

Fremstilling og testing av PBXN-110

Gunnar Ove Nevstad

Forsvarets forskningsinstitutt/Norwegian Defence Research Establishment (FFI)

17. juni 2009

FFI-rapport 2009/01111

339301

P: ISBN 978-82-464-1622-9

E: ISBN 978-82-464-1623-6

Emneord

Detonasjonshastighet

Detonasjonstrykk

HMX

PBXN-110

Sjokkfølsomhet

Godkjent av

Jan Ivar Botnan

Avdelingssjef

Sammendrag

To partier av HMX krystaller med krystallfordeling tilsvarende klasse 2 og 3 har vært benyttet til fremstilling av PBXN-110 med 87.2 vektprosent HMX. Hensikten med fremstilling av PBXN-110 var å studere om benyttede krystaller kunne ha forbedrede egenskaper med hensyn på sjokkfølsomhet.

I Intermediate Scale Gap test ga undersøkt komposisjon en sjokkfølsomhet på 38.5 kbar, et resultat ikke ulikt hva vi normalt har oppnådde for PBXN-110. Derfor tyder resultatet på at benyttet krystall-sats 482/06 og sats 835/08 ikke har RS(Reduced Sensitivity) egenskaper av betydning selv om oppnådd sjokkfølsomhet ligger i det nedre området av hva som er rapportert i litteraturen for PBXN-110.

Etter herding i 4 døgn ved 50 °C ble gjennomsnittlig Shore A_{15s} hardhet målt til 34.6 et resultat som tilfredsstillende kravet på 20.

Ved benyttet metode, hvor en kjegle av sprengstoffet initieres, er kritisk diameter funnet å være 3.8 ± 0.2 mm. Detonasjonshastigheten er bestemt til 8233 m/s og detonasjonstrykket ved bruk av Plate Dent test til 242 kbar. De to siste resultatene er i overensstemmelse med Cheetah beregninger.

English summary

Two charges of HMX crystals with crystal size distribution as class 2 and 3 have been used in production of PBXN-110 with 87.2 wt. % HMX. The purpose of the production of PBXN-110 was to study if used crystals could give improved properties with regard to shock sensitivity.

In Intermediate Scale Gap test the study composition gave a shock sensitivity of 38.5 kbar, a result in accordance with what we normally have achieved for PBXN-110. The obtained shock sensitivity of PBXN-110 indicate the used crystals sats 482/06 and sats 835/09 have no RS (reduced Sensitivity) properties, even though the obtained shock sensitivity was in the lower range of what is reported in the literature for shock sensitivity of PBXN-110.

Curing for 4 days at 50°C gave a composition that satisfies the requirement for Shore A_{15s} hardness of 20 since our average result was 34.6.

The average critical diameter determined by initiating a cone of the explosive was found to be 3.8±0.2 mm. Detonation velocity has been measured to 8233m/s, and the detonation pressure measured by use of Plate Dent test to 242 kbars. The last two results are in accordance with Cheetah calculated values.

Innhold

1	Innledning	7
2	Eksperimentelt	8
2.1	HMX krystaller	8
2.2	Andre råvarer	8
2.3	Sammensetning – fremstilling	8
2.4	Viskositetsmålinger	8
2.5	Hardhet	8
2.6	Intermediate Scale Gap test	8
2.7	Tetthet	9
2.8	Kritisk diameter	9
2.9	Detonasjonshastighet	9
2.10	Plate Dent test	10
3	Resultater	11
3.1	Viskositet	11
3.2	Tetthet	12
3.3	GAP test	12
3.4	Kritisk diameter	19
3.5	Detonasjonshastighet og trykk	22
3.5.1	Teoretiske beregninger	22
3.5.2	Eksperimentell bestemmelse av detonasjonshastighet	22
3.5.3	Plate Dent test	22
3.6	Hardhet	24
Appendix A		26
A.1	Kontrollrapport for grov RS-HMX	26
A.2	Kontrollrapport fin RS-HMX	27
A.3	Kontrollrapport overdrager sprengstoff	28
Appendix B Mikseorder og blandeskjema		29
B.1	Blanding PBXN-110 A	29
B.2	Blanding PBXN-110 B	31
Appendix C Viskositetsmålinger		33
C.1	Blanding PBXN-110 A	33
C.2	Blanding PBXN-110 B	34
	Referanser	35

1 Innledning

PBXN-110 er en HMX basert komposisjon av typen støpherdbar. Komposisjonen er utviklet og kvalifisert i USA og har eksistert noen år (1). PBXN-110 inneholder inert bindemiddel og mykner, men et høyt innhold av HMX gir den en relativ høy tetthet og dermed høy detonasjonshastighet. Imidlertid vil PBXN-110 ha lavere detonasjonshastighet enn pressbare HMX-komposisjoner og støpherdbare komposisjoner med energirikt mykningsmiddel og/eller bindemiddel. AOP-26 (2) gir egenskaper og sammensetning for andre kvalifiserte støpherdbare komposisjoner; Fransk Octorane 86A og 86B ((HMX/Polyurethan)(86/14)), UK EDC 32 (85/15) og KS 32 (85/14/1) (HMX/HTPB/DOA) er alle komposisjoner som er kvalifisert og nær beslektet med PBXN-110 i ytelse. For Tyskland er det i (2) gitt en HMX støpherdbar komposisjon med 90 vekt % HMX produsert ut fra spesifikasjon H 8231. Normalt vil man ved 90 vekt % HMX eller mer være tvungen til å presse fyllingene for å oppnå tilfredsstillende tetthet og kvalitet på sprengstoffyllingen.

For mindre stridskoder som krever høy ytelse, er pressbare komposisjoner med et HMX innhold fra 90-98 vekt % et bedre alternativ til fylling enn en støpherdbar. Spesielt er kravet til detonasjonshastighet og -trykk viktig for å oppnå god virkning for stridskoder med retta virkning. Imidlertid inneholder kravene til et stridskode, eller for den del et våpen mer enn krav om en gitt ytelse. Et krav mange nasjoner i dag stiller til nye våpen er at de skal tilfredsstille kravene til IM gitt i STANAG 4439 (3), et krav som normalt lettest kan tilfredsstilles for sprengstoffyllingen ved bruk av støp-herdbare komposisjoner som PBXN-110. En viktig og kritisk egenskap for sprengstoffyllinger er sjokkfølsomheten, som i en test som sympatetisk detonasjon er avgjørende for å oppnå et tilfredsstillende resultat. Sjokkfølsomheten til en komposisjon er normalt avhengig av fyllstoffinnhold, men også type bindemiddel er avgjørende. Med hensyn til faststoff har partikkelfordeling og størrelse betydelig effekt på sjokkfølsomheten (4).

De senere år har det kommet på markedet nitraminer med forbedrede krystaller som når de anvendes i PBXer gir betydelig endring i sjokkfølsomhetsegenskapene. Ved valg av riktig RDX krystallkvalitet kan sjokkeegenskapene til en komposisjon som PBXN-109 forbedres med en faktor på 2-3. For HMX baserte komposisjoner er det i dag ikke oppnådd tilsvarende forbedringer av sjokkeegenskaper som resultat av endret kvalitet på inngående HMX krystaller. Imidlertid er det rapportert om forbedringer med en reduksjon på 40 % i sjokkfølsomheten for PBXN-110 (5). Gevinsten i forbedret sjokkfølsomhet ved overgang til en bedre HMX krystallkvalitet kan enten tas direkte ut ved å beholde en komposisjons sammensetning eller for en komposisjon som PBXN-110 ved å øke fyllstoffinnholdet og dermed virkning uten at sjokkfølsomheten øker.

I denne rapporten har vi benyttet ukjente kvaliteter av HMX i fremstilling av PBXN-110. En av egenskapene som har vært testet er sjokkfølsomhet ved bruk av Intermediate Scale Gap test. I tillegg har hardhet vært bestemt for å se at benyttet herdetid gir et produkt som tilfredsstiller kravet til mekaniske egenskaper (1), detonasjonshastighet, detonasjonstrykk samt kritisk diameter.

2 Eksperimentelt

2.1 HMX krystaller

To satser av HMX-krystaller ble levert av Chemring Nobel AS som vannfuktet kvalitet. Sats 482/06 var av klasse 3 med kontrollrapport gitt i Appendiks A.1. Sats 835/08 hadde en krystallfordeling tilsvarende klasse 2 og hvor kontrollrapport er gitt i Appendiks A.2. Begge satsene ble før bruk tørket ved 60°C til det ble oppnådd konstant vekt.

2.2 Andre råvarer

Benyttet bindemiddel HTPB samt herder IPDI er levert av Nammo Raufoss AS. Mykner IDP (isodecyl pelargonate) samt Lecithin er levert av Chemring Nobel AS. Øvrige kjemikalier er anskaffet fra Fluka.

2.3 Sammensetning – fremstilling

Spesifikasjonen for PBXN-110 gir krav til sammensetning i tillegg til alternativer for valg av herder og katalysator kombinasjoner (1). Vi har valgt å fremstille komposisjonen som er definert som type II hvor IPDI (Isophorone diisocyanate) er benyttet som herder og DBTDL (Dibutyltin dilaurate) som katalysator. Med hensyn på HMX innhold har vi holdt fast på 87.2 vektprosent med en 3:7 fordeling mellom klasse 2 og klasse 3. Dette valget ble tatt for å kunne sammenligne resultatene med tidligere fremstilte og testede blandinger av PBXN-110 (6-9). Benyttet sammensetning samt fremstillingsprosedyre er for begge blandingsene gitt i Appendiks B. Ved fullføring av blandingen hadde denne en temperatur på 50°C. Herding ble gjennomført ved 50°C.

2.4 Viskositetsmålinger

Viskositeten ble målt ved en temperatur på 50°C ved bruk av et Brookfield viskosimeter. Alle målingene ble gjennomført med en T-D spindel og variabel høyderegulator. Vandring i vertikalretning 20-25 mm. Under målingene var prøvene oppbevart i en dobbelvegget beholder hvor vann sirkulerte for å holde massen på konstant temperatur under målingene. Resultatene fra viskositetsmålingene er gitt i 3.1 i tillegg til at Appendiks C gir alle enkeltmålinger.

2.5 Hardhet

Shore A hardhet ble målt med Shore A Härtprüfer DIN 53505 ISO R 868 Type BS 61, Serien Nr.;16705/97 fra BAREISS etter 15 sekunder på endene av ”dog bone” legemer samt skiver av samme tykkelse 11-13 mm. Resultatene er gitt i 3.6.

2.6 Intermediate Scale Gap test

Sjokkfølsomheten ble bestemt ved bruk av ”Intermediate Scale Gap Test” og ble gjennomført i henhold til prosedyren beskrevet i STANAG 4488 (10) med unntak av tykkelsen på korta. Våre kort har en tykkelse på 0.25 mm, mens i (10) er tykkelsen på korta spesifisert til 0.19+0.02/-0.01 mm. Andre detaljer vedrørende gjennomføringen av testen er beskrevet i referanse 11. Til

overdragere ble det benyttet en RDX/voks/grafitt (95/5) (HWC) komposisjon levert av Chemring Nobel. Kontrollrapport for overdragersprengstoff er gitt i Appendiks A.3. Pressing ble foretatt med et trykk på 10 tonn og en holdetid på 30 sekunder. Sjokktrykk som funksjon av barrieretykkelse for denne type overdragere er gitt i (10).

2.7 Tetthet

Tetthet for herdet komposisjon ble målt ved veiing og måling av volum til fyllingene i Gap test rør. Resultatene er gitt i 3.2.

2.8 Kritisk diameter

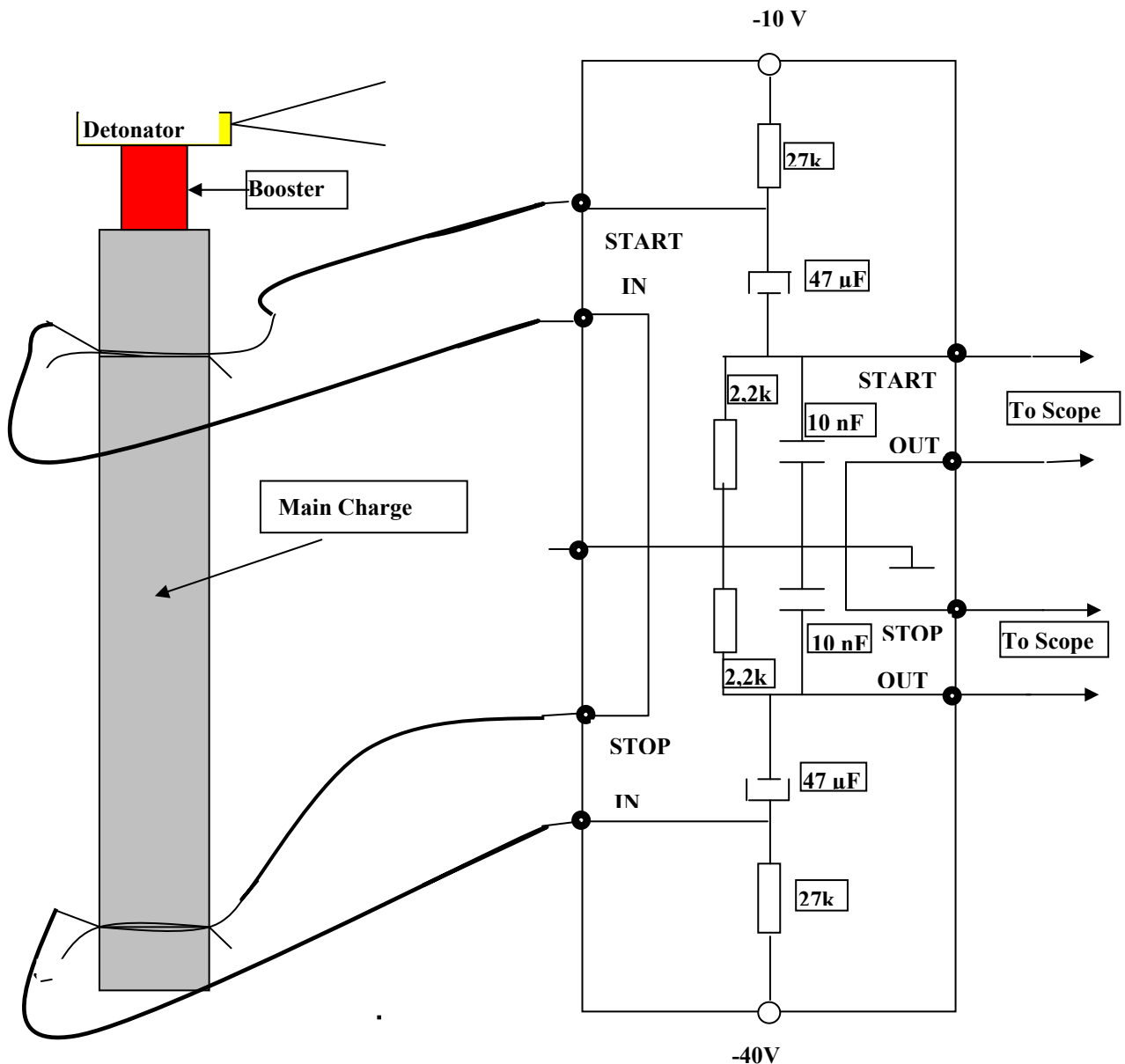
Til bestemmelse av kritisk diameter (12) ble det benyttet kjegler med lengde 270 mm og diameter fra 30 mm til 3 mm. Etter at støpemassen var ferdig herdet ble støpeformen fjernet og en 3 mm tykk kobbertråd limt på kjeglen i lengderetningen. Til initiering ble det benyttet detonator nr.8 samt en HWC 94.5/4.5/1 booster med diameter 20 mm. Mellom booster og testlegeme ble det benyttet en sylindrisk ladning med diameter 30 mm og lengde 80-100 mm av samme blanding som testlegemet. Den sist nevnte ladningen ble benyttet for at kjeglen skal bli initiert med riktig detonasjonshastighet. Vitneplater med dimensjon 3x45x300 mm i stål (ST-52) ble montert som vist i figur 3.14.

2.9 Detonasjonshastighet

Detonasjonshastigheten ble målt på sylindriske ladninger med diameter 30 mm. Total lengde på ladningene var 36-40 cm med en avstand mellom sensorene på 272 ± 1 mm. Til sensorer ble det benytter tvinna kobbertråder (13) med diameter på 0.15 mm og et 0.005 mm tykt lakklag. To tråder ble tvinna sammen og på ikke tvinna ender ble lakklaget fjernet for å oppnå godt kontakt. Vi benyttet to sensorer, start plassert omlag 6-8 cm etter booster, og stopp omlag 2 cm fra bunn. Valget av startpunkt ble tatt for at hastigheten skulle ha tid til å stabilisere seg mens stopp ble valgt for å unngå innvirkning på ”denten”.

Til initiering ble det benyttet detonator nr. 8 samt en 16 g HWC 94.5/4.5/1 booster med diameter 20 mm. Et bilde av testenheten er vist i figur 3.16.

Til måling av detonasjonshastigheten ble oppsettet som vist i figur 2.1 benyttet i tillegg til to strømkilder og et oscilloskop av typen: HEWLETT PACKARD 54510A. Digitizing Oscilloscope, 250 MHz 1G Sa/s. I det detonasjonsfronten passerer startsensoren vil det gå en strøm gjennom kretsen som gir opphav til et signal på oscilloskopet. Tilsvarende vil et signal bli registrert når detonasjonsfronten passerer stopp sensoren. For både start- og stoppsensor var utgangspunktet at der var ingen kontakt mellom trådene. Siden avstanden i tid mellom disse to registreringene kan avleses på oscilloskopet med relativt god nøyaktighet, og vi i utgangspunktet visste nøyaktig avstand mellom sensorene kan hastigheten beregnes med god nøyaktighet.



Figur 2.1 Skisse av instrumenteringen for måling av detonasjonshastighet.

2.10 Plate Dent test



”Plate Dent test” ble gjennomført som beskrevet i (14) for to ladninger benyttet til bestemmelse av detonasjonshastighet. Som vitneplate ble plater med tykkelse 50 mm av bolt med diameter 155 mm av ST-37 kvalitet benyttet.

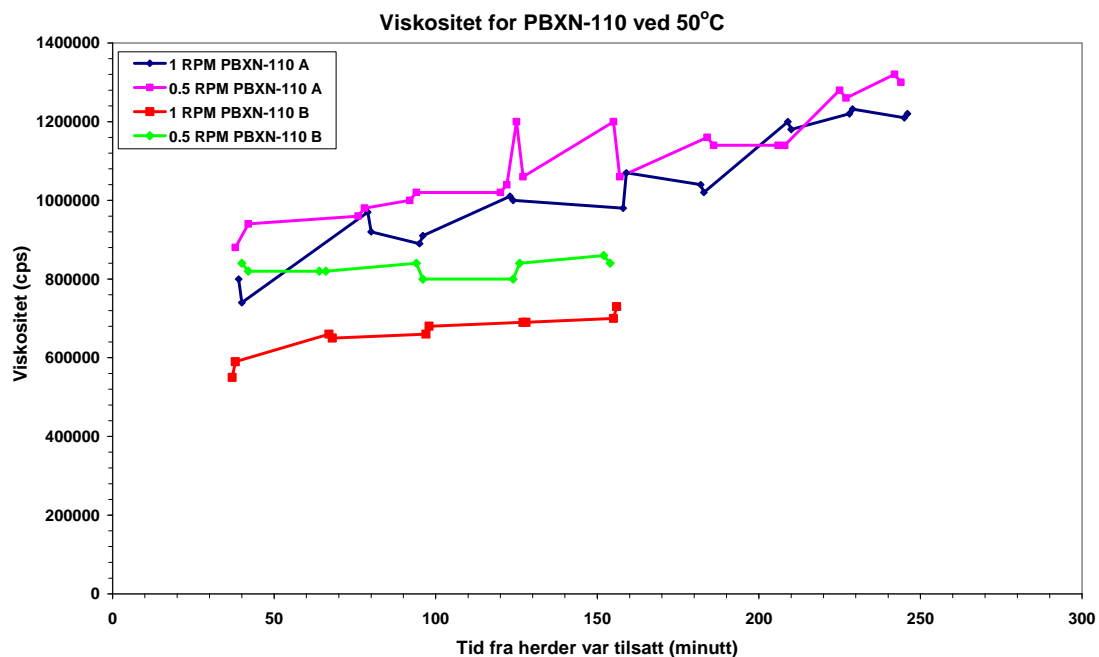
For å måle dent dybden ble det benyttet en stålkule med diameter 20 mm, en ring med høyde 20 mm og diameter 70 mm og en mikrometerskrue med en nøyaktighet på 0.02 mm, figur 2.2.

Figur 2.2 Bilde av oppsett for måling av dent dybde.

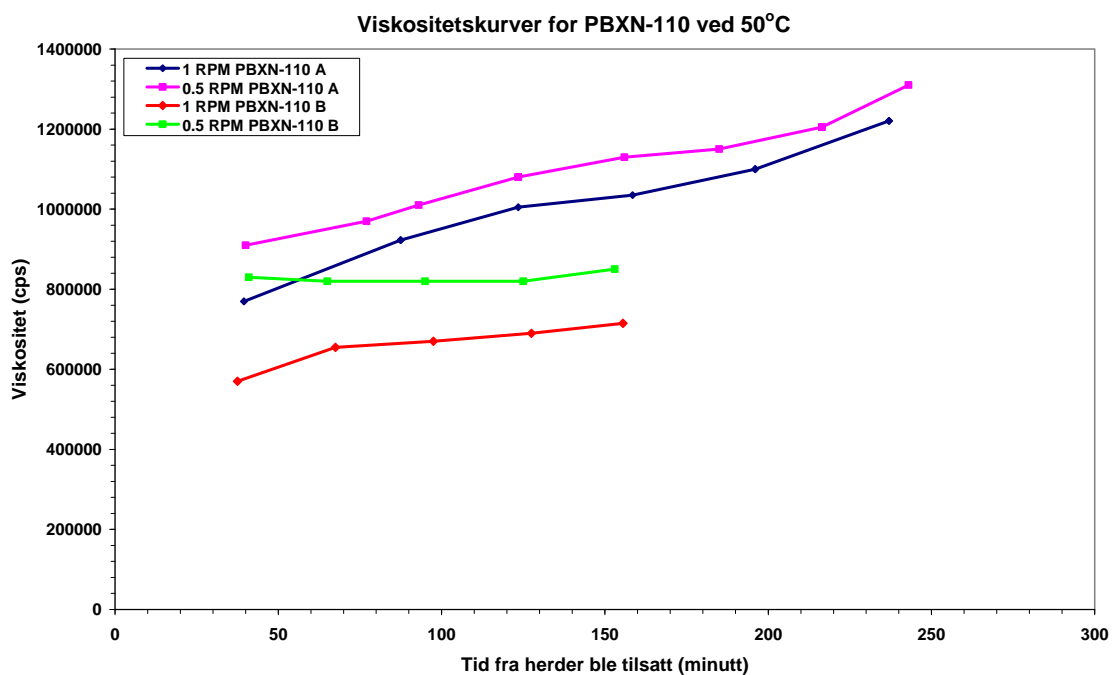
3 Resultater

3.1 Viskositet

Det ble gjennomført viskositetsmålinger på begge blandingene, som i utgangspunktet var identiske med hensyn på sammensetning. Imidlertid er målt viskositet for blanding B noe lavere enn blanding A. I tillegg har blanding B en noe flattere viskositetskurve de 3 timene som viskositeten er målt.



Figur 3.1 Viskositetskurver målt med T-D spindel ved 50°C før midling.



Figur 3.2 Viskositetskurvene i figur 3.1 etter midling.

For begge blandningene er både viskositeten etter endt blanding og de første timene etter på tilfredsstillende med hensyn på støping. Sammenlignet med andre blandinger av PBXN-110 av andre krystaller har blandningene med sats 482/06 og sats 835/08 noe høyere viskositet enn hva vi fikk for blandningene rapportert i referanse 9.

3.2 Tetthet

Samtlige gaptestrør ble før bruk målt med hensyn på indre diameter og lengde for beregning av indre volum, tabell 3.1, i tillegg til at rørene ble veid. Etter at rørene var fylt med PBXN-110 blanding og denne var herdet og overskuddsmasse fjernet ble rørene på nytt veid.

Rør nr	Vekt (g)	Indre diameter topp (cm)	Indre diameter bunn (cm)	Høyde (cm)	Volum (cm ³)	PBXN-110 Blanding Nr.	Vekt rør +Sprengstoff(g)	Nettovekt Sprengstoff (g)	Tetthet (g/cm ³)
1	878.05	3.957	3.952	20.002	245.67	PBXN-110 A	1283.49	405.44	1.650
2	882.74	3.957	3.959	19.997	246.04	PBXN-110 A	1288.31	405.57	1.648
3	896.93	3.937	3.946	19.999	244.02	PBXN-110 A	1301.61	404.68	1.658
4	884.24	3.958	3.957	20.017	246.22	PBXN-110 A	1291.39	407.15	1.654
5	904.40	3.941	3.939	20.020	244.09	PBXN-110 A	1306.00	401.60	1.645
6	907.04	3.934	3.936	20.025	243.53	PBXN-110 A	1309.12	402.08	1.651
7	875.72	3.954	3.973	20.008	246.86	PBXN-110 B	1284.87	409.15	1.657
8	904.54	3.933	3.940	20.042	243.92	PBXN-110 B	1306.61	402.07	1.648
9	879.39	3.952	3.956	19.949	244.95	PBXN-110 B	1285.44	406.05	1.658
10	885.36	3.960	3.950	20.050	246.32	PBXN-110 B	1295.56	410.20	1.665
Gjennomsnitt									1.654 ±0.006

Tabell 3.1 Tetthet for sprengstoffyllinger til de ulike rørene benyttet til testing av sjokkfølsomheten til PBXN-110.

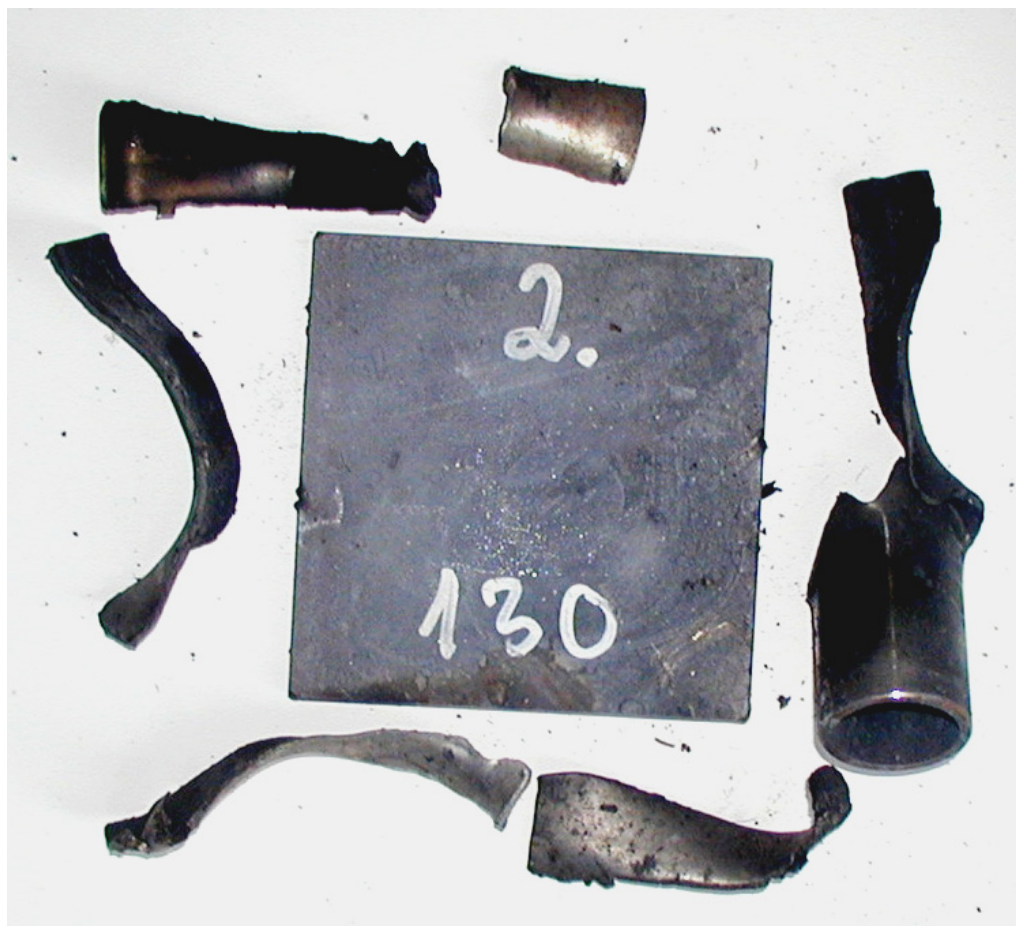
Det er moderat forskjell i tettheten for blanding A og B. Den gjennomsnittlige tettheten for samtlige 10 rør i tabell 3.1 er 1.654 ± 0.006 g/cm³. Teoretisk tetthet for PBXN-110 inneholdende 87.2 vekt % HMX ble i (6) beregnet til $\rho = 1.666$ g/cm³. For rørene i tabell 3.1 er oppnådd tetthet derfor 99.3 % av TMD.

3.3 GAP test

Første skuddet i Gap test ble gjennomført med en barrieretykkelse på 140 kort eller 35.7 mm. Resultatet var som vist i figur 3.3 ingen omsetning i tillegg til at røret var nærmest intakt. De neste 9 skuddene ble suksessivt skutt med varierende barrieretykkelse. Resultatene er gitt i figur 3.4 til 3.13.



Figur 3.3 Skudd 1, rør 1 med PBXN-110 A, barrieretykkelse 140 kort, ikke omsetning.



Figur 3.4 Skudd 2, rør 2 med PBXN-110 A, barrieretykkelse 130 kort, ikke omsetning.



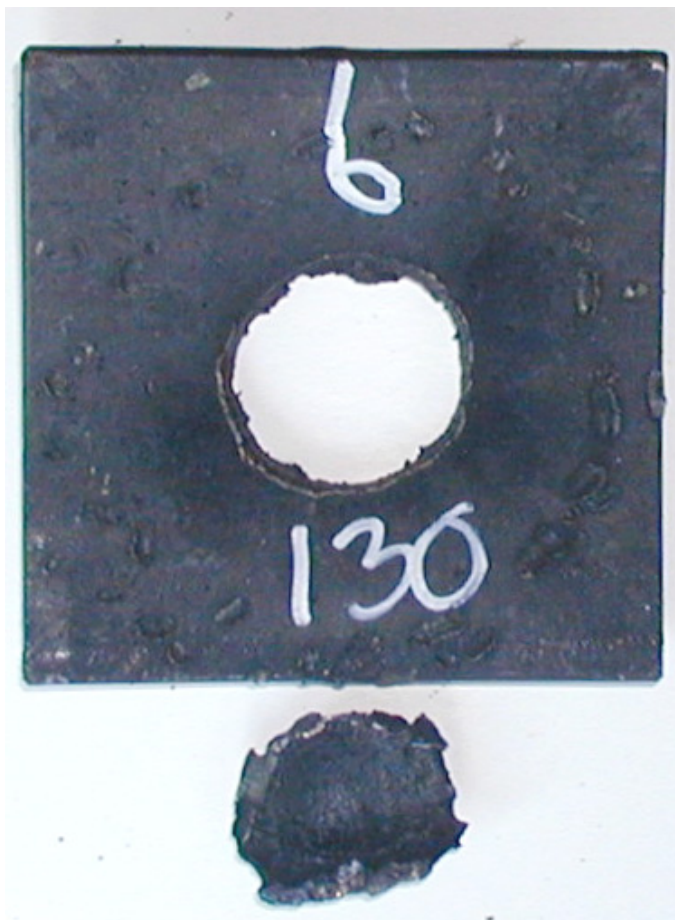
Figur 3.5 Skudd 3, rør 3 med PBXN-110 A, barrieretykkelse 120 kort, full omsetning.



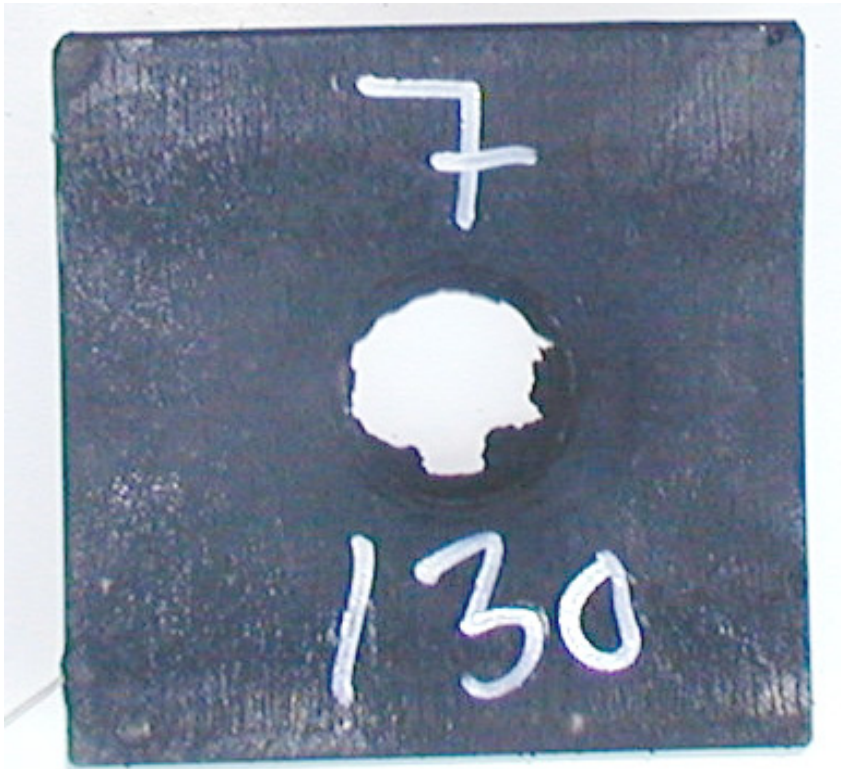
Figur 3.6 Skudd 4, rør 4 med PBXN-110 A, barrieretykkelse 125 kort, full omsetning.



Figur 3.7 Skudd 5, rør 5 med PBXN-110 A, barrieretykkelse 130 kort, ikke omsetning.



Figur 3.8 Skudd 6, rør 6 med PBXN-110 A, barrieretykkelse 130 kort, full omsetning.



Figur 3.9 Skudd 7, rør 7 med PBXN-110 B, barrieretykkelse 130 kort, full omsetning.



Figur 3.10 Skudd 8, rør 8 med PBXN-110 B, barrieretykkelse 130 kort, full omsetning.



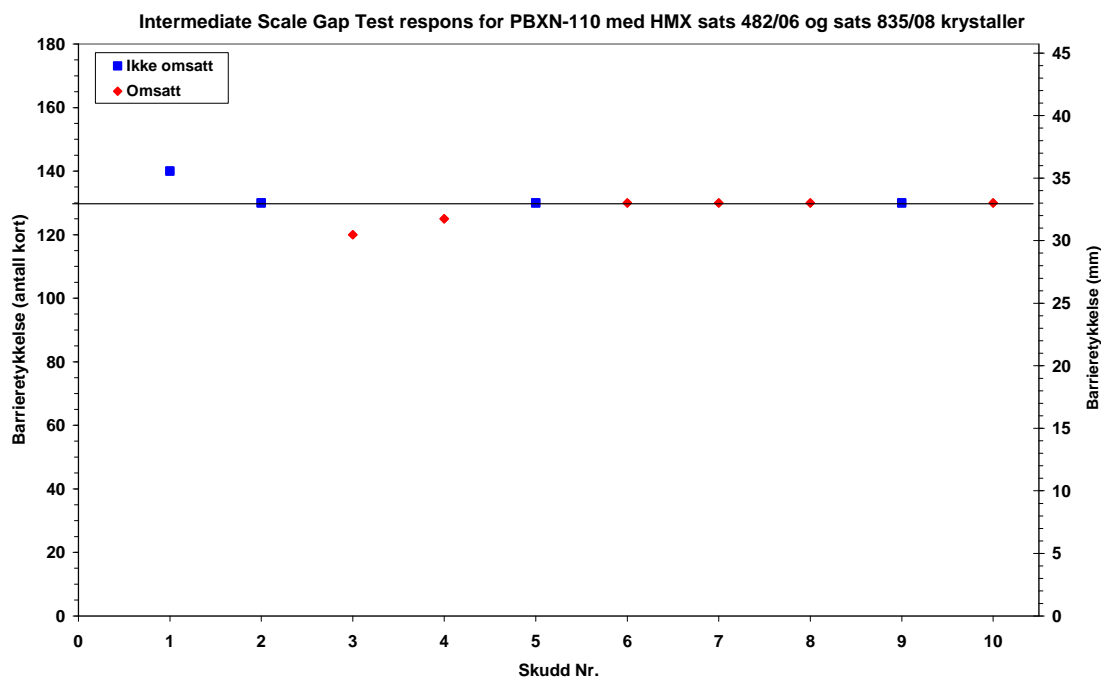
Figur 3.11 Skudd 9, rør 9 med PBXN-110 B, barrieretykkelse 130 kort, ikke omsetning.



Figur 3.12 Skudd 10, rør 10 med PBXN-110 B, barrieretykkelse 130 kort, full omsetning.

Skudd Nr.	Rør Nr.	Antall kort	Barrieretykkelse (mm)	Reaksjon
1	1	140	35.7	Ikke omsatt
2	2	130	33.2	Ikke omsatt
3	3	120	30.6	Omsatt
4	4	125	31.8	Omsatt
5	5	130	33.2	Ikke omsatt
6	6	130	33.2	Omsatt
7	7	130	33.2	Omsatt
8	8	130	33.2	Omsatt
9	9	130	33.2	Ikke omsatt
10	10	130	33.2	Omsatt

Tabell 3.2 Resultater i Intermediate Scale Gap test for PBXN-110 inneholdende HMX-krystaller fra sats 482/06 og sats 835/08.



Figur 3.13 Plot av responsen til testet skudd i Intermediate Scale Gap test inneholdende PBXN-110 med HMX sats 482/06 og sats 835/08 krystaller.

Tabell 3.2 viser et sammendrag av resultatene for hele PBXN-110 serien med krystaller fra sats 482/06 og sats 835/08. Serien ble startet med en barrieretykkelse på 140 kort som ikke ga omsetning. For skudd 2 ble barrieretykkelsen redusert med 10 kort til 130 uten at vi fikk omsetning. For skudd 3 ble barrieretykkelsen redusert med ytterligere 10 kort til 120 kort noe som medførte full omsetning av akseptor. For skudd 4 ble barrieretykkelsen økt med 5 kort til 125 kort men reaksjonen i akseptor var fremdeles full omsetning. Skudd 5 ble en repetisjon av skudd 2 med en barrieretykkelse på 130 kort og responsen i akseptor var ingen reaksjon. For de resterende 5 skuddene ble barrieretykkelsen holdt konstant på 130 kort. Reaksjonen i akseptor var, 4

akseptorer gikk til full omsetning mens 1 ga ingen reaksjon. For skudd 6 var merkene i vitneplaten noe forskjellig fra hva man normalt observerer. Som figur 3.8 viser er det et stort antall sår i vitneplaten etter treff av fragmenter og i tillegg er hullet av en størrelse og form man normalt ikke observerer. Hva årsaken skyldes er usikkert, men det kan muligens være at reaksjonen i akseptor lenge har vært en deflagrasjon som ved enden av røret har gått over i en detonasjon.

Grensen mellom omsetning og ikke er på 130 kort som tilsvarer 33.2 mm i barrieretykkelse. Sammenhengen mellom barrieretykkelse og trykk for overdragerne vi har benyttet er gitt i STANAG 4488 (10). En barrieretykkelse på 33.2 mm gir et trykk på 38.5 ± 1 kbar. For å oppnå en 50% sannsynlighet for detonasjon må testet PBXN-110 komposisjon bli utsatt for et sjokktrykk på 38.5 ± 1 kbar. Sammenlignet med følsomheten til PBXN-109 er dette resultatet nærmere PBXN-109 med standard RDX type II (25 kbar) enn RS-RDX (55-60 kbar). For PBXN-110 gir NIMIC EMC (Energetic Material Compendium) (2) to resultater: Shock Gap Test –EIDS 2 = 34 kbar og for LSGT = 34 kbar. I referanse 9 fikk vi 140 kort eller 34 kbar, i referanse 8 135 kort eller 35.5 kbar, i referanse 7 ble en og en halv serie testet med 133 kort for den fulle serien og 140 kort for den halve og tilslutt i referanse 6 ble en serie med standard HMX testet til 137 kort eller 35 kbar for 50% sannsynlighet for detonasjon

Alle disse resultatene er svært like og likt resultatet vi har oppnådd for vår PBXN-110 på 38.5 kbar.

3.4 Kritisk diameter

To kjegler av hver blanding ble støpt for bestemmelse av kritisk diameter. I figur 3.14 er bilder av konene etter at de var påmontert start og booster samt kobberstreng vist.



Figur 3.14 Ladningene for bestemmelse av kritisk diameter etter at de var montert på vitneplater.



Figur 3.15 Vitneplater fra fyingene for bestemmelse av kritisk diameter.

Komposisjon	Kon Nr.	Konsumert lengde av kon (mm)	Kritisk diameter (mm)	Gjennomsnitt kritisk diameter (mm)
PBXN-110 A	I	260	4.0	3.8±0.2
	II	264	3.6	
PBXN-110 B	I	260	4.0	
	II	263	3.7	

Tabell 3.3 Resultat fra bestemmelse av kritisk diameter for PBXN-110 A/B blandinger.

Figur 3.15 viser vitneplatene etter at testlegemene er avfyrt. Tabell 3.3 viser resultatet med hensyn på kritisk diameter med et gjennomsnitt på 3.8 ± 0.2 mm. AOP-7 (US-202)(16) oppgir en kritisk diameter for PBXN-110 på 6.1 mm for en tetthet på 1.67 g/cm^3 . Vi har tidligere i referanse 9 skutt noen kritiske diameter tester for en tilsvarende PBXN-110 komposisjon og fikk da et resultat på 5.4 ± 1.3 mm.

3.5 Detonasjonshastighet og trykk

3.5.1 Teoretiske beregninger

I (6) ble Cheetah 2.0 (15) benyttet til å gjennomføre teoretiske beregninger for PBXN-110 for noen blandinger med ulikt faststoffinnhold. Tabell 3.4 gir et sammendrag av de viktigste egenskapene. Ved bruk av de tetthetene til inngående forbindelser som ligger i Cheetah 2.0 vil våre blandinger ha en teoretisk tetthet på 1.666 g/cm^3 , og dermed vil man med en % TMD på 97.5 oppnå kravet til tetthet gitt i (1).

Egenskaper ved C-J Condition	Faststoffinnhold av HMX (vekt%)			
	86	87.2	88	89
The pressure (GPa)	26.07	26.91	27.48	28.22
The volume (cc/g)	0.464	0.459	0.455	0.451
The density (g/cc)	2.157	2.181	2.197	2.217
The energy (kJ/cc explosive)	3.08	3.17	3.24	3.32
The temperature (K)	3485	3532	3563	3601
The shock velocity (mm/us)	8.183	8.274	8.336	8.414
The particle velocity (mm/us)	1.935	1.952	1.963	1.977
The speed of sound (mm/us)	6.248	6.322	6.372	6.437
Gamma	3.230	3.239	3.246	3.256
Tetthet komposisjon (g/cm^3)	1.6467	1.6663	1.6796	1.6965

Tabell 3.4 Beregnet egenskaper for PBXN-110 med faststoffinnhold fra 86 til 89 vekt %.

3.5.2 Eksperimentell bestemmelse av detonasjonshastighet

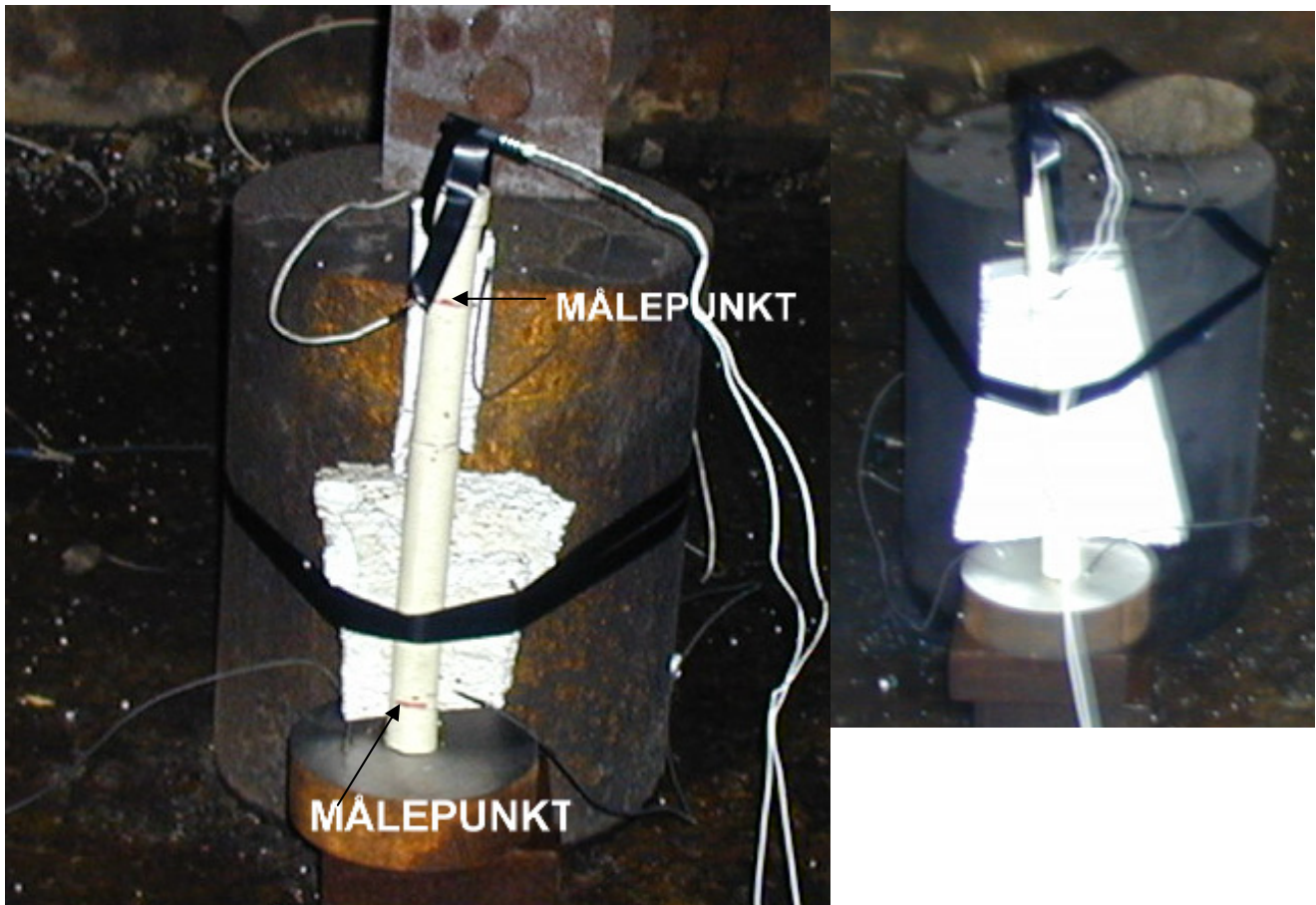
Tilgjengelig legemer med diameter 30 mm ble limt sammen til to testlegemer med en samlet lengde på omlag 40 cm. Tabell 3.5 gir avstanden mellom målepunktene for bestemmelse av detonasjonshastigheten. I figur 3.16 er bilder av testlegemene gitt før fyring.

For skudd 1 med en avstand på 271.7 mm ble som vist i figur 3.17 registrert en tid på $33.0 \mu\text{s}$ mellom trigging av start og stopp sensoren. Dette gir en detonasjonshastighet på 8233 m/s. For skudd 2 misset vi start triggingen og oppnådde dermed ingen tidsdifferanse.

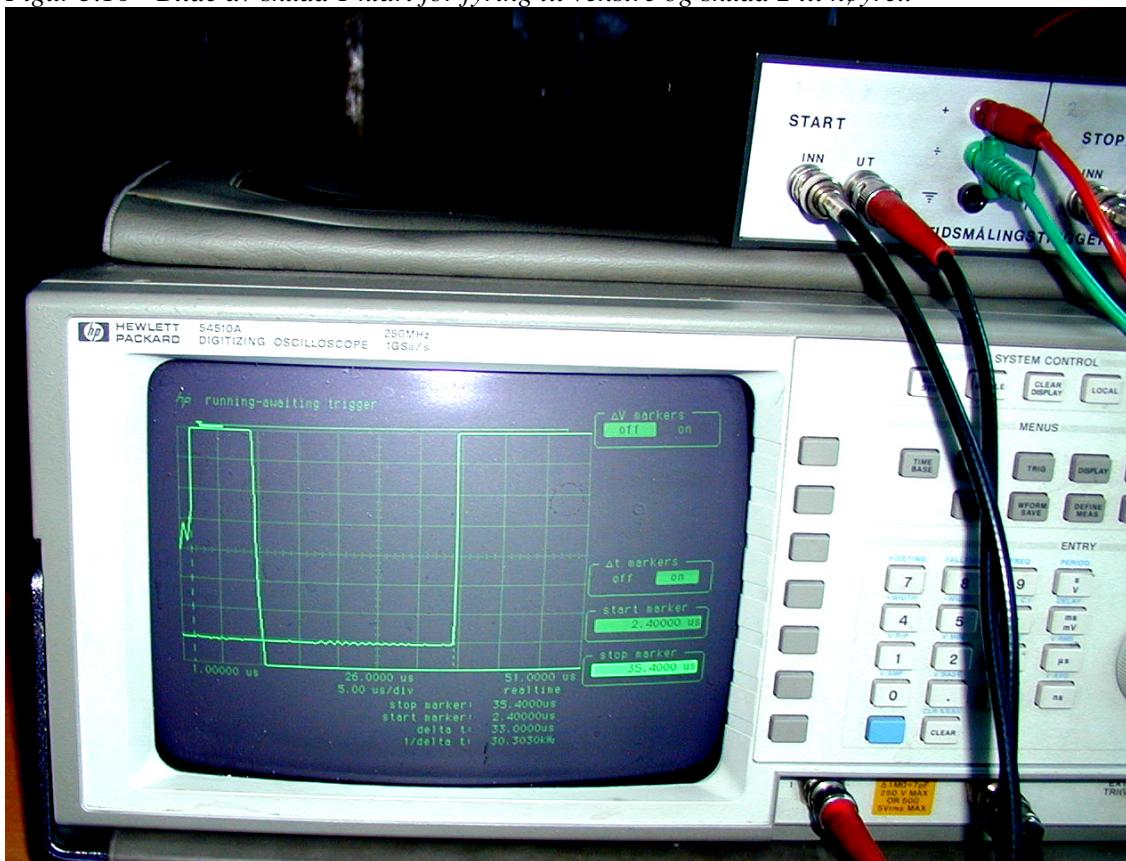
3.5.3 Plate Dent test

For skuddene benyttet til bestemmelse av detonasjonshastigheten ble det plassert "Dent" plater under (figur 3.16) slik at man samtidig kunne bestemme detonasjonstrykket. Bilde av disse vitneplatene er gitt i figur 3.18. For skudd 1 ble denten målt til 5.05 mm og for skudd 2 til 5.00 mm. Av figur 1 ser man at for skudd 1 inneholder vitneplata noen mindre krater som tyder på at det har vært noen mindre luftbobler i støpen.

Tabell 3.5 oppsummerer resultatene fra bestemmelsen av detonasjonshastighet og trykk. Oppnådd hastighet på 8233m/s og trykk på 242 kbar er i overensstemmelse med beregningene i tabell 3.4. Siden antall skudd som er testet er på et minimum er resultatene noe usikre.



Figur 3.16 Bilde av skudd 1 klart for firing til venstre og skudd 2 til høyre..



Figur 3.17 Bilde av skop med firingsskurven på skjermen for skudd 1.



Figur 3.18 Bilde av Dent vitneplatene for skudd 1 og 2 med henholdsvis PBXN-110 B og A.

Skudd	Lengde mellom målepunkt (cm)	Tid (µs)	Detonasjons hastighet (m/s)	Diameter bunn (mm)	Dentdybde (mm)	Detonasjonstrykk (Gpa)
1	27.17	33.0	8233	30.20	5.05	240.8
2	27.24			29.50	5.00	244.1
			8233			242.4

Tabell 3.5 Oppsummering av resultater fra bestemmelse av detonasjonshastighet og Plate Dent test.

3.6 Hardhet

Shore A er målt etter 15 sekunder på prøver som var herdet til testing av mekaniske egenskaper samt på prøver fra herdet masse først benyttet til målinger av viskositetsegenskaper. Alle resultatene er gitt i tabellene 3.6 til 3.9. Kravet til Shore A_{15s} hardhet for PBXN-110 er gitt i (1) og er minimum 20. Tabell 3.10 oppsummerer resultatene og viser at det er liten forskjell mellom de ulike prøvene som er testet og at alle resultater ligger innenfor kravet på 20.

Emne Nr.	Shore A _{15s} for PBXN-110 A Blanding				Gjennomsnitt
1	34	35	35	39	35.8
2	36	35	38	37	36.5
3	35.5	30	35	36	34.1
4	29	38	34.5	34.5	34.0
Gjennomsnitt					35.1

Tabell 3.6 Resultat fra Shore A hardhetsmålinger for PBXN-110 A.

Emne Nr.	Shore A _{15s} for PBXN-110 A Viskositet				Gjennomsnitt
1	38	32	29.5	32	32.9
2	39	41	41	37	39.5
3	35	34	35	33	34.3
Gjennomsnitt					35.6

Tabell 3.7 Resultat fra Shore A hardhetsmålinger for PBXN-110 A massen benyttet til viskositetsmålinger.

Emne Nr.	Shore A _{15s} for PBXN-110 B Blanding				Gjennomsnitt
1	35	32.5	36	34	34.4
2	30	31.5	35	35.5	33.0
3	36	33	33.5	33	33.9
4	35	32.5	34.5	36.5	34.4
5	39	37	33	34	35.8
Gjennomsnitt					34.3

Tabell 3.8 Resultat fra Shore A hardhetsmålinger for PBXN-110 B.

Emne Nr.	Shore A _{15s} for PBXN-110 B Viskositet				Gjennomsnitt
1	32.5	32.5	30.5	33	32.1
2	34	35	32.5	30.5	33.0
3	34	34	35.5	35	34.6
Gjennomsnitt					33.2

Tabell 3.9 Resultat fra Shore A hardhetsmålinger for PBXN-110 B massen benyttet til viskositetsmålinger.

Blanding Nr.	Type støp	Gjennomsnittlig Shore A _{15s}
PBXN-110 A	Mekanisk egenskaper	35.1
	Viskstøp	35.6
PBXN-110 B	Mekanisk egenskaper	34.3
	Viskstøp	33.2
Gjennomsnittlig Shore A_{15s}		34.6

Tabell 3.10 Oppsummering av resultatene fra hardhetsmålingene for PBXN-110 A og B blandningene.

Appendix A

A.1 Kontrollrapport for grov RS-HMX



High Energy Materials

KONTROLLRAPPORT

etter EN 10204 - 3.1

Kjøper/Mottaker Forsvarets Forskningsinstitutt Instituttstaben Postboks 25, 2007 Kjeller		Bestillingsnummer V/ Gunnar Nevstad Bestillingsdato 13.10.08		Rapport nummer 523 Kontroll dato 15.10.08				
Produsent Chemring Nobel AS N-3475 Sætre NORGE		Produksjonsdato		Offentlig oppdragsnummer				
Lot nummer		Mengde 6 kg						
Sprengstofftype RS-HMX, grov for knading til PBXN-110		Leveringsbetingelser/Teknisk underlag MIL-H-45444B, Amendment 4						
Analyseresultater for loten								
	HMX HPLC	RDX HPLC	Smelte- punkt	Uløst i acetone	Uorganisk uløst	Uløste partikler på USSS No.	Surhet	
KRAV	≥ 98,0 %	≤ 2,0 %	≥ 277 °C	≤ 0,03 %	≤ 0,05 %	40 0	60 ≤ 5	≤ 0,02 %
RESULTAT Sats 482/06	100,0	0,0	285	0,00	< 0,03	0	0	0,00
	Kornfordeling, % gjennom USSS Nr.				Krystall-modifikasjon IR			
KRAV	12	50	100	200	α-HMX ikke detekterbar			
RESULTAT Sats 482/06	100	55	18	8	ok			
Min. 15 % vannfuktet								
<hr style="width: 20%; margin: auto;"/> Kvalitetssjef								

Figur App. 1 Kontrollrapport for benyttet grov RS-HMX, benyttet til framstilling av PBXN-110.

A.2 Kontrollrapport fin RS-HMX



KONTROLLRAPPORT

etter EN 10204 - 3.1

High Energy Materials

Kjøper/Mottaker Forsvarets Forskningsinstitutt Instituttstaben Postboks 25, 2007 Kjeller			Bestillingsnummer V/ Gunnar Nevstad Bestillingsdato 13.10.08			Rapport nummer 524 Kontroll dato 15.10.08		
Produsent Chemring Nobel AS N-3475 Sætre NORGE			Produksjonsdato			Offentlig oppdragsnummer		
Lot nummer			Mengde 2,5 kg					
Sprengstofftype RS-HMX, fin for knading til PBXN-110			Leveringsbetingelser/Teknisk underlag MIL-H-45444B, Amendment 4					
Analyseresultater for loten								
	HMX HPLC	RDX HPLC	Smelte- punkt	Uløst i acetone	Uorganisk uløst	Uløste partikler på USSS No.		Surhet
KRAV	≥ 98,0 %	≤ 2,0 %	≥ 277 °C	≤ 0,03 %	≤ 0,05 %	40 0	60 ≤ 5	≤ 0,02 %
RESULTAT Sats 835/08	100,0	0,0	282	0,00	< 0,03	0	0	0,00
	Kornfordeling, % gjennom USSS Nr.		Malvern laser		Krystall-modifikasjon IR			
KRAV	200	325	µm		α-HMX ikke detekterbar			
RESULTAT Sats 835/08	82	62	23		ok			
Min. 15 % vannfuktet								
<hr/> Kvalitetssjef								



Figur App. 2 Kontrollrapport for benyttet fin RS-HMX i fremstillingen av PBXN-110.

A.3 Kontrollrapport overdrager sprengstoff

Til overdragere for Gaptest og bestemmelse av kritisk diameter ble RDX/voks benytt.

DYNO
High Energy Materials

KONTROLLRAPPORT B
etter EN 10204 - 3.1 B

Kjøper/Mottaker Forsvarets Forskningsinstitutt Avd. for våpen og matriell Postboks 25, 2007 Kjeller			Bestillingsnummer V/ Gunnar Nevstad Bestillingsdato 19.08.05		Rapportnummer 372 Kontrolldato 24.08.05	
Produsent Dyno Nobel ASA N-3476 Sætre NORWAY			Produksjonsdato 04-05.04		Offentlig oppdragsnummer	
Lot nummer			Mengde 20 kg			
Sprengstofftype RDX/VOKS/GRAFITT, 94,5/4,5/1			Leveringsbetingelser/Teknisk underlag			
Analyseresultater for loten						
	Sammensetning			HMX i RDX	Surhet	Fuktighet og flyktige bestanddeler
	RDX	Voks	Grafit			
KRAV	94,5 ± 0,5 %	4,5 ± 0,5 %	1,0 ± 0,2 %	4 - 15 %	≤ 0,02 %	≤ 0,1%
RESULTAT 08/02	94,7	4,4	0,9	6,1	0,00	0,01
	Uløste partikler på USSS No. 60	Vacuum stabilitet	Volumvekt	Kornfordeling %, USSS No.		
				> 12	> 18	< 100
KRAV	Ingen	≤ 1,2 ml/g	0,86 - 0,93g/ml	0	≤ 2	≤ 1
RESULTAT 08/02	ingen	0,05	0,88	0	0	0,8
 Kvalitetssjef						
						

Figur App. 3 Kontrollrapport for benyttet overdragersprengstoff.

Appendix B Mikseordrer og blandeskjema

B.1 Blanding PBXN-110 A

**MIKSEORDRE
FOR
SPRENGSTOFF/DRIVSTOFF**

Dato for utstedelse 20/10/2008	Utsteder GON	Batch nr. PBXN-110 A
Herdetemperatur 50°C	Herdetid 4 DØGN	

Nr.	Ingrediens	Lot Nr.	Vekt %	Vekt (g)
1	HTPB R45-HT LO	307065	5.800	232.00
2	IDP (5.365 wt.%)	Best. Nr. 4500 142029	5.697	227.88
3	AO-4426	40903165	0.05	2.00
4	Lecithin	Best. Nr. 3-3929	0.70	28.00
5	HMX Grade B, Class 3, Dyno Nobel	482/06	61.04	2441.60
6	HMX Grade B, Class 2, Dyno Nobel	835/08	26.16	1046.40
7	Dibutyltin dilaurate (DBTDL)	286865 191	0.002	0.0800
8	Isophorone Diisocyanate (IPDI)	BA 30696393	0.551	22.04
9				
10				
TOTAL VEKT				4000.00

REKVIRERTE PRØVER:

<input checked="" type="checkbox"/>	Spesifikk vekt	<input checked="" type="checkbox"/>	Intermediate Scale Gap test: rør...6.. stk
<input checked="" type="checkbox"/>	Viskositet Brookfield	<input type="checkbox"/>	Detonasjons hastighet.....mm.....stk
<input checked="" type="checkbox"/>	Strekprøving	<input type="checkbox"/>	Oppvarmingstest.....stk
<input type="checkbox"/>	Plate Dent	<input type="checkbox"/>	Beskytningstest.....stk
<input checked="" type="checkbox"/>	Shore A Hardness	<input type="checkbox"/>	Burning Tube test.....stk

MERKNADER:

Innhold av HMX 87.2 vekt%. Forhold klasse 3/klasse 2 7:3.

Dato for miksing 26/10-08	Klokkeslett herdar tilsatt: 11 ¹⁰	Klokkesett ferdigmikset: 11 ⁴⁰	Operatør: GON
-------------------------------------	--	---	-------------------------

MIKSESKJEMA

Dato for miksing 26/10-08	Operatør GON	Batch nr. PBXN-110 A
Produkt type PBXN-110 med RS-HMX?		

Merknader/Prosedyre	Klokke- slett start	Miksetid (min)	Vakuum (mbar)		TEMPERATUR °C		
			Krav	Målt	I oljen	I kjelen	Ønsket i kjelen
Tilsett HTPB, Lecithin, IDP, AO-2246, DBTDL	8 ³⁵	40	10	10	84	20.5 37.8	75 ₊₃
Tilsett 2/3 HMX kl.3	9 ¹⁵	5 20	-- 10	-- 10	84	37.6 58.1	55 ₊₃
Tilsett ½ HMX kl 2	9 ⁴⁰	5 10	-- 10	-- 10	90	56.7 58.8	55 ₊₃
Tilsett Rest HMX kl 3	9 ⁵⁵	5 10	-- 10	-- 10	90	58.3 56.5	50 ₊₃
Tilsett 1/4 HMX kl. 2	10 ¹⁰	5 10	-- 10	-- 10	90	55.0 55.4	50 ₊₃
Tilsett Rest HMX kl. 2	10 ²⁵	5 10	-- 10	-- 10	90	53.0 53.0	50 ₊₃
Tilsett Nedskraping	10 ⁴⁰	30	10	10	90	52.1 52.8	50 ₊₃
Tilsett IPDI	11 ¹⁰	5 10	-- 10	-- 10	90	49.9 48.0	50 ₊₃
Tilsett Nedskraping	11 ²⁵	15	10	10	92	46.6 53.3	50 ₊₃
Tilsett							

VISKOSITET°CcP SPINDEL RPM

VISKOSITET°CcP SPINDEL RPM

VISKOSITET°CcP SPINDEL RPM

VISKOSITET°CcP SPINDEL RPM

VISKOSITET°CcP SPINDEL RPM

MERKNADER:

Resultatet fra viskositetsmålingene er gitt på eget skjema.

B.2 Blanding PBXN-110 B**MIKSEORDRE
FOR
SPRENGSTOFF/DRIVSTOFF**

Dato for utstedelse 20/10/2008	Utsteder GON	Batch nr. PBXN-110 B
Herdetemperatur 50°C	Herdetid 4 DØGN	

Nr.	Ingrediens	Lot Nr.	Vekt %	Vekt (g)
1	HTPB R45-HT LO	307065	5.800	232.00
2	IDP (5.365 wt.%)	Best. Nr 4500142029	5.697	227.88
3	AO-4426	40903165	0.05	2.00
4	Lecithin	Best. Nr. 3-3929	0.70	28.00
5	HMX Grade B, Class 3, Dyno Nobel	482/06	61.04	2441.60
6	HMX Grade B, Class 2, Dyno Nobel	835/08	26.16	1046.40
7	Dibutyltin dilaurate (DBTDL)	286865 191	0.002	0.08
8	Isophorone Diisocyanate (IPDI)	BA 30696393	0.551	22.04
9				
10				
TOTAL VEKT				4000.00

REKVIRERTE PRØVER:

- Spesifikk vekt
- Viskositet Brookfield
- Strekkprøving
- Plate Dent
- Shore A Hardness

- Intermediate Scale Gap test: rør....4..stk
- Detonasjons hastighet...|...mm.....
- Oppvarmingstest.....stk
- Beskytningstest.....stk
- Burning Tube test.....stk

MERKNADER:

Innhold av HMX 87.2 vekt%. Forhold klasse 3/klasse 2 7:3.

Dato for miksing 26/10-08	Klokkeslett herdar tilsatt: 14 ⁵⁰	Klokkesett ferdigmikset: 15 ²⁰	Operatør: GON
------------------------------	---	--	------------------

MIKSESKJEMA

Dato for miksing 26/10-08	Operator GON	Batch nr. PBXN-110 B
Produkt type PBXN-110 med RS-HMX?		

Merknader/Prosedyre	Klokke-slett start	Miksetid (min)	Vakuum (mbar)		TEMPERATUR °C		
			Krav	Målt	I oljen	I kjelen	Ønsket i kjelen
Tilsett HTPB, Lecithin, IDP, AO-2246, DBTDL	12 ¹⁵	40	10	10	76	28.7 42.8	75 ₊₃
Tilsett 2/3 HMX kl.3	12 ⁵⁵	5 20	-- 10	-- 10	74	42.7 52.7	55 ₊₃
Tilsett ½ HMX kl 2	13 ²⁰	5 10	-- 10	-- 10	73	51.3 52.0	55 ₊₃
Tilsett Rest HMX kl 3	13 ³⁵	5 10	-- 10	-- 10	73	50.6 53.3	50 ₊₃
Tilsett 1/4 HMX kl. 2	13 ⁵⁰	5 10	-- 10	-- 10	73	53.3 54.3	50 ₊₃
Tilsett Rest HMX kl. 2	14 ⁰⁵	5 10	-- 10	-- 10	73	52.5 53.8	50 ₊₃
Tilsett Nedskraping	14 ²⁰	30	10	10	78	51.7 50.6	50 ₊₃
Tilsett IPDI	14 ⁵⁰	5 10	-- 10	-- 10	78	48.5 49.4	50 ₊₃
Tilsett Nedskraping	15 ⁰⁵	15	10	10	78	47.7 52.3	50 ₊₃
Tilsett							

VISKOSITET°CcP SPINDEL RPM
 VISKOSITET°CcP SPINDEL RPM
 VISKOSITET°CcP SPINDEL RPM
 VISKOSITET°CcP SPINDEL RPM
 VISKOSITET°CcP SPINDEL RPM

MERKNADER:

Resultatet fra viskositetsmålingene er gitt på eget skjema.

Appendix C Viskositetsmålinger

C.1 Blanding PBXN-110 A

Brookfield RV serie viskosimeter		Spindel Nr. : T-D	Herder tilsatt: 11:10	Blanding Nr.: PBXN-110 A
27/10-08 Klokkeslett	Tid (min)	Hastighet (RPM)	Brookfield avlesning	Viskositet (cps)
11:48	38	0.5	22.0	880 000
11:49	39	1	40.0	800 000
11:50	40	1	37.0	740 000
11:52	42	0.5	23.5	940 000
12:26	76	0.5	24.0	960 000
12:28	78	0.5	24.5	980 000
12:29	79	1	48.5	970 000
12:30	80	1	46.0	920 000
12:42	92	0.5	25.0	1 000 000
12:44	94	0.5	25.5	1 020 000
12:45	95	1	44.5	890 000
12:46	96	1	45.5	910 000
13:10	120	0.5	25.5	1 020 000
13:12	122	0.5	26.0	1 040 000
13:13	123	1	50.5	1 010 000
13:14	124	1	50.0	1 000 000
13:15	125	0.5	30.0	1 200 000
13:17	127	0.5	26.5	1 060 000
13:45	155	0.5	26.0	1 040 000
13:47	157	0.5	25.5	1 020 000
13:48	158	1	49.0	980 000
13:49	159	1	53.5	1 070 000
14:12	182	1	52.0	1 040 000
14:13	183	1	51.0	1 020 000
14:14	184	0.5	29.0	1 160 000
14:16	186	0.5	28.5	1 140 000
14:36	206	0.5	28.5	1 140 000
14:38	208	0.5	28.5	1 140 000
14:39	209	1	60.0	1 200 000
14:40	210	1	59.0	1 180 000
14:55	225	0.5	32.0	1 280 000
14:57	227	0.5	31.5	1 260 000
14:58	228	1	61.0	1 220 000
14:59	229	1	61.5	1 230 000
15:12	242	0.5	33.0	1 320 000
15:14	244	0.5	32.5	1 300 000
15:15	245	1	60.5	1 210 000
15:16	246	1	61.0	1 220 000

Tabell App 1 Resultater fra viskositetsmålingene for blanding PBXN-110 A ved 50°C.

C.2 Blanding PBXN-110 B

Brookfield RV serie viskosimeter		Spindel Nr. : T-D	Herder tilsatt: 14:50	Blanding Nr.: PBXN-110 B
27/10-08 Klokkeslett	Tid (min)	Hastighet (RPM)	Brookfield avlesning	Viskositet (cps)
15:27	37	1	27.5	550 000
15:28	38	1	29.5	590 000
15:30	40	0.5	21.0	840 000
15:32	42	0.5	20.5	820 000
15:54	64	0.5	20.5	820 000
15:56	66	0.5	20.5	820 000
15:57	67	1	33.0	660 000
15:58	68	1	32.5	650 000
16:24	94	0.5	21.0	840 000
16:26	96	0.5	20.0	800 000
16:27	97	1	33.0	660 000
16:28	98	1	34.0	680 000
16:54	124	0.5	20.0	800 000
16:56	126	0.5	21.0	840 000
16:57	127	1	34.5	690 000
16:58	128	1	34.5	690 000
17:22	152	0.5	21.5	860 000
17:24	154	0.5	21.0	840 000
17:25	155	1	35.0	700 000
17:26	156	1	36.5	730 000

Tabell App 2 Resultater fra viskositetsmålingene for blanding PBXN-110 B ved 50°C.

Referanser

- (1) Naval Sea Systems Command, Department of the Navy; MIL-DTL-82901A(OS), Detail Specification, Explosive, Plastic-Bonded, Cast PBXN-110, 13 May (2002).
- (2) The NIMIC Energetic Materials Compendium, v3.00 (2003): NIMIC, NATO HQ, B-1110 Brussels, Belgium.
- (3) NATO STANAG 4439: Policy for introduction, assessment and testing for Insensitive Munitions (MURAT) (1995).
- (4) C, Spycerelle, A. Freche, S. Lecume (2003): "I-RDX Comparative Analytical Characterization. State of the Art". Reduced Sensitivity RDX Technical Meeting, Meppen, Tyskland, 17-20 November.
- (5) Jørn D. Kristiansen, Øyvind H. Johansen, Alf Berg, Terje Halvorsen, Richard Gjersøe, Kjell-Tore Smith and Mona Christensen (2004): "Steps towards reduced sensitivity HMX (RS-HMX): Reduced shock sensitivity in both Cast-Cured and Pressable PBX compositions", IM&EM Technology Symposium, Materials & Techniques for Reducing Sensitivity, San Francisco, 15-17 November.
- (6) Nevstad Gunnar Ove (2005): Egenskaper til PBXN-110 med standard HMX, FFI/RAPPORT-2005/00005, Ugradert.
- (7) Nevstad Gunnar Ove (2005): Testing av sjokkfølsomhet til PBXN-110, FFI/RAPPORT-2005/02666, Ugradert
- (8) Nevstad Gunnar Ove (2006): PBXN-110 studier, FFI/RAPPORT-2006/00937, Ugradert.
- (9) Nevstad Gunnar Ove (2007): Testing og karakterisering av PBXN-110, FFI/RAPPORT-2007/01569, Ugradert.
- (10) NATO Standardization Agency (NSA) (2002): STANAG 4488 PCS (Edition 1) Explosives, Shock Sensitivity Tests; NSA/0883-PPS/4488, 12 September. NATO/PFP UNCLASSIFIED.
- (11) Nevstad Gunnar Ove (2002): Fremstilling og testing av PBXN-109 med Fransk I-RDX, FFI/RAPPORT-2002/3206, Ugradert.
- (12) Hartmut Badners and Carl-Otto Leiber (1992): Method for the Determination of the Critical Diameter of High Velocity Detonation by Conical Geometry, *Propellants, Explosives, Pyrotechnics* **17**, 77-81.
- (13) Eriksen Svein, Skarbøvik Knut, Larsen Øivind, Hagen Norman (1984): Bestemmelse av detonasjonsparametre, FFI/NOTAT-84/4041, Unclassified.
- (14) Gibbs&Popolato (1980): LASL Explosive Property Data, Los Alamos Data Center for Dynamic Material Properties.
- (15) Laurence E. Fried, W. Michael Howard, P. Clark Souers (1998): Cheetah 2.0 User's Manual, UCRL-MA-117541 Rev. 5; Energetic Materials Center Lawrence Livermore National Laboratory, 20 August.
- (16) NATO /AC/326 Subgroup 1) (2004): AOP-7, Edition 2 Rev. 1, "Manual of Data Requirements and Tests for the Qualification of Explosive Materials for Military Use".