



Jämförelse mellan svenska gjutkrav och MIL-STD

ELISABETH BEMM, SVANTE KARLSSON, MAGNUS BERGH

FOI är en huvudsakligen uppdragsfinansierad myndighet under Försvarsdepartementet. Kärnverksamheten är forskning, metod- och teknikutveckling till nytta för försvar och säkerhet. Organisationen har cirka 1000 anställda varav ungefär 800 är forskare. Detta gör organisationen till Sveriges största forskningsinstitut. FOI ger kunderna tillgång till ledande expertis inom ett stort antal tillämpningsområden såsom säkerhetspolitiska studier och analyser inom försvar och säkerhet, bedömning av olika typer av hot, system för ledning och hantering av kriser, skydd mot och hantering av farliga ämnen, IT-säkerhet och nya sensorers möjligheter.



FOI
Totalförsvarets forskningsinstitut
Försvars- och säkerhetssystem
147 25 Tumba

Tel: 08-55 50 30 00
Fax: 08-55 50 31 00

www.foi.se

FOI-R--2795--SE Underlagsrapport
ISSN 1650-1942 Juni 2009

Försvars- och säkerhetssystem

Elisabeth Bemm, Svante Karlsson, Magnus Bergh

Jämförelse mellan svenska gjutkrav och MIL-STD

Titel	Jämförelse mellan svenska gjutkrav och MIL-STD
Title	Comparison between Swedish casting specifications and MIL-STD
Rapportnr/Report no	FOI-R—2795—SE
Rapporttyp Report Type	Underlagsrapport Base data report
Sidor/Pages	28 p
Månad/Month	juni
Utgivningsår/Year	2009
ISSN	
Kund/Customer	FMV
Forskningsområde Programme area	
Delområde Subcategory	51 VVS med styrda vapen 51 Weapons and Protection
Projektnr/Project no	E26287
Godkänd av/Approved by	Bengt Eiderfors
FOI, Totalförsvarets Forskningsinstitut	FOI, Swedish Defence Research Agency
Avdelningen för Försvars- och säkerhetssystem	Defence & Security, Systems and Technology
Grindsjöns forskningscentrum	
147 25 Tumba	SE-147 25 Tumba

Sammanfattning

Efter att ett antal olyckor med granater under utskjutning i slutet på sextioalet inträffade, genomfördes den s k spaltgruppsutredningen för att utreda hur denna typ av olyckor skulle kunna förhindras. Spaltgruppens rapport har lett fram till att de gjutkravsbestämmelser som gäller i Sverige är något hårdare än t ex MIL-STD. En jämförelse har därför gjorts i denna rapport mellan dessa standarder för att utreda om granater som tillverkats enligt MIL-STD lever upp till de svenska kraven enligt spaltgruppen.

Strukturdynamiksimuleringar visar att initiering genom stötkompression är högst osannolik. Vidare utpekade breda bottenpalter som kritiska utifrån experiment i litteraturen, men initiering anses ändå som högst osannolik för granater med rund botten och god vidhäftning mellan sprängämneskropp och hölje. Vad gäller kaviteter visar experiment att en radie av 3,5 mm under en konstant acceleration av 20000g kan leda till initiering i TNT. Beräkningarna antyder att sådan kollaps är osannolik, men här behövs ytterligare experiment i det aktuella området, gärna i kombination med en mer sofistikerad materialmodell. Sfäroidiska kaviteter kan emellertid komprimeras, men uppskattningar av värmeutveckling under adiabatisk kompression antyder att temperaturen då blir klart lägre än kritisk temperatur från experiment under likartade förhållanden.

Nyckelord: granat, spalter, kaviteter, TNT, känslighetsanalys

Summary

During late sixties a number of accidents occurred with grenades that were initiating at launching. A study was performed by "Spaltgruppen" to analyse how these types of accidents could be prevented. The final report presented by "Spaltgruppen" resulted in that the standard requirements for melt casting of TNT in Sweden is more stringent than for example MIL-STD. A comparison between these standards has been performed to being able to determine whether grenades produced according to MIL-STD conforms to the Swedish requirements and is reported on in this report.

Structural Dynamics Simulations show that initiation through shock compression can be considered highly unlikely. Furthermore, experiments suggest that broad air gaps at the bottom of a grenade are considered critical. However, initiation during launch is still considered highly unlikely for grenades with a round bottom and where a (close to) frictionless interface between charge and cover can be excluded. When it comes to cavities, experiments show that a radius of 3.5 mm and a constant acceleration of 20000g can lead to initiation in TNT. At the acceleration considered within this project, simulation indicates that spherical cavities do not collapse due to material strength. However, further experiments are required, preferably in combination with a more sophisticated material model. For spheroidal (oblate) cavities compression is achieved, but an estimate of the heating due to adiabatic compression suggests that the temperature in the surrounding explosive is well below the critical temperature for initiation reported in experiments performed under similar conditions.

Keywords: premature initiation, TNT, air gap, cavities, casting defects

Innehållsförteckning

1	Inledning	7
2	Jämförelse mellan olika gjutkravsbestämmelser	8
2.1	Skillnader i kravställning	8
2.2	Skillnader i kontroll av färdiga granater	14
2.3	Skillnader i gjutmetoder vid tillverkning.....	14
2.4	Övriga faktorer av betydelse för säkerhet och funktion	16
3	Teoretisk utvärdering av defekter i laddningen	17
3.1	Kortfattad modellbeskrivning.....	17
3.2	Initiering genom stötkomprimering.....	18
3.3	Initiering genom kompression av luftfickor.....	19
3.3.1	Bred bottenspalt.....	19
3.3.2	Smal bottenspalt	20
3.3.3	Sfärisk eller sfäroidisk bottenkavitet/spalt.....	21
3.4	Jämförelse mellan TNT och Comp B.....	23
4	Diskussion	24
5	Slutsatser och rekommendationer	26
6	Referenser	28

1 Inledning

Efter olyckorna på Ravlunda och Gryt gjordes en utredning av den s.k. Spaltgruppen i syfte att minimera förutsättningarna för att farliga spalter och kaviteter uppkommer vid gjutning av ammunition till eldrörspjäser¹. Det framkom tidigt att god vidhäftning mellan sprängämnet och hylsan var mycket viktigt. Detta resulterade i att en speciell lack togs fram för att belägga insidan av granathylsorna. För att ytterligare öka vidhäftningen blandades finkornig trotyl in i lacken, vilket har visat sig fungera väl. Man kom också fram till att det är viktigt att granathylsorna håller rätt temperatur (ca 80° C) när de fylls med smält trotyl och att de placeras i ett vattenbad för att säkerställa att stelningen startar i botten av hylsan.

De krav och rekommendationer som framställs i Spaltgruppsrapporten är minimikrav för gjutning av granater i Sverige. Vid tillämpning av dessa krav anses granater som är säkra att hantera och använda kunna tillverkas. Dessa krav har sedan använts som utgångspunkt vid utformning av olika standardiserade Tillverkningsbestämmelser (TB) för specifika granater. Ofta är kraven i TB något högre än de accepterade minimikraven i Spaltgruppsrapporten. Det har också förmodats att kraven i svenska TB är något hårdare än i internationella standarder (MIL-STD). En jämförelse har därför gjorts mellan dessa standarder för att utreda om granater som tillverkats enligt MIL-STD lever upp till de svenska kraven enligt Spaltgruppen.

Det kommer att ske samarbete med Norge inom ARCHER-projektet (155 mm artilleripjässystem) och det skulle därför vara önskvärt att kunna använda norska granater i vapensystemet. Eftersom norska granater har tillverkats enligt MIL-STD har också de krav och metoder som tillämpats för tillverkning av granater på NAMMO i Karlskoga respektive på NAMMO i Raufoss jämförts. Resultatet från dessa jämförelser presenteras i denna rapport nedan.

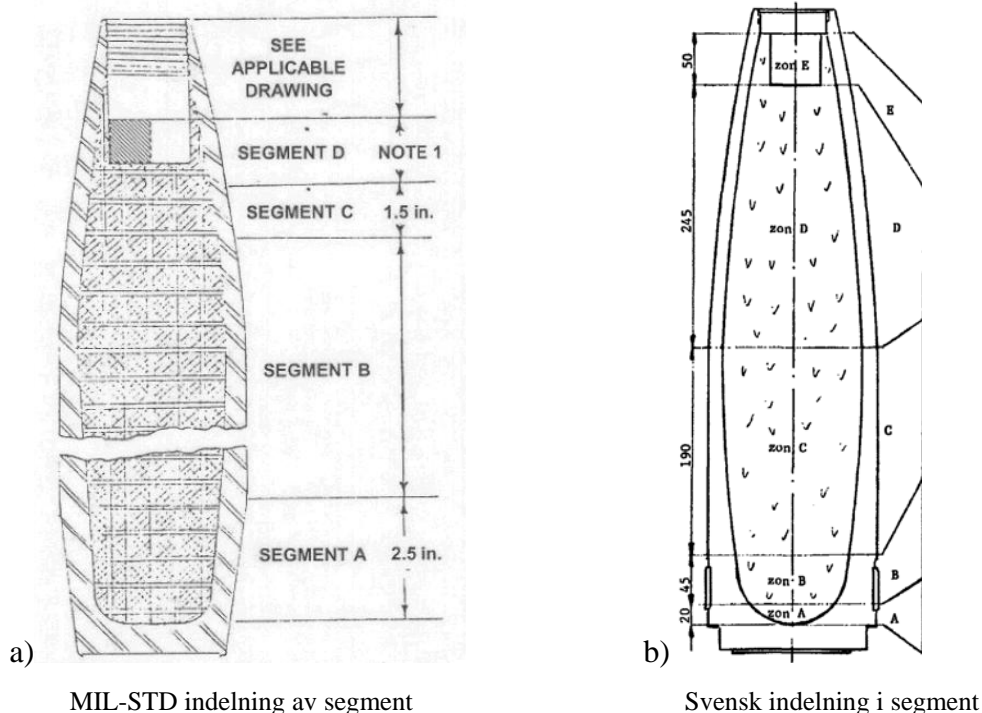
Vidare presenteras en teoretisk studie som behandlar effekten av olika defekter i laddningen. Resultat från strukturdynamiksimuleringar i kombination med experimentell data från litteraturen sammanfattas för de defekter som betraktas som mest kritiska: spalter och kaviteter i granatens botten.

2 Jämförelse mellan olika gjutkravsbestämmelser

2.1 Skillnader i kravställning

De olika gjutkravsbestämmelser som vi har jämfört är MIL-DTL-60377A-C och Tillverkningsbestämmelse gjutning sgr m/54-77 (dok.nr 0 808 327), som i fortsättningen refereras till som (MIL-STD) och (TB), samt gjutkravsbestämmelser från Spaltgruppsrapporten. För att få en uppfattning om produktionstekniska skillnader mellan tillverkning av granater på NAMMO i Karlskoga (enligt TB) och i Raufoss (enligt MIL-STD då tillverkning skedde där) har lämpliga personer där intervjuats.

En svårighet med att jämföra gjutkravsbestämmelserna enligt Spaltgruppen och TB med MIL-STD är att zonindelningen för olika segment av granaten från botten delen och upp till toppen skiljer sig åt mellan dessa standarder. I MIL-STD (figur 1 a) är zonerna mindre i toppen av granaten medan de är mindre i botten av granaten i de svenska standarderna (figur 1b).

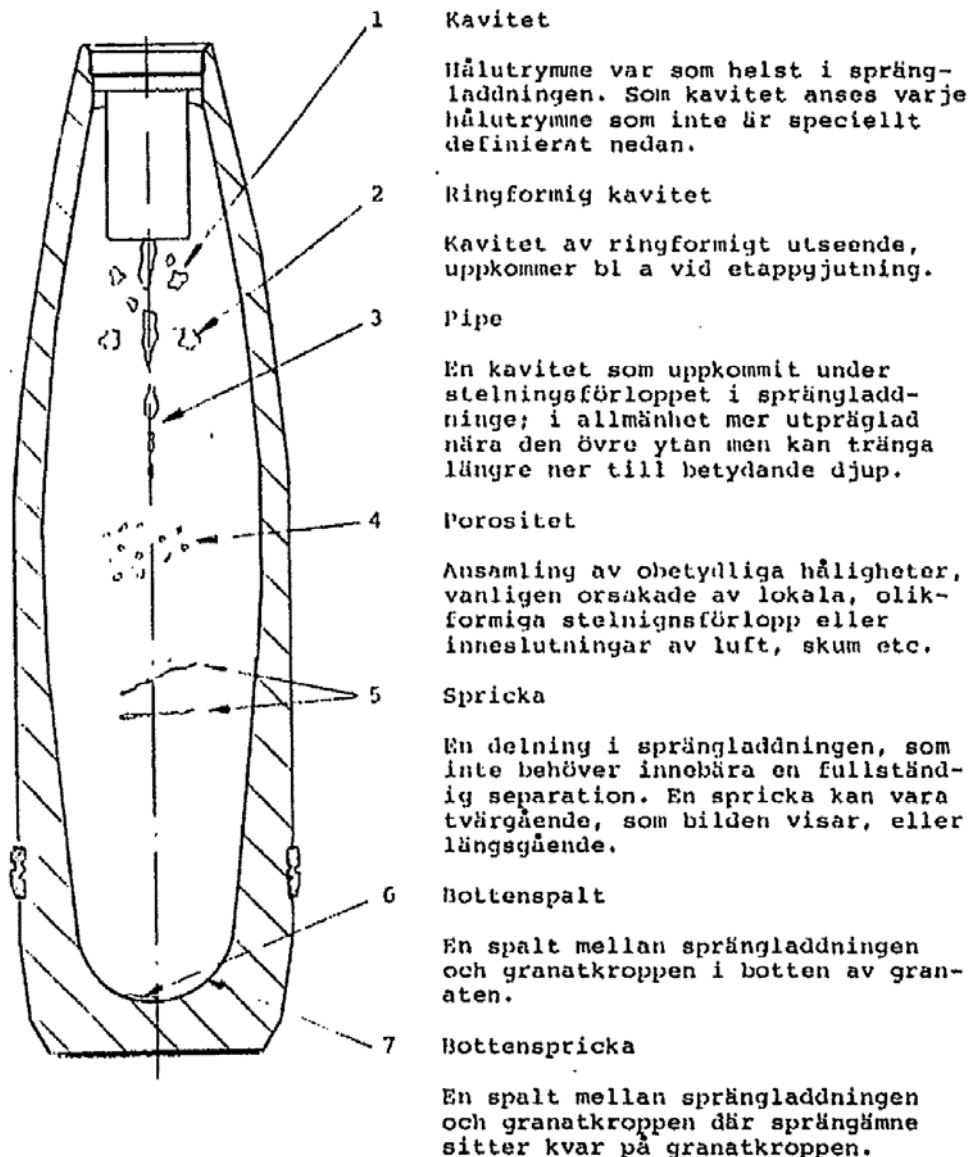


Figur 1. Zonindelning enligt a) MIL-STD och b) Spaltgruppen och TB. Bilderna är tagna ur MIL-DTL-60377C respektive TB för sgr m/54-77.

För att kunna göra en mera rättvis jämförelse mellan den svenska standarden och MIL-STD måste zonindelningen göras jämförbar. Eftersom Zon A och B+C i MIL-STD nästan motsvaras av zon A+B respektive C+D i den svenska

zonindelningen, har vi valt att slå ihop dessa zoner i Spaltgruppens gjutkrav i tabell 1.

De olika typer av fel som kan uppkomma vid tillverkning av gjutna granater beskrivs i figur 2. I de olika gjutkravsbestämmelserna anges tillåtna gränsvärden för dessa typer av fel. Hur dessa tillåtna gränsvärden skiljer sig åt mellan de olika gjutkravsbestämmelserna kan ses i tabell 1-2. Defekter anges här som projicerad yta vilket underlättar vid analysen av röntgenfilmer.



Figur 2. Beskrivning av olika typer av fel som kan uppkomma vid gjutning av granater. Bilden är tagen ur TB för sgr m/54-77.

Tabell 1. Jämförelse av kravställning på gjutna granater enligt MIL-STD och Spaltgruppen. Förklaring av zonindelningen återfinns i figur 1 a-b.

Typ av fel	MIL-STD				Gjutkrav enligt Spaltgruppen						
	Zon A	Zon B	Zon C	Zon D	Zon A	Zon B	Zon C	Zon D	Zon E	Zon A+B	Zon C+D
Projicerad längd av enstaka kaviteter	3,2 mm	12,7 mm	12,7 mm	19 mm							
Summa projicerad area av kaviteter	10 mm ²	161 mm ²	323 mm ²	323 mm ²	3,5 mm ²	16 mm ²	80 mm ²	100 mm ²	300 mm ²	19,5 mm ²	180 mm ²
Sprickor , genomgående, (max projicerad bredd)											
Sprickor, ej genomgående (max projicerad bredd)	0,8 mm	0,8 mm	1,6 mm		0,1 mm	0,3 mm	0,5 mm (x2)	0,5 mm (x2)	0,75 mm (x2)		
Summerad area av porositeter	202 mm ²	424 mm ²	424 mm ²	-	0	16 mm ²	160 mm ²	160 mm ²	160 mm ²	16 mm ²	320 mm ²
Pipes (projicerad bredd)	0	6,4 mm	6,4 mm	-							
Pipes (projicerad yta)	0	161 mm ²	323 mm ²	-	0	0	120 mm ²	120 mm ²	-		240 mm ²
Ringformig kavitet (max projicerad bredd)	0	0	6,4 mm	-							
Bottenspalt	0,38 mm				0,1 mm						

Tabell 2. Jämförelse av kravställning på gjutna granater enligt Spaltgruppen och svensk TB. Förklaring av zonindelningen återfinns i figur 1 b.

Typ av fel	Gjutkrav enligt Spaltgruppen					Svensk TB för sgr m/54-77				
	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
Projicerad längd av enstaka kaviteter						2 mm	3 mm	6 mm	6 mm	10 mm
Summa projicerad area av kaviteter	3,5 mm ²	16 mm ²	80 mm ²	100 mm ²	300 mm ²	3,5 mm ²	16 mm ²	80 mm ²	100 mm ²	300 mm ²
Sprickor , genomgående, (max projicerad bredd)						-	1 st 0,3 mm	2 st vardera max 0,5 mm	2 st vardera max 0,5 mm	2 st max summa 1,5 mm
Sprickor, ej genomgående (max projicerad bredd)	0,1 mm	0,3 mm	0,5 mm (x2)	0,5 mm (x2)	0,75 mm (x2)	-	0,3 mm	1,0mm	1,0 mm	-
Summerad area av porositeter	0	16 mm ²	160 mm ²	160 mm ²	160 mm ²	-	16 mm ²	160 mm ²	160 mm ²	160 mm ²
Pipes (projicerad bredd)						-	-	4 mm	4 mm	-
Pipes (projicerad yta)	0	0	120 mm ²	120 mm ²	-	-	-	120 mm ²	120 mm ²	-
Ringformig kavitet (max projicerad bredd)										
Bottenspalt	0,1 mm					-				

Av de defekter som förekommer i tabell 1-2 är bottenpalter de som är mest kritiskt för säkerheten. Maximalt tillåten bottenpalt enligt Spaltgruppens gjutkrav är 0,1 mm, medan de tillåter en bottenpalt på 0,38 mm i MIL-STD (se tabell 1). För att undvika kassation vid tillverkning har kraven om tillåtna bottenpalter skärpts upp i TB jämfört med Spaltgruppens gjutkrav (se tabell 2).

Näst efter bottenpalter bedöms kaviteter vara mest kritiska enligt MIL-STD. Defekter i granatkroppens nedre del är mer kritiskt än defekter i den övre delen. Detta beror på att den nedre delen av granaten utsätts för mycket större påkänningar än den övre delen under accelerationen på grund av att den utsätts för tyngden av hela granatkroppen. Vid jämförelse av gjutkraven i tabell 1 tillåts endast en projicerad area av $3,5 \text{ mm}^2$ i den nedersta, mest kritiska, delen av granaten i de svenska gjutkraven medan motsvarande area är 10 mm^2 i MIL-STD. Zon A i MIL-STD motsvaras dock ungefär av zon A + B i de svenska gjutkraven. För hela denna del av granaten skall då 10 mm^2 i MIL-STD istället jämföras med 19 mm^2 i svenska gjutkrav. Detta betyder att i den mest kritiska delen av granaten (motsvarande svensk zon A) är de svenska gjutkraven hårdare medan i den del av granaten som motsvarar zon A i MIL-STD är de svenska gjutkraven mindre skarpa än MIL-STD.

Vid en jämförelse av tillåtna ytan av porositeter (se tabell 1) att de svenska gjutkraven är betydligt strängare i den nedre delen av granaten både om endast svenska zon A (0 mm^2) och svenska zon A + B (16 mm^2) jämförs med zon A i MIL-STD (202 mm^2).

Det är ingen större skillnad mellan de tillåtna projicerade ytan av pipes eller projicerade bredden av sprickor mellan MIL-STD och Spaltgruppens gjutkrav (se tabell 1).

Eftersom förekomst av bottenpalter är mer kritiskt än andra möjliga defekter bedöms den mest signifikanta skillnaden i gjutkrav mellan MIL-STD och svenska gjutkrav utgöras av kraven kring tillåtna bottenpalter (0,38 mm respektive 0,1 mm). Konsekvenserna av förekomst av bottenpalter diskuteras vidare i avsnitt 3.

Vid jämförelse mellan Spaltgruppens gjutkrav och TB (se tabell 2) framgår att skillnaden mellan dem är mycket små förutom att TB inte tillåter någon bottenpalt överhuvudtaget medan Spaltgruppen tillåter bottenpalter av 0,1 mm.

Enligt MIL-STD får inga främmande föremål alls finnas i explosivämnesladdningen. Enligt TB får dock främmande föremål som anges i tabell 3

förekomma i det gjutna sprängämnet. Förutom de specificerade föroreningarna i tabell 3, får även rester av andra sprängämnen och aluminium förekomma.

Tabell 3. Främmande föremål som får förekomma i det gjutna sprängämnet enligt TB.

Typ av föremål	Storlek	Max antal per granat
Hårda partiklar: <ul style="list-style-type: none"> - Metaller (magnetiska o omagnetiska) - Keramiska material (sand, glas etc) 	<ul style="list-style-type: none"> - Trådform (maxlängd 4 mm, maxtjocklek 0,7 mm) - Korn (maxmått 0,7 mm) - Flaga (maxmått 4 mm, maxtjocklek 0,7 mm) 	Totalt 2 st
Mjuka partiklar: <ul style="list-style-type: none"> - Hård plast - Trä 	Högst 5 mm	Totalt 5 st

De olika versionerna av MIL-STD A-C har också jämförts för att se om det förekommer några signifikanta skillnader. Det finns inga skillnader i de tekniska kraven mellan de olika versionerna av denna standard. De andra standarder och övriga dokument som de hänvisar till och som utgör en del av MIL-STD skiljer sig dock något åt mellan de olika versionerna (se tabell 4). Vi har inte granskat dessa dokument men bedömer inte att det påverkar kvaliteten på slutprodukten.

Tabell 4. Specifikationer, dokument och andra standarder som de hänvisar till i de olika versionerna av MIL-STD

Version	Dokument-nummer	Dokumenttitel
A	MIL-A-2550	Ammunition and Special Weapons, General Specification for Standards
	MIL-STD-105	Sampling Procedures and Tables for Inspection by Attributes
	MIL-STD-109	Quality Assurance Terms and Definitions
	MIL-STD-453	Inspection, Radiographic
	MIL-STD-1168	Lot Numbering of Ammunition
	MIL-STD-1235	Single and Multilevel Continuous Sampling Procedures and Tables for Inspection by Attributes
B	MIL-A-48078	Ammunition, Standard Quality Assurance Provisions, General Specification for Standards
	MIL-STD-109	Quality Assurance Terms and Definitions
	MIL-STD-453	Inspection, Radiographic
	MIL-STD-1235	Single and Multilevel Continuous Sampling Procedures and Tables for Inspection by Attributes

C	MIL-STD-1168	Lot Numbering of Ammunition
	MIL-STD-1916	DoD preferred methods for acceptance of product
	ASTM E 1742	Standard Practice for Radiographic Examination

2.2 Skillnader i kontroll av färdiga granater

Enligt både TB och MIL-STD skall samtliga granater genomgå radiografering för att upptäcka olika typer av fel enligt tabellen 1 och 2 ovan.

Enligt TB skall en granat per skift (ett skift = 200 granater) sågas isär i längdriktningen i två lika delar. Olika typer av synliga fel i snittytan kan då upptäckas och mätas. Enligt Raufoss kontrollerades dock även där en granat per skift (ett skift = 72 granater) enligt samma metod då granater tillverkades där trots att detta inte krävs enligt MIL-STD. På de itusågade granaterna utförs även vidhäftningsprov. Provet sker i en urslagsapparat under 12 s vid ett lufttryck på 6 kp/cm² och en slaglängd av 10-15 mm.

Enligt MIL-STD skall istället granaten delas parallellt med botten, ungefär 10 cm upp, fram till centrum av granataxeln. Ett snitt skärs sedan genom botten mot toppen fram till förra snittet så att en kil av stål kan tas bort och en eventuell bottenspalt eller sprickor kan studeras. Det är de åtta granater per skift, där störst bottenspalter (dock ej över 0,38 mm) vid röntgning upptäckts, som skall kontrolleras på detta sätt. Om det inte finns så många granater där bottenspalt upptäckts, tas resterande granater ut slumpmässigt ur detta skift.

I Raufoss skedde ballistisk testning av färdiga granater enligt MIL-STD. Ingen för tidig tändning i eldröret eller banan fick då ske vid utskjutning med ett tryck av 41000 plus 3000 psi. Ingen sådan typ av testning förekommer i Karlskoga.

2.3 Skillnader i gjutmetoder vid tillverkning

Både TB och MIL-STD utgör ett minimikrav vid tillverkning. Det kan därför förekomma att högre krav ställs vid olika tillverkningsställen där man uppger att en viss standard följs. TB och MIL-STD anger också endast vilka krav som ställs och inte hur de skall uppfyllas. Det är därför viktigt att jämföra skillnader i gjutmetoder mellan olika tillverkningsställen och inte bara vad som anges för gjutkrav i de olika standarderna. Nedan följer en beskrivning av de gjutmetoder som används/ användes på NAMMO i Karlskoga respektive Raufoss.

Det framförs i spaltgruppens rapport att det är mycket viktigt att det är en god vidhäftning av explosivämnet mot hylsan. En rad olika åtgärder kan göras för att åstadkomma detta. Förutom att granathylsorna rengörs och kontrolleras okulärt (ingen smuts eller skador) före gjutning, behandlas också innerytan på olika sätt. Fosfatering sker för att minska risken för korrosion och lackering samt förvärmning av granaten för att öka vidhäftningen mot explosivämnet. Alla dessa åtgärder har vidtagits både i Raufoss och i Karlskoga.

Det är också viktigt att inga främmande föremål eller partiklar förekommer i gjutmassan. I Karlskoga sker silning av gjutmassan före användning medan man i Raufoss endast ställde det som ett krav till leverantören att inga främmande föremål fick förekomma i gjutmassan. MIL-STD ställer dock hårdare krav än TB på att det inte får förekomma främmande föremål i explosivämnet i de färdiga granaterna.

Både i Karlskoga och i Raufoss tillsätts/tillsattes hexanitrostilben (HNS) till gjutmassan för att minska risken för att sprickor bildas under stelningsförloppet. Denna tillsats har stor påverkan på den färdiga granatens kvalitet och mängden defekter som kan uppstå.

För att säkerställa en jämn kvalitet på gjutningen, är en stor del av gjutprocessen automatiserad genom processtyrning vid båda tillverkningsställena. Nedan följer några exempel på processtyrningsparametrar

- temperaturen på hylsan före gjutning
- temperaturen på smältan vid gjutning
- tid och tryck för vakuumbehandling
- tid från gjutning till svalning

I Karlskoga och Raufoss tillämpas något som benämns som stavprogrammet under stelningsförloppet. Stavprogrammet innebär att en doppvärmare ("hot finger") placeras i gjutkroppen. Doppvärmaren förs sedan upp med en viss hastighet under stelningsförloppet samtidigt som mer gjutmassa kontinuerligt fylls på. I Karlskoga är granaten placerad i vattenbad under stelningsförloppet medan det i Raufoss istället skedde kylning genom att luft blåstes över granaterna från golvet. I USA sker endast vattenbadskylning på utsidan av granaten trots att samma standard för gjutning används där som i Raufoss. Avsikten med stavprogrammet är att undvika att luftinneslutningar bildas under stelningsförloppet.

2.4 Övriga faktorer av betydelse för säkerhet och funktion

Övriga faktorer som har betydelse för säkerhet och funktion men som inte är relaterade till själva gjutningen redovisas i tabell 5.

Tabell 5. Övriga faktorer som har betydelse för säkerhet och funktion.

Andra faktorer av betydelse för säkerhet och funktion	Konsekvens
Kvalitén på metallen i hylsan.	Har betydelse för storleken på och antalet splitter.
Ojämn tyngdpunktsaxel, rotationssymmetri på hylsan.	Kan resultera i en avvikande bana. Målet kan då missas och granaten kan bli farlig för egen trupp.
Sprickbildning i hylsan.	Smälta kan tränga in under gjutningen och granaten kan initieras vid utskjutning.
Ojämnheter på granatens utsida.	Påverkar luftmotståndet och därmed skottvidd och träffsannolikhet.
Avtätning.	Minskar risk för att explosivämne tränger in i gängor då granaten utsätts för höga temperaturer.
Förekomst av oljefilm i gördelspåret vid fastsättning.	Ofullständig fastsättning av gördeln som kan slitas av vid utskjutning.

Dessa olika faktorer har inget med själva gjutningen att göra men är ändå faktorer som påverkar säkerheten vid användning, hantering och lagring av granaterna. Avtätning som innebär beläggning av gängor med någon typ av t.ex. lim minskar risken för att explosivämne från granaten (som smält trotyl) skall tränga in i gängor då granaten utsätts för höga temperaturer. I Karlskoga sker avtätning genom beläggning med någon typ av lim medan detta inte förekom i Raufoss. I kallare klimat som i Sverige har kanske inte detta så stor betydelse eftersom trotyl smälter först vid 80°C men vid internationella insatser är det inte orimligt att dessa temperaturer kan uppnås och därmed förekomst av avtätning är av större vikt.

3 Teoretisk utvärdering av defekter i laddningen

Mekanismerna bakom antändning av explosivämnen med defekter, så som spalt mot inneslutning, kaviteter och sprickor, utgör idag ett aktivt forskningsområde. Detta betyder att man kan finna både teoretiska modeller och experimentella undersökningar i litteraturen, men det antyder samtidigt att kunskapen om processerna bakom denna typ av initiering är bristfällig. I detta avsnitt presenteras beräkningar av effekten av några kritiska defekter som kan leda till oavsiktlig initiering under utskjutning av granat. På grund av svårigheten i att modellera dessa komplexa förlopp, görs också jämförelser med experiment från litteraturen.

Vi har valt att fokusera på spalter och kaviteter i granatens botten då dessa anses som mest kritiska. Defekterna är av samma typ som anges i MIL-STD, och sannolika initieringsmekanismer har valts med stöd av litteraturen, främst rapporter ur Detonationssymposierna [4-6].

3.1 Kortfattad modellbeskrivning

Nedan följer en kortfattad beskrivning av de fysikaliska modellerna samt hur resultaten för de olika typerna av defekter kan tolkas. Resultaten jämförs också med experimentella resultat från litteraturen. Samtliga modeller är konstruerade utifrån en *worst-case*-filosofi där approximationerna ska leda till högre sannolikhet för initiering. Strukturodynamiken i laddningen under utskjutning simuleras i LS-DYNA (med axi-symmetrisk geometri) där granatens hölje fungerar som en stel kropp. För att studera värsta tänkbara situation antas sprängämneskroppen kunna glida fritt mot höljet. Granatkroppens rörelse följer angiven accelerationskurva för ARCHER.

För TNT har en elastisk materialmodell använts med följande fysikaliska parametrar [8]

Densitet: $1,624 \text{ g/cm}^3$

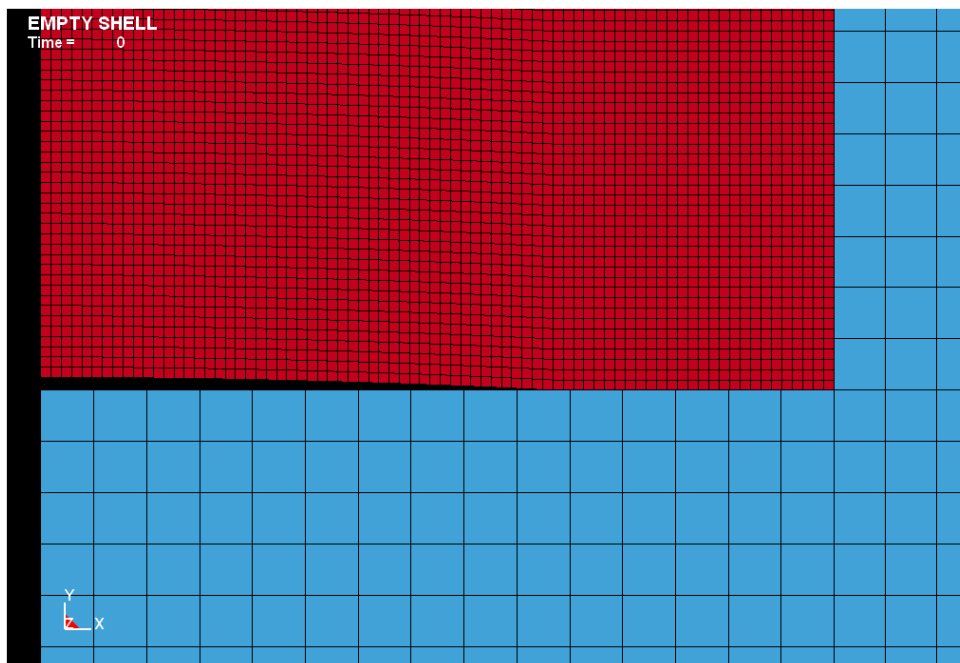
E-modul: 0,0755 Mbar

Poissons tal: 0,293.

Granaten approximeras med en cylinder med höjden 55 cm. Innerdiametern har varierats, men är i simuleringarna nedan 12,2 cm. För den adiabatiska kompressionen har ideala gaslagen använts, korrigerad för höga tryck [2].

3.2 Initiering genom stötkomprimering

Först undersöktes möjligheten till initiering genom stötkomprimering av TNT i närvaro av bottenspalt med olika form och höjd. För en spalt med sfärisk form, som visas i figur 3, erhöles ett relativt lågt topptryck i explosivämnet. Spaltens bredd och höjd varierades, men det maximala trycket som funktion av position och tid översteg aldrig 1 kbar. Tryckstegringstiden följer accelerationskurvan och är 2-3 ms. Detta tryckförlopp ligger i linje med tidigare beräkning [2] och ligger långt under (mer än 30 ggr) vad experimentella undersökningar anger som kritisk nivå [2-3]. Initiering kan därför anses högst osannolik.



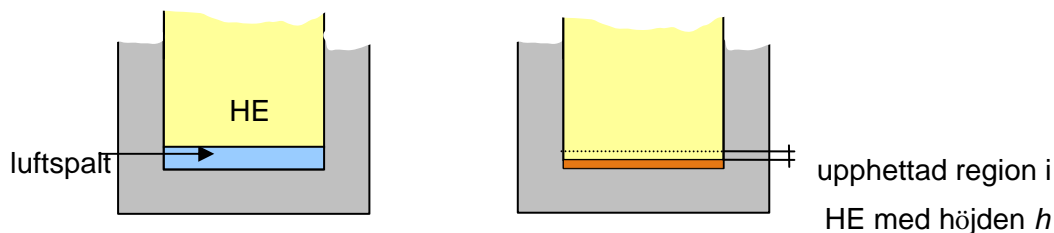
Figur 3. Bottenspalt med sfärisk form i förenklad granatgeometri. Röda beräkningsceller motsvarar TNT och blå granatens hölje. En simulering av denna typ kan ge information om vilka tryck som uppnås i laddningen, samt huruvida en viss typ av spalt/kavitet kollapsar eller inte under accelerationsförloppet.

Simulering med rektangulär spalt ger ett hastigare tillslag i höljets botten och därmed ett något högre topptryck (strax under 2 kbar), men fortfarande långt under kritiskt topptryck, jämfört med sfärisk spalt.

Man kan notera att en viss spalthöjd ger ett högsta tryck. Detta topptryck inträffar vid en spalthöjd runt 1 mm för den aktuella höjden på sprängämneskroppen och för de valda materialegenskaperna. Slutsatsen är att initiering genom stötkompression av sprängämnet är högst osannolik.

3.3 Initiering genom kompression av luftfickor

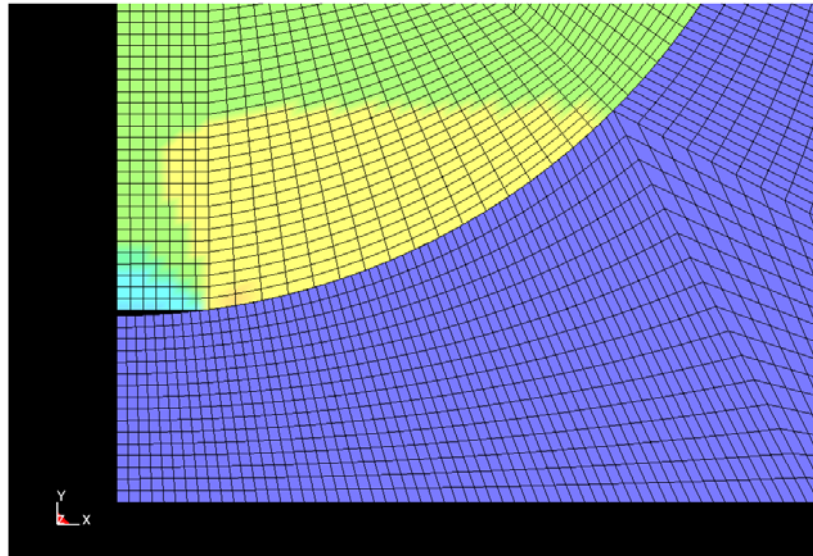
Även om accelerationen och granatens geometri är densamma indikerar modellen med stöd av litteraturen att olika typer av luftfickor kan ge avsevärda skillnader i sannolikhet för initiering, även om de har samma volym och förekommer i botten av granaten. Nedan redogörs för de viktigaste fallen av luftfickor.



Figur 4: Bred bottenspalt i förenklad granatgeometri.

3.3.1 Bred bottenspalt

Figur 4 visar en genomskärning av en bred bottenspalt. Denna typ av defekt har undersökts experimentellt [5-6] och vi kan från litteraturen uppskatta risken för initiering. Starckenberg et al. [5] visar att ett mekaniskt stimulus strax under 6 kbar (oklar angivelse) under 0,5 ms kan leda till initiering i TNT vid förekomst av en bred bottenspalt med en höjd runt 0,6 mm. I linje med detta klargör Bélanger et al. [6] att en acceleration av 25000 g sannolikt leder till initiering för en spalthöjd av 0,5 mm. Samma studie visar att ingen initiering erhålls (på 5 identiska försök) då spaltens höjd är 0,3 mm. (Liknande resultat fås för Comp-B.) Denna typ av bottenspalt kan därför anses kritisk. Man kan dock notera att de förhållanden som gäller i experimenten ovan skulle motsvara att sprängämneskroppen "plötsligt lossnar" från höljet vid den maximala accelerationen. En annan viktig faktor i experimenten ovan är att de har en platt spaltyta, dvs. spalten kan beskrivas med ett cylindriskt hålrum. Då granathöljet i fråga har en rundad botten undersöks effekten av detta med strukturdynamiksimulering. Figur 5 visar geometrin i en simulering av en bottenspalt med höjden 0,5 mm. Under simuleringens gång komprimeras spalten och når ett minimum vid en höjd av 0,3 mm. Om elasticitetsmodulen halveras blir höjden ca 0,1 mm. Detta resulterar i en relativt liten volymsförändring och därmed en mycket begränsad upphettning av luften i spalten. Detta antyder att rund botten i granaten begränsar kompressionen eftersom sprängämnet måste deformeras. Samma slutsats gäller om höjden sätts till 0,38 mm (maximalt accepterad höjd i MIL-STD).



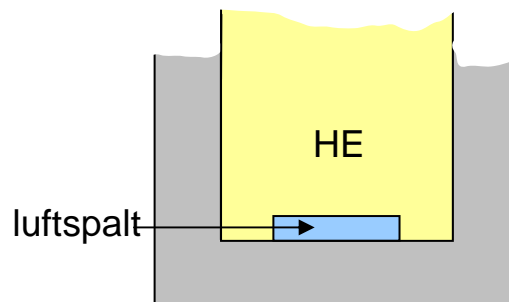
Figur 5: Beräkningsnätet i en strukturdynamiksimulering med rundad botten. Trycket markeras i färg i sprängämneskroppen (gult=högt, blått=lågt). Spalten är här 0.5 mm hög och 7.7 mm bred. Den elastiska materialmodellen indikerar en kompression av spalten under accelerationsförloppet, men volymsförändringen är inte stor nog att orsaka någon betydande upphettning av luften i spalten.

Sammanfattningsvis visar alltså experiment att en bred bottenspalt kan leda till initiering under kraftigare accelerationsförhållanden (20000g) än i ARCHER. Simuleringar antyder dock att rundad botten begränsar kompressionen, och temperaturhöjningen skulle då bli marginell. Om sprängämnet inte tillåts glida eller lämna höljets innervägg (full vidhäftning) blir kompressionen och därmed upphettningen begränsad ytterligare.

3.3.2 Smal bottenspalt

Om bottenspaltan inte sträcker sig fram till granathöljets vägg kommer sprängämnet att dämpa stöten. Strukturdynamiksimuleringar har utnyttjats för att undersöka huruvida smala bottenspalter kan komprimeras. Simuleringarna indikerar att utdragna spalter liknande den i figur 6 kan komprimeras under givna förhållanden. Här krävs dock även en uppskattning av temperaturen under en sådan kompression. Som kritisk temperatur används försök av Beedham et al. [4]. Där testas känsligheten av TNT med avseende på stöt i kombination med upphettning. Resultaten visar att en stöt på 1,3-2,0 kbar under 1-2 ms i kombination med snabb upphettning till runt 650 °C ger en sannolikhet för antändning med omkring 50 %. Med stöd av litteraturen [3,4] väljer vi därför att undersöka huruvida upphettning genom adiabatisk kompression i kombination med svag stöt (som den beskriven ovan) skulle kunna leda till initiering under givna förhållanden. Upphettning genom adiabatisk kompression modelleras genom att låta toptrycket vid spalten komprimera gasen i spalten. Den tillförda inre energin i gasen värmer sedan ett skikt i det omgivande sprängämnet. En sådan beräkning bör överskatta temperaturen (då vi bortser från värmeledning och mekaniskt kompressions-

arbete). Resultatet indikerar att temperaturen ökar med ökande spalthöjd, men håller sig under 100 °C för en spalthöjd upp till 2 mm. Detta är fortfarande långt under den kritiska temperaturen och denna typ av spalt anses därför inte som kritisk.

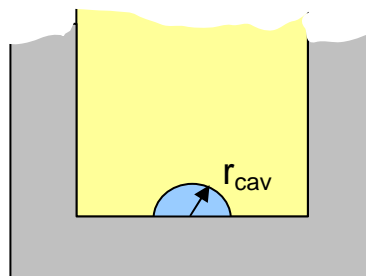


Figur 6: Smal bottenspalt i förenklad granatgeometri.

Beräkningar indikerar alltså att upphettningen i en smal bottenspalt blir marginell.

3.3.3 Sfärisk eller sfäroidisk bottenkavitet/spalt

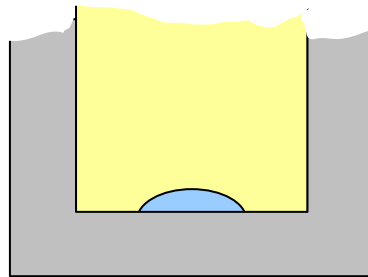
Två viktiga skillnader gör sig gällande när vi betraktar en luftficka med formen av en halvsfär (figur 7) eller sfäroid (figur 8). För det första kommer det att krävas ett större mekaniskt arbete för att komprimera en sfär/sfäroid. För det andra blir temperaturen sannolikt högre i en sådan konvergerande geometri [4]. Strukturdynamiksimuleringar visar att halvsfäriska bottenspalter som den i figur 7 inte komprimeras nämnvärt under rådande förhållanden. Samtliga simuleringar har även gjorts med halverad elasticitetsmodul för att undersöka eventuella effekter av mjukare sprängämne (t ex på grund av deformationsupphettning).



Figur 7: Halvsfärisk bottenkavitet; exempel på konvergerande geometri.

För sfäroidiska kaviteter erhålls dock kompression. Då detta endast sker för mycket breda sfäroider med en form lik den i figur 8 kan denna typ av defekt lämpligast klassas som smal bottenspalt (med rund form). Det är därför rimligt att använda den maximala höjden för bottenspalt på denna defekt (0.38 mm i MIL-STD)

Man kan notera att tillämpad modell ger ett temperaturmaximum i angränsande sprängämne för smalast möjliga, men fortfarande komprimerbara, sfäroid. För värsta tänkbara höjd och bredd och med flera *worst case*-approximationer fås denna temperatur till 330 °C, vilket fortfarande är klart under den kritiska temperaturen definierad ovan [3]. Höjd och bredd för denna sfäroid är 1 respektive 18 mm. Om höjden istället sätts till 0.38 mm fås en maximal temperatur runt 100 °C.



Figur 8: Halvsfäroidisk bottenkavitet/spalt. Dessa utdragna bottenkaviteter liknar den smala bottenspalten i figur 4.

Här bör tilläggas att materialmodellen för sprängämnet (TNT) sannolikt inte är tillräcklig för att ge en noggrann beskrivning av kollaps av kavitet. Exempelvis antyder experimentella studier under vakuum [5] att endast deformationsvärmets under kollaps av kavitet kan leda till initiering (acceleration: 25000g) [6].

Simuleringar indikerar alltså att materialstyrkan begränsar kompressionen i sfäriska kaviteter medan experiment visar att en sfärisk bottenkavitet med radien 3,5 mm kan leda till initiering i TNT vid en konstant acceleration av 20000 g [6].

3.4 Jämförelse mellan TNT och Comp B

Resultaten ovan gäller för TNT, men samma beräkningar kan göras för Comp B genom att ändra materialdatan. *LLNL explosives handbook* [8] anger en densitet på $1,726 \text{ g/cm}^3$, en elasticitetsmodul på 0.1355 Mbar och poissons tal till 0,266. Comp B är således hårdare och man kan därför förvänta sig en mindre volymsförändring under kompression jämfört med TNT. För en sfäroidisk bottenspalt i TNT med höjden 0,38 mm sker kollaps när bredden överstiger ca 13 mm. För Comp B krävs att bredden ökas till runt 22 mm. Detta kan förklaras genom att kollaps motverkas på ett mer effektivt sätt i en smalare kavitet (konvergerande geometri). För Comp B som är starkare inträffar därför kollaps vid större spaltbredd.

4 Diskussion

De krav och rekommendationer som framställs i Spaltgruppsrapporten utgör minimikrav för gjutning av granater i Sverige. Vid tillämpning av dessa krav anses granater som är säkra att hantera och använda kunna tillverkas. Dessa krav har sedan använts som utgångspunkt vid utformning av olika standardiserade Tillverkningsbestämmelser (TB) för specifika granater. TB och MIL-STD anger dock endast vilka krav (kan vara hårdare än dem enligt Spaltgruppen) som ställs och inte hur de skall uppfyllas. Det är därför viktigt att jämföra skillnader i gjutmetoder mellan olika tillverkningsställen och inte bara vad som anges för gjutkrav i de olika standarderna.

Vid diskussioner med tillverkare av granater har det framkommit att även om det är viktigt att kontrollera att inga fel förekommer i granaterna är ofta mät-noggrannheten för uppmätning av storleken på sprickor, kaviteter, spalter osv i samma storleksordning som själva defekten. Små skillnader i kravställning på granaterna har därför liten betydelse och det är istället tillverkningsmetoden av granaterna som är viktigare för att förebygga och undvika att olika typer av fel uppkommer.

Genom beräkningar och jämförelse med experiment i litteraturen uppskattas effekten av olika defekter i sprängämnet. När det gäller bottenpalter så indikerar modellen att initiering genom stötkompression är högst osannolikt och den kritiska mekanismen kan anses vara upphettning genom adiabatisk kompression av luft, ev. kombinerat med deformationsupphettning i sprängämnet. Materialmodellen visar också att breda bottenpalter (längs hela eller nästan hela botten) kan anses som mer kritiska än smala, där materialstyrkan motverkar kollaps. Vi noterar att den övre gräns för tillåten spalthöjd som finns i MIL-STD (0,38 mm) ligger under höjden där initiering erhålls (0,5 mm) i det mest relevanta experimentet, samt att accelerationen i detta experiment (20000 g konstant) är högre än toppvärdet för ARCHER-kurvan (16500 g). Vidare visar beräkningar att faktorer som rund granatbotten och god vidhäftning mot innerväggen begränsar möjligheten till kollaps. Spalter med rundad yta mot explosivämnet (benämnd sfäroidisk kavitet/spalt, se figur 6) kan leda till upphettning under kollaps, men om höjden begränsas till 0.38 mm hamnar temperaturen under kritisk temperatur med god marginal.

En ytterligare faktor som är relevant vid en riskanalys är typen av sprängämne. Denna rapport har fokus på TNT, men simuleringar har även gjorts med Comp B. Som man kan förvänta sig av materialparametrarna är Comp B något styvare än TNT och motstår därför kollaps i större utsträckning. Denna skillnad i känslighet bekräftas även i experiment [6]. Vi vill emellertid tillägga att trots denna märkbara skillnad i känslighet visar t ex [3,6] att en initiering i Comp B tenderar att följas av ett snabbare brinnförlopp än i TNT, vilket kan öka risken för att detonation sker i eldröret. Detta får stöd av Starkenberg et. al. [5] som

rapporterar en längre tid-till-detonation för TNT (dock med större variation) vilket istället ökar risken för loppbrisad.

När det gäller sfäriska bottenkaviteter visar en kanadensisk studie [6] att en bottenkavitet med radien 3,5 mm kan leda till initiering i TNT under en konstant acceleration av 20000 g. (Någon undre gräns för acceleration eller radie fastställs inte.) Då beräkningarna inte modellerar deformations-uppvärmning (t ex skjuvband) på ett tillfredställande sätt så bedömer vi att rekommendationer för sfäriska kaviteter bör baseras på experiment i det aktuella området i kombination med en mer detaljerad materialmodell för sprängämnet.

Avslutningsvis kan konstateras att en ökad kunskap om initieringsmekanismer är önskvärd inom flera områden. Här kan också nämnas att ett långsiktigt utvecklingsarbete pågår vid FOI idag, med avsikten att kunna prediktera initiering och efterföljande DDT-förlopp utifrån given termo-mekanisk stimuli i godtycklig geometri. Ett sådant redskap i kombination med lämpliga experiment skulle ge möjlighet att utreda i detalj vilka defekter som är kritiska under givna utskjutningsförhållanden.

5 Slutsatser och rekommendationer

Eftersom förekomst av bottenspalter är mer kritiskt än andra möjliga defekter bedöms den mest signifikanta skillnaden i gjutkrav mellan MIL-STD och svenska gjutkrav utgöras av kraven kring tillåtna bottenspalter (0,38 mm respektive 0,1 mm).

Enligt vår bedömning är det annars inga större skillnader mellan de tillverkningsmetoder som används i Sverige respektive Norge. De skillnader som identifierats är främst att ingen silning av gjutmassan och avtätning av granaterna gjordes i Norge samt att kylningen av granaterna under stelningsförloppet sker i vattenbad i Sverige medan luftkyllning underifrån tillämpades i Norge. Att ingen avtätning har skett på de norska granaterna kan dock vara av betydelse om de används vid internationella insatser.

15,5 cm artillerigranater modell M-107 är och har varit i bruk inom främst NATO under lång tid. Det avfyrades 10-tusentals sådana granater under första Gulf kriget, under den senare konflikten i Irak och Afghanistan av amerikanska, kanadensiska och brittiska förband. Det har inte rapporterats någon olycka från något av länderna med katastrofal utgång som FOI känner till. Det kan ha förekommit brisader i banan som troligen inte får så stort genomslag även om det rapporteras. Eftersom vi inte har haft tillgång till något annat statistiskt underlag gör vi därför bedömningen, med ovanstående som underlag, att gjutkraven enligt MIL-DTL är tillräckligt stränga för att en loppbrisad inte skall kunna inträffa med tolerabel risk.

Beräkningar indikerar att initiering genom stötkompression är högst osannolik och vi identifierar initiering genom stöt i kombination med adiabatisk kompression av luft som den kritiska mekanismen. Då detta förlopp är synnerligen komplext och inga generella, validerade modeller finns tillgängliga vare sig på FOI eller i den öppna litteraturen så kan inga *definitiva* gränsvärden ges för defekter i en laddning. Däremot kan kritiska omständigheter identifieras och värderas.

De två defekter som anses som kritiska är breda bottenspalter och sfäriska kaviteter i botten eller i det nedersta segmentet av en granat. För breda bottenspalter har initiering erhållits i TNT för något högre spalter än MIL-STD (0.5 mm) samt högre acceleration (20000 g konstant). Faktorer som mildrar omständigheterna är rund granatbotten och god vidhäftning mot höljet. Beräkningarna indikerar att båda dessa faktorer (var för sig) begränsar möjligheten till adiabatisk kompression. Vi menar att dessa resultat kan tolkas som att initiering är högst osannolik i en bottenspalt med höjden 0.38 mm *om granatens botten är rund och vidhäftningen kan anses som god*. Comp B kan i detta sammanhang betraktas som aningen mindre känsligt än TNT [6].

Med anledning av experiment från litteraturen på sfäriska kaviteter vill vi understryka att även om initiering inte har påvisats under aktuella förhållanden, så kan en risk föreligga eftersom TNT antänts under något starkare acceleration, och för en kavitetsradie nära den som anges i MIL-STD. För att kunna fastslå en kritisk radie som funktion av acceleration krävs ytterligare experiment i det aktuella området, helst i kombination med en mer sofistikerad materialmodell för sprängämnet.

6 Referenser

1. Demin, Bo, "Spaltgruppen, Arbetsgruppen för säkerhet hos sprängämnen i artilleriammunition med särskild hänsyn till spalter och kaviteter, Slutrapport". FMV, 1982.
2. H. Almström, "Antändningsrisker vid tappade icke fördämda laddningar med tillämpning på mina F8", FOA rapport C 20451-04, 1982.
3. B. C. Taylor, J. Starkenberg, L. H. Ervin, "An experimental investigation of Composition-B ignition under artillery setback conditions", Ballistic Research Laboratory, ARBRL-TR-02276, 1980.
4. K. Beedham, A. S. Dyer, W. I. Holmes, "The thermal initiation and growth of reaction in secondary explosives under transient confinement", Proceedings of the Fifth International Symposium on Detonation", (1970).
5. J. Strakenberg et al., "Sensitivity of several explosives to ignition in the launch environment", Proceedings of the Ninth International Symposium on Detonation", (1989).
6. C. Bélanger, "Study of explosive shell fillings with defects in simulated gun launch conditions", Proceedings of the Ninth International Symposium on Detonation", (1989).
7. S. P. Marsch, "LASL Shock Hugoniot Data" Los Angeles University of California Press, (1980).
8. B. M. Dobratz, P. C. Crawford, "LLNL Explosives handbook", UCRL-52997, (1985).