 JJ = 1,NUMPRJ
C II = LNTPRJ(JJ)
C FXTOT = FXTOT + XFORBD(II)
10 CONTINUE
C
C IF (NSWOFF .EQ. 0) THEN
C IF (FXTOT .GT. FXTOFF) THEN
C THE PROJECTILE WILL START TO MOVE
C NSWOFF = 1
C WRITE(NOP,610) TIME,FXTOT,FXTOFF
610 FORMAT(/,8X,'EXDBFO: THE PROJECTILE STARTS TO MOVE AT T=',
1 E14.5,/8X,' FXTOT=',E14.5,' FXOFF=',E14.5/)
C ENDIF
C ENDIF
C
C IF (NSWOFF .EQ. 0) THEN
C NSWOFF = 0 : SET FORCES TO ZERO.
C DO 20 JJ = 1,NUMPRJ
C II = LNTPRJ(JJ)
C XFORBD(II) = 0.
20 CONTINUE
C ELSE

```



```

XDIS = XENDBD(LNTPRJ(1)) - XP0
IF (XDIS .LT. XD1) THEN
 PFRIC = POFF + XDIS*FAC0
ELSE IF (XDIS .LT. XD2) THEN
 PFRIC = PF1 + (XDIS-XD1)*FAC1
ELSE IF (XDIS .LT. XD3) THEN
 PFRIC = PF2
ELSE IF (XDIS .LT. XD4) THEN
 PFRIC = PF2 + (XDIS-XD3)*FAC2
ELSE
 PFRIC = PF4
ENDIF
C
FXFRIC = ARPRO*(PFRIC + PATM)
IF (XDOTBD(IP1) .GT. 0.)
* XFORBD(IP1) = XFORBD(IP1) - FXFRIC
ENDIF
C
EXTRAS(21) = XDIS
EXTRAS(22) = PFRIC
C
EXTRAS(23) = FXTOT
EXTRAS(24) = FXTOT-FXFRIC
EXTRAS(25) = FXTOT/ARPRO
C WRITE(NOP,730) EXTRAS(23),EXTRAS(24),EXTRAS(25)
C 730 FORMAT(/,8X,'blablabla
C 1 EXTRAS(23)',E14.5,/8X,'EXTRAS(24)=' ,E14.5,/8X,'
C 2 EXTRAS(25)=' ,E14.5/)
C
C
RETURN
END
C
C*****
C
SUBROUTINE EXBUR(BURN,DBDRHO,DBDVFR,RHO1,RHO2,
1 VFR1,VFR2,UX1,UY1,UX2,UY2,
2 SIE1,SIE2,PDEN2,PB,
3 I,J,M)
C
DATA CONST/.01/ BETA/8.E-10/
C
BURN=BETA*PB+CONST
DBDRHO=0.
DBDVFR=0.
RETURN
END

```

## APPENDIX 3

### Het Otomelara kanon

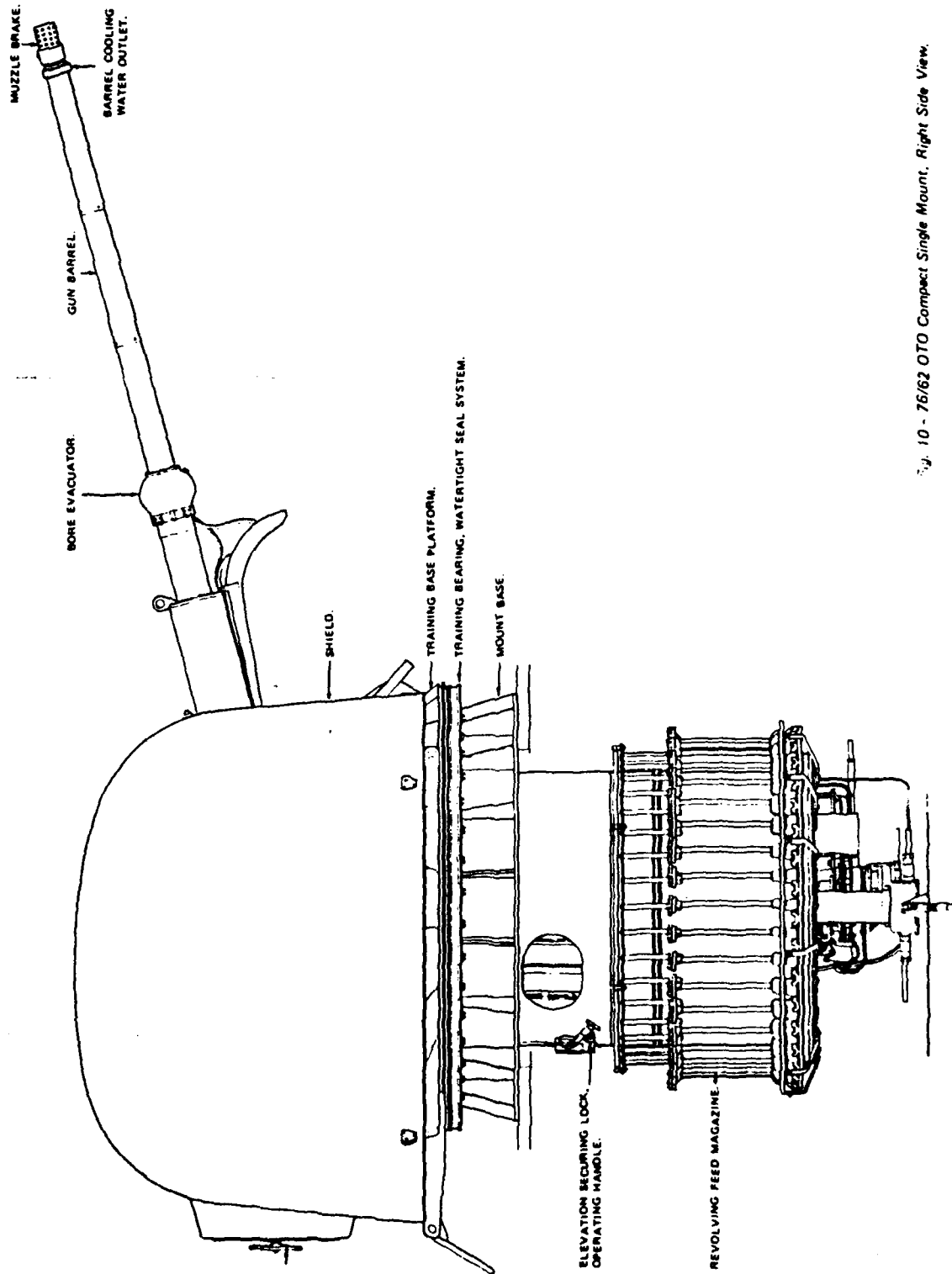
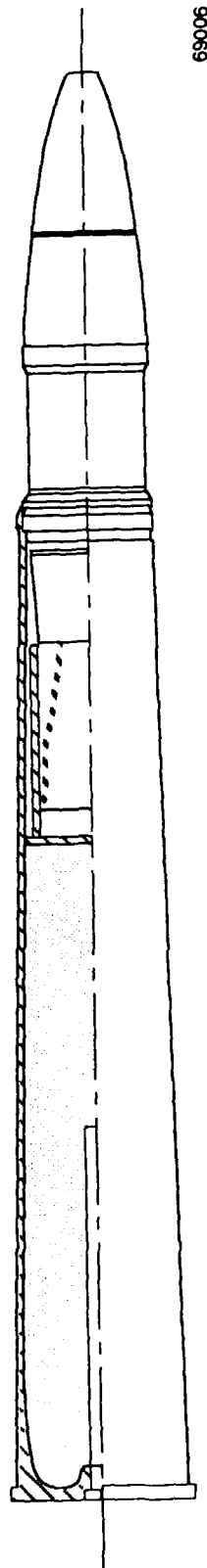


Fig. 10 - 75/62 OTO Compact Single Mount, Right Side View.

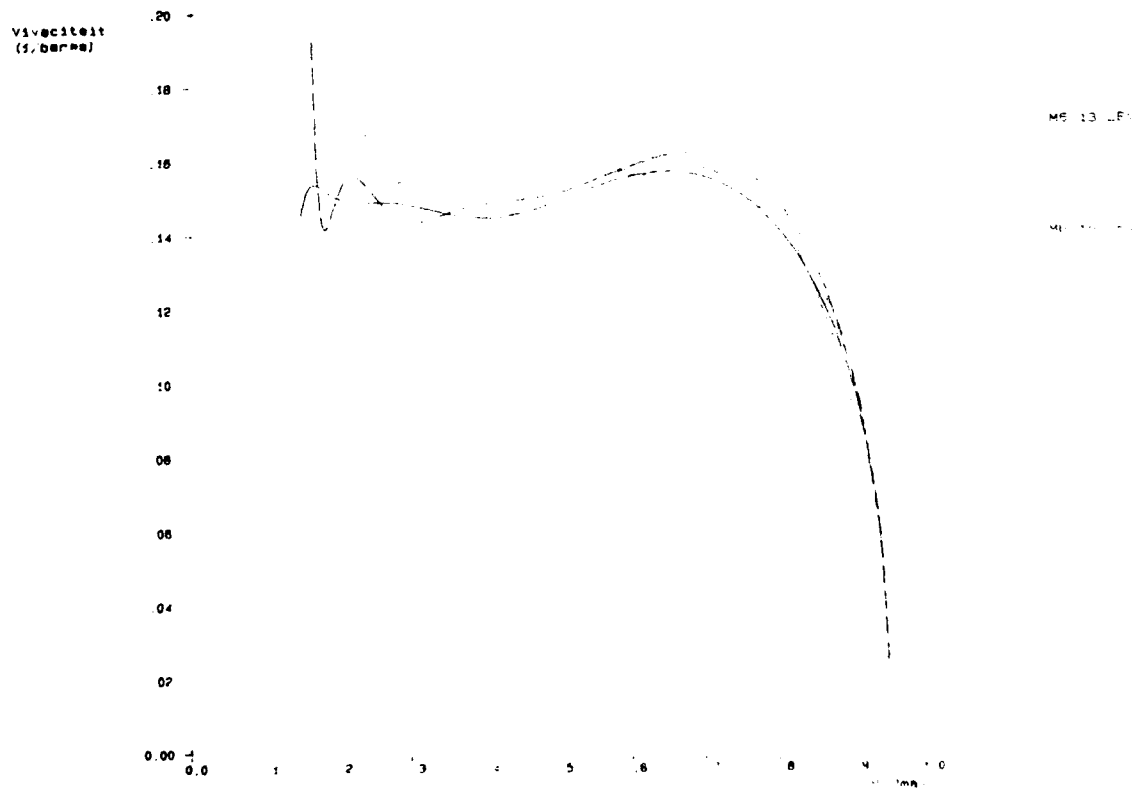
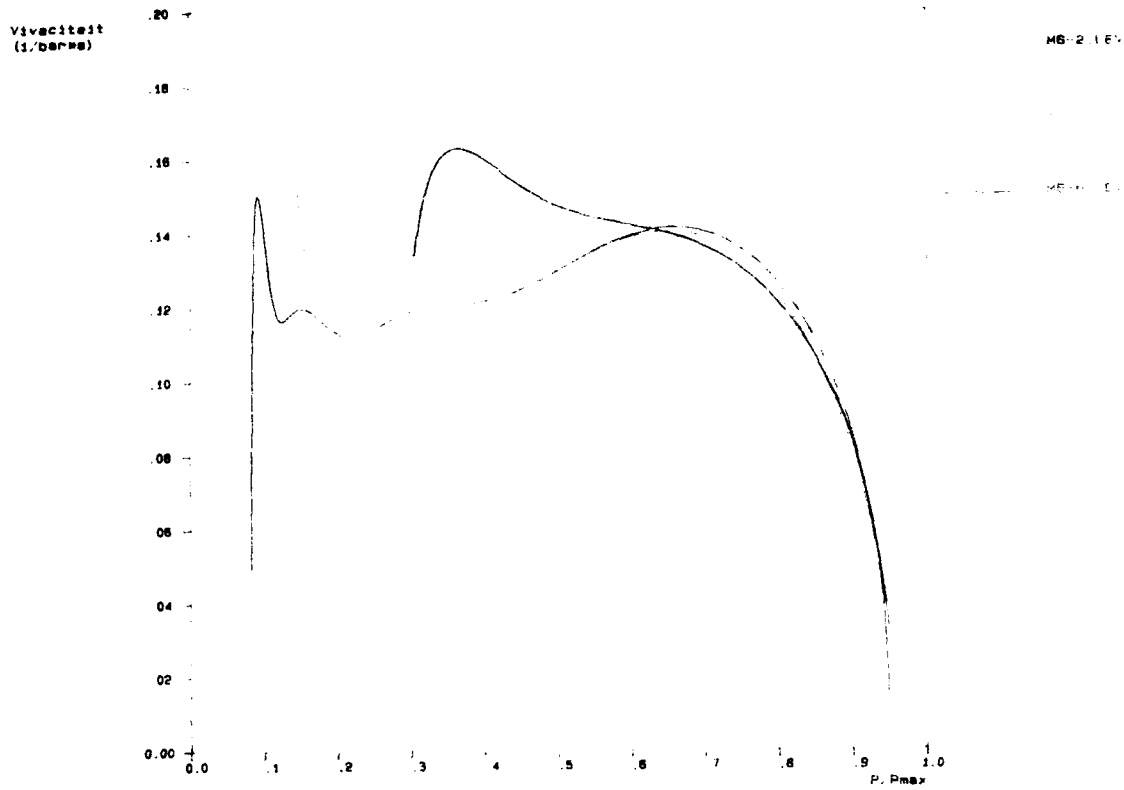
## APPENDIX 4

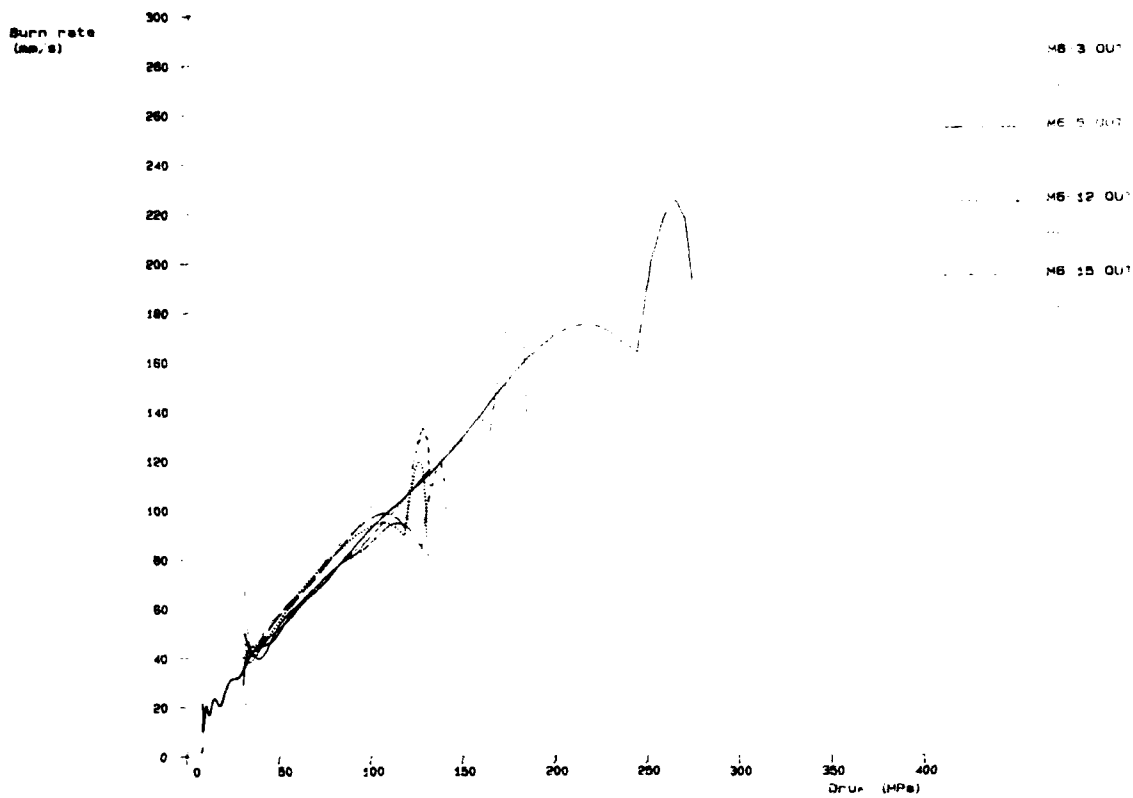
Een Otomelara patroon



# APPENDIX 5

Figuren 1 t/m 3 in kleur





# REPORT DOCUMENTATION PAGE

(MOD NL)

|                                                                                                                                                                                            |                                                           |                                                             |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| 1. DEFENSE REPORT NUMBER (MOD-NL)<br>TD91-4207                                                                                                                                             | 2. RECIPIENT'S ACCESSION NUMBER                           | 3. PERFORMING ORGANIZATION REPORT NUMBER<br>PML1992-90      |
| 4. PROJECT/TASK/WORKUNIT NO.<br>253490069                                                                                                                                                  | 5. CONTRACT NUMBER<br>A85/KM/118                          | 6. REPORT DATE<br>September 1992                            |
| 7. NUMBER OF PAGES<br>76 ( 5 Annexes )                                                                                                                                                     | 8. NUMBER OF REFERENCES<br>12                             | 9. TYPE OF REPORT AND DATES COVERED<br>Final                |
| 10. TITLE AND SUBTITLE<br>Simulation of a shot from the Otomelara 76/62 with pisces-2delk graim burning<br>(Simulatie van een schot van de Otomelara 76/62 met pisces-2delk grain burning) |                                                           |                                                             |
| 11. AUTHOR(S)<br>Dr. Ir. J.H. Hendriks                                                                                                                                                     |                                                           |                                                             |
| 12. PERFORMING ORGANIZATION NAME(S) AND ADDRESS(ES)<br>TNO Prins Maurits Laboratory<br>P.O. Box 45, 2280 AA Rijswijk, The Netherlands                                                      |                                                           |                                                             |
| 13. SPONSORING AGENCY NAME(S) AND ADDRESS(ES)<br>KIM, Postbus 10000<br>1780 CA Den Helder                                                                                                  |                                                           |                                                             |
| 14. SUPPLEMENTARY NOTES                                                                                                                                                                    |                                                           |                                                             |
| 15. ABSTRACT (MAXIMUM 200 WORDS (1044 BYTE))<br>No summary was provided                                                                                                                    |                                                           |                                                             |
| 16. DESCRIPTORS<br>Naval Guns<br>Interior Ballistics<br>Propellant Combustion<br>Computerized Simulation<br>Computer Program                                                               |                                                           | IDENTIFIERS<br>Propellant Grains                            |
| 17A. SECURITY CLASSIFICATION<br>(OF REPORT)<br>UNCLASSIFIED                                                                                                                                | 17B. SECURITY CLASSIFICATION<br>(OF PAGE)<br>UNCLASSIFIED | 17C. SECURITY CLASSIFICATION<br>(OF ABSTRACT)<br>-          |
| 18. DISTRIBUTION AVAILABILITY STATEMENT<br>Unlimited distribution                                                                                                                          |                                                           | 17D. SECURITY CLASSIFICATION<br>(OF TITLES)<br>UNCLASSIFIED |

## Distributielijst

- 1 DWOO
- 2 HWO-KL
- 3/4 HWO-KLu
- 5 HWO-KM
- 6/8 KIM
- 9 Commissie van Proefneming  
t.a.v. dhr G. Minholz
- 10/12 TDCK
- 13 Hoofddirecteur DO-TNO
- 14 Lid Instituuts Advies Raad PML  
Prof. dr. F.N. Hooge
- 15 Lid Instituuts Advies Raad PML  
Prof. dr. U.A. Th. Brinkman
- 16 PML-TNO, Directeur; daarna reserve
- 17 PML-TNO, Directeur Programma; daarna reserve
- 18/20 PML-TNO, Secretariaat Divisie 3, Groep 1, 3 exemplaren
- 21 H.J. Reitsma
- 22 P.J.M Elands
- 23/24 Auteur
- 25 PML-TNO, Archief
- 26 PML-TNO, Documentatie