

FFI RAPPORT

UTVIKLING OG TESTING AV SMÅSKALA RAKETTMOTORER FOR YTELSESMÅLINGER

JOHANNESSEN Tom C, OMHOLT Leiv, SKARBØVIK Knut

FFI/RAPPORT-2003/01239

FFIBM/844/131

Godkjent
Kjeller 21. august 2003

Bjarne Haugstad
Forsknings sjef

**UTVIKLING OG TESTING AV SMÅSKALA
RAKETTMOTORER FOR YTELSESMÅLINGER**

JOHANNESSEN Tom C, OMHOLT Leiv, SKARBØVIK
Knut

FFI/RAPPORT-2003/01239

FORSVARETS FORSKNINGSINSTITUTT
Norwegian Defence Research Establishment
Postboks 25, 2027 Kjeller, Norge

FORSVARETS FORSKNING SINSTITUTT (FFI)
Norwegian Defence Research Establishment

UNCLASSIFIED

P O BOX 25
 NO-2027 KJELLER, NORWAY
REPORT DOCUMENTATION PAGE

SECURITY CLASSIFICATION OF THIS PAGE
 (when data entered)

1) PUBL/REPORT NUMBER FFI/RAPPORT-2003/01239 1a) PROJECT REFERENCE FFIBM/844/131	2) SECURITY CLASSIFICATION UNCLASSIFIED 2a) DECLASSIFICATION/DOWNGRADING SCHEDULE -	3) NUMBER OF PAGES 31
4) TITLE UTVIKLING OG TESTING AV SMÅSKALA RAKETTMOTORER FOR YTELSESMÅLINGER Development and testing of small scale rocket motors for performance measurements		
5) NAMES OF AUTHOR(S) IN FULL (surname first) JOHANNESSEN Tom C, OMHOLT Leiv, SKARBØVIK Knut		
6) DISTRIBUTION STATEMENT Approved for public release. Distribution unlimited. (Offentlig tilgjengelig)		
7) INDEXING TERMS IN ENGLISH: IN NORWEGIAN: a) <u>Static firings</u> a) <u>Statiske fyringer</u> b) <u>Small scale rocket motor</u> b) <u>Småskala rakettmotor</u> c) <u>Radial burning grain</u> c) <u>Radieltbrennende ladning</u> d) <u>Thrust measurements</u> d) <u>Skyvkraftmålinger</u> e) <u>Performance</u> e) <u>Ytelse</u>		
THESAURUS REFERENCE: 8) ABSTRACT Equipment consisting of a small scale test-motor and a firing stand has been constructed. During the firing thrust and chamber-pressure were measured simultaneously. The efficiency parameters specific impulse (I_{sp}), characteristic exhaust velocity (c^*) and thrust coefficient (C_T) were calculated from the firing curves. Two different propellant grains, one with a relatively constant burning area and one with a progressive burning area, have been tested together with two propellant compositions with different theoretical performance. It was found that measured and theoretical values were consistent. The accuracy of the results did not depend on the grain category used. The results showed also that it was possible to distinguish between measured I_{sp} from two different propellant compositions, even though the theoretical difference in I_{sp} was only about 1%.		
9) DATE 21. August 2003	AUTHORIZED BY This page only Bjarne Haugstad	POSITION Director of Research

ISBN-82-464-0765-1

UNCLASSIFIED

**SECURITY CLASSIFICATION OF THIS PAGE
(when data entered)**

INNHOOLD

	Side	
1	INNLEDNING	7
2	TEORI	7
2.1	Definisjoner	7
2.2	Karakteristisk hastighet, c^*	9
2.3	Spesifikk impuls, I_{sp}	9
2.4	Skyvkraftkoeffisienten, C_f	11
2.5	Beregning av teoretiske ytelsesverdier	11
3	UTSTYR	12
3.1	Drivstoff	12
3.2	Ladninger	12
3.3	Motorrør	13
3.4	Frontstykke	13
3.5	Endestykke med dyse	14
3.6	Instrumentering	14
3.6.1	Trykkmålecelle	14
3.6.2	Skyvkraftmålecelle	14
3.6.3	Måleforsterkere	14
3.6.4	Dataregistrering	15
3.7	Fyringsfikstur og sammenstilling	15
4	FYRINGER/MÅLINGER	17
5	RESULTATER	18
5.1	Generelt	18
5.2	Fyringskurver	18
5.2.1	LMF-01 og LMF-02	18
5.2.2	LMF-06	19
5.2.3	LMF-05 og LMF-07	20
5.2.4	LMF-08 og LMF-09	22
5.2.5	LMF-12, LMF-13, LMF-14 og LMF-15	23
5.3	Ytelsesverdier	24
6	VURDERING AV RESULTATER OG FEILKILDER	26
6.1	Teoretiske verdier mot målte verdier	26
6.2	Sammenlikning av tilnærmet like fyringer	28
6.3	Sammenlikning av ladningstyper, RB og 2"	28
6.4	Sammenlikning av drivstofftypene A og B	29

7	KONKLUSJON	29
	Litteratur	30
	Fordelingsliste	31

UTVIKLING OG TESTING AV SMÅSKALA RAKETTMOTORER FOR YTELSESMÅLINGER

1 INNLEDNING

Tidligere har det ved FFI blitt utviklet en metode for bestemmelse av brennhastighet som funksjon av trykk, $r(P)$, ut fra en enkelt småskalafyring med progressivt brennende (RB = radielt brennende) overflate, se FFI/NOTAT-2000/00447 (1). Dette har vist seg å være en pålitelig og kjemikaliebesparende metode som med fordel kan benyttes under utviklingen av nye drivstoff.

For å få enda mer ut av hver enkelt fyring ble det etter hvert konstruert og anskaffet utstyr som gjorde det mulig å måle skyvraft og kammertrykk samtidig. Dermed kunne også ytelsesverdier som spesifikk impuls (I_{sp}) og skyvkraftkoeffisient (C_f) bestemmes fra samme fyring. I tillegg økte påliteligheten for hver enkelt fyring i det to måleuavhengige parametere ble bestemt, c^* fra trykkmålinger og I_{sp} fra skyvkraftmålinger.

I litteraturen er ytelsesmålinger fra motorer med nøytralt brennende overflater godt beskrevet (2), mens tilsvarende litteratur for ladninger med progressiv brennflate er mindre tilgjengelig. I vårt utstyr er motoren tilpasset en ladning med ytre dimensjoner 59x108 mm. Det tilsvarer en ordinær 2"-ladning. Derfor kan også slike ladninger, med tilnærmet nøytral brennflate, benyttes i samme utstyr. Det ble derfor også mulig å sammenlikne resultater fra de to ladningstypene.

Utvikling og testing av dette utstyret ble utført i prosjekt 844-02 (Neste generasjon rakettmotorer). Testene ble utført på to nært beslektede drivstoffkomposisjoner utviklet i prosjekt 798-05 (Panserbekjempelse 2000+). Detaljer om disse drivstoffene vil bli beskrevet i egne rapporter.

Samtlige deler, bortsett fra motorrøret som kun er noe modifisert, er konstruert ved FFIBM og produsert ved FFIFV. Drivstoffet og ladningene er produsert ved FFIBM.

2 TEORI

2.1 Definisjoner

I følge (3) er definisjonene for spesifikk impuls (I_{sp}) og skyvkraftkoeffisient (C_f) gitt av likningene (2.1) og (2.2). Karakteristisk hastighet (c^*) er i følge (2) gitt av likning (2.3).

$$\text{Spesifikk impuls } I_{sp} = \frac{F}{\dot{m}} \quad (\text{Ns/kg) eller (m/s),} \quad (2.1)$$

hvor F er skyvkraft (N) og \dot{m} er massestrøm (kg/s).

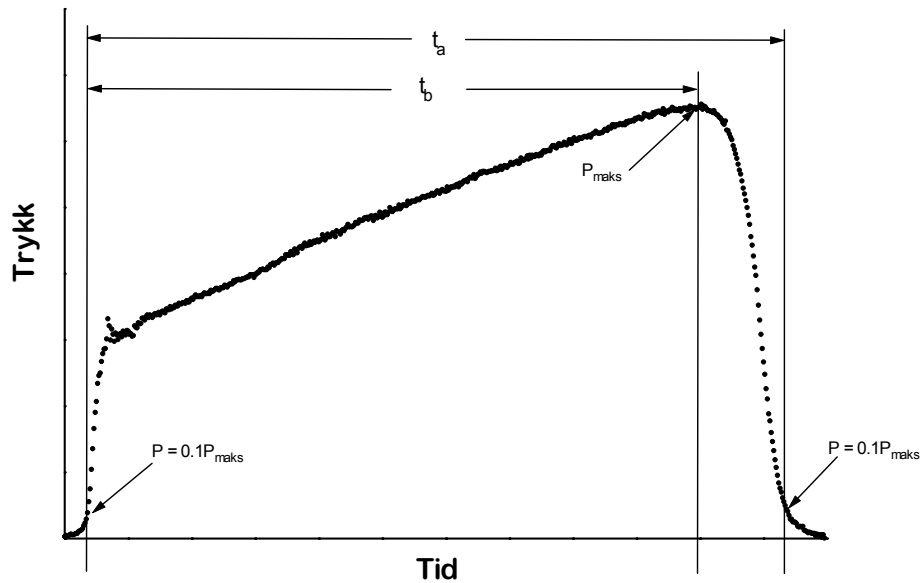
$$\text{Skyvkraftkoeffisienten } C_f = \frac{F}{P_c A_t} \quad (2.2)$$

$$\text{Karakteristisk hastighet } c^* = \frac{P_c A_t}{\dot{m}} \quad (\text{m/s}), \quad (2.3)$$

hvor P_c er kammertrykket (N/m²) og A_t er dysehalsens tverrsnittsareal (m²).

Under en fyring registreres kammertrykk, P_c , og skyvkraft, F , som funksjon av tiden. Trykkkurven benyttes som utgangspunkt for å definere fyringens aksjonstid, t_a , og fyringens brenntid, t_b . Begge starter i punktet hvor P_c passerer 10% av maksimaltrykket på vei oppover. Aksjonstiden ender når P_c passerer 10% av maksimaltrykket på vei nedover. Brenntiden ender der trykkkurven begynner å falle mot null, dvs der man antar at ladningen er utbrent. Tidsintervallene er tegnet inn i en fyringskurve i figur 2.1. En fyrings gjennomsnittlige kammertrykk, $P_{c,snitt}$, beregnes i følge likning (2.4).

$$P_{c,snitt} = \frac{\int P_c dt_b}{t_b} \quad (2.4)$$



Figur 2.1 Fyringskurve som definerer tidsintervallene t_a og t_b .

2.2 Karakteristisk hastighet, c^*

Karakteristisk hastighet er definert i følge likning (2.3) som også kan skrives som likning (2.5).

$$m = \frac{P_c A_t}{c^*} \quad (2.5)$$

Karakteristisk hastighet er tilnærmet uavhengig av motorens kammertrykk og dysens geometri. Med god tilnærming kan man si at c^* kun er avhengig av drivstoffets sammensetning. Dette gjør c^* til en svært viktig ytelsesparameter. Det er vanlig å regne c^* som konstant under en fyring. Fra fyringskurven regnes karakteristisk hastighet ut etter likning (2.6).

$$c^*_{\text{målt}} = \frac{A_t \int P_c dt_a}{m_t}, \quad (2.6)$$

hvor m_t er total drivstoffmasse (kg), mens c^* har fått betegnelsen $c^*_{\text{målt}}$ fordi den er beregnet fra en fyringskurve.

2.3 Spesifikk impuls, I_{sp}

Skyvkraften (F) kan deles i to komponenter og skrives som likning (2.7)

$$F = m v_e + (P_e - P_a) A_e, \quad (2.7)$$

hvor

v_e – gassens hastighet i dysens utløpsplan, (m/s)

P_e – statisk trykk i dysens utløpsplan, (N/m²)

P_a – atmosfæretrykket, (N/m²)

A_e – dysens tverrsnittsareal i utløpet, (m²)

Det første leddet er hastighetsbidraget fra gassen som strømmer ut av dysen. Det andre leddet er bidraget fra trykkforskjellen mellom dysens utløpsplan og atmosfæretrykket.

Sammenhengen mellom I_{sp} og F er gitt av definisjonen i likning (2.1). Derfor kan også uttrykket for I_{sp} skrives på tilsvarende måte med ett hastighetsbidrag og ett trykklidrag, likning (2.8).

$$I_{sp} = v_e + \frac{P_e - P_a}{m} A_e \quad (2.8)$$

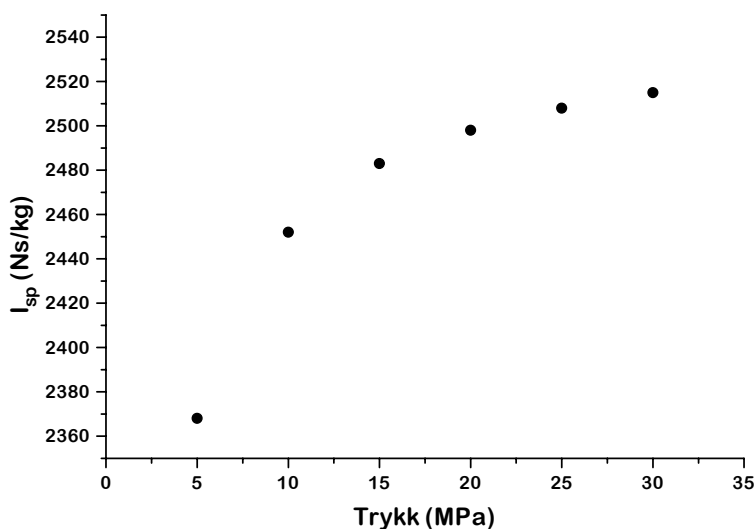
Ved å sette inn fra likning (2.5) oppnås likning (2.9)

$$I_{sp} = v_e + \frac{P_e - P_a}{P_c} c * \varepsilon, \quad (2.9)$$

Hvor ekspansjonsforholdet, ε , er gitt i likning (2.10).

$$\varepsilon = \frac{A_e}{A_t} \quad (2.10)$$

I figur 2.2 ser man hvordan I_{sp} vil øke med kammertrykket i en tenkt motor. Dysens geometri forutsettes konstant. Økningen skyldes kun bidraget fra siste ledd i likning (2.9).



Figur 2.2 Teoretisk beregning som viser hvordan spesifikk impuls øker med trykket.

Den tradisjonelle måten å beregne I_{sp} på tar utgangspunkt i definisjonen (2.1) og man må da basere seg på gjennomsnittsverdier for skyvkraft og massestrøm. Dersom ladningen har en nøytral brennflate, slik at trykket holder seg tilnærmet konstant under hele fyringsforløpet, blir dette en god tilnærming. Ytelsesmålinger for ladninger med tilnærmet nøytral brennflate og masse ca 2 kg, er tidligere utført ved FFI og beskrevet i FFI/NOTAT-92/4032 (4).

Ved fyringer av ladninger hvor trykket og skyvkraften varierer i løpet av fyringen vil tilnærmingen være forbundet med større usikkerhet. Man bør i stedet benytte likning (2.11).

$$I_{sp,m\ddot{a}lt} = \frac{\int F dt_a}{m_t}, \quad (2.11)$$

Her har I_{sp} har fått betegnelsen $I_{sp,m\ddot{a}lt}$ fordi den er beregnet fra en fyringskurve.

Uavhengig av ladningstype er det viktig at man har undereksponasjon ($P_e > P_a$) under hele forløpet. Dette for å unngå at gassen slipper dyseveggen for tidlig uten å benytte dysens fulle ekspansjonsforhold.

2.4 Skyvkraftkoeffisienten, C_f

Skyvkraftkoeffisienten er definert i følge likning (2.2). Uttrykket for C_f kan deles i to ledd tilsvarende som for I_{sp} og man får uttrykket vist i likning (2.12).

$$C_f = \frac{v_e}{c^*} + \frac{P_e - P_a}{P_c} \varepsilon \quad (2.12)$$

Sammenhengen mellom de tre ytelsesverdiene følger av likningene (2.1) og (2.3) og er gitt i likning (2.13).

$$I_{sp} = c^* C_f \quad (2.13)$$

Eksperimentelt kan skyvkraftkoeffisienten bestemmes fra en fyring ved å benytte sammenhørende punkter for F og P_c . C_f beregnes da som gjennomsnitt av mange punkter under fyringen, se likning (2.14). Dysehalstverrsnittet, A_t , antas konstant under forløpet. Kun verdiene for F og P_c fra den stabile fasen i fyringen benyttes i beregningen.

$$C_{f,m\ddot{a}lt} = \frac{1}{1 + m - n} \sum^n \frac{F_i}{(P_c)_i A_t} \quad (2.14)$$

Her har C_f fått betegnelsen $C_{f,m\ddot{a}lt}$ fordi den er beregnet fra fyringskurvene.

2.5 Beregning av teoretiske ytelsesverdier

Teoretisk beregning av ytelsesverdiene I_{sp} , c^* og C_f foretas med programmet NASA SP-273 (5). Programmet benytter drivstoffsammensetning, kammertrykk og ekspansjonsforhold som inndata. To beregningsmodeller kan anvendes, en hvor full likevekt oppnås gjennom dysen, og

en hvor gass-sammensetningen ikke forandrer seg etter kammeret (frossen sammensetning). Programmet beregner blant annet størrelsene P_e , v_e og c^* . Fra disse verdiene kan I_{sp} beregnes fra likning (2.9) og C_f fra likning (2.12). Den tenkte dysen er ideell, dvs ingen tap, og gass-strømmen er parallell med dyseaksen. Man kan korrigere for at gass-strømmen ikke er parallell med dyseaksen under målingene ved å multiplisere I_{sp} og C_f med en faktor λ , gitt i likning (2.15).

$$\lambda = \frac{1}{2}(1 + \cos \alpha), \quad (2.15)$$

hvor α er dysens halveringsvinkel.

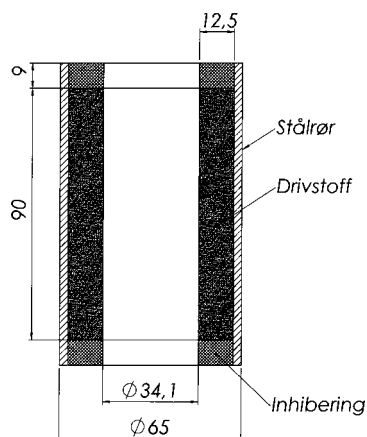
3 UTSTYR

3.1 Drivstoff

Under testene ble det benyttet to typer drivstoff som i denne rapporten er gitt betegnelsene A og B. Sammensetningen ble valgt slik at teoretisk ytelse var innbyrdes lik for alle A blandingene og tilsvarende for alle B blandingene, mens brennhastighet og andre egenskaper varierte noe innbyrdes, altså fra A1 til A2 osv.

3.2 Ladninger

Ladningene bestod av herdet rakettdrivstoff støpt i sandblåste stålrør. To ladningstyper ble benyttet. Ladningstypen som ga tilnærmet nøytral brennflate var en 2"-ladning. Den andre ladningstypen, som er vist i figur 3.1 og betegnes RB-ladning, ga en progressiv brennflate. Den var basert på en 2"-ladning som var forkortet 9 mm i hver ende for å gi plass til inhibering. Inhiberingen, som ble utviklet spesielt for dette formålet, bestod av HTPE herdet med en tri-isocyanat. Inhiberingen ble mikset for hånd og herdet i løpet av 24 timer ved 20°C. Sammensetningen er gitt i tabell 3.1.



Figur 3.1 Snitt og skisse av inhibert RB- ladning.

Tabell 3.1 Inhiberingens sammensetning

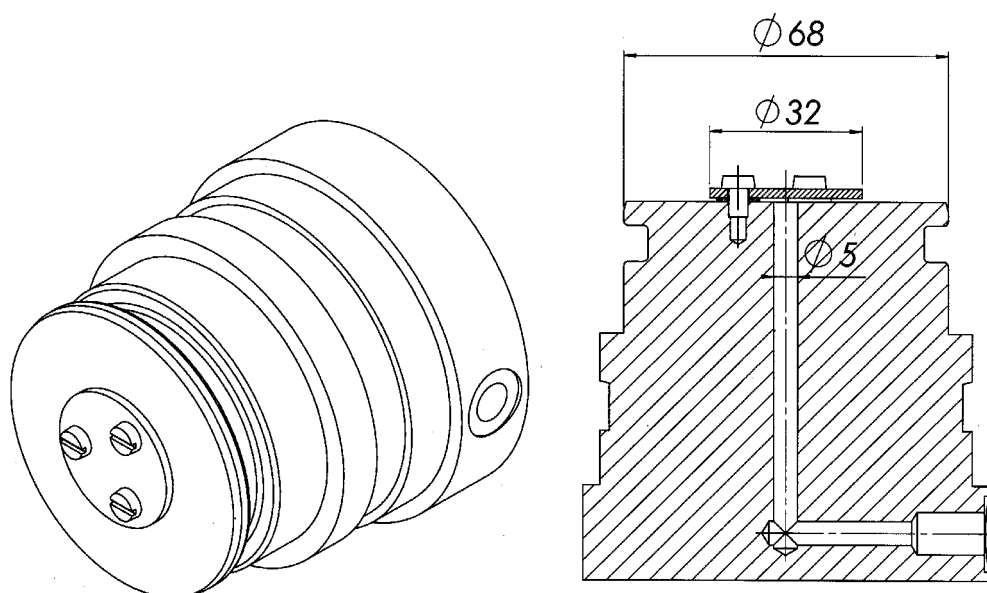
Ingrediens	Vekt %
HPE	86.13
C-black	2.00
DBTDL	100 ppm
DN100	11.87

3.3 Motorrør

Motorrøret var i rustfritt stål og identisk med røret for en ordinær 2"-motor. I røret ble det boret hull til seks ekstra bruddbolter slik at endestykket med dysen kunne festes med tolv bruddbolter. Tolv bruddbolter vil kunne motstå et kammertrykk på ca 60 MPa. Motorrøret er vist blant annet i figur 3.6.

3.4 Frontstykke

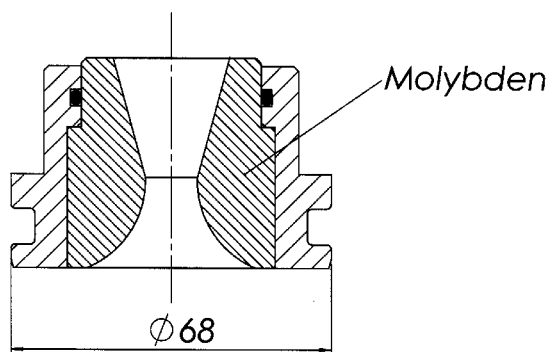
Fronstykket ble laget i stål med brunert (Fe_3O_4 belagt) overflate. Det var forsynt med en o-ring som tettet motorrøret i forkant. En låsering bestående av to klammer, festet fronstykket og motorrøret sammen. Under fyringen sørget fronstykket for godt anlegg mot skyvkraftmålecellen. Trykkuttak-kanalen for kammertrykk (P_c) gikk gjennom fronstykket og endte i et gjenget område hvor målecellen kunne festes. I enden av kanalen som pekte inn i motoren, var åpningen dekket av en tynn stålskive (syrefast stål) med 0,8 mm klaring. Stålskiven hadde en "pipehatteffekt". Det vil si at gassen ble tvunget til å passere på undersiden av stålskiven før den entret kanalen. Hensikten med "pipehatten" er nærmere forklart i kapittel 5.2.2. Detaljer av frontstykket er vist i figur 3.2.



Figur 3.2 Fronstykke med "pipehatt". På skissen til høyre ser man kanalen for uttak av kammertrykk (P_c).

3.5 Endestykke med dyse

Endestykket ble laget i stål og dysen i molybden. Endestykket ble klemt inn i motorørets bakkant og holdt på plass av en bruddboltring festet med gjennomgående bruddbolter. O-ringer sørget for tetting mellom motorrør - endestykke og endestykke - dyse. Detaljert skisse er vist figur 3.3. I figur 3.6 kan man blant annet se endestykke og dyse, og i figur 3.8 kan man se motor med dysen montert. Samtlige dyser var koniske med halveringsvinkel $\alpha = 15^\circ$ og med et ekspansjonsforhold på 5,0.



Figur 3.3 Endestykke av stål med molybdendyse montert.

3.6 Instrumentering

Instrumenteringen bestod av en trykkmålecelle, en skyvkraftmålecelle, to måleforsterkere og en PC med et innebygd dataregistreringssystem.

3.6.1 Trykkmålecelle

Det ble benyttet en resistiv trykkmåleceller for måleområde 0 til 50 MPa. Trykkmålecellen var strekklappbasert med Wheatstone brokobling. Den hadde en følsomhet på 2 mV/V, en egenfrekvens over 100 kHz og nøyaktighetsklassen var 0,1. Trykkmålecellens, som var produsert av HBM (Hottinger Baldwin Messtechnik), hadde typebetegnelsen P3MB.

3.6.2 Skyvkraftmålecelle

Skyvkraftmålecellen hadde et måleområde på 0 til 10 kN. Denne var også resistiv og strekklappbasert.

Den hadde en følsomhet på 2 mV/V, en egenfrekvens på 19,3 kHz og nøyaktighetsklassen var 0,1. Målecellens typebetegnelse var C2, og også den va produsert av HBM.

3.6.3 Måleforsterkere

Det ble benyttet et måleforsterkersystem, bestående av ME10 måleforsterkere fra HBM. Dette er 10 kHz DC-måleforsterkere for strekklappbaserte måleceller.

3.6.4 Dataregistrering

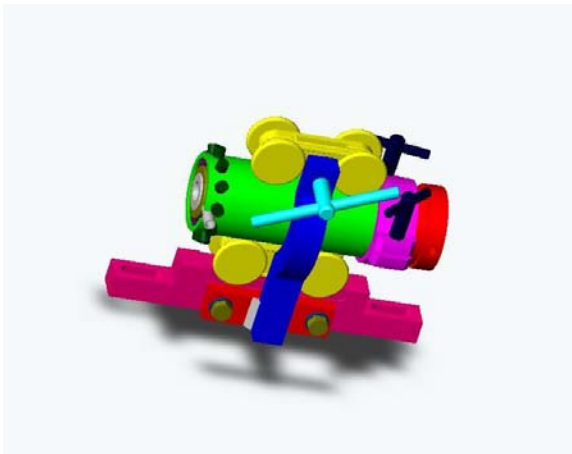
Signalene fra måleforsterkerne ble digitalisert, registrert og bearbeidet i et PC-basert dataregistreringssystem med typebetegnelsen COMPUTERSCOPE ISC-67.

Dataregistreringssystemet har en analog til digital omformer med en oppløsning på 12 bit og minste tidsintervall mellom datasamplingene er $1\mu\text{s}$. Ved firingene beskrevet i denne rapporten ble datasamplingen foretatt hvert $500\mu\text{s}$.

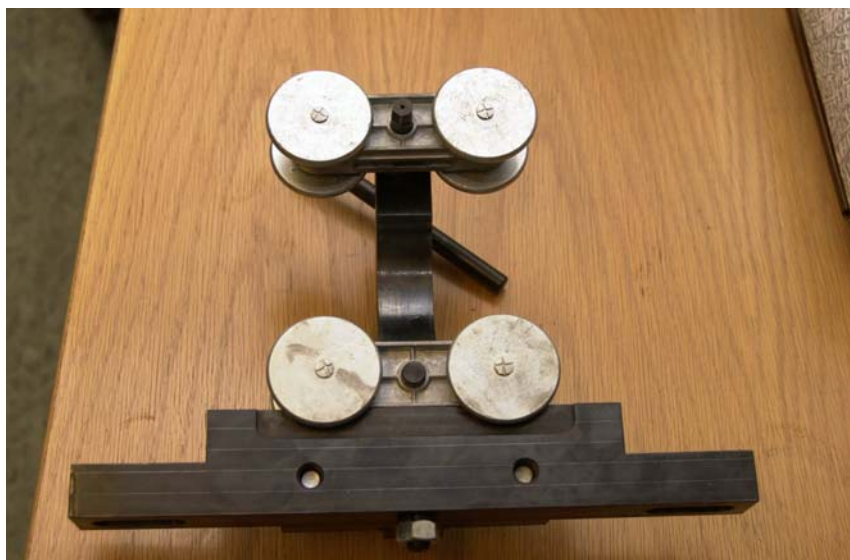
Registrerte måledata ble lagret i ASCII-datafiler, for å forenkle overføring av data til andre programmer, for videre beregning og analyse.

3.7 Fyringsfikstur og sammenstilling

Innretningen som holdt motoren på plass under firingen kalles fyringsfikstur. Under firingen måtte motoren kunne bevege seg fritt i aksial retning. Det var viktig at friksjonen mellom motor og fyringsfikstur var svært lav. Motoren hvilte derfor på ett hjulsett bestående av fire stålhjul (ruller), og samtidig presset et tilsvarende hjulsett ned mot motoren ovenfra. De to hjulsettene skulle hindre all bevegelse i uønskede retninger, forutsatt at kreftene ikke ble for store. Skisse av fyringsfikstur med motor på plass er vist i figur 3.4.



Figur 3.4 Fyringsfikstur med motor montert. På skissen er hjulsettene gule og motorrøret grønt. Bakerst på motorrøret kan man se noen av bruddboltene.

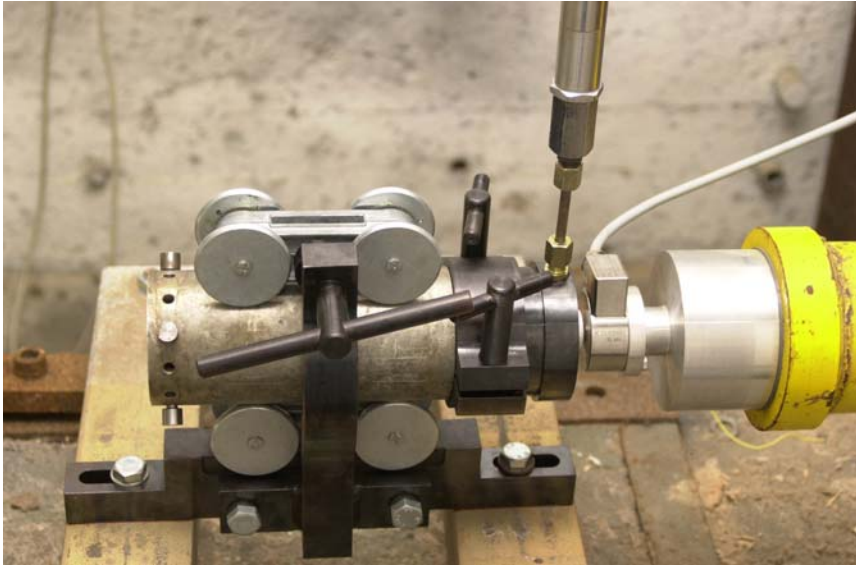


Figur 3.5 *Fotografi av fyringsfiksaturen.*

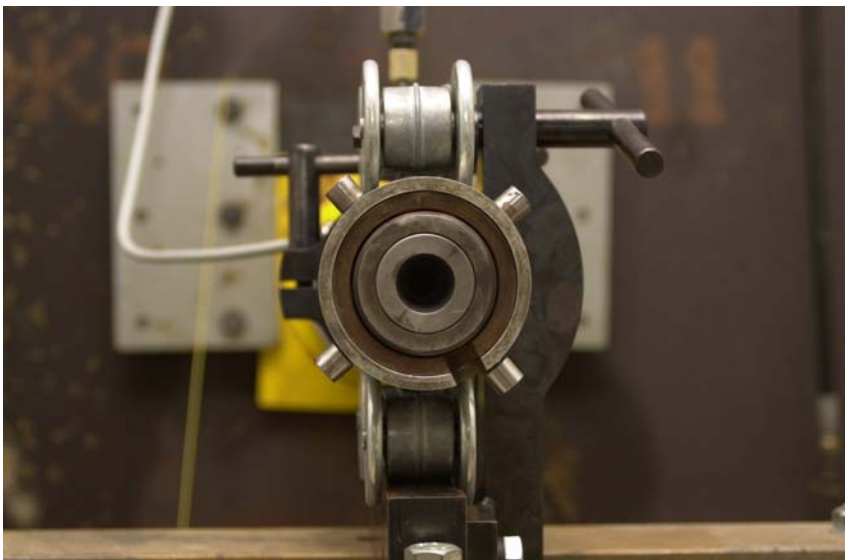
Fyringsfiksaturen ble festet ved hjelp av to solide bolter til underlaget på fyringsrampa. I fyringsfiksaturen lå motoren an mot skyvkraftcellen i forkant. Forbindelsen mellom motoren og skyvkraftcellen var elektrisk isolert ved hjelp av en plastskive. Skyvkraftcellen var igjen festet til en horisontal veggmontert stålsylinder. Motoren ble montert slik at trykkmålecellen ble stående vertikalt. Fotografi av fyringsfiksaturen separat er vist i figur 3.5. Motor i fyringsfiksatur er vist i figurene 3.7 og 3.8.



Figur 3.6 *Motoren i de enkelte bestanddeler. Fra venstre: Frontstykke, låsering, motorrør, endestykke, bruddboltring og dyse.*



Figur 3.7 Motor i fyringsfiksatur. Trykkmålecellen for kammertrykket er plassert vertikalt i enden av et kort rør fra motorens frontstykke. Til høyre for frontstykket er skyvkraftmålecellen plassert.



Figur 3.8 Motor i fyringsfiksatur sett rett bakfra. De forskjellige ringene som synes er følgende fra ytterst: motorrør, bruddboltring, endestykke og dyse.

4 FYRINGER/MÅLINGER

Montering av motoren startet med å feste dyse og endestykke med bruddbolter. Deretter ble tennladningen festet fremst i drivstoffladningens midtløp ved hjelp av tape. Tennladningen bestod av ett gram bor-kaliumnitrat i en liten papirpose forsynt med et elektrisk tennhode. Ledningene ble ført gjennom dysen. Ladningen ble sluppet forsiktig ned i motorrøret fra fremre ende før fronstykket ble klemt på plass og festet med låseringen.

Den ferdig monterte motoren ble så montert i fyringsfiksaturen. Skyvkraftcellen måtte være på

plass før motoren ble satt på plass i fiksturen, mens trykkmålecellen ble montert etterpå. Et lite lodd ble hengt på motoren før fyring for å trekke den mot skyvkraftmålecellen og sikre kontakt. Dette var viktig for å unngå kraftig sammenstøt med motor og målecelle etter tenning, og for å redusere svingninger i skyvkraftkurvens første del. Skyvkraftcellen ble nullstilt før fyring. Tennladningen ble satt av elektrisk. Under fyringene ble skyvkraft og kammertrykk registrert.

Motoren og spesielt ladingrøret ble nøye inspisert etter hver fyring. Dysehalsdiameter ble målt før og etter hver fyring. Rådataene framkom som kolonner med spenningsverdier for hver enkelt målecelle. Videre bearbeiding av dataene foregikk ved hjelp av Microsoft Excel regneark.

5 RESULTATER

5.1 Generelt

I denne rapporten er resultatene fra 11 fyringer tatt med, se tabell 5.1. Fyringene med A1 ble gjort primært for å teste utstyret. For de resterende fyringene var hensikten primært å teste drivstoffets ballistiske egenskaper, men samtidig ble ytelsen målt. Kun resultater som vedrører ytelsen omtales her.

Tabell 5.1 Oversikt over fyringer som omtales i denne rapporten.

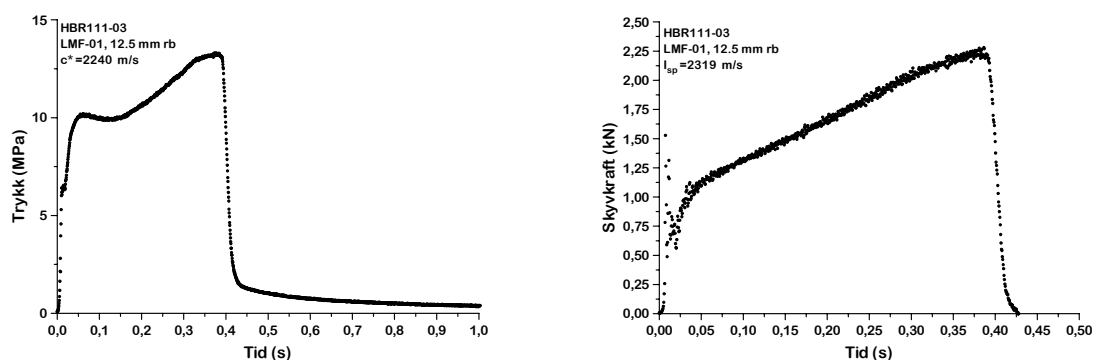
Fyring nr	Drivstoff	Ladningstype	Drivstoffmasse (kg)	Dysehalsdiameter (mm)
LMF-01	A1	RB	0,28396	13,00
LMF-02	A1	RB	0,28255	13,00
LMF-05	A1	2"	0,34430	12,00
LMF-06	A1	RB	0,28585	13,00
LMF-07	A1	2"	0,34255	10,11
LMF-08	A2	RB	0,28517	12,00
LMF-09	A3	RB	0,28374	12,00
LMF-12	B1	RB	0,28742	11,50
LMF-13	B1	RB	0,28781	10,99
LMF-14	B2	RB	0,28781	10,96
LMF-15	B2	RB	0,28448	10,28

5.2 Fyringskurver

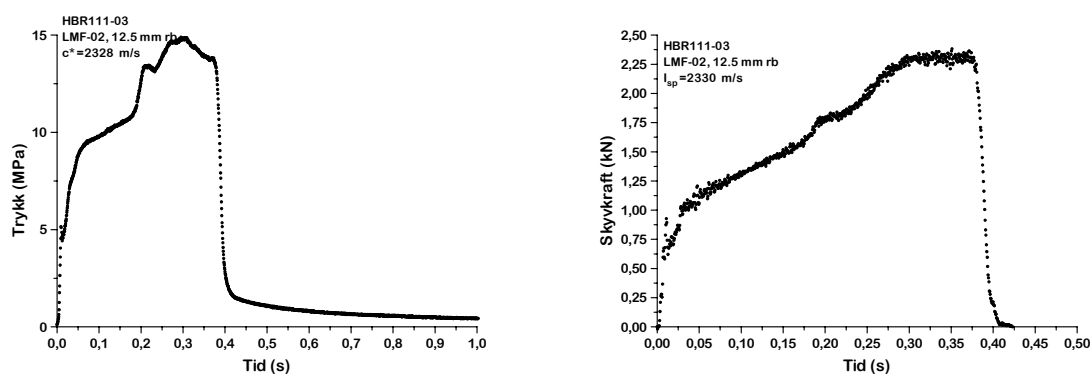
5.2.1 LMF-01 og LMF-02

Dette var de to første fyringene som ble foretatt. Ladningene var av typen RB og var forventet å gi en progressiv brennflate. Fyringskurvene trykk - tid og skyvkraft - tid er vist i figurene 5.1 og

5.2.



Figur 5.1 Fyringskurver for LMF-01: Trykk - tid (venstre) og skyvkraft – tid.



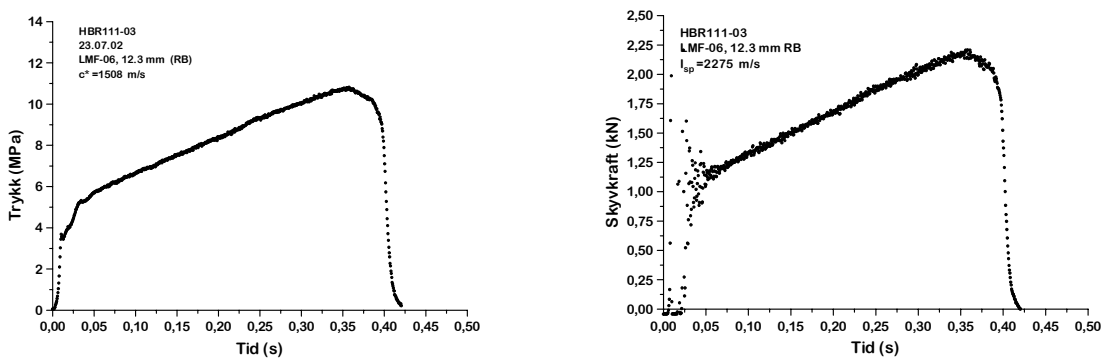
Figur 5.2 Fyringskurver for LMF-02: Trykk - tid (venstre) og skyvkraft – tid.

Av figurene 5.1 og 5.2 ser man at det er dårlig samstemmighet mellom trykk- og skyvkraftkurvene. Trykkkurvene har store avvik fra forventet form. Integralene for de to trykkkurvene er betydelig høyere enn forventet og gir en c^* på 2240 m/s og 2328 m/s, mens teoretisk verdi er på ca 1520 m/s. Samme dyse ble benyttet i begge firingene. Etter at firing LMF-01 var foretatt ble trykk-kanalen i motorens framstykke boret opp fra 3 til 5 mm. Som vi ser av figur 5.2 forbedret dette ikke trykkmålingen. Skyvkraftmålingene i begge firingene så derimot ut til å gi pålitelige resultater til beregning av I_{sp} . Skyvkraftkurven for firing LMF-02 er litt ujevn, noe som kan forklares med ujevnheter i brennflaten under firingen. Ujevnheterne i skyvkraftkurvene har trolig liten påvirkning på I_{sp} . Siden skyvkraftmålingene ble som forventet kan man gå ut fra at det ikke var noen feil på ladningen eller motoren, men kun på trykkmålingen alene.

5.2.2 LMF-06

LMF-06 var den første vellykkede trykkmålingen som ble foretatt på en RB-ladning med dette utstyret. Nå hadde frontstykket blitt modifisert med ”pipehatt”, som beskrevet i kapittel 3.4. Dessuten hadde trykkanalen i målecellen blitt fylt med fett for å beskytte målecellen direkte mot varm gass og stråling under firingen.

Hypotesen som førte til at frontstykkets trykkuttak ble forsynt med ”pipehatt”, var at det kunne være uheldig å ha trykkuttaket plassert på senterlinja hvor det muligens kunne oppstå symmetrieffekter som forårsaket lokale trykktopper under forbrenningen. Under tidligere fyringer, ved bruk av fikstur hvor trykkuttaket var plassert ca 20 mm til siden for senterlinja, har tilsvarende problem aldri blitt observert. Ved å benytte ”pipehatt” oppnådde man at nydannede gasspartiklene fra den brennende overflaten ”kolliderte” langs senterlinja på utsiden av ”pipehatten”, for deretter å strømme relativt rolig inn i kanalen fra undersiden. Fyringskurvene for LMF-06 er vist i figur 5.3.



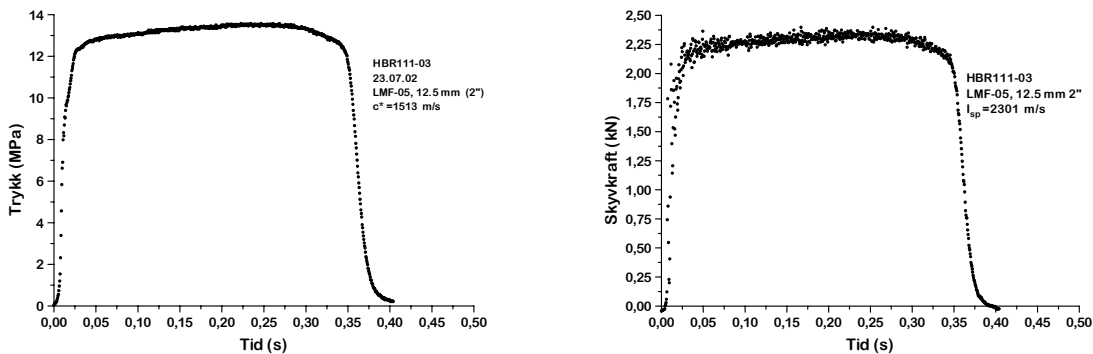
Figur 5.3 Fyringskurver for LMF-06: Trykk - tid (venstre) og skyvkraft – tid.

Man ser her at trykkurven har fått tilnærmet samme form som skyvkraftkurven. Trykk-tid integralet ga $c^* = 1506$ m/s som stemte godt overens med teoretisk beregnet verdi.

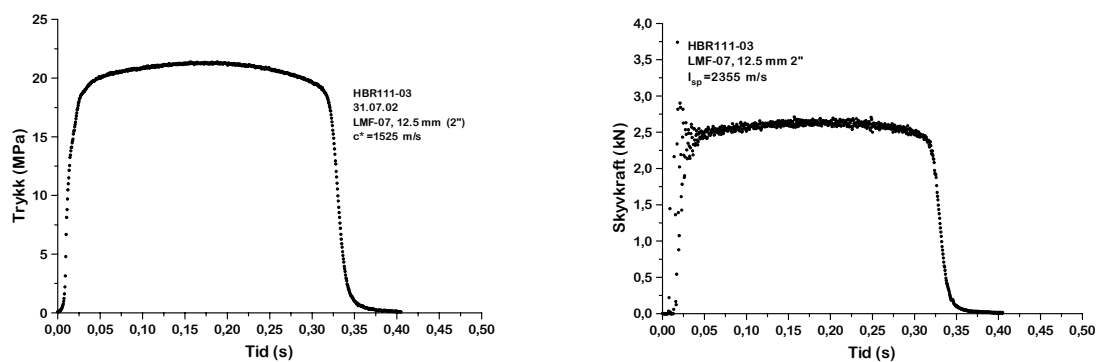
Skyvkraftkurven har store svingninger i starten, og det medfører noe usikkerhet i bestemmelsen av I_{sp} . Svingningene skyldes trolig at motoren ikke var helt i kontakt med skyvkraftmålecellen i tenningsøyeblikket.

5.2.3 LMF-05 og LMF-07

I disse to fyringene ble det brukt ordinære 2"- ladninger, og tilnærmet nøytrale fyringskurver var forventet. Fyringskurvene er vist i figurene 5.4 og 5.5.



Figur 5.4 Fyringskurver for LMF-05: Trykk - tid (venstre) og skyvkraft – tid.

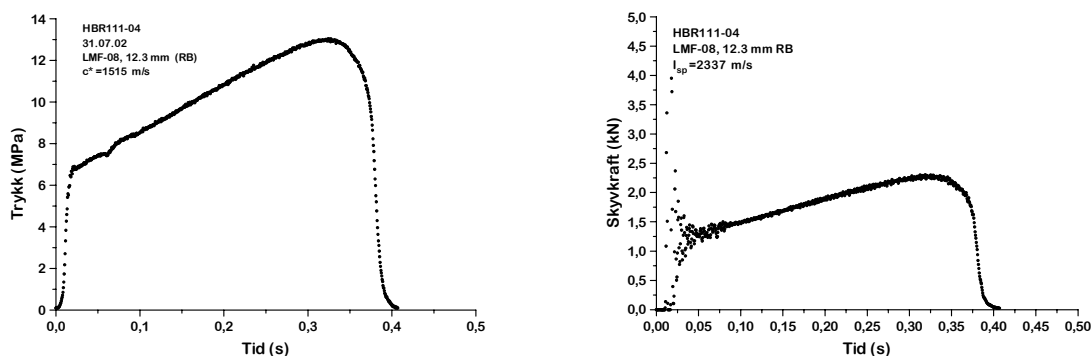


Figur 5.5 Fyringskurver for LMF-07: Trykk - tid (venstre) og skyvkraft – tid.

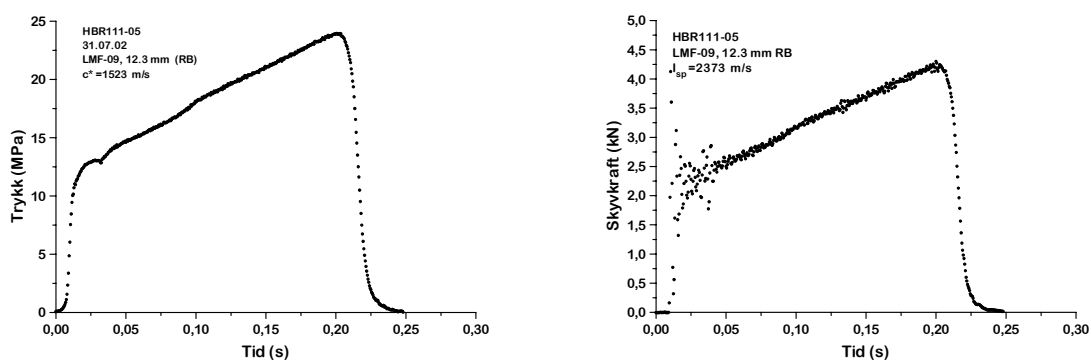
Kurvene ser bra ut bortsett fra litt svingninger i starten på skyvkraftkurvene.

5.2.4 LMF-08 og LMF-09

Begge firingene var av motorer med RB ladninger. Drivstoffsammensetningen var nå noe forandret fra tidligere firinger for å oppnå forandringer i ballistiske egenskaper, jfr brennhastighet og trykkekspont, mens teoretiske ytelsesverdier var uforandret. Fyringskurvene er vist i figurene 5.6 og 5.7.



Figur 5.6 Fyringskurver for LMF-08: Trykk - tid (venstre) og skyvkraft – tid.

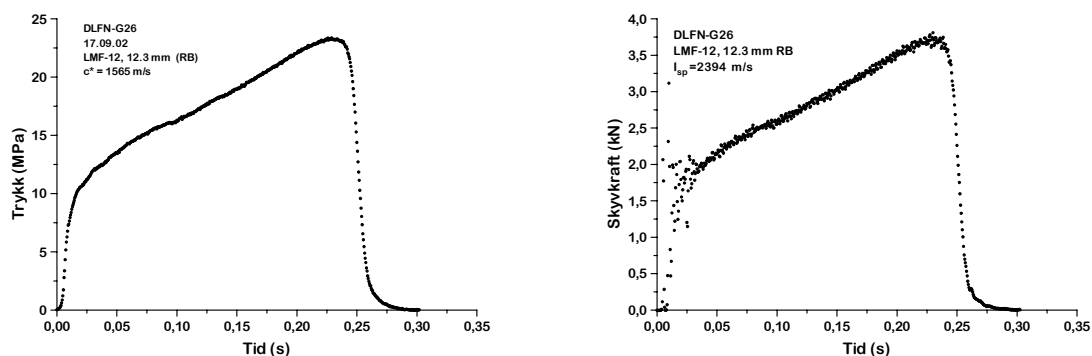


Figur 5.7 Fyringskurver for LMF-09: Trykk - tid (venstre) og skyvkraft – tid.

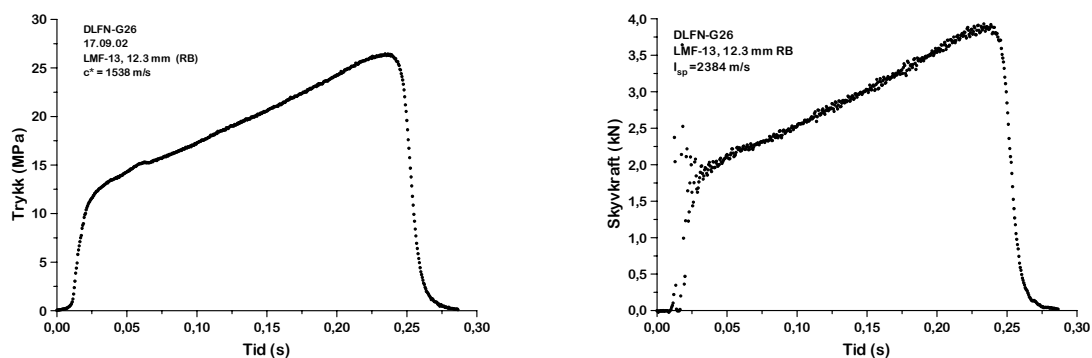
Kurvene er brukbare, men med et noe langsomt tønningsforløp for LMF-08. Det langsomme tønningsforløpet skyldes sannsynligvis ujevn brennflate og burde ikke ha noen betydning for bestemmelsen av ytelsesverdiene. Skyvkraftkurvene for begge firingene svinger mye i starten, noe som kan forklares med at det ble benyttet for lite kraft for å trekke motoren inntil skyvkraftmålecellen før firing.

5.2.5 LMF-12, LMF-13, LMF-14 og LMF-15

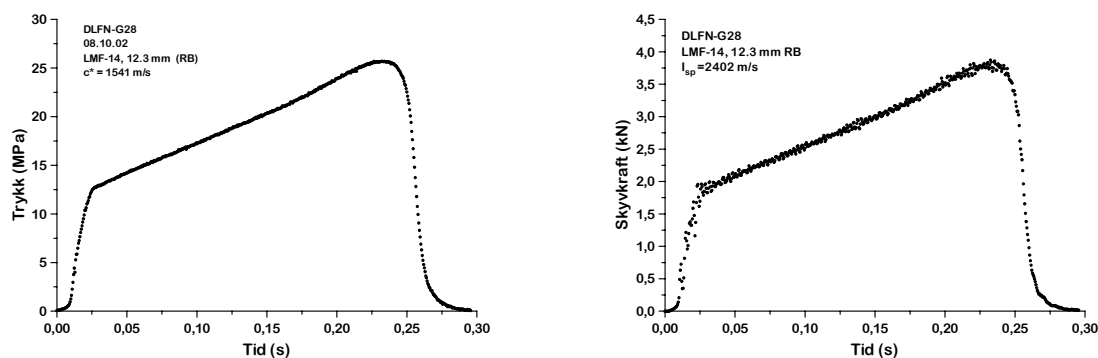
Disse ladningene bestod av drivstoffblanding B med noe høyere tetthet og I_{sp} . Ladningene var av typen RB. Fyringskurvene er vist i figur 5.8 til og med figur 5.11



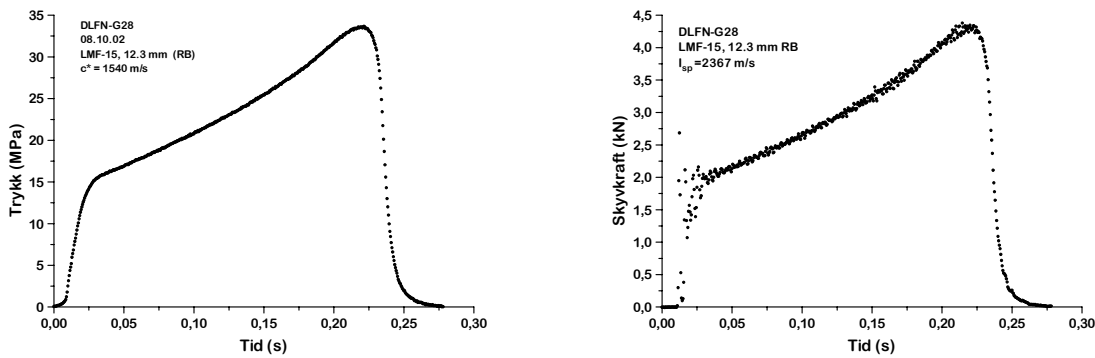
Figur 5.8 Fyringskurver for LMF-12: Trykk - tid (venstre) og skyvkraft – tid.



Figur 5.9 Fyringskurver for LMF-13: Trykk - tid (venstre) og skyvkraft – tid.



Figur 5.10 Fyringskurver for LMF-14: Trykk - tid (venstre) og skyvkraft – tid.



Figur 5.11 Fyringskurver for LMF-15: Trykk - tid (venstre) og skyvkraft – tid.

Samtlige kurver ser bra ut og burde gi et godt utgangspunkt for beregning av ytelsesverdiene.

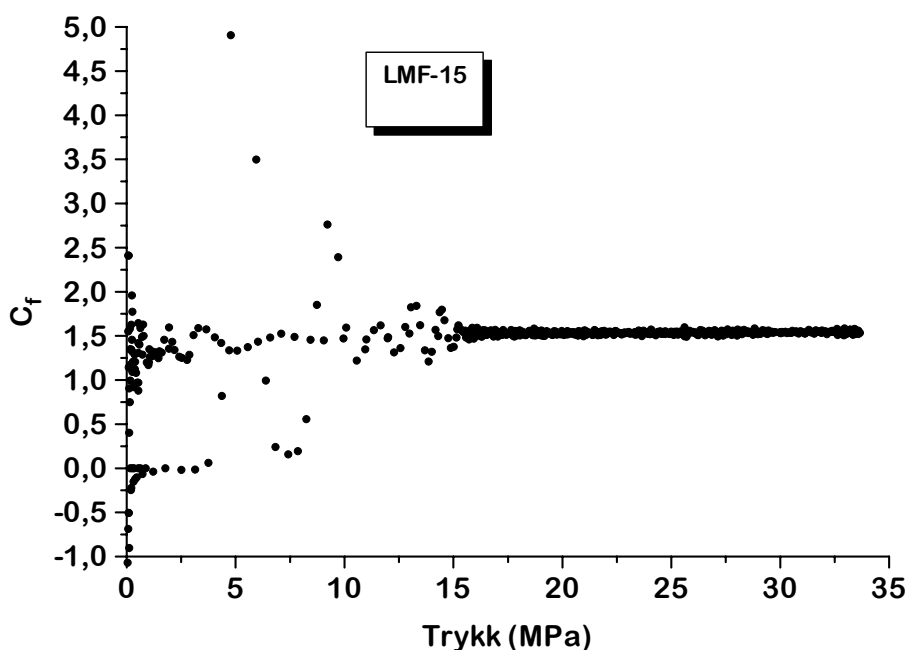
5.3 Ytelsesverdier

Fyringskurvene benyttes til å beregne integralene for trykk og skyvkraft som inngår i likningene (2.6) og (2.11). Maksimaltrykket avleses direkte, og tidene t_a og t_b finnes fra trykkkurven som definert i figur 2.1. Verdiene er gjengitt i tabell 5.2. Ytelsesverdiene, c^* , I_{sp} og C_f blir beregnet etter henholdsvis likningene (2.6), (2.11) og (2.14) som beskrevet i kapittel 2. Verdiene er vist i tabell 5.3.

Tabell 5.2 Avleste og beregnede verdier fra fyringskurvene.

Fyring nr	Drivstoff	Ladning	t_a (s)	t_b (s)	$P_{c,snitt}$ (MPa)	$P_{c,maks}$ (MPa)	$\int P_c dt_a$ (MPa s)	$\int F dt_a$ (N s)
LMF-01	A1	RB	0,405	0,381	-	-	-	656,84
LMF-02	A1	RB	0,393	0,372	-	-	-	658,34
LMF-05	A1	2"	0,369	0,350	12,9	13,6	4,6048	792,14
LMF-06	A1	RB	0,401	0,307	9,6	10,8	3,2471	650,35
LMF-07	A1	2"	0,334	0,302	20,2	21,4	6,5066	806,85
LMF-08	A2	RB	0,380	0,319	10,0	13	3,8192	666,34
LMF-09	A3	RB	0,215	0,193	16,9	23,9	3,8218	673,19
LMF-12	B1	RB	0,256	0,224	17,0	23,3	4,3304	687,96
LMF-13	B1	RB	0,250	0,223	19,0	26,3	4,6716	686,22
LMF-14	B2	RB	0,254	0,221	17,2	25,7	4,7000	691,42
LMF-15	B2	RB	0,234	0,209	22,6	33,6	5,2797	673,22

Ved å plote C_f mot P_c vil man oppnå en rett linje med svak stigning i trykkområdet med stabil tilstand. Ved lavere trykk, tilsvarende fyringens tenning- og tømningforløp, blir det stor spredning i punktene. Plott av C_f mot P_c for fyring LMF-15 er tatt med som eksempel, figur 5.12.



Figur 5.12 C_f plottet mot P_c for fyring LMF-15. Man ser at stabil tilstand for denne fyringen begynner ved ca 15 MPa.

Tabell 5.3 Ytelsesverdier beregnet ut fra fyringene.

Fyring nr	Drivstoff	Ladning	c_m^* (m/s)	I_{sp} (Ns/kg)	C_f	$C_f c^*$
LMF-01	A1	RB	-	2313	-	-
LMF-02	A1	RB	-	2330	-	-
LMF-05	A1	2"	1513	2301	1,527	2310
LMF-06	A1	RB	1508	2275	1,510	2277
LMF-07	A1	2"	1529	2355	1,546	2364
LMF-08	A2	RB	1515	2337	1,540	2333
LMF-09	A3	RB	1523	2373	1,555	2368
LMF-12	B1	RB	1565	2394	1,531	2396
LMF-13	B1	RB	1538	2384	1,541	2370
LMF-14	B2	RB	1541	2402	1,561	2406
LMF-15	B2	RB	1540	2367	1,534	2362

I følge teorien skal $I_{sp} = C_f c^*$. Det lille avviket som man kan se fra tabell 5.3 oppstod under beregningen av de to størrelsene. C_f ble beregnet fra den delen av fyringskurvene hvor stabil tilstand forekom, altså fra et smalere område enn I_{sp} som ble integrert over intervallet t_a .

6 VURDERING AV RESULTATER OG FEILKILDER

6.1 Teoretiske verdier mot målte verdier

I tabellene 6.1 og 6.2 er c^* og I_{sp} sammenliknet med teoretiske verdier. Teoretiske verdier ble beregnet ved hjelp av programmet NASA SP-273 (5). Programmet benyttet $P_{c,snitt}$ fra tabell 5.2 og $\varepsilon=5.0$ som inndata og forutsatte full likevekt i gassammensetningen gjennom dysen.

Tabell 6.1 Teoretiske og målte verdier.

				Teoretisk	Målt	Teoretisk	Målt
Fyring nr	Drivstoff	Ladning	$P_{c,snitt}$ (MPa)	c^* teoretisk (m/s)	c^* målt (m/s)	$I_{sp,teoretisk}$ (Ns/kg)	$I_{sp,målt}$ (Ns/kg)
LMF-05	A1	2"	12,94	1527	1513	2474	2301
LMF-06	A1	RB	9,60	1524	1508	2450	2275
LMF-07	A1	2"	20,24	1531	1525	2500	2355
LMF-08	A2	RB	9,97	1524	1515	2454	2337
LMF-09	A3	RB	16,92	1529	1523	2491	2373
LMF-12	B1	RB	17,00	1562	1565	2516	2394
LMF-13	B1	RB	19,00	1562	1538	2521	2384
LMF-14	B2	RB	17,20	1562	1541	2517	2402
LMF-15	B2	RB	22,10	1563	1540	2534	2367

Tabell 6.2 Sammenlikning av teoretiske og målte verdier.

Fyring nr	Drivstoff	Ladning	t_a (s)	$c^*_{målt}/c^*_{teoretisk}$	$I_{sp,målt}/I_{sp,teoretisk}$	$I_{sp,målt}/\lambda I_{sp,teoretisk}$
LMF-05	A1	2"	0,369	0,991	0,930	0,946
LMF-06	A1	RB	0,401	0,990	0,929	0,945
LMF-07	A1	2"	0,334	0,996	0,942	0,958
LMF-08	A2	RB	0,380	0,994	0,952	0,969
LMF-09	A3	RB	0,215	0,996	0,953	0,969
LMF-12	B1	RB	0,256	1,002	0,952	0,968
LMF-13	B1	RB	0,250	0,984	0,946	0,962
LMF-14	B2	RB	0,254	0,987	0,954	0,971
LMF-15	B2	RB	0,234	0,985	0,934	0,950

Av tabell 6.2 ser man at målt c^* stemte godt overens med teoretisk c^* . I gjennomsnitt lå $c^*_{målt}$ 0,7% og 1,5% under $c^*_{teoretisk}$ for henholdsvis drivstoff A og B (LMF-12 er ikke tatt med grunnet stort avvik fra de andre fyringene). Årsaken til at målt verdi lå lavere enn teoretisk kan forklares med varmetap til gods før gassen nådde dysen.

For I_{sp} var forskjellen mellom målt og teoretisk verdi større enn for c^* . Noe av forskjellen kan forklares ved at $I_{sp,målt}$ ble redusert av varmetapet både til motorkammeret og dysen. Bruk av konisk dyse under målingene reduserte $I_{sp,målt}$ i forhold til $I_{sp,teoretisk}$ ytterligere. En konisk dyse vil avbøye gassen i forhold til senteraksen og gi en lavere $I_{sp,målt}$, men tapet kan korrigeres ved å multiplisere $I_{sp,teoretisk}$ med λ gitt i likning (2.15). Ved å korrigere for konisk dyse vil forholdet mellom målte og teoretiske I_{sp} -verdier øke, siste kolonne i tabell 6.2, og man fikk en $I_{sp,målt}$ som i

snitt lå 4,3% og 3,7% under teoretisk verdi for henholdsvis drivstoff A og B.

Man kan med rimelig sikkerhet si at varmetapet vil øke med aksjonstiden t_a . Med det som utgangspunkt skulle varmetapet vært størst for A-drivstoffene. Sagt på en annen måte, $c^*_{\text{målt}}/c^*_{\text{teoretisk}}$ og $I_{\text{sp,målt}}/I_{\text{sp,teoretisk}}$ burde ligget nærmere 1 for B-drivstoffene enn for A1- og A2-drivstoffene. Ved å studere forholdet mellom målte og teoretiske verdier, tabell 6.2, er det motsatte tilfellet for c^* , mens man ikke ser noen forskjell for I_{sp} . En mulig forklaring på dette er at de teoretiske verdienes riktighet avhenger av at termodynamiske data for drivstoff- ingrediensene er riktige. Siden drivstoff B inneholder en ingrediens som ikke finnes i A, kan en feil i ingrediensens termodynamiske data føre til overprediksjon av teoretiske verdier for drivstoff B. Forholdene $c^*_{\text{målt}}/c^*_{\text{teoretisk}}$ og $I_{\text{sp,målt}}/I_{\text{sp,teoretisk}}$ reduseres da pga overprediksjon av teoretiske verdier, men relativt til drivstoff A vil det lavere varmetapet trekke i motsatt retning og mest for $I_{\text{sp,målt}}/I_{\text{sp,teoretisk}}$ fordi varmetapet påvirker I_{sp} mer enn c^* . Kun likevektsalternativet benyttes i programmet NASA SP-273, noe som øker overprediksjonen av teoretisk ytelse.

6.2 Sammenlikning av tilnærmet like fyringer

Tabell 6.3 Fire tilnærmet parallelle fyringer, LMF-06/08 og LMF-12/14.

Fyring nr	Drivstoff	Ladning	d_t (mm)	t_a (s)	$P_{c, snitt}$ (MPa)	c^* målt (m/s)	$I_{sp, målt}$ (Ns/kg)
LMF-06	A1	RB	13,00	0,401	9,60	1508	2275
LMF-08	A2	RB	12,00	0,380	9,97	1515	2337
LMF-12	B1	RB	11,50	0,256	17,00	1565	2394
LMF-14	B2	RB	10,96	0,254	17,20	1541	2402

Fyringene LMF-06/08 og LMF-12/14 var parvis svært like. Forskjellene lå i drivstoffenes brennhastighet og motorens dysehalsareal, noe som ga en liten forskjell i fyringenes aksjonstid t_a , se tabell 6.3. Større varmetap pga lenger aksjonstid kan allikevel forklare noe av forskjellen mellom LMF-06/08. Siden dysehalsarealene også var forskjellige, vil feilkilder ved bestemmelsen av dem kunne påvirke sammenlikningen av resultatene. Man ser av tabell 6.2 at c^* for LMF-12 er høyere enn teoretisk verdi, og det er derfor grunn til å tvile på dette tallet. For fyringene LMF-12/14 stemte verdiene for $I_{sp, målt}$ godt overens.

6.3 Sammenlikning av ladningstyper, RB og 2''

Tabell 6.4 RB- og 2''-ladninger med samme drivstoff, men med varierende trykk under fyringene.

Fyring nr	Drivstoff	Ladning	d_t (mm)	t_a (s)	$P_{c, snitt}$ (MPa)	c^* målt (m/s)	$I_{sp, målt}$ (Ns/kg)
LMF-06	A1	RB	13,00	0,401	9,60	1508	2275
LMF-08	A2	RB	12,00	0,380	9,97	1515	2337
LMF-09	A3	RB	12,00	0,215	16,92	1523	2373
LMF-05	A1	2''	12,00	0,369	12,94	1513	2301
LMF-07	A1	2''	10,11	0,334	20,24	1525	2355

Fra tabell 6.4 ser man ingen signifikant forskjell i bruk av radieltbrennende ladninger kontra ordinære 2''-ladninger. Begge ladningene har hver sin svakhet når det gjelder varmetap, eller nedkjøling av gassen i motorkammeret. I motorer med RB- ladninger vil noe varme gå med til ablasjon (bortsmelting) av inhiberingen i hver ende. Vekttap av inhibering under fyringene ble målt til 2.5 – 3.0 g. 2''-ladningen har ingen inhibering, men varmetapet til motorens gods vil bli større fordi den brenner fra endeflatene og blottlegger gods mot gassen i motorkammeret tidlig i fyringsforløpet. I fyringene omtalt her ser det ut til at de to forskjellige tapsfaktorene utjevner hverandre.

Ved å betrakte de to ladningstypene for seg i tabell 6.4, kan man se at I_{sp} øker med trykket og med synkende t_a . I teorien skal c^* være tilnærmet uavhengig av trykket. Da vi allikevel målte

en stigning kan den forklares med redusert varmetap grunnet kortere t_a .

6.4 Sammenlikning av drivstofftypene A og B

Tabell 6.5 Gjennomsnittsverdier av samtlige målinger for hver av de to drivstofftypene. ⁽¹⁾ LMF-12 er ikke med i c^* beregningen. ⁽²⁾ Differanse mellom A og B verdiene

			Teoretisk	Målt	Teoretisk	Målt
Drivstoff	$P_{c, \text{snitt}}$ (MPa)	t_a (s)	c^* teoretisk (m/s)	c^* målt (m/s)	$I_{sp, \text{teoretisk}}$ (Ns/kg)	$I_{sp, \text{målt}}$ (Ns/kg)
A	13,93	0,340	1527	1517	2474	2328
B⁽¹⁾	18,83	0,249	1562	1540	2522	2387
B-A⁽²⁾	4,9	-0,091	35	23	48	59

Ved å sammenlikne I_{sp} på denne måten får man også med innvirkningen av trykket. Dersom kun en sammenlikning mellom to drivstofftyper skal gjøres, bør man etterstrebe å ha samme trykk. Fyringer med tilnærmet samme trykk er sammenliknet i tabell 6.6.

Tabell 6.6 Fyringer med tilnærmet likt trykk for å sammenlikne drivstoff A og B.

					Teoretisk	Målt	Teoretisk	Målt
Fyring nr	Drivstoff	Ladning	t_a (s)	$P_{c, \text{snitt}}$ (MPa)	c^* teoretisk (m/s)	c^* målt (m/s)	$I_{sp, \text{teoretisk}}$ (Ns/kg)	$I_{sp, \text{målt}}$ (Ns/kg)
LMF-09	A3	RB	0,215	16,92	1529	1523	2491	2373
LMF-14	B2	RB	0,254	17,20	1562	1541	2517	2402
Differanse	B2-A3		0,039	0,28	33	18	26	29

Av tabellene 6.5 og 6.6 ser man at forskjellen i målt ytelse kommer godt fram selv om den teoretiske forskjellen i spesifikk impuls ved likt trykk ikke er større enn ca 1%.

7 KONKLUSJON

Motorer i småskala (ladning: 59x108 mm), både med radielt brennende og nøytralt brennende overflater egnet seg godt til å bestemme ytelsesverdiene I_{sp} , c^* og C_f . Ladningstypen hadde ingen betydning for resultatene. Man kunne skille mellom ytelsen til to forskjellige drivstoff, selv om forskjellen i teoretisk I_{sp} ved standardbetingelser kun var ca 1%.

Under utviklingen erfarte man at trykkuttaket for kammertrykket ikke kan plasseres på linje med motorens senterakse uten å gjøre visse tiltak for å skjerme trykkmålecellen.

Litteratur

- (1) Johannessen T C, Skarbøvik K, Unneberg E (2000): UTVIKLING OG TESTING AV RADIELTBRENNENDE LADNINGER I SMÅSKALA RAKETTMOTORER - Bestemmelse av brennhastighet som funksjon av trykk fra èn enkelt firing, FFI/NOTAT-2000/00447, FORTROLIG
- (2) Sarner S F (1966): Propellant chemistry, Reinhold, New York.
- (3) Sutton G P (1963): Rocket Propulsion Elements, John Wiley and Sons, Inc., New York and London.
- (4) Johannessen T C, Engen T K, Omholt L (1993): Eksperimentell evaluering av ytelsesparametre for krutt med 0% og 25% HMX, FFI/NOTAT-92/4032
- (5) Gordon S, McBride B J (1971): NASA SP-273, Computer program for calculation of complex chemical equilibrium compositions, rocket performance, incident and reflected shocks and Capman-Jouguet detonations.

FORDELINGSLISTE

FFIBM
Dato: 21. august 2003

RAPPORTTYPE (KRYSS AV) <input checked="" type="checkbox"/> RAPP <input type="checkbox"/> NOTAT <input type="checkbox"/> RR		RAPPORT NR. 2003/01239	REFERANSE FFIBM/844/131	RAPPORTENS DATO 21. august 2003
RAPPORTENS BESKYTTELSESGRAD UGRADERT		ANTALL TRYKTE UTSTEDT 24	ANTALL SIDER 31	
RAPPORTENS TITTEL UTVIKLING OG TESTING AV SMÅSKALA RAKETTMOTORER FOR YTELSESMÅLINGER		FORFATTER(E) JOHANNESSEN Tom C, OMHOLT Leiv, SKARBØVIK Knut		
FORDELING GODKJENT AV FORSKNINGSSJEF Bjarne Haugstad		FORDELING GODKJENT AV AVDELINGSSJEF: Jan Ivar Botnan		

EKSTERN FORDELING
INTERN FORDELING

ANTALL	EKS NR	TIL	ANTALL	EKS NR	TIL
		NAMMO Raufoss AS Pb 162 2831 Raufoss	9		FFI-Bibl
			1		FFI-ledelse
			1		FFIE
1		V/ S A Haugen	1		FFISYS
1		V/ J Husdal	1		FFIBM
1		V/ E A Løkke	1		FFIN
			3		Forfattereksemplar(er)
			4		Restopplag til Biblioteket
					Elektronisk fordeling:
					FFI-veven
					Ø Frøyland (Ofr)
					Tove K E Karsrud (TKE)
					Ivar Sollien (Iso)
					E Unneberg (EUn)