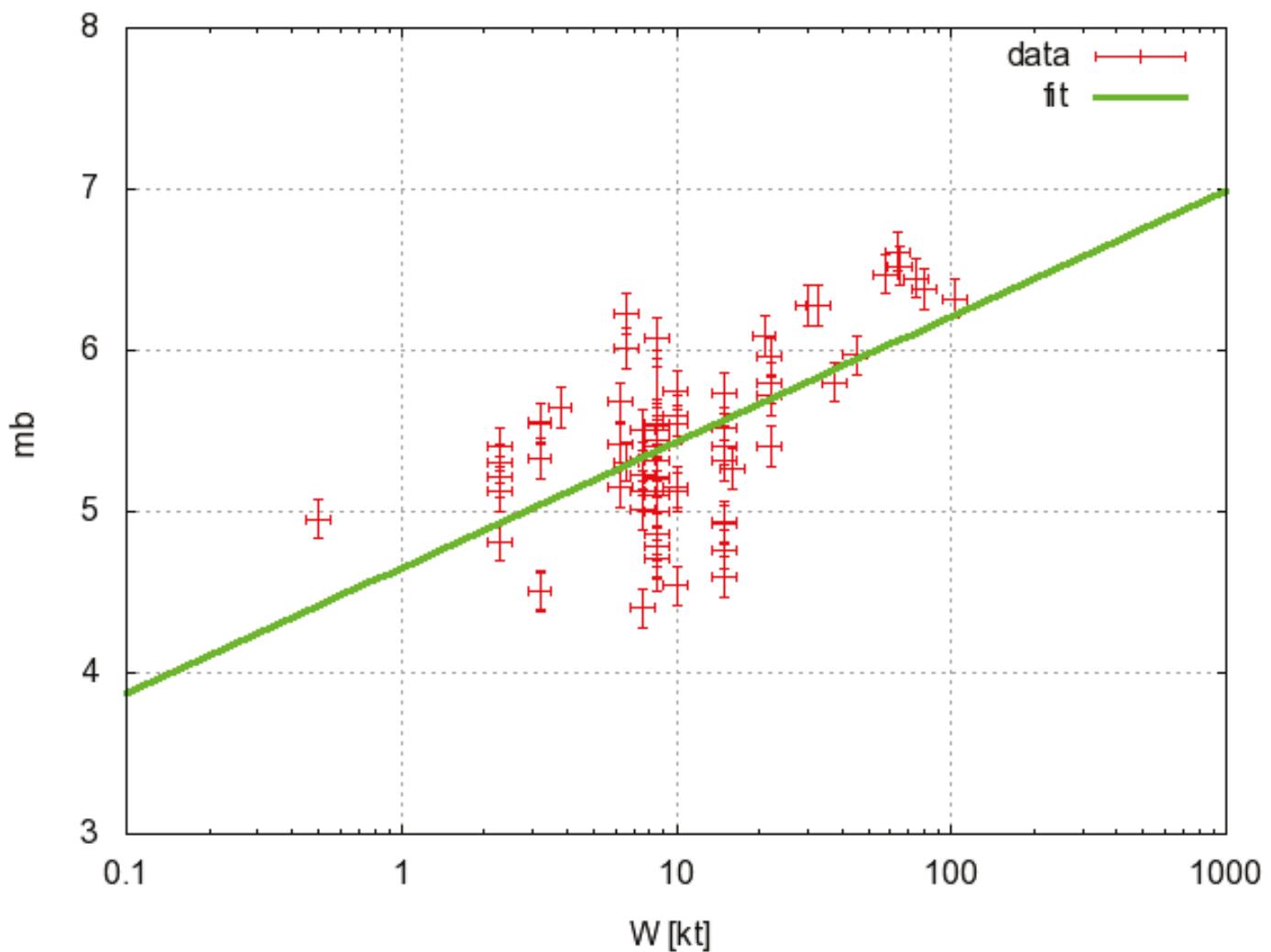


# Samband mellan laddningsstyrka och magnitud för kärnexplosioner

NILS-OLOV BERGKVIST, MARTIN GOLIATH, MÅRTEN STENMARK





Samband mellan laddningsstyrka och magnitud för kärnexplosioner



<b>Titel</b>	Samband mellan laddningsstyrka och magnitud för kärnexplosioner
<b>Title</b>	Relations between Yield and Seismic Magnitude of Nuclear Explosions
<b>Rapportnummer / Report no</b>	FOI-R--4057--SE
<b>Rapporttyp / Report type</b>	Metodrapport / Methodology report
<b>Utgivningsår / Year</b>	2015
<b>Antal sidor / Pages</b>	76
<b>Kund / Customer</b>	Utrikesdepartementet
<b>Projektnummer / Project no</b>	A290311
<b>Godkänd av / Approved by</b>	Torgny Carlsson Biträdande avdelningschef, Försvars- och säkerhetssystem
<b>ISSN</b>	ISSN-1650-1942

FOI Totalförsvarets forskningsinstitut  
Försvars- och säkerhetssystem  
164 90 STOCKHOLM



## **Sammanfattning**

Relationer mellan laddningsstyrka och seismisk magnitud för kärnladdningsexplosioner beskrivs. Exempel på laddningsstyrka-magnitudförhållanden för den seismiska arrayen i Hagfors ges för olika regioner där sovjetiska och amerikanska kärnladdningsprov har utförts.

## **Nyckelord**

Kärnvapen, laddningsstyrka, seismisk magnitud

## **Abstract**

Relations between yield and seismic magnitude of nuclear explosions are reviewed. Examples of yield-magnitude relations for the seismic array in Haga-fors, Sweden, are given for various regions where Soviet and American nuclear testing have been performed.

## **Keywords**

Nuclear Weapons, Yield, Seismic Magnitude

# Innehåll

<b>Innehåll</b>	<b>7</b>
<b>1 Inledning</b>	<b>9</b>
<b>2 Data från kärnladdningsprov</b>	<b>11</b>
2.1 Urval av prov . . . . .	11
2.2 Korrektionsfaktor för geografiskt avstånd . . . . .	11
2.3 Seismisk magnitud . . . . .	14
2.4 Laddningsstyrka . . . . .	14
2.5 Osäkerheten i data . . . . .	15
<b>3 Relationer mellan laddningsstyrka och magnitud</b>	<b>17</b>
3.1 Metodik för anpassningar . . . . .	17
3.2 Exempel på laddningsstyrka-magnitudförhållanden . . . . .	18
<b>4 Prov där laddningsstyrkan anges i form av ett intervall</b>	<b>21</b>
4.1 Medelvärde . . . . .	21
4.2 Linjär anpassning . . . . .	21
4.3 Feluppskattning . . . . .	23
4.4 Resultat . . . . .	23
<b>5 Diskussion</b>	<b>27</b>
<b>A Lista över kärnexplosioner</b>	<b>29</b>
<b>B Beräkningsrutiner för anpassningar</b>	<b>53</b>
B.1 prepareData.pl . . . . .	54
B.2 YieldMagnitude.pl . . . . .	63
B.3 filePreparation.pl . . . . .	70
B.4 mbWfit3.c . . . . .	73
<b>Litteraturförteckning</b>	<b>75</b>



# 1 Inledning

Denna rapport sammanställer olika tillvägagångssätt för att uppskatta laddningsstyrkan hos en kärnladdningsexplosion, utgående från den uppmätta seismiska magnituden. Relationer mellan laddningsstyrka och magnitud kan förväntas vara beroende både av källregionen (området där explosionen sker), såväl som den seismiska stationens placering. Att stationens geografiska avstånd i förhållande till explosionen har betydelse är inte förvånande, men erfarenheten visar att även relativt närliggande stationer upptäcks stora skillnader avseende signalstyrka från givna regioner. Till exempel anses den seismiska stationen i Hagfors ha goda "lyssnarförhållanden" visavi Semipalatinskområdet, där ett stort antal ryska provsprängningar genomförts. En specifik relation mellan laddningsstyrka och magnitud kommer alltså att råda för varje givet val av provområde och seismisk station. I denna rapport exemplifieras olika relationer för laddningsstyrka genom att använda data för provsprängningar uppmätta vid Hagforsstationen.

Rapportens syfte är att utgöra bakgrundssdata inför kommande detaljstudier kring hur kärnladdningars initiala verkan, främst genom markstötvågen, ger upphov till den seismiska källtermen från underjordsexplosioner. En särskilt intressant frågeställning i detta sammanhang är förutsättningarna för så kallad frikoppling. Som en biprodukt kan rapporten också vara av intresse för det nationella datacentret NDC.



## 2 Data från kärnladdningsprov

För att kunna genomföra de anpassningar som önskas, krävs uppgifter både om seismisk magnitud och explosionens laddningsstyrka. Avseende magnitudmätningar har vi valt att utgå från den seismiska stationen i Hagfors, och är därför begränsade till de explosioner för vilka någon registrering har gjorts i just den stationen. Som nämntes i inledningen, är det inte meningsfullt att blanda magnitudmätningar från olika seismiska stationer, ens om dessa mätningar korrigeras för stationernas olika avstånd till provplatsen. Om stationsspecifika responsfaktorer för givna regioner bestäms, skulle dock sammanvägning av data från olika stationer möjliggöras. Detta har inte utvecklats i denna rapport.

Utöver registrering i den utvalda stationen, krävs vidare en uppgift om vilken laddningsstyrka som explosionen motsvarade. Detta minskar ytterligare urvalet av explosioner som kan komma ifråga för anpassning. Genom olika bilaterala arrangemang, till exempel tröskelavtalet 1974 där man överenskom om att begränsa alla prov till styrkor under 150 kiloton (kt), kom USA och Sovjetunionen att i stor utsträckning offentliggöra laddningsstyrkor. Ett problem i sammanhanget är dock att detta ofta gjordes genom att ange styrkan i ett antal schablonintervall, nämligen 0 - 20 kt, 20 - 150 kt, 150 - 1 500 kt, och större än 1 500 kt<sup>1</sup>. Detta försvarar bestämningen av en relation mellan laddningsstyrka och magnitud. Ett försök att ändå utnyttja prov för vilka laddningsstyrka bara finns i form av ett intervall redovisas i avsnitt 4.

### 2.1 Urval av prov

Eftersom relationen mellan laddningsstyrka och magnitud förväntas vara beroende av källregionen, behöver ett urval vad gäller explosioner göras. I den beflitliga metoden sker detta för hand, genom att välja ut de kärnladdningsprov som gjorts inom en region som av erfarenhet förväntas ha likartad seismisk respons. De utvalda proven sammanställs i en datafil som, förutom kärnladdningsprovets ID-nummer, även ska innehålla bästa kända lokalisering av varje prov. Det är den lokalisering som anges i denna fil, i fortsättningen benämnd *regionfil*, som används för att bestämma avståndet mellan prov och mätstation.

I tabell 2.1 sammanställs de olika regioner för vilka användbara data har hittats. I figur 2.1–2.3 plottas de aktuella proven.

### 2.2 Korrektionsfaktor för geografiskt avstånd

De lokaliseringar som angetts i regionfilen används, tillsammans med uppgift om den seismiska stationens latitud och longitud på samma format, för att bestämma avståndet mellan mätstationen och varje prov. För att beräkna avståndet används verktyg ur Generic Mapping Tools (GMT) [1], vilket ger vinkelavstånden  $D$  mellan prov och station i grader.

Detta vinkelavstånd används sedan för att bestämma den så kallade P-korrektionen för varje prov, vilket är den globala justeringen av magnitud till följd av avståndet mellan händelse och mätstation [2]. Denna justering tar endast hänsyn till den globala vågutbredningen, och väger alltså inte in regionala korrektioner vid källa eller mätstation.

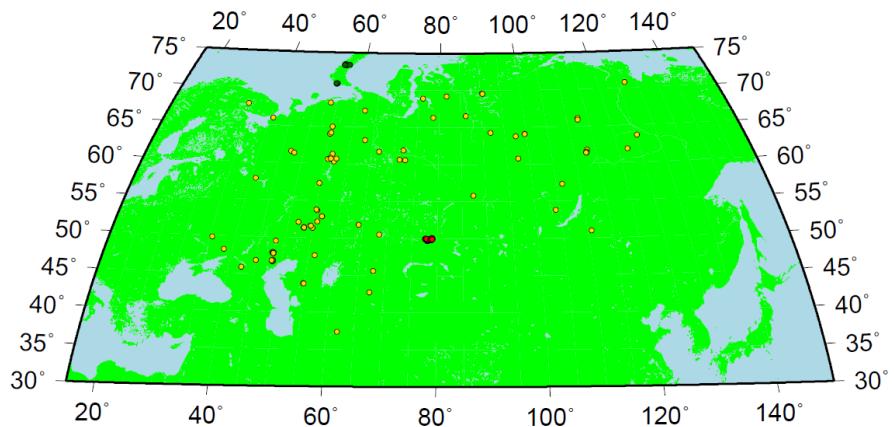
För korrigering av bulkmagnituden  $m_b$  läses korrektionsfaktorer in från en *P-faktorfil*, som innehåller tabellerade vinkelavstånd och korrektionsfaktorer,

---

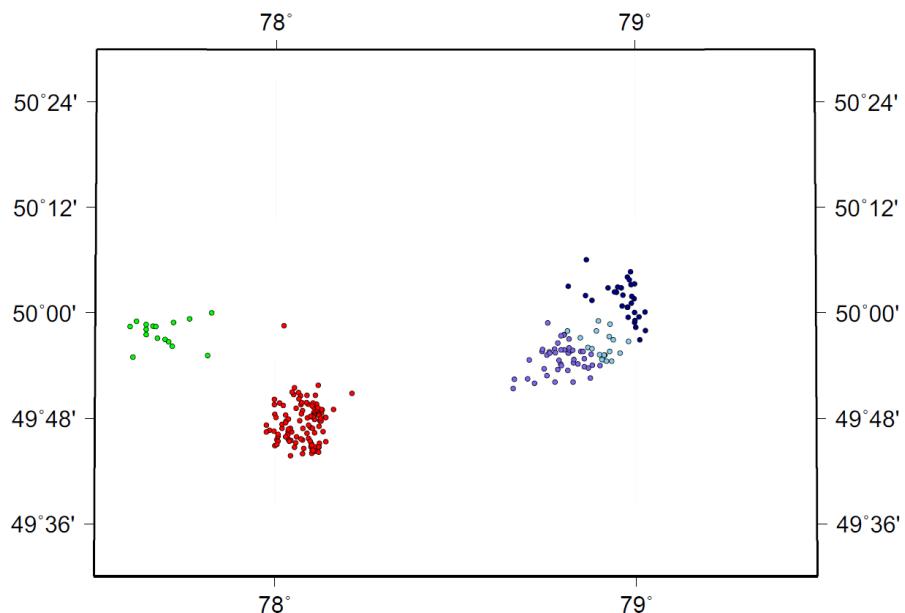
<sup>1</sup>De två sistnämnda intervallen var rimligtvis inte aktuella efter 1974.

Tabell 2.1: Regioner för vilka kärnladdningsprov med tillräckliga data finns utifrån registreringar av bulkmagnitud  $m_b$  och/eller ytvägsmagnitud  $M_s$  i Hagfors, samt oberoende uppgifter om laddningsstyrka. Med  $N$  avses totala antalet utvalda prov i regionen med seismisk registrering i Hagforsstationen, medan  $N_p$  och  $N_i$  är antalet av dessa prov för vilka laddningsstyrkan är tillgänglig som punktvärde respektive intervall.

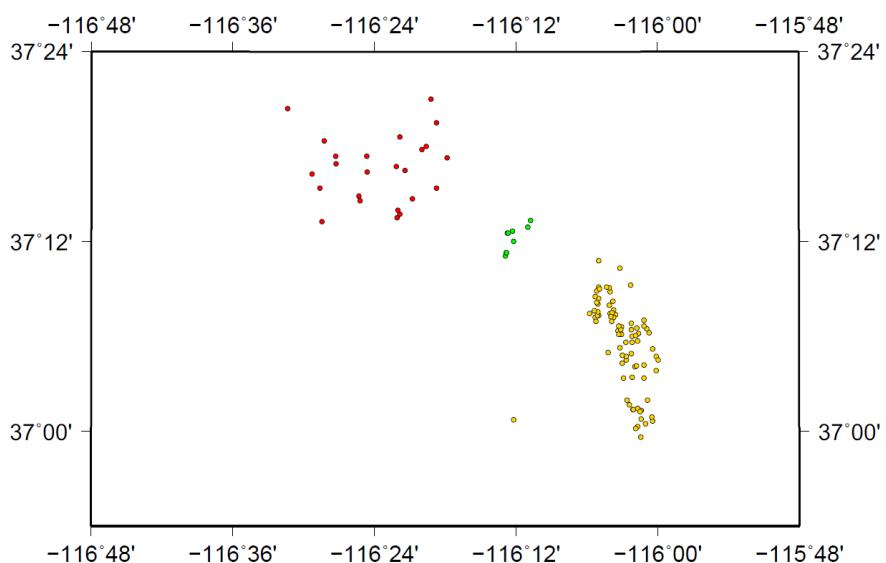
Region Delområde	Regionfil Region_*.txt	$N$	$m_b$ $N_{p+i}$	$N_p$	$N_i$	$M_s$ $N_{p+i}$	$N_p$	$N_i$
<b>Nevada Test Site</b>								
Pahute Mesa	NTS_PahuteMesa	24	23	0	23	18	0	18
Rainier Mesa	NTS_RainierMesa	9	8	0	8	0	0	0
Yucca Flats	NTS_YuccaFlats	82	53	3	50	15	2	13
<b>Novaja Zemlja</b>								
Norra området	NZ_north	21	10	10	0	18	17	1
Södra området	NZ_south	4	1	1	0	4	4	0
<b>Ryska PNE:er</b>								
Astrakan	PNE_Astrak	15	9	9	0	1	1	0
Azgir	PNE_Azgir	15	12	12	0	8	8	0
Jakutsk	PNE_Jakutsk	12	8	8	0	3	3	0
Kazakhstan	PNE_Kazakh	11	5	5	0	10	10	0
Krasnojarsk	PNE_Krasno	9	8	8	0	1	1	0
Orenburg	PNE_Orenbg	5	5	5	0	2	2	0
Perm	PNE_Perw	8	8	8	0	3	3	0
Tyumen	PNE_Tyumen	6	5	5	0	4	4	0
Alla, inklusive enstaka	PNE_USSR	108	81	81	0	44	44	0
<b>Semipalatinsk</b>								
Degelen	STS_Degelen	109	101	94	7	12	11	1
Konystan	STS_Konystan	16	15	15	0	6	6	0
Shagan, nordöst	STS_Shagan_NE	31	30	30	0	11	11	0
Shagan, sydväst	STS_Shagan_SW	47	43	43	0	35	35	0
Shagan, övergångszon	STS_Shagan_tz	17	16	16	0	14	14	0
Shagan (alla)	STS_Shagan	95	89	89	0	60	60	0



Figur 2.1: Ryska prov. Områdena är Semipalatinsk (rött), Novaja Zemlja (grönt) och PNE:er (Peaceful Nuclear Explosions; gult).



Figur 2.2: Prov vid Semipalatinsk. Delområdena är Konystan (grönt), Degelen (rött) och Shagan (olika blåa nyanser).



Figur 2.3: Prov vid Nevada Test Site. Delområdena är Pahute Mesa (rött), Rainier Mesa (grönt), och Yucca Flats (gult).

varefter nödvändiga korrektioner  $P(D)$  bestäms genom linjär interpolation till relevant vinkelavstånd.<sup>2</sup>

För ytvågsmagnituden  $M_s$  används en funktionsanpassning för korrektionen enligt

$$C = \frac{1}{3} \log_{10} D + \frac{1}{2} \log_{10} \left[ \sin \left( \frac{\pi}{180} D \right) \right] + 0,0046D + 2,370, \quad (2.1)$$

där  $D$  som tidigare är vinkelavståndet mellan prov och station i grader.

## 2.3 Seismisk magnitud

För Hagforsstationen, som vi valt att exemplifiera med, finns signalparametrar för över 600 kända kärladdningsprov. De parametrar som används, förutom provens ID-nummer, är amplitud (*peak-to-peak*)  $A$  [nm] och period  $T$  [s] för signalen, avseende både bulkmagnituden  $m_b$  och ytvågens magnitud  $M_s$ . För de fall där signalparametrarna är givna, beräknas bulk- och ytvågsmagnituder enligt

$$m_b = \log_{10} \left( \frac{A_b}{T_b} \right) + P(D), \quad (2.2)$$

$$M_s = \log_{10} \left( \frac{A_s}{T_s} \right) + C(D), \quad (2.3)$$

där  $P(D)$  och  $C(D)$  är korrektionerna som diskuterats i avsnitt 2.2 ovan.

För många prov saknas en eller flera av de primära parametrarna ( $A_b$ ,  $T_b$ ,  $A_s$ ,  $T_s$ ). I vissa av dessa fall anges ändemot magnitudvärde för  $m_b$  och/eller  $M_s$  utan närmare redovisning av uppgiftens ursprung. Dessa värden har använts när någon av de primära parametrarna saknas. Eftersom förfarandet för magnitudberäkningen inte är redovisat för dessa värden, har vi valt att i första hand utgå från signalen. Endast om signaldatal är ofullständiga har angiven magnitud använts.

I vissa fall finns varken tillräckliga signaldatal eller någon magnitud angiven. Sådana prov har därför inte kunnat användas i den fortsatta analysen. Filen som innehåller stationsparametrar för prov kallas fortsättningsvis *parameterfil*.

## 2.4 Laddningsstyrka

Uppgifter om laddningsstyrka hämtas ur en lista som sammanställts ur uppgifter från olika källor, och som är en uppdaterad version av den som redovisas i [3], och huvudsakligen baseras på officiella nationella sammanställningar [4, 5] med kompletteringar främst från [3, 6, 7]. Listan bifogas elektroniskt till denna rapport, och i bilaga A redovisas en delmängd av informationen ur listan.

Många prov består av flera kärladdningar som detoneras samtidigt inom ett begränsat område. Den vedertagna ryska definitionen för att en sådan salva ska räknas som ett enda prov är att tidsintervallet mellan första och sista explosion ska vara mindre än 5 sekunder, och att totala avståndet är mindre än 40 km [5]. Dessa salvexplosioner har hanterats på så vis att de individuella laddningsstyrkorna adderas. Detta är rimligt om avståndet mellan explosionerna är av samma storleksordning som den så kallade elastiska radien, vilken bestämmer källkarakteristiken [8], och att tidsintervallet är mindre än periodtiden  $T$ . De övre gränserna i tid och rum i definitionen av salvor ovan

---

<sup>2</sup>För jordbävningar brukar även ett djupberoende ingå i P-faktorn. I relation till jordbävningar sker provsprängningar på djupet  $h = 0$ , vilket är vad de P-faktorer som har använts här motsvarar.

är emellertid större än dessa kvantiteter. Eftersom det sällan finns information om faktiska provkonfigurationer, har vi ändå valt att addera laddningsstyrkor på detta vis.

## 2.5 Osäkerheten i data

Databehandlingen så långt har resulterat i datapar  $(W_i, m_{b,i})$  och  $(W_i, M_{s,i})$  för de kärnladdningsprov som analyseras, där  $W_i$  betecknar laddningsstyrkan för prov  $i$ . För den slutliga bestämningen av relationer mellan laddningsstyrka och magnitud är det av intresse att vikta datapunkterna efter uppskattad osäkerhet i data. Under antagande om okorrelerade fel, fås genom felfortplantning i ekvation (2.2) och (2.3) osäkerheten i beräknade magnitunder:

$$\delta m_b = \frac{1}{\ln 10} \sqrt{\left(\frac{\delta A_b}{A_b}\right)^2 + \left(\frac{\delta T_b}{T_b}\right)^2}, \quad (2.4)$$

$$\delta M_s = \frac{1}{\ln 10} \sqrt{\left(\frac{\delta A_s}{A_s}\right)^2 + \left(\frac{\delta T_s}{T_s}\right)^2}. \quad (2.5)$$

Seismometrars kalibreringsgräns för amplitud är  $\delta A/A \sim 5\%$ . Därtill kommer avläsningsfel ur seismogram med registreringar av kärnexplosioner, vilket i praktiken ofta handlat om mätning av två längder i seismogrammet. Den uppskattning som vi gör är att relativ felet för både amplituden och perioden är åtminstone 20%, och kanske är även detta i underkant. I de fall där magnituden inte beräknas från stationsparametrar, utan erhålls från annan källa, ansätts en osäkerhet om  $\delta m_b \approx 0,5$ ,  $\delta M_s \approx 0,5$ . Sammanfattningsvis gäller då för osäkerheten i magnituden

$$\sigma_{\text{magnitud}} \approx \begin{cases} 0,12 & \text{magnitud beräknad} \\ 0,5 & \text{annars} \end{cases}. \quad (2.6)$$

För laddningsstyrka brukar osäkerheten hos de radiologiska analysmetoder som används för bestämning efter ett prov anges vara minst 5%. Till detta kommer att det har rått oklarheter om hur laddningsstyrka ska uppskattas, vilket har inneburit att man på senare år räknat om laddningsstyrkorna för gamla prov. Här har relativ felet  $\delta W/W$  satts till 10% i de fall då ett punktvärde för laddningsstyrkan angetts. Osäkerheten för ett givet prov  $i$  har sedan satts till

$$\sigma_{W,i} = W_i \frac{\delta W}{W}. \quad (2.7)$$



## 3 Relationer mellan laddningsstyrka och magnitud

Eftersom laddningsstyrka är liktydigt med energi, och seismiska magnituder är logaritmiska energimått, är det naturligt att anta att magnituder är proportionella mot logaritmen av laddningsstyrkan:

$$\text{magnitud} \sim \log_{10} W. \quad (3.1)$$

Enkla uppskattningar som man kan stöta på är av karaktären ”ett kiloton motsvarar en fyra på Richterskalan”, och ”en lutning kring 0,75 verkar funka för prov i Sovjetunionen”. En mycket enkel uppskattning skulle då kunna vara

$$m_b = 4 + 0,75 \log_{10} W. \quad (3.2)$$

Avsikten här är att utifrån indata bearbetade enligt avsnitt 2 ovan, bestämma koefficienter för anpassningar på formen

$$m_b = m_1 + k_b \log_{10} W, \quad (3.3)$$

$$M_s = M_1 + k_s \log_{10} W, \quad (3.4)$$

för de olika geografiska regioner som berörts ovan. Det finns en omfattande litteratur kring anpassningar av detta slag, se till exempel [9, 10].

### 3.1 Metodik för anpassingar

Inom varje geografisk region finns ett antal prov med data  $(W_i, m_{b,i}, \sigma_{W,i}, \sigma_{mb,i})$  och  $(W_i, M_{s,i}, \sigma_{W,i}, \sigma_{Ms,i})$ . Ett givet prov  $i$  har inte nödvändigtvis data för både  $m_b$  och  $M_s$ . Dessutom har bara prov där laddningsstyrkan anges som ett punktvärde använts<sup>1</sup>. Metodiken exemplifieras i det följande med bulkmagnituden, men används på samma sätt för ytvågor.

Anpassning till en relation på formen given av ekvation (3.3) kan nu prövas genom linjär anpassning av datauppsättningen  $(\log_{10} W_i, m_{b,i})$ , varvid koefficienterna  $m_1$  och  $k$  bestäms. För detta ändamål har **fitexy** från [11] använts. Denna rutin utför linjär anpassning, och tar hänsyn till osäkerheter både i  $W$  och  $m_b$ . I föreliggande fall utgörs den beroende variabeln av  $\log_{10} W$ , varvid felet uppskattas till

$$\sigma_{\log_{10} W} = \frac{\sigma_W}{W_i \ln 10} \quad (3.5)$$

$$= \frac{1}{\ln 10} \frac{\delta W}{W} \quad (3.6)$$

$$\approx 0,043, \quad (3.7)$$

om  $\delta W/W = 10\%$ . Felet i magnituden ges som tidigare av ekvation (2.6)<sup>2</sup>.

---

<sup>1</sup>I avsnitt 4 diskuteras hur prov med intervall för laddningsstyrkan skulle kunna användas.

<sup>2</sup>I en första ansats användes en standardrutin för anpassning till en rät linje, **fit** från [11]. Eftersom denna rutin endast medger felangivelse för den beroende variabeln (här  $m_b$ ), vägdes feluppskattningen för  $W$  in i den osäkerhet som användes vid anpassningen. Utgående från ekvation (3.3) gjordes skattningen

$$\sigma = \sqrt{\sigma_{mb}^2 + \left( \frac{\partial m_b}{\partial W} \sigma_W \right)^2} \quad (3.8)$$

Tabell 3.1: Anpassningar av bulkmagnitud för olika regioner. Endast prov för vilka laddningsstyrkan angetts med ett punktvärde har utnyttjats. För regioner där inga anpassningsparametrar redovisas är provdata otillräckliga, eller osäkerheten i anpassningen för stor. För till exempel Astrakan finns visserligen många prov som medger beräkning av  $m_b$ , men dessa prov har alla samma laddningsstyrka. För Shagan har två delvis olika uppgifter om laddningsstyrka prövats: den första anpassningen för varje område är baserad på laddningsstyrkor från den sammanställning som nämns i avsnitt 2.4, medan den andra anpassningen använder laddningsstyrkor från [12].

Region Delområde	$N_p$	$m_1$	$m_b$ $k_b$	$Q$
<b>Nevada Test Site</b>				
Pahute Mesa	0	-	-	-
Rainier Mesa	0	-	-	-
Yucca Flats	3	-	-	-
<b>Novaja Zemlja</b>				
Norra området	10	$4,76 \pm 0,18$	$0,94 \pm 0,10$	0,14
Södra området	1	-	-	-
<b>Ryska PNE:er</b>				
Astrakan	9	-	-	-
Azgir	12	$5,04 \pm 0,05$	$0,70 \pm 0,04$	0
Jakutsk	8	$5,06 \pm 0,20$	$0,36 \pm 0,18$	0,12
Kazakhstan	5	-	-	-
Krasnojarsk	8	$3,51 \pm 0,43$	$1,25 \pm 0,42$	0,01
Orenburg	5	$4,92 \pm 0,12$	$0,69 \pm 0,16$	0,97
Perm	8	$4,37 \pm 0,11$	$1,03 \pm 0,13$	0
Tyumen	5	-	-	-
USSR (alla)	81	$4,63 \pm 0,03$	$0,79 \pm 0,03$	0
<b>Semipalatinsk</b>				
Degelen	94	$4,73 \pm 0,08$	$0,79 \pm 0,06$	0
Konystan	15	$4,80 \pm 0,11$	$0,94 \pm 0,10$	0
Shagan, nordöst	30	$5,45 \pm 0,08$	$0,79 \pm 0,06$	0
		$5,59 \pm 0,07$	$0,60 \pm 0,04$	0
Shagan, sydväst	43	$5,92 \pm 0,13$	$0,70 \pm 0,07$	0
		$5,95 \pm 0,12$	$0,65 \pm 0,06$	0
Shagan, övergångszon	16	$5,93 \pm 0,17$	$0,60 \pm 0,10$	0
		$5,83 \pm 0,15$	$0,62 \pm 0,08$	0
Shagan (alla)	89	$5,41 \pm 0,06$	$0,92 \pm 0,03$	0
		$5,53 \pm 0,05$	$0,78 \pm 0,03$	0

### 3.2 Exempel på laddningsstyrka-magnitudförhållanden

Exempel på anpassningar gjorda med data från den seismiska stationen i Hagfors är sammanfattade i tabell 3.1 och 3.2. Anpassningens godhetsmått  $Q$  redovisas också. Ett värde nära  $Q = 1$  indikerar hög sannolikhet för att givna data är konsistenta med hypotesen om en funktionsform enligt ekvation (3.3) eller (3.4), se [11]. I figur 3.1 och 3.2 ges exempel på anpassningar.

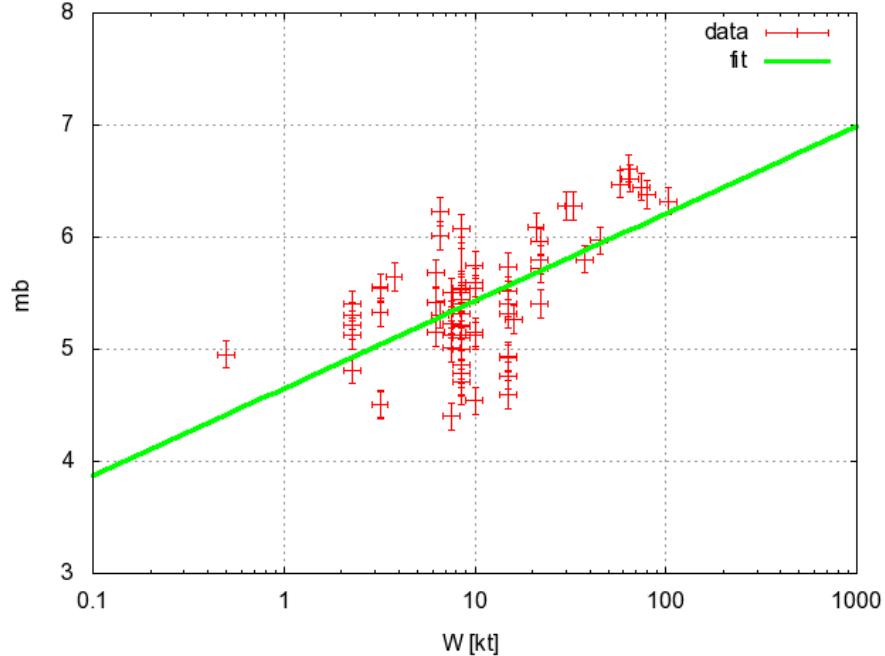
---


$$= \sqrt{\sigma_{mb}^2 + \left( \frac{k_* \sigma_W}{W \ln 10} \right)^2}, \quad (3.9)$$

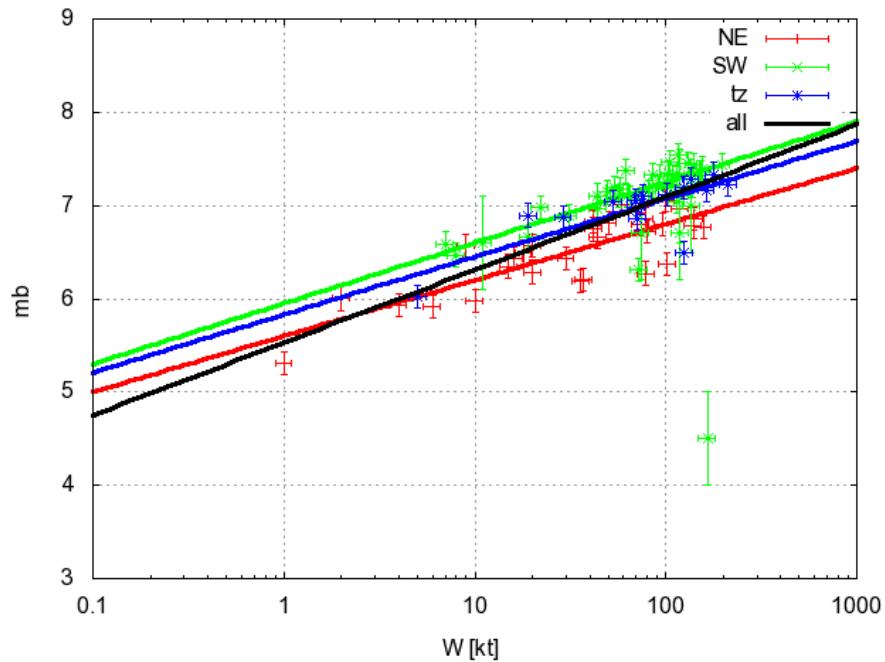
där  $k_* := 1$  är en tentativ uppskattning av lutningskoefficienten  $k_b$ . Anpassningsresultaten med **fit** skilde sig inte mot **fityexy** i några avgörande avseenden.

Tabell 3.2: Anpassningar av ytvågsmagnitud för olika regioner. Endast prov för vilka laddningsstyrkan angetts med ett punktvärde har utnyttjats. För regioner där inga anpassningsparametrar redovisas är provdata otillräckliga, eller osäkerheten i anpassningen för stor. Liksom i tabell 3.1 har två delvis olika underlag för laddningsstyrka används inom Shaganområdet.

Region Delområde	$M_s$			
	$N_p$	$M_1$	$k_s$	$Q$
<b>Nevada Test Site</b>				
Pahute Mesa	0	-	-	-
Rainier Mesa	0	-	-	-
Yucca Flats	2	-	-	-
<b>Novaja Zemlja</b>				
Norra området	17	$1,76 \pm 0,15$	$1,57 \pm 0,06$	0
Södra området	4	$1,78 \pm 0,34$	$1,32 \pm 0,11$	0,63
<b>Ryska PNE:er</b>				
Astrakan	1	-	-	-
Azgir	8	$2,56 \pm 0,27$	$1,40 \pm 0,16$	0
Jakutsk	3	-	-	-
Kazakhstan	10	-	-	-
Krasnojarsk	1	-	-	-
Orenburg	2	-	-	-
Perm	3	-	-	-
Tyumen	4	-	-	-
USSR (alla)	44	$2,68 \pm 0,09$	$1,23 \pm 0,07$	0
<b>Semipalatinsk</b>				
Degelen	11	$2,23 \pm 0,33$	$1,39 \pm 0,25$	0,08
Konystan	6	-	-	-
Shagan, nordöst	11	$3,03 \pm 0,18$ $3,00 \pm 0,17$	$0,83 \pm 0,12$ $0,74 \pm 0,10$	0
Shagan, sydväst	35	$3,65 \pm 0,16$ $3,65 \pm 0,16$	$0,53 \pm 0,08$ $0,51 \pm 0,08$	0
Shagan, övergångszon	14	$3,09 \pm 0,26$ $2,95 \pm 0,30$	$0,78 \pm 0,14$ $0,78 \pm 0,15$	0
Shagan (alla)	60	$3,26 \pm 0,10$ $3,23 \pm 0,11$	$0,72 \pm 0,06$ $0,68 \pm 0,06$	0



Figur 3.1: Anpassning med rutinen `fitexy` för data från samtliga ryska PNE:er. Endast laddningsstyrkor angivna som punktdata har använts.



Figur 3.2: Anpassningar med rutinen `fitexy` för data från området Shagan inom Semipalatinsk med laddningsstyrkor från [12]. Endast laddningsstyrkor angivna som punktdata har använts. Notera att anpassningarna för de tre delområdena ger ungefärligen samma lutning  $k_b$ , men olika värden på  $m_1$ . Anpassningen som använder alla prov har däremot avvikande lutning.

## 4 Prov där laddningsstyrkan anges i form av ett intervall

Om det finns fåtal eller inga prov där laddningsstyrkan är angiven som ett punktvärde i en given region, kan man tänka sig att eventuella explosioner inom ett och samma intervall för laddningsstyrka skulle kunna vara av viss nytta. Den metod som används i detta avsnitt försöker att dra nytta även av sådana data.

För de fall där laddningsstyrkan har angivits med ett intervall, behöver ett representativt värde på laddningsstyrkan bestämmas. Två sätt att hantera detta har prövats<sup>1</sup>.

### 4.1 Medelvärde

En möjlighet är att använda medelvärdet för intervallet

$$W := \frac{1}{2} (W_{\max} + W_{\min}), \quad (4.1)$$

och vara medveten om den stora osäkerhet som följer med detta (se vidare avsnitt 4.3). I praktiken kan man räkna med att antalet olika intervall är tämligen begränsat (till exempel 0 – 20 kt, 20 – 150 kt och större än 150 kt), vilket med denna metod kommer att leda till många datapunkter med identiska laddningsstyrkor, men olika seismiska magnituder.

### 4.2 Linjär anpassning

Om många prov har angetts i form av intervall kan det vara önskvärt att försöka utnyttja den information som detta kan tänkas ge om man antar att större magnituder torde vara relaterade till övre delen av ett givet intervall, och tvärt om. Om vi antar att de faktiska laddningsstyrkorna för prov som angetts med intervall förde sig enligt en relation på formen (3.3) där  $W$  betecknar laddningsstyrka, kan tentativa laddningsstyrkor för intervallfallen bestämmas enligt

$$W_i = 10^{(m_{b,i} - m_1)/k}, \quad (4.2)$$

$$k = \frac{\sum_i (x_i - \langle x \rangle) m_{b,i}}{\sum_i (x_i - \langle x \rangle)^2}, \quad (4.3)$$

$$m_1 = \langle m_b \rangle - k \langle x \rangle, \quad (4.4)$$

$$\langle x \rangle = \frac{1}{N_{\text{int}}} \sum_i x_i, \quad (4.5)$$

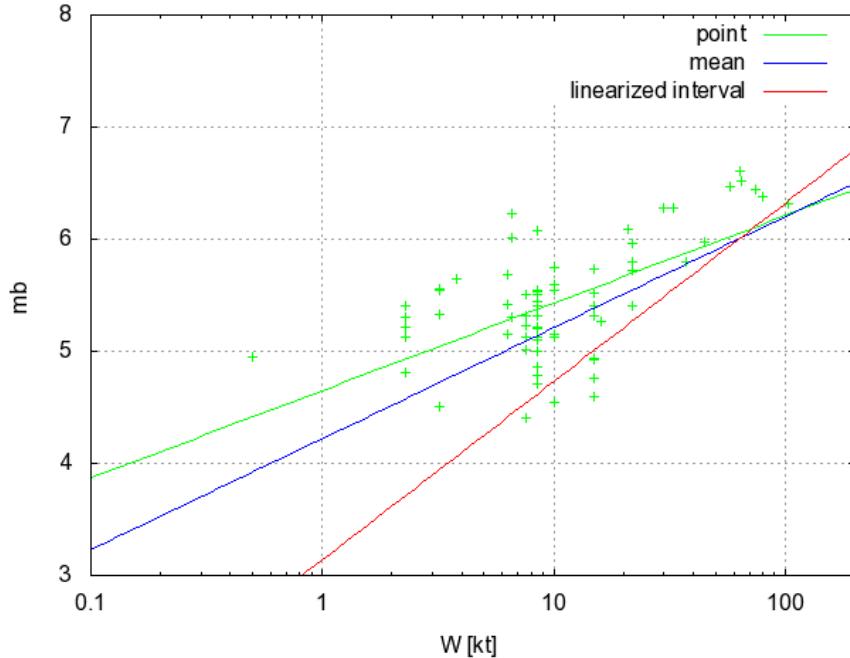
$$\langle m_b \rangle = \frac{1}{N_{\text{int}}} \sum_i m_{b,i}, \quad (4.6)$$

$$x_i = \log_{10} \left[ \frac{1}{2} (W_{\max,i} + W_{\min,i}) \right], \quad (4.7)$$

där  $\sum_i$  avser summa över prov med laddningsstyrka angiven på intervallform, och  $N_{\text{int}}$  är antalet sådana prov. Om en uppskattning  $W_i$  hamnar utanför intervallet  $[W_{\min,i}, W_{\max,i}]$ , sätts  $W_i$  lika med närmaste intervallgräns. De sålunda

---

<sup>1</sup>Om laddningsstyrkorna som ingår i en salva har angetts som intervall, har övre och undre gränserna adderats för att på så vis få fram ett intervall för provet som helhet.

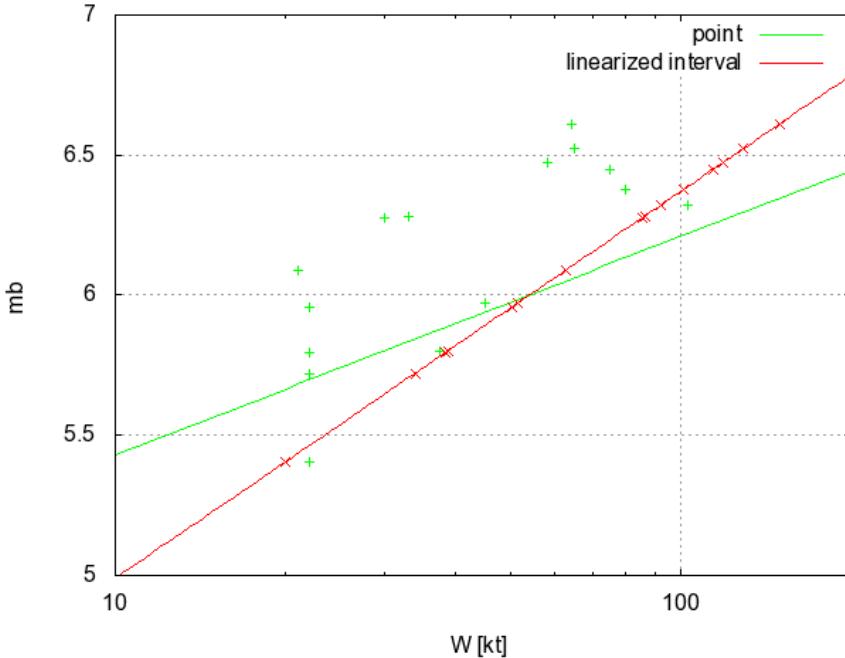


Figur 4.1: Ryska PNE:er med laddningsstyrkor angivna som punktvärden (grönt), samt intervallhantering för dessa om man antar att laddningsstyrkor är angivna endast inom intervallet 0 – 20 kt och 20 – 150 kt: medelvärdesmetod (blått) och linjär anpassning (rött). Anpassningarna är  $m_b = 4.65 + 0.78 \log_{10} W$  (grönt),  $m_b = 4.22 + 0.99 \log_{10} W$  (blått) och  $m_b = 3.14 + 1.59 \log_{10} W$  (rött).

erhållna laddningsstyrkorna kommer i regel förhålla sig till motsvarande magnitider  $m_{b,i}$  enligt formen given av ekvation (3.3). I den slutliga anpassningen, där alla prov används för att bestämma koefficienter enligt ett uttryck på denna form, viktas efter hur stora osäkerheterna uppskattas vara.

Flera invändningar mot förfaringsssättet är uppenbara. Till att börja med kan man inte utan ytterligare information om proven utgå från att dessa verkligen fördelar sig över hela det angivna intervallet. Till exempel kan prov där laddningsstyrkorna anges ligga i ett interval 20 – 150 kt, lika gärna vara samlade mellan, säg 47 och 49 kt. För det andra har vi sett ur data för prov där laddningsstyrkan angivits med punktvärde att det inte är ovanligt med magnitider som är väsentligt avvikande, vilket skulle medföra förskjutningar av datapunkter. Slutligen bör övervägas hur olika, sinsemellan överlappande, intervall ska hanteras med denna metod. Inte desto mindre är det värt att undersöka metoden, se vidare avsnitt 4.4 för resultat.

I figur 4.1 jämförs de två intervallmetoderna genom att behandla data för ryska PNE:er med laddningsstyrkor angivna som punktvärden i intervallet 0 – 20 kt och 20 – 150 kt som om de vore angivna endast med dessa intervall. Som ett exempel på hur metoden förskjuter data, undersöker vi särskilt intervallet 20 – 150 kt för linjära anpassningen i denna jämförelse. Datamängden innehåller inga extremt avvikande datapunkter, men ger ändå märkbara förskjutningar, se figur 4.2.



Figur 4.2: Linjär anpassning (rött) av data från samtliga ryska PNE:er i intervallet 20 – 150 kt. Faktiska datapunkter, samt anpassning (grönt). Observera dock att sistnämnda anpassning avser alla PNE:er, det vill säga även punkter utanför intervallet 20 – 150 kt.

### 4.3 Feluppskattning

För de fall då laddningsstyrka angetts som ett intervall utgår feluppskattningen från punktspridningen  $\sigma_{W,pi}$ , samt spridningen för uniform fördelning inom ett intervall, vilket ger

$$\sigma_{W,i} = \sqrt{\sigma_{W,pi}^2 + \frac{1}{12} (W_{\max,i} - W_{\min,i})^2}, \quad (4.8)$$

där andra termen är variansen för uniform fördelning inom ett intervall  $[W_{\min,i}, W_{\max,i}]$  [13]. Denna feluppskattning används alltså oavsett vilken metod – medelvärde eller linjär anpassning – som tillämpas för bestämning av laddningsstyrkan. För fallet linjär anpassning finns visserligen möjligheten att den verkliga laddningsstyrkan för ett fall där det framräknade värdet hamnar nära en intervallgräns verkligen ligger nära denna gräns, men några garantier för detta finns inte.

### 4.4 Resultat

För regionerna i tabell 2.1 är det bara inom områdena vid Nevada Test Site som många prov har laddningsstyrka angiven som intervall. För övriga områden är det inte meningsfullt att inkludera de få extra prov där laddningsstyrkan är angiven som intervall. Anpassningar inkluderande intervalldata gjorda med **fitexy** är redovisade i tabell 4.1 och 4.2. Ett exempel på resultat redovisas i figur 4.3.

Det är svårt att dra några långtgående slutsatser av de få anpassningar som gjorts, men metoden kan möjligen vara till nytta när ett fåtal prov med

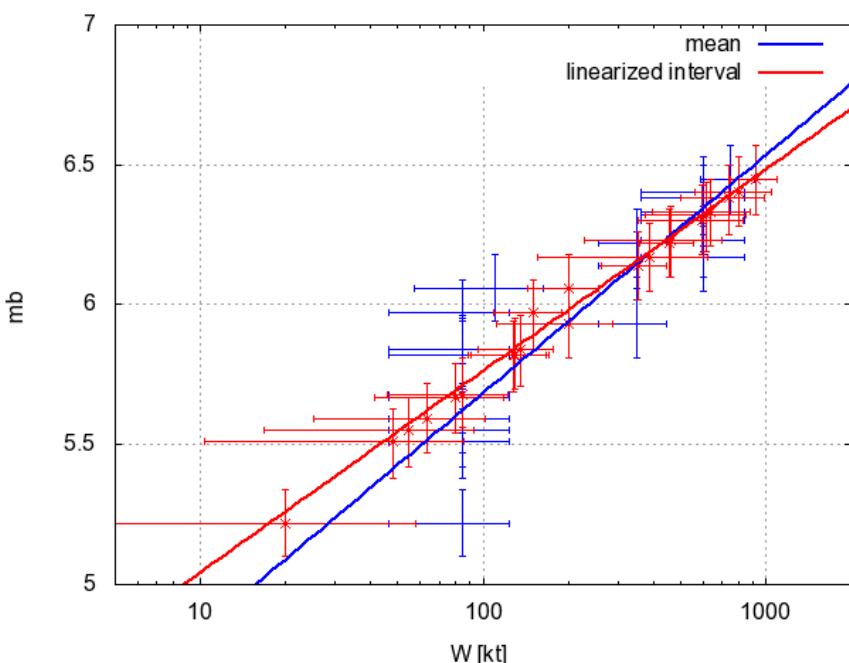
Tabell 4.1: Anpassningar av bulkmagnitud för olika regioner. Prov för vilka laddningsstyrkan angetts antingen med ett punktvärde eller ett intervall har utnyttjats. Intervall har hanterats genom att använda medelvärdet. För regioner där inga anpassningsparametrar redovisas är provdata otillräckliga, eller osäkerheten i anpassningen för stor.

Region Delområde	$N_p$	$N_i$	$m_1$	$m_b$	$k_b$	$Q$
<b>Nevada Test Site</b>						
Pahute Mesa	0	23	$3,98 \pm 0,27$	$0,85 \pm 0,11$	0,77	
Rainier Mesa	0	8	-	-	-	
Yucca Flats	3	50	-	-	-	

Tabell 4.2: Anpassningar av bulkmagnitud för olika regioner. Prov för vilka laddningsstyrkan angetts antingen med ett punktvärde eller ett intervall har utnyttjats. Intervall har hanterats genom använda linjär anpassning. För regioner där inga anpassningsparametrar redovisas är provdata otillräckliga, eller osäkerheten i anpassningen för stor.

Region Delområde	$N_p$	$N_i$	$m_1$	$m_b$	$k_b$	$Q$
<b>Nevada Test Site</b>						
Pahute Mesa	0	23	$4,32 \pm 0,23$	$0,72 \pm 0,09$	1,00	
Rainier Mesa	0	8	-	-	-	
Yucca Flats	3	50	$4,09 \pm 0,17$	$0,80 \pm 0,08$	0,96	

laddningsstyrka på punktform kompletteras med ett flertal intervallvärden.



Figur 4.3: Prov i Pahute Mesa. Anpassningar gjorda för data genererade enligt medelvärdesmetod (blått) och linjär anpassning (rött). Anpassningsparametrar framgår i tabell 4.1 och 4.2.



## 5 Diskussion

Anpassningar för olika provområden avseende detektioner vid den seismiska stationen i Hagfors har gjorts, och redovisas i avsnitt 3.2 ovan. Några preliminära iakttagelser och reflexioner från denna inventering är sammanfattade nedan.

- Magnituder som ligger påtagligt lägre än övriga skulle kunna förklaras med att någon form av frikoppling – antropogen eller naturlig – skett. Det är troligt att avsiktlig frikoppling kan göras effektivare för lägre laddningsstyrkor. Frågeställningen bör undersökas närmare, till exempel genom simulering av de fysikaliska processerna i det tidiga explosionsförloppet och källgenereringen.
- Det är tveksamt om data med laddningsstyrkan given på intervallform tillför någon användbar information i de fall som har analyserats. Om ett antal prov med laddningsstyrka angivna som punktdata finns, är det möjligt att flera prov med laddningsstyrka på intervallform kan vara till nytta.
- Godhetsvärdet  $Q \ll 1$  innebär antingen att hypotesen om en funktionsform enligt ekvation (3.3) och (3.4) inte håller, alternativt att osäkerheterna i laddningsstyrka och/eller magnitud är underskattade i denna studie.
- Det är möjligt att anpassningar på formen enligt ekvation (3.3) och (3.4) med olika anpassningsparametrar för olika intervall av laddningsstyrka kan motiveras på fysikaliska grunder. Detta har inte undersökts närmare i denna rapport.



# A Lista över kärnexplosioner

Nedan återges ett urval av data för alla kärnexplosioner till och med 2014. Listan beskrivs i avsnitt 2.4 ovan, och finns i sin helhet på den bifogade CD-skivan som filen **NuclearExplosions.xlsx**. Den näst sista kolumnen i utskriften nedan anger antal kärnladdningar i provet om detta är känt.

Angående urvalet av explosioner är några anmärkningar värd att göra.

- I [6] dubbelräknas alla brittiska prov vid Nevada Test Site som både brittiska och amerikanska. Det rör sig om alla brittiska prov från 1962 och framåt; inalles 24 prov.
- I [6, 14] saknas inalles tolv franska prov mellan 1966 och 1989. Dessa prov är förmodligen säkerhetsprov utan nämnvärd nuklear energifrigörelse.
- I [5, 6, 14] betraktas de två ryska proven 1974-01-30 (NOB ID 74001 och 74002) som ett och samma prov.
- I [7] förekommer ett flertal prov som förkastats, och som förmodligen är kavitetsskollapser eller liknande.
- Två prov saknas i [3]: dels ett ryskt prov 1972-06-07 samma dag som ett annat ryskt prov, och som både [5, 6] tar upp; dels den förmodade sydafrikansk-israeliska provsprängningen 1979-09-22.
- Två kinesiska prov (1979-02-02 och 1992-11-02), utöver de 45 som tas upp här, förekommer bara i [15] och har förkastats.

Date	Time	NOB ID	State	Site	Lat	Long	Series	Name	Arrangem	Explosion type	Wmin	Wmax	Height	Purpose	N	Lab
1945-07-16	11:29	45001	USA	Alamogordo	33.675	-106.475		Trinity	Tower	Surface burst	21	21	30	Weapons	1	LANL
1945-08-05	23:16	45002	USA	Hiroshima	34.22	132.25		Little Boy	Air drop	Air burst	12.5	12.5	600	Warfare	1	
1945-08-09	01:58	45003	USA	Nagasaki	32.48	129.53		Fat Man	Air drop	Air burst	22	22	600	Warfare	1	
1946-06-30	22:01	46001	USA	Bikini	11.35	165.2	Crossroads	Able	Air drop	Atmospheric	21	21	160	Effects	1	LANL/DoD
1946-07-24	21:35	46002	USA	Bikini	11.583	165.5	Crossroads	Baker	Barge	Underwater	21	21	-28	Effects	1	LANL/DoD
1948-04-14	18:17	48001	USA	Eniwetok Enjebi	11.3	162.15	Sandstone	X-ray	Tower	Atmospheric	37	37	60	Weapons	1	LANL
1948-04-30	18:09	48002	USA	Eniwetok Aomon I	11.3	162.15	Sandstone	Yoke	Tower	Atmospheric	49	49	60	Weapons	1	LANL
1948-05-14	18:04	48003	USA	Eniwetok Runit I	11.3	162.15	Sandstone	Zebra	Tower	Atmospheric	18	18	60	Weapons	1	LANL
1949-08-29	12:00	49001	Soviet	Semipalatinsk	48	76		Joe 1	Tower	Surface burst	22	22		Weapons	1	
1951-01-27	13:45	51001	USA	Nevada Area 5	37	-116	Ranger	Able	Air drop	Atmospheric	1	1	320	Weapons	1	LANL
1951-01-28	13:52	51002	USA	Nevada Area 5	37	-116	Ranger	Baker I	Air drop	Atmospheric	8	8	325	Weapons	1	LANL
1951-02-01	13:47	51003	USA	Nevada Area 5	37	-116	Ranger	Easy	Air drop	Atmospheric	1	1	325	Weapons	1	LANL
1951-02-02	13:49	51004	USA	Nevada Area 5	37	-116	Ranger	Baker II	Air drop	Atmospheric	8	8	330	Weapons	1	LANL
1951-02-06	13:47	51005	USA	Nevada Area 5	37	-116	Ranger	Fox	Air drop	Atmospheric	22	22	435	Weapons	1	LANL
1951-04-07	18:34	51006	USA	Eniwetak Runit I	11.556	162.354	Greenhouse	Dog	Tower	Atmospheric	81	81	90	Weapons	1	LANL
1951-04-20	18:26	51007	USA	Eniwetak Enjebi	11.669	162.24	Greenhouse	Easy	Tower	Atmospheric	47	47	90	Weapons	1	LANL
1951-05-08	21:30	51008	USA	Eniwetak Eberiru	11.627	162.315	Greenhouse	George	Tower	Atmospheric	225	225	60	Weapons	1	LANL
1951-05-24	17:17	51009	USA	Eniwetak Enjebi	11.673	162.249	Greenhouse	Item	Tower	Atmospheric	45.5	45.5	60	Weapons	1	LANL
1951-09-24	10:15	51010	Soviet	Semipalatinsk	48	76		Joe 2		Surface burst	38	38		Weapons	1	
1951-10-18	07:00	51011	Soviet	Semipalatinsk	48	76		Joe 3	Air drop	Air burst	42	42		Weapons	1	
1951-10-22	14:00	51012	USA	Nevada Area 7	37	-116	Buster	Able	Tower	Atmospheric	0	0.1	30	Weapons	1	LANL
1951-10-28	15:20	51013	USA	Nevada Area 7	37	-116	Buster	Baker	Air drop	Atmospheric	3.5	3.5	340	Weapons	1	LANL
1951-10-30	15:00	51014	USA	Nevada Area 7	37	-116	Buster	Charlie	Air drop	Atmospheric	14	14	340	Weapons	1	LANL
1951-11-01	15:30	51015	USA	Nevada Area 7	37	-116	Buster	Dog	Air drop	Atmospheric	21	21	430	Weapons	1	LANL
1951-11-05	16:30	51016	USA	Nevada Area 7	37.092	-116.024	Buster	Easy	Air drop	Atmospheric	31	31	400	Weapons	1	LANL
1951-11-19	17:00	51017	USA	Nevada Area 9	37	-116	Jangle	Sugar	Surface	Surface burst	1.2	1.2	1	Effects	1	LANL/DoD
1951-11-29	20:00	51018	USA	Nevada Area 10	37.168	-116.043	Jangle	Uncle		Cratering	1.2	1.2	-5	Effects	1	LANL/DoD
1952-04-01	17:00	52001	USA	Nevada Area 5	37	-116	Tumbler-Snapper Able	Air drop	Atmospheric	1	1	240	Effects	1	LANL/DoD	
1952-04-15	17:30	52002	USA	Nevada Area 7	37	-116	Tumbler-Snapper Baker	Air drop	Atmospheric	1	1	335	Effects	1	LANL/DoD	
1952-04-22	17:30	52003	USA	Nevada Area 7	37	-116	Tumbler-Snapper Charlie	Air drop	Atmospheric	31	31	1045	Various	1	LANL/DoD	
1952-05-01	16:30	52004	USA	Nevada Area 7	37	-116	Tumbler-Snapper Dog	Air drop	Air burst	19	19	315	Weapons	1	LANL	
1952-05-07	12:15	52005	USA	Nevada Area 1	37	-116	Tumbler-Snapper Easy	Tower	Atmospheric	12	12	90	Weapons	1	LANL	
1952-05-25	12:00	52006	USA	Nevada Area 4	37	-116	Tumbler-Snapper Fox	Tower	Atmospheric	11	11	90	Weapons	1	LANL	
1952-06-01	11:55	52007	USA	Nevada Area 3	37	-116	Tumbler-Snapper George	Tower	Atmospheric	15	15	90	Weapons	1	LANL	
1952-06-05	11:55	52008	USA	Nevada Area 2	37	-116	Tumbler-Snapper How	Tower	Atmospheric	14	14	90	Weapons	1	LANL	
1952-10-03	08:00	52009	UK	Monte Bello Isla	-20.4	115.57		Hurricane	Ship	Surface burst	25	25	1	Weapons	1	
1952-10-31	19:15	52010	USA	Eniwetok Elugelap	11.67	162.197	Ivy	Mike	Surface	Surface burst	10400	10400	1	Weapons	1	LANL
1952-11-15	23:30	52011	USA	Eniwetok Runit I	11.562	162.353	Ivy	King	Air drop	Atmospheric	500	500	450	Weapons	1	LANL
1953-03-17	13:20	53001	USA	Nevada Area 3	37	-116	Upshot-Knothole Annie	Tower	Atmospheric	16	16	90	Weapons	1	LANL	
1953-03-24	13:10	53002	USA	Nevada Area 4	37	-116	Upshot-Knothole Nancy	Tower	Atmospheric	24	24	90	Weapons	1	LANL	
1953-03-31	13:00	53003	USA	Nevada Area 7	37	-116	Upshot-Knothole Ruth	Tower	Atmospheric	0.2	0.2	90	Weapons	1	LLNL	
1953-04-06	15:30	53004	USA	Nevada Area 7	37	-116	Upshot-Knothole Dixie	Air drop	Atmospheric	11	11	1820	Weapons	1	LANL	
1953-04-11	12:45	53005	USA	Nevada Area 4	37	-116	Upshot-Knothole Ray	Tower	Atmospheric	0.2	0.2	30	Weapons	1	LLNL	
1953-04-18	12:35	53006	USA	Nevada Area 2	37	-116	Upshot-Knothole Badger	Tower	Atmospheric	23	23	90	Weapons	1	LLNL	



1957-04-16	57007	Soviet	Semipalatinsk	50	78		Air burst	320	320	Weapons	1	
1957-04-24	14:27	57053	USA	Nevada Nellis	37	-115 Project 57	57/1	Surface	Atmospheric	0	0	
1957-05-15	19:37	57008	UK	ChristmasMalden	-4	-155 Grapple	I	Air drop	Atmospheric	300	300	
1957-05-28	11:55	57009	USA	Nevada Area 7	37	-116 Plumbbob	Boltzmann	Tower	Atmospheric	12	12	
1957-05-31	19:41	57010	UK	ChristmasMalden	-4	-155 Grapple	II	Air drop	Atmospheric	720	720	
1957-06-02	11:55	57011	USA	Nevada Area 3	37	-116 Plumbbob	Franklin	Tower	Atmospheric	0.14	0.14	
1957-06-05	11:45	57012	USA	Nevada Area 9	37	-116 Plumbbob	Lassen	Balloon	Atmospheric	0.00050	0.0005	
1957-06-18	11:45	57013	USA	Nevada Area 9	37	-116 Plumbbob	Wilson	Balloon	Atmospheric	10	10	
1957-06-19	19:40	57014	UK	ChristmasMalden	-4	-155 Grapple	III	Air drop	Atmospheric	200	200	
1957-06-24	13:30	57015	USA	Nevada Area 5	37	-116 Plumbbob	Priscilla	Balloon	Atmospheric	37	37	
1957-07-01	17:30	57054	USA	Nevada Area 3	37	-116 Plumbbob	Coulomb-A	Surface	Atmospheric	0	0	
1957-07-05	11:40	57016	USA	Nevada Area 9	37	-116 Plumbbob	Hood	Balloon	Atmospheric	74	74	
1957-07-15	11:30	57017	USA	Nevada Area 2	37	-116 Plumbbob	Diablo	Tower	Atmospheric	17	17	
1957-07-19	14:00	57018	USA	Nevada Area 10	37	-116 Plumbbob	John	Missile	Atmospheric	1.7	1.7	
1957-07-24	11:50	57019	USA	Nevada Area 4	37	-116 Plumbbob	Kepler	Tower	Atmospheric	10	10	
1957-07-25	13:30	57020	USA	Nevada Area 9	37	-116 Plumbbob	Owens	Balloon	Atmospheric	9.7	9.7	
1957-07-26	08:00	57021	USA	Nevada Area 3	37	37.052 -116.034	Plumbbob	Pascal-A	Open sha	Underground	0.055	0.055
1957-08-07	12:25	57022	USA	Nevada Area 7	37	-116 Plumbbob	Stokes	Balloon	Atmospheric	19	19	
1957-08-10	01:00	57055	USA	Nevada Area 12	37.194	-116.034	Plumbbob	Saturn	Tunnel	Underground	0	0
1957-08-18	12:00	57023	USA	Nevada Area 2	37	-116 Plumbbob	Shasta	Tower	Atmospheric	17	17	
1957-08-22	12:50	57024	Soviet	Semipalatinsk	50	78		Air burst	520	520	Weapons	1
1957-08-23	12:30	57025	USA	Nevada Area 7	37	-116 Plumbbob	Doppler	Balloon	Atmospheric	11	11	
1957-08-26	12:00	57026	Soviet	Semipalatinsk	50	78		Air burst	0.1	0.1	Safety	1
1957-08-27	22:35	57027	USA	Nevada Area 3	37.049	-116.035	Plumbbob	Pascal-B	Open sha	Underground	0.3	0.3
1957-08-30	12:40	57028	USA	Nevada Area 7	37	-116 Plumbbob	Franklin P	Balloon	Atmospheric	4.7	4.7	
1957-08-31	12:30	57029	USA	Nevada Area 2	37	-116 Plumbbob	Smoky	Tower	Atmospheric	44	44	
1957-09-02	12:40	57030	USA	Nevada Area 1	37	-116 Plumbbob	Galileo	Tower	Atmospheric	11	11	
1957-09-06	12:45	57031	USA	Nevada Area 9	37	-116 Plumbbob	Wheeler	Balloon	Atmospheric	0.197	0.197	
1957-09-06	20:05	57032	USA	Nevada Area 3	37	-116 Plumbbob	Coulomb-B	Surface	Surface burst	0.3	0.3	
1957-09-07	08:00	57034	Soviet	Novaya Zemlya	70.69	54.8		Surface burst	32	32	Effects	1
1957-09-08	13:00	57033	USA	Nevada Area 7	37	-116 Plumbbob	Laplace	Balloon	Atmospheric	1	1	
1957-09-13	12:00	57035	Soviet	Semipalatinsk	50	78		Air burst	5.9	5.9	Weapons	1
1957-09-14	05:30	57036	UK	Maralinga	-30	131 Antler	Tadje	Tower	Atmospheric	1	1	
1957-09-14	16:45	57037	USA	Nevada Area 3	37	-116 Plumbbob	Fizeau	Tower	Atmospheric	11	11	
1957-09-16	12:50	57038	USA	Nevada Area 7	37	-116 Plumbbob	Newton	Balloon	Atmospheric	12	12	
1957-09-19	17:00	57039	USA	Nevada Area 12	37.196	-116.204	Plumbbob	Rainier	Tunnel	Underground	1.7	1.7
1957-09-23	12:30	57040	USA	Nevada Area 2	37	-116 Plumbbob	Whitney	Tower	Atmospheric	19	19	
1957-09-24	09:00	57041	Soviet	Novaya Zemlya	73	55		Air burst	1600	1600	Weapons	1
1957-09-25	00:30	57042	UK	Maralinga	-30	131 Antler	Biak	Tower	Atmospheric	6	6	
1957-09-26	05:00	57043	Soviet	Semipalatinsk	50	78		Air burst	13	13	Weapons	1
1957-09-28	13:00	57044	USA	Nevada Area 9	37	-116 Plumbbob	Charleston	Balloon	Atmospheric	12	12	
1957-10-06	08:58	57045	Soviet	Novaya Zemlya	73	55		Air burst	2900	2900	Weapons	1
1957-10-07	13:00	57046	USA	Nevada Area 9	37	-116 Plumbbob	Morgan	Balloon	Atmospheric	8	8	
1957-10-09	06:45	57047	UK	Maralinga	-30	131 Antler	Taranaki	Balloon	Atmospheric	25	25	
1957-10-10	06:55	57048	Soviet	Novaya Zemlya	70.7	54.56		Airburst	10	10	Effects	1
1957-11-08	17:47	57049	UK	Christmas Island	2	-157 Grapple	IV	Air drop	Atmospheric	1800	1800	
1957-12-06	22:15	57050	USA	Nevada Area 3	37.05	-116.032	Project 58	Pascal-C	Open sha	Underground	0	0
1957-12-09	20:00	57051	USA	Nevada Area 3	37	-116 Project 58	Coulomb-C	Surface	Surface burst	0.5	0.5	
1957-12-28	12:00	57052	Soviet	Semipalatinsk	50	78		Air burst	12	12	Weapons	1
1958-01-04	58001	Soviet	Semipalatinsk	50	78		Air burst	1.3	1.3	Weapons	1	
1958-01-17	58002	Soviet	Semipalatinsk	50	78		Air burst	0.5	0.5	Weapons	1	
1958-02-22	01:00	58003	USA	Nevada Area 12	37.113	-116.115	Project 58A	Venus	Tunnel	Underground	0	0.001
1958-02-23	58004	Soviet	Novaya Zemlya	73	55		Air burst	860	860	Weapons	1	
1958-02-27	07:59	58005	Soviet	Novaya Zemlya	73	55		Air burst	1500	1500	Weapons	1
1958-02-27	10:24	58006	Soviet	Novaya Zemlya	73	55		Air burst	250	250	Weapons	1
1958-03-13	58007	Soviet	Semipalatinsk	50	78		Air burst	1.2	1.2	Weapons	1	
1958-03-14	22:00	58010	USA	Nevada Area 12	37.113	-116.115	Project 58A	Uranus	Tunnel	Underground	0	0.001
1958-03-14	58008	Soviet	Novaya Zemlya	73	55		Air burst	40	40	Effects	1	
1958-03-14	58009	Soviet	Semipalatinsk	50	78		Air burst	35	35	Weapons	1	
1958-03-15	58011	Soviet	Semipalatinsk	50	78		Air burst	14	14	Weapons	1	
1958-03-18	58012	Soviet	Semipalatinsk	50	78		Air burst	0.16	0.16	Effects	1	
1958-03-20	58013	Soviet	Semipalatinsk	50	78		Air burst	12	12	Weapons	1	
1958-03-21	58014	Soviet	Novaya Zemlya	73	55		Air burst	650	650	Weapons	1	
1958-03-22	58015	Soviet	Semipalatinsk	50	78		Air burst	18	18	Weapons	1	
1958-04-28	02:40	58016	USA	Pacific Ocean	12.617	163.017	Newsreel (Hard	Yucca	Balloon	High altitude	1.7	1.7
1958-04-28	19:05	58017	UK	Christmas Island	2	-157 Grapple	V	Air drop	Atmospheric	3000	3000	
1958-05-08	18:15	58018	USA	Eniwetok	11.556	162.354	Hardtack I	Cactus	Surface	Surface burst	18	18
1958-05-11	17:50	58019	USA	Bikini	11.691	165.274	Hardtack I	Fir	Barge	Surface burst	1360	1360
1958-05-11	18:15	58020	USA	Eniwetok	11.541	162.351	Hardtack I	Butternut	Barge	Surface burst	81	81
1958-05-12	18:30	58021	USA	Eniwetok	11.675	162.206	Hardtack I	Koa	Surface	Surface burst	1370	1370
1958-05-16	01:30	58022	USA	Eniwetok	11.345	162.179	Hardtack I	Wahoo	Underwater	9	9	
1958-05-20	18:30	58023	USA	Eniwetok	11.544	162.356	Hardtack I	Holly	Barge	Surface burst	5.9	5.9
1958-05-21	21:20	58024	USA	Bikini	11.496	165.371	Hardtack I	Nutmeg	Barge	Surface burst	25.1	25.1
1958-05-26	02:00	58025	USA	Eniwetok	11.661	162.225	Hardtack I	Yellowwood	Barge	Surface burst	330	330
1958-05-26	18:00	58026	USA	Eniwetok	11.543	162.354	Hardtack I	Magnolia	Barge	Surface burst	57	57
1958-05-30	02:15	58027	USA	Eniwetok	11.663	162.23	Hardtack I	Tobacco	Barge	Surface burst	11.6	11.6
1958-05-31	03:00	58028	USA	Bikini	11.691	165.274	Hardtack I	Sycamore	Barge	Surface burst	92	92
1958-06-02	18:45	58029	USA	Eniwetok	11.541	162.352	Hardtack I	Rose	Barge	Surface burst	15	15
1958-06-08	18:15	58030	USA	Eniwetok	11.381	162.136	Hardtack I	Umbrella	Sea floo	Underwater	8	8
1958-06-10	17:30	58031	USA	Bikini	11.687	165.415	Hardtack I	Maple	Barge	Surface burst	213	213
1958-06-14	17:30	58032	USA	Bikini In crat	11.691	165.273	Hardtack I	Aspen	Barge	Surface burst	319	319
1958-06-14	18:30	58033	USA	Eniwetok	11.66	162.225	Hardtack I	Walnut	Barge	Surface burst	1450	1450
1958-06-18	03:00	58034	USA	Eniwetok	11.544	162.356	Hardtack I	Linden	Barge	Surface burst	11	11
1958-06-27	17:30	58035	USA	Bikini	11.687	165.415	Hardtack I	Redwood	Barge	Surface burst	412	412
1958-06-27	18:30	58036	USA	Eniwetok	11.663	162.23	Hardtack I	Elder	Barge	Surface burst	880	880
1958-06-28	18:30	58037	USA	Eniwetok	11.608	162.108	Hardtack I	Oak	Barge	Surface burst	8900	8900
1958-06-29	00:00	58038	USA	Bikini	11.496	162.371	Hardtack I	Hickory	Barge	Surface burst	14	14
1958-07-01	18:30	58039	USA	Eniwetok	11.544	162.356	Hardtack I	Sequoia	Barge	Surface burst	5.2	5.2
1958-07-02	17:30	58040	USA	Bikini	11.691	165.254	Hardtack I	Cedar	Barge	Surface burst	220	220
1958-07-05	18:30	58041	USA	Eniwetok	11.663	162.23	Hardtack I	Dogwood	Barge	Surface burst	397	397
1958-07-12	03:30	58042	USA	Bikini	11.688	165.264	Hardtack I	Poplar	Barge	Surface burst	9300	9300









































1995-12-27 21:30 95007	France	Mururoa	-21.8	-139.09		Themisto	Underground	10	40	Weapons development
1996-01-27 21:30 96001	France	Fangataufa	-22.27	-138.78	Xouthos	Underground	40	150	Weapons development	
1996-06-08 02:56 96002	China	Lop Nor	41.657	88.69		Underground	20	80	Weapons development	
1996-07-29 01:49 96003	China	Lop Nor	41.824	88.42		Underground	1	5	Weapons development	
1998-05-11 10:14 98001	India	Rajasthan	27.102	71.857	Shakti	I	Underground	5	20	Weapons 3
1998-05-13 06:45 98003	India	Rajasthan	27.07	71.7	Shakti	IV	Underground	0	1	Weapons 2
1998-05-28 10:16 98004	Pakistan	SW Pakistan	28.862	64.818		Underground	5	20	Weapons 5	
1998-05-30 06:55 98005	Pakistan	SW Pakistan	28.487	63.787		Underground	0	18	Weapons 1	
2006-10-09 01:35 06001	DPRK	Punggye-ri, Kilc	41.312	129.019		Tunnel	Underground	0.4	1.6	Weapons 1
2009-05-25 00:55 09001	DPRK	Punggye-ri, Kilc	41.311	129.046		Tunnel	Underground	2.3	9.2	Weapons 1
2013-02-12 02:58 13001	DPRK	Punggye-ri, Kilc	41.3	129.065		Tunnel	Underground	5	20	Weapons 1

## B Beräkningsrutiner för anpassningar

I detta avsnitt återges de beräkningsrutiner som används för anpassningarna i denna rapport. I tabell B.1 sammanfattas dessa, samt formaten för indatafiler.

Tabell B.1: Sammanställning av beräkningsrutiner och indatafiler.

Rutiner	
<code>prepareData.pl</code>	Läser angiven regionfil, Beräknar avståndet (i grader) mellan den seismiska stationen (vars koordinater är angivna i rutinen) och varje prov (hädanefter benämnda <i>event</i> ), Läser in P-faktorfil, Beräknar avståndskorrektion för $m_b$ och $M_s$ , Läser in parameterfiler för $m_b$ och $M_s$ , Läser in min och max för laddningsstyrka från lista över prov, Skriver ut en eventlista med all information.
<code>YieldMagnitude.pl</code>	Läser eventlista på format från <code>prepareData.pl</code> , Beräknar magnitud, eller använder eventuell angiven magnitud i brist på signalparametrar, Beräknar laddningsstyrka enligt angiven metod för intervallhantering, Beräknar feluppskattningar för magnitud och laddningsstyrka, Skriver ut värden: radnummer $i$ , ID, $W_i$ , $m_{b,i}$ , $M_{s,i}$ , $\sigma_{W,i}$ , $\sigma_{mb,i}$ och $\sigma_{Ms,i}$ .
<code>filePreparation.pl</code>	Konverterar data från <code>YieldMagnitude.pl</code> till ett format lämpligt för <code>mbWfit3.c</code> : $\log_{10} W$ , $m$ , $\sigma_{\log W}$ , och $\sigma_m$ för varje event, där $m$ är $m_b$ eller $M_s$ beroende på val.
<code>mbWfit3.c</code>	Läser data från <code>filePreparation.pl</code> , Anpassar dessa data till uttryckten 3.3 eller 3.4 genom att utnyttja rutinen <code>fitexy</code> från [11], Skriver ut anpassningsparametrar med felgränser, samt <i>goodness of fit</i> $Q$ för anpassningen.
Indata	
Regionfil	Tre kolumner: ID, latitud och longitud. Enheten för latitud och longitud är grader med decimaler (ej minuter och sekunder). Positiva värden avser nordlig latitud, respektive östlig longitud.
P-faktorfil	TVå kolumner: avstånd i grader och P-faktor.
Parameterfiler	Fyra kolumner: ID, amplitud ( <i>peak-to-peak</i> ) [nm], period [s], och magnitud. Värdet $-1$ anger att parametern saknas.
Lista över laddningsstyrkor	Tre kolumner: ID, minvärde och maxvärde för laddningsstyrka.

## B.1 prepareData.pl

```

#!/usr/bin/perl

use strict;
use warnings;

my $pi = 3.14159;

my $ARGC = @ARGV;
if ($ARGC != 1) {
    print "Specify the event file";
    exit;
}
my $eventFileName = $ARGV[0];

# Location of seismic station
my $latStation = 60.13;
my $longStation = 13.69;

# Data read from event file
my $N;      # Number of events
my @ID;    # Event ID
my @lat;   # Latitude of event
my @long; # Longitude of event
readEventFile($eventFileName);

# Calculate distance from events to seismic station
my @dist; # Distance [degrees]
calcDistance();

# Data read from distance correction factor file for mb
my $Nf;    # Number of distance correction factors
my @d;     # Distance [degrees]
my @df;   # Distance correction factor, mb
readFactorFile("P-factors.txt");

# Calculate distance corrections of magnitudes for each event
my @corrmb; # Distance correction, mb
my @corrMs; # Distance correction, Ms
calcCorrection();

# Data read from station parameter files
my @OK;      # Flag, event found
my @ampmb;  # Amplitude, mb
my @permb;  # Period, mb
my @filemb; # Magnitude in file, mb
my @ampMs;  # Amplitude, Ms
my @perMs;  # Period, Ms
my @fileMs; # Magnitude in file, Ms
my @amp;     # Amplitude, tmp
my @per;    # Period, tmp
my @magn;   # Magnitude in file, tmp
readStationParameterFiles();

```

```

# Yields read from file
my @Wmin; # Minimum yield of event [kt]
my @Wmax; # Maximum yield of event [kt]
readYieldFile("Yields.txt");
#readYieldFile("data-original/Yields-from-NOB-lista.txt");

# Event output
printEventList();
cleanUp();

# Subroutine declarations #####
#####

sub readEventFile {
    my ($fileName) = @_;
    my $nLine = 0;
    my $line;

    $N = 0;
    if ( -e $fileName ) {
        my $infile;
        open ($infile, "<", $fileName);
        for (;;) {
            # Read line from input file, checking for file end, etc.
            undef $!;
            unless (defined( $line = readline ($infile) )) {
                die $! if $!;
                last; # reached EOF
            }

            # Split the line into a list of separate items
            my @tmpList = split (" ", $line);
            my $len = @tmpList;

            # Extract data, skipping first line
            unless (!$nLine) {
                if (($len == 3) && ($tmpList[0] =~ /\d/)) {
                    $ID[$N] = $tmpList[0];
                    $lat[$N] = $tmpList[1];
                    $long[$N] = $tmpList[2];
                    $N++;
                }
            }
            $nLine++;
        }
        close ($infile);
    }
    else {
        print "File " . $fileName . " does not exist";
        exit;
    }
}

```

```

sub readFactorFile {
    my ($fileName) = @_;
    my $nLine = 0;
    my $line;

    $Nf = 0;
    if ( -e $fileName) {
        my $infile;
        open ($infile, "<", $fileName);
        for (;;) {
            # Read line from input file, checking for file end, etc.
            undef $!;
            unless (defined( $line = readline ($infile) )) {
                die $! if $!;
                last; # reached EOF
            }

            # Split the line into a list of separate items
            my @tmpList = split (" ", $line);
            my $len = @tmpList;

            # Extract data, skipping first line
            unless (! $nLine) {
                if (($len == 2) && ($tmpList[0] =~ /\d/)) {
                    $d[$Nf] = $tmpList[0];
                    $df[$Nf] = $tmpList[1];
                    $Nf++;
                }
            }
            $nLine++;
        }
        close ($infile);
    }
    else {
        print "File " . $fileName . " does not exist";
        exit;
    }
}

sub readStationParameterFiles {
    my @tmpOK;
    readStationParameterFile("HFS-parametrar-mb.txt");
    for (my $i=0; $i<$N; $i++) {
        if ($OK[$i]) {
            $ampmb[$i] = $amp[$i];
            $permmb[$i] = $per[$i];
            $filemb[$i] = $magn[$i];
        }
        else {

```

```

        $ampmb[$i] = -1;
        $permbs[$i] = -1;
        $filemb[$i] = -1;
    }
    $tmpOK[$i] = $OK[$i];
}
readStationParameterFile("HFS-parametrar-Ms.txt");
for (my $i=0; $i<$N; $i++) {
    if ($OK[$i]) {
        $ampMs[$i] = $amp[$i];
        $perMs[$i] = $per[$i];
        $fileMs[$i] = $magn[$i];
    }
    else {
        $ampMs[$i] = -1;
        $perMs[$i] = -1;
        $fileMs[$i] = -1;
    }
    if ($tmpOK[$i] != $OK[$i]) {
        print "Difference between mb and Ms station data (strange!)\n";
    }
}
}

```

```

sub readStationParameterFile {
    my ($fileName) = @_;
    my $nLine = 0;
    my $line;

    for (my $i=0; $i<$N; $i++) { $OK[$i] = 0; }

    if ( -e $fileName) {
        my $infile;
        open ($infile, "<", $fileName);
        for (;;) {
            # Read line from input file, checking for file end, etc.
            undef $!;
            unless (defined( $line = readline ($infile) )) {
                die $! if $!;
                last; # reached EOF
            }

            # Split the line into a list of separate items
            my @tmplist = split (" ", $line);
            my $len = @tmplist;

            # Extract data, skipping first line
            unless (!$nLine) {
                if (($len == 4) && ($tmplist[0] =~ /\d/)) {
                    my $id = $tmplist[0];
                    for (my $i=0; $i<$N; $i++) {
                        if ($id == $ID[$i]) {

```

```

                $OK[$i]++;
                $amp[$i] = $tmpList[1];
                $per[$i] = $tmpList[2];
                $magn[$i] = $tmpList[3];
            }
            if ($OK[$i] > 1) {
                print "Multiple event $ID[$i]\n";
            }
        }
    }
    $nLine++;
}
close ($infile);
}
else {
    print "File " . $fileName . " does not exist";
    exit;
}
}

sub checkYieldFile {
my ($fileName) = @_;
my $nLine = 0;
my $line;
my %qwe;

my @okl; # Local OK flag
for (my $i=0; $i<$N; $i++) { $okl[$i] = 0; }

if ( -e $fileName) {
    my $infile;
    open ($infile, "<", $fileName);
    for (;;) {
#        Read line from input file, checking for file end, etc.
        undef $!;
        unless (defined( $line = readline ($infile) )) {
            die $! if $!;
            last; # reached EOF
        }

#        Split the line into a list of separate items
        my @tmpList = split (" ", $line);
        my $len = @tmpList;

#        Extract data, skipping first line
        unless (! $nLine) {
            if (($len == 3) && ($tmpList[0] =~ /\d/)) {
                my $id = $tmpList[0];
                if ( exists $qwe{$id} ) {
                    print "Multiple $id\n";
                }
            }
        }
    }
}

```

```

        else {
            $qwe{$id} = 1;
        }
    }
    $nLine++;
}
close ($infile);
}
else {
    print "File " . $fileName . " does not exist";
    exit;
}
}

sub readYieldFile {
    my ($fileName) = @_;
    my $nLine = 0;
    my $line;

    my @okl; # Local OK flag
    for (my $i=0; $i<$N; $i++) { $okl[$i] = 0; }

    if ( -e $fileName) {
        my $infile;
        open ($infile, "<", $fileName);
        for (;;) {
#           Read line from input file, checking for file end, etc.
            undef $!;
            unless (defined( $line = readline ($infile) )) {
                die $! if $!;
                last; # reached EOF
            }

#           Split the line into a list of separate items
            my @tmpList = split (" ", $line);
            my $len = @tmpList;

#           Extract data, skipping first line
            unless (!$nLine) {
                if (($len == 3) && ($tmpList[0] =~ /\d/)) {
                    my $id = $tmpList[0];
                    for (my $i=0; $i<$N; $i++) {
                        if ($id == $ID[$i]) {
                            $okl[$i]++;
                            $Wmin[$i] = $tmpList[1];
                            $Wmax[$i] = $tmpList[2];
                        }
                        elsif ($okl[$i] > 1) {
                            print "Multiple event $ID[$i]\n";
                        }
                    }
                }
            }
        }
    }
}

```

```
        }
    }
    $nLine++;
}
close ($infile);
# Check missing events.
for (my $i=0; $i<$N; $i++) {
    if ($okl[$i] < 1) {
        $Wmin[$i] = -1;
        $Wmax[$i] = -1;
        print "Event $ID[$i] missing in list file\n";
    }
}
else {
    print "File " . $fileName . " does not exist";
    exit;
}
}

sub printEventList {
my $R_earth = 6367;
my $deg_to_km = 2*3.14159*$R_earth / 360;

print " # ID      lat      long      dist [deg,km]";
print " mb: corr      amp per      magn";
print " Ms: corr      amp per      magn";
print "     Wmin      Wmax\n";
for (my $i=0; $i<$N; $i++) {
    my $dist_km = $dist[$i]*$deg_to_km;
    printf "%3d %5d", $i, $ID[$i];
    printf " %7.2f %7.2f", $lat[$i], $long[$i];
    printf " %7.2f %7.1f", $dist[$i], $dist_km;
    printf " %7.3f %6.0f %6.3f %6.2f",
    $corrmb[$i], $ampmb[$i], $permrb[$i], $filemb[$i];
    printf " %7.3f %6.0f %6.3f %6.2f",
    $corrMs[$i], $ampMs[$i], $perMs[$i], $fileMs[$i];
    printf " %8.2f %8.2f", $Wmin[$i], $Wmax[$i];
    if ($Wmax[$i] < 0) {
        print " (missing in nuclear test list)\n";
    }
    elsif (!$OK[$i]) {
        print " (missing in station parameter file)\n";
    }
    else {
        print "\n";
    }
}
}
```

```

sub cleanUp {
# Remove temporary files
my @fileList = ( ".gmtcommands4", "grid.out", "point.dat" );
unlink @fileList;
}

# Calculation subroutine declarations

sub calcDistance {
# Grid region (should cover seismic station and all events):
my $longWest = $longStation -135;
my $longEast = $longStation +120;
my $latNorth = 90;
my $latSouth = $latStation -90;
my $deltaLong = $longEast - $longWest;
my $deltaLat = $latNorth - $latSouth;

# Define region (-R)
my $mapRegion = "/" . $longWest . "/" . $longEast . "/" .
    $latSouth . "/" . $latNorth;

# Set grid resolution (-I)
my $longResolution = $deltaLong/500;
my $latResolution = $deltaLat/500;
my $resolution = $longResolution . "/" . $latResolution;

# Create spherical distance grid centered at seismic station
my $exe = "grdmath -R$mapRegion -I$resolution " .
    "$longStation $latStation SDIST = grid.out";
system ($exe);

# Find distances from events to seismic station
for (my $i=0; $i<$N; $i++) {
    open(TMPOUT, ">", "point.dat");
    print TMPOUT "$long[$i] $lat[$i]";
    close(TMPOUT);

    $exe = "grdtrack point.dat -Ggrid.out";
    my $res = qx($exe);
    my @tmpList = split (" ", $res);
    my $len = @tmpList;
    if ($len == 3) { $dist[$i] = $tmpList[2]; }
}
}
}

```

```
sub calcCorrection {
    for (my $i=0; $i<$N; $i++) {
        # Determine distance correction factor, mb
        my $j;
        for ($j=0; $j<$Nf; $j++) {
            if ($dist[$i] <= $d[$j]) { last; }
        }
        $corrmb[$i] = $df[$j-1] +
                      ($dist[$i] - $d[$j-1]) *
                      ($df[$j] - $df[$j-1]) /
                      ($d[$j] - $d[$j-1]);

        # Determine distance correction factor, Ms
        $corrMs[$i] =
            0.3333*log10($dist[$i]) +
            0.5*log10(sin($dist[$i]*$pi/180)) +
            0.0046*$dist[$i] +
            2.370;
    }
}

sub log10 {
    my ($x) = @_;
    return log($x)/log(10);
}
```

## B.2 YieldMagnitude.pl

```

#!/usr/bin/perl

use strict;
use warnings;

my $ARGC = @ARGV;
if ($ARGC != 2) {
    print "Specify the event file name and method for yield intervals";
    exit;
}
# Methods for treatment of yield intervals
# 0: Only using point data (dW/W <= 10%)
# 1: W set to mean value of interval
# 2: W set according to linear assumption
my $eventFileName = $ARGV[0];
my $yieldIntervalMethod = $ARGV[1];

# Read data from file
my $N;          # Number of events
my @ID;         # Event ID
my @lat;        # Latitude of event
my @long;       # Longitude of event
my @dist;       # Distance [degrees]
my @distkm;     # Distance [km]
my @corrmb;     # Distance correction, mb
my @ampmb;      # Amplitude, mb
my @permb;      # Period, mb
my @filemb;     # Magnitude in file, mb
my @corrMs;     # Distance correction, Ms
my @ampMs;      # Amplitude, Ms
my @perMs;      # Period, Ms
my @fileMs;     # Magnitude in file, Ms
my @Wmin;       # Minimum yield of event
my @Wmax;       # Maximum yield of event
readFile($eventFileName);
#printEventList();
#exit;

# Magnitude calculation
my @mb;          # Magnitude mb
my @Ms;          # Magnitude Ms
calcMagnitudes();

# Yield calculation
my @W;           # Yield [kt]
calcYield();

# Error estimates
my $dWrelP = 0.1;    # dW/W estimate (point)
my $dampmbrel = 0.2; # dA/A estimate, mb
my $dpermbrel = 0.2; # dT/T estimate, mb
my $dmb = 0.5;       # dmb estimate (calculation procedure unknown)

```

```

my $dampMsrel = 0.2; # dA/A estimate, Ms
my $dperMsrel = 0.2; # dT/T estimate, Ms
my $dMs = 0.5;       # dMs estimate (calculation procedure unknown)
my @sigW;           # Error estimate for W
my @sigmb;          # Error estimate for mb
my @sigMs;          # Error estimate for Ms
calcSig();
printYieldMagnitude();

# Subroutine declarations #####
# I/O subroutine declarations

sub readFile {
    my ($fileName) = @_;
    my $nLine = 0;
    my $line;

    $N = 0;
    if ( -e $fileName) {
        my $infile;
        open ($infile, "<", $fileName);
        for (;;) {
            # Read line from input file, checking for file end, etc.
            undef $!;
            unless (defined( $line = readline ($infile) )) {
                die $! if $!;
                last; # reached EOF
            }

            # Split the line into a list of separate items
            my @tmpList = split (" ", $line);
            my $len = @tmpList;

            # Extract data, skipping first line
            unless (! $nLine) {
                $ID[$N] = $tmpList[1];
                $lat[$N] = $tmpList[2];
                $long[$N] = $tmpList[3];
                $dist[$N] = $tmpList[4];
                $distkm[$N] = $tmpList[5];
                $corrmb[$N] = $tmpList[6];
                $ampmb[$N] = $tmpList[7];
                $permb[$N] = $tmpList[8];
                $filemb[$N] = $tmpList[9];
                $corrMs[$N] = $tmpList[10];
                $ampMs[$N] = $tmpList[11];
                $perMs[$N] = $tmpList[12];
                $fileMs[$N] = $tmpList[13];
                $Wmin[$N] = $tmpList[14];
                $Wmax[$N] = $tmpList[15];
                $N++;
            }
        }
    }
}

```

```

        }
        $nLine++;
    }
    close ($infile);
}
}

sub printEventList {
    print " # ID      lat      long     dist [deg,km]";
    print "   mb: corr      amp per      magn";
    print "   Ms: corr      amp per      magn";
    print "           Wmin      Wmax\n";
    for (my $i=0; $i<$N; $i++) {
        printf "%3d %5d", $i, $ID[$i];
        printf " %7.2f %7.2f", $lat[$i], $long[$i];
        printf " %7.2f %7.1f", $dist[$i], $distkm[$i];
        printf "      %7.3f %6.0f %6.3f %6.2f",
        $corrmb[$i], $ampmb[$i], $permmb[$i], $filemb[$i];
        printf "      %7.3f %6.0f %6.3f %6.2f",
        $corrMs[$i], $ampMs[$i], $perMs[$i], $fileMs[$i];
        printf "      %8.2f %8.2f\n", $Wmin[$i], $Wmax[$i];
    }
}

sub printYieldMagnitude {
    print " # ID          W          mb          Ms";
    print "       sigW      sigmb      sigMs\n";
    for (my $i=0; $i<$N; $i++) {
        printf "%3d %5d", $i, $ID[$i];
        printf "      %7.3f", $W[$i];
        printf "      %7.3f", $mb[$i];
        printf "      %7.3f", $Ms[$i];
        printf "      %7.3f", $sigW[$i];
        printf "      %7.3f", $sigmb[$i];
        printf "      %7.3f", $sigMs[$i];
        # Diagnostic output
        if ($Wmax[$i] < 0) {
            print " no W";
        }
        elsif ($W[$i] < 0) {
            print " no point W";
        }
        if (($ampmb[$i] > 0) && ($permmb[$i] > 0)) {
            # NOP
        }
        elsif ($filemb[$i] > 0) {
            print " mb from file";
        }
        else {
            print " no mb";
        }
    }
}

```

```

        }
        if (($ampMs[$i] > 0) && ($perMs[$i] > 0)) {
            print "\n";
        }
        elsif ($fileMs[$i] > 0) {
            print "    Ms from file\n";
        }
        else {
            print "    no Ms\n";
        }
    }
}

# Calculation subroutine declarations

sub calcYield {

    if ($yieldIntervalMethod == 0) {
        # Only using point data (dW/W <= 10%)
        for (my $i=0; $i<$N; $i++) {
            if ($Wmax[$i] < 0) {
                # No yield in nuclear test list
                $W[$i] = -1;
            }
            else {
                $W[$i] = 0.5*($Wmin[$i] + $Wmax[$i]);
                # Reject events with yield interval
                if (($Wmax[$i] - $Wmin[$i]) > 0.1*$W[$i]) {
                    $W[$i] = -1;
                }
            }
        }
    }

    elsif ($yieldIntervalMethod == 1) {
        # Mean value
        for (my $i=0; $i<$N; $i++) {
            if ($Wmax[$i] < 0) {
                # No yield in nuclear test list
                $W[$i] = -1;
            }
            else {
                $W[$i] = 0.5*($Wmin[$i] + $Wmax[$i]);
            }
        }
    }

    elsif ($yieldIntervalMethod == 2) {
        # Linear fit
        my $Nint=0; # Number of events with yield interval
        my @iint;   # Index for events with yield interval
        my @xint;   # x-values for interval fit
    }
}

```

```

my @yint;    # y-values for interval fit
my $xm=0;    # Mean x for interval fit
my $ym=0;    # Mean y for interval fit

for (my $i=0; $i<$N; $i++) {
    my $magn = $mb[$i];
    my $magn = $Ms[$i];
    if ($Wmax[$i] < 0) {
        # No yield in nuclear test list
        $W[$i] = -1;
    }
    elsif ($magn < 0) {
        # No magnitude for this event: do not include among interval events.
        $W[$i] = $Wmin[$i];
    }
    elsif ($Wmax[$i] - $Wmin[$i] < 0.01) {
        $W[$i] = $Wmin[$i];
    }
    else {
        $iint[$Nint] = $i;
        $xint[$Nint] = log10(0.5*($Wmin[$i] + $Wmax[$i]));
        $yint[$Nint] = $magn;
        $xm += $xint[$Nint];
        $ym += $yint[$Nint];
        $Nint++;
    }
}

# Determine a best fit for yield for events with yield interval
if ($Nint) {
    if ($Nint == 1) {
        # Just one event with yield interval
        my $i = $iint[0];
        $W[$i] = 0.5*($Wmin[$i] + $Wmax[$i]);
    }
    else {
        $xm /= $Nint;
        $ym /= $Nint;
        my $sum1=0;
        my $sum2=0;
        for (my $i=0; $i<$Nint; $i++) {
            $sum1 += ($xint[$i] - $xm) * $yint[$i];
            $sum2 += ($xint[$i] - $xm)**2;
        }

        if ($sum2 == 0) {
            # Will happen for identical yields.
            # In that case, use mean.
            for (my $i=0; $i<$Nint; $i++) {
                $W[$iint[$i]] =
                    0.5*($Wmin[$iint[$i]] + $Wmax[$iint[$i]]);
            }
        }
        else {
    }
}

```

```

        my $k = $sum1/$sum2;
        my $m1 = $ym - $k*$xm;
        for (my $i=0; $i<$Nint; $i++) {
            my $magn = $mb[$iint[$i]];
            my $magn = $Ms[$iint[$i]];
            $W[$iint[$i]] = 10**((($magn - $m1)/$k));
            if ($W[$iint[$i]] < $Wmin[$iint[$i]]) {
                $W[$iint[$i]] = $Wmin[$iint[$i]];
            }
            elsif ($W[$iint[$i]] > $Wmax[$iint[$i]]) {
                $W[$iint[$i]] = $Wmax[$iint[$i]];
            }
        }
    }
}

else {
    print "Unknown mode of yield calculation: $yieldIntervalMethod\n";
}
}

sub calcMagnitudes {
    for (my $i=0; $i<$N; $i++) {
        # Magnitude mb
        if (($ampmb[$i] > 0) && ($permb[$i] > 0)) {
            # Calculate magnitude mb
            $mb[$i] = log10( $ampmb[$i]/$permb[$i] ) + $corrmb[$i];
        }
        elsif ($filemb[$i] > 0) {
            # Use magnitude mb from file
            $mb[$i] = $filemb[$i];
        }
        else {
            $mb[$i] = -1;
        }

        # Magnitude Ms
        if (($ampMs[$i] > 0) && ($perMs[$i] > 0)) {
            # Calculate magnitude Ms
            $Ms[$i] = log10( $ampMs[$i]/$perMs[$i] ) + $corrMs[$i];
        }
        elsif ($fileMs[$i] > 0) {
            # Use magnitude Ms from file
            $Ms[$i] = $fileMs[$i];
        }
        else {
            $Ms[$i] = -1;
        }
    }
}

```

```

sub calcSig {
    # Error estimate, yield (same for all yield methods)
    # Point error estimate + uniform distribution
    for (my $i=0; $i<$N; $i++) {
        if ($Wmax[$i] > 0) {
            $sigW[$i] = sqrt(
                $W[$i]*$W[$i]*$dWrelP*$dWrelP
                + ($Wmax[$i] - $Wmin[$i])*( $Wmax[$i] - $Wmin[$i])/12);
        }
        else {
            $sigW[$i] = -1;
        }
    }

    # Error estimate, magnitudes
    for (my $i=0; $i<$N; $i++) {
        # Magnitude mb
        if (($ampmb[$i] > 0) && ($permmb[$i] > 0)) {
            # Calculated magnitude mb: use error propagation
            $sigmb[$i] = sqrt($dampmbrel*$dampmbrel +
                $dpermmbrel*$dpermmbrel)/log(10);
        }
        elsif ($filemb[$i] > 0) {
            # Magnitude mb from file: use magnitude error estimate
            $sigmb[$i] = $dmb;
        }
        else {
            $sigmb[$i] = -1;
        }

        # Magnitude Ms
        if (($ampMs[$i] > 0) && ($perMs[$i] > 0)) {
            # Calculated magnitude Ms: use error propagation
            $sigMs[$i] = sqrt($dampMsrel*$dampMsrel +
                $dperMsrel*$dperMsrel)/log(10);
        }
        elsif ($fileMs[$i] > 0) {
            # Magnitude Ms from file: use magnitude error estimate
            $sigMs[$i] = $dMs;
        }
        else {
            $sigMs[$i] = -1;
        }
    }
}

sub log10 {
    my ($x) = @_;
    return log($x)/log(10);
}

```

### B.3 filePreparation.pl

```

#!/usr/bin/perl

use strict;
use warnings;

my $ARGC = @ARGV;
if ($ARGC != 2) {
    print "Specify the magnitude type and fitting method";
    exit;
}
# Magnitude types
# 1: mb
# 2: Ms
# Fiting methods
# 2: fit
# 3: fitexy
my $magn = $ARGV[0];
my $fit = $ARGV[1];

# Data read from file
my $N;          # Number of events
my @ID;         # Event ID
my @W;          # Yield [kt]
my @m;          # Magnitude
my @sigW;       # Error estimate for W
my @sigm;       # Error estimate for m
readFile();
#printYieldMagnitude();

# Write file suitable for NR routine
open (TMPOUT, ">", "data.dat");
print TMPOUT "$N\n";
for (my $i=0; $i<$N; $i++) {
    my $logW = log10($W[$i]);
    if ($fit == 2) {
        my $k = 1; # Slope ansatz for error estimation only
        my $dW = $k*$sigW[$i]/(log(10)*$W[$i]);
        my $sig = sqrt($sigm[$i]*$sigm[$i] + $dW*$dW);
        print TMPOUT "$logW $m[$i] $sig\n";
    }
    elsif ($fit == 3) {
        my $siglogW = $sigW[$i]/(log(10)*$W[$i]);
        print TMPOUT "$logW $m[$i] $siglogW $sigm[$i]\n";
    }
    else {
        print "Unknown fitting method: $fit\n";
    }
}
close (TMPOUT);

```

```

sub readFile {
    my ($fileName) = "tmp";
    my $nLine = 0;
    my $line;

    $N = 0;
    if ( -e $fileName ) {
        my $infile;
        open ($infile, "<", $fileName);
        for (;;) {
            # Read line from input file, checking for file end, etc.
            undef $!;
            unless (defined( $line = readline ($infile) )) {
                die $! if $!;
                last; # reached EOF
            }

            # Split the line into a list of separate items
            my @tmplist = split (" ", $line);
            my $len = @tmplist;

            # Extract data, skipping first line
            unless (!$nLine) {
                my $tmpW = $tmplist[2];
                my $tmpm;
                my $tmpsigm;
                if ($magn == 1) {
                    $tmpm = $tmplist[3];
                    $tmpsigm = $tmplist[6];
                }
                elsif ($magn == 2) {
                    $tmpm = $tmplist[4];
                    $tmpsigm = $tmplist[7];
                }
                else {
                    print "Unknown magnitude type: $magn\n";
                }
                if (($tmpW > 0) && ($tmpm > 0)) {
                    $ID[$N] = $tmplist[1];
                    $W[$N] = $tmpW;
                    $m[$N] = $tmpm;
                    $sigW[$N] = $tmplist[5];
                    $sigm[$N] = $tmpsigm;
                    $N++;
                }
            }
            $nLine++;
        }
        close ($infile);
    }
}

```

```
sub printYieldMagnitude {
    print " # ID           W           m";
    print "           sigW         sigm\n";
    for (my $i=0; $i<$N; $i++) {
        printf "%3d %5d", $i, $ID[$i];
        printf "      %7.3f", $W[$i];
        printf "      %7.3f", $m[$i];
        printf "      %7.3f", $sigW[$i];
        printf "      %7.3f\n", $sigm[$i];
    }
}

sub log10 {
    my ($x) = @_;
    return log($x)/log(10);
}
```

## B.4 mbWfit3.c

```

using namespace std;
#include <stdio.h>
#include <iostream>
#include <fstream>
#include "nr.h"
#include "nrutil.h"

main()
{
    ifstream infile;
    double *logW,*mb,*siglogW,*sigmb,L,k,sigL,sigk,chi2,q;
    int n;
    char str[128];

    infile.open("data.dat");
    if (!infile) {
        printf("Error opening input file data.dat\n");
        return(1);
    }
    infile >> n;
    logW=vector(1,n);
    mb=vector(1,n);
    siglogW=vector(1,n);
    sigmb=vector(1,n);
    for (int i=1; i<=n; i++) {
        infile >> logW[i] >> mb[i] >> siglogW[i] >> sigmb[i];
    }
    infile.close();

    fitexy(logW,mb,n,siglogW,sigmb,&L,&k,&sigL,&sigk,&chi2,&q);

    printf("mb = %f(+-%f) + %f(+-%f) * log_10(W)\n", L, sigL, k, sigk);
    printf("chi^2 = %f, q = %f\n", chi2, q);
}

```



## Litteraturförteckning

- [1] P. Wessel et al. Generic Mapping Tools. <http://gmt.soest.hawaii.edu>, 2006.
- [2] K. F. Veith and G. E. Clawson. Magnitude of Short-period P Wave Data. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 62:435–452, 1972.
- [3] N.-O. Bergkvist and R. Ferm. Nuclear Explosions 1945 - 1998. FOA rapport FOA-R-00-01572-180-SE, 2000.
- [4] Department of Energy. United States Nuclear Tests - July 1945 through September 1992. DOE/NV-209-REV 15; tillgänglig på DVD:n 'Trinity and Beyond', 2000.
- [5] MinAtom. USSR Nuclear Weapons Tests and Peaceful Nuclear Explosions. (Nedladdad), 1996.
- [6] Geoscience Australia. Nuclear Explosions Database. <http://www.ga.gov.au/oracle/nuclear-explosion.jsp>, 2015.
- [7] Oklahoma Geological Survey. Oklahoma Geological Survey Nuclear Explosion Catalog. <http://www.okgeosurvey1.gov/level2/nuke.cat.index.html>, 2006.
- [8] O. Dahlman and H. Israelson. *Monitoring Underground Nuclear Explosions*. Elsevier, 1977.
- [9] P. W. Basham and R. B. Horner. Seismic Magnitudes of Underground Nuclear Explosions. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 63:105–131, 1973.
- [10] J. R. Murphy. Seismic Source Functions and Magnitude Determinations for Underground Nuclear Explosions. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 67:135–158, 1977.
- [11] W. H. Press et al. *Numerical Recipes in C – The Art of Scientific Computing (2nd edition)*. Cambridge University Press, 1992.
- [12] F. Ringdal, P. D. Marshall, and R. W. Alewine. Seismic yield determination of Soviet underground nuclear explosions at the Shagan River test site. *Geophys. J. Int.*, 109, 1992.
- [13] M. Goliath. Kärnvapenverkan i mål – Användarhandledning till ett beräkningsprogram för kvantitativ analys. FOI rapport FOI-R-3313-SE, 2011.
- [14] X. Yang et al. Worldwide Nuclear Explosions. In *International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology*. Academic press, 2002.
- [15] V. N. Mikhailov. Catalog of Worldwide Nuclear Testing. Finns tillgänglig vid Nuclear Weapons Archive, <http://nuclearweaponarchive.org>, 1994.



FOI  
Totalförsvarets forskningsinstitut  
164 90 Stockholm

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

[www.foi.se](http://www.foi.se)

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