



Masteruppsats i Militärteknik, (30 hp)

Författare Fredrik Johnsson	Förband SWEDEC	Program HSU-T 12-14
Kurskod 2HU007	Ämne Militärteknik	Nivå Masteruppsats, E-nivå
Examinator Åke Sivertun	Huvudhandledare Bengt Vretblad	Handledare Björn Persson

Experimentellt vidareutvecklad modell för dimensionering av skadebegränsande åtgärder mot RSV-penetration vid ammunitionsröjning

Vid röjning av RSV-ammunition saknas idag adekvat beslutstöd för att dimensionera skadebegränsande åtgärder mot jetstrålens verkan. I uppsatsen vidareutvecklas en beräkningsmodell som författaren tidigare föreslagit. Syftet är att skapa ett verktyg som kan införas i ammunitionsröjningsverksamheten.

Fullskaliga skjutförsök har genomförts för att klarlägga inverkan av förhållanden som är typiska vid ammunitionsröjning; en skyddskonstruktion byggd av sandsäckar och med ett långt detonationsavstånd till röjningsobjektet. Försöksresultatet visar att den grundläggande hydrodynamiska penetrationsteorin inte är användbar för dessa förhållanden. Vidare ger sandsäckskonstruktionen signifikant bättre skydd mot jetstrålen än en homogen grusbädd.

Genom störningsanalys har känsligheten hos de enskilda parametrarna i beräkningsmodellen för verksamhetstypiska fel utretts. Härfter har Monte Carlo-simulering använts för att analysera den sammanlagda inverkan som dessa fel kan ge. Resultatet har legat till grund för att bestämma modellens säkerhetsmarginal.

Militär nytta innebär att modellen skall kunna tillämpas fältmässigt, med korta tidsförhållanden och utan tillgång till avancerade beräkningshjälpmedel. Detta har lett fram till att ett enkelt diagram inkluderats i det kompletta dimensioneringsverktyget.

Verktyget föreslås införas i regelverk och utbildningssystem för att avhjälpa den brist som råder idag.

Nyckelord

riktad sprängverkan, ammunitionsröjning, skadebegränsande åtgärder, penetrationsdjup, sandsäckar, grus, sand



Master Thesis in Military Technology, (30 HE credits)

Author Fredrik Johnsson	Military Unit SWEDEC	Degree Programme HSU-T 12-14
Course Code 2HU007	Subject Military Technology	Level Advanced, Master Thesis
Examiner Åke Sivertun	Principal Supervisor Bengt Vretblad	Supervisor Björn Persson

Experimentally developed model for the design of protective measures against shaped charge jet penetration during EOD operations

During the clearance of shaped charge ammunition, explosive ordnance disposal (EOD) personnel lack adequate means for the design of protective measures against the jet. In this thesis a calculation model, previously suggested by the author, is developed further. The aim is to create a tool that can be applied to EOD operations.

Full-scale experiments have been conducted to clarify the effects of conditions that are typical for EOD operations: protective measures built from sandbags with a long standoff distance to the ordnance. The results indicate that the hydrodynamic penetration theory is not suitable for these conditions. Furthermore, a sandbag construction provides significantly better protection against the jet than a homogeneous gravel construction.

By disturbance analysis, the sensitivity of the individual parameters in the model is studied for typical errors. Subsequently, Monte Carlo simulation has been used to analyse the effect these errors can cause. The simulation results have then been used to determine the model's margin of safety.

Military utility implies that it should be possible to use the model under field conditions, with limited time frames and without access to advanced calculating means. This has resulted in a simple diagram included in the comprehensive design tool.

It is proposed that the tool is implemented in regulations and curricula in order to remedy today's lack of decision support.

Keyword

shaped charge, explosive ordnance disposal, protective measures, penetration depth, sandbags, gravel, sand

Innehållsförteckning

Innehållsförteckning.....	iii
Förord.....	vi
1. Inledning.....	1
1.1. Bakgrund.....	1
1.2. Problemformulering.....	2
1.3. Syfte.....	3
1.4. Uppgiftsställning.....	3
1.5. Teoretisk referensram.....	4
1.6. Forskningsöversikt.....	4
1.7. Avgränsningar.....	5
1.8. Centrala begrepp.....	6
1.9. Metod.....	7
1.10. Källor inklusive källkritik.....	8
1.11. Egen erfarenhet.....	9
2. Den militära nyttan.....	10
2.1. Dimensionerande kostnader.....	10
2.2. Verksamhetsspecifika krav.....	11
3. RSV-strålens penetrationsegenskaper.....	12
3.1. Grundläggande hydrodynamisk penetrationsteori.....	12
3.2. Semi-empiriska penetrationsteorier.....	13
3.3. Teorier baserade på strålens hastighetsgradient.....	14
3.4. Teorier som betraktar strålen som en projektil.....	15
3.5. Teorier avseende detonationsavståndets inverkan.....	16
4. Tidigare föreslagen beräkningsmodell för RSV-penetration.....	18
5. Försök.....	20
5.1. Försöksmetod och försöksdesign.....	20
5.2. Försöksuppställning.....	21
5.3. Diskussion felkällor.....	23
5.4. Resultat.....	24

6.	Analys av försöksresultat.....	26
6.1.	Överensstämmelse med beräkningsmodellen.....	26
6.2.	Diskussion kring orsaker till försöksresultat.....	31
6.3.	Slutsatser.....	39
7.	Revidering av beräkningsmodellen.....	40
7.1.	Behov av anpassningsåtgärder.....	40
7.2.	Revidering.....	40
7.3.	Slutsatser.....	42
8.	Störningsanalys.....	43
8.1.	Metod.....	43
8.2.	Felkällor inklusive sannolikhetsfördelningar.....	43
8.3.	Resultat av störningsanalys.....	45
8.4.	Slutsatser.....	46
9.	Modellens säkerhetsmarginal.....	48
9.1.	Metod.....	48
9.2.	Användarrelaterade fel och störningar.....	48
9.3.	Ammunitionens egenspridning.....	52
9.4.	Fastställande av värde på säkerhetsmarginalen.....	53
9.5.	Slutsatser.....	53
10.	Reviderad beräkningsmodell.....	55
10.1.	Sammanfattning av revideringsåtgärder.....	55
10.2.	Förslag till beräkningsmodell.....	55
10.3.	Jämförelse med försöksresultat.....	56
10.4.	Modellens styrkor och svagheter.....	57
11.	Utveckling av verktyg.....	58
11.1.	Metod.....	58
11.2.	Analys avseende behov av anpassningsåtgärder.....	58
11.3.	Diskussion kring anpassningsåtgärder.....	59
11.4.	Förslag på verktyg.....	60
11.5.	Slutsatser.....	61
12.	Avslutning.....	62
12.1.	Sammanfattande slutsatser.....	62
12.2.	Svar på uppgiftsställning.....	64
12.3.	Rekommendationer.....	64

13.	Källförteckning.....	66
13.1.	Litteratur, artiklar och rapporter.....	66
13.2.	Opublicerat material	69
13.3.	Personlig kommunikation.....	69

Bilagor

Bilaga 1	Skjutförsök
Bilaga 2	Monte Carlo-simulering
Bilaga 3	Föreslaget verktyg

Förord

Idén till denna masteruppsats har sin grund i en självupplevd avsaknad av beslutsstöd och beräkningsmodeller vid röjning av RSV-ammunition.

Genomförandet av fullskaliga skjutförsök var en förutsättning för uppsatsen. Detta möjliggjordes tack vare ett omfattande stöd från Totalförsvarets ammunitions- och minröjningscentrum, SWEDEC, i Eksjö. Jag vill framföra ett särskilt tack till chefen Ronnie Nilsson, hela verksamhetsstöddavdelningen under ledning av Joachim Engblom, Michael Henebratt vid aminfoavdelningen och ammunitionstekniker Erik Löfberg.

Jag vill rikta ett särskilt tack till de som bidragit med stöd i form av försöksmateriel, information och framförallt en gedigen kunskap som jag fått ta del av; Perry Lundqvist vid Försvarets Materielverk (FMV), Svante Karlsson och Staffan Harling vid Totalförsvartets Forskningsinstitut (FOI), Rolf Dalenius och Magnus Persson vid Fortifikationsverket (FortV) och inte minst personalen vid Anna Lindh-biblioteket vid Försvvarshögskolan.

Avslutningsvis, tack till mina handledare Bengt Vretblad och Björn Persson för stöd och vägledning genom hela skrivprocessen.

Stockholm den 12 juni 2014

Fredrik Johnsson

1. Inledning

1.1. Bakgrund

Ammunition med verkansformen riktad sprängverkan (RSV) utgör ett vanligt röjningsobjekt för ammunitionsröjningsenheter. Typiska röjningsobjekt med denna verkansform är substridsdelar, landminor och ammunition till lätta pansarvärnsvapen, men verkansformen förekommer i allt från små handgranater till stora robotsystem (Försvarmakten 2010a, Kap. 2).

RSV-ammunition innebär en särskild teknisk fara att hantera för röjningspersonalen (Försvarmakten 2010b, 24). Hanteringen innebär att särskilda riskreducerande åtgärder skall vidtas, exempelvis:

- ”- ett utökat riskområde för strålen eller projektilen beaktas
- djupet på murar mm, enligt skadebegränsande åtgärder, utökas då RSV-strålen/-projektilen har betydligt större genomslag än splitter [...]” (Försvarmakten 2010b, 32).

Kraven åligger den ansvarige ammunitionsröjningsledaren att säkerställa efterlevnaden av. Till skillnad mot andra verkansformer, såsom stötvågs- och splittersverkan, så finns för riktad sprängverkan inget beslutsstöd i detta avseende. I realiteten föreligger krav på specifika riskreducerande åtgärder, men det saknas både beräkningsmodeller och metodanvisningar för hur detta skall utföras.

Avsaknaden av adekvat beslutsstöd uppmärksammades av författaren i en tidigare uppsats, som föreslog två nya beräkningsmodeller; en för dimensionering av riskområdets storlek och en för dimensionering av skadebegränsande åtgärder (Johnsson 2012). För att kunna användas i verksamheten bör deras tillförlitlighet verifieras mot relevanta försök. Trots omfattande försökserfarenhet, såväl i Sverige som internationellt, avseende riktad sprängverkan, saknas relevanta försöksdata utifrån röjningsverksamhetens särart (Walters & Zukas 1989, kap. 3).

Inför uppsatsen analyserades om vidareutveckling av de föreslagna modellerna skulle kunna utgöra lämpliga uppsatsämnen. I båda fallen skulle det krävas genomförande av experimentell verksamhet. I fallet med en ostörd RSV-stråles maximala kastvidd och riskområdets storlek föreligger behov av omfattande och komplicerade försöksuppställningar, som kräver ekonomiska och personella resurser utöver vad som inryms inom uppsatsens omfång. Däremot identifierades en möjlighet att vidareutveckla verktyget för dimensionering av skadebegränsande åtgärder, med en mindre resurskrävande försöksuppställning. Vidare föreligger en inbördes relation mellan de två kunskapsområdena, där resultatet avseende skadebegränsande åtgärder utgör ingångsvärden vid försök avseende riskområdets storlek.

Ammunitionsröjningsenheter står idag utan stöd för att dimensionera de skadebegränsande åtgärder som krävs för att eliminera RSV-strålens verkan. Ytterst innebär denna brist att dagens riskreducerande åtgärder troligen är felaktigt dimensionerade, vilket kan leda till allvarliga personella och materiella konsekvenser. Genom att vidareutveckla den i en tidigare uppsats föreslagna teoretiska beräkningsmodellen, fortsättningsvis betecknad [1], är förhoppningen att komma fram till en vidareutvecklad modell som kan införas i ammunitionsröjningsverksamheten.

1.2.Problemformulering

Skadebegränsande åtgärder utförs vid ammunitionsröjning för att minska eller förhindra ammunitionens verkan och minska riskområdets storlek (Försvarmakten 2010b, 161). Vid röjning av RSV-ammunition eftersträvas att om möjligt välja en oskadliggörandeteknik som förhindrar att en jetstråle bildas, vanligen genom att använda en kraftig röjningsladdning som krossar RSV-konen (Försvarmakten 2010b, 32). I de fall en sådan teknik inte är tillämplig eller då ammunitionen behöver hanteringssäkras krävs åtgärder dimensionerade utifrån effekten av en fullt utvecklad jetstråle. Anledningen är relaterad till en av de grundläggande säkerhetsprinciper som tillämpas vid ammunitionsröjning, där den mest ogynnsamma händelseutvecklingen utgör dimensioneringsgrund – i det aktuella fallet en ostörd RSV-stråle.

”Sämsta som kan hända. Oavsett vald teknik och metod skall ammunitionsröjningsledaren alltid analysera resultatet från det värsta som kan hända samt vidta åtgärder för att begränsa dess verkan” (Försvarmakten 2010b, 16).

Följden blir att riskområdet behöver utökas i strålens riktning (Försvarmakten 2010b, 32). Riskområdet anger det område som behöver spärras av och utrymmas på människor (Försvarmakten 2010b, 87). Beräkningsmodeller eller andra anvisningar för att fastställa RSV-strålens riskområde saknas i regelverket för verksamheten. Däremot står det bortom allt tvivel att riskområdet för en ostörd RSV-stråle vida överstiger exempelvis riskområdet för splitter i en sektor framför verkansdelen (Johnsson 2012). Utrymning av bebyggelse är resurs- och tidskrävande och även mindre riskområden i urban miljö blir snabbt en övermäktig uppgift. Den naturliga slutsatsen blir att RSV-strålens verkan behöver begränsas med skadebegränsande åtgärder för att undvika ett ohanterligt stort riskområde (Vretblad & Johnsson 2013, 14).

Skadebegränsande åtgärder utförs normalt i form av temporära skyddskonstruktioner, såsom skyddsmurar eller skyddstäckningar, dimensionerade för att motstå den aktuella verkansformen (Försvarmakten 2010b, 161-172). Det förhärskande konstruktionsmaterialet är sandsäckar fyllda med sand/fingrus, en formbar byggkomponent som kan staplas till önskad utformning. Fyllnadsmassor finns att tillgå över hela världen och sandsäckarna skapar en modularitet som medger anpassning av skyddskonstruktionen både till ammunitionens verkan och till den omgivning den upprättas i. Vidare ger sandsäckarna möjlighet att upprätta tunga skyddskonstruktioner enbart med handkraft.

Den tidigare föreslagna beräkningsmodellen för dimensionering av skadebegränsande åtgärder [1] är en teoretisk modell som har utvecklats genom att kombinera beräkningsmodeller från olika tillämpningsområden (Johnsson 2012). Relevanta försöksdata för att verifiera dess överensstämmelse med fullskaliga experiment saknas. Anledningen är främst relaterad till två förhållanden i samband med ammunitionsröjning, som gör tillämpningen unik och vars inverkan på penetrationsdjupet inte är helt känd.

Det första förhållandet är relaterat till konstruktionsmaterialet sandsäckar, den sand/fingrus som används är relativt finkornig och existerande försökserfarenhet avser främst grövre fraktioner som används till fortifikatoriska skyddstäckningar (Hansson & Westerling 2007, 83-86). Sandsäckar innebär också ett inhomogent skyddsmaterial, bestående av sand/grus, sandsäcksmaterial och en

viss andel luftfickor. Hur denna inhomogenitet i skyddsmaterialet inverkar på skyddsegenskaperna är heller inte känt.

Nästa förhållande är de långa detonationsavstånd (*standoff*) som är typiska för ammunitionsröjning, vilka överstiger vad som är optimalt för ammunitionen. Optimalt detonationsavstånd är vanligen integrerat i ammunitionen i form av ett distansorgan, som säkerställer att laddningen initieras när distansorganet träffar målet (Held 1991a, 1; Forsvarsmakten 2009, 136). I ammunitionsröjningsfallet träffar ammunitionen inte något mål, utan röjs statiskt från en position på/i marken. Dessutom byggs skadebegränsande åtgärder med ett säkerhetsavstånd till ammunitionen, vilket innebär att konstruktionen alltid upprättas bortom det optimala detonationsavståndet. Hur penetrationsdjupet avtar med detonationsavståndet brukar beskrivas med s.k. standoff-kurvor, vilka främst föreligger för metaller och sällan inkluderar representativa detonationsavstånd.

Genom experiment som klarlägger inverkan av förhållanden som är typiska för ammunitionsröjning kan beräkningsmodellen [1] vidareutvecklas. En nödvändig förutsättning för att skapa ett användbart och tillförlitligt verktyg som kan införas i verksamheten.

1.3.Syfte

Uppsatsens huvudsyfte är att föreslå ett verksamhetsanpassat verktyg för dimensionering av skadebegränsande åtgärder mot riktad sprängverkan. Syftet kan karaktäriseras som både normativt, teoripreciserande och informativt. Det normativa delsyftet är relaterat till att verktyget är avsett att kunna införas i röjningsverksamheten, genom att inarbetas i regelverk, metodanvisningar och utbildningssystem. Det teoripreciserande delsyftet är främst relaterat till bristen på vetenskapligt underlag som överensstämmer med röjningsverksamhetens förhållanden. Resultatet bedöms därmed kunna bidra till att utöka den vetenskapliga kunskapsbasen. Avslutningsvis är ett viktigt delsyfte att medvetandegöra problemet, både för röjningspersonalen och för beslutsfattare som på olika sätt påverkar ammunitionsröjningsverksamheten.

1.4.Uppgiftställning

Utifrån det redovisade problemområdet och syftet har följande uppgift formulerats för uppsatsen:

Vidareutveckla den tidigare föreslagna beräkningsmodellen [1] för skadebegränsande åtgärder mot RSV-penetration till ett användbart verktyg inom ammunitionsröjningstjänsten.

Den övergripande uppgiften har operationaliserats till nedanstående deluppgifter, vilka har en inbördes relation och beskrivs i kronologisk ordning.

1. Genomför experiment för att tillskapa representativa försöksdata.
2. Analysera och diskutera överensstämmelsen mellan modell och försöksresultat.
3. Revidera modellen utifrån identifierade anpassningsbehov.
4. Genomför störningsanalys av modellens enskilda parametrar.
5. Analysera resultatet och vid behov revidera modellen.
6. Genomför simulering av hur användarrelaterade fel inverkar på penetrationsdjupet.
7. Analysera hur ammunitionens tekniska egenspridning inverkar på penetrationsdjupet.
8. Dimensionera modellens säkerhetsmarginal utifrån ovan identifierade störningar.
9. Vidareutveckla beräkningsmodellen till ett funktionellt verktyg vid ammunitionsröjning.

1.5. Teoretisk referensram

Inom sakområdet riktad sprängverkan föreligger en stor bredd av teorier tillsammans med en omfattande försökerfarenhet inom olika delområden (Walters & Zukas 1989, 1-2). Forskning har bedrivits inom området under mer än ett sekel, men intensifierades först när den militära användningen inleddes under andra världskriget (Walters & Zukas 1989, kap. 2). Specifika teorier och forskning avseende dimensionering av skadebegränsande åtgärder vid ammunitionsröjning har inte gått att finna. Däremot föreligger teorier av mer generell karaktär likväl som teorier avsedda för andra tillämpningsområden, vilka kan användas för det aktuella problemet.

Uppsatsens teoretiska utgångspunkt utgörs främst av teorier för RSV-strålens penetrationsförmåga, ett brett kunskapsområde som inbegriper flera vetenskapsområden och forskningsdiscipliner. Ett urval har gjorts avseende teorier som anses relevanta för den aktuella uppgiften, enligt:

- Grundläggande hydrodynamiska penetrationsteorier
- Teorier som bygger på jetstrålens hastighetsgradient
- Teorier som betraktar strålen som en projektil
- Teorier som beaktar detonationsavståndets inverkan

En mer utförlig beskrivning och diskussion av ovanstående teorier återfinns i kapitel 3.

Härutöver utgår uppsatsen från *Beräkningsmodell för riktad sprängverkan vid ammunitionsröjning*, den teoretiska beräkningsmodell [1] som tidigare föreslagits för det specifika problemområdet (Johnsson 2012). Då avsikten är att vidareutveckla denna modell, bör den betraktas som en del av den teoretiska referensramen och redovisas mer utförligt i kapitel 4.

Slutligen används *den militära nyttan* inom ramen för ämnet Militärteknik som ett analysverktyg för att säkerställa att den militära verksamhetens behov beaktas i utvecklingen av ett funktionellt verktyg. Innebörden av den militära nyttan, i det aktuella sammanhanget, definieras i kapitel 2.

1.6. Forskningsöversikt

Tillämpningsområden för RSV-teknologi preciserar indirekt de områden inom vilka RSV-forskning bedrivs. Det huvudsakliga tillämpningsområdet återfinns inom den militära sfären, där RSV-teknologi främst används i stridsdelar avsedda för verkan i bepansrade, motståndskraftiga och fortifikatoriskt skyddade mål (Walters & Zukas 1989, 32). Forskning avseende den militära tillämpningen kan betraktas som tvådelad; antingen inriktad på verkan eller inriktad på skydd.

Forskning som avser militära stridsdelars verkan är främst inriktad på penetrationsegenskaper i målmaterial som pansarstål, keramer och betong, utifrån de mål som ammunitionen är avsedd att verka mot. Forskning avseende verkan i målmaterial som sand och grus är inte lika vanlig. Vidare avser forskningen vanligen maximal verkan, genom att ammunitionen förutsätts träffa målet och är försedd med ett distansorgan som skapar ett optimalt detonationsavstånd vid initieringen. Forskning avseende detonationsavståndets inverkan föreligger främst för optimeringsändamål och avser därför relativt korta detonationsavstånd (< 25 kalibrar) och nästan uteslutande penetration i stål/pansarstål (Walters 2006, 4-5).

Forskning avseende skydd mot riktad sprängverkan är generellt mer användbar för det aktuella problemområdet. Främst därför att här återfinns forskning avseende fortifikatoriska

skyddstäckningar, där penetration i fyllnadsmassor är nära relaterat till problemområdet. Dock föreligger en viktig skillnad mellan den sand/grus som används i sandsäckar och fyllnadsmassor för fortifikatoriska skyddstäckningar. Kornstorleken är avsevärt större vid fortifikatoriska tillämpningar och skillnaden i penetrationsegenskaper vid mindre fraktioner är inte fullt klarlagd. Vad avser detonationsavståndets inverkan är även skyddsforskningen främst inriktad på maximal verkan, vilket är den naturliga designparametern för skyddslösningar (Lidén et.al. 1994, 84; Hansson & Westerling 2007, 7-8; Elfving, Karlsson & Hansson 2005, 5-7).

Relevant forskning för det studerade problemområdet går även att finna inom andra tillämpningsområden. Exempelvis finns omfattande forskning avseende penetration i geologiska material för tillämpning inom gas- och oljeindustrin. Men även här föreligger viktiga skillnader mot problemområdet, framförallt avser forskningen penetration i massiva bergarter och även här utifrån ett optimalt detonationsavstånd (Walters & Zukas 1989, 37-42; Walters 2006, 3).

Sammantaget föreligger brist på forskning avseende uppsatsens specifika uppgiftställning. Däremot finns omfattande forskning inom andra tillämpningsområden som är representativa för enskilda delar av problemområdet. Det går således att identifiera ett forskningsläge för både penetration i sand/grus och detonationsavståndets inverkan, däremot är kombinationen av dessa aspekter ett kunskapsområde som verkar vara relativt outforskat.

1.7. Avgränsningar

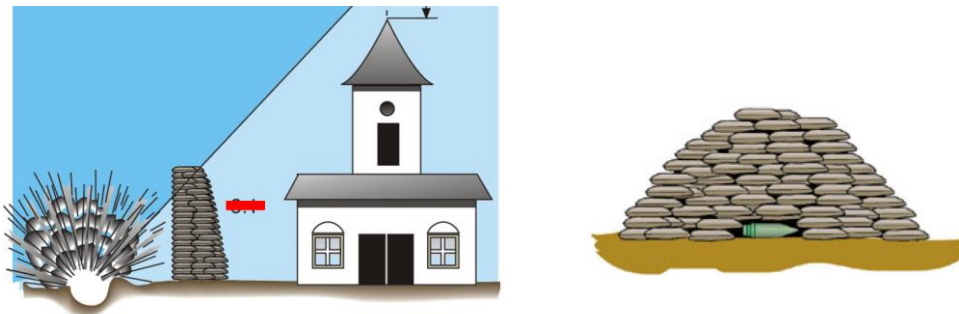
Projektilbildande RSV

I svensk nomenklatur skiljer man vanligen mellan två huvudtyper av riktad sprängverkan; strålbildande respektive projektilbildande (Lidén et. al. 1994, 35-36; Persson 1993; Hansson & Westerling 2007, 9). Skillnaden mellan de två varianterna har sin grund i utformningen av den hållighet som ger upphov till laddningens riktade verkan. Vid en konvinkel mindre än 120-150° bildar inlägget en lång stråle med liten diameter, vid en större konvinkel bildas istället en sammanhållen homogen projektil (Persson 1993, 2-3). Verkansprinciperna är fundamentalt olika för de två typerna. En strålbildande RSV har en mycket hög spets hastighet (7000-10000 m/s) och verkar genom ett hydrodynamiskt förlopp där såväl stråle som målmaterial kan betraktas som vätskor (Hansson & Westerling 2007, 10). Den tunna strålen fragmenteras i mindre segment som snabbt bromsas i luften, varför effekten nedgår markant redan på korta avstånd. En projektilbildande RSV har en avsevärt lägre utgångshastighet (2000-3000 m/s) och bildar en större sammanhållen projektil som inte fragmenteras som en jetstråle, varför den påverkas mindre av luftbromsning och kan användas på långa detonationsavstånd (Lidén et. al. 1994, 49). Verkansprincipen för denna variant kan snarast likställas med den som gäller för projektiler (Wu, Liu, & Du 2007, 1156).

Projektilbildande RSV avgränsas från detta arbete på grund av den stora skillnaden i verkansprinciper och därför kräver en helt annan teoretisk referensram för att studeras. Innehållet och resultatet av denna uppsats är därför enbart tillämpligt vid rövning av ammunition innehållande strålbildande stridsdelar. Dock bör det understrykas att det föreligger motsvarande brist på beräkningsmodeller vid rövning av projektilbildande stridsdelar. Verkansprincipen är vanlig i landminor och används även i improviserade laddningar (IED).

1.8. Centrala begrepp

Skadebegränsande åtgärder är temporära skydds konstruktioner som byggs vid ammunitionsröjning för att förhindra skadeverkningar alternativt minska riskområdets storlek och upprättas antingen i anslutning till ammunitionen eller i anslutning till ett skyddsföremål (Försvarmakten 2010b, 161-162). Skadebegränsande åtgärder byggs av plast-/jutevävsäckar fyllda med sand eller fingrus, s.k. sandsäckar. Skydds konstruktionen designas, dimensioneras och placeras utifrån vilken verkansform som skall reduceras/elimineras. Exempelvis byggs en skyddsmur i anslutning till ammunitionen om riskområdet för splitter eller för en RSV-stråle skall reduceras och det krävs en skyddstäckning om även verkan av luftstöt vågen skall kunna motverkas (Försvarmakten 2010b, 164 & 168). Se Figur 1-1.

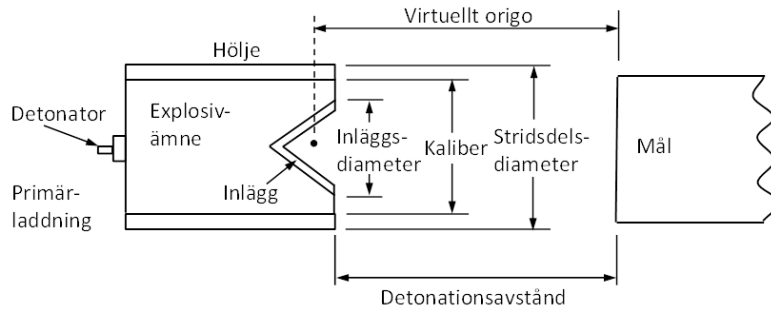


Figur 1-1 Skadebegränsande åtgärder utförda som skyddsmur (t.v.) respektive skyddstäckning (t.h.) (Försvarmakten 2010b, 165 & 168).

Riktad sprängverkan är ett sätt att koncentrera energin från ett detonerande explosivämne genom att påverka laddningsgeometrin. Principen bygger på att en cylindrisk laddning förses med en konisk kavitet i den ände där en koncentrerad verkan önskas. För att ytterligare öka penetrationsförmågan bekläds kaviteten med ett metallinlägg, som av energin från explosivämnet pressas samman till en penetrationskropp (Walters & Zukas 1989, 2-3). Främst beroende av vinkeln på kaviteten bildas antingen en stråle eller en projektil, med skilda egenskaper. I den svenska nomenklaturen sorterar båda varianterna under samlingsbegreppet riktad sprängverkan, men åtskiljs ofta genom olika benämningar på andra språk: strålbildande RSV (am. *shaped charge* respektive eng. *hollow charge*) och projektilbildande RSV (am. *explosively formed projectile* respektive eng. *self forging fragments*) (Persson 1993, 2).

Detonationsavstånd är den svenskspråkiga benämningen på engelskans *standoff distance* eller *standoff* och avser avståndet mellan inläggets bas och målet (Försvarmakten 2009, 136; Walters & Zukas 1989, 8). Se Figur 1-2.

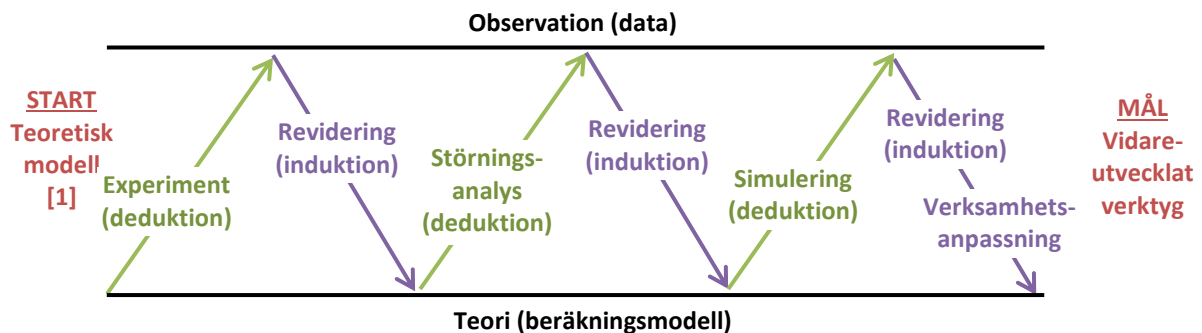
Kaliber eller laddningsdiameter avser laddningens yttre diameter inkluderande inlägg och explosivämne, men inte höljets tjocklek. Denna innebörd används normalt avseende riktad sprängverkan, men distinktionen mot den mer allmänna innebörden av begreppet är viktig att notera (Held 1983, 332; Walters & Zukas 1989, 8-9). Se Figur 1-2.



Figur 1-2 Nomenklatur avseende RSV-stridsdelars uppbyggnad, illustration efter (Walters & Zukas 1989, 8, Figure 8.).

1.9. Metod

För att lösa den övergripande uppgiften krävs ett succesivt kunskapsuppbyggande i flera steg. Processen är iterativ i den bemärkelsen att metodologin växlar mellan att vara deduktiv och induktiv, se Figur 1-3 (Box, Hunter & Hunter 2012, 15-20). Respektive steg erfordrar en specifik metoduppställning, varför uppsatsen spänner över ett flertal vetenskapliga metoder. Redovisningen nedan beskriver översiktligt metodapparaten för respektive steg, härutöver diskuteras de enskilda metodernas mer utförligt under respektive avsnitt i uppsatsen.



Figur 1-3 Schematisk bild över uppsatsens kunskapsbyggande process

Den övergripande metoden bygger på tre utvecklingscykler där beräkningsmodellen [1] succesivt vidareutvecklas och förbättras. Varje cykel inleds med ett deduktivt skede där ny data genereras baserat på beräkningsmodellens avsedda användning. Data analyseras och resultatet används induktivt för att erhålla en förbättrad och generaliserbar modell.

Den första cykeln avser den tidigare föreslagna modellens [1] överensstämmelse med verkliga penetrationsdata. Experiment genomförs utifrån förhållanden som är typiska för den avsedda tillämpningen. Genom praktiska skjutförsök undersöks sambandet mellan detonationsavstånd och penetrationsdjup i målmaterialen fingrus respektive sandsäckar. Försöksresultatet analyseras såväl kvalitativt som kvantitativt med stöd av teorier för RSV-strålens penetration. Utifrån analysresultatet revideras beräkningsmodellen [1], för att förbättra överensstämmelsen mellan modell och verklighet.

Nästa cykel avser de enskilda parametrarnas känslighet för fel. Utifrån modellens avsedda tillämpning identifieras troliga felkällor som kan föreligga när värdet på enskilda parametrar fastställs. Genom störningsanalys undersöks vilken inverkan respektive parameter kan ge på penetrationsdjupet. Resultatet analyseras kvantitativt syftande till att identifiera störningskänsliga

parametrar och behov av anpassningsåtgärder. Vid behov revideras beräkningsmodellen, syftande till att reducera konsekvensen av dessa fel.

Den tredje cykeln avser bestämmande av modellens säkerhetsmarginal, som i denna uppsats avser det tillägg som behöver göras till beräknat penetrationsdjup för att erhålla dimensioneringsvärdet på skyddskonstruktionens djup. Säkerhetsmarginalen skall kompensera för typiska fel och störningar som kan uppstå vid avsedd användning. Första delen avser användarrelaterade fel vars inverkan analyseras genom Monte Carlo-simulering. Andra delen avser variationer i penetrationsdjupet på grund av ammunitionens tekniska egenspridning, vilken analyseras utifrån data och försöksresultat i rapporter och artiklar. Säkerhetsmarginalen dimensioneras utifrån en sammanvägning av de två delarna.

Det avslutande skedet avser transformationen från en ekvation till ett dimensioneringsverktyg som är användbart under fältförhållanden. Den militära nyttan definierar de kriterier som skall tillgodoses och identifierat behov av åtgärder utförs som förenklingar, anvisningar eller kompletterande designparametrar. Målbilden är ett komplett dimensioneringsverktyg för skadebegränsande åtgärder mot RSV-penetration som tillgodoser röjningsverksamhetens behov.

1.10. Källor inklusive källkritik

Uppsatsen baseras uteslutande på öppna källor och information som inte omfattas av sekretess.

Teorier riktad sprängverkan. Den huvudsakliga källan för uppsatsens teoretiska utgångspunkt utgörs av vetenskapliga artiklar och publicerade konferens-/symposiebidrag som genomgått Peer-Review. För de grundläggande penetrationsteorierna används ursprungskällorna i de fall dessa gått att återfinna, varför dessa källor genomgående är av äldre datum. Annars används primärkällor som avhandlar teoriernas vidareutveckling respektive forskningsfronten inom respektive delområde.

Inom sakområdet riktad sprängverkan föreligger referensverket *Fundamentals of Shaped Charges* publicerat 1989 av William P. Walters och Jonas A. Zukas. Boken utgör en sammanställning över dåvarande forskningsläge och baseras på vetenskapliga artiklar inom området. Boken används frekvent som referens av forskare inom området, varför den bör tillskrivas ett högt källkritiskt värde. I uppsatsen används boken i de fall specifika primärkällor inte gått att spåra. Ett observandum bör dock uttalas avseende tidskriteriet. Omfattande forskning har genomförts och publicerats sedan boken gavs ut, varför den inte används som källa då forskningsfronten avses.

Tidigare föreslagen beräkningsmodell [1]. Det objekt som avhandlas i uppsatsen är en av författaren föreslagen beräkningsmodell, ursprungligen härrörande från en C-uppsats i ämnet Militärteknik (Johnsson 2012). För att undvika att undersökningen blir tendentiös används beräkningsmodellen enbart som ett studieobjekt och inte som vetenskaplig referens. Däremot måste dess reliabilitet vara acceptabel om den ska kunna utgöra grund för vidareutveckling. Detta styrks av att modellen blivit publicerad i *Journal of Military Studies* (Johnsson, Vretblad & Sivertun 2013) och därvid genomgått Peer Review samt publicerats som konferensbidrag till International Society of Military Sciences Conference (ISMS) (Johnsson, Vretblad & Sivertun 2012) samt till International Symposium on the Interaction of the Effects of Munitions with Structures (ISIEMS) (Vretblad & Johnsson 2013).

Ammunitionsröjningsverksamhet. Vetenskapliga källor som redovisar metoder och procedurer föreligger enbart för enstaka delaktiviteter. I uppsatsen används det svenska totalförsvarets

handboksserie, *Handbok Ammunitions- och minröjning (H Am- och minröj)*, som källa avseende röjningsverksamhetens genomförande. Innehållet baseras huvudsakligen på NATO-standarder (STANAG) i kombination FN:s humanitära standarder (IMAS). Handböckerna är därför att betrakta som sekundärkälla till huvuddelen av informationen. Samtidigt innebär detta att metoderna oftast bygger på internationell erfarenhet. Detaljerade referenser saknas genomgående i hela handboksserien, vilket försvårar kontroll och möjlighet till spårarhet mot primärkällorna. I uppsatsen används handböckerna som källa avseende röjningsverksamhetens genomförande, för detta ändamål anses detta källmaterial användbart trots identifierade källkritiska brister.

Ammunitionsteknisk information. Information om militära vapensystem omfattas normalt av sekretess och data avseende RSV-stridsdelars karaktäristik föreligger endast i begränsad omfattning i öppna källor. I förekommande fall är tendenskriteriet problematiskt, då det finns intresse av att både under- och överdriva prestanda. Undersökningens reliabilitet är direkt relaterad till tillförlitligheten i indata. Teknisk information om den ammunition som används i försöken hämtas därför enbart ur dokumentation tillhandahållen från ammunitionstillverkarens arkiv. Dessa primärkällor har tidigare omfattats av sekretess, men har gjorts tillgängliga av SAAB Dynamics AB (f.d. BOFORS AB) för denna uppsats, då den använda ammunitionen inte längre är i operativt bruk. Underlaget är opublicerat, varför det till stora delar återges i bilaga 1.

Metodanvisningar. Försöksmetoden inkluderande försöksuppställningen har utvecklats utifrån erfarenheter från försök inom andra tillämpningsområden. Genom vetenskapliga artiklar och rapporter har erfarenheter inhämtats. Härefter har försöksplanen redovisats för expertis vid Totalförsvarets Forskningsinstitut (FOI), med erfarenheter från liknande försök. Deras synpunkter och erfarenheter har inarbetats i den slutliga försöksdesignen och en representant från FOI deltog även under genomförandet.

Övriga metoder baseras huvudsakligen på information i läroböcker och utbildningsunderlag avseende statistiska metoder, störningsanalys och Monte Carlo-simulering. I flera fall har dessutom metodvalet diskuterats med sakkunnig personal vid Forsvarshögskolan, för att säkerställa den valda metodens ändamålsenlighet. Källorna utgörs av en blandning av primär- och sekundärkällor, men detta faktum anses inte innebära några besvärande källkritiska konsekvenser då de enbart används för det metodologiska upplägget.

1.11. Egen erfarenhet

Författaren erhöll 1996 behörighet som ammunitionsröjningsledare och har alltsedan dess varit verksam inom ammunitions- och minröjning. Han arbetar sedan 2002 vid Totalförsvarets ammunitions- och minröjningscentrum (SWEDEC) och har där innehaft olika chefsbefattningar. Härutöver har författaren erfarenhet från ammunitionsröjningsinsatser i Sverige, internationellt och från deltagande i olika internationella samarbetsprojekt. Författaren har en specialisering inom ammunitionsteknisk informationsförsörjning, teknisk underrättelsetjänst avseende ammunitionstekniska hot och utbildningsutveckling.

Författarens kunskaper inom sakområdet riktad sprängverkan avser huvudsakligen penetrationsteorier och är relaterade till riskhantering i samband med ammunitionsröjning. Kunskaperna har förvärvats i samband med studier vid Forsvarshögskolan och vid skrivandet av vetenskapliga artiklar.

2. Den militära nyttan

Ämnet militärteknik syftar till att förena teknikens möjligheter och begränsningar med den militära verksamheten (Axberg 2006, 70; 2008, 197; Sivertun 2012, 108). Militärteknik avser således inte tekniken per se, utan dess inverkan på den militära operationen och utifrån den militära personalens perspektiv (Axberg 2006, 68-70). Detta ger ämnet dess tvärvetenskapliga natur med utgångspunkt i såväl natur-, samhälls- och ingenjörsvetenskap (Axberg 2008, 197). För att värdera teknikens bidrag till den militära verksamheten används begreppet *militär nytta*.

Den *militära nyttan* avser hur tekniken reducerar *kostnaderna* för att uppnå målen med den militära insatsen. Kostnadsdimensionen har i detta sammanhang en bredare innebörd än enbart den ekonomiska aspekten och kan utgöras av så vitt skilda ting som risker, materiell resursförbrukning och mänskligt liv. (Sivertun 2012, 108; Axberg et. al. 2013, 16)

Den breda innebörden av *militär nytta* skapar förutsättningar för att kunna applicera begreppet på olika tillämpningsområden inom ramen för den militära verksamheten. Samtidigt innebär den breda tolkningen att det krävs en definiering av begreppets innebörd i varje enskild tillämpning. Definitionen bör eftersträva en hög detaljeringsgrad och situationsanpassning för att undvika tvetydigheter avseende vad som konstituerar den militära nyttan i den aktuella situationen.

En analys av den *militära nyttan* bör ta sin utgångspunkt i en avgränsning av problemets sammanhang. I uppsatsen avses inte beräkningsmodeller för RSV-penetration i allmänhet, utan hur dessa kan tillämpas i samband med ammunitionsröjning. Mer preciserat avses hur penetrationsteorier kan tillämpas för att dimensionera skadebegränsande åtgärder som upprättas för att skydda mot RSV-strålens verkan. Detta avgränsar vilken typ av militär verksamhet som avses, men för att kunna värdera den militära nyttan måste även vad som utgör dimensionerande *kostnader* definieras.

2.1. Dimensionerande kostnader

Skadebegränsande åtgärder utförs enligt fastställda metodanvisningar (Försvarmakten 2010b), vilka har använts som utgångspunkt för att identifiera de kostnader som behöver minimeras för att erhålla militär nytta:

Skador på personal och materiel. Det övergripande syftet med skadebegränsande åtgärder är att begränsa ammunitionens tekniska risker, för att undvika skador på röjningspersonal, tredje person, materiel och miljö (Försvarmakten 2010b, 15).

Tidsåtgång. Denna kostnad har flera dimensioner och avser tidsåtgång för att tillämpa beräkningsmodellen, tidsåtgång för att bygga skyddskonstruktionen och den tid det tar innan riskområdet för strålen kan upphävas och verksamheten återgå till det normala.

Materielbehov. Utöver den rena materielförbrukningen kan kostnaden också relateras till behov av tillförsel av materielsystem. Ingår den materiel som behövs sedan tidigare i den ordinarie utrustningen eller måste nyanskaffning ske?

Utbildnings- och träningsbehov. Kostnaden är relaterad till komplexiteten att tillämpa beräkningsmodellen och svårighetsgraden att bygga skyddskonstruktionen. Röjningspersonal får bara

använda metoder och utrustning för vilka de har godkänd utbildning, varför modellens tillämpning måste inordnas i utbildningssystemet (Försvarsmakten 2010b, 16).

Informationsbehov. Hur mycket information krävs för att tillämpa beräkningsmodellen? Är denna information normalt tillgänglig eller krävs specifik inhämtning?

2.2. Verksamhetsspecifika krav

För att göra kostnaderna användbara som kriterier i värderingen av den militära nyttan har dessa vidareutvecklats till verksamhetsspecifika krav.

Hög tillförlitlighet. Beräkningsmodellen skall resultera i en konstruktionslösning som med hög sannolikhet förhindrar RSV-strålens penetration och som verifierats genom verkliga penetrationsdata. En upprättad skadebegränsande åtgärd skall medge att riskområdet för RSV-strålen kan minskas/elimineras (Försvarsmakten 2010b, 161).

Komplett verktyg. För att kunna integreras i verksamheten, genom utbildning och metodanvisningar, krävs ett verktyg som stödjer fastställandet av skyddskonstruktionens samtliga dimensioner.

Ofullständig information. Beräkningsmodellen skall enbart använda indata som röjningspersonalen normalt har tillgång till genom ammunitionsdatabaser eller som enkelt kan inhämtas genom rekognosering. Användning skall vara möjlig enbart utifrån en kategorisering av röjningsobjektet.

Befintlig utrustning. Beräkningsmodellen skall kunna användas utan tekniska hjälpmedel och noggrannare beräkningar skall kunna utföras med miniräknare. Skyddskonstruktionen skall kunna byggas för hand enbart av sandsäckar.

Personalens utbildningsnivå. Ammunitionsröjningsledare skall kunna utföra beräkningar enligt modellen utan kompletteringsutbildning i matematik. Den matematiska komplexiteten i beräkningsmodellen skall vara anpassad till användarnas gemensamma utbildningsnivå, där gymnasieskolans Matematik B utgör miniminivå.

Korta tidsförhållanden. Beräkningsmodellen skall användas under fältförhållanden och medge snabba uträkningar. Tidsförhållanden för beräkningar skall vara anpassade till när informationen behövs för beslut i verksamheten.

Maximala verkan. Beräkningsmodellen skall, i enlighet med tillämpade säkerhetsprinciper, utgå från att RSV-strålen har full penetrationsförmåga oavsett valet av oskadliggörandeteknik (Försvarsmakten 2010b, 16 & 87).

Om de verksamhetsspecifika kraven uppfylls reduceras kostnaderna och utgör därmed kriterier för att erhålla militär nytta.

3. RSV-strålens penetrationsegenskaper

När en RSV-laddning initieras utbreder sig en detonationsfront genom explosivämnet (Walters & Zukas 1989, 2). Det höga trycket från sprängämnesgaserna accelererar inlägget mot laddningens symmetriaxel, där det kollapsar och bildar en jetstråle (Lidén et. al. 1994, 38). Endast ca 20 % av inläggs materialet bildar den tunna stråle som med hög hastighet rör sig framåt och ger RSV-laddningen dess goda penetrationsegenskaper. Huvuddelen av inläggs materialet bildar ett tungt, projektilliknande, segment bakom strålen, den s.k. sluggen (Walters & Zukas 1989, 6-7).

Då explosivämnets dimension varierar utmed det koniska inlägget kommer strålen erhålla en hastighetsgradient. Hastigheten varierar från ca 7000-10000 m/s i spetsen till ca 2000 m/s i den bakre delen (Hansson & Westerling 2007, 10). Den efterföljande sluggens hastighet varierar från 300-1000 m/s (Held 1991a, 4) och kan grovt approximeras till en tiondel av strålens spetshastighet (Walters & Zukas 1989, 7). Hastighetsgradienten innebär att strålen kommer att sträckas ut och bli allt längre, tills den fragmenteras i ett stort antal strålsegment (Walters & Zukas 1989, 2).

När strålen träffar målet ger den höga hastigheten upphov till ett tryck som överskrider målmaterialets hållfastegenskaper. Strålen och målmaterialet kommer uppträda som inkompressibla vätskor där främst tröghetskrafter inverkar på penetrationen, vilket skapar grunden för att approximera penetrationsförloppet som hydrodynamiskt (Walters, Flis & Chou 1988, 308; Walters & Zukas 1989, 132).

Penetrationsdjupet är direkt relaterat till strålens längd och når sitt maximum när strålen är som längst, precis innan den fragmenteras (Lidén et. al. 1994, 38). Härefter avtar penetrationsdjupet på grund av strålsegmentens luftbromsning och radiella avdrift (Held 1991b, 4-5).

De första analytiska modellerna för att beräkna RSV-strålars penetration var baserade på Bernoullis ekvation för strömmande inkompressibla vätskor (Walters, Flis & Chou 1988, 308; Walters & Zukas 1989, 131). Bernoullis ekvationen avser fluiders friktionsfria strömning och anger att förhållandet mellan tryck, hastighet och densitet är konstant, dvs. ökar hastigheten eller densiteten sjunker trycket och vice versa. Analogin till RSV-strålens penetration bygger på en jämviktsekvation där trycket som strålen skapar är detsamma som det tryck som målet skapar i gränssytan dem emellan. Detta ger ett förhållande som enbart är beroende av hastigheten och densiteten hos materialen, där penetrationsdjupet kan relateras till tiden det tar innan strålen konsumerats och hur snabbt hålbotten rör sig in i målmaterialet (Walters & Zukas 1989, 132-133).

3.1. Grundläggande hydrodynamisk penetrationsteori

De första penetrationsteorierna utvecklades av Hill et.al. (1944a, 1944b) och Birkhoff (1947) och anger penetrationsdjupet enbart relaterat till strålens längd och densiteten hos stråle och mål, enligt:

$$P = l \sqrt{\frac{\rho_j}{\rho_t}} \quad (3-1)$$

Där	P	Penetrationsdjup	(m)
	l	RSV-strålens längd	(m)
	ρ_j	Densitet, RSV-stråle	(kg/m ³)
	ρ_t	Densitet, målmateriale	(kg/m ³)

Teorin är behäftad med flera brister, exempelvis beaktas inte andra materialegenskaper än densiteten. Verkligt penetrationsdjup är mindre i pansarstål än vad som erhålls i vanligt konstruktionsstål, trots att dessa har likvärdig densitet. Detta indikerar att andra materialegenskaper än densiteten inverkar på penetrationsdjupet (Walters, Flis & Chou 1988, 309; Gooch et. al. 2001, 243-245).

För användning som teoretisk utgångspunkt i uppsatsen har modellen ytterligare brister. Specifik information om strålens längd krävs för beräkningarna, information som normalt inte finns att tillgå i de databaser och identifieringsunderlag som används vid ammunitionsröjning. Den beaktar inte detonationsavståndets inverkan på penetrationsdjupet, vilket är betydelsefullt då skadebegränsande åtgärder alltid uppförs bortom det optimala detonationsavståndet. Modellen är huvudsakligen avsedd för penetrationsdjup i metaller, vanligtvis pansarstål, inte för porösa material som sand och grus (Walters, Flis & Chou 1988, 308).

Trots dessa tillkortakommanden utgör teorin alltjämt grunden för nyutvecklade och förbättrade modeller för strålens penetrationsegenskaper. Det föreligger en mängd olika vidareutvecklingar av grundmodellen för att bättre kunna prediktera och beräkna penetrationsdjup för olika tillämpningsområden. Ett vanligt tillvägagångssätt är att introducera semi-empiriska faktorer som kompenserar för någon av de aspekter som inte täcks av grundmodellen. Härigenom erhålls modeller som uppvisar god överensstämmelse med verkligheten för en specifik tillämpning.

3.2.Semi-empiriska penetrationsteorier

Ett för uppsatsen relevant exempel på semi-empirisk penetrationsteori har utvecklats av Totalförsvarets Forskningsinstitut (FOI) efter försök mot fortifikatoriska skyddstäckningar av betong, grus och sand (Elfving, Karlsson & Hansson 2005). Samma modell används som dimensioneringsgrund för strålens inträngning i fortifikatoriska skydd (Fortifikationsverket 2011a, 68).

$$P = d \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot \sqrt{\frac{\rho_j}{\rho_t}} \quad (3-2)$$

Där	P	Penetrationsdjup	(m)
	d	RSV-stridsdelens kaliber	(m)
	k_1	Koefficient för strållängd	(-)
	k_2	Koefficient för målmaterial	(-)
	ρ_j	Densitet, RSV-stråle	(kg/m ³)
	ρ_t	Densitet, målmaterial	(kg/m ³)

I modellen har strållängden, i den hydrodynamiska grundekvationen (3-1), ersatts med produkten av stridsdelens kaliber, en koefficient för strållängd och en koefficient för målmaterial. Modellen är användbar vid ammunitionsröjning då den kan användas för målmaterialen sand och grus och för röjningsobjekt med varierande teknisk generation. Ekvationens parametrar avser huvudsakligen information som går att erhålla ur ammunitionsdatabaser eller kan fastställas under fältförhållanden. Däremot beaktas inte detonationsavståndets inverkan och modellen ger således enbart maximal penetration vid optimalt detonationsavstånd.

Walters och Zukas (1989, 136) beskriver att utvecklingen av penetrationsmodeller från 1960-talet följer två huvudsakliga trender; de som beaktar strålens hastighetsgradient och de som betraktar strålen som en projektil.

3.3. Teorier baserade på strålens hastighetsgradient

Strålens hastighetsgradient leder till att den succesivt kommer förlängas intill dess att den bryts upp i ett stort antal mindre segment. Två strålsegment med ett mellanliggande avstånd ger mindre penetrationsdjup än om samma segment följer efter varandra utan avstånd (Chou & Toland 1977). Detta fenomen är relevant för den avsedda tillämpningen, då skadebegränsade åtgärder normalt upprättas på ett detonationsavstånd där strålen är helt eller delvis segmenterad.

Hela strålen bildas inte vid en gemensam punkt. Spetsen bildas nära konspetsen medan de bakre delarna bildas närmare konbasen. För att underlätta beräkningar har konceptet om ett virtuellt origo (*virtual origin*) införts. Enligt detta koncept antas hela strålen bildas vid och utgå från en och samma punkt som är belägen ungefär en tredjedels kondiameter från konbasen, se Figur 1-2.

Den teori som normalt används för att förklara hur strålens hastighetsgradient inverkar på penetrationsdjupet utgår från den undre gränshastigheten (*cutoff velocity*), vilken avser den lägsta utgångshastighet där strålen bidrar till penetrationsförloppet. När strålen töjs och blir längre ökar penetrationsdjupet. En större andel av strålen är verksam i målet och den undre gränshastigheten sjunker. Fragmenteringsgraden ökar med detonationsavståndet och den lägsta undre gränshastigheten föreligger när strålen är helt fragmenterad, härefter stiger den undre gränshastigheten på grund av strålsegmentens luftbromsning och axiella avdrift (Held 1987, 2-4).

Beräkningsmodellen för maximalt penetrationsdjup vid en given strålhastighet skiljer på om strålen är kontinuerlig, ekvation (3-3), delvis fragmenterad, ekvation (3-4), eller helt fragmenterad, ekvation (3-5). För problemområdet är långa detonationsavstånd och en helt fragmenterad stråle av primärt intresse, men övriga ekvationer erfordras för fullständighet i den senare analysen (Held 1988, 111-112).

Ekvationer för att beräkna strålens egenskaper utifrån dess fragmenteringsgrad och undre gränshastighet utvecklades redan på 1960-talet (DiPersio 1964, 1965). Held har senare vidareutvecklat ekvationerna för olika tillämpningar och redovisar följande ekvationer för penetrationsdjupet (1991b):

$$P_{max} = Z_0 \left(\left(\frac{v_{j,0}}{v_{j,min}} \right)^{\frac{1}{\gamma}} - 1 \right) \quad (3-3)$$

$$P_{max} = \frac{\left((1 + \gamma)(v_{j,0} \cdot \bar{t}_p)^{\frac{1}{1+\gamma}} Z_0^{\frac{\gamma}{1+\gamma}} - v_{j,min} \cdot \bar{t}_p \right)}{\gamma} - Z_0 \quad (3-4)$$

$$P_{max} = \frac{(v_{j,0} - v_{j,min})\bar{t}_p}{\gamma} \quad (3-5)$$

Där
$$\gamma = \sqrt{\rho_t / \rho_j}$$

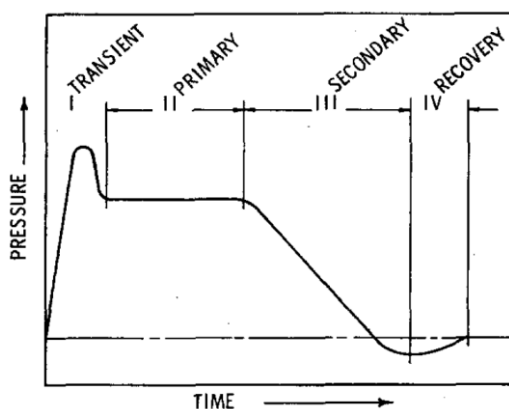
P_{max}	Penetrationsdjup, maximalt	(m)
Z_0	Avstånd från virtuellt origo till målet	(m)
$v_{j,0}$	Strålens spets hastighet	(m/s)
$v_{j,min}$	Undre gränshastighet	(m/s)
\bar{t}_p	Genomsnittlig fragmenteringstid	(s)
t_p	Fragmenteringstid	(s)

Dessa ekvationer har en tydlig begränsning genom att de förutsätter detaljerad information om strålens karaktäristik, information som normalt inte är tillgänglig för röjningspersonalen. Förvisso föreligger en numerisk metod för att beräkna fragmenteringstiden (den informationsmängd som troligen är svårast att fastställa), men även denna förutsätter indata som ammunitionsröjaren ej har tillgång till (Walters & Summers 1994, 1873-1874). Däremot ger teorin, om dess ingångsvärden kan fastställas, strålens penetrationsegenskaper vid långa detonationsavstånd och efter fullständig fragmentering.

3.4. Teorier som betraktar strålen som en projektil

Den andra utvecklingslinjen avser penetrationsmodeller som betraktar strålen som en sammanhängande projektil med enhetlig utgångshastighet. Dessa modeller är ursprungligen avsedda för ett lägre hastighetsintervall än jetstrålens, vilket innebär att målets hållfastegenskaper får en större inverkan på penetrationsdjupet. De modeller som är användbara för RSV-strålar är i grunden desamma som används för pilprojektiler (Walters & Zukas 1989, 149-150).

Christman och Gehring utvecklade på 1960-talet de grundläggande penetrationsteorierna för långsträckta höghastighetsprojektiler (pilprojektiler). Teorierna betraktar penetrationsförloppet som bestående av fyra olika faser och kan appliceras på RSV-strålens längd och hastighet (Christman & Gehring 1966, 1580). Faserna ger olika bidrag till den totala penetrationen och domineras av fundamentalt skilda fysikaliska principer.



Figur 3-1 De fyra penetrationsfaserna när strålen betraktas som en pilprojektil. (Christman & Gehring 1966, 1580)

Den första fasen, övergångsfasen (*Transient Phase*), uppstår när strålen träffar målet, är kortvarig och sträcker sig bara in till ett par stråldiametrars penetrationsdjup. Övergångsfasen domineras av den kraftiga stötvåg som uppstår vid anslaget mot målet, då såväl stråle som mål uppträder plastiskt. De dominerande materielegenskaperna är strålens och målets densiteter. (Christman & Gehring 1966, 1580; Orphal 1997, 601).

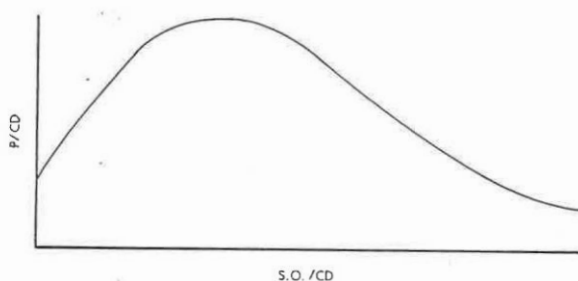
Den andra fasen, primärfasen (*Primary Penetration Phase*) avser den hydrodynamiska delen av penetrationsförloppet, under vilken strålens segment konsumeras (eroderas) samtidigt som det bildas en hållighet i målet. Bernoullis ekvation ger en god approximation av penetrationsförloppet och varaktigheten för denna fas avgörs främst av strålens geometri. När hela strålen har konsumerats övergår penetrationen i den tredje fasen (Christman & Gehring 1966, 1580; Orphal 1997, 601-602).

Den tredje fasen, sekundärfasen (*Secondary Penetration Phase*) avser penetration som sker efter att strålen har konsumerats. Penetrationsförloppet fortsätter genom den rörelseenergi som strålen överfört till målmaterialiet och som ger upphov till materialrörelser och komprimering. Under denna fas är det främst mål- och strålmaterialets hållfasthetsegenskaper och porisitet som dominerar (Christman & Gehring 1966, 1580; Orphal 1997, 602).

Den sista fasen, återhämtningsfasen (*Recovery Regime*) är en reaktion på föregående fas. Förloppet är elastiskt och motsatt riktat mot föregående fas, vilket gör att håldjupet minskar något. Den fjärde fasens inverkan på penetrationsdjupet är marginell och betraktas ofta som försumbar (Christman & Gehring 1966, 1581; Orphal 1997, 602).

3.5. Teorier avseende detonationsavståndets inverkan

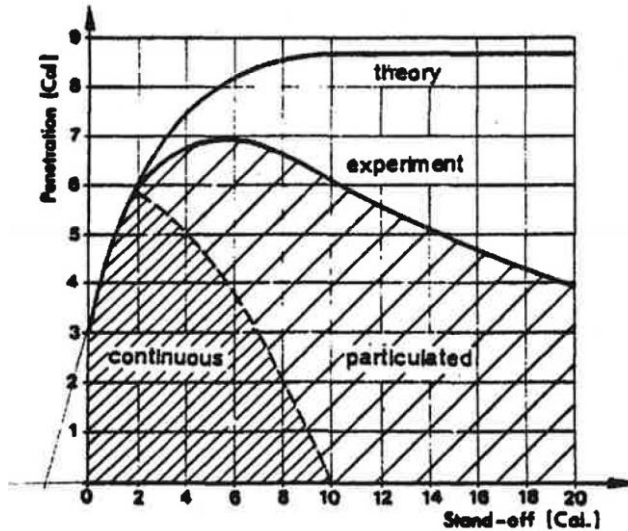
En RSV-laddnings penetrationsförmåga är relaterad till avståndet mellan konbasen och målet, det s.k. detonationsavståndet (*standoff distance*). Inledningsvis ökar penetrationsdjupet med detonationsavståndet, för att nå ett maximum vid det optimala detonationsavståndet, varefter penetrationsdjupet succesivt avtar (Held 1983, 331). Grafiskt brukar detonationsavståndets inverkan på penetrationsdjupet beskrivas med en standoff-kurva (Held 1983, 331; Walters, Flis & Chou 1988, 309). Standoff-kurvan kan genom RSV-laddningars skalbarhet normaliseras med laddningens kaliber, se Figur 3-2. Härigenom erhålls en möjlighet att jämföra laddningar med varierande kaliber (Held 1983, 332). Vanligtvis redovisar standoff-kurvan penetrationsdjupet i stål eller pansarstål.



Figur 3-2 Normaliserad standoff-kurva utvisande hur penetrationsdjupet varierar med detonationsavståndet, efter (Walters, Flis & Chou 1988, 310).

Den fysikaliska förklaringen till kurvans form är att penetrationsförmågan ökar så länge strålen sträcks ut och blir längre. Genom att fragmenteringen inte sker simultant kommer kurvlutningen succesivt att avta allteftersom en större andel av strålen fragmenteras. Teoretiskt skulle strålen

härefter bibehålla sin maximala penetration, men i realiteten börjar den avta redan innan hela strålen hunnit fragmenterats, se Figur 3-3. Anledningen är främst relaterad till att strålsegmenten avviker från symmetriaxeln och i allt högre grad träffar hålkanalens väggar istället för hålbotten (Held 1983, 332-333; Cornish et. al. 2001, 114).



Figur 3-3 Sambandet mellan experimentell och teoretisk standoff-kurva samt kurvans segmenteringsgrad (Held 1983, 332).

Kurvans lutning är relaterad till precision och symmetri i tillverkningen av laddningen (Walters & Zukas 1989, 178-180). Standoff-kurvor är normalt specifika för en viss laddning och sträcker sig sällan längre än till ett detonationsavstånd motsvarande 25 kalibrar. Dock anses standoff-kurvans principiella form vara generaliserbar även om laddningarnas maximala penetrationsdjup varierar. Wiljk och Tjernberg (2005, 9) har utvecklat en modell för att beräkna penetrationsförmågan som funktion av detonationsavståndet. För precisionsladdningar anges den till:

$$P(S) = \frac{5,6d}{1 + \left(\frac{S - 7d}{14d}\right)^2} \quad (3-6)$$

Där	P	Penetrationsdjup	(m)
	S	Detonationsavstånd	(m)
	d	RSV-stridsdelens kaliber	(m)

Den generaliserade standoff-kurvan kan användas för stridsdelar med en kaliber mellan 40-178 mm (Walters & Zukas 1989, 185-187). Modellen avser penetration i metaller och någon motsvarande modell för porösa målmaterial som sand och grus har inte gått att finna.

4. Tidigare föreslagen beräkningsmodell för RSV-penetration

I en tidigare uppsats i ämnet Militärteknik har författaren föreslagit en beräkningsmodell för dimensionering av skadebegränsande åtgärder mot RSV-penetration vid ammunitionsröjning [1] (Johnsson 2012, 40). Modellen är teoretiskt framtagen och kombinerar olika modeller för RSV-strålens egenskaper, från andra tillämpningsområden än ammunitionsröjning, enligt:

$$P_d = d \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_{avstånd} \cdot \xi \cdot \sqrt{\frac{\rho_j}{\rho_t}} \quad (4-1)$$

Där	P_d	Penetrationsdjup, dimensioneringsvärde	(m)
	d	RSV-stridsdelens kaliber	(m)
	k_1	Koefficient för strållängd	(-)
	k_2	Koefficient för målmaterial	(-)
	$k_{avstånd}$	Koefficient för detonationsavstånd	(-)
	ξ	Dimensioneringsfaktor	(-)
	ρ_j	Densitet, RSV-stråle	(kg/m ³)
	ρ_t	Densitet, målmaterial	(kg/m ³)

Basen är den modell som FOI utvecklat för fortifikatoriska skyddstäckningar, ekvation (3-2). Modellen ansågs användbar som grundekvation, då den använder indata som finns tillgänglig i använda ammunitionsdatabaser eller kan inhämtas vid rekognosering. Dessutom är den utvecklad för relevanta målmaterial och genom koefficienten för målmaterial kan penetrationsdjup i sand och grus beräknas. Ytterligare en fördel med modellen är att den beaktar den tekniska utveckling som skett avseende RSV-stridsdelars penetrationsförmåga, genom koefficienten för strållängd.

Koefficienten för strållängd är ursprungligen framtagen av Totalförsvarets Forskningsinstitut (FOI) tillsammans med anvisningar och rekommenderade värden (Elfving, Karlsson & Hansson 2005, 13). I en senare rapport föreslås en revidering av de rekommenderade värdena, då vissa värden anses felaktiga och att modern RSV-ammunition, med ett penetrationsdjup i pansar motsvarande 8 kalibrar, inte omfattas (Hansson & Westerling 2007, 66-67). Dessa reviderade värden på koefficienten för strållängd används, enligt:

Tabell 4-1 Värden på koefficienten för strållängd, k_1 .

Typ av stridsdel	Kaliber [mm]	k_1
Substridsdel	< 70	8
Bärbara pansarvärnsvapen	< 110	8/12/16*
Lätt pansarvärnsrobot	< 130	12/16**
Tung pansarvärnsrobot	< 180	12/16**

* Värdet 8 används enbart för äldre stridsdelar, med kända data motsvarande 4 kalibrars penetrationsförmåga, i övrigt enligt **
** Värdet 12 används för alla stridsdelar förutom senare generationer med ett normerat penetrationsdjup i pansarstål motsvarande 8 kalibrar.

Även koefficienten för målmaterial är ursprungligen framtagen av Totalförsvarets Forskningsinstitut (FOI) och tillämpas enligt deras anvisningar (Elfving, Karlsson & Hansson 2005, 14; Hansson & Westerling 2007, 68):

Tabell 4-2 Värdet på koefficienten för målmaterial, k_2 .

Målmaterial	Densitet [kg/m ³]	k_2
Sand, grus och singel	1600	1,0

Wijks och Tjernbergs beräkningsmodell (2005, 9) för detonationsavståndets inverkan på penetrationsdjupet, ekvation (3-6), har använts som grund för framtagandet av koefficienten för detonationsavstånd. För att kunna integreras i modellen har ekvation (3-6) omarbetats till att uttrycka kvarvarande andel av maximal penetrationsförmåga som funktion av detonationsavståndet, enligt:

$$k_{avstånd} = \frac{1}{1 + \left(\frac{S - 7d}{14d}\right)^2} \quad (4-2)$$

Där	$k_{avstånd}$	Koefficient för detonationsavstånd	(-)
	S	Detonationsavstånd	(m)
	d	RSV-stridsdelens kaliber	(m)

Standoff-kurvans principiella form är densamma för olika stridsdelar även om storlek och teknisk generation varierar (Wijk och Tjernberg 2005, 9). Härigenom kan kurvan tillämpas tillsammans med grundmodellens övriga parametrar. En försvårande omständighet för denna grova förenkling är att kurvans lutning troligen varierar mellan olika målmaterial. Dock saknades standoff-kurvor för relevanta målmaterial för att undersöka denna hypotes i den förra uppsatsen (Johnsson 2012, 37).

Modellen har kompletterats med en dimensioneringsfaktor, avsedd att kompensera för fel relaterade till skattning av dimensioner, variationer i målmaterialiets sammansättning och heterogeniteter i målmaterialiet genom att sandsäckar används (Johnsson 2012, 40). Värdet 1,3 används på dimensioneringsfaktorn, utifrån de kriterier som Fortifikationsverket tillämpar för RSV-penetration i fortifikatoriska skydd (Fortifikationsverket 2011b, 60).

Beräkningsmodellen bedöms giltig för kalibrar i intervallet 40-178 mm, relaterat till RSV-laddningars skalbarhet (Walters & Zukas 1989, 186). Vidare bedöms beräkningsmodellen endast vara tillämpbar för detonationsavstånd mindre än 25 kalibrar, utifrån bristen på tillförlitlig dokumentation avseende kurvans utseende vid längre detonationsavstånd (Johnsson 2012, 39).

5. Försök

I kapitlet redovisas de försök som genomförts för att kunna vidareutveckla beräkningsmodellen [1]. En mer detaljerad dokumentation av försöksuppställning och erhållet resultat redovisas i Bilaga 1.

5.1. Försöksmetod och försöksdesign

Metoden som valts för att erhålla kunskap om RSV-strålens penetrationsförmåga i en sandsäckskonstruktion vid långa detonationsavstånd utgörs av experiment i fullskala. Syftet med metodvalet är att erhålla data som är representativa för den avsedda användningen. Försök av denna typ är resurskrävande på grund av stora dimensioner, men valdes då representativa stridsdelar fanns att tillgå och kostsam specialtillverkning kunde undvikas.

Modellen [1] inkluderar empiriska faktorer som kompenserar för vissa avvikelser utifrån den fysikaliska grundmodellen, ekvation (3-1). Härigenom är olika parametrars inverkan på utfallet inte känd. Skalning av semi-empiriska modeller kan ge fel relaterat till en felaktig/ofullständig dimensionsanalys (Lidén et. al. 1994, 193). Forrestal och Luk menar dessutom att experimentell verksamhet avseende penetration i jordarter inte går att utföra i laboratorieskala, utan kräver fältexperiment för att analyseras (1992, 427).

En alternativ metod för att kartlägga penetrationsförloppet hade kunnat vara kontinuumdynamiska simuleringar. Kontinuummekanik utgår från de grundläggande principerna om massans, rörelsemängdens och energins bevarande i ett kontinuerligt medium. Med avancerat datorstöd simuleras förloppet fram i korta tidssteg (Lidén et. al. 1994, 152-153). I de fall materialparametrarna inte är fullständigt kända vid de studerade förhållandena kan simuleringar av denna typ ge upphov till stora fel, vilka normalt kräver praktiska skjutförsök för att kunna korrigeras (Lidén et. al. 1994, 131). Med hänsyn till de osäkerheter som föreligger avseende RSV-penetration i sand/grus bedömdes denna metod inte ge erforderlig tillförlitlighet för att vidareutveckla modellen.

De fullskaliga försöken har designats för att i så hög grad som möjligt efterlikna de förhållanden som är typiska vid ammunitionsröjning. Målmaterialet fingrus förpackat i sandsäckar i kombination med långa detonationsavstånd anses vara utmärkande.

Det fyllnadsmaterial som används i sandsäckar utgörs vanligtvis av natursand/naturgrus, inte krossat material på grund av detta har sämre formbarhet. Någon specificerad fraktionsfördelning för denna användning har inte påträffats i varken svenskt eller internationellt regelverk för verksamheten. Däremot undviks fyllnadsmassor innehållande större kornstorlekar som kan ge upphov till sekundärsplitter med lång räckvidd. Oftast styrs valet av vad som finns att tillgå på orten, men kornstorlekasintervallet 0-8 mm bedöms, utifrån författarens erfarenhet, som representativt.

Sandsäckar förekommer i olika material och storlekar och inte heller här finns någon specificerad storlek eller standard. Det vanligaste materialet är juteväv, men även säckar i plast med eller utan glasfiberarmering förekommer. Inom Försvarmakten används sandsäckar tillverkade av juteväv, med storleken 0,35x0,75 m. Detta motsvarar storleken 0,30x0,50x0,10 m när säcken fyllts till 2/3 och förslutits. Samma storlek är även vanlig internationellt och används både till fördämningar och fortifikatoriska skydds konstruktioner.

Vid byggnation av skadebegränsande åtgärder staplas säckarna noga så att luftfickor och genomgående skarvar undviks i konstruktionen. För att säkerställa att sandsäckarna fyller ut ojämnheter och formar sig efter omgivningen packas varje sandsäckslager genom trampning.

Detonationsavståndet överstiger alltid det optimala för ammunitionen. Utöver det integrerade distansorganet krävs minst 0,5-1,0 m fritt arbetsutrymme. Sammantaget innebär detta att representativa detonationsavstånd är större än 10 kalibrar. Vidare kan markbeskaffenhet och omgivningen göra att avståndet måste utökas ytterligare för att möjliggöra byggnation. Dessutom kan detonationsavståndet användas som en designparameter då penetrationsförmågan minskar med ett ökande detonationsavstånd.

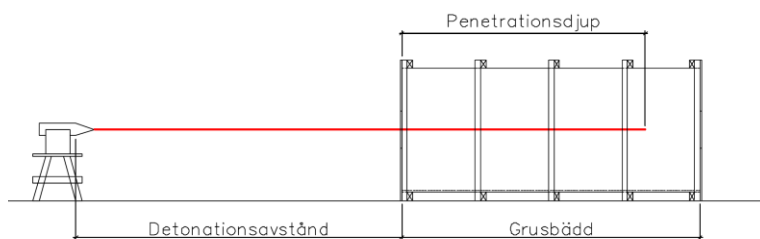
Försöken genomförs i tre försöksserier om fem skott vardera. Enbart en parameter varieras mellan de enskilda skotten inom respektive serie och övriga parametrar hålls konstanta. Inledningsvis kommer maximal penetration i homogen grusbädd att undersökas, för att verifiera penetrationsparametrar för rena fyllnadsmassor. Härefter införs en större luftspalt i målet för att studera strålsegmentens beteende. Slutligen undersöks maximal penetration när samma fyllnadsmassor är förpackade i sandsäckar. Inom varje försöksserie skjuts fem skott, där enbart detonationsavståndet varieras mellan de enskilda skotten. Detonationsavstånden 10, 25, 50, 75 och 100 kalibrar används i samtliga försöksserier. Genom att använda samma detonationsavstånd vid de olika serierna skapas även möjlighet till jämförelse mellan serierna.

5.2.Försökuppställning

Skjutförsöken genomförs som tre separata försöksserier, med olika försökuppställningar. Ritningar för mål och försökuppställning redovisas i Bilaga 1.

Försöksserie 1 – Penetrationsdjup i homogen grusbädd

RSV-laddningen skjuts mot en regelförstärkt trälåda med öppen ovansida fylld med fingrus. Grusbädden har tvärsnittet 1,00x1,00 m och längden 2,44 m. Laddningen skjuts längs målets centrumaxel från fastställt detonationsavstånd och RSV-strålen tränger in i målet genom en tunn pappskiva i ena gaveln. Penetrationsdjupet fastställs utifrån sluggsegmentets position, som lokaliseras med metalldetektor och dess läge mäts in efter friläggning. Se Figur 5-1.

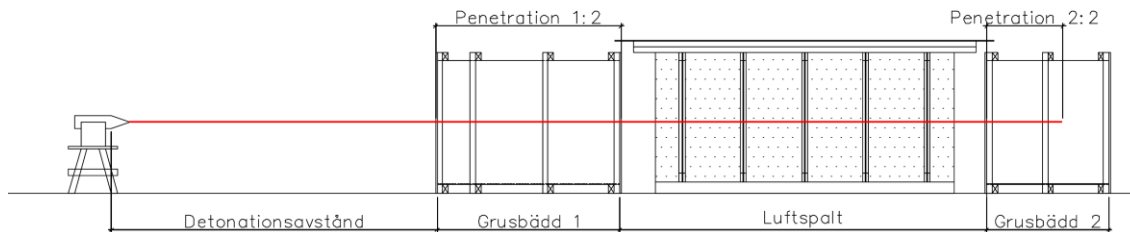


Figur 5-1 Schematisk bild över försökuppställningen för skjutserie 1.

Försöksserie 2 – Penetrationsdjup i tvådelad grusbädd med luftspalt

RSV-laddningen skjuts mot två regelförstärkta trälådor med öppen ovansida, fyllda med fingrus. Grusbädden har tvärsnittet 1,00x1,00 m och den första delen har en längd motsvarand maximalt penetrationsdjup från försöksserie 1 reducerat med 0,50 m och den andra delen har längd på mer än 0,80 m. Avståndet mellan sandmålen (3,00 m) utgörs av en luftspalt med tunna vittnesskivor i wellpapp var 0,50 m för att studera sluggens beteende under penetrationsförloppet. Laddningen skjuts längs målkonstruktionens centrumaxel från fastställt detonationsavstånd. RSV-strålen passerar

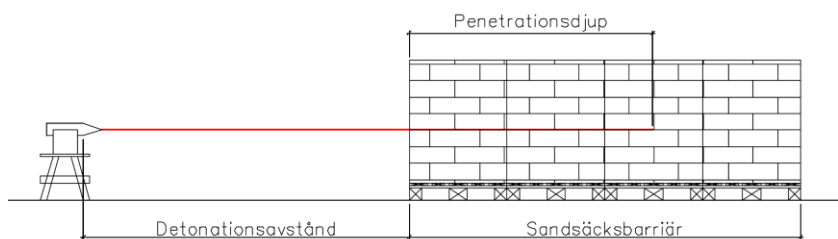
igenom den första sandbädden via tunna pappskivor i lådans gavlar. Härfter passerar strålen genom luftspalten med vittnesskivor, där penetrationsförloppet filmas med en enkel höghastighetskamera, CASIO EX-F1, med en bildhasighet på 1200 bildrutor per sekund. Slutligen erhålls resterande penetration i den andra grusbädden, där inpassering ånyo sker genom en pappskiva i ena gaveln. Totalt penetrationsdjup erhålls genom att addera den första grusbäddens djup till sluggsegmentets penetration i den andra grusbädden. Sluggens position fastställs på samma sätt som i försöksserie 1. Sluggsegmentets beteende under passage genom luftspalten dokumenteras utifrån genomslagsmönster i vittnesskivorna och höghastighetsfilmer. Se Figur 5-2.



Figur 5-2 Schematisk bild över försökssupställningen för skjutserie 2.

Försöksserie 3 – Penetrationsdjup i sandsäcksbarriär

RSV-laddningen skjuts mot en sandsäcksbarriär med formen av ett rätblock, med tvärsnittet 1,20x1,00 m och längden 3,20 m. Sandsäckarna fylls till 2/3 med samma fyllnadsmassor som används i försöksserie 1 och 2 och försluts med buntband i plast. Laddningen skjuts parallellt med sandsäcksbarriärens centrumaxel och med minst 0,40 m sandsäckstäckning på alla sidor om penetrationskanalen. Penetrationsdjupet fastställs utifrån sluggsegmentets position, som lokaliseras med metalldetektor och dess läge mäts in efter friläggning. Se Figur 5-3.



Figur 5-3 Schematisk bild över försökssupställningen för skjutserie 3.

Ammunition

Samtliga försök genomförs med samma typ av RSV-laddning, stridshuvud till Robot 53 BANTAM. Verkansdelen utgörs av en 107 mm strålbildande RSV-stridsdel som modifierats för statisk sprängning. Laddningen har använts vid ett flertal tidigare försök, varför det finns omfattande dokumentation att utgå ifrån. Stridsdelen är av äldre modell, men kan ändå anses representativ avseende teknisk generation och kaliber för vanligt förkommande oexploderad ammunition från lätta pansarvärnsvapen. Då stridsdelen inte längre är i operativt bruk omfattas den inte av sekretess, vilket förenklar informationshanteringen och medger publicering av resultatet. En mer utförlig teknisk specifikation, stråldata, standoff-kurvor mm för laddningen redovisas i Bilaga 1.

Målmaterialet

Målmaterialet utgörs av fingrus 0-8 mm, som homogen grusbädd respektive förpackat i sandsäckar. Vid samtliga försök har grusbädden/sandsäckarna packats till en packningsgrad motsvarande vad

som tillämpas vid skadebegränsande åtgärder. Packningen har skett genom manuell trampning i samband med målkonstruktionens ifyllnad/byggnation.

Provtagningar fördelade över samtliga försöksserier har genomförts för att fastställa sandens densitet, sandsäckarnas fyllnadsgrad och sandsäcksbarriärens densitet. Följande avrundade medelvärden på uppmätta densiteter används för samtliga beräkningar avseende försöken, ytterligare detaljer och spridningsmått redovisas i Bilaga 1.

Densitet fingrus, opackad	1 370 kg/m ³
Densitet fingrus, packad	1 620 kg/m ³
Densitet sandsäck, packad	1 490 kg/m ³

5.3.Diskussion felkällor

För att säkerställa en funktionell försöksdesign testades den planerade försöksuppställningen genom två fullskaliga provskjutningar 2014-01-09 --10. Erfarenheterna inarbetades i den slutliga försöksuppställningen.

För att undvika att RSV-strålens bildande och riktning påverkas är det avgörande att detonationsfronten utbreder sig symmetriskt genom explosivämnet (Ayisit 2008, 1399). Enbart laddningar som är modifierade för statisk sprängning används för säkerställa symmetrisk initiering. Modifieringen är utförd av Försvarets Materielverk (FMV) och det nya tändarläget är anpassat för initiering med elsprängkapsel av typen VA, vilken användes vid försöken. För att minimera risken att strålen påverkas av stötvågsreflektion mot underlaget placerades laddningen på en ca 0,45 m hög pall. Pallen utgörs av en klen träkonstruktion som försetts med en 50 mm tjock skumgummimatta som distans till pallen för att ytterligare reducera reflektionen.

Gruset/sandsäckarna packades på motsvarande sätt vid samtliga skott, dock gjordes ingen mätning av packningsgraden. Lokala variationer i packningsgraden kan påverka penetrationsdjupet och strålens riktning. Hållkanalens riktning bedöms också kunna påverkas genom att deformationsmotståndet avtar mot sandbäddens ovansida, relaterat till det lägre marktrycket.

Målkonstruktionen försågs med cirkulära hål i gavlarna för stålens in- och utpassering, vilka täcktes med en tunn pappskiva för att gruset skulle hållas på plats. Härigenom minimerades inverkan av andra material än det undersökta fingeruset.

Inriktning av laddningarna måste ske med hög precision för att strålens avvikelser från symmetriaxeln skall kunna fastställas. All inmätning skedde med hjälp av olika laserinstrument. I horisontalplanet skedde inmätningen med en tvåaxlig korslaser (Leica Lino L2) tillsammans med lasermottagare (Leica Lino LLD2), både för att mäta in målkonstruktionens och RSV-laddningens höjd.

Detonationsavståndet mättes in med laseravståndsmätare (Leica Disto D2). RSV-laddningens riktning i horisontal och vertikalplan mättes in med laserriktmedel (till Rönjningsladdning OXA 4). De toleranser som tillämpades vid inriktningen var +/- 10 mm, tillsammans med de olika instrumentens mätnoggrannheter innebär detta ett maximalt fel på +/- 15 mm vid inriktning av mål och laddning.

Inmätning av de frilagda strålsegmenten skedde med måttstock och lod för att markera strålsegmentets läge i längd och sida. I höjd skedde inmätningen med måttstock mot en träregel placerad mellan målets sidor. Avläsningar avrundades till närmaste centimetermarkering och

mätnoggrannheten uppskattas till +/- 5 mm, vilket ger ett totalt maximalt fel på +/- 10 mm vid inmätning av frilagda strålsegment.

Då försöken genomfördes vintertid användes saltblandat grus för att undvika tjälbildning i målmaterialet. Enligt leverantören uppgick saltmängden till ca 20 kg per m³, vilket motsvarar ca 1,3 viktprocent. På vissa ställen i massorna påträffades klumpar av rent salt som inte blivit jämnt fördelade i massorna. Hur salthalten och vissa ouppblandade saltklumpar kan inverka på penetrationsegenskaperna är inte känt.

Fyllnadsmassor av ett givet storleksintervall, t.ex. 0-8 mm, kan ha varierande kornstorleksfördelning. Information om vilken inverkan olika kornstorleksfördelningar har på penetrationsegenskaperna hos en RSV-stråle har inte gått att spåra. För att öka användbarheten av försöksresultatet har siktanalys genomförts på det använda målmaterialet, se Bilaga 1.

Samtliga försök genomfördes i fullt dagsljus, utan kraftig nederbörd och vid en temperatur mellan 0 och +5° C. Inverkan av väderrelaterade omständigheter bedöms därför som minimal.

5.4.Resultat

Samtliga försök genomfördes vid SWEDEC, Sprängplats 1 i Eksjö under januari och februari 2014. Två skott fick upprepas under försöken. Det första var skott 1:4 där ett avsevärt mindre penetrationsdjup erhöles. Efteråt konstaterades ett flertal stora splitter från höljet i kombination med omfattande sotbeläggning runt detonationsplatsen. Dessa fynd indikerar att det skett en ofullständig detonation (deflagration) i explosivämnet. Det erhållna resultatet anses återspegla ett tekniskt fel snarare än ammunitionens egenspridning, varför detta försök ersattes med ett nytt skott (1:4b). Det andra var skott 2:5, där sluggsegmentet gick utanför den andra grusbädden. Hålskanalen följde symmetriaxeln genom den första grusbädden och under första delen av luftspalten, härfter inträffar en kraftig riktningsändring som får sluggen att missa hela restverkansmålet. Troligen träffades sluggen av något föremål i luftspalten, vilket orsakade den abrupta riktningsändringen. Övriga strålsegment följde symmetriaxeln och träffade den andra grusbädden. Skottet upprepades (2:5b), varvid ett mätbart resultat erhöles.

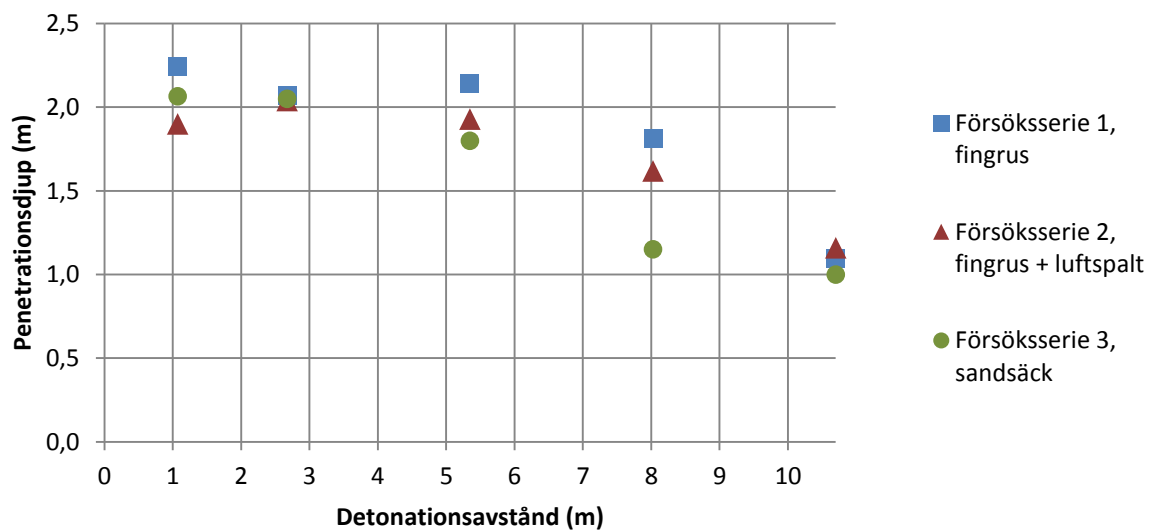
Nedan redovisas en sammanställning över uppmätta penetrationsdjup för respektive försöksskott. En mer detaljerad redovisning av försöksresultat jämte bilder redovisas i Bilaga 1. Härutöver finns fullständiga försöksprotokoll, komplett fotodokumentation och höghastighetsfilm för respektive skott hos författaren.

Tabell 5-1 Sammanställning över försöksresultat.

Detonationsavstånd [kalibrar] [m]	10 1,07	25 2,68	50 5,35	75 8,03	100 10,70
FÖRSÖKSSERIE 1					
Penetrationsdjup [m]	2,25	2,07	2,14	1,81	1,10
Skott nr [serie:nr]	(Skott 1:5)	(Skott 1:4b)	(Skott 1:3)	(Skott 1:2)	(Skott 1:1)
FÖRSÖKSSERIE 2					
Penetrationsdjup [m]	1,90	2,04	1,93	1,62	1,16
Skott nr [serie:nr]	(Skott 2:5b)	(Skott 2:4)	(Skott 2:3)	(Skott 2:2)	(Skott 2:1)
FÖRSÖKSSERIE 3					
Penetrationsdjup [m]	2,07	2,05	1,80	1,15	1,00
Skott nr [serie:nr]	(Skott 3:5)	(Skott 3:4)	(Skott 3:3)	(Skott 3:2)	(Skott 3:1)

I diagrammet nedan redovisas försöksresultatet grafiskt.

Försöksresultat - Maximalt penetrationsdjup



Figur 5-4 Grafisk sammanställning över försöksresultat.

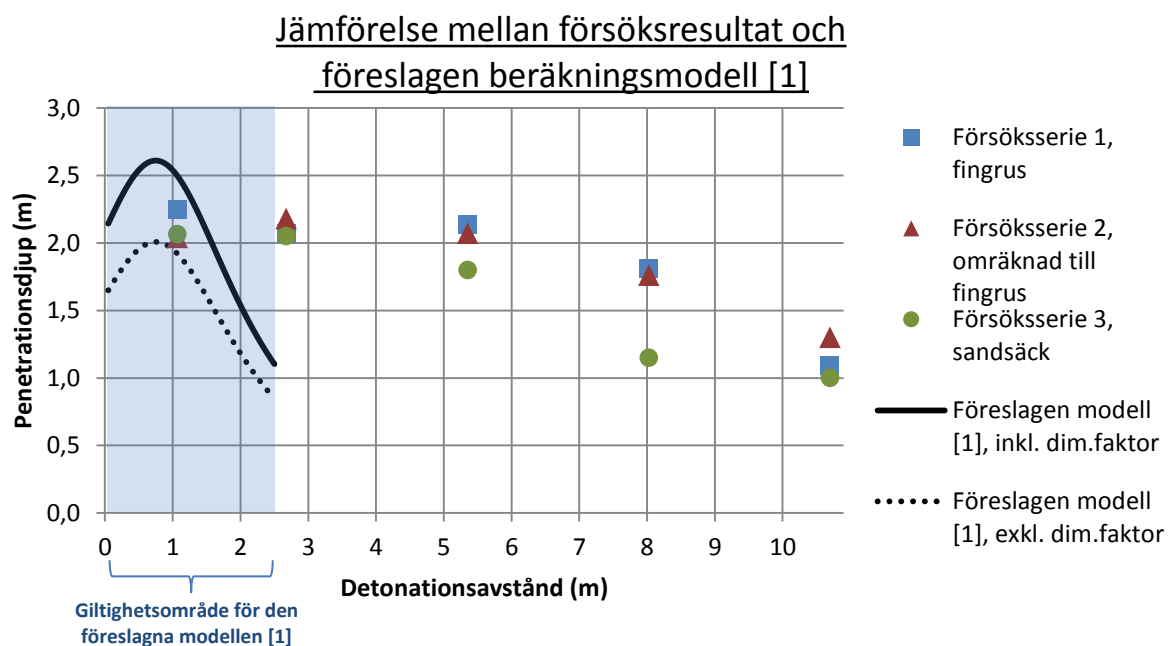
6. Analys av försöksresultat

I kapitlet analyseras överensstämmelsen mellan försöksresultatet och den föreslagna beräkningsmodellen [1]. Resultatet diskuteras utifrån teorier för RSV-strålens penetrationsegenskaper (Kapitel 2).

6.1. Överensstämmelse med beräkningsmodellen

Beräkningsmodellen [1] ger dimensioneringsvärdet för tjockleken på en skyddskonstruktion byggd av sandsäckar, men är även avsedda att kunna användas till skyddskonstruktioner i form av en homogen sand-/grusbädd (Johnsson 2012, 53-54). Modellen [1] inkluderar en säkerhetsmarginal, dimensioneringsfaktorn. För att erhålla en mer korrekt jämförelse mellan beräknat penetrationsdjup och erhållt försöksresultat exkluderas dimensioneringsfaktorn, utom där detta särskilt redovisas.

I Figur 6-1 redovisas en jämförelse mellan försöksresultatet och penetrationsdjup enligt modellen [1], såväl med som utan dimensioneringsfaktorn. Försöksserie 2 har här omräknats till penetration i en homogen grusbädd för att kompensera för att strålen även passerar en luftspalt på 3,0 m, vilket innebar i en genomsnittlig reducering av penetrationsdjupet på 0,14 m.



Figur 6-1 Försöksresultat jämfört med den föreslagna beräkningsmodellen [1].

Samtliga uppmätta penetrationsdjup för detonationsavståndet 1,07 m (10 kalibrar) ligger inom dimensioneringsvärdet enligt modellen, men överstiger vad som beräknas utan dimensioneringsfaktorn. Den av FOI utvecklade grundmodellen, ekvation (3-2), predikterar således ett för lågt värde för maximalt penetrationsdjup under de aktuella förhållandena. Avvikelsen uppvägs förvisso av dimensioneringsfaktorn, men denna är inte avsedd att kompensera för denna typ av fel, se kapitel 4.

Nästa avvikelse är relaterad till hur penetrationsdjupet avtar vid ett ökande detonationsavstånd. Penetrationsdjupet i båda målmaterialet avtar avsevärt långsammare än vad [1] predikterar, vilket innebär att penetrationsdjupet vid längre detonationsavstånd riskerar att överstiga den beräknade

tjockleken på en skyddskonstruktion. De uppmätta penetrationsdjupen vid detonationsavståndet 2,68 m (25 kalibrar) överstiger modellens med ungefär en meter. Någon jämförelse med övriga försöksresultat är inte möjlig på grund av modellens [1] giltighetsområde.

En anmärkningsvärd iakttagelse är att penetrationsdjupet genomgående är mindre i en sandsäcksbarriär än i en grusbädd. Samtidigt kan det konstateras att spridningen i resultat är relativt stor och antalet försök begränsat. Frågan är om skillnaden i penetrationsdjup mellan målmaterialet är signifikant eller om den kan förklaras stokastiskt.

Skillnaden mellan grusbädd och sandsäcksbarriär

De genomförda försöken är få till antalet, lågt n-värde, vilket begränsar möjligheterna att dra generaliserbara slutsatser utifrån läges- och spridningsmått. Dessutom är möjligheterna till jämförelse med andra försök begränsad, då den dokumenterade försökserfarenheten i förekommande fall oftast utgörs av singelskott ($n=1$). Se exempelvis FOI försökserfarenhet avseende fortifikatoriska skyddstäckningar 2003-2005 (Elfving, Karlsson och Hansson 2005, 11).

Försöksresultatet omfattar tre skjutserier, där en parameter varierats mellan respektive serie och inom serierna har samma detonationsavstånd tillämpats. För att pröva om det föreligger en signifikant skillnad mellan penetrationsdjupet i en sandsäcksbarriär jämfört med en homogen grusbädd föreligger därför två alternativ. Antingen jämförs skotten parvis för respektive detonationsavstånd eller jämförs medelvärdet för hela serierna. Vad som är lämpligast i detta fall är svårt att fastställa, varför båda jämförelserna genomförs.

Hypotesprövning används för att undersöka om det råder en signifikant skillnad, följande hypoteser ställs upp:

- **Nollhypotes (H_0)** – Det råder ingen skillnad i penetrationsdjup mellan målmaterialet.
- **Mothypotes (H_1)** – Penetrationsdjupet i sandsäcken är mindre än i ett homogent grusskikt.

Hypotesprövningen genomförs mot konfidensgraden 95 %, då någon fastställd nivå för den aktuella tillämpningen inte föreligger.

Inledningsvis bör penetrationsdjupen analyseras utifrån hur dessa kan antas fördelade. Försöksresultatet är otillräckligt för att genomföra analys av den statistiska fördelningen vid respektive detonationsavstånd. Istället har vetenskaplig litteratur och rapporter granskats i detta avseende. Walters och Zukas (1989, 180) återger en undersökning av DiPesio et.al. (1965) där det föreligger såväl läges- som spridningsmått för RSV-laddningar. Av underlaget konstateras att skottens spridning är symmetriskt fördelad kring medelvärdet (standoff-kurvan). Penetrationsdjupet antas vara approximativt normalfördelat i den fortsatta analysen. Metoden för att jämföra de två populationerna (målmaterialet), sandsäcksbarriär med homogen grusbädd, är ett s.k. t-test (Lantz 2013, 265).

Det första testet avser parvisa jämförelser där penetrationsdjupet jämförs för respektive detonationsavstånd. Styrkan med denna typ av jämförelse är att den undersöker faktiska skillnader och inverkan av andra faktorer reduceras, exempelvis om spridningen varierar med detonationsavståndet (Lantz 2013, 284). Generellt rekommenderas parvisa jämförelser istället för jämförelser av stickprovsmedelvärden, då denna test anses ha högre precision (Lantz 2013, 285).

För varje detonationsavstånd beräknas differensen mellan populationerna, penetrationsdjup i fingrus (försöksserie 1) jämfört med sandsäckar (försöksserie 3). Medelvärdet och standardavvikelsen för differenserna används för att fastställa testets t-värde enligt (Lantz 2013, 286):

$$t = \frac{\bar{d} - D}{s_d/\sqrt{n}} \quad (6-1)$$

Där	\bar{d}	Medelvärde, differenser	$259 \cdot 10^{-3}$ m
	s_d	Standardavvikelse, differenser	$254 \cdot 10^{-3}$ m
	D	Den sanna differens som man vill testa	0 m
	n	Urvalets storlek (antal jämförda par)	5 st

Detta resulterar i ett t-värde på 2,28. Då mothypotesen (H_1) är ensidig undersöks ett ensidigt konfidensintervall. Antalet frihetsgrader är 4 ($n-1$) och p-värdet för testet beräknas till 0,042, vilket innebär att nollhypotesen kan förkastas (vid 95 % konfidensgrad) och mothypotesen antas.

Det andra testet avser jämförelse av stickprovsmedelvärden för två oberoende populationer. Genom att utgå från en standoff-kurva för fingrus erhålls stickprovsmedelvärden på penetrationsdjupet för olika detonationsavstånd. Standoff-kurvan ger en möjlighet att samtidigt jämföra samtliga penetrationsdjup i sandsäckar (försöksserie 3) med de i fingrus (försöksserie 1 och 2). Styrkan med detta test är att alla tio skotten mot fingrus kan jämföras med de fem skotten mot sandsäckar.

Inledningsvis bestäms en standoff-kurva för försöksresultatet i fingrus. Genom att studera en standoff-kurvas principiella form, Figur 3-2 och Figur 3-3, kan det konstateras att kurvan är icke-linjär, utan har formen av ett flergradigt polynom. Inom det studerade intervallet, detonationsavstånd 10-100 kalibrar, approximeras kurvans form som ett tredjegradspolynom, då kurvan bör kunna åskådliggöra två riktningsändringar. Den första riktningsändringen är relaterad till omslagspunkten vid maximalt penetrationsdjup och den andra till att kurvan vanligen "planar ut" efter visst detonationsavstånd.

Kurvanpassningen genomförs med minstakvadratmetoden, baserad på penetrationsdata från försöksserie 1 och försöksserie 2 omräknad till penetration i en homogen grusbädd. Beräkningarna genomförs med datorstöd och inbyggd funktionalitet i Microsoft Excel (version 2010) och Matlab (version R2014a) med tilläggsmodulen *Curve Fitting Toolbox*. Två olika programvaror används för att verifiera att likvärdiga resultat erhålls.

Kurvanpassningen resulterar i en ekvation för det tredjegradspolynom som beskriver laddningens standoff-kurva för målmaterialiet fingrus i intervallet 10-100 kalibrar. Både programvarorna resulterar i samma resultat, enligt:

$$P = -1,00 \cdot 10^{-3} \cdot S^3 + 1,23 \cdot 10^{-3} \cdot S^2 + 1,51 \cdot 10^{-2} \cdot S + 2,12 \quad (6-2)$$

Där	P	Penetrationsdjup	(m)
	S	Detonationsavstånd	(m)

Härefter används Welchs t-test som är avsett för jämförelse mellan två populationer vars sanna medelvärden inte är kända och enbart stickprovdata är tillgängliga. Vidare är testet avsett för stickprov som har olika storlek och varians. Försöksresultatet är enligt dessa kriterier; stickproven är

olika stora, variansen skiljer och den sanna standoff-kurvan (medelvärdet) är inte känd. Testets t-värde beräknas enligt (Lantz 2013, 276-278):

$$t = \frac{(\bar{x}_1 - \bar{x}_2) - D}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}} \quad (6-3)$$

För signifikanstestet approximeras fördelningen som en t-fördelning, där antal frihetsgrader beräknas enligt ekvation (6-4) och avrundas till närmast lägre heltal. (Lantz 2013, 278).

$$f.g. = \frac{\left(\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}\right)^2}{\left(\frac{s_1^2}{n_1}\right)^2 / (n_1 - 1) + \left(\frac{s_2^2}{n_2}\right)^2 / (n_2 - 1)} \quad (6-4)$$

Där	\bar{x}_1 och \bar{x}_2	Medelvärde (avvikelse från standoff-kurva)	(m)
	s_1 och s_2	Standardavvikelse	(m)
	n_1 och n_2	Urvalets storlek	(st)
	$f.g.$	Frihetsgrader	(-)

Utifrån standoff-kurvan för fingrus, ekvation (6-2), och försöksdata har följande parametrar för hypotesprovnings beräknats:

Tabell 6-1 Sammanställning över försöksresultat.

Målmaterial	Stickprovets storlek	Medelvärde [m]	Standardavvikelse [m]	t-värde	Frihetsgrader
Fingrus	$n_1 = 10$	$\bar{x}_1 = -2,04 \cdot 10^{-3}$	$s_1 = 77,9 \cdot 10^{-3}$	2,44	4,45 → 4
Sandsäck	$n_2 = 5$	$\bar{x}_2 = -261 \cdot 10^{-3}$	$s_2 = 235 \cdot 10^{-3}$		

I likhet med förra testet undersöks ett ensidigt konfidensintervall. P-värdet för jämförelsen mellan målmaterialet beräknas till 0,034, vilket innebär att nollhypotesen kan förkastas (vid 95 % konfidensgrad) och mothypotesen antas även i detta test.

Sammantaget indikerar de båda testen att penetrationsdjupet i sandsäckar är signifikant mindre än i en homogen grusbädd, sannolikheten att nollhypotesen skulle vara sann (typ I-fel) är < 5 %. Förvisso är n-värdet lågt och de erhållna p-värdena ligger relativt nära signifikansnivån. Trots detta är resultatet ändå anmärkningsvärt, särskilt utifrån att sandsäckskonstruktionen har lägre densitet än en homogen grusbädd. Enligt grundläggande penetrationsteorier för RSV-strålar skulle detta innebära det motsatta resultatet - ett större penetrationsdjup i sandsäckar. Möjliga orsaker till det erhållna resultatet diskuteras i avsnitt 0.

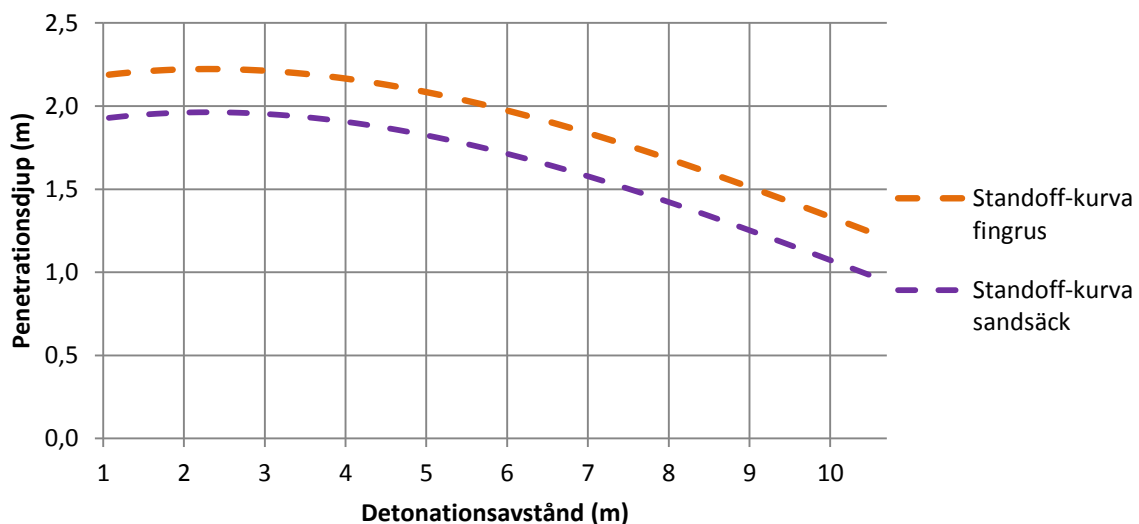
Bestämmande av standoff-kurvor

Som konstaterats föreligger en betydande spridning mellan de enskilda skotten vid respektive detonationsavstånd. Iakttagelsen är inte unik, utan har noterats även för andra experiment i målmaterialet sand (Schneider & Stilp 1984, 71-72). Generellt kan RSV-strålars spridning relateras till

faktorer som laddningarnas tillverkningsprecision, variationer i strålbildning och variationer i målmaterialets egenskaper (Walters & Zukas 1989, 179+186; Held 1983, 331-333). Den fortsatta analysen bör därför i första hand utgå från medelvärdet på penetrationen i målmaterialet (standoff-kurvor), snarare än från enskilda försöksresultat, undantaget de fall då enskilda mätvärden eller spridningsmått är av intresse. Då det föreligger en signifikant skillnad i penetrationsdjup mellan de två målmaterialet anses det relevant att bestämma två separata standoff-kurvor.

Standoff-kurvor för de enskilda försökserierna baseras på ett fåtal mätvärden, vilket gör att det finns en betydande osäkerhet avseende formen. För att genomföra kurvanpassningen på största möjliga mängd mätdata, omräknades samtliga försöksresultat som penetration i fingrus. Standoff-kurvan för sandsäckar erhålls därefter genom att parallellförskjuta kurvan motsvarande den genomsnittliga skillnaden mellan fingrus och sandsäckar (0,26 m). Denna grova förenkling anses rimlig då kurvorna för de enskilda försökserierna delar samma principiella form och främst skiljer i amplitud. Samtidigt föreligger en risk att kurvorna i verkligheten har något olika form. Även i detta fall genomfördes kurvanpassningen med två olika programvaror som resulterade i identiska kurvor, se Figur 6-2.

Standoff-kurvor



Figur 6-2 Standoff-kurvor för RB 53 penetration i homogen grusbädd respektive sandsäcksbarriär.

Kurvorna avser enbart det undersökta intervallet, 10-100 kalibrar. Extrapolering utanför dessa gränser leder till felaktiga penetrationsdjup. Vid kortare detonationsavstånd (< 10 kalibrar) har kurvan en helt annan form genom att strålen inte är helt fragmenterad och fortfarande töjs, se Figur 3-3. Vid längre detonationsavstånd (> 100 kalibrar) bedöms kurvan erhålla en flackare lutning ("plana ut"), bland annat relaterat till sluggens låga luftbromsning.

6.2. Diskussion kring orsaker till försöksresultat

Nedan analyseras och diskuteras försöksresultatet och möjliga förklaringar.

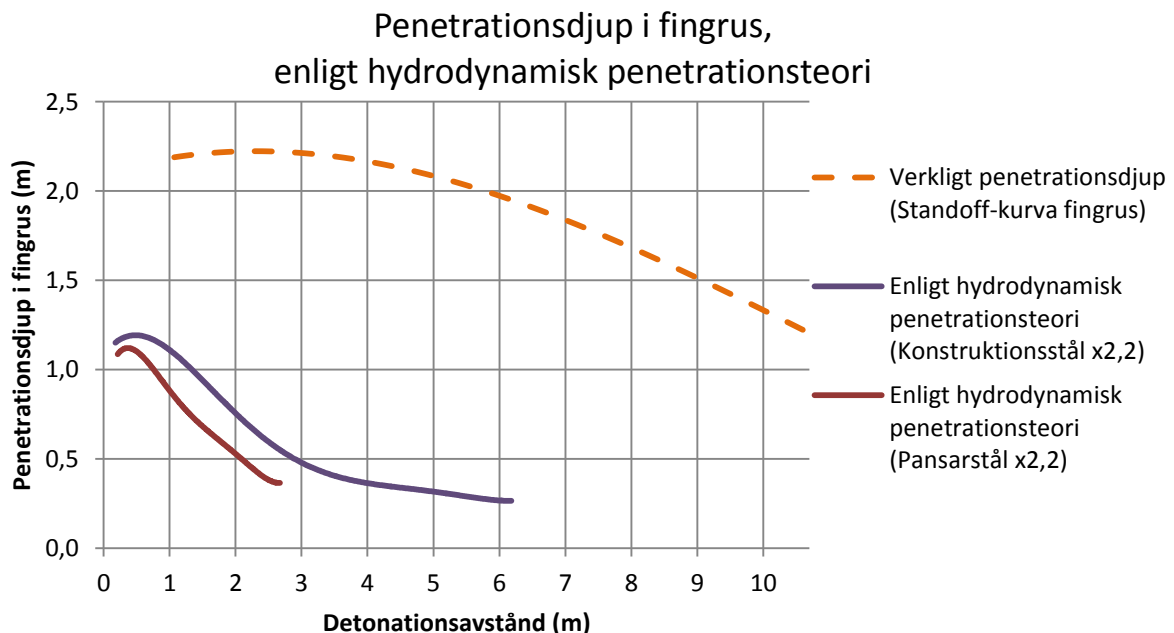
Den hydrodynamiska penetrationsteorins giltighet

Den fundamentala teorin avseende RSV-strålens penetration är den hydrodynamiska penetrationsteorin, ekvation (3-1). För en RSV-laddning (konstant strållängd och stråldensitet) kan förhållandet mellan penetrationsdjup i grus jämfört med stål uttryckas enligt (Held 1991a, 11):

$$\frac{P_{grus}}{P_{stål}} = \frac{l \sqrt{\frac{\rho_{stråle}}{\rho_{grus}}}}{l \sqrt{\frac{\rho_{stråle}}{\rho_{stål}}}} = \sqrt{\frac{\rho_{stål}}{\rho_{grus}}} \quad (6-5)$$

Densitetsförhållandet ger att penetrationsdjupet i den fingrus som användes vid försöken motsvarar penetrationen i stål multiplicerat med faktorn 2,2 (baserat på $\rho_{stål} = 7800 \text{ kg/m}^3$ och $\rho_{grus} = 1620 \text{ kg/m}^3$). Penetrationsdjupet i stål används normalt som referens för penetration i andra material, dock är det inte alltid tydligt vilken stålqualität som åsyftas (Held 1987, 5). För den använda laddningen föreligger penetrationsdata för både konstruktionsstål (Hansson & Westerling 2007, 48) och pansarstål (FOI u.å.), båda stålqualitéerna används i jämförelsen.

I grafen nedan redovisas standoff-kurvor motsvarande 2,2 gånger penetrationsdjupet för konstruktionsstål respektive pansarstål i jämförelse med penetrationsdjupet i försöken. Utifrån försöksdata kan konstateras att verkligt penetrationsdjup i fingrus är 4-5 gånger större än i stål, beroende på om pansarstål eller konstruktionsstål används som referens. Vid längre detonationsavstånd ökar faktorn till över 10 gånger penetrationsdjupet i stål.



Figur 6-3 Penetrationsdjup i fingrus enligt den hydrodynamiska penetrationsteorin jämfört med försöksresultat.

Verkligt penetrationsdjup är således minst dubbelt så stort som det beräknade för samma målmaterial. Den hydrodynamiska penetrationsteorin predikterar ett alldeles för litet penetrationsdjup i målmaterialen fingrus. Vidare kan det konstateras att teorin ej heller kan användas

för att bedöma detonationsavståndets inverkan på penetrationsdjupet. Held har i ett RSV-försök mot sand konstaterat att penetrationsdjupet överstiger det beräknade, dock kunde inte ökningen kvantifieras då hela målkonstruktionen penetrerades (1992, 11-12). Motsvarande iakttagelse har även gjorts för pilprojektilers penetration i sand, där densitetsförhållandet gav ett penetrationsdjup som motsvarade mindre än hälften av det som erhöles experimentellt (Van Vooren et. al. 2013, 602). Savvateev et. al. (2001, 678-679) har dessutom konstaterat att projektilens form har liten inverkan på penetrationsdjupet i sand, samma maximala penetrationsdjup erhöles för en sfärisk projektil som för en slank pilprojektil ($L/D > 12$).

Den grundläggande hydrodynamiska penetrationsteorin är således inte tillämplig som förklaringsmodell varken för maximalt penetrationsdjup eller för att fastställa detonationsavståndets inverkan vid de aktuella förhållandena. Troligen inverkar andra materialegenskaper på penetrationsdjupet, vilket analyseras vidare nedan.

Undre gränshastighet

En RSV-stråle som penetrerar ett mål skapar en hålskanal, med olika dimensioner beroende av målets deformationsegenskaper och detonationsavståndets inverkan. En hålskanal i pansarstål har både mindre diameter och mindre djup jämfört med vad som erhålls i konstruktionsstål, vidare avtar hålskanalens diameter och djup med ett ökande detonationsavstånd. Detta fenomen kan förklaras utifrån den undre gränshastigheten (Held 1987, 4; 1992, 4). I pansarstål krävs en högre hastighet för att ett strålsegment skall bidra till penetrationsdjupet, indirekt innebär detta att en större andel av strålen bidrar till penetrationsförloppet i konstruktionsstål jämfört med i pansarstål. För bättre förståelse för det erhållna försöksresultatet analyseras penetrationsförloppet med avseende på strålens undre gränshastighet. Analysen genomförs enligt (Held 1988, 111-119).

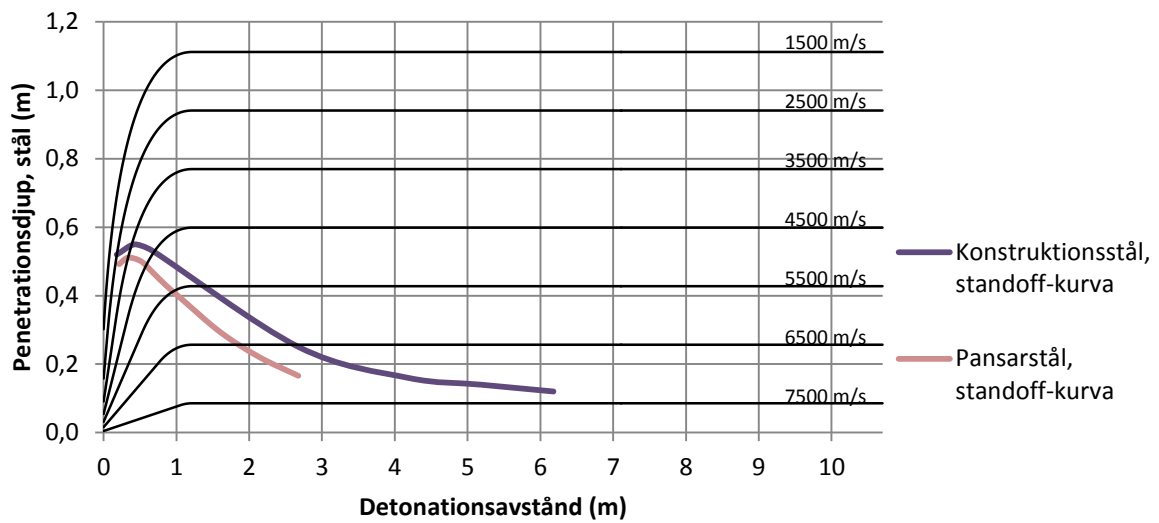
För den aktuella RSV-laddningen, RB 53 BANTAM gäller:

Z_0	Detonationsavstånd + 0,064	(m)
$v_{j,0}$	8000	(m/s)
\bar{t}_p	160E-6	(s)

Samtliga uppgifter ovan har erhållits ur konstruktionsritningar och stråldata för RB 53 BANTAM (BOFORS(a), (b), (c) & (d) u.å.).

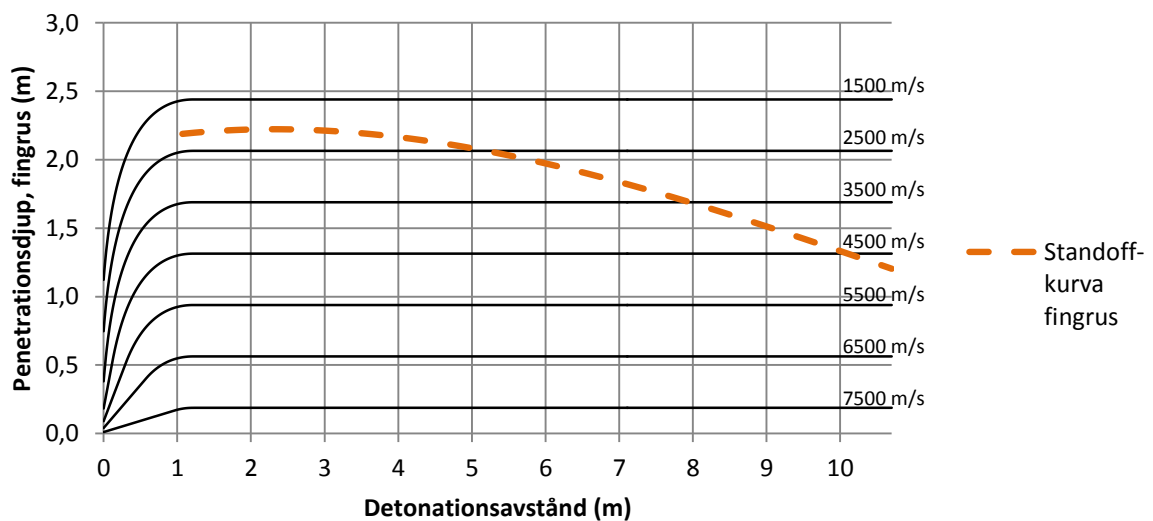
Maximalt penetrationsdjup för olika gränshastigheter och detonationsavstånd har beräknats enligt ekvationerna (3-3), (3-4) och (3-5), varefter de sammanställts till kurvor. I diagramet för stål, Figur 6-4, har kända standoff-kurvor för RB 53 BANTAM mot konstruktionsstål respektive pansarstål plottats och i diagramet för fingrus, Figur 6-5, har försöksresultatet för fingrus plottats.

Undre gränshastighetskurvor, RB 53 BANTAM mot stål



Figur 6-4 Gränshastigheter för RB 53 BANTAM vid penetration i stål.

Undre gränshastighetskurvor, RB 53 BANTAM mot fingrus



Figur 6-5 Gränshastigheter för RB 53 penetration i fingrus.

Ur diagramen ovan kan den undre gränshastigheten fastställas grafiskt och verksam andel av den totala strållängden beräknas utifrån strålens hastighetsgradient. För respektive detonationsavstånd ger standoff-kurvan penetrationsdjupet. Samma punkt ger den undre gränshastigheten genom interpolation mellan gränshastighetskurvorna. Utifrån laddningens stråldata, diagram redovisande ackumulerad strållängd utifrån strålshastighet, kan värdet på den undre gränshastigheten omvandlas till aktiv strållängd (BOFORS(b) u.å.).

Tabell 6-2 Undre gränshastigheter för RB 53 penetration i olika målmaterial och från varierande detonationsavstånd samt hur stor andel av den totala strållängden som bidrar till penetrationen. För fingrus redovisas även beräknat penetrationsdjup enligt ekvation (6-6).

Detonationsavstånd	10	25	50	75	100
	[kalibrar]				
	1,07	2,68	5,35	8,03	10,70
Pansarstål			Data	Data	Data
Undre gränshastighet	5500 m/s	7000 m/s	föreligger	föreligger	föreligger
Andel av total strållängd	40%	18%	ej *	ej *	ej *
Konstruktionsstål				Data	Data
Undre gränshastighet	5000 m/s	6500 m/s	7000 m/s	föreligger	föreligger
Andel av total strållängd	48%	24%	18%	ej *	ej *
Fingrus					
Undre gränshastighet	2200 m/s	2100 m/s	2500 m/s	3400 m/s	4800 m/s
Andel av total strållängd	98%	99%	92%	78%	50%
Beräknat penetrationsdjup	2,09 m	2,09 m	2,02 m	1,73 m	1,06 m

*) I tillgänglig information för RB 53 BANTAM föreligger inga penetrationsdata för detonationsavstånd över 25 kalibrar för pansarstål respektive 50 kalibrar vid konstruktionsstål.

Vid verkan mot fingrus bidrar strålen till penetrationen vid avsevärt lägre gränshastigheter än vid verkan mot stål. Detta innebär, baserat på strålens hastighetsgradient, att en större andel av strålen är verksam under penetration i porösa fyllnadsmaterial. I princip bidrar hela strålen till penetrationsförloppet vid 10 kalibrars avstånd mot fingrus, motsvarande värde i pansarstål är endast 40 % vid samma detonationsavstånd. Vidare kan man konstatera att den undre gränshastigheten för penetration i stål snabbt ökar vid längre detonationsavstånd. Detta innebär att penetrationsdjupet avtar avsevärt snabbare i stål än i fingrus vid ökande detonationsavstånd.

Standoff-kurvorna för de olika målmaterialen indikerar även att maximalt penetrationsdjup uppnås vid ett längre detonationsavstånd i målaterialet fingrus jämfört med stål. Detta fenomen har tidigare observerats av Held som konkluderar att det troligen beror på att strålen medges sträckas ut ytterligare i den snabbt växande hålskanalen (1983, 334; 1987, 4; 1992, 4). Utifrån stråldata (BOFORS(b) u.å.) och gränshastighetskurvorna för stål (Figur 6-4) kan det konstateras att endast en mindre del av strålen hunnit fragmentera när maximalt penetrationsdjup erhålls. Härefter hinner inte hålskanalen växa med sådan hastighet att strålen kan sträckas ut till maximal längd. I fingrus växer hålskanalen snabbare, varför förklaringen bedöms som rimlig. Dock saknas data för att ytterligare verifiera denna iakttagelse.

Sammantaget visar analysen avseende den undre gränshastigheten att den verksamma strållängden är direkt relaterad till målaterialet och dess egenskaper. Om den undre gränshastighetens inverkan på den verksamma andelen av strållängden, $\Delta_{strållängd}$, inarbetas i den hydrodynamiska modellen, ekvation (3-1), erhålls följande förhållande för penetrationsdjupet:

$$P = \Delta_{strållängd} \cdot l \sqrt{\frac{\rho_j}{\rho_t}} \quad (6-6)$$

Där	P	Penetrationsdjup	(m)
	$\Delta_{strållängd}$	Verksam andel av maximal strållängd pga. undre gränshastighet	(-)
	l	RSV-strålens längd	(m)
	ρ_j	Densitet, RSV-stråle	(kg/m ³)
	ρ_t	Densitet, målmaterial	(kg/m ³)

Ekvation (6-6) har använts för att beräkna penetrationsdjup för RB 53 penetration i fingrus, se Tabell 6-2, med god överensstämmelse med erhållet försöksresultat. Dock kan det konstateras att det beräknade penetrationsdjupet generellt är något lägre än det verkliga, varför det troligen förekommer ytterligare fenomen som inverkar på penetrationsdjupet.

Fas 3-penetration

RSV-strålens penetrationsegenskaper kan även analyseras utifrån teorier för pilprojektiler, varvid penetrationsförloppet indelas i olika faser. Den första fasen är relaterad till den stötvåg som uppstår när strålen träffar målet och den andra fasen utgörs av det tidigare beskrivna hydrodynamiska förloppet. Efter att hela pilprojektilen/strålen har konsumerats övergår penetrationen i den tredje fasen.

Fas 3-penetration inkluderar två olika penetrationsfenomen, vars tillskott till den totala penetrationen kan variera stort (Bless, Jurick & Yoon 1986). Det första fenomenet är s.k. *after-flow* som uppstår på grund av att strålen överför kinetisk energi till målmaterialiet och uppstår i princip alltid, däremot varierar dess bidrag till penetrationsdjupet (Orphal 1997, 602). I porösa material som lätt kan komprimeras, som sand och grus, leder *after-flow* till att målmaterialiet packas i såväl axiell som radiell riktning (Held 1992, 13). Van Vooren har vid experiment i sand dokumenterat denna komprimering som utbreder sig som en vågrörelse genom sanden (2013, 602-603).

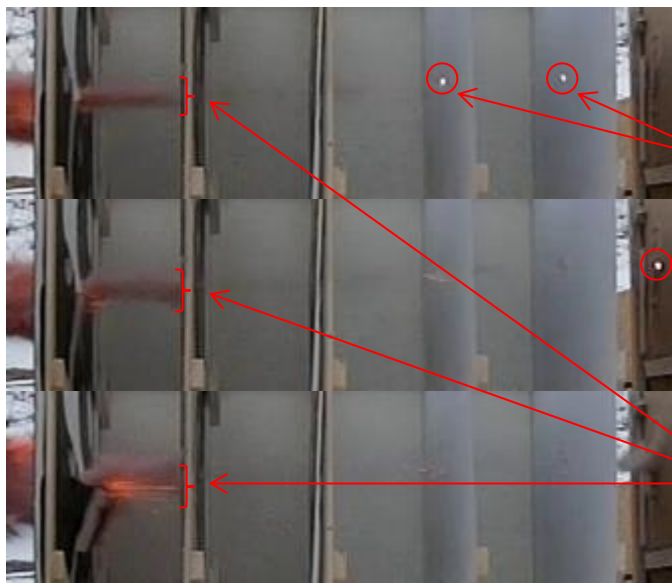
Det andra fenomenet är s.k. *secondary penetration* och uppstår enbart när det råder en avsevärd densitetsskillnad mellan jetstrålen och målmaterialiet (Cullis & Nash 1986, 355; Orphal 1997, 602). De eroderade partiklarna slungas bakåt längs hålskanalen och i det fall strålen och målet har samma densitet blir hastighetsresultanten noll. Men, då målet har avsevärt lägre densitet än strålen kommer målmaterialiet runt hålskanalen erhålla en hastighetsresultant i penetrationsriktningen (Orphal 1997, 602). I material med låg mekanisk hållfasthet ger detta en ökning i penetrationsdjupet genom att hålskanalens väggar fortsätter ytterligare en bit framåt i strålens riktning (Held 1992, 13).

En indikator på att det sannolikt förekommer fas 3-penetration i målmaterialiet kan observeras i den första försöksserien. Efter penetration kan det konstateras en volymminskning i delar av grusbädden, som sjunkit ihop över hålskanalen, se Figur 6-6. Hopsjunkningen är i genomsnitt 0,07 m kortare än penetrationsdjupet. Två rimliga förklaringar till den erhållna volymminskningen kan identifieras; antingen har målmaterialiet transporterats bort eller har det packats runt hålskanalen. Båda dessa fenomen kan vara relaterade till fas 3-penetration.



Figur 6-6 Grusbädden sjunker ihop efter RSV-strålens penetration, sannolikt relaterat till fas 3-penetration i målmaterialet, t.v. skott 1:2 och t.h. skott 1:5.

Ytterligare en indikator på möjlig förekomst av fas 3-penetration kan observeras på höghastighetsfilmerna från den andra försöksserien, Figur 6-7. När strålen har penetrerat den första grusbädden och passerar luftspalten åtföljs strålsegmenten av en rörelse i målmaterialet. Sanden som är i rörelse är formad som en cylinder som rör sig i penetrationsriktningen. Däremot går det inte att avgöra om rörelsen i målmaterialet beror av *after-flow* eller *secondary penetration*.



Strålsegment från jetstrålen med en högre hastighet än den efterföljande rörelsen i målmaterialet.

Cylindriskt formad rörelse i målmaterialet, glödande partiklar från eroderade strålsegment transporteras med målmaterialet.

Figur 6-7 Bildserie utvisande indikationer på fas 3-penetration i målmaterialet.

Sammantaget kan det konstateras att det förekommer en framåtriktad rörelse i målmaterialet som sannolikt kan relateras till förekomst av fas 3-penetration. Rörelsen medför att hela hålskanalen rör sig framåt under penetrationsförloppet. Efter att hela strålen konsumerats fortsätter penetrationen ännu en bit innan rörelsen i målmaterialet avstannat. Rörelsen ger ett tillskott till penetrationsdjupet, dock är det inte möjligt att kvantifiera tillskottet utifrån försöksresultatet.

Inverkan av att sanden förpackas i sandsäckar

Utifrån den hydrodynamiska penetrationsteorin bör penetrationsdjupet öka när gruset förpackas i sandsäckar, relaterat till att densiteten på målmaterialet minskar. Vid en jämförelse med projektilers penetrationsdjup i sandsäcksskydd kontra skydd av ren sand/grus, krävs genomgående en större

skyddstjocklek vid användning av sandsäckar (US Department of the Air Force 2008, 142; US Department of the Army Headquarters 1985, 3:11; US War Department 1944, 223). Detta var också det förväntade utfallet när beräkningsmodellen [1] utvecklades (Johnsson 2012, 40). Försöksresultatet visar däremot på det motsatta förhållandet – sandsäckar ger ett bättre skydd mot RSV-penetration än en homogen grusbädd. Detta fenomen har inte gått att finna i någon vetenskaplig litteratur, vilket försvårar en djupare analys samtidigt som det understryker behovet av ytterligare forskning.

En möjlig förklaring skulle kunna vara relaterad till den tidigare analyserade fas 3-penetrationen. Sandsäckarna skapar en sektionering av målmaterialet, där juteväven håller samman det enskilda konstruktionselementet – sandsäcken. Rörelser i målmaterialet som uppstår inuti en sandsäck får svårt att sprida sig till nästa sandsäck. Den fas 3-penetration som strålen bygger upp reduceras i varje övergång till en ny sandsäck. Om detta resonemang är korrekt kan fas 3-penetration motverkas genom att använda sandsäckar.

Standoff-kurvan för sandsäckar ger i genomsnitt 0,26 m mindre penetrationsdjup än för en homogen grusbädd. Utifrån den hydrodynamiska penetrationsteorin motsvarar den densitetsskillnad som föreligger mellan fingrus och sandsäckar att penetrationsdjupet borde bli 4 % högre vid sandsäckar. Detta motsvarar ett penetrationstillskott på 0,04-0,09 m för RB 53 från detonationsavstånd mellan 10-100 kalibrar. Sammantaget är det verkliga penetrationsdjupet i sandsäckar 0,30-0,35 m mindre än om skyddet varit av en homogen grusbädd med samma densitet.

Denna mycket grova överslagsberäkning skulle kunna indikera storleksordningen på det penetrationsbidrag som är relaterat till fas 3-penetration, förutsatt att detta är orsaken till den konstaterade skillnaden.

Sluggsegmentets inverkan på penetrationsdjupet

Sluggsegmentet inbegrips normalt inte i vad som kategoriseras som RSV-strålen, utan ses som en restprodukt med avsevärt högre massa och lägre hastighet än övriga strålsegment. Vid penetration i metaller eller andra motståndskraftiga målmaterial, vilket är den normala användningen av RSV-ammunition, ger sluggen inget bidrag till penetrationsdjupet. Däremot i porösa material som sand och grus är det normalt sluggen som ger det maximala penetrationsdjupet (Elfving, Karlsson & Hansson 2005, 11), vilket överensstämmer med försöksresultatet.

Sluggens hastighet ligger under det hastighetsintervall som vanligen anses gälla för att ett penetrationsförlopp skall kunna betraktas som hydrodynamiskt (Lidén et. al. 1994, 115). En viktig skillnad vid penetration i lägre hastigheter är att projektilen deformeras istället för att konsumeras och målmaterialets hållfastegenskaper får en allt större inverkan på penetrationsdjupet (Lidén et. al. 1994, 115). Sluggsegmenten från försöken uppvisar inga tecken på att ha konsumerats under penetrationen, däremot uppvisar de ytor som exponerats i penetrationsriktning tydliga deformationer/förlitningar efter kontakten med målmaterialet, se Figur 6-8.



Figur 6-8 Sluggsegmenten uppvisar tydliga förslitningar efter kontakt med målmaterialet, förslitningar förekommer enbart på de ytor som exponerats i penetrationsriktningen (Skott 1:2).

Det är inte möjligt, utifrån försöksresultatet, att kvantifiera det tillskott som sluggen ger till det totala penetrationsdjupet. Anledningen är att det saknas data avseende vilken hastighet sluggen har när den tar över i hålskanalens botten. Även om sluggens utgångshastighet är känd så föreligger inga data om dess uppbromsning vid passagen genom hålskanalen, innan den når hålskanalens botten. Flera faktorer kan ha en direkt inverkan på i vilken grad sluggen kommer i kontakt och bromsas av hålskanalens väggar. Till vilken grad hålskanalen och sluggens bana sammanfaller, hålskanalens dimensioner i förhållande till sluggens exponerade tvärsnitt och i vilken grad som hålskanalen hunnit "rasa samman" eller att kanalen förslutits genom s.k. "closure-effekt" (Hansson & Westerling 2007, 14).

En grov uppskattning av det maximala penetrationsbidrag som sluggen skulle kunna ge kan erhållas genom en enkel genomslagsberäkning. Sluggsegmenten i försöken uppvisar genomgående ojämn förslitning och huvudsakligen på långsidorna, vilket indikerar att de penetrerar målmaterialet icke-optimalt (inte med spetsen först), se Figur 6-8. Sluggen kan approximeras som ett spränggranatsplitter, baserat på dess oregelbundna form, ojämna yta och icke-optimala ställning under penetrationen. Diagram för splittergenomslag för splittervikten 125 g och anslagshastigheten 800 m/s ger ett genomslag på ca 0,016 m i handelsjärn (Lamnevik 1997, 17). Genomslagsfaktorn 18 för sand och grus ger ett maximalt penetrationsdjup på 0,29 m (Lamnevik 1997, 19). Detta penetrationsdjup avser ett sluggsegment som är helt opåverkat av såväl luftbromsning som passagen genom den långa hålskanalen. Detta är troligen ett realistiskt scenario. Utifrån sluggens utseende kan det konstateras att den uppvisar tydliga spår av påverkan efter kontakt med målmaterialet. Mer rimligt skulle man kunna anta att sluggens bidrag uppgår till $\ll 0,3$ m penetrationsdjup. Detta penetrationsdjup ska läggas till det maximala penetrationsdjup som strålen ger.

Vid försöken återfanns i flera fall ett avsevärt mindre strålsegment (rester av strålen) än sluggen i närheten av det maximala penetrationsdjupet. I de fall ett sammanhängande mindre stålsegment inte förekom återfanns enbart små eroderade kopparkopparpartiklar i hålskanalen. I försöksserie 1 och 2 hade samtliga mindre strålsegment ett mindre penetrationsdjup än sluggen. Den genomsnittliga skillnaden i penetrationsdjup mellan det mindre strålsegmentet och sluggen uppgick till 0,17 m, vilket ger ännu en indikation på sluggens penetrationstillskott.

Under försöksserie 3 noterades en avvikelse från ovan. Maximalt penetrationsdjup erhöles vid två av fem tillfällen av det mindre segmentet, vilket återfanns efter samtliga fem skott. Underlaget är för

litet för att medge generella slutsatser, men detta skulle kunna indikera att även sluggsegmentets hastighet och penetration reduceras i större utsträckning vid användning av sandsäckar.

6.3.Slutsatser

De genomförda försöken har gett ny kunskap om RSV-strålars penetration i såväl homogena grusbäddar som sandsäckskonstruktioner. Den föreslagna beräkningsmodellen för dimensionering av skadebegränsande åtgärder [1] stämmer enbart för kortare detonationsavstånd, därefter erhålls ett ökande fel som innebär att ett för litet penetrationsdjup beräknas.

Anledningen kan relateras till att penetrationsdjupet i de aktuella målmaterialet endast reduceras marginellt vid ökande detonationsavstånd. Utifrån försöksresultatet har standoff-kurvor för både fingrus och sandsäckar bestämts, med ett giltighetsområde upp till 100 kalibrars detonationsavstånd. Standoff-kurvan för målmaterialet har en unik form och vid ett ökat detonationsavstånd reduceras inte penetrationsdjupet i samma grad som för målmaterialet stål och betong.

Analysen visar att den grundläggande hydrodynamiska penetrationsteorin inte är användbar under aktuella förhållanden. Teorin lämpar sig varken för att beräkna maximalt penetrationsdjup eller för att beräkna detonationsavståndets inverkan vid denna typ av målmateriell.

Analysen utifrån strålens undre gränshastighet visar att i princip hela strålen bidrar till penetrationsförloppet vid korta (≤ 25 kalibrar) detonationsavstånd mot målmaterialet fingrus. Motsvarande värde för penetration i stål är under 50 %. Detta innebär att (den verksamma) strållängden är beroende av målmaterialet. Genom att kombinera den undre gränshastighetens inverkan på strållängden med den hydrodynamiska penetrationsteorin erhålls en god överensstämmelse med försöksresultatet.

En anmärkningsvärd iakttagelse är att penetrationsdjupet i en sandsäckskonstruktion är signifikant mindre än i en homogen grusbädd. Detta resultat är i motsats till vad som predikteras för jetstrålar utifrån den hydrodynamiska penetrationsteorin, då sandsäckskonstruktionen har en lägre densitet. Resultatet är även i motsats till vad som är känt avseende projektilers penetration, där det krävs en större skyddstjocklek vid användning av sandsäckar jämfört med enbart fyllnadsmassor.

En möjlig förklaring är att det uppstår s.k. fas 3-penetration i målmaterialet, vilket ger en rörelse i målmaterialet med ett betydande tillskott till det totala penetrationsdjupet. När målmaterialet är förpackat i sandsäckar motverkas, troligen, att rörelsen överförs mellan de enskilda sandsäckarna. Flera olika indikationer på förekomst av fas 3-penetrationen kunde konstateras under försöken.

Det dimensionerande strålselementet, såväl vid korta som långa detonationsavstånd, är sluggen. Även om sluggen når det maximala penetrationsdjupet kan det konstateras att den huvudsakliga penetrationsdjupet åstadkoms av jetstrålen, även vid långa detonationsavstånd (100 kalibrar). Sluggsegmentets tillskott till det totala penetrationsdjupet är begränsat och jetstrålen har god verkan långt bortom fragmenteringspunkten, i de aktuella målmaterialet.

Den föreslagna beräkningsmodellen [1] behöver delvis modifieras för att utgöra en tillförlitlig dimensioneringsgrund för skadebegränsande åtgärder vid ammunitionsröjning.

7. Revidering av beräkningsmodellen

Behovet av revidering analyseras utifrån försöksresultatet och dess avvikelser från den föreslagna modellen [1].

7.1. Behov av anpassningsåtgärder

Jämförelsen mellan beräkningsmodellen [1] och försöksresultatet visar att den främsta avvikelsen är relaterad till standoff-kurvans form och hur penetrationsdjupet minskar med ett ökande detonationsavstånd. Försöken har lett fram till standoff-kurvor för relevanta målmaterial, giltiga för detonationsavstånd upp till 100 kalibrar. Dessa bör användas i modellen både för att förbättra dess tillförlitlighet och utöka giltighetsområdet.

Utifrån försöksresultatet kan det konstateras att det maximala penetrationsdjupet i fingrus överstiger såväl de värden som FOI grundekvation (3-2) ger som tidigare försökserfarenhet i motsvarande målmaterial (Elfving, Karlsson & Hansson 2005, 11). En möjlig förklaring till grundekvationens lägre värden är att denna är framtagen för dimensionering av fortifikatoriska skyddstäckningar, där generellt grövre fyllnadsmassor används (Elfving, Karlsson & Hansson 2005, 14). Revidering erfordras för att säkerställa att det större penetrationsdjup som erhålls vid finkorniga fyllnadsmassor inkluderas.

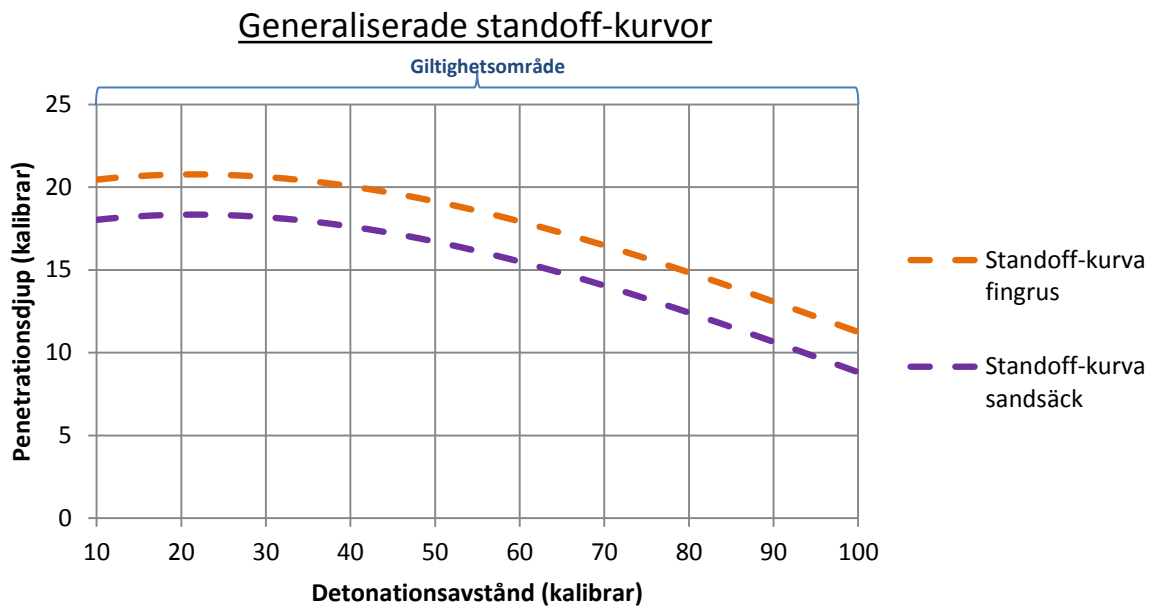
När gruset förpackas i sandsäckar sjunker skyddskonstruktionens densitet på grund av en högre andel luftfickor och förekomsten av sandsäcksmaterial. Däremot erhålls ett signifikant mindre penetrationsdjup i en sandsäckskonstruktion, vilket är i motsats till vad beräkningsmodellen [1] predikterar. Olika beräkningsgrunder bör användas för sandsäckskonstruktioner och homogena grusbäddar.

Hur stor andel av strålens längd som bidrar till penetrationsdjupet är relaterat till den undre gränshastigheten, vilken i sin tur är beroende av målmateriallets egenskaper. Detta innebär att det föreligger en relation mellan strållängd och aktuellt målmaterial [*Sic!*]. Strållängden i den hydrodynamiska penetrationsteorin, ekvation (3-1), är i modellen [1] ersatt av produkten av parametrarna; RSV-stridsdelens kaliber, koefficienten för strållängd och koefficienten för målmaterial. Detta skapar en nödvändig matematisk relation mellan strållängd och målmaterial, som inte får upphävas vid revideringen.

Koefficienten för strållängd och koefficienten för målmaterial används inom andra tillämpningsområden och för att inte ändra den nuvarande innebörden kommer samtliga ovan identifierade behov av revidering att inarbetas i koefficienten för detonationsavstånd.

7.2. Revidering

Standoff-kurvorna för fingrus respektive sandsäckar, Figur 6-2, används som grund för att revidera koefficienten för detonationsavstånd, k_{avst} . Härigenom inkluderas samtliga identifierade behov av anpassningsåtgärder samtidigt som det ger en distinktion mellan de olika målmaterialen. För att omvandla försöksresultatet till en koefficient i modellen krävs att kurvorna generaliseras. Utifrån RSV-laddningars skalbarhet (Walters & Zukas 1989, 186) generaliseras standoff-kurvorna till att uttrycka detonationsavstånd och penetrationsdjup i enheten kalibrar, enligt:



Figur 7-1 Generaliserade standoff-kurvor för målmaterialet fingrus respektive sandsäckar.

Koefficienten för detonationsavstånd behöver uttrycka kvarvarande andel av maximal penetrationsförmåga vid ett givet detonationsavstånd för att enkelt kunna integreras med övriga parametrar i modellen. Detta innebär att de generaliserade standoff-kurvornas ekvationer behöver omarbetas så att de uttrycker andel av maximal penetration mellan 0 och 1, vilket uppnås genom att samtliga led divideras med maximalt penetrationsdjup i aktuellt målmaterial.

De tidigare bestämda standoff-kurvorna utgörs av tredjegradspolynom, dock kan det visuellt konstateras att formen inom det studerade intervallet huvudsakligen kan approximeras som ett andragradspolynom. Vidare bör beräkningsmodellens olika parametrar ha en jämförbar noggrannhet i antalet värdesiffror och även vara anpassade till den precision som föreligger i indata. Genom att förenkla ekvationerna till andragradspolynom med maximalt två värdesiffror reduceras den matematiska komplexiteten. Detta ger förvisso något sämre överensstämmelse med försöksresultatet, men för den avsedda användningen och utifrån precisionen i indata anses denna förenkling motiverad. Förenklingen ger följande ekvationer för koefficienten för detonationsavstånd:

För homogen grusbädd:

$$k_{avst} = 1,1 + \frac{2 \cdot 10^{-3} \cdot S}{d} - \frac{7 \cdot 10^{-5} \cdot S^2}{d^2} \quad (7-1)$$

För sandsäcksbarriär:

$$k_{avst} = 0,9 + \frac{3 \cdot 10^{-3} \cdot S}{d} - \frac{8 \cdot 10^{-5} \cdot S^2}{d^2} \quad (7-2)$$

Där	k_{avst}	Koefficient för detonationsavstånd	(-)
	S	Detonationsavstånd	(*)
	d	RSV-stridsdelens kaliber	(*)
	*) S och d Uttrycks i samma längdenhet		

7.3.Slutsatser

Den föreslagna modellens [1] sammansättning anses alltså giltig vad avser ingående parametrar och deras inbördes relation. Däremot föreligger behov av att revidera beräkningsgrunden för hur värdet på enskilda parametrar fastställs.

Den främsta avvikelserna är relaterad till standoff-kurvans form vid längre detonationsavstånd. Olika beräkningsgrund tillämpas beroende av om en homogen grusbädd eller sandsäckskonstruktion avses.

Samtliga identifierade avvikelser mellan beräkningsmodellen och försöksresultatet åtgärdas genom en ny beräkningsgrund för koefficienten för detonationsavstånd, k_{avst} . Den tidigare beräkningsgrunden, ekvation (4-2), ersätts med ekvation (7-1) för en homogen grusbädd och ekvation (7-2) för en sandsäckskonstruktion, då de använda fyllnadsmassorna utgörs av sand/grus.

Utifrån försöksresultatet har modellens giltighetsområde kunnat utökas till detonationsavstånd mellan 10-100 kalibrar, vilket bättre motsvarar typiska avstånd vid ammunitionsröjning.

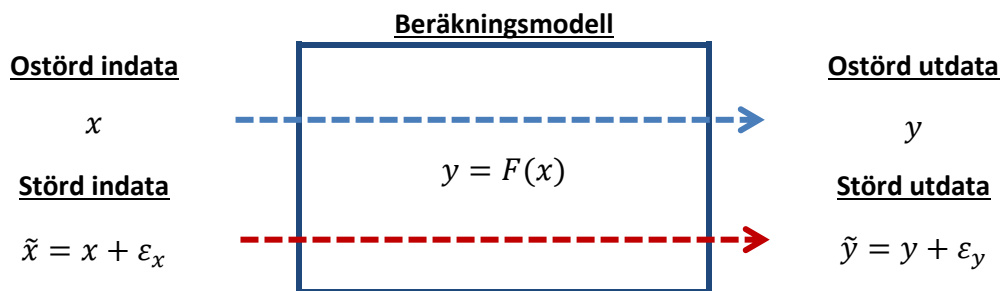
Standoff-kurvorna har generaliserats utifrån principer för RSV-laddningars skalbarhet. Då vissa andra grundprinciper har visat sig ogiltiga under de aktuella förhållandena finns en risk att även skalbarheten avviker. Detta skulle kunna innebära att kurvans form varierar mellan olika kalibrar. Dock saknas data för att närmare undersöka denna ovisshet.

I vidareutvecklingen av beräkningsmodellen [1] återstår att analysera om modellens säkerhetsmarginal kompenserar för avvikelser som kan uppstå vid avsedda tillämpning.

8. Störningsanalys

De värden som används för olika parametrar kommer i realiteten alltid vara mer eller mindre felaktiga. Anledningen är främst att vissa storheter inte kan mätas, varför ammunitionsröjaren är tvungen att göra antaganden och skattningar. En viktig frågeställning är hur känsliga den reviderade modellens parametrar är för dessa fel.

Störningsanalysen avser att klarlägga hur felet i utdata, ε_y , beror på felet i indata, ε_x . Denna information är viktig för prioritering av optimeringsåtgärder och för att bestämma värdet på säkerhetsmarginalen i modellen (Runborg 2012, 1-2).



Figur 8-1 Schematisk bild över principen för störningsanalys.

8.1. Metod

Två alternativa tillvägagångssätt föreligger för att genomföra störningsanalysen; numeriskt eller experimentellt. En matematisk lösning i numerisk form är endast möjlig om funktionen är känd och möjlig att derivata. Vid komplexa samband eller då den slutna metoden inte är tillämpbar rekommenderas den experimentella metoden. Funktionen betraktas då som en "svart låda" och genom att störa indata studeras vilken konsekvens detta ger på utdata (Runborg 2012, 1-3).

Störningsanalysen av enskilda parametrar genomförs här enligt den experimentella metoden. Inledningsvis omvandlas den reviderade beräkningsmodellen (från kapitel 7) till ett Matlab-script. Härfter genomförs störningsanalysen genom att en störning anges i indata och störd utdata jämförs med ostörd utdata.

8.2. Felkällor inklusive sannolikhetsfördelningar

Nedan beskrivs troliga felkällor för respektive parameter i beräkningsmodellen. Analysen är gjord utifrån den avsedda tillämpningen och är relaterade till beskrivningen av den militära nyttan (Kapitel 2). För de parametrar som ammunitionsröjaren fastställer värden på bestäms även en sannolikhetsfördelning för felet, för användning i den senare simuleringen (Kapitel 9).

RSV-stridsdelens kaliber, d . RSV-konen är inte synlig och dess dimensioner är normalt inte specificerade i ammunitionstekniska underlag. Felkällor är främst relaterade till vilket antagande som görs avseende höljets tjocklek. Ytterdiametern redovisas normalt i ammunitionstekniskt underlag, men om en fullständig identifiering inte är möjlig måste även detta mått inhämtas på plats och då föreligger ytterligare en felkälla genom att ammunitionen inte kan vidröras vid mätningen. Fel avseende RSV-stridsdelens kaliber antas normalfördelade, enligt:

$$d \in N(d, 0.05d)$$

Detonationsavstånd, S . Avståndet utgår från RSV-konens bas som vanligen döljs av ett integrerat distansorgan. Troliga felkällor bedöms främst vara relaterade till skattningar av konens position inuti ammunitionen samt till rena mätfel då avståndet till skyddskonstruktionen mäts utan att vidröra objektet. Fel avseende detonationsavståndet antas normalfördelade, enligt:

$$S \in N(S, 0.5d)$$

Koefficient för strållängd, k_1 . Koefficienten tilldelas värden enligt Tabell 4-1, de fasta värdena 8, 12 och 16 används. Noteras bör att värdet 8 endast får tillämpas för stridsdelar, där det är känt att de tillhör denna kategori (Hansson & Westerling 2007, 66-67). Återstår gör i realiteten endast två värden att välja på när den tekniska generationen inte är specificerad, 12 respektive 16. Den felkälla som kan föreligga är att ammunitionsröjaren bedömer den tekniska generationen fel och väljer ett felaktigt värde. I realiteten är stridsdelar inte antingen det ena eller det andra värdet, utan förekommer inom hela spektret mellan gränsvärdena. Fel för koefficienten för strållängd betraktas som en kontinuerlig, likformig, sannolikhetsfördelning, då alla värden anses lika troliga, enligt:

$$k_1 \in R(8, 16)$$

Densitet, målmaterial, ρ_t . Variation i målmateriallets densitet kan relateras till bergart, siktkurva, vattenhalt, porositet och packningsgrad. Om densiteten inte är känd rekommenderas värdet 1600 kg/m³ för sand och grus (Elfving, Karlsson & Hansson 2005,14). För sandsäckar antas densiteten ca 100 kg/m³ lägre, se avsnitt 5.2, varför värdet 1500 kg/m³ rekommenderas. Begränsade möjligheter att fastställa målmateriallets densitet föreligger.

För att definiera ett realistiskt intervall för målmateriallets densitet har Statens Geotekniska Institut rådfrågats. Fyllnadsmassornas densitet beror främst av kornstorlek, korndensitet, vattenmättnadsgrad och packningsgrad. Intervallet för den aktuella tillämpningen bör inkludera både sand och grus, en packningsgrad från lös fyllning till lätt stampning och en vattenmättnadsgrad mellan 0-50%. Dessa kriterier resulterar i en torrdensitet mellan 1300-1800 kg/m³ (Fagerström 1973, 18). Vattenmättnadsgraden i kombination med maximal porositet för sand och grus ger ett tillskott på maximalt 200 kg/m³ (Larsson 2008, 12-13). Den totala variationsbredden för densiteten på relevanta fyllnadsmassor blir således 1300-2000 kg/m³, motsvarande intervall för sandsäckar bedöms vara ca 100 kg/m³ lägre. Målmateriallets densitet betraktas som en kontinuerlig, likformig, sannolikhetsfördelning, enligt:

$$\rho_{t, \text{fingrus}} \in R(1300, 2000)$$

$$\rho_{t, \text{sandsäck}} \in R(1200, 1900)$$

Koefficient för detonationsavstånd, $k_{avstånd}$. Beräknas enligt ekvation (7-1) för fingrus respektive (7-2) för sandsäckar. Variablerna utgörs endast av detonationsavståndet och stridsdelens kaliber, vilka redan har beskrivits avseende felkällor och täthetsfunktioner.

Koefficient för målmaterial, k_2 . Koefficienten avser målmateriallets samtliga egenskaper, förutom densiteten som hanteras genom en särskild parameter. Detta innebär att koefficienten inkluderar vitt skilda aspekter, som hållfasthetsegenskaper, inverkan av den undre gränshastigheten och materialets bergerart, siktkurva och vattenhalt. Denna information har ammunitionsröjaren inte tillgång till, utan förlitar sig på det rekommenderade värdet $k_2 = 1,0$ (Elfving, Karlsson & Hansson

2005, 14; Hansson & Westerling 2007, 68). Då användaren inte skattar värdet på parametern definieras ingen täthetsfunktion.

Densitet, RSV-stråle, ρ_j . Beräkningsmodellen [1] avser inlägg tillverkade av koppar. Dock bedöms det föreligga en viss spridning i strålens densitet relaterat till användandet av olika kopparlegeringar och strålens porositet. Denna typ av information har ammunitionsröjaren inte tillgång till, utan förlitar sig på det rekommenderade värdet $\rho_j = 8930 \text{ kg/m}^3$ (BOFORS (b) u.å.). Då användaren inte skattar värdet på parametern definieras ingen täthetsfunktion.

8.3.Resultat av störningsanalys

De enskilda parametrarna analyseras avseende deras känslighet för felkällor enligt ovan. Två möjliga utfall föreligger för respektive fel. Nedan redovisas enbart det fel som leder till ett ogynnsamt utfall, att det verkliga penetrationsdjupet blir större än det beräknade. Procentsatserna avser ökning av det verkliga penetrationsdjupet relativt det beräknade värdet vid ostörda indata.

RSV-stridsdelens kaliber, d . Felet varierar icke-linjärt med detonationsavståndet. Om kalibern skattas till ett 10 % för lågt värde blir ökningen 11 % (vid 10 kalibrars detonationsavstånd) och hela 46 respektive 81 % (vid 100 kalibrars detonationsavstånd) beroende av om fingrus eller sandsäckar avses.

Detonationsavstånd, S . Felet varierar icke-linjärt med detonationsavståndet. Om detonationsavståndet skattas till ett för högt värde motsvarande en stridsdelskaliber blir ökningen maximalt 2 respektive 3 % vid 100 kalibrars detonationsavstånd.

Koefficient för strållängd, k_1 . Om koefficienten skattas till ett för lågt värde beräknas ett för litet penetrationsdjup. Felet är konstant oavsett detonationsavstånd och ökningen blir 33 % om en stridsdel med $k_1 = 16$ skattas till $k_1 = 12$.

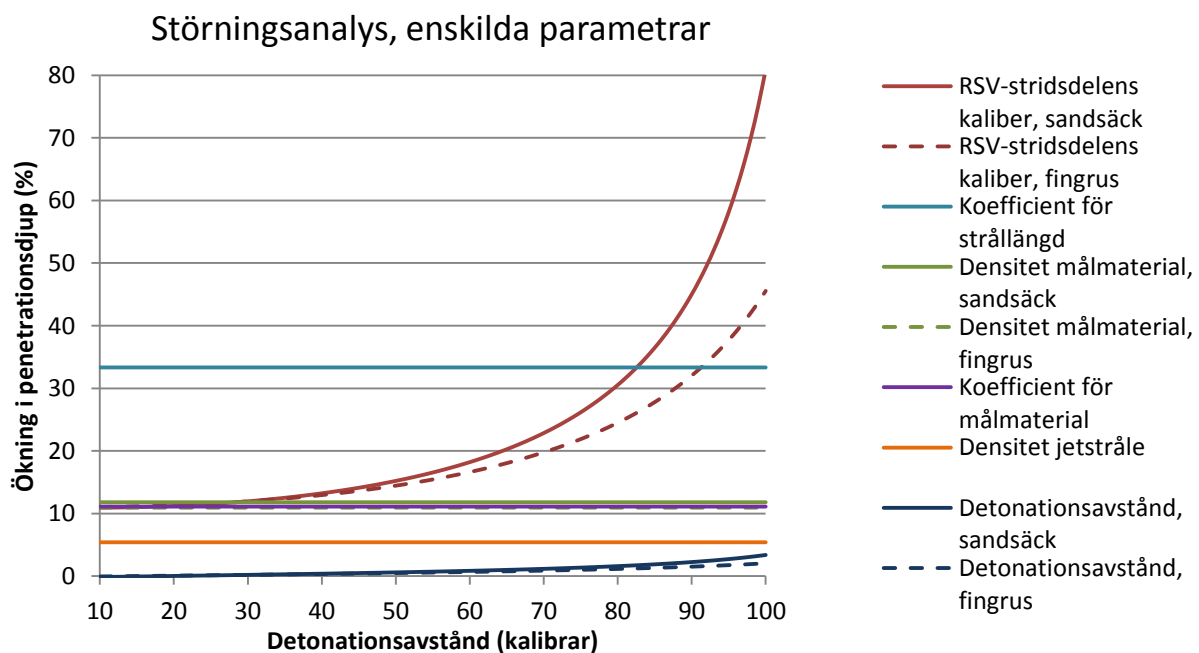
Densitet, målmaterial, ρ_t . Om densiteten skattas till ett för högt värde beräknas ett för litet penetrationsdjup. De rekommenderade värdena 1600 respektive 1500 kg/m^3 tillämpas när densiteten inte är känd, varför det föreligger en risk att den verkliga densiteten kan nedgå till 1300 respektive 1200 kg/m^3 . Felet är konstant oavsett detonationsavstånd och ökningen blir 11 respektive 12 %.

Övriga parametrar, skattas inte av röjningspersonalen och rekommenderade värden tillämpas vid beräkningarna. För dessa parametrar har enbart en kontroll gjorts avseende känslighet för en generell störning motsvarande 10 %, vilket i båda fallen bedöms utgöra en grov störning. Båda parametrarna får ett konstant fel oavsett detonationsavstånd och kaliber. Om de skattas till ett för lågt värde blir ökningen 11 % (för koefficient för målmaterial) respektive 5 % (för stråldensiteten).

Tabell 8-1 Sammanställning över resultat från störningsanalys av enskilda parametrar.

Parameter	Störning (för ogynnsamt utfall)	Verkligt penetrationsdjup i förhållande till beräknat.
RSV-stridsdelens kaliber, d	Skattar 10 % för lågt värde på d	+11 % → +46 % (fingrus) +11 % → +81 % (sandsäck)
Detonationsavstånd, S	Skattar avståndet för högt motsv. d	+/-0 % → +2 % (fingrus) +/-0 % → +3 % (sandsäck)
Koefficient för strållängd, k_1	Skattar ett skalsteg för lågt (12 vid 16).	+ 33 %
Densitet, målmaterial, ρ_t	Skattar 1600 vid 1300 kg/m ³ vid fingrus. Skattar 1500 vid 1200 kg/m ³ vid sandsäck.	+11 % (fingrus) +12 % (sandsäck)
Koefficient för målmaterial, k_2	10 % för lågt värde	+ 11 %
Densitet, RSV-stråle, ρ_j	10 % för lågt värde	+ 5 %

De enskilda felens inverkan på penetrationsdjupet (vid ogynnsamt utfall) redovisas grafiskt i Figur 8-2.



Figur 8-2 Grafisk redovisning avseende störningsanalys för beräkningsmodellens parametrar.

8.4.Slutsatser

Utifrån störningsanalysen konstateras att två av parametrarna riskerar att ge större fel än övriga, vid avsedd användning.

Den första störningskänsliga parametern är RSV-stridsdelens kaliber. Den främsta rekommendationen för att minimera felets storlek är att tillämpa hög noggrannhet vid mätning och skattning. Arbetsmomentet bör integreras i utbildnings- och träningsystemet, för att säkerställa att hög färdighet uppnås och vidmathålls. Om felets storlek kan halveras (maximalt 5 % av kalibern) minskar ökningen i penetrationsdjup till 35 % för sandsäckar och 24 % för fingrus. Vidare kan

ogynnsamma fel undvikas om ammunitionen betraktas som tunnväggig i alla situationer då information om höljstjocklek saknas.

Den andra parametern är koefficienten för strållängd som riskerar att ge upphov till det största felet inom huvuddelen av giltighetsområdet. Då parametern i verkligheten följer en kontinuerlig fördelning mellan gränsvärdena kan felets storlek reduceras om intervallet mellan de rekommenderade värdena kan minskas.

Koefficienten för strållängd är direkt relaterad till maximalt penetrationsdjup i pansarstål, där penetrationsdjupet uttryckt i kalibrar multiplicerat med två motsvarar koefficientens värde (Hansson & Westerling 2007, 66-67). Ungefärliga uppgifter avseende olika stridsdelars maximala penetration i pansar finns normalt redovisad i ammunitionsdatabaser, varför det bedöms som möjligt att skatta koefficienten med högre precision. Genom att skatta maximal penetration i pansar avrundat till hela kalibrar erhålls halva intervallet mellan skalstegen, Tabell 4-1.

Tabell 8-2 Rekommenderade värden på koefficienten för strållängd, k_1 .

Maximal penetration i pansar [kalibrar]	4	5	6	7	8
Rekommenderat värde på koefficient för strållängd, k_1	8	10	12	14	16

Denna klassificering anses funktionell med hänsyn till med vilken noggrannhet informationen föreligger och övriga parametrars noggrannhet. Med nedanstående rekommenderade värden på koefficienten bedöms en störning motsvarande ett skalsteg fortfarande som relevant för den aktuella tillämpningen, vilket reducerar penetrationsökningen till mellan 14-25 %, beroende av vilket värde som skattas felaktigt.

9. Modellens säkerhetsmarginal

Säkerhetsmarginalen är avsedd att kompensera för fel och störningar som kan uppstå när modellen tillämpas. Två huvudsakliga felkällor har identifierats; fel relaterade till att användaren skattar värdet på vissa parametrar och ammunitionens tekniska egenspridning.

9.1. Metod

Inledningsvis analyseras det sammanlagda användarrelaterade felet. En metod för att analysera det totala felet är att addera de fel som kan erhållas för respektive parameter (kapitel 8). Detta skulle resultera i ett stort och ytterst osannolikt resultat – att samtliga parametrar skulle ha ett maximalt fel vid ett och samma tillfälle. Ett mer realistiskt utfall erhålls om man undersöker sannolikheten för olika kombinationer.

Detta utförs genom Monte Carlo-simulering. Metoden kan liknas vid en konstgjord samplingsmetod som kan appliceras på komplexa problem. Simuleringen genomförs genom att utföra samma beräkning ett stort antal gånger och där de undersökta parametrarna får variera stokastiskt utifrån sina respektive täthetsfunktioner inför varje ny beräkning. Härigenom erhålls ett stort stickprov, som kan analyseras statistiskt (Holm 2007, 16). Endast de parametrar som ammunitionens tekniska egenskaper skattar värdet på omfattas av simuleringen.

Härefter analyseras ammunitionens tekniska egenspridning. Då försöksresultatet omfattar för få skott, förs istället en diskussion utifrån penetrationsdata för metaller.

Slutligen bestäms modellens säkerhetsmarginal. Då de två felkällorna är oberoende av varandra och kan förekomma samtidigt bestäms värdet genom att summera bidragen från de två delarna.

9.2. Användarrelaterade fel och störningar

Simuleringsmodell

För att genomföra Monte Carlo-simuleringen har en simuleringsmodell programmerats som ett MATLAB-script, se Bilaga 2.

Då beräkningsgrunden är olika för fingrus och sandsäckar behöver simuleringen genomföras separat för respektive målmaterial. Vidare är vissa fel relaterade till detonationsavståndet, varför simuleringen dessutom behöver utföras specifikt för respektive detonationsavstånd inom modellens giltighetsområde.

Ovanstående införs i simuleringsmodellen genom ett inledande val av aktuellt målmaterial, som anger vilken ekvation som skall tillämpas för koefficienten för detonationsavstånd, k_{avst} . Härefter genomförs simuleringen $n=20\,000$ gånger för respektive detonationsavstånd. Hela simuleringsförloppet upprepas för samtliga detonationsavstånd mellan 10-100 kalibrar, i steg om en kaliberdiameter. För att undvika att simuleringsförloppet även behöver upprepas för respektive kaliberdimension i giltighetsområdet normaliseras såväl penetrationsdjup som detonationsavstånd som kalibrar (Walters & Zukas 1989, 185-186).

Avseende koefficienten för strållängd simuleras två alternativ. Alternativ 1 avser ett fel motsvarande ett skalsteg enligt den nya klassificeringen, enligt Tabell 8-2. Alternativ 2 avser motsvarande

simulering enligt FOI klassificering, enligt Tabell 4-1, och redovisas enbart som jämförelse i Bilaga 2. Alternativ 1 avses i den fortsatta uppsatsen. Följande indata används för simuleringen:

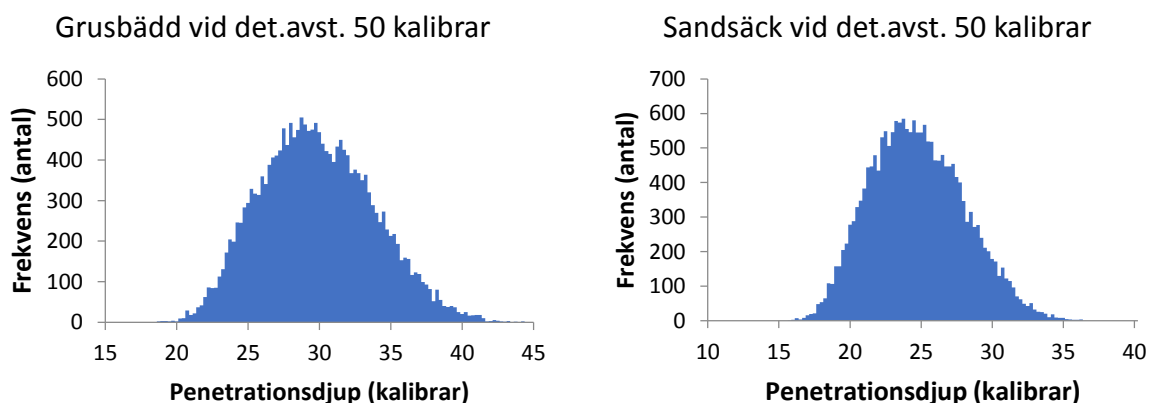
Tabell 9-1 Sammanställning över indata för Monte Carlo-simuleringar.

	Målmaterial Fingrus	Målmaterial Sandsäck
RSV-stridsdelens kaliber, d		
- Faktiskt värde	d	d
- Simulerad fördelning	$d \in N(d, 0.05d)$	$d \in N(d, 0.05d)$
Detonationsavstånd, S		
- Faktiskt värde	S	S
- Simulerad fördelning	$S \in N(S, 0.5d)$	$S \in N(S, 0.5d)$
Densitet, målmaterial, ρ_t		
- Faktiskt värde	1600	1500
- Simulerad fördelning	$\rho_t \in R(1300, 2000)$	$\rho_t \in R(1200, 1900)$
Koefficient för strållängd, k_1		
- Faktiskt värde	12	12
- Simulerad fördelning, alt. 1	$k_1 \in R(10, 14)$	$k_1 \in R(10, 14)$
- Simulerad fördelning, alt. 2*	$k_1 \in R(8, 16)$	$k_1 \in R(8, 16)$
Koefficient för detonationsavstånd, k_{avst}		
- Faktiskt värde	Enl. ekvation (7-1)	Enl. ekvation (7-2)
- Simulerad fördelning	Enl. ekvation (7-1)	Enl. ekvation (7-2)
Antal simuleringar		
- Simuleringar per detonationsavstånd	20000	20000
- Antal simulerade detonationsavstånd	91	91

*) Redovisas enbart i Bilaga 2.

Analys av simuleringsresultat

Den första analysen avser huruvida simuleringsresultatet kan betraktas som normalfördelat. Inledningsvis granskas stickprovets frekvensfördelning visuellt för att avgöra om den har normalfördelningens typiska klockform (*bell curve*). Denna kontroll görs för respektive simulerat detonationsavstånd. Samtliga frekvensfördelningar har en tydlig klockform, dock är den inte helt symmetrisk. I Figur 9-1 redovisas två exempel på histogram för målmaterialen fingrus respektive sandsäckar båda vid detonationsavståndet 50 kalibrar.



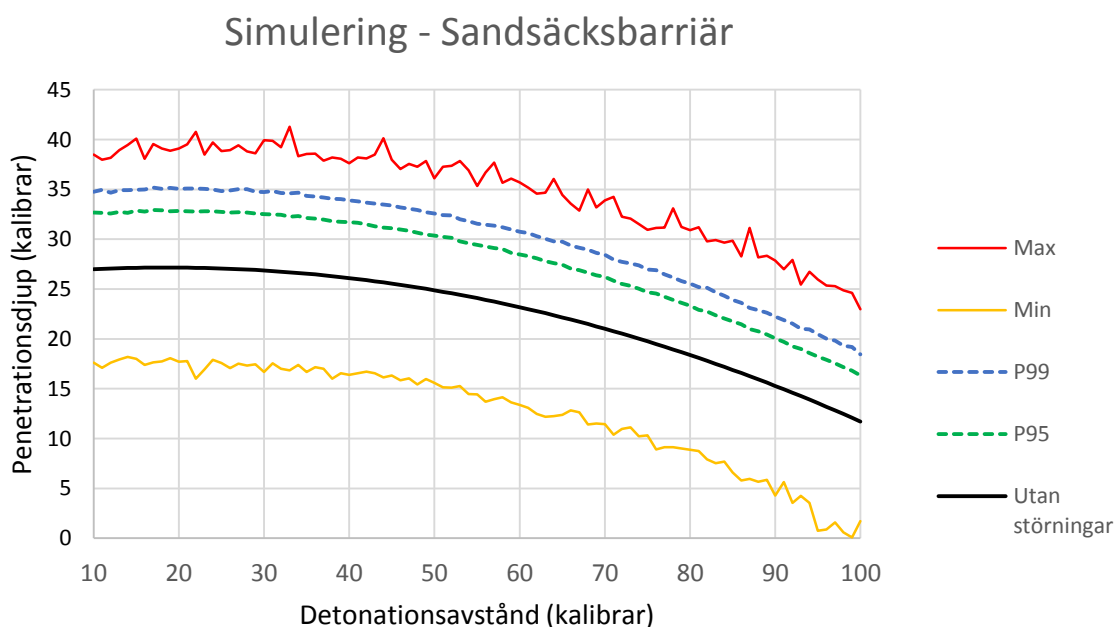
Figur 9-1 Histogram används för att bedöma om simuleringsresultatet är normalfördelat.

Då en viss oklarhet råder avseende om resultatet är normalfördelat genomförs ett s.k. chi två-test utifrån 95 % konfidensgrad. Testet genomförs med programvaran MATLAB och tilläggsmodulen Statistic Toolbox. Resultatet är entydigt, simuleringsresultatet är inte normalfördelat, inte ens om konfidensgraden sänks till 90 %.

Detta resultat är förvisso tillräckligt för att fortsätta analysen, men samtidigt uppstår frågan om resultatet följer någon annan fördelning och i så fall vilken. Ett MATLAB-script som undersöker vilken fördelning som bäst överensstämmer med simuleringsresultatet används. Jämförelsen görs mot 17 kontinuerliga sannolikhetsfördelningar¹ (Aminov 2012). Den fördelning som bäst motsvarar det erhållna simuleringsresultatet är den s.k. *Generalized Extreme Value* (GEV) fördelningen. Denna information kan vara av intresse för framtida verktygsutveckling, exempelvis om modellen ska användas i en datorapplikation, men utreds inte närmare här.

Genom att redovisa max- och minvärden från simuleringen erhålls en grafisk bild över mellan vilka gränsvärden samtliga simuleringsresultat befinner sig. Denna bild säger däremot inget om hur troliga olika utfall är mellan dessa gränser.

Varje simuleringskörning motsvarar ungefär 1,8 miljoner skott och vid upprepade körningar kan endast marginella skillnader konstateras, varför resultatet betraktas som en totalundersökning. Gränsvärden redovisas som percentiler och anger det penetrationsdjup nedanför vilket en viss procent av simuleringarna befinner sig. I Figur 9-2 redovisas den 95:e och den 99:e percentilen (P_{95} respektive P_{99}) för simuleringsresultatet för en sandsäcksbarriär, tillsammans med max- och minvärden. Någon vedertagen nivå för denna typ av parametrar föreligger inte. Motsvarande diagram för målmaterialet fingrus redovisas i bilaga 2.

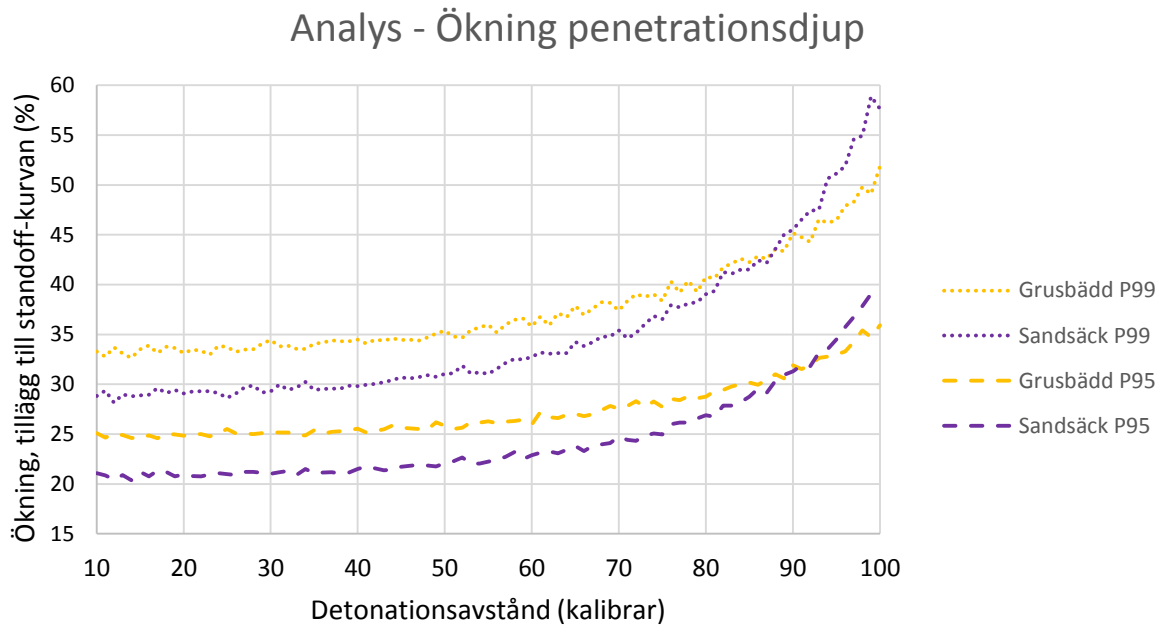


Figur 9-2 Simuleringsresultat för sandsäcksbarriär.

¹Beta, Birnbaum-Saunders, Exponential, Extreme value, Gamma, Generalized extreme value, Generalized Pareto, Inverse Gaussian, Logistic, Log-logistic, Lognormal, Nakagami, Normal, Rayleigh, Rician, t location-scale och Weibull.

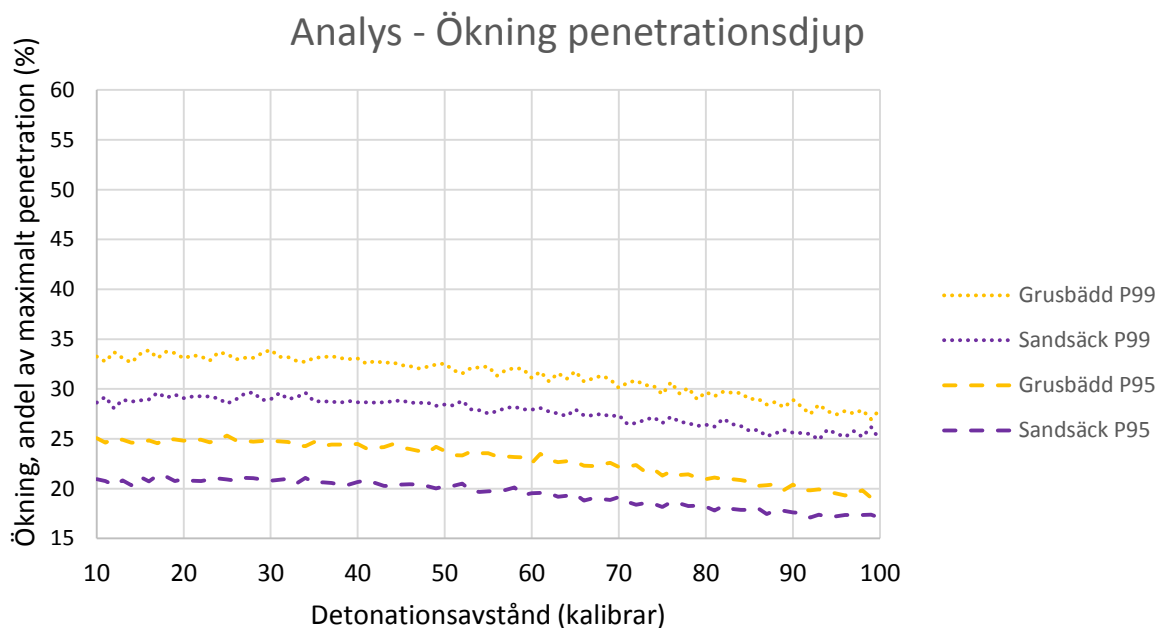
Bidraget till säkerhetsmarginalen

Genom att uttrycka simuleringsresultatet som ett procentuellt tillägg till standoff-kurvans värde kan de användarrelaterade felens bidrag till säkerhetsmarginalen bestämmas, se Figur 9-3.



Figur 9-3 Simuleringsresultatet uttryckt som ett procentuellt tillägg till standoff-kurvan för P₉₅ och P₉₉.

Tillägget ökar med detonationsavståndet, vilket komplicerar tillämpningen i modellen. Istället föreslås ett fast tillägg till det penetrationsdjup som övriga modellen ger. Genom att uttrycka tillägget på motsvarande sätt som koefficienten för detonationsavstånd, som en andel av laddningens maximala penetration erhålls en mindre spridning i värdet, se Figur 9-4.



Figur 9-4 Ökningen i penetrationsdjup uttryckt som en fast andel av laddningens maximala penetration för P₉₅ och P₉₉.

På detta sätt kan ett och samma värde användas för samtliga detonationsavstånd inom giltighetsområdet, vilket underlättar användningen. Tabell 9-2 redovisar den spridning som föreligger avseende de användarrelaterade felens bidrag till säkerhetsmarginalen.

Tabell 9-2 Simuleringsresultatet uttryckt som ett procentuellt tillägg baserat på laddningens maximala penetrationsdjup i det aktuella målmaterialet, utifrån P₉₅ och P₉₉.

K1, enligt:	Percentil	Grusbädd	Sandsäck
Föreslagen ny klassificering	P ₉₅	19-25 %	17-21 %
	P ₉₉	27-34 %	25-30 %

9.3.Ammunitionens egenspridning

Den andra delen av säkerhetsmarginalen avser störningar på grund av ammunitionens egenspridning. Data för denna typ av analys föreligger dessvärre inte i försöksresultatet, då det krävs ett stort antal upprepade skott för att fastställa tillförlitliga spridningsmått. Istället har denna typ av information sökts i vetenskapliga artiklar och försöksrapporter, dock utan att finna generaliserbara spridningsmått för de aktuella målmaterialet. Däremot föreligger viss information för pansarstål, både för en generell precisionsladdning och för den stridsdel som användes i försöken.

Tre uppsättningar data har identifierats som lämpliga för denna diskussion. Walters och Zukas redovisar ett omfattande försök där över 130 identiska laddningar skjutits mot målmaterialet pansarstål, från detonationsavstånd mellan 2-20 kalibrar. Underlaget består av medel-, max- och minvärden samt standardavvikelser för olika detonationsavstånd (Walters & Zukas 1989, 187). De andra två underlagen utgörs av utökade standoff-kurvor för RB 53 BANTAM, vilka redovisar såväl medel- som max- och minkurvor för detonationsavstånd upp till 25 respektive ca 50 kalibrar (BOFORS(a) u.å.; FOI u.å.). De senare underlagen saknar dock uppgifter om antalet skott om skjutits för att fastställa kurvorna.

Underlagen analyseras genom att uttrycka de maximala penetrationsdjupen som ett procentuellt tillägg till medelvärdet (standoff-kurvan) samt som en andel av laddningens maximala penetrationsdjup, på motsvarande sätt som gjordes för simuleringsresultatet, se Tabell 9-3.

Tabell 9-3 Analysresultat ammunitionens egenspridning, maximalt tillägg på penetrationsdjup. Värden inom parentes avser de tillägg som ligger inom beräkningsmodellens giltighetsområde (10-100 kalibrar).

Underlag	Tillägg relaterat till standoff-kurvans penetrationsdjup	Tillägg relaterat till laddningens maximala penetration
Precisionsladdning (Walters & Zukas 1989, 187)	6-66 % (22-66 %)	6-30 % (19-30 %)
RB 53 BANTAM (BOFORS (a) u.å. och FOI u.å.)	7-68 % (14-68 %)	6-24 % (12-24 %)

Av denna enkla analys kan man dra slutsatsen att (även) ammunitionens tekniska egenspridning bör hanteras som en fast andel av laddningens maximala penetration. De absoluta maxvärdena motsvarar ett tillägg motsvarande 30 %. Samtidigt föreligger en betydande osäkerhet i dessa värden, då de avser metalliska målmateriale. Som jämförelse kan konstateras att de maxvärden som erhöles under försöken motsvarar ett tillägg på 7 %, alltså avsevärt lägre än de värden som föreligger för metaller. Antalet skott i försöken är för få för att värdet ska kunna ligga till grund för en reduktion.

9.4. Fastställande av värde på säkerhetsmarginalen

Dimensioneringsfaktorn i den föreslagna modellen [1] är avsedd att kompensera för fel och störningar vid tillämpning. I den tidigare uppsatsen rekommenderades värdet 1,3 på dimensioneringsfaktorn (Johnsson 2012, 40). Värdet fastställdes med stöd av Fortifikationsverkets konstruktionsregler för dimensionering av fortifikatoriska skydd mot RSV-penetration (Fortifikationsverket 2011b, 59-60).

Två felkällor har analyserats, med varierande detaljeringsgrad. Gemensamt är dock att de bör adderas till penetrationsdjupet som ett fast tillägg baserat på laddningens maximala penetration, oavsett detonationsavstånd. Detta innebär att begreppet dimensioneringsfaktor är missvisande, då den i modellen används som en term. Istället rekommenderas införande av en dimensioneringskoefficient, k_{dim} , som uttrycker en fast andel av laddningens maximala penetrationsdjup, P_{max} , oavsett detonationsavstånd. Dimensioneringskoefficienten inarbetas i modellen, enligt:

$$P_d = P + (k_{dim} \cdot P_{max}) \quad (9-1)$$

Härigenom erhåller parametern en mer korrekt benämning och sammanblandning med sedvanlig användning av dimensioneringsfaktorn undviks.

Felkällorna är oberoende av varandra och kan inträffa samtidigt, vilket innebär att deras respektive bidrag till dimensioneringskoefficienten bör adderas.

För användarrelaterade störningar anses en dimensioneringskoefficienten motsvarande den 95:e percentilen som relevant, då denna nivå är jämförbar med den konfidensgrad som tillämpats tidigare i uppsatsen. P_{95} motsvarar ett tillägg på maximalt 25 % till dimensioneringskoefficienten, se Tabell 9-2.

Ammunitionens tekniska egenspridning har inte kunnat analyseras med motsvarande detaljeringsgrad. Den enda jämförelse som kunnat göras utgår från penetrationsdata i pansarstål och samtliga maxvärden inryms inom ett tillägg motsvarande 30 % och för den laddning som använts tidigare i uppsatsen 24 %, se Tabell 9-3. Dessa värden är baserade på de mest extrema värden som erhållits vid olika detonationsavstånd. Någon gräns utifrån en viss konfidensgrad är inte möjlig att fastställa, då spridningsmått till stor del saknas.

Tillägget för de användarrelaterade felen minskar med ett ökande detonationsavstånd medan det ökar för ammunitionens egenspridning. Det sammanvägda värdet på dimensioneringskoefficienten blir ca 0,5 (50 %) när de två delarna summeras. Samma värde föreslås oavsett om fyllnadsmassorna är förpackade i sandsäckar eller används som en homogen grusbädd.

9.5. Slutsatser

Beräkningsmodellens säkerhetsmarginal ska kompensera för typiska fel i samband med dess användning. Två huvudsakliga felkällor har identifierats som relevanta att beakta; användarrelaterade fel respektive ammunitionens tekniska egenspridning.

Den vanliga tillämpningen av en dimensioneringsfaktor, som ett procentuellt påslag på det beräknade penetrationsdjupet, är inte lämplig. Istället föreslås en dimensioneringskoefficient, som

anger ett fast tillägg relaterat till laddningens maximala penetrationsdjup, oavsett detonationsavstånd.

De två störningarna är oberoende av varandra och kan uppträda samtidigt, varför deras respektive bidrag till dimensioneringskoefficienten adderas. Värdet 0,5 rekommenderas, där ungefär halva värdet kan relateras till respektive felkälla.

Säkerhetsmarginalens största brist är den osäkerhet som råder avseende ammunitionens egenspridning i de aktuella målmaterialet. Upprepade försök med stora n-värden rekommenderas för att erhålla relevanta läges- och spridningsmått på denna parameter. Härigenom kan ett tillförlitligare värde bestämmas.

10. Reviderad beräkningsmodell

De genomförda försöken har resulterat i ny kunskap om RSV-laddningars penetration i sandsäckskonstruktioner och vid långa detonationsavstånd. Genom en iterativ process har försöksresultatet analyserats, bearbetats och kunnat användas för en succesiv vidareutveckling av den föreslagna beräkningsmodellen [1].

10.1. Sammanfattning av revideringsåtgärder

Försöksresultatet visar att beräkningsmodellens [1] övergripande sammansättning är funktionell och kan användas som grund för fortsatt utveckling. Däremot uppstår ett ökande fel vid längre detonationsavstånd.

Generaliserbara standoff-kurvor för de aktuella målmaterialen ger en grund för anpassning av beräkningsmodellen [1]. Då exakta orsakssamband inte gått att fastställa åtgärdas samtliga avvikelser genom koefficienten för detonationsavstånd. Två beräkningsgrunder föreslås; en för homogena grusbäddar och en för sandsäckskonstruktioner.

Användarens skattning av värdet på koefficienten för strållängd riskerar att ge upphov till större fel än övriga parametrar. En ny klassificering föreslås, som reducerar felets magnitud, se Tabell 8-2.

Användaren saknar förutsättningar att skatta värdet på två parametrar; koefficienten för målmaterial och jetstrålens densitet. Enbart ett värde föreligger för respektive parameter vid den avsedda tillämpningen, varför de ersätts med en konstant, enligt: $k_2 \cdot \sqrt{\rho_j} = 1,0 \cdot \sqrt{8930} = 95$.

Modellens säkerhetsmarginal har bestäms utifrån Monte Carlo-simulering av användarrelaterade fel och analys av ammunitionens egenspridning. Den tidigare dimensioneringsfaktorn har ersatts med en mer ändamålsenlig dimensioneringskoefficient.

10.2. Förslag till beräkningsmodell

De genomförda utvecklingsstegen utgör grund för en komplett beräkningsmodell tillsammans med rekommenderade parametervärden för den avsedda tillämpningen. Den matematiska modellen för dimensionering av skadebegränsande åtgärder mot RSV-penetration vid ammunitionsröjning blir sammanfattningsvis:

$$P_d = d \cdot k_1 \cdot \frac{1}{\sqrt{\rho_t}} \cdot 95 \cdot (k_{avst} + k_{dim}) \quad (10-1)$$

Där	P_d	Penetrationsdjup, dimensioneringsvärde	(m)
	d	RSV-stridsdelens kaliber	(m)
	k_1	Koefficient för strållängd	(-)
	ρ_t	Densitet, målmaterial	(kg/m ³)
	k_{avst}	Koefficient för detonationsavstånd	(-)
	k_{dim}	Dimensioneringskoefficient	(-)
	S	Detonationsavstånd	(m)

Vid dimensionering av skadebegränsande åtgärder uppförda av sandsäckar fyllda med sand/fingrus rekommenderas följande värden på modellens parametrar:

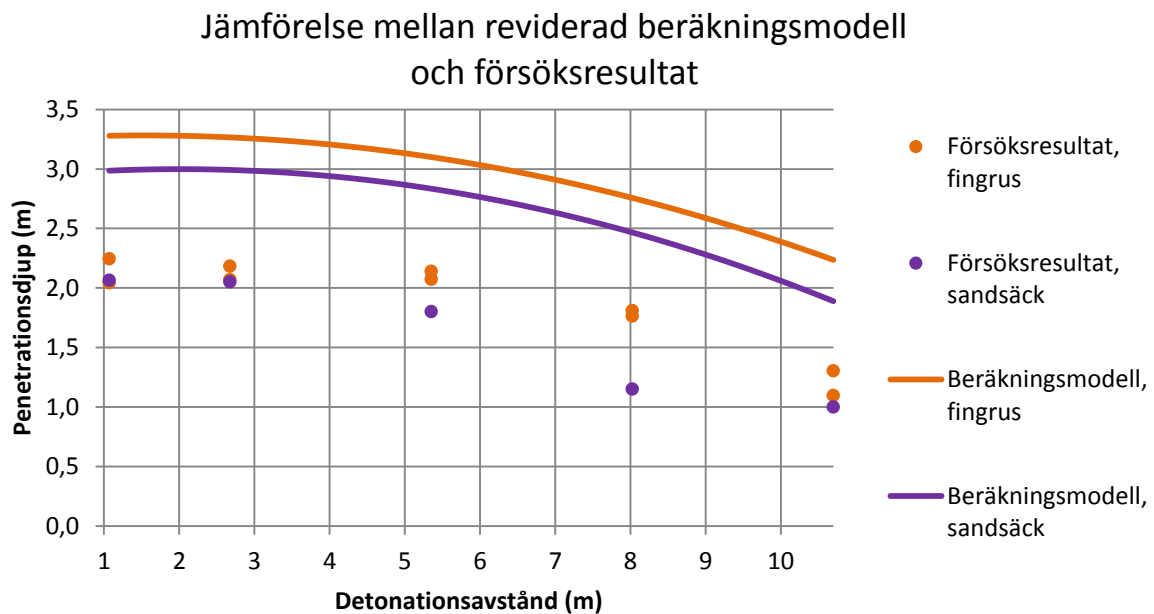
Tabell 10-1 Föreslagna värden på parametrar i beräkningsmodell efter revidering.

Parameter		Rekommenderat värde vid sandsäckskonstruktion
k_1	Koefficient för strållängd *	8/10/12/14/16
k_{avst}	Koefficient för detonationsavstånd **	$k_{avst} = 0,9 + \frac{3 \cdot 10^{-3} \cdot s}{d} - \frac{8 \cdot 10^{-5} \cdot s^2}{d^2}$
k_{dim}	Dimensioneringskoefficient ***	0,5
ρ_t	Densitet, målmateriäl ****	1500 kg/m ³

* Värde beräknas utifrån stridsdelens maximala penetrationsdjup i pansar uttryckt i hela kalibrar multiplicerat med faktorn två.
 ** Vid skadebegränsande åtgärd utförd som homogen skyddstäckning av sand/fingrus beräknas koefficienten enligt ekvation (7-2).
 *** Avser P₉₅ för användarrelaterade störningar tillsammans med maxvärden för egenspridning.
 **** Vid skadebegränsande åtgärd utförd som homogen skyddstäckning av sand/fingrus används densiteten 1600 kg/m³. Om skyddskonstruktionens densitet är känd används det faktiska värdet.

10.3. Jämförelse med försöksresultat

Avslutningsvis jämförs dimensioneringsvärdet för en skyddskonstruktion enligt den reviderade beräkningsmodellen, ekvation (10-1), med försöksresultatet.



Figur 10-1 Jämförelse mellan reviderad beräkningsmodell och försöksresultat i fingrus respektive sandsäck. Försöksserie 2 har omräknats som penetration i fingrus, utan luftspalt.

Beräkningsmodellen ger ett dimensioneringsvärde som med minst 0,8 m överstiger de i försöken erhållna penetrationsdjupen.

10.4. Modellens styrkor och svagheter

Modellens avsedda användning innebär vissa förhållanden som gör tillämpningen unik. Då i princip inga data som klarlägger dessa förhållanden funnits att tillgå krävdes experiment. Försöken är designade utifrån att pröva och verifiera verksamhetens unika förhållanden, vilket skapar en grundläggande god validitet för hela undersökningen genom att den mäter det som undersökningen de facto avser. Samtidigt innebär detta en svaghet i den bemärkelsen att resultatet är specifikt och möjligheten begränsad att verifiera resultatet med data från andra experiment.

Metodvalet att genomföra fullskaliga skjutförsök är en styrka, då bias relaterat till skalning och tolkning av resultat undviks. Dock är försöken resurskrävande, vilket begränsar antalet skott. Även om tre jämförbara skjutserier genomförts är det svårt att dra tillförlitliga slutsatser avseende spridningsmått och trender i resultatet. Resultatets generaliserbarhet begränsas av det ringa antalet skott samt att enbart på en typ av stridsdel och en typ fyllnadsmaterial använts.

I beräkningsmodellen används parametrar som förekommer inom andra tillämpningsområden, vilket stärker tillförlitligheten genom att dessa parametrar även har analyserats/granskats i andra sammanhang. Revideringen av den ursprungliga modellen [1] bygger huvudsakligen på standoff-kurvans form som bestämts i sin helhet utifrån försöksresultatet. Även om RSV-laddningar inom det aktuella intervallet anses skalbara och standoff-kurvor bedöms ha samma principiella form i likvärdiga målmaterial föreligger en viss variation mellan olika laddningar. Det finns en risk att koefficienten för detonationsavståndet inte är generaliserbar för alla typer av stridsdelar, alla kaliberdimensioner inom giltighetsområdet eller alla typer av fyllnadsmaterial.

Störningsanalysen för modellens parametrar bygger på felkällor som har identifierats utifrån arbetsmetoder, informationstillgång och övriga förhållanden som normalt föreligger vid upprättande av skadebegränsande åtgärder. Däremot har dessa störningar inte kunnat verifieras experimentellt och bedöms dessutom kunna variera mellan enskilda individer och även relaterat till yttre betingelser som ljusförhållanden, stress, hot mm.

Monte Carlo-simuleringen resulterade i ett stort antal värden på hur kombinationer av olika användarrelaterade fel och störningar kan inverka på penetrationsdjupet. Resultatet av simuleringen gav underlag för att utarbeta förslag på dimensioneringskoefficienten. Data saknas för att fastställa vilken inverkan ammunitionens egenspridning ger på penetrationsdjupet i de aktuella målmaterialen. Endast grova antaganden utifrån spridningsmått i pansarstål har kunnat genomföras, varför denna del av modellens säkerhetsmarginal har lägre validitet och reliabilitet än övriga.

Ytterligare möjligheter till kvalitetsförbättringar kan identifieras inom flera delområden, men bristen på erfarenheter begränsar möjligheterna. Införande i röjningsverksamheten anses därför gynna både säkerheten och förutsättningarna för erfarenheter från tillämpning, vilket främjar modellens fortsatta utveckling.

11. Utveckling av verktyg

Sammantaget föreligger härmed en komplett beräkningsmodell för dimensionering av skadebegränsande åtgärder mot RSV-penetration vid ammunitionsröjning (kapitel 10). Trots detta kan det konstateras att modellen inte lämpar sig för fältmässig användning i nuvarande utformning. För att uppnå militär nytta behöver beräkningsmodellen transformeras till ett användbart verktyg.

11.1. Metod

Metoden för att transformera modellen till ett verktyg, bygger på att analysera och maximera dess militära nytta. Kriterierna för militär nytta har tidigare definierats (kapitel 2) och används som utgångspunkt i analysen.

För att komma fram till behovet av anpassningsåtgärder övervägs två alternativa tillvägagångssätt; SWOT-analys respektive en enklare kvalitativ bedömning. SWOT-analysen har den fördelen att den strukturerar analysfaktorerna och resulterar i behov av åtgärder för att reducera identifierade svagheter och hot (Axberg et. al. 2013, 116-118). I och med den tidigare analysen avseende innebörden av den militära nyttan bedöms en fullständig SWOT analys som överflödigt.

Istället genomförs en enklare granskning avseende huruvida respektive krav är uppfyllt/tillgodosett i den vidareutvecklade modellen, ekvation (10-1). I de fall det föreligger brister utarbetas förslag på anpassningsåtgärder för att bättre tillgodose kraven på militär nytta.

11.2. Analys avseende behov av anpassningsåtgärder

I kapitel 2 definierades sju verksamhetsspecifika krav som utgör kriterierna för att militär nytta skall erhållas. Kraven har olika viktning och det föreligger ingen specificerad grad av uppfyllnad för att militär nytta skall anses uppnådd. Samtliga krav anses däremot viktiga att beakta för att reducera de dimensionerande kostnaderna (se avsnitt 2.1). Uppfyllnaden av de enskilda kraven och förslag på anpassningsåtgärder utarbetas därför utifrån ett kostnads-nyttoperspektiv.

Hög tillförlitlighet. Beräkningsmodellen har vidareutvecklats utifrån resultatet av fullskaliga experiment mot relevanta målmaterial. Härutöver har en säkerhetsmarginal som kompenserar för såväl användarrelaterade fel som ammunitionens tekniska egenspridning införts. Vid jämförelse med försöksresultatet ger modellen minst 0,8 m marginal till uppmätta penetrationsdjup. Inget ytterligare anpassningsbehov anses föreligga.

Komplett verktyg. Beräkningsmodellen ger enbart erforderlig tjocklek på skyddskonstruktionen, en fullständig dimensioneringsanvisning behöver även inkludera övriga dimensioner. Detta innebär att modellen behöver kompletteras med anvisningar för konstruktionens bredd och höjd. Dessutom bör modellen beakta riktningsändringar och förskjutningar av RSV-strålen, på grund av: förskjuten träffpunkt, avböjning inuti målmaterialiet samt riktningsändring på grund av röjningsladdningen.

Ofullständig information. Modellen förutsätter enbart indata som finns att tillgå i använda ammunitionsdatabaser eller kan skattas/mätas av röjningspersonalen. När identifiering inte är möjlig kan värdet på vissa parametrar inte fastställas. Anvisningar behövs för situationer när röjningsobjektet enbart kan kategoriseras eller då den tillgängliga informationen är ofullständig.

Befintlig utrustning. En sandsäckskonstruktion kan byggas för hand och utan tillförsel av utrustning. Om konstruktionen istället byggs som en homogen grusbädd krävs tillförsel av material för inneslutningen av fyllnadsmassorna. Inga ytterligare anpassningsbehov föreligger.

Personalens utbildningsnivå. Den matematiska komplexiteten är anpassad till röjningspersonalens utbildningsnivå och föranleder inga ytterligare anpassningsåtgärder. Däremot kan beräkningsmodellens matematiska nivå bli ett hinder i stressade lägen när fokus behöver vara på annat än matematiska beräkningar. I dessa lägen bör det föreligga ett enklare verktyg än en ekvation.

Korta tidsförhållanden. Tidsaspekten har stor betydelse för verktygets militära nytta och bör relateras till det tempo som verksamheten i övrigt genomförs med. Konstruktionen kan ta timmar att upprätta, men dess dimensioner behöver vanligen kunna beräknas på några minuter. Anledningen är de beslutsfaser som verktyget skall stödja med information.

Sammantaget föreligger behov av ett verktyg utformat som tabeller eller diagram som kan börja användas redan utifrån knapphändig information och som ger god överblick över olika alternativ. Verktyget bör även medge succesiva förfiningar allteftersom mer information erhålls. För noggrannare beräkningar bedöms modellens nuvarande utformning som godtagbar.

Maximala verkan. Detta krav har beaktats under hela utvecklingen av modellen och är tillgodosett.

11.3. Diskussion kring anpassningsåtgärder

Av modellens fem parametrar fastställer användaren värdet på tre av dessa; kalibern, detonationsavståndet och koefficienten för strållängd. Med detta som grund är det möjligt att designa ett enklare verktyg.

Ett alternativ är tabeller som ger penetrationsdjupet för olika kombinationer av kaliber och detonationsavstånd. Fördelen med tabellformatet är enkelheten och att resultatet inte kräver någon tolkning då det kan uttryckas direkt i lämplig längdenhet. Nackdelen är att det krävs en tabell för respektive värde på koefficienten för strållängd och det är svårt att erhålla en visuell bild av hur variationer i parametervärden påverkar resultatet.

Det andra alternativet är att utforma verktyget som diagram. Detta är möjligt om samtliga enheter omvandlas till enheten kalibrar, varvid den ena axeln uttrycker detonationsavståndet och den andra skyddets tjocklek. Fördelarna är flera; det krävs bara ett diagram, visualiserar sambandet mellan olika parametrar och interpolation mellan redovisade värden förenklas. Nackdelen är främst att beräkningsresultatet måste uttryckas i enheten kalibrar, vilket kräver omräkning av både indata och resultat till lämplig längdenhet.

Diagramformatet väljs för utformningen av verktyget, främst på grund av överskådligheten. Verktyget kan användas genom röjningsarbetets olika faser, det enda som ändras är att utfallsrummet succesivt blir mindre. Dessutom är konsekvenserna av olika handlingsalternativ enkla att jämföra. För att minimera andelen beräkningar ytterligare bör diagrammet kompletteras med en omräkningstabell mellan längdenheterna kaliber och meter.

Jetstrålens avböjning inuti målet dokumenterades under försöken. Försöksserie 1 och 3 anses representativa, varvid stålens maximala avvikelse från symmetriaxeln uppgick till 0,14 m i sida och 0,16 m i höjd. Under försöken användes motsvarande 5 kalibrars marginal med skyddsmaterial på

samtliga sidor om symmetriaxeln. Inga indikationer på att detta skulle vara otillräckligt kunde konstateras. Motsvarande marginal rekommenderas tillsammans med modellen.

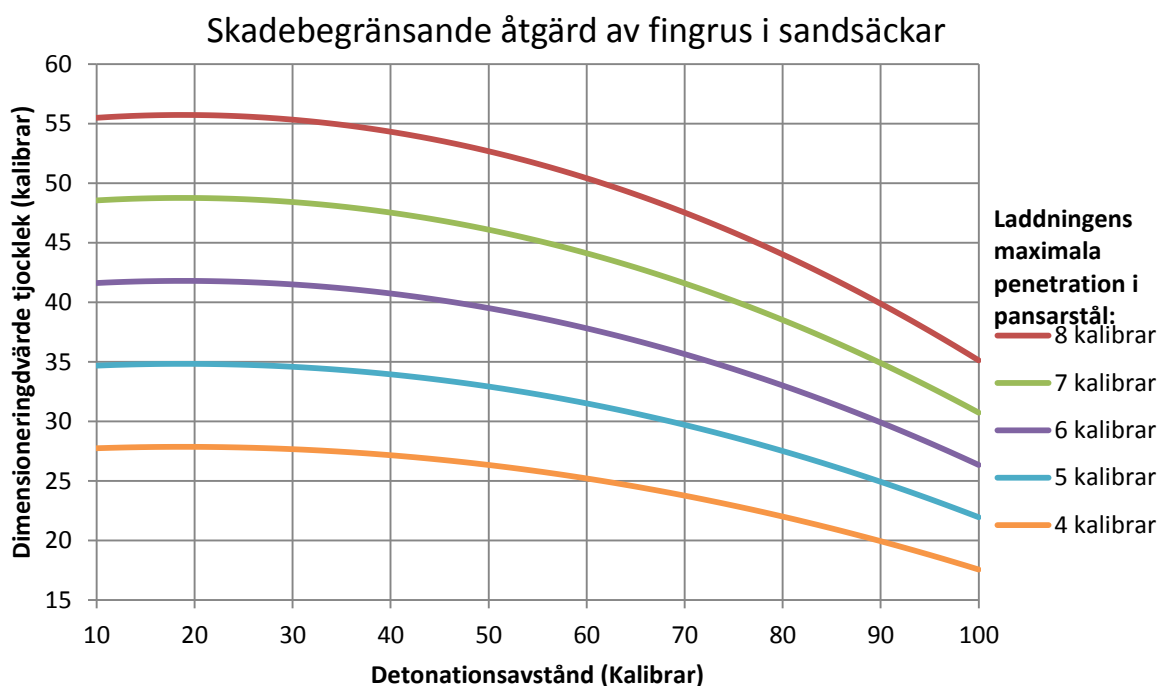
Att kvantifiera en motsvarande marginal för fel relaterade till syftningen av objektets träffpunkt är svårare. Avvikelsen är relaterad till faktorer som personalens skicklighet och ammunitionens yttre skick. Osäkerheten i syftningen av ammunitionens riktning bör istället hanteras som ett område, utanför detta "osäkerhetsområde" är det osannolikt att träffpunkten befinner sig. Detta ger en bättre individ- och situationsanpassning av osäkerheten. Den tidigare beskrivna marginalen för strålens riktningsändring inuti målet tas ut från osäkerhetsområdets gränser.

Den tredje formen av riktningsändring är relaterad till den använda röjningsladdningen. Röjningsladdningar kommer sannolikt medföra en osymmetrisk initiering av RSV-laddningen, vilket riskerar att påverka strålbildningen med en krökt stråle som följd. En förskjutet initieringspunkt leder till att strålen böjer av i motsatt riktning (Ayisit 2008, 1402-1404; Held 1983, 333). Genom att skjuta röjningsladdningen rakt ovanifrån undviks en förskjutning i sidled, istället bedöms avböjningen ske mot markplanet.

Den avslutande anpassningsåtgärden avser vilka värden som skall användas i de fall röjningsobjektet inte kan identifieras eller då erforderlig teknisk information inte föreligger. Denna avsaknad av information påverkar endast värdet på koefficienten för strållängd. Om parametern skattas till ett för lågt värde underdimensioneras skyddskonstruktionen, med risk att strålen penetrerar skyddet. I de fall denna information inte kan fastställas bör $k_1 = 16$ användas, en maximal penetration i pansarstål motsvarande 8 kalibrar.

11.4. Förslag på verktyg

Baserat på analysen ovan har följande verktyg utvecklats för dimensionering av skadebegränsande åtgärder byggda av sandsäckar:



Figur 11-1 Föreslaget verktyg för dimensionering av skadebegränsande åtgärd byggda av sandsäckar.

Verktygets ger minsta tjocklek på en skyddskonstruktion byggd av sandsäckar enligt Ekvation (10-1), inklusive parametervärden enligt Tabell 10-1. Den vertikala axeln anger dimensioneringsvärdet på skyddskonstruktionens tjocklek, inklusive dimensioneringskoefficienten, och den horisontella axeln anger detonationsavståndet. I diagrammet finns fem kurvor, en för respektive värde på koefficienten för strållängd och dessa definieras utifrån laddningens maximala penetration i pansarstål. Samtliga storheter i verktyget uttrycks i enheten kalibrar.

Vid användning fastställs först vilken kurva som skall användas utifrån stridsdelens tekniska generation. Härfter fastställs vid vilket detonationsavstånd den skadebegränsande åtgärden skall byggas. Skärningpunkten mellan detonationsavståndet och aktuell kurva ger skyddstjockleken på den vertikala axeln. Motsvarande diagram för en skyddskonstruktion utförd som en homogen grusbädd samt exempel på omvandlingstabell mellan kaliber och meter återfinns i bilaga 3.

I övrigt gäller följande anvisningar för verktygets användning:

- Giltighetsområde kalibrar mellan 40-178 mm
- Giltighetsområde detonationsavstånd mellan 10-100 kalibrar
- Minsta bredd på skyddskonstruktionen är 5 kalibrar på ömse sidor om bedömd träffpunkt
- Minsta höjd på skyddskonstruktionen är 5 kalibrar över bedömd träffpunkt
- Vid osäkerhet i syftningen av träffpunkten bestäms ett träffpunktsområde
- Om röjningsobjektet inte kan identifieras sätts $k_1 = 16$, motsvarande 8 kalibrar maximal penetration i pansarstål.
- Röjningsladdningar skjuts rakt ovanifrån

11.5. Slutsatser

För att beräkningsmodellen skall ge avsedd militär nytta krävs att den är anpassad till de behov och förutsättningar som föreligger vid dess tillämpning. Den militära nyttan kan inte definieras i generella termer, utan kräver en särskild analys i varje enskild tillämpning.

För att ge avsedd militär nytta behöver modellen vara anpassad till de tidsförhållanden som gäller för olika beslut under röjningsuppdraget. Modellen har transformerats till ett dimensioneringsverktyg som medger snabba uträkningar utan tekniska hjälpmedel.

Verktyget har kompletterats med skyddskonstruktionens övriga dimensioner och nödvändiga anvisningar. Tillsammans utgör de olika delarna en komplett dimensioneringsgrund för skadebegränsande åtgärder. Genom att samtliga verksamhetsspecifika krav har kunnat beaktas och till stor del kunnat tillgodoses bedöms den militära nyttan som hög.

12. Avslutning

12.1. Sammanfattande slutsatser

Uppsatsen har resulterat i ny kunskap avseende RSV-strålars penetration i skyddskonstruktioner byggda av sandsäckar. Kunskapen har använts för att vidareutveckla den i en tidigare uppsats föreslagna beräkningsmodellen [1] för dimensionering av skadebegränsande åtgärder vid ammunitionsröjning. Försöksresultatet är begränsat, vilket reducerar möjligheten att generalisera vissa iakttagelser och slutsatser.

Standoff-kurvor för geologiska fyllnadsmassor är ovanliga och för de långa detonationsavstånd som är typiska vid ammunitionsröjning närmast obefintliga. Utifrån erhållit försöksresultat har standoff-kurvor bestämts för målmaterialet fingrus respektive sandsäckar, upp till 100 kalibrars detonationsavstånd. Formen på kurvorna uppvisar fundamentala olikheter jämfört med motsvarande kurvor för metaller. Penetrationsdjupet avtar långsammare vid ökande detonationsavstånd och distinkta omslagpunkter saknas. Den principiella formen är annorlunda för dessa målmaterial, vilket innebär att standoff-kurvor för sand och grus inte kan fastställas genom skalning av kurvor för metaller.

Försöksresultatet uppvisar vissa avvikelser från gängse teorier för jetstrålars penetration. Den första är att penetrationsdjupet är signifikant mindre när fingrus är förpackat i sandsäckar, jämfört med när det används som en homogen grusbädd. Detta är anmärkningsvärt då sandsäckskonstruktionen har en lägre densitet, vilket enligt den hydrodynamiska penetrationsteorin skulle innebära det motsatta resultatet. Resultatet är även i motsats till kunskap om projektilers penetrationsegenskaper, som normalt innebär ökat penetrationsdjup när fyllnadsmaterialet är förpackat i sandsäckar. Detta innebär att olika dimensioneringsgrunder bör tillämpas beroende av om målmaterialet är förpackat i sandsäckar eller ej.

En rimlig förklaringsmodell till den konstaterade skillnaden är att det uppstår fas 3-penetration i den homogena grusbädden, vilket ger ett betydande tillskott till penetrationsdjupet. När densiteten på målmaterialet är avsevärt lägre än för strålen kommer målmaterialet runt hållkanalen erhålla en framåtriktad hastighetsresultant. Dessutom överförs kinetisk energi från strålen till målmaterialet, som leder till komprimering av målmaterialet. Vid försöken dokumenterades flera indikatorer på att dessa fenomen ger ett betydande tillskott till penetrationsdjupet i en homogen grusbädd. Motsvarande iakttagelser föreligger inte för sandsäcksbarriärer, vilket skulle kunna bero på att sandsäcksmaterialet motverkar att rörelsen i målmaterialet överförs mellan sandsäckarna.

Nästa avvikelse avser den grundläggande hydrodynamiska penetrationsteorin. Teorin predikterar ett alldeles för litet penetrationsdjup i de aktuella målmaterialet, det verkliga penetrationsdjupet är minst dubbelt så stort som det teoretiska. Teorin anses därför inte användbar för porösa geologiska målmaterial som sand och grus. Avvikelsen indikerar att för denna typ av målmaterial inverkar andra materialegenskaper än vid penetration i metaller.

En analys av resultatet utifrån den undre gränshastigheten, den lägsta strålhastighet som bidrar till penetrationsdjupet, visar att i princip hela strållängden är verksam vid målmaterial som sand och grus. Motsvarande värde för stål är under 50 % och sjunker snabbt vid ökande detonationsavstånd. Genom att kombinera den hydrodynamiska penetrationsteorin med hur stor andel av strålen som

bidrar till penetrationsdjupet erhålls en god prediktering av erhållna penetrationsdjup. Det föreligger troligen ett samband mellan (aktiv) strållängd och målmaterial, vilket penetrationsmodeller för porösa geologiska material bör beakta.

Utifrån försöksresultatet kan det konstateras att den föreslagna beräkningsmodellens [1] övergripande sammansättning är funktionell, däremot erhålls ett ökande fel vid längre detonationsavstånd. Denna avvikelse tillsammans med den konstaterade skillnaden mellan en sandsäcksbarriär och en homogen grusbädd har införts i modellen genom anpassning av koefficienten för detonationsavstånd.

De av FOI rekommenderade värdena på koefficienten för strållängd (stridsdelens tekniska generation) är inte lämpliga för modellens avsedda användning. Genom störningsanalys kan det konstateras att parametern riskerar att ge upphov till ett betydande fel när dess värde skattas för röjningsobjektet. En ny klassificering, som bygger på tillgänglig teknisk information om stridsdelen och den övriga modellens precision, har utarbetats och minskar störningens magnitud.

Den gängse användningen av en dimensioneringsfaktor, som ett procentuellt påslag på beräknat penetrationsdjup, är inte lämplig tillsammans med modellen. Genom Monte Carlo-simulering av användarrelaterade fel har det visats att ett fast tillägg oavsett detonationsavstånd är lämpligare. Samma slutsats dras avseende ammunitionens tekniska egenspridning, som enbart varit möjligt att analysera utifrån penetrationsdata för metaller. En dimensioneringskoefficient som ger ett fast tillägg oavsett detonationsavstånd har utvecklats. Det föreslagna värdet på koefficienten kompenserar för såväl användarrelaterade som ammunitionrelaterade fel och störningar.

Därmed föreligger en komplett beräkningsmodell för dimensionering av skadebegränsande åtgärder mot RSV-penetration vid ammunitionsröjning. Modellen använder enbart indata som finns i använda ammunitionsdatabaser eller kan inhämtas på plats. Den matematiska komplexiteten är anpassad till den utbildningsnivå som föreligger bland Försvarmaktens ammunitionsröjningspersonal. Trots detta kan det konstateras att modellen inte lämpar sig för fältmässig användning i nuvarande utformning.

Genom att analysera modellen i förhållande till de definierade verksamhetsspecifika kraven kan dess militära nyttan värderas. Den främsta bristen är att modellen inte är anpassad till de tidsförhållanden som är typiska för röjningsverksamheten. Genom att uttrycka modellen som ett enkelt diagram medges snabba uträkningar och alternativjämförelser, i samma takt som denna information efterfrågas i röjningsarbetet. Diagrammet har kompletterats med konstruktionens övriga dimensioner och andra anvisningar för att utgöra ett komplett dimensioneringsverktyg. Det föreslagna verktyget uppfyller de verksamhetsspecifika kraven, varför den militära nyttan bedöms som hög.

Skadebegränsande åtgärder dimensionerade utifrån modellen resulterar i stora och resurskrävande konstruktioner. När materielltillgång eller tidskrav omöjliggör en fullständig skydds konstruktion kommer skyddsnivån att reduceras. Den vidareutvecklade beräkningsmodellen ger inget stöd för att bestämma restverkan vid underdimensionerade skyddslösningar. Ytterligare forskning rekommenderas avseende ofullständiga skydds konstruktioner i kombination med röjningsladdningars reduktion av röjningsobjektets penetrationsegenskaper, viktiga indata för att kunna utöva riskhanteringen av röjningsinsatser.

Sammanfattningsvis har den tidigare föreslagna beräkningsmodellen [1] vidareutvecklats till ett funktionellt verktyg för ammunitionsröjning. Ett flertal anpassningsåtgärder har krävts för att modellen ska ge den eftersträvade militära nyttan. Fortfarande finns delar av detta komplexa problemområde som inte kunnat utredas inom ramen för uppsatsen. Trots detta utgörs resultatet av ett komplett verksamhetsanpassat verktyg. Införande i regelverk och utbildningssystem föreslås. Härigenom skapas förutsättningen för att erhålla erfarenheter och synpunkter från användare, troligen den främsta förutsättningen för fortsatt utveckling.

12.2. Svar på uppgiftsställning

Vidareutveckla den tidigare föreslagna beräkningsmodellen [1] för skadebegränsande åtgärder mot RSV-penetration till ett användbart verktyg inom ammunitionsröjningstjänsten.

Med utgångspunkt i Militärteknikens fundamentala grund – interaktionen mellan tekniken och den militära verksamheten – har den beräkningsmodell [1] som författaren föreslagit i en tidigare uppsats vidareutvecklats. Den militära nyttan har använts som urvalsgrund och analysverktyg för att säkerställa att varje åtgärd leder mot det övergripande syftet att åstadkomma ett funktionellt verktyg för ammunitionsröjningstjänsten.

Genom succesiva utvecklingssteg har respektive del av modellen analyserats, verifierats och anpassats för att ge ett tillförlitligt resultat vid tillämpning. Resultatet utgörs av en beräkningsmodell, Ekvation (10-1), med anvisningar och värden för ingående parametrar, Tabell 10-1. För att uppnå eftersträvd militär nytta krävdes transformering av ekvationen till ett fältmässigt verktyg.

Svaret på frågeställningen utgörs av ett dimensioneringsverktyg för skadebegränsande åtgärder mot RSV-penetration, Figur 11-1. Verktyget uppfyller kriterierna för att ge avsedd militär nytta och bedöms kunna införas i ammunitionsröjningsverksamheten.

12.3. Rekommendationer

Försök i större serier. Den främsta begränsningen med den genomförda undersökningen är den begränsade empirin. Ytterligare kunskap behövs avseende ammunitionens egenspridning vid långa detonationsavstånd i målmaterialet sandsäckar. Med hänsyn till de betydande skillnader som konstaterats jämfört med verkan i metalliska målmateriale är det inte självklart hur ammunitionens egenspridningen påverkas. För att fastställa läges- och spridningsmått på denna parameter krävs större försöksserier (hög n-värden) samtidigt som övriga parametrar hålls konstanta och störningsfria. Härigenom kan såväl validitet som reliabilitet i modellens säkerhetsmarginal förbättras, vilket även ger nödvändiga indata för riskhanteringen av röjningsverksamheten.

Införande i ammunitionsröjningsverksamheten. Med hänsyn till dagens avsaknad av beslutsstöd för dimensionering av skadebegränsande åtgärder mot RSV-penetration föreslås att resultatet av denna undersökning införs i ammunitionsröjningsverksamheten. Verktygets användning bör ingå grundutbildningen för ammunitionsröjningsledare samtidigt som det inarbetas i Försvarens handboksserie för ammunitions- och minröjning. Införandet bör även involvera Försvarens säkerhetsinspektör och sakområdesansvarig för bokserien Säkl (Säkerhetsinstruktion för vapen och ammunition med mera).

Försök med modernare stridsdelar. Genom att genomföra motsvarande försök med andra typer av RSV-stridsdelar erhålls bättre kunskap om hur ammunitionens tekniska generation inverkar på

penetrationsdjupet. Är penetrationsdjupet i en sandsäckskonstruktion skalbart utifrån kända penetrationsegenskaper mot metaller? Informationen behövs för att verifiera den föreslagna beräkningsmodellens generaliserbarhet i detta avseende och för att förbättra dess reliabilitet.

Utreda inverkan av variationer i målmaterialet. För att erhålla bättre kunskap om hur variationer i det geologiska fyllnadsmaterialet inverkar på penetrationsdjupet rekommenderas kunskapsuppbyggnad. Genom att utreda hur faktorer som kornstorleksfördelning, fukthalt och bergart inverkar på penetrationsdjupet kan denna osäkerhet minskas och modellen anpassas.

Utreda inverkan av oskadliggörandetekniker och ofullständiga skyddskonstruktioner. Den nuvarande utformningen av beräkningsmodellen bygger på att ammunitionen antas erhålla maximal verkan och skyddskonstruktionen är dimensionerad för att helt eliminera strålens verkan. Samma princip tillämpas även för dimensionering av skyddsåtgärder mot andra verkansformer. I vissa situationer omöjliggör tid- eller materielltillgång en komplett skyddskonstruktion. Vilken skyddsnivå erhålls genom en klenare konstruktion? Dessutom är det känt att RSV-stridsdelar är känsliga för asymmetrier och yttre störningar. Hur mycket reduceras verkan av röjningsladdningen och i vilka fall kan jetstrålen antas helt eliminerad? Denna kunskap är nödvändig för att kunna utöva riskhantering av röjningsinsatser.

Utveckling av motsvarande verktyg för projektilbildande RSV. Den genomförda undersökningen avser enbart strålbildande RSV-stridsdelar, men behovet av adekvat beslutsstöd omfattar även projektilbildande dito. Framtagande av ett motsvarande verktyg för röjning av projektilbildande RSV-stridsdelar rekommenderas.

13. Källförteckning

13.1. Litteratur, artiklar och rapporter

- Aminov, Y. (2012). *FBD - Find the best distribution tool*. MATLAB Central .
<https://www.mathworks.se/matlabcentral/fileexchange/36000-fbd--find-the-best-distribution--tool>. [2014-05-12]
- Axberg, S. (2006). Military Technology as Science. I Axberg, S. & Foghelin, J. (red.) *Perspectives on military technology*. Stockholm: Department of Military Technology, Royal Swedish Academy of War Sciences, s. 67-86.
- Axberg, S. (2008). Tools of War: A Few Remarks on the Subject of Military-Technology. *Tiede ja ase: Suomen sotatieteellisen seuran vuosijulkaisu*, vol. 66, s. 195-204.
- Axberg, S., Andersson, K., Bang, M., Bruzelius, N., Bull, P., Eliasson, P., Ericson, M., Hagenbo, M., Hult, G., Jensen, E., Liwång, H., Löfgren, L., Norsell, M., Sivertun, Å., Svantesson, C-G. & Vretblad, B. (2013). *Lärobok i Militärteknik, vol. 9 : Teori och metod*. Stockholm: Försvarshögskolan (FHS).
- Ayisit, O. (2008). The influence of asymmetries in shaped charge performance. *International Journal of Impact Engineering*. vol. 35 (12), s. 1399-1404.
- Birkhoff, G. (1947). *Hollow Charge Anti-Tank (HEAT) Projectiles*. Aberdeen: US Army Ballistic Research Laboratory, BRL Report.
- Bless, S.J., Jurick, D. & Yoon, R. (1986). Secondary Penetration of Rod Projectiles. *IX International Symposium on Ballistics*. Shrivenham, England, 1986, s. 345-350.
- Box, G. E. P., Hunter, J. S. & Hunter, W. G. (2012). *Praktisk statistik och försöksplanering*. Lund: Studentlitteratur.
- Chou, P., & R. Toland. (1977). Experimental study of multiple interior impacts. *Experimental Mechanics* 17 (6), s. 201-206.
- Christman, D. R., & Gehring, J. W. (1966). Analysis of High-Velocity Projectile Penetration Mechanics. *Journal of Applied Physics*, vol. 37 (4), s. 1579-1587.
- Cornish, R., Mills, J. T., Curtis, J. P. & Finch, D. (2001). Degradation mechanisms in shaped charge jet penetration. *International Journal of Impact Engineering*, vol. 26 (1), s. 105-114.
- Cullis, J.G. & Nash, M. A. (1986). The Importance of Afterflow in High Impedance Mismatch Penetration. *IX International Symposium on Ballistics*. Shrivenham, England, 1986, s. 351-363.
- DiPersio, R. & Simon, J.(1964). *The Penetration-Standoff-Relation for Idealized Shaped Charge Jets*. Aberdeen: US Army Ballistic Research Laboratory, BRL Memorandum Report No 1542, Feb. 1964.
- DiPersio, R., Simon, J. & Merendino, A. (1965). *Penetration of shaped-charge jets into metallic targets*. Aberdeen: US Army Ballistic Research Laboratory, BRL Report no. 1296, Sept 1965.
- Elfving, C., Karlsson, S. & Hansson, H. (2005). *Modell för penetration av RSV i skyddstäckningar*. Stockholm:Totalförsvarets Forskningsinstitut (FOI), FOI-R—1680--SE.
- Fagerström, H. (1973). Packningsegenskaper - Förslag till geotekniska laboratorieanvisningar, del 5. I *Byggnadsforskningens informationsblad B2:1971, Reviderad utgåva 1973*. Stockholm: Statens institut för byggnadsforskning
- Forrestal, M. J. & Luk, V. K. (1992). Penetration into soil targets. *International Journal of Impact Engineering*, vol. 12 (3), s. 427-444.

- Fortifikationsverket (2011a). *Fortifikationsverkets konstruktionsregler, FKR 2011, Bilaga FortLast*. Eskilstuna: Fortifikationsverket (FortV).
- Fortifikationsverket (2011b). *Fortifikationsverkets konstruktionsregler, FKR 2011, Bilaga FortSkydd*. Eskilstuna: Fortifikationsverket (FortV).
- Försvarsmakten (2009). *Handbok ammunitions- och minröjning för totalförsvaret – Ammunitionslära*, (H Am- och minröj – Ammunitionslära), Stockholm:Försvarsmakten, M7747-244141.
- Försvarsmakten (2010a). *Handbok ammunitions- och minröjning - Arbetsmetoder*. (H Am- och minröj – Arbetsmetoder), Stockholm:Försvarsmakten, M7734-351093.
- Försvarsmakten (2010b). *Handbok ammunitions- och minröjning - Skyddsåtgärder*. (H Am- och minröj – Skyddsåtgärder), Stockholm:Försvarsmakten, M7734-244012.
- Gooch, W. A., Burkins, M. S., Walters, W. P., Kozhushko, A. A. & Sinani, A. B. (2001). Target strength effect on penetration by shaped charge jets. *International Journal of Impact Engineering*, vol. 26 (1), s. 243-248.
- Hansson, H. & Westerling, L. (2007). *RSV-penetration i skyddstäckningar*. Stockholm:Totalförsvarets Forskningsinstitut (FOI), FOI-R—2344--SE
- Held, M. (1987). Refined Shaped Charge Jet Penetration Measurements in Various Materials Versus Hydrodynamic Prediction. *X International Symposium on Ballistics*.
- Held, M. (1983). Characterizing shaped charge performance by stand-off behavior. *VII International Symposium on Ballistics*, Hauge, Netherlands, 1983, s. 331-339.
- Held, M. (1988). Penetration Cutoff Velocities of Shaped Charge Jets. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, vol. 13 (4), s. 111-119.
- Held, M. (1991a). Hydrodynamic Theory of Shaped Charge Jet Penetration. *Journal of Explosives and Propellants*, R.O.C. Taiwan vol. 4, s. 9-24.
- Held, M. (1991b). Phenomenological Description of the Function of Shaped Charges. *Journal of Explosives and Propellants*, R.O.C. Taiwan vol. 7, nr. 4, s. 9-24.
- Held, M. (1992). Penetration of Shaped Charges in Concrete and in Sand in Comparison to Steel-targets. *Journal of Explosives and Propellants*, R.O.C. Taiwan vol. 8, nr. 1, s. 1-15.
- Hill, R, Mott, N. F. & Pack, D. C. (1944a). *Theoretical Research Report, 2/44*. UK Armament Research Department.
- Hill, R, Mott, N. F. & Pack, D. C. (1944b). *Theoretical Research Report, 12/44*. UK Armament Research Department.
- Holm, G. (2007). *Systemmodellering och Simulering -med särskild inriktning mot försvarsmakten*. Stockholm: Totalförsvarets Forskningsinstitut (FOI).
- Johnsson, F. (2012). Beräkningsmodeller för riktad sprängverkan vid ammunitionsröjning, Kandidatuppsats, Militärteknik, Stockholm: Försvarshögskolan.
- Johnsson, F., Vretblad, B. & Sivertun, Å. (2013). Shaped Charge Calculation Models for Explosive Ordnance Disposal Operations. *Journal of Military Studies*, vol. 3, nr. 1.
- Johnsson, F., Vretblad, B. & Sivertun, Å. (2012). Shaped Charge Calculation Models for Explosive Ordnance Disposal Operations. I *International Society of Military Sciences (ISMS) 2012 Annual Conference*. Kingston, Canada, 2012.
- Lamnevik, S. (1997). *Diagram för konsekvensanalys*. Stockholm:Försvarets Forskningsanstalt (FOA)
- Lantz, B. (2013). *Grundläggande statistisk analys*. Lund: Studentlitteratur.

- Larsson, R. (2008). *Information 1 - Jords egenskaper*. Linköping:Statens Geotekniska Institut (SGI).
- Lidén, E., Holmberg, L. Mellgard, I. & Westerling, L. (1994). *Stridsdelar, skydd och deras växelverkan*. Stockholm: Försvarets Forskningsanstalt (FOA), FOA-R—94-00035-2.3--SE.
- Orphal, D. L. (1997). Phase three penetration. *International Journal of Impact Engineering* 20 (6):601-616.
- Persson, D. (red.) (1993). Grunder om RSV-stridsdelar. *Fakta om RSV, Ag Verkan i pansar (VIP)*, Nr. 1 Mars 1993.
- Runborg, O (2012). Fel- och störningsanalys. (Utbildningsunderlag KTH, Kurs DN1240 – Numeriska metoder, grundkurs II). Stockholm:Kungliga Tekniska Högskolan (KTH).
<http://www.csc.kth.se/utbildning/kth/kurser/DN1240/numfcl12/Lecture1.pdf>. [2014-04-01]
- Savvateev, A. F., Budin, A. V. Kolikov, V. A. & Rutberg, Ph. G. (2001). High-speed penetration into sand. *International Journal of Impact Engineering*, vol. 26 (1), s. 675-681.
- Schneider, A. & Stilp, A. (1984). Projectile Penetration into Low Density Media. *VIII International Symposium on Ballistics*, Orlando, Florida, USA.
- Sivertun, Å. (2012). Militärgeografi och GIS - delar av Militärteknik. *Kungl Krigsvetenskapsakademiens Handlingar och Tidskrift*, vol. 1, s. 108-120.
- US Department of the Air Force (2008). *Civil engineer guide to fighting positions, shelters, obstacles, and revetments*. Vol. 14: United States Department of the Air Force.
- US Department of the Army Headquarters (1985). *Field Manual (FM) 5-103, Survivability*: Washington, DC: Government Printing Office.
- US War Department (1944). *FM 5-15 Corps of Engineers Field Fortifications 1944*. Washington: US War Department.
- Van Vooren, A., Borg, J., Sandusky, H. & Felts, J. (2013). Sand Penetration: A Near Nose Investigation of a Sand Penetration Event. *Procedia Engineering* 58, s. 601-607.
- Vretblad, B. & Johnsson, F. (2013). Tool for Clearance of Shaped Charge Ammunition Designed for Military Usefulness. I *15th International Symposium on Interaction of the Effects of Munitions with Structures (ISIEMS)*. 17-20 September 2013, Potsdam, Tyskland.
- Walters, W. P. & Zukas J. A. (1989). *Fundamentals of shaped charges*. New York:John Wiley & Sons.
- Walters, W. P., Flis W. J. & Chou P. C. (1988). A survey of shaped-charge jet penetration models. *International Journal of Impact Engineering* 7 (3):307-325.
- Walters, W. P. & Summers R. L.. (1994). Shaped charge jet particulation. *AIP Conference Proceedings* 309:1873-1876.
- Walters, W. P. (2006) *An Overview of the Shaped Charge Concept*, West Point:US Military Academy.
- Wijk, G. & Tjernberg A. (2005). Shaped charge jet penetration reduction with increasing stand-off. Stockholm: Totalförsvarets Forskningsinstitut - FOI.
- Wu, J., Liu J. B. & Du Y. X. (2007). Experimental and numerical study on the flight and penetration properties of explosively- formed projectile. *International Journal of Impact Engineering* 34 (7):1147-1162.

13.2. Opublicerat material

Erhållet via SAAB Dynamics AB, Jyrki Helander, 2014-03-12:

BOFORS(a). (u.å.). Standoff-kurva RB 53 BANTAM. Karlskoga:Bofors AB. [Opublicerat manuskript].

BOFORS(b). (u.å.). Stråldata RB 53 BANTAM. Karlskoga:Bofors AB. [Opublicerat manuskript].

BOFORS(c). (u.å.). Technical Data BANTAM. Karlskoga:Bofors AB. [Opublicerat manuskript].

BOFORS(d). (u.å.). Konstruktionsritning RB 53 BANTAM. Karlskoga:Bofors AB. [Opublicerat manuskript].

Erhållet via Totalförsvarets Forskningsinstitut (FOI), Svante Karlsson, 2013-12-17:

Totalförsvarets Forskningsinstitut (FOI). (u.å.). RB53 BANTAM Standoff-kurva i pansar.
Stockholm:Totalförsvarets Forskningsinstitut (FOI). [Opublicerat manuskript].

13.3. Personlig kommunikation

Burman, Fredrik, Statens Geotekniska Institut (SGI)

Dalenius, Rolf, Fortifikationsverket (FortV)

Harling, Staffan, Totalförsvarets forskningsinstitut (FOI).

Helander, Jyrki, SAAB Dynamics AB

Karlsson, Svante, Totalförsvarets forskningsinstitut (FOI).

Lundqvist, Perry, Försvarets Materielverk (FMV)

Persson, Anders, Fortifikationsverket (FortV)

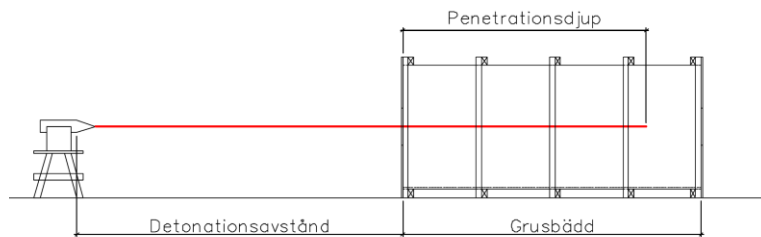
Bilaga 1 – Försök

1. Försöksupställning.....	2
1.1. Försöksserie 1.....	2
1.2. Försöksserie 2.....	3
1.3. Försöksserie 3.....	4
1.4. Ammunition – Robot 53 BANTAM.....	5
1.5. Fingrus och sandsäckar.....	11
1.6. Ritningar målmaterial.....	13
2. Försöksresultat	18
2.1. Försöksserie 1.....	18
2.2. Försöksserie 2.....	20
2.3. Försöksserie 3.....	22
3. Källförteckning.....	24
3.1. Litteratur, artiklar och rapporter.....	24
3.2. Opublicerat material	24

1. Försökuppställning

Skutförsöken genomförs som tre separata försöksserier, med olika försökuppställningar.

1.1.Försöksserie 1



Figur 1-1 Schematisk bild över försökuppställningen för skjutserie 1.

Bilder nedan visar den försökuppställning som användes för försöksserie 1.



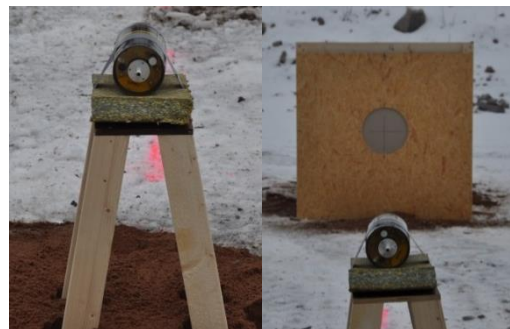
Figur 1-2 Konstruktion mål, regelförstärkt trälåda.



Figur 1-3 Målkonstruktion med sandfyllning packad genom trampning.



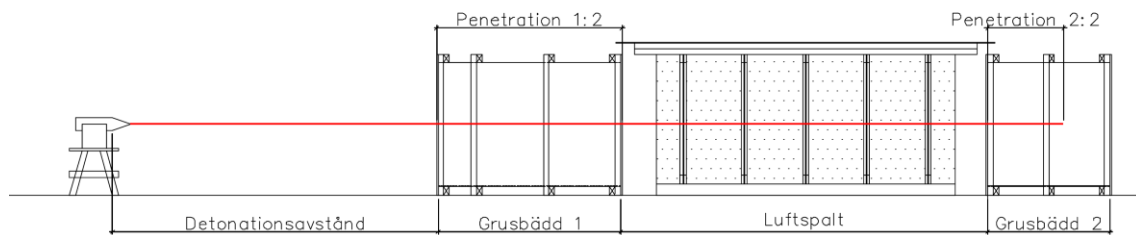
Figur 1-4 Konstruktion mål, kortsida med pappskiva för inträngning av RSV-stråle.



Figur 1-5 Pall för RSV-laddning.

Figur 1-6 RSV-laddning inriktad mot målkonstruktionen vid ett fastställt detonationsavstånd.

1.2.Försöksserie 2



Figur 1-7 Schematisk bild över försöksupställningen för skjutserie 2.

Bilder nedan visar den försöksupställning som användes för försöksserie 2.



Figur 1-8 Målkonstruktion sandbädd del 1, motsvarande maximal penetration i sand minus 0,50 m.



Figur 1-9 Luftspalt med vittnesskivor i papp var 0,50 m. Bakom vittnesskivorna vitmålad bakgrund för att erhålla optimal kontrast vid höghastighetsfilmning.

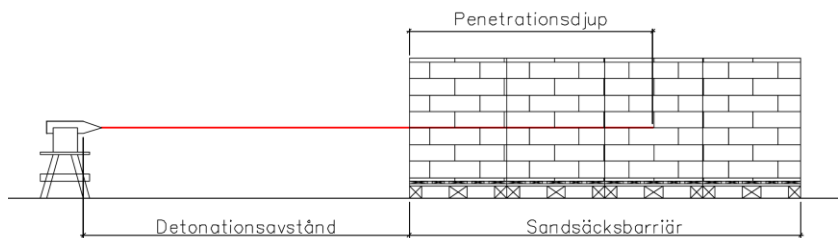


Figur 1-10 Höghastighetskameran skyddades mot splitter med sandsäckar. Halogenbelysning användes för att erhålla bättre ljusförhållanden för filmning.



Figur 1-11 Målkonstruktion sandbädd del 2 för sluggens restverkan, bakom målet ett extra uppfång vid eventuellt genomslag.

1.3.Försöksserie 3



Figur 1-12 Schematisk bild över försökupställningen för skjutserie 3.

Bilder nedan visar den försökupställning som användes för försöksserie 3.



Figur 1-13 Sandsäcksbarriär med längden 3,20 m och tvärsnittet 1,20x1,00 m.



Figur 1-14 Bakom sandsäcksbarriären anbringades ett extra uppfång/mothåll fyllt med sand.



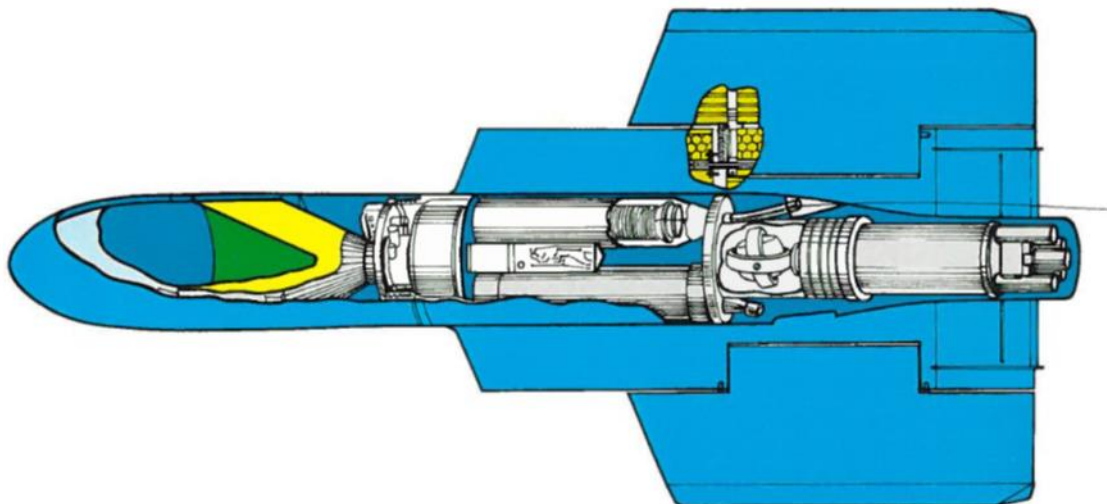
Figur 1-15 Sandsäcksbarriären försedd med wellpappskiva, för att underlätta inriktning.



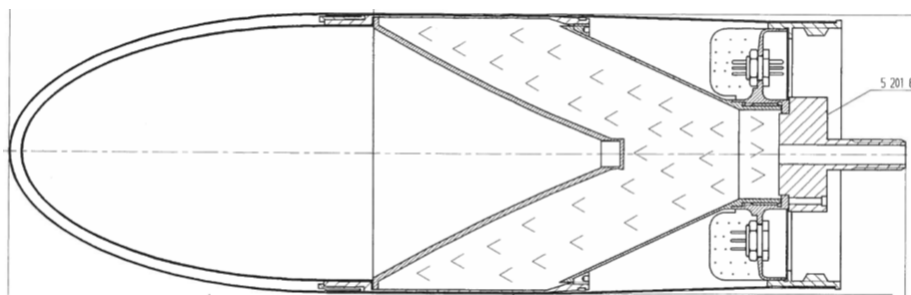
Figur 1-16 RSV-laddning inriktad mot målet.

1.4.Ammunition – Robot 53 BANTAM

Robot 53 BANTAM (Bofors ANti TAnk Missile) är ett lätt pansarvärnsrobotsystem utvecklat av Bofors i slutet av 1950-talet (Arboga 2014). Robotsystemet var operativt i den svenska Försvarsmakten mellan åren 1965 och 1992 (Arboga 2014). När robotsystemet togs ur operativt bibehölls ett större antal verkansdelar (stridshuvuden) för prov- och försöksverksamhet. Verkansdelen utgörs av en strålbildande RSV, med ett trumpetformat inlägg av koppar.



Figur 1-17 Skiss Robot 53 BANTAM (BOFORS (c) u.å.).



Figur 1-18 Ritning Stridshuvud till Robot 53 BANTAM (BOFORS (d) u.å.).

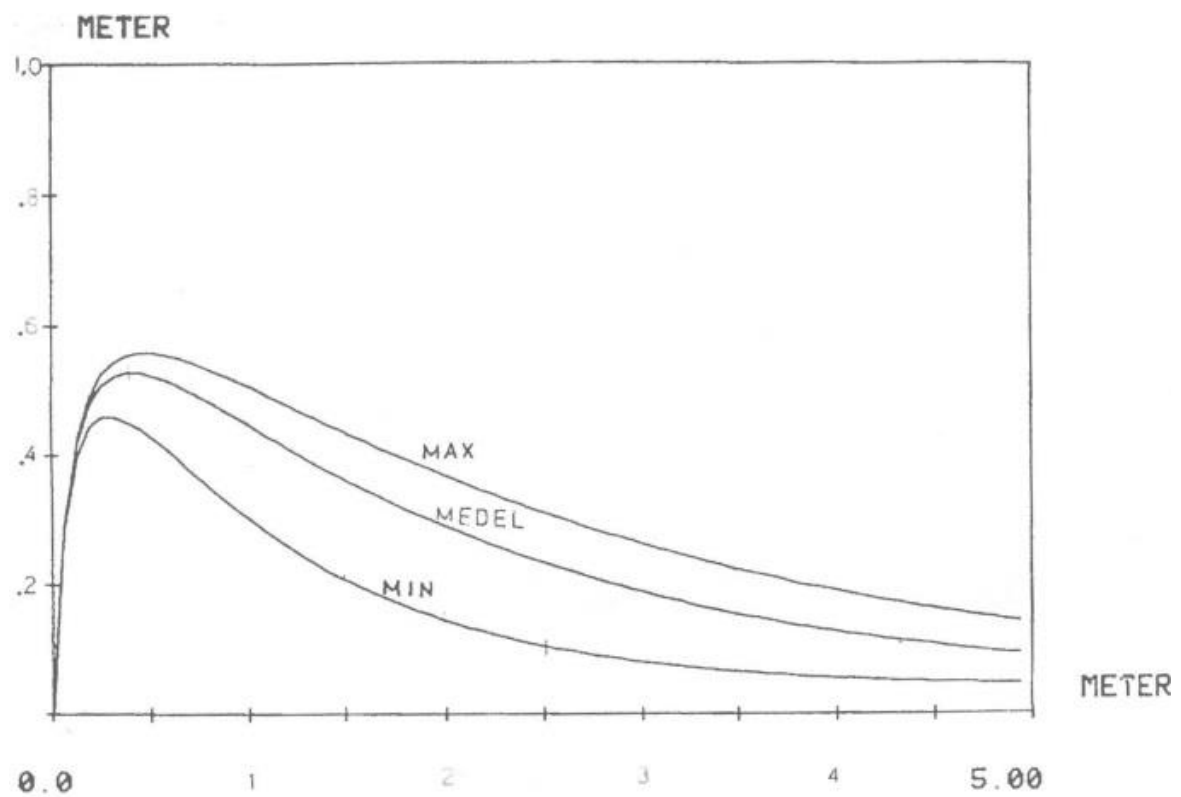


Figur 1-19 Bild Stridshuvud till Robot 53 BANTAM.

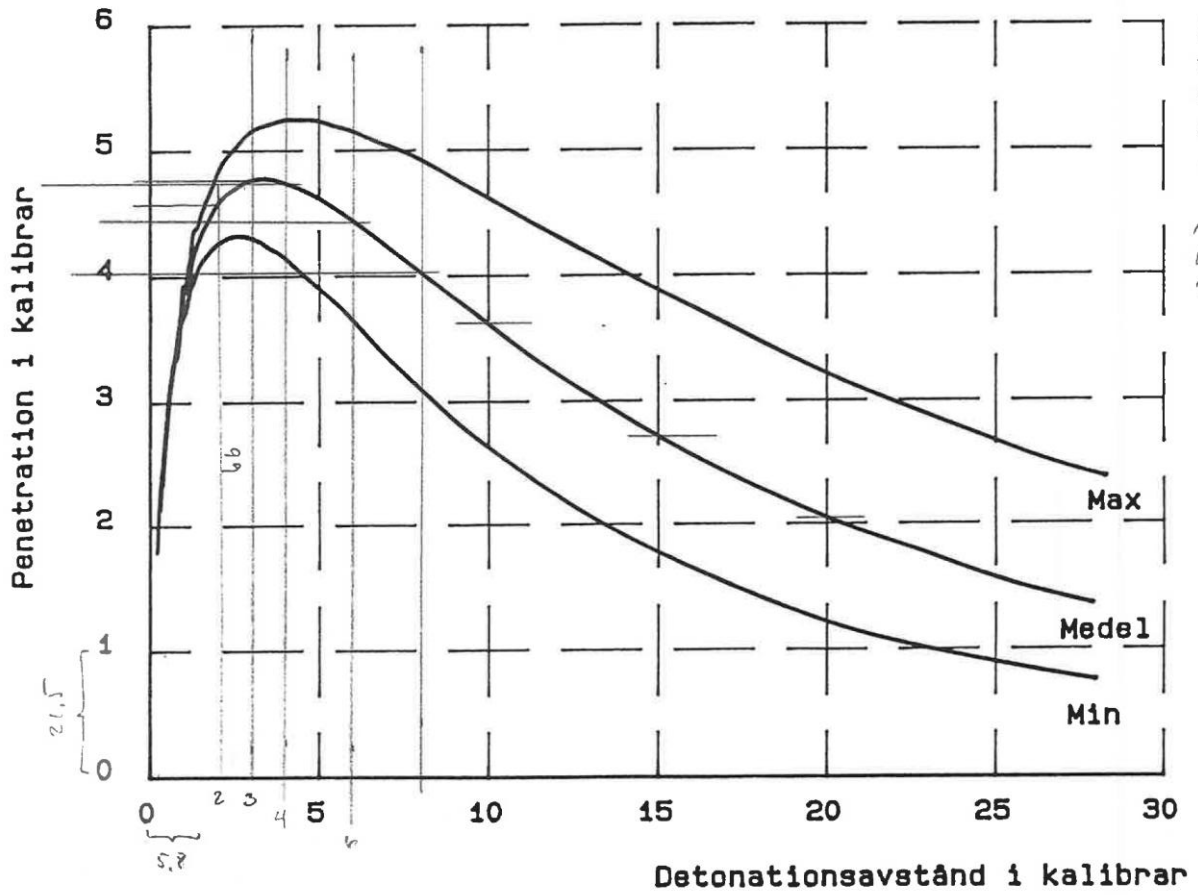
Tekniska data

Inlägg, diameter	107 mm
Inlägg, massa	266 g
Inlägg, material	Koppar
Stråle, densitet	8930 kg/m ³
Stråle, spetsastighet	ca 8000 m/s
Stråle, svansastighet	ca 2000 m/s
Stråle, break up time	157 μs

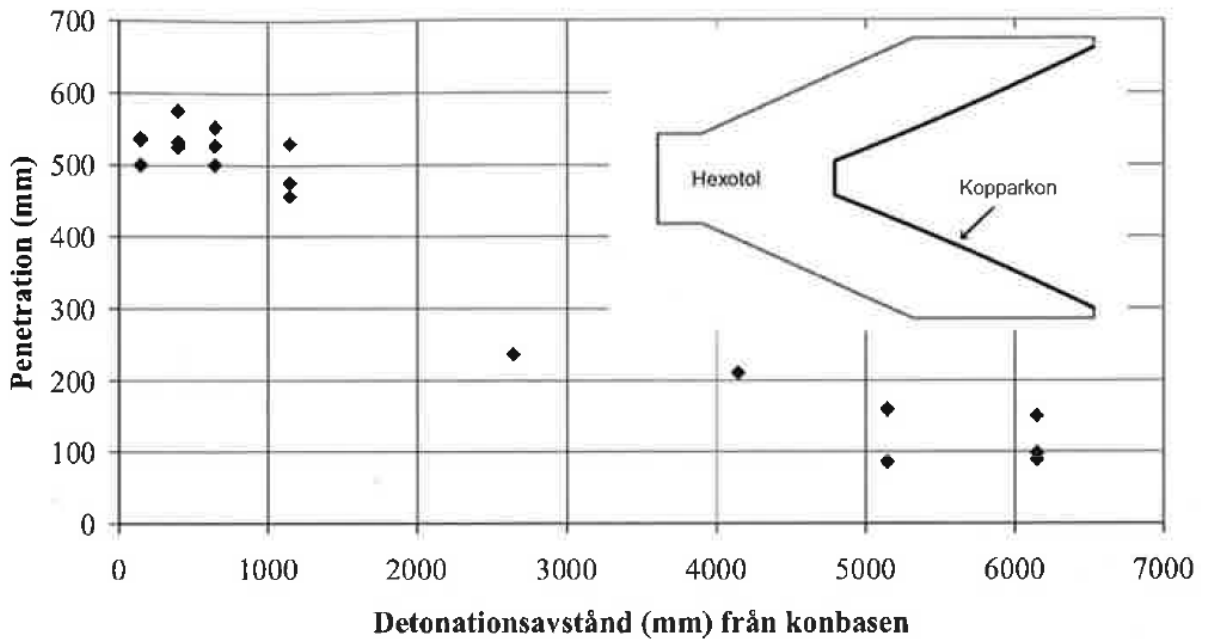
Standoff-kurvor för laddningen föreligger i olika varianter, där kurvans form varierar något mellan de olika kurvorna, troligen relaterat till att de avser olika stålqualität.



Figur 1-20 Standoff-kurva Bantam (BOFORS (a) u.å.).

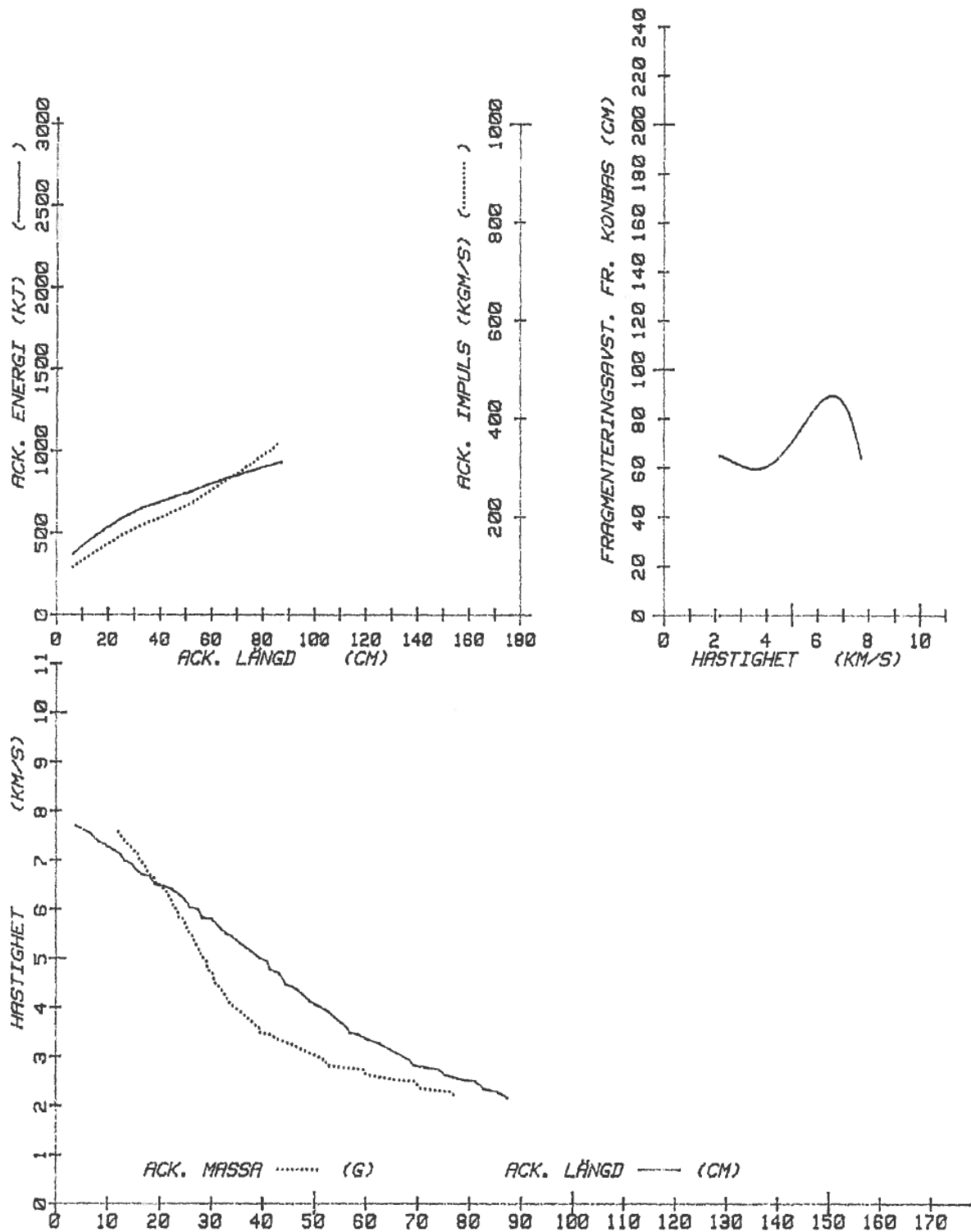


Figur 1-21 Standoff-kurva, pansarstål (FOI u.å.).

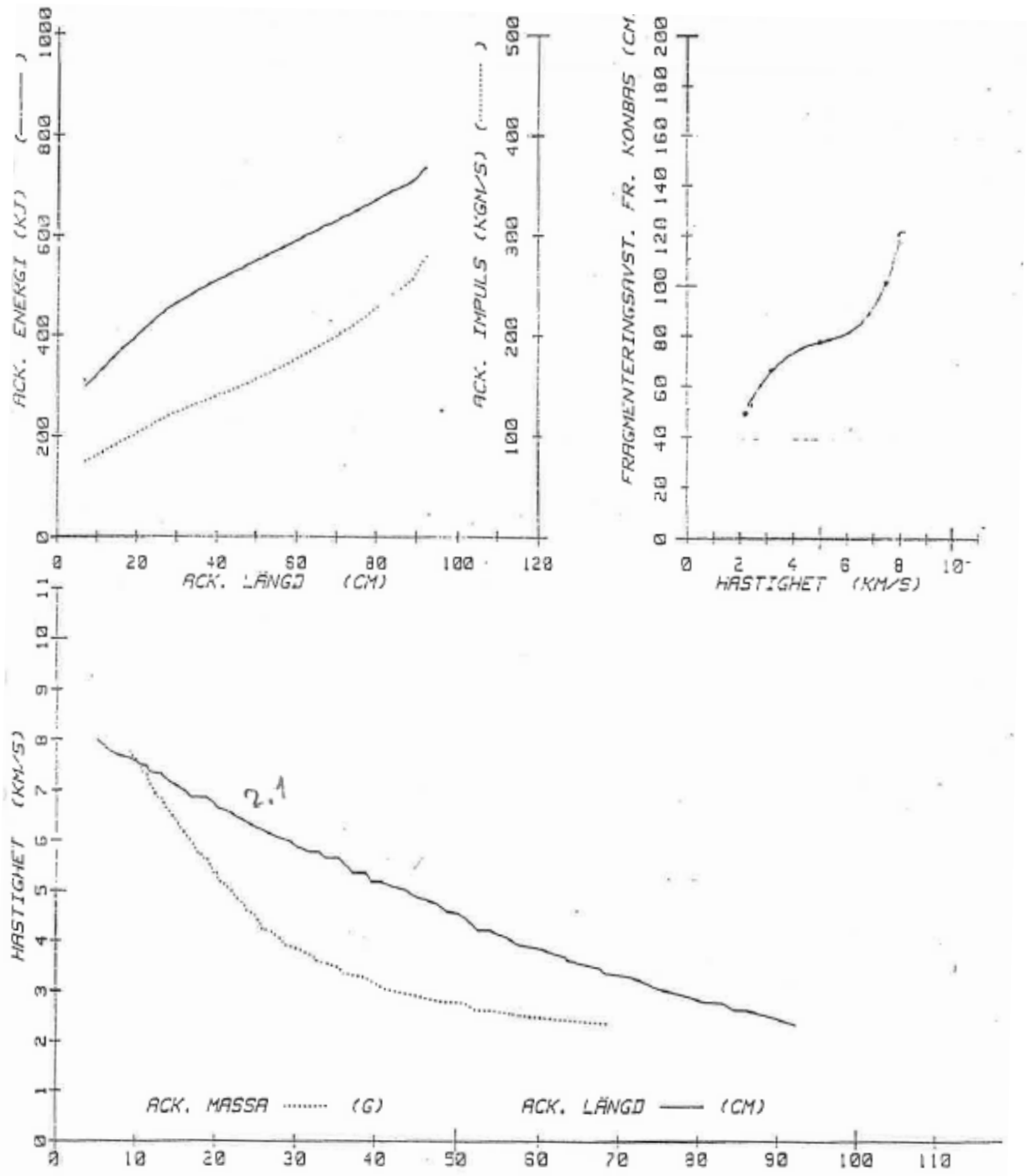


Figur 1-22 Standoff-kurva, konstruktionsstål (Hansson and Westerling 2007, 48).

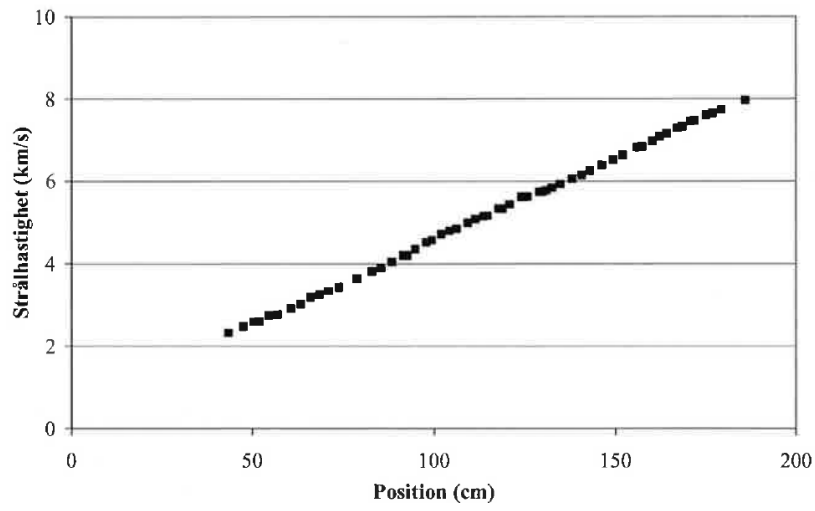
I likhet med standoff-kurvor föreligger stråldata i flera versioner från olika provskjutningar. Nedan redovisas några grafiska sammanställningar, tabeller med data för enskilda strålsegment redovisas av utrymmesskäl inte i denna bilaga. Observera att sluggsegmentet inte omfattas av stråldata nedan.



Figur 1-23 Stråldata BANTAM (BOFORS (b) u.å.).



Figur 1-24 Stråldata BANTAM (BOFORS (b) u.å.).



Figur 1-25 Hastighetsfördelning fragmenterad stråle (Hansson and Westerling 2007, 48).

1.5.Fingrus och sandsäckar

Densitetsberäkningar utförda för fingrus respektive sandsäcksbarriär är medelvärden utifrån ett flertal mätningar. För fingruset är två typer av densiteter uppmätta; opackad respektive packad genom trampning. Provvolymer var i samtliga fall 10 liter. Följande resultat erhöles:

Densitet fingrus, opackad

Antal prov, n (st)	5
Provvolymer, V (m ³)	0,010
Medelvärde, M (kg/m ³)	1 368
Standardavvikelse, σ (kg/m ³)	10,8

Densitet fingrus, packad

Antal prov, n (st)	5
Provvolymer, V (m ³)	0,010
Medelvärde, M (kg/m ³)	1 618
Standardavvikelse, σ (kg/m ³)	4,7

Fyllnadsgrad sandsäck

Antal prov, n (st)	44
Medelvärde (kg)	29,6
Standardavvikelse (kg)	3,1

Densitet sandsäcksbarriär

Antal sandsäck i provet (st)	208
Barriärens volym, V (m ³)	4,12
Total vikt (kg)	6151
Densitet (kg/m ³)	1493

Protokoll från siktanalys av sanden som användes som målmaterial.

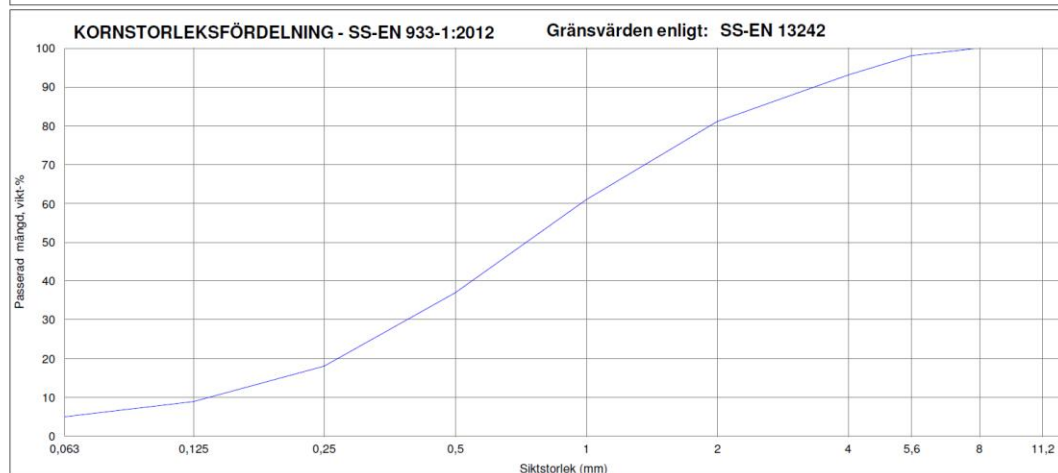
SKANSKA



RAPPORT
utfärdad av ackrediterat laboratorium
REPORT issued by an Accredited Laboratory

1603
ISO/IEC 17025

Tillverkningskontroll Stenmaterial		Provnummer 55S140036	Sidan 1 av 1
Beställare AB Gilbert Gustafssons Entreprenadfirma	Provtagningsdatum 2014-02-05	Analys datum 2014-02-14	
Hultvägen 24 575 36 Eksjö	Ankomstdatum 2014-02-13	ID-nummer	
Kontaktperson Svante Breidner	Provtagare Svante Breidner	Provtagningsplats Brokabo	
Produkt Sand 0/8	Objekt Tillverkningskontroll AB Gilbert Gustafssons		
Leverantör	Entreprenör		
	Märkning		

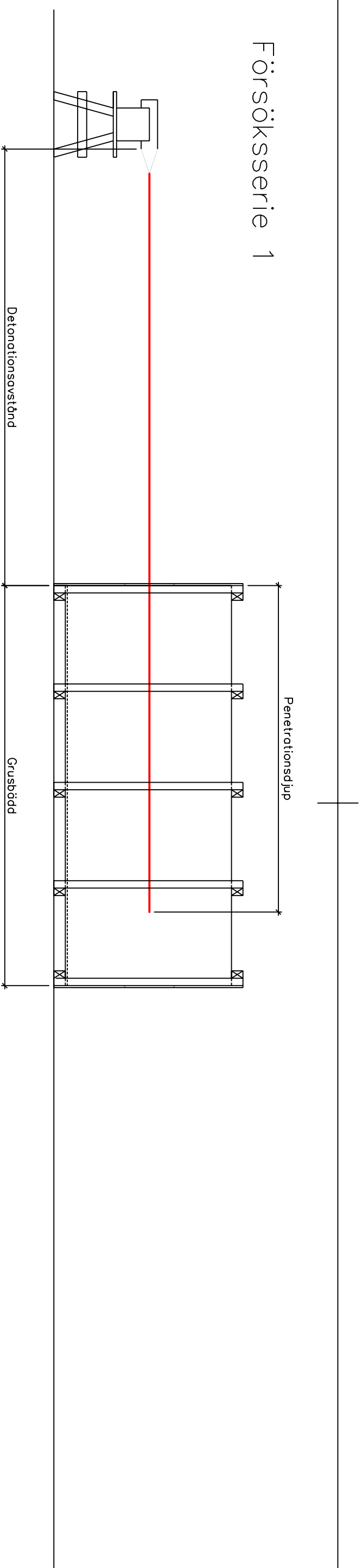


Sikt (mm)	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4	5,6	8	11,2	16	22,4	31,5	45	63				
Analysvärde	5,1	9	18	37	61	81	93	98	100	100									
Deklarerad																			
Min																			
Max																			

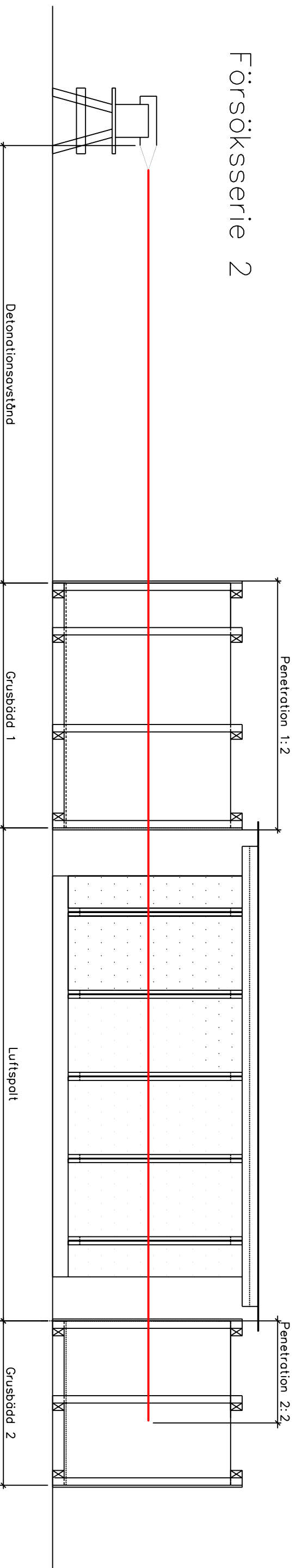
Provresultat	Värde	Fraktion	Notering
Siktningmetod: Tvättning och siktning			Ort och datum Forserum, 2014-02-14
			Jesper Frohm, Lab.föreståndare Digitalt utfärdad signatur

Denna rapport måste återges i sin helhet. Provresultatet avser levererat prov. Mätosäkerhetslista, metodavstegslista och metodlista har överlämnats vid kontraktsgenombgång.				
Skanska Sverige AB Teknik - VTC Box 149 571 03 Forserum	Besöksadress Krökesbo Styrelsens säte Solna	Telefon nr 0104482894 Telefax nr 0104482894	Org.nr 556033-9086 VAT nr SE 663000022901	E-post jesper.frohm@skanska.se Internet adress www.skanska.se

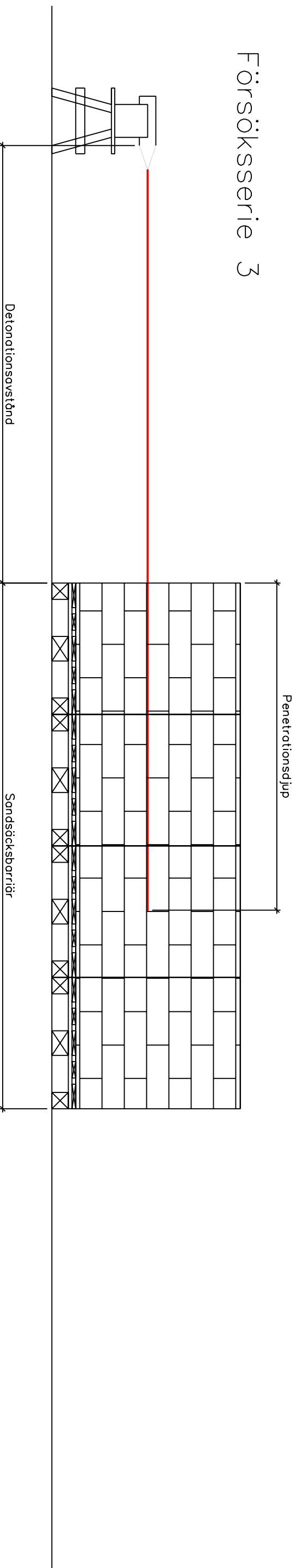
Försöksserie 1



Försöksserie 2



Försöksserie 3

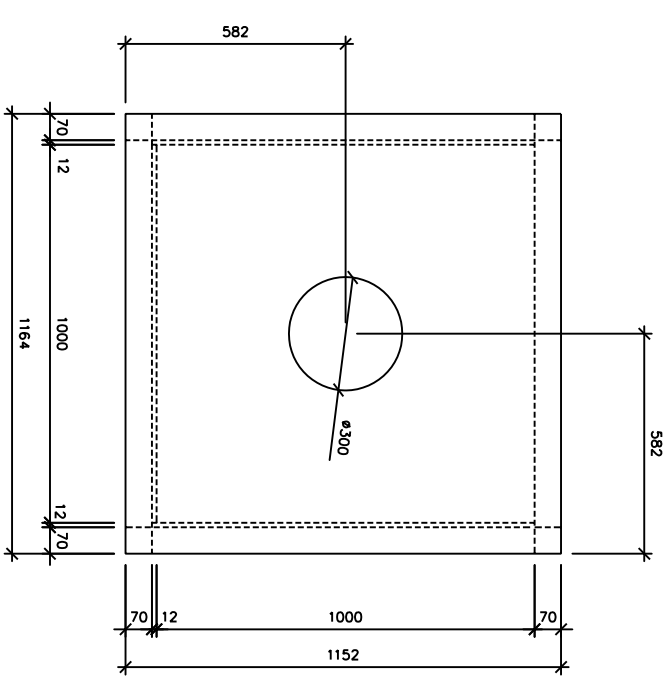
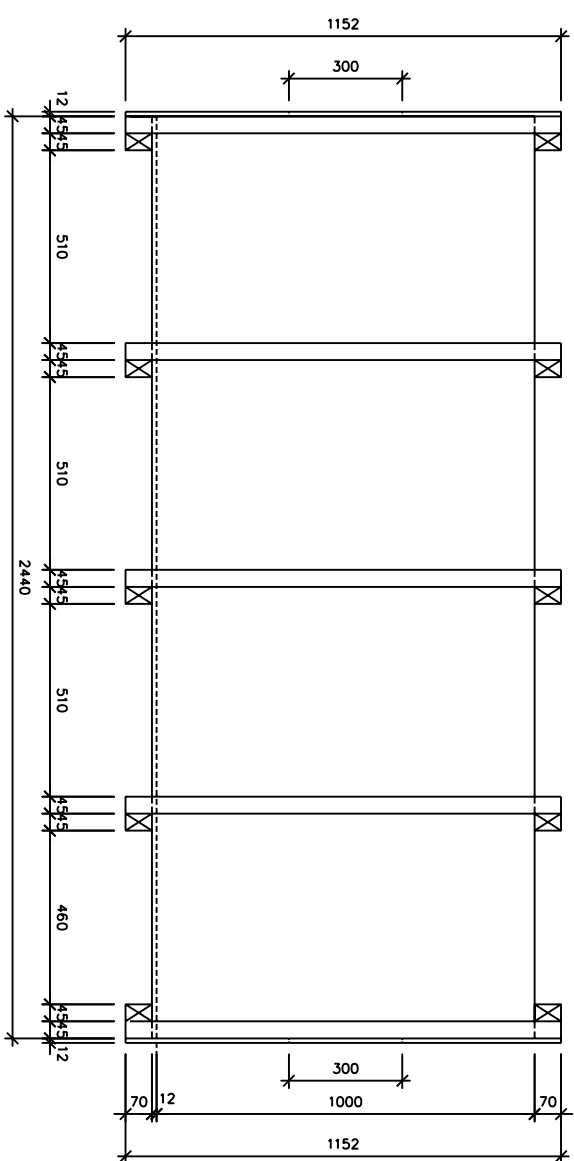
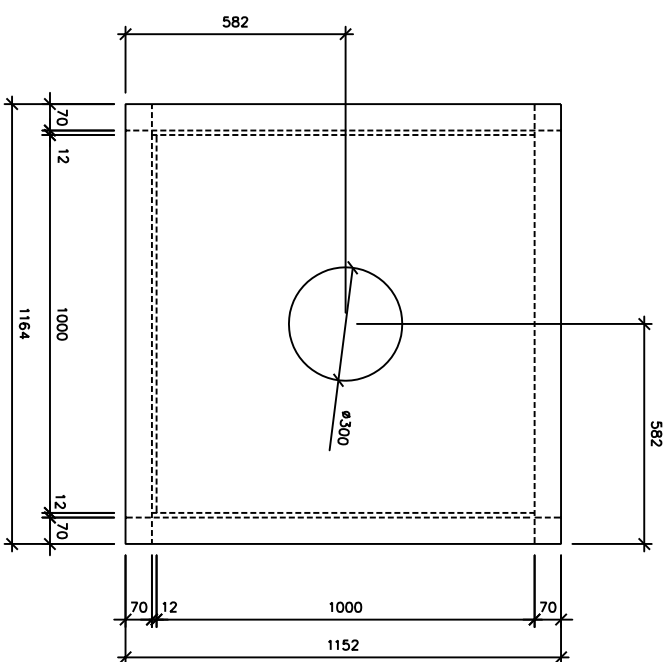


Ritad av F Johansson	Kontrollerad av F Johansson	Datum 2014-02-01	Skala 1:25
-------------------------	--------------------------------	---------------------	---------------

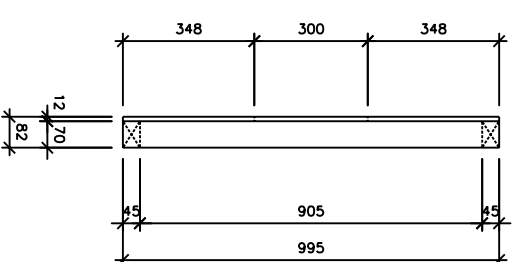
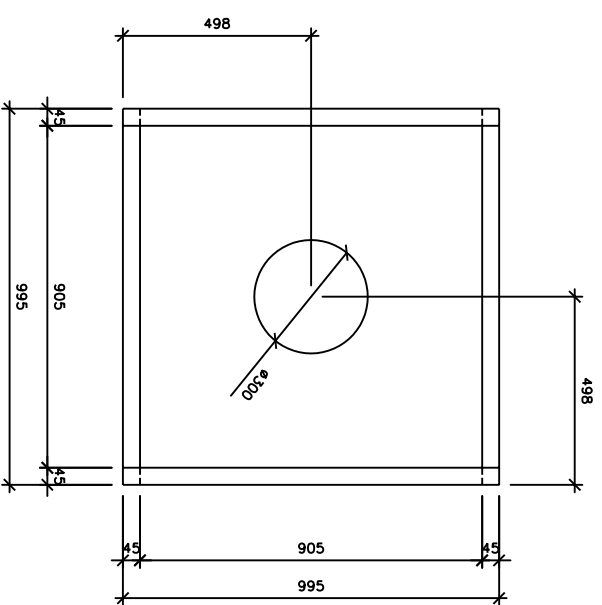
E-UPPSATS
Fredrik Johansson
HSU-T 12-14

Översiktsskiss
Försöksserie 1-3

Grusbädd – Föröksserie 1



Extra gavel till grusbädd 1 – Föröksserie 2

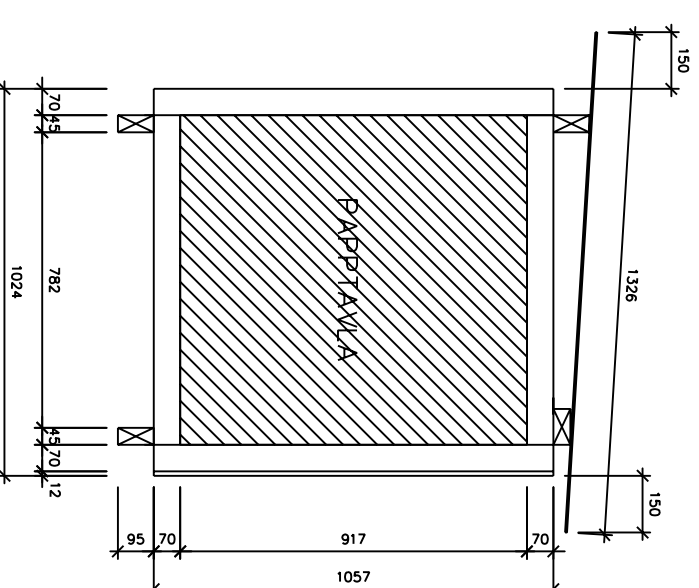
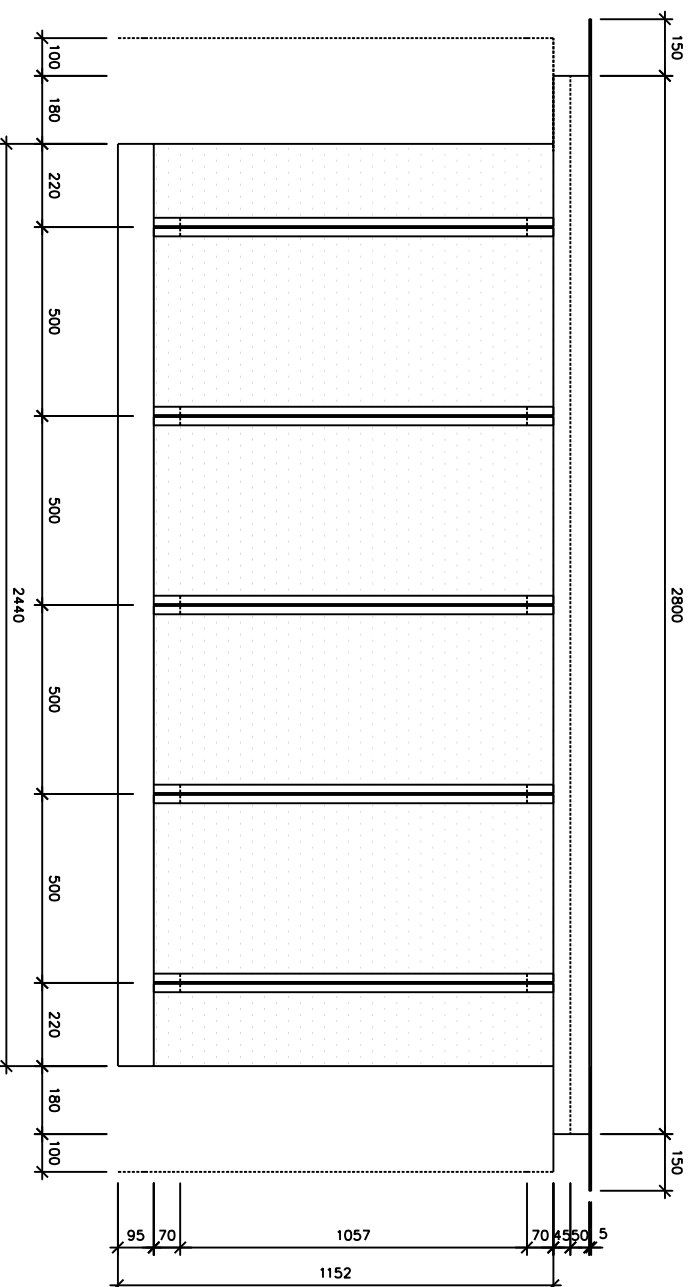


Ritad av F Johnson	Kontrollerad av F Johnson	Datum 2014-02-01	Skala 1:20
-----------------------	------------------------------	---------------------	---------------

E-UPPSATS
Fredrik Johnson
HSU-T 12-14

Grusbädd
Föröksserie 1 & 2

Luftspalt med vittnesskivor och bakgrund för höghastighetsfilming – Försöksserie 2

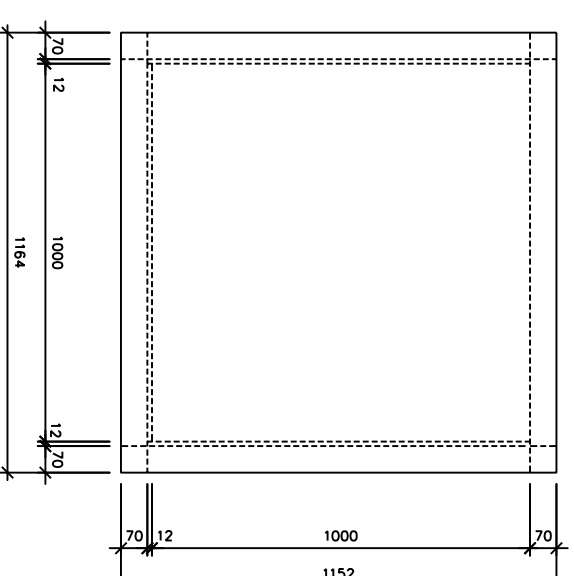
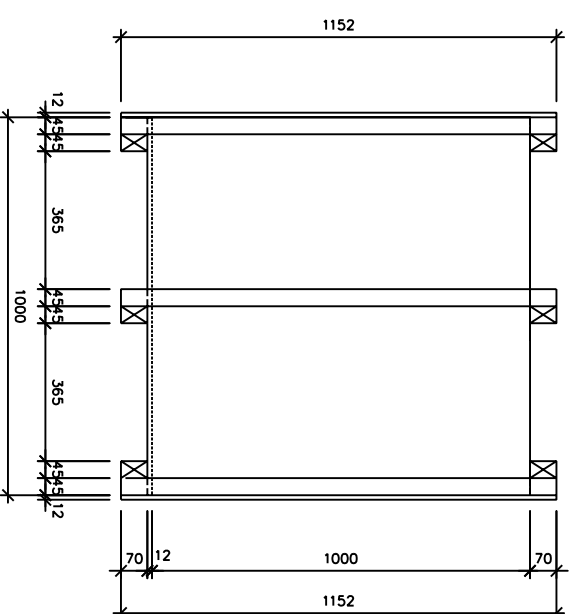
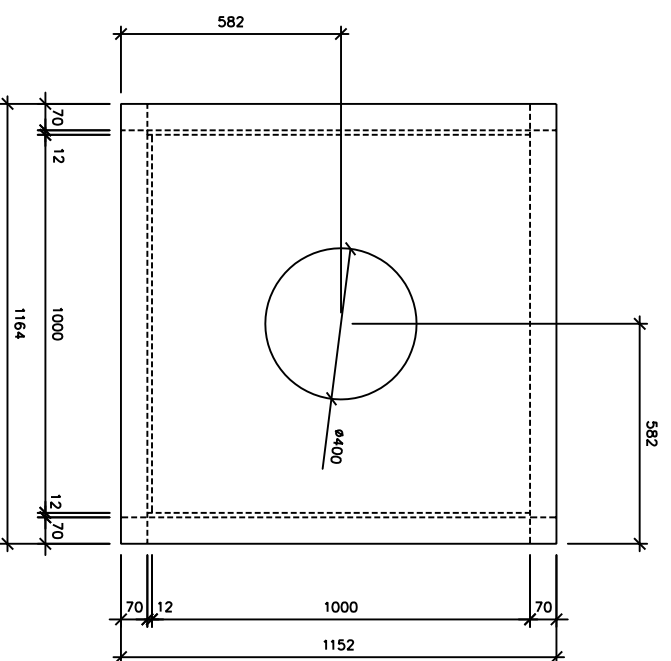


Ritad av F Johansson	Kontrollerad av F Johansson	Datum 2014-02-01	Skala 1:20
-------------------------	--------------------------------	---------------------	---------------

E-UPPSATS
Fredrik Johansson
HSU-T 12-14

Luftspalt m vittnesskivor
Försöksserie 2

Grusbädd 2 för restverkan – Försöksserie 2

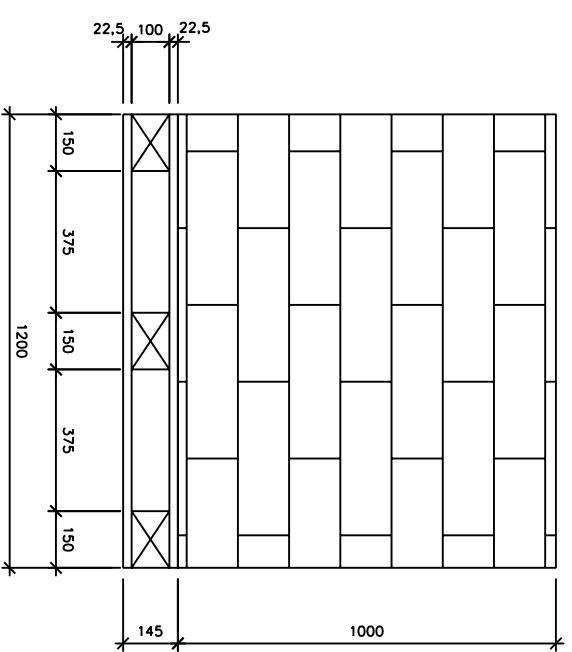
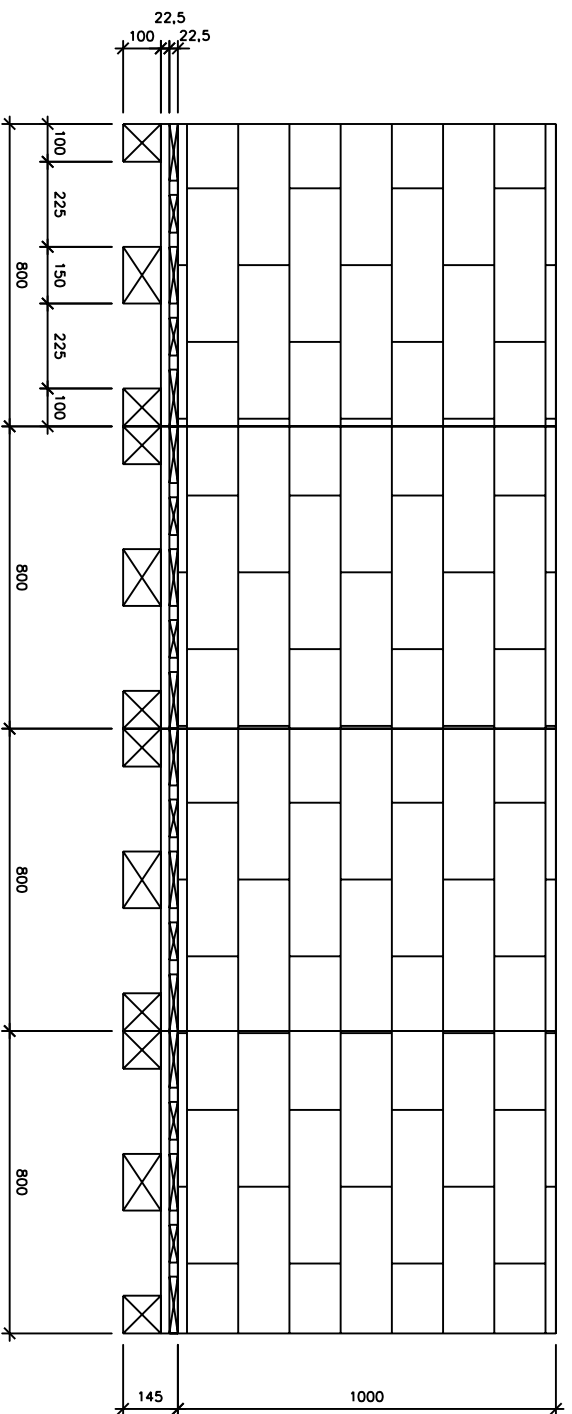


Ritad av F Johnson	Kontrollerad av F Johnson	Datum 2014-02-01	Skala 1:20
-----------------------	------------------------------	---------------------	---------------

E-UPPSATS
Fredrik Johnson
HSU-T 12-14

Grusbädd 2
Försöksserie 2

Sandsäcksbarrriär – Försöksserie 3



Ritad av F Johansson	Kontrollerad av F Johansson	Datum 2014-02-01	Skala 1:20
E-UPPSATS Fredrik Johansson HSU-T 12-14		Sandsäcksbarrriär Försöksserie 3	

2. Försöksresultat

Nedan redovisas en komplett sammanställning över erhållet försöksresultat kompletterat med bilder exemplifierande resultatet. Fullständiga försöksprotokoll, komplett fotodokumentation och höghastighetsfilm för respektive skott finns hos författaren.

2.1.Försöksserie 1

Sammanställning av resultat från försöksserie 1:

Tabell 2-1 Sammanställning försöksresultat försöksserie 1.

FÖRSÖKSSERIE 1	Skott 1:1	Skott 1:2	Skott 1:3	Skott 1:4	Skott 1:5	Skott 1:4b
Allmänt						
Datum [ÅÅMMDD]	140205	140205	140205	140205	140205	140227
Temperatur [° C]	+2° C	+3° C	+3° C	+4° C	+4° C	+4° C
Detonationsavstånd						
Detonationsavstånd [kalibrar]	100	75	50	25	10	25
Detonationsavstånd [mm]	10700	8025	5350	2675	1070	2675
Dimensionerande strålsegment						
Sluggen lokaliserad [Ja/Nej]	JA	JA	JA	JA	JA	JA
Penetrationsdjup [mm]	1095	1810	2140	1730	2245	2070
Vikt [g]	138	128	128	128	126	116
Längd [mm]	68	59	68	55	73	75,5
Diameter [mm]	27/20	29/26	38/27	19/28	29/25	27,8/25
Avvikelse, sida [mm + riktning]	20 Vä	15 Vä	105 Hö	140 Vä	70 Vä	40 Vä
Avvikelse, höjd [mm + riktning]	30 Upp	60 Upp	75 Upp	40 Ner	70 Upp	50 Ner
Ytterliga strålsegment						
Förekomst [Ja/Nej]	NEJ	JA	JA	JA	NEJ	NEJ
Penetrationsdjup [mm]		1640	2095	1580		
Vikt [g]		24	22	24		
Längd [mm]		48	41	56		
Diameter [mm]		9	9	9		
Avvikelse, sida [mm + riktning]		30 Vä	60 Vä	60 Vä		
Avvikelse, höjd [mm + riktning]		10 Upp	180 Upp	0		
Övriga iakttagelser						
Sammansjunken sandbädd över hålskanal [mm]	1050	1700	2010	1650	2200	2000

Bilder utvisande exempel på resultat från försöksserie 1:



Figur 2-1 Målkonstruktionens utseende efter skott (Skott 1:3).



Figur 2-2 Sättningar i sandbädden efter strålens penetration (Skott 1:3).



Figur 2-3 Strålsegment lokaliserade med metalldetektor innan friläggning skedde (Skott 1:4).



Figur 2-4 Penetrationskanalen syns tydligt i sandbädden som ljusare/torrare sand (Skott 1:4).



Figur 2-5 Frilagt sluggsegment i sandbädd (Skott 1:5).



Figur 2-6 Sluggsegment (Skott 1:5).

2.2.Försöksserie 2

Sammanställning av resultat från försöksserie 2:

Tabell 2-2 Sammanställning försöksresultat försöksserie 2.

FÖRSÖKSSERIE 2	Skott 2:1	Skott 2:2	Skott 2:3	Skott 2:4	Skott 2:5	Skott 2:5b
Allmänt						
Datum [ÅÅMMDD]	140206	140206	140206	140206	140206	140227
Temperatur [° C]	+2° C	+2° C	+2° C	+2° C	+2° C	+4° C
Detonationsavstånd						
Detonationsavstånd [kalibrar]	100	75	50	25	10	10
Detonationsavstånd [mm]	10700	8025	5350	2675	1070	1070
Sandbädd 1						
Tjocklek sandbädd [mm]	850	1050	1300	1500	1650	1650
Dimensionerande strålsegment						
Sluggen lokaliserad [Ja/Nej]	JA	JA	JA	JA	NEJ	JA
Penetrationsdjup [mm]	1160	1620	1930	2040	2033*	1900
Vikt [g]	124	134	144	120		122
Längd [mm]	81	91	71	49		72
Diameter [mm]	29/23	29/18	34/17	29/27		27,7/24
Avvikelse, sida [mm + riktning]	140 Vä	175 Vä	110 Vä	60Vä		70 Vä
Avvikelse, höjd [mm + riktning]	15 Ner	45 Upp	135 Upp	275 Upp		30 Ner
Ytterliga strålsegment						
Förekomst [Ja/Nej]	NEJ	JA	NEJ	JA	JA	NEJ
Penetrationsdjup [mm]		1550		1610	1860	
Vikt [g]		12		12	26	
Längd [mm]		34		33	52	
Diameter [mm]		9		9	10	
Avvikelse, sida [mm + riktning]		175 Vä		35 Vä	140 Hö	
Avvikelse, höjd [mm + riktning]		145 Upp		135 Upp	305 Upp	
Sluggens uppträdande i luftspalt						
Stabilitet [Stabil/Tumlande]	Tumlande	Tumlande	Stabil	Tumlande	Tumlande	Okänd
Position [text]	Snedställd	Snedställd	Snedställd	Snedställd	Okänd	Okänd

Övriga iakttagelser

*) Skott 2:5. Penetrationsdjup beräknat baserat på genomsnittlig skillnad mellan sluggens och det näst sista segmentets position vid tidigare försök. Sluggen avvek kraftigt i höjded och passerade omedelbart över sandbädd 2.

Bilder utvisande exempel på resultat från försöksserie 2:



Figur 2-7 Sandbädd 1 efter skott (Skott 2:4).



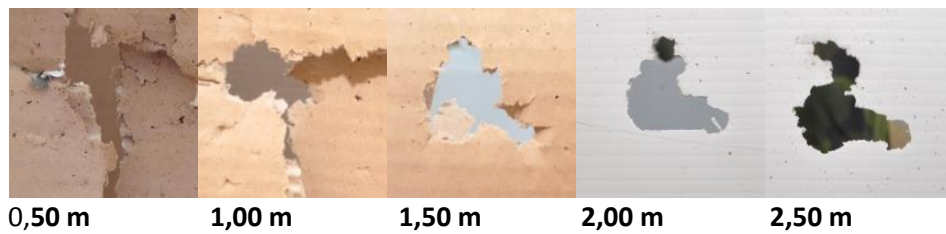
Figur 2-8 Sandbädd 1 efter skott (Skott 2:1).



Figur 2-9 Sandbädd 2 efter skott (Skott 2:3).



Figur 2-10 Vittnesskivor efter skott (Skott 2:3).



0,50 m

1,00 m

1,50 m

2,00 m

2,50 m

Figur 2-11 Vittnesskivor efter skott, avtryck efter sluggsegment (Skott 2:3).



Figur 2-12 Lokaliserat sluggsegment i sandbädd 2 (Skott 2:3).



Figur 2-13 Sluggsegment (Skott 2:3).

2.3.Försöksserie 3

Sammanställning av resultat från försöksserie 3:

Tabell 2-3 Sammanställning försöksresultat försöksserie 3.

FÖRSÖKSSERIE 3	Skott 3:1	Skott 3:2	Skott 3:3	Skott 3:4	Skott 3:5
Allmänt					
Datum [ÅÅMMDD]	140227	140227	140227	140227	140227
Temperatur [° C]	+3° C	+4° C	+5° C	+5° C	+4° C
Detonationsavstånd					
Detonationsavstånd [kalibrar]	100	75	50	25	10
Detonationsavstånd [mm]	10700	8025	5350	2675	1070
Dimensionerande strålsegment					
Sluggen lokaliserad [Ja/Nej]	JA	JA	JA	JA	JA
Penetrationsdjup [mm]	700	1150	1800	2010	2065
Vikt [g]	127	128	134	122	122
Längd [mm]	92	79	74	56,5	76
Diameter [mm]	28,5/16	26/21,4	31/21,6	41/36	33/16
Avvikelse, sida [mm + riktning]	100 Vä	50 Hö	70 Vä	50 Hö	80 Vä
Avvikelse, höjd [mm + riktning]	150 Upp	160 Upp	20 Ner	50 Upp	90 Upp
Ytterliga strålsegment					
Förekomst [Ja/Nej]	JA	JA	JA	JA	JA
Penetrationsdjup [mm]	1000	1050	1750	2050	2060
Vikt [g]	14	14	22	33	8
Längd [mm]	29	35	49	37	29
Diameter [mm]	10,3	11	10,7	17,0/10	9
Avvikelse, sida [mm + riktning]	30 Hö	60 Hö	90 Vä	50 Vä	160 Vä
Avvikelse, höjd [mm + riktning]	120 Upp	10 Upp	10 Ner	90 Upp	65 Upp
Övriga iakttagelser					
Skott 3:1 och 3:4 sluggen är inte det dimensionerande strålsegmentet.					

Bilder utvisande exempel på resultat från försöksserie 3:



Figur 2-14 Sandsäcksbarriären efter träff (Skott 3:3).



Figur 2-15 Sandsäcksbarriären efter träff (Skott 3:2).



Figur 2-16 Sandsäcksbarriären delades maskinellt för att lokalisera penetrerade moduler (Skott 3:3).



Figur 2-17 Sluggsegmentets lokaliseras med metalldetektor innan friläggning genomfördes (Skott 3:2).



Figur 2-18 Friläggning av sluggsegmentet (Skott 3:2).



Figur 2-19 Dokumentering av sluggsegmentet (Skott 3:2).

3. Källförteckning

3.1. Litteratur, artiklar och rapporter

Arboga Robotmuseet. (2014). Robot 53 Bantam.

http://www.robotmuseum.se/Mappar/Robothistorik/11_Pansar/ARM_rb_53.htm [2014-03-02]

Hansson, H. & Westerling, L. (2007). *RSV-penetration i skyddstäckningar*. Stockholm: Totalförsvarets Forskningsinstitut (FOI), FOI-R—2344--SE

3.2. Opublicerat material

Erhållet via SAAB Dynamics AB, Jyrki Helander, 2014-03-12:

BOFORS(a). (u.å.). Standoff-kurva RB 53 BANTAM. Karlskoga: Bofors AB. [Opublicerat manuskript].

BOFORS(b). (u.å.). Stråldata RB 53 BANTAM. Karlskoga: Bofors AB. [Opublicerat manuskript].

BOFORS(c). (u.å.). Technical Data BANTAM. Karlskoga: Bofors AB. [Opublicerat manuskript].

BOFORS(d). (u.å.). Konstruktionsritning RB 53 BANTAM. Karlskoga: Bofors AB. [Opublicerat manuskript].

Erhållet via Totalförsvarets Forskningsinstitut (FOI), Svante Karlsson, 2013-12-17:

Totalförsvarets Forskningsinstitut (FOI). (u.å.). RB53 BANTAM Standoff-kurva i pansar. Stockholm: Totalförsvarets Forskningsinstitut (FOI). [Opublicerat manuskript].

Bilaga 2 – Monte Carlo-simulering

1. MATLAB-script	2
2. Resultat Monte Carlo Simulering	5
2.1. Sandsäck, k_1 enl. ny indelningsgrund	5
2.2. Grusbädd, k_1 enl. ny indelningsgrund	5
2.3. Sandsäck, k_1 enl. FOI indelningsgrund	6
2.4. Grusbädd, k_1 enl. FOI indelningsgrund	6
2.5. Ökning av penetrationsdjup	7

1. MATLAB-script

```
% MATLAB Script
% Monte Carlo-simulering
% Beräkningsmodell för RSV-penetration i sand/sandsäck
% Fredrik Johnsson, HSU-T 12-14
% Masteruppsats i Militärteknik
clear all
%clf
P=[];

targettype=input('Välj målmaterial 1=Sand 2=Sandsäck ');
klmodel=input('Välj modell för k1 1=Gammal 2=Ny ');

% Värden på parametrar
n=20000; %Antal simuleringar för respektive
detonationsavstånd
m=1; %Intervall mellan respektive detonationsavstånd
[kalibrar]
k1_real=12; %Koefficient för strållängd, faktiskt värde
k2_real=1; %Koefficient för målmaterial, faktiskt värde
dim=0; %Dimensioneringsfaktor
rhoj=8930; %Densitet jetstråle
rhot=1500; %Densitet målmaterial, faktiskt värde
d_value=0.150; %RSV-stridsdelens kaliber, faktiskt värde
d_sigma=0.05*d_value; %RSV-stridsdelens kaliber, standardavvikelse

% Iteration för respektive detonationsavstånd
for i=10:m:100

    %SIMULERING - RSV-stridsdelens kaliber
    d_sim=d_value+d_sigma.*randn(n,1); %RSV-stridsdelens kaliber,
simulering

    %SIMULERING - Detonationsavstånd
    S_value=i*d_value; %Detonationsavstånd, faktiskt
värde
    S_sigma=0.5*d_value; %Detonationsavstånd,
standardavvikelse
    S_sim=S_value+S_sigma.*randn(n,1); %Detonationsavstånd, simulering
    %S_sigma=0.05*S_value; %Används ej!

    %SIMULERING - Densitet målmaterial
    rhot_sim=1200+rand(n,1)*700; %Densitet målmaterial,
simulering

    %SIMULERING - Koefficient för strållängd
    if klmodel==1;
        %GAMMAL MODELL
        k1_sim=8+rand(n,1)*8; %Alternativ 1
    else
        if klmodel==2;
            %NY MODELL
            k1_sim=10+rand(n,1)*4; %Alternativ 2
        end
    end
    %k1_sim=k1_real; %Används ej!

    %SIMULERING - Koefficient för målmaterial
```

```

k2_sim=k2_real; %Simuleras ej!
%k2_sim=0.9+rand(n,1)*0.2; %Används ej!

%SIMULERING - Densitet målmaterial
rhoj_sim=rhoj; %Simuleras ej!
%rhoj_sim=8470+rand(n,1)*900; %Används ej!

if targettype==1;
    %SAND
    kavst_sim=1.1+2*10.^(-3).*S_sim./d_sim-7*10.^(-
5)*S_sim.^2./(d_sim.^2);
    kavst_real=1.1+2*10.^(-3).*S_value./d_value-7*10.^(-
5)*S_value.^2./(d_value.^2);
    else
        if targettype==2;
            %SANDSÄCK
            kavst_sim=0.9+3*10.^(-3).*S_sim./d_sim-8*10.^(-
5)*S_sim.^2./(d_sim.^2);
            kavst_real=0.9+3*10.^(-3).*S_value./d_value-8*10.^(-
5)*S_value.^2./(d_value.^2);
        end
    end

    %Beräkning penetrationsdjup

P_sim=d_sim.*k1_sim.*k2_sim.*(rhoj_sim./rhot_sim).^(1/2).*(kavst_sim+dim)/d
_value;

P_real=d_value.*k1_real.*k2_real.*(rhoj./rhot).^(1/2).*(kavst_real+dim)/d_v
alue;

    %Sparande av resultat
    Pen_std(i)=std(P_sim); %Standardavvikelse
    Pen_mean(i)=mean(P_sim); %Medelvärde
    Pen_real(i)=P_real; %Penetrationsdjup, enligt modell
    Pen_max(i)=max(P_sim); %Penetrationsdjup, simulerat, max
    Pen_min(i)=min(P_sim); %Penetrationsdjup, simulerat, min
    P=[P,P_sim]; %Penetrationsdjup, simulerat, samtliga
värden

end

%PLOTTA UTDATA
hold on
%plot(Pen_real,'-.k','LineWidth',2) %Penetrationsdjup, enligt
modell
%plot(Pen_max,':r') %Penetrationsdjup, simulerat, max
%plot(Pen_min,':r') %Penetrationsdjup, simulerat, min
%plot(Pen_mean+1.64*Pen_std,'-g') %Ensidigt konfidensintervall,p<5%
%plot(Pen_mean+2.33*Pen_std,'-b') %Ensidigt konfidensintervall,p<1%
%plot(Pen_mean) %Ensidigt konfidensintervall,p<0,1%
%plot(Pen_mean+3.09*Pen_std) %Ensidigt konfidensintervall,p<0,1%
%plot((Pen_mean+2.33*Pen_std).*Pen_real.^-1,'k') %faktor på beräknat
penetrationsdjup
plot((Pen_mean+1.64*Pen_std-Pen_real).*max(Pen_real).^-1+1,'y') %faktor
på beräknat penetrationsdjup
xlim ([10 100])
if targettype==1;
    if klmodel==1;

```

```
        %SAND+K1 GAMMAL
        title('Simulering Sand + K1 enligt gammal modell');
    else
        %SAND+K1 NY
        title('Simulering Sand + K1 enligt ny modell');
    end
else
    if targettype==2;
        if klmodel==1;
            %SANDSÄCK+K1 GAMMAL
            title('Simulering Sandsäck + K1 enligt gammal modell');
        else
            %SANDSÄCK+K1 NY
            title('Simulering Sandsäck + K1 enligt ny modell');
        end
    end
end

xlabel('Detonationsavstånd (kalibrar)');
ylabel('Penetrationsdjup (kalibrar)')

%hold off

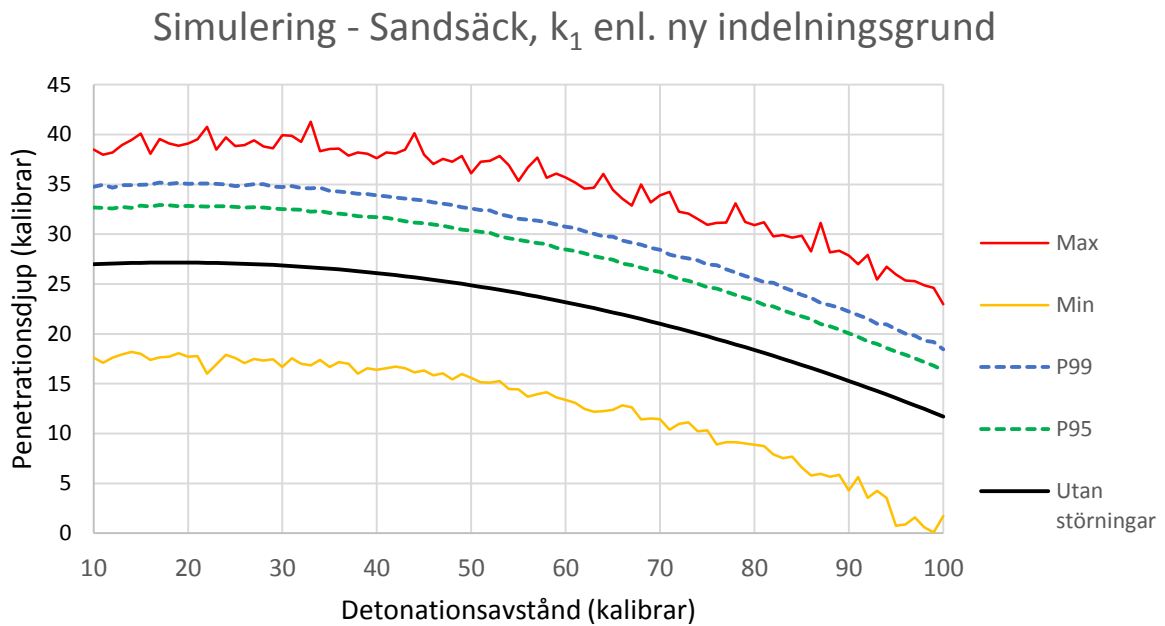
%PLOTTA HISTOGRAM
%subplot(5,2,1),hist(P(:,1),100);
%subplot(5,2,2),hist(P(:,11),100);
%subplot(5,2,3),hist(P(:,21),100);
%subplot(5,2,4),hist(P(:,31),100);
%subplot(5,2,5),hist(P(:,41),100);
%subplot(5,2,6),hist(P(:,51),100);
%subplot(5,2,7),hist(P(:,61),100);
%subplot(5,2,8),hist(P(:,71),100);
%subplot(5,2,9),hist(P(:,81),100);
%subplot(5,2,10),hist(P(:,91),100);

%hist(P(:,31),100)

%SPARA DATA TILL EXCEL
%xlswrite ('testdata',P)
```

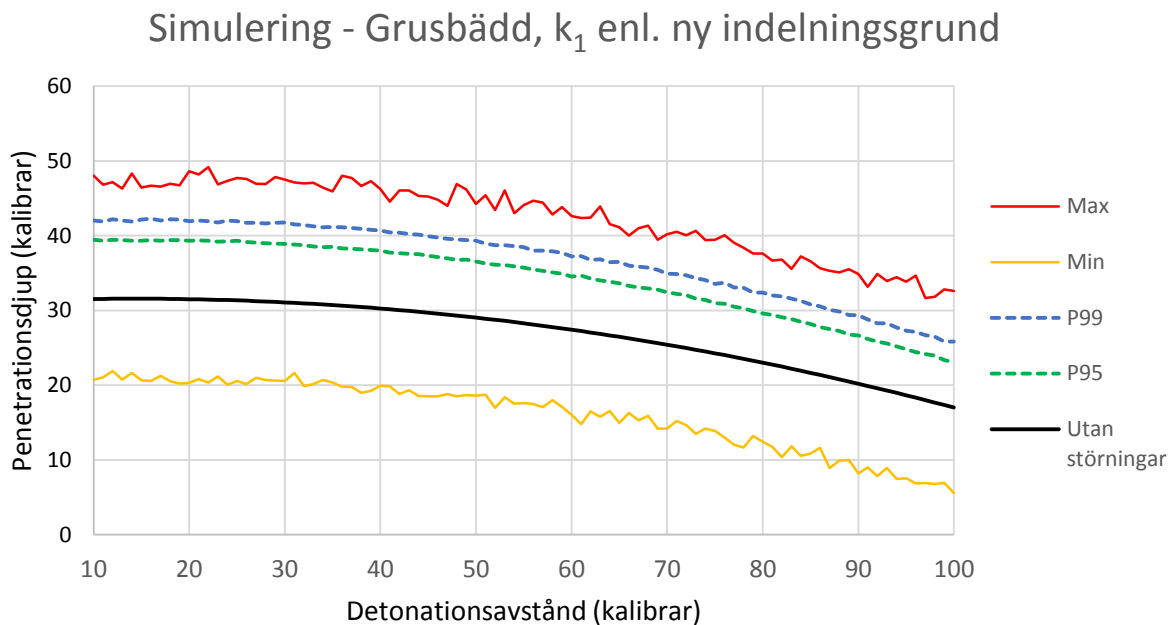
2. Resultat Monte Carlo Simulering

2.1. Sandsäck, k_1 enl. ny indelningsgrund



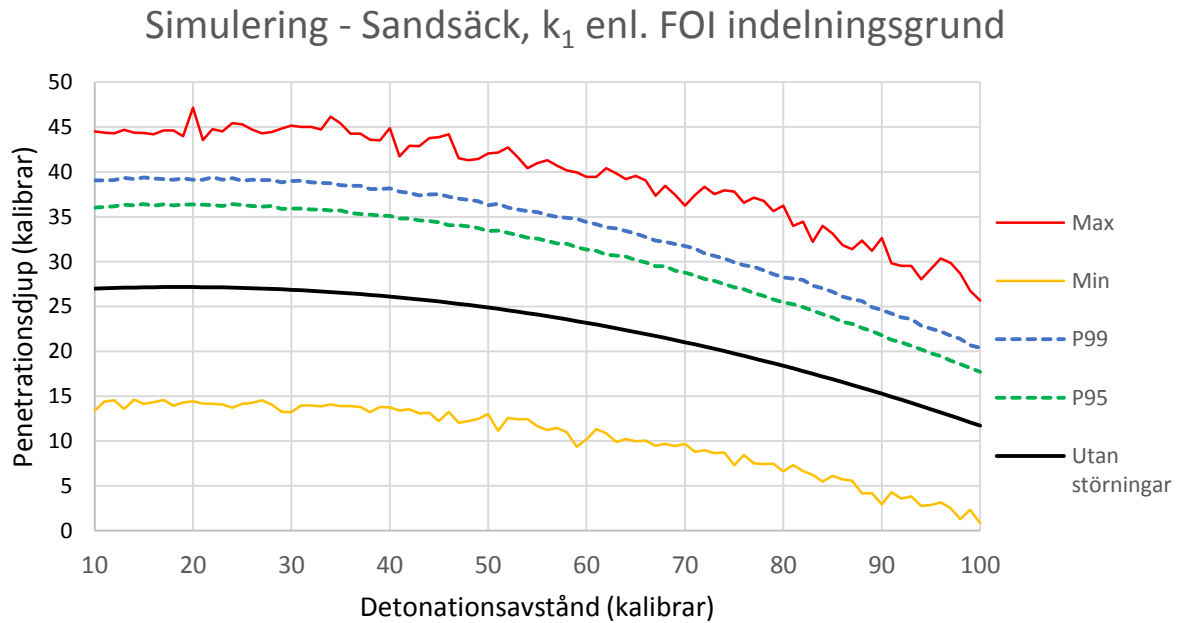
Figur 2-1 Simuleringsresultat för målmaterialet sandsäck i kombination med föreslagen ny indelningsgrund för koefficienten för strållängd.

2.2. Grusbädd, k_1 enl. ny indelningsgrund



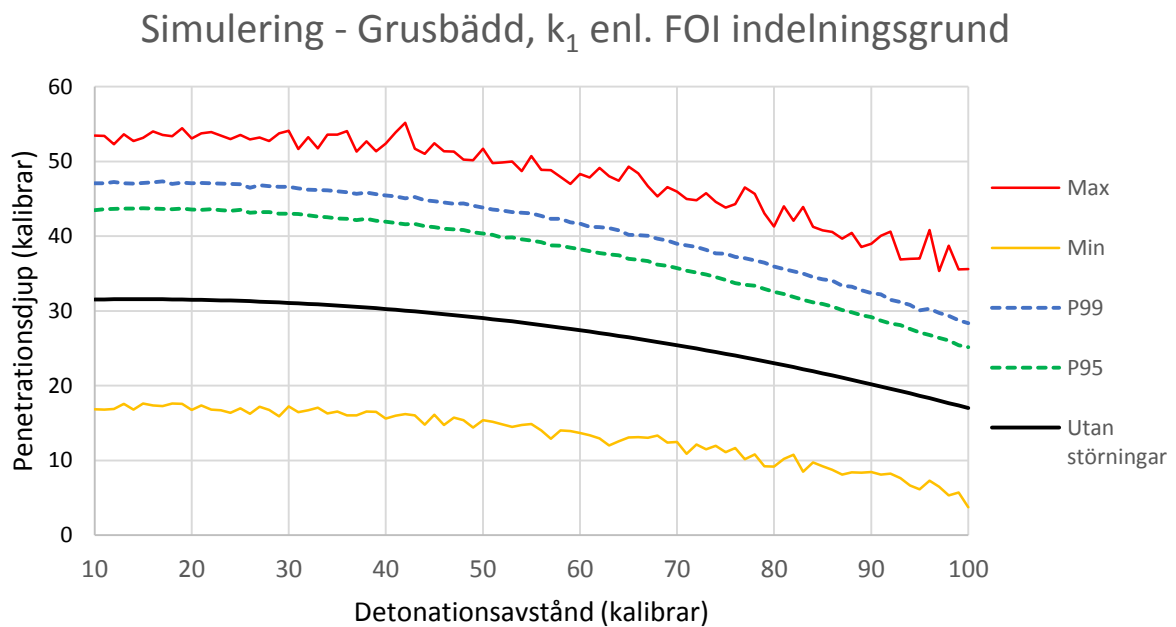
Figur 2-2 Simuleringsresultat för målmaterialet fingrus i kombination med föreslagen ny indelningsgrund för koefficienten för strållängd.

2.3.Sandsäck, k_1 enl. FOI indelningsgrund



Figur 2-3 Simuleringsresultat för målmaterialet sandsäck i kombination med FOI indelningsgrund för koefficienten för strållängd.

2.4.Grusbädd, k_1 enl. FOI indelningsgrund



Figur 2-4 Simuleringsresultat för målmaterialet fingrus i kombination med FOI indelningsgrund för koefficienten för strållängd.

2.5.Ökning av penetrationsdjup

Tabell 2-1 redovisar den spridning som föreligger avseende de användarrelaterade felens bidrag till säkerhetsmarginalen.

Tabell 2-1 Simuleringsresultatet uttryckt som ett procentuellt tillägg baserat på laddningens maximala penetrationsdjup i det aktuella målmaterialet, utifrån P₉₅ och P₉₉.

K1, enligt:	Percentil	Grusbädd	Sandsäck
Föreslagen ny klassificering	P ₉₅	19-25 %	17-21 %
	P ₉₉	27-34 %	25-30 %
FOI klassificering	P ₉₅	26-39 %	22-34 %
	P ₉₉	36-50 %	32-45 %

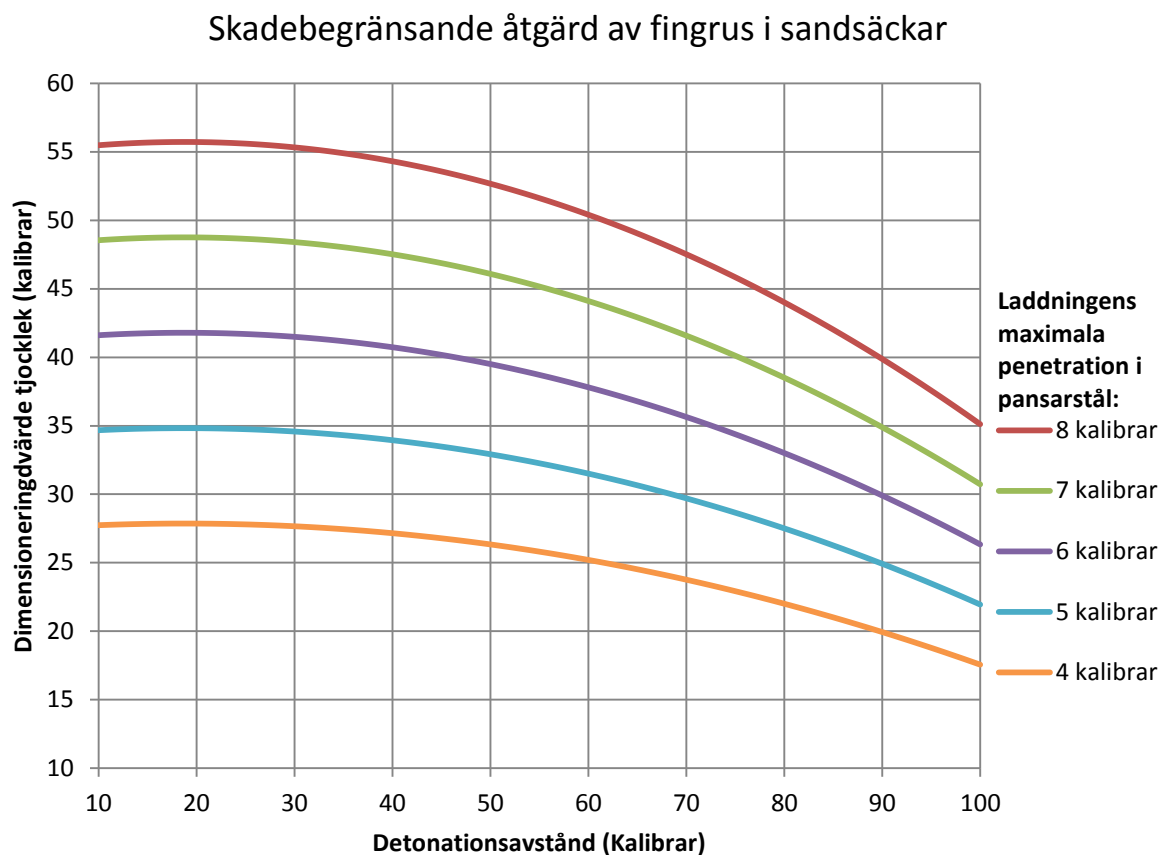
Bilaga 3 - Verktyg

1. Föreslaget verktyg	2
1.1. Dimensioneringsverktyg för sandsäcksbarriär	2
1.2. Dimensioneringsverktyg för homogen sand-/grusbädd	3
1.3. Omvandlingstabell.....	4

1. Föreslaget verktyg

Det föreslagna verktyget föreligger i två versioner beroende av om skyddskonstruktionen byggs som en sandsäcksbarriär eller som en homogen grusbädd. För att underlätta omvandlingen av längdenheter till respektive från kalibrar föreslås även en enkel omvandlingstabell mellan längdenheterna kaliber och meter.

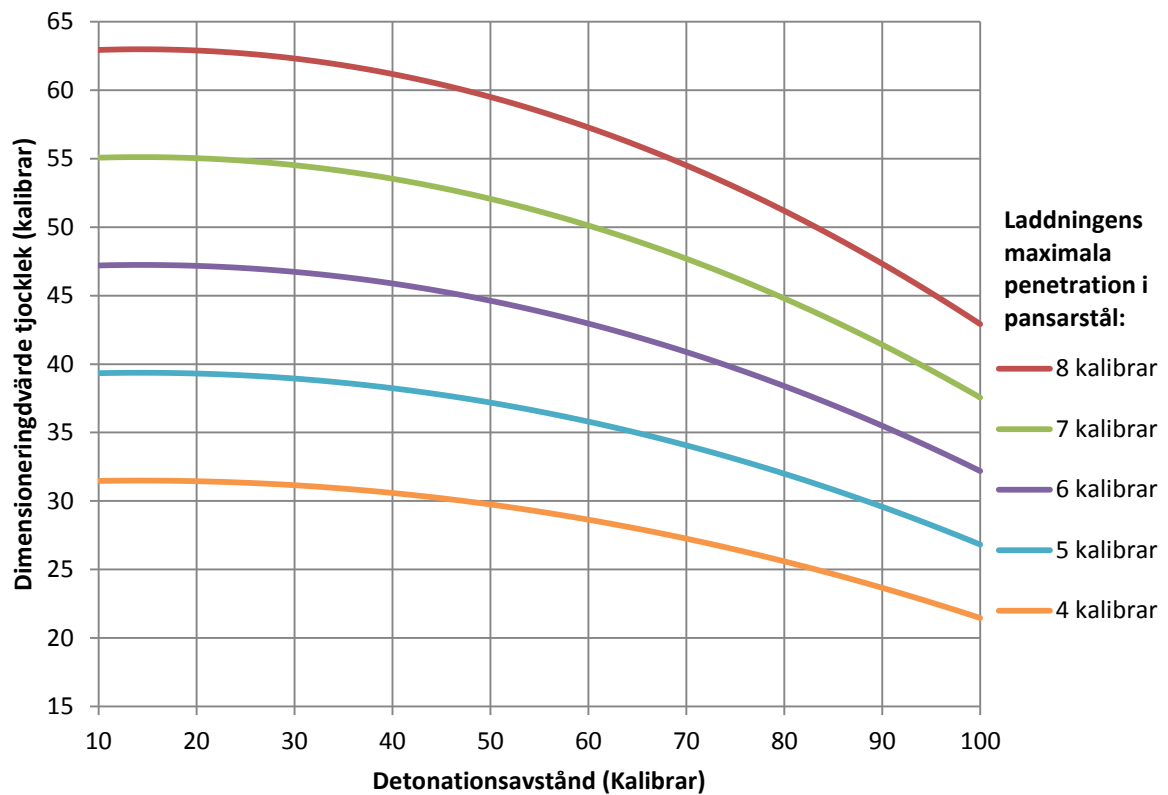
1.1. Dimensioneringsverktyg för sandsäcksbarriär



Figur 1-1 Föreslaget verktyg för dimensionering av skadebegränsande åtgärd byggda som sandsäcksbarriär.

1.2. Dimensioneringsverktyg för homogen sand-/grusbädd

Skadebegränsande åtgärd som homogen sand-/grusbädd



Figur 1-2 Föreslaget verktyg för dimensionering av skadebegränsande åtgärd byggd som homogen sand-/grusbädd.

1.3.Omvandlingstabell

Exempel på utformning av omvandlingstabell mellan längdenheterna kaliber och meter.

Tabell 1-1 Omvandlingstabell mellan kalibrar och meter. Den horisontella axeln avser detonationsavstånd i enheten kalibrar. Den vertikala axeln avser stridsdelens kaliber i enheten millimeter. Övriga fält ger avståndet i enheten meter.

175	1,75	2,63	3,50	4,38	5,25	6,13	7,00	7,88	8,75	9,63	10,50	11,38	12,25	13,13	14,00	14,88	15,75	16,63	17,50
170	1,70	2,55	3,40	4,25	5,10	5,95	6,80	7,65	8,50	9,35	10,20	11,05	11,90	12,75	13,60	14,45	15,30	16,15	17,00
165	1,65	2,48	3,30	4,13	4,95	5,78	6,60	7,43	8,25	9,08	9,90	10,73	11,55	12,38	13,20	14,03	14,85	15,68	16,50
160	1,60	2,40	3,20	4,00	4,80	5,60	6,40	7,20	8,00	8,80	9,60	10,40	11,20	12,00	12,80	13,60	14,40	15,20	16,00
155	1,55	2,33	3,10	3,88	4,65	5,43	6,20	6,98	7,75	8,53	9,30	10,08	10,85	11,63	12,40	13,18	13,95	14,73	15,50
150	1,50	2,25	3,00	3,75	4,50	5,25	6,00	6,75	7,50	8,25	9,00	9,75	10,50	11,25	12,00	12,75	13,50	14,25	15,00
145	1,45	2,18	2,90	3,63	4,35	5,08	5,80	6,53	7,25	7,98	8,70	9,43	10,15	10,88	11,60	12,33	13,05	13,78	14,50
140	1,40	2,10	2,80	3,50	4,20	4,90	5,60	6,30	7,00	7,70	8,40	9,10	9,80	10,50	11,20	11,90	12,60	13,30	14,00
135	1,35	2,03	2,70	3,38	4,05	4,73	5,40	6,08	6,75	7,43	8,10	8,78	9,45	10,13	10,80	11,48	12,15	12,83	13,50
130	1,30	1,95	2,60	3,25	3,90	4,55	5,20	5,85	6,50	7,15	7,80	8,45	9,10	9,75	10,40	11,05	11,70	12,35	13,00
125	1,25	1,88	2,50	3,13	3,75	4,38	5,00	5,63	6,25	6,88	7,50	8,13	8,75	9,38	10,00	10,63	11,25	11,88	12,50
120	1,20	1,80	2,40	3,00	3,60	4,20	4,80	5,40	6,00	6,60	7,20	7,80	8,40	9,00	9,60	10,20	10,80	11,40	12,00
115	1,15	1,73	2,30	2,88	3,45	4,03	4,60	5,18	5,75	6,33	6,90	7,48	8,05	8,63	9,20	9,78	10,35	10,93	11,50
110	1,10	1,65	2,20	2,75	3,30	3,85	4,40	4,95	5,50	6,05	6,60	7,15	7,70	8,25	8,80	9,35	9,90	10,45	11,00
105	1,05	1,58	2,10	2,63	3,15	3,68	4,20	4,73	5,25	5,78	6,30	6,83	7,35	7,88	8,40	8,93	9,45	9,98	10,50
100	1,00	1,50	2,00	2,50	3,00	3,50	4,00	4,50	5,00	5,50	6,00	6,50	7,00	7,50	8,00	8,50	9,00	9,50	10,00
95	0,95	1,43	1,90	2,38	2,85	3,33	3,80	4,28	4,75	5,23	5,70	6,18	6,65	7,13	7,60	8,08	8,55	9,03	9,50
90	0,90	1,35	1,80	2,25	2,70	3,15	3,60	4,05	4,50	4,95	5,40	5,85	6,30	6,75	7,20	7,65	8,10	8,55	9,00
85	0,85	1,28	1,70	2,13	2,55	2,98	3,40	3,83	4,25	4,68	5,10	5,53	5,95	6,38	6,80	7,23	7,65	8,08	8,50
80	0,80	1,20	1,60	2,00	2,40	2,80	3,20	3,60	4,00	4,40	4,80	5,20	5,60	6,00	6,40	6,80	7,20	7,60	8,00
75	0,75	1,13	1,50	1,88	2,25	2,63	3,00	3,38	3,75	4,13	4,50	4,88	5,25	5,63	6,00	6,38	6,75	7,13	7,50
70	0,70	1,05	1,40	1,75	2,10	2,45	2,80	3,15	3,50	3,85	4,20	4,55	4,90	5,25	5,60	5,95	6,30	6,65	7,00
65	0,65	0,98	1,30	1,63	1,95	2,28	2,60	2,93	3,25	3,58	3,90	4,23	4,55	4,88	5,20	5,53	5,85	6,18	6,50
60	0,60	0,90	1,20	1,50	1,80	2,10	2,40	2,70	3,00	3,30	3,60	3,90	4,20	4,50	4,80	5,10	5,40	5,70	6,00
55	0,55	0,83	1,10	1,38	1,65	1,93	2,20	2,48	2,75	3,03	3,30	3,58	3,85	4,13	4,40	4,68	4,95	5,23	5,50
50	0,50	0,75	1,00	1,25	1,50	1,75	2,00	2,25	2,50	2,75	3,00	3,25	3,50	3,75	4,00	4,25	4,50	4,75	5,00
45	0,45	0,68	0,90	1,13	1,35	1,58	1,80	2,03	2,25	2,48	2,70	2,93	3,15	3,38	3,60	3,83	4,05	4,28	4,50
40	0,40	0,60	0,80	1,00	1,20	1,40	1,60	1,80	2,00	2,20	2,40	2,60	2,80	3,00	3,20	3,40	3,60	3,80	4,00
	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100