

|                |                       |
|----------------|-----------------------|
| <b>B06-101</b> | <b>Beräkningsstöd</b> |
|                | <b>Arkivbomb</b>      |

Författare: Joosef Leppänen. Ansvarig utgivare: Björn Ekengren.

|   |          |
|---|----------|
| <b>1 Orientering</b>                            | <b>1</b> |
| 1.1 Samlingsdokument                            | 1        |
| 1.2 Om detta dokument                           | 1        |
| <b>2 Definition och last från arkivbomb</b>     | <b>2</b> |
| 2.1 Stötvågsbelastning                          | 2        |
| 2.2 Splitterbelastning                          | 4        |
| <b>3 Bakgrund till framtagning av arkivbomb</b> | <b>6</b> |
| 3.1 Riskanalys                                  | 6        |
| 3.2 Stötvågsbelastning                          | 8        |
| 3.3 Splitterbelastning                          | 8        |

## 1 Orientering

### 1.1 Samlingsdokument

För allmän information om MSB:s kunskapsdokument i serien Beräkning av impulsbelastade konstruktioner, se dokument B01-101. Där ges bland annat övergripande bakgrund, en sammanfattande beteckningslista samt referenser. För en förteckning av utgivna och kommande dokument i serien hänvisas till dokument B01-102.

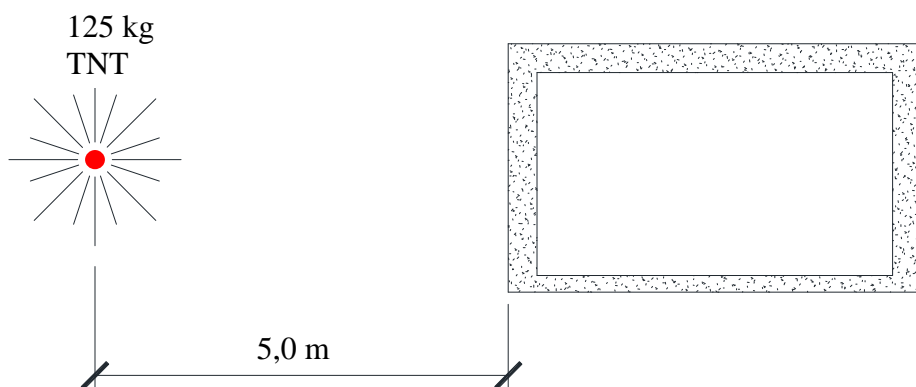
### 1.2 Om detta dokument

I detta dokument definieras MSB:s så kallade arkivbomb för stötvågsbelastning och splitterverkan som kan nyttjas vid dimensionering av ett skyddsrum, se Skyddsrumregler SR 15, MSB (2015). Arkivbomben är en fiktiv bomb som motsvarar bombverkan från en 250 kg minbomb. Enligt SR 15 ska skyddsrummet tåla ”verkan av en tryckvåg motsvarande den som åstadkoms av en 250 kilograms minbomb med 50 viktprocent trotyl som briserar i det fria 5,0 meter från skyddets utsida vid fri tryckavlastning”. Vid bestämning av vapenverkan skiljer sig förutsättningar för att ta fram lasten från stötvågsbelastning och splitterbelastning. För stötvågsbelastning bestäms lasten utifrån en sfärisk laddning utan hölje, medan den för bestämning av splitterverkan bestäms utifrån en cylindrisk laddning med ett hölje. I detta dokument definieras den resulterande lasten från en arkivbomb samt bakgrunden till hur denna är framtagen. Teoretisk bakgrund för framtagning av arkivbomb för stötvågsbelastning behandlas i Johansson (2012) och för splitterbelastning i Leppänen (2012).

## 2 Definition och last från arkivbomb

### 2.1 Stötvågsbelastning

Vid bestämning av stötvågsbelastning från en arkivbomb, bestäms lasten utifrån en sfärisk bomb utan hölje innehållande 125 kg TNT enligt Figur 2.1. Bomben briserar 5,0 m från skyddets utsida och antas ha fri sfärisk utbredning.



Figur 2.1 Lastuppställning för bestämning av stötvågsbelastning från en arkivbomb.

Last från stötvågsbelastning kan beräknas enligt dokument B02-111. Det skalade avståndet  $Z$  bestäms som:

$$Z = \frac{r}{W^{1/3}} = \frac{5}{125^{1/3}} = 1,0 \text{ m/kg}^{1/3} \quad (2.1)$$

där  $r = 5$  m, vilket är avståndet från detonationen till studerad vägg, och  $W = 125$  kg, vilket är laddningens vikt mätt i kg TNT.

Med det skalade avståndet  $Z$  kan stötvågsp parametrar enligt dokument B02-111, Tabell 4.1 bestämmas till:

Tabell 2.1 Stötvågsp parametrar för  $Z = 1 \text{ m/kg}^{1/3}$ .

| $Z$<br>[m/kg <sup>1/3</sup> ] | $P_s^+$<br>[kPa] | $P_r^+$<br>[kPa] | $i_s^+$<br>[Pas/kg <sup>1/3</sup> ] | $i_r^+$<br>[Pas/kg <sup>1/3</sup> ] | $t_a$<br>[ms/kg <sup>1/3</sup> ] | $t^+$<br>[ms/kg <sup>1/3</sup> ] |
|-------------------------------|------------------|------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| 1                             | 935              | 5 006            | 175                                 | 559                                 | 0,532                            | 1,795                            |

## Beräkning av impulsbelastad konstruktion

Tryck-tidssambandet  $P(t)$  för en stötvåg beräknas med följande samband:

$$P(t) = P^+ \left( 1 - \frac{t - t_a}{t^+} \right) e^{-\alpha(t-t_a)/t^+} \quad (2.2)$$

där  $P^+$  är övertrycket,  $t^+$  är varaktigheten hos stötvågen och  $t_a$  är ankomsttid för stötvågen.

Impulstätheten  $i^+$  kan beräknas enligt följande:

$$i^+ = P^+ t^+ \left[ \frac{1}{\alpha} - \frac{1}{\alpha^2} (1 - e^{-\alpha}) \right] \quad (2.3)$$

från vilket faktorn  $\alpha$  kan lösas ut när  $P^+$ ,  $i^+$  samt  $t^+$  är kända.

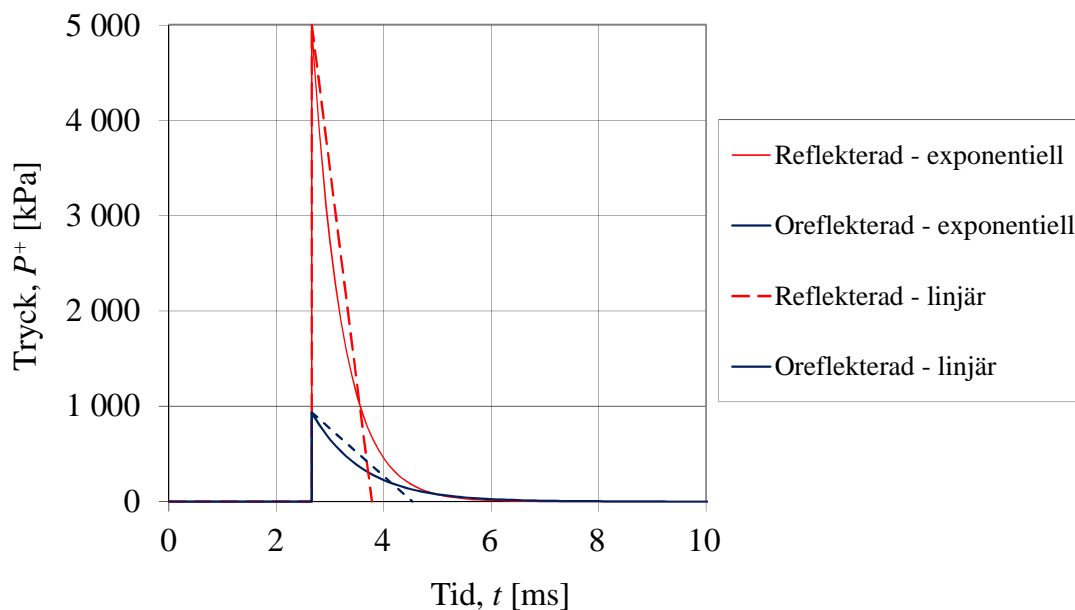
En vanlig förenkling av tryck-tidssambandet är att beskriva den med ett linjärt avtagande. En fiktiv varaktighet  $t_{r,\Delta}^+$  beräknas enligt följande:

$$t_{r,\Delta}^+ = \frac{2i_r^+}{P_r^+} = \frac{2 \cdot 2\,795}{5\,006} = 1,12 \text{ ms} \quad (2.4)$$

I Tabell 2.2 sammanställs aktuella stötvågparametrar för reflekterad belastning när exponentiell respektive linjär tryckminskning antas och utgående från dessa kan sedan tryck-tidssambanden i Figur 2.2 upprättas.

*Tabell 2.2 Stötvågparametrar med antagande om exponentiellt respektive linjärt avtagande tryck.*

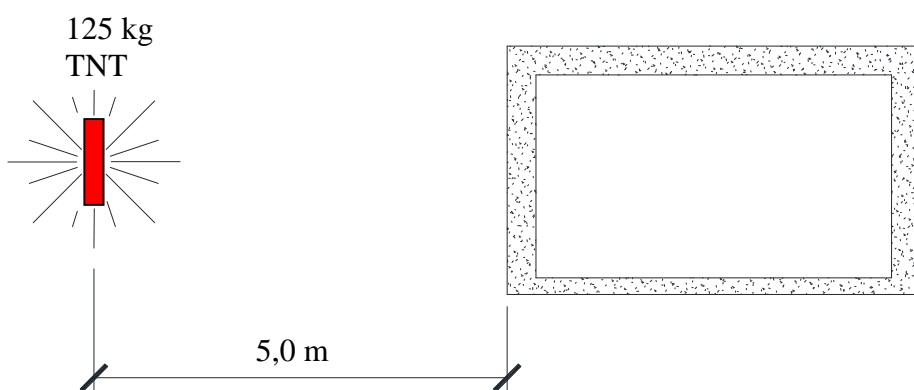
| Exponentiellt avtagande tryck |          |                     |           | Linjärt avtagande tryck |         |                     |           |
|-------------------------------|----------|---------------------|-----------|-------------------------|---------|---------------------|-----------|
| Oreflekterad stötvåg          |          | Reflekterad stötvåg |           | Oreflekterad stötvåg    |         | Reflekterad stötvåg |           |
| $P_s^+$                       | 935 kPa  | $P_r^+$             | 5 006 kPa | $P_s^+$                 | 935 kPa | $P_r^+$             | 5 006 kPa |
| $i_s^+$                       | 875 Pas  | $i_r^+$             | 2 795 Pas | $i_s^+$                 | 875 Pas | $i_r^+$             | 2 795 Pas |
| $t_s^+$                       | 8,975 ms | $t_r^+$             | 8,975 ms  | $t_{s,\Delta}^+$        | 1,87 ms | $t_{r,\Delta}^+$    | 1,12 ms   |
| $t_a$                         | 2,66 ms  | $t_a$               | 2,66 ms   | $t_a$                   | 2,66 ms | $t_a$               | 2,66 ms   |
| $\alpha$                      | 8,46     | $\alpha$            | 15        |                         |         |                     |           |



Figur 2.2 Tryck-tidssamband för reflekterad och oreflekterad stötvåg när exponentiellt respektive linjärt tryckavtagande antas, se Tabell 2.2.

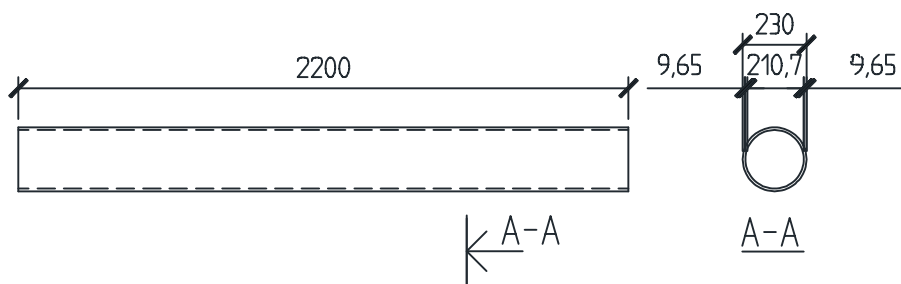
## 2.2 Splitterbelastning

Vid bestämning av splitterbelastning från en arkivbomb, bestäms lasten utifrån en 250 kg bomb med ett hölje och sprängmedel av TNT på vardera 125 kg enligt Figur 2.3. Bomben briserar 5,0 m från skyddets utsida och antas ha fri sfärisk utbredning. För splitterbelastning antas arkivbomben ha cylindrisk form med geometri enligt Figur 2.4 och data enligt Tabell 2.3. Detta innebär att vid framtagning av last för stötvåg och splitter antas olika former för bomben. Detta förfarande bedöms vara acceptabelt eftersom arkivbomben är en fiktiv bomb vars syfte är att definiera en given last.



Figur 2.3 Lastuppställning för bestämning av splitterbelastning från en arkivbomb.

## Beräkning av impulsbelastad konstruktion



Figur 2.4 Geometri för arkivbomb vid bestämning av splitterbelastning. Fiktiv cylindrisk bomb där nosen och den bakre delen består av icke splittergivande massa.

Tabell 2.3 Data för arkivbomb vid framtagning av splitterbelastning.

| Parameter   | Cylindrisk                               |
|---|--|
| Massa bomb, $M_b$                                 | 250 kg                                   |
| Massa sprängmedel, TNT <sup>1)</sup> , $W$        | 125 kg                                   |
| Splittergivande massa                             | 114,6 kg                                 |
| Längd, $L$  | 2,2 m                                    |
| Ytterdiameter, $d_b$                              | 230 mm                                   |
| Innerdiameter, $d_i$                              | 210,7 mm                                 |
| Höljets tjocklek, $t_h$                           | 9,65 mm                                  |
| Splitterfördelningsparameter, $M_A$ <sup>2)</sup> | $2,28 \text{ g}^{1/2} / \text{mm}^{7/6}$ |
| Motts konstant                                    | $3,67 \text{ kg}^{1/2} / \text{m}^{7/6}$ |

<sup>1)</sup> Densitet för TNT =  $1630 \text{ kg/m}^3$ .

<sup>2)</sup> Beräknas enligt ekvation (3.9).

Ett beräkningsexempel för last från splitterverkan behandlas i dokument B04-201, där splitterfördelning tas fram för arkivbomben, samt splitterhastighet och splitterverkan hos en betongvägg för denna bomb.

### 3 Bakgrund till framtagning av arkivbomb

#### 3.1 Riskanalys

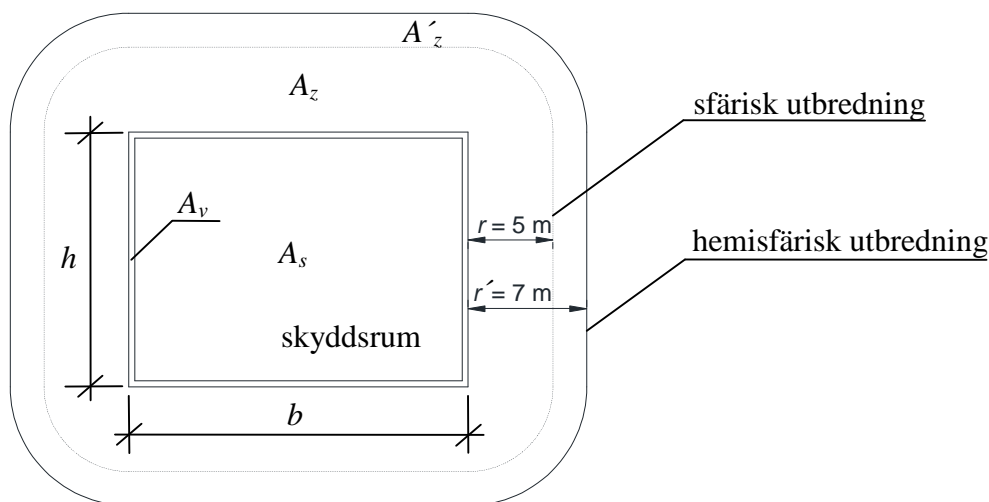
Storleken hos ett skyddsrumms nettoarea  $A_s$  begränsas enligt SR 15 som:

$$A_s \leq A_{\max} \quad (3.1)$$

där  $A_{\max}$  är skyddsrummets maximala tillåtna nettoarea, vilket bestäms som:

$$A_{\max} = 440 - (A_v + A_z) \quad (3.2)$$

där  $A_v$  är tvärsnittsarean för skyddsrummets omslutande väggar och  $A_z$  är area som erhålls av en 5,0 m bred zon runt om skyddsrummet enligt Figur 3.1. Detta val är baserad på en riskanalys där totalt 1,0 ton bomber (tillsammans innehållande 500 kg TNT) fälls på ett hektar (100 x 100 m<sup>2</sup>) stort område. Det kan dock argumenteras för att explosionslasten från en verklig bomb skulle påverkas av så kallad spegling, reflexion mot markytan. Beaktande detta påvisas nedan att 125 kg TNT med hemisfärisk laddning, på avstånden 7,0 m, genererar en stötvågslast som motsvarar den som fås av arkivbomben. En yta inom avståndet  $r' = 7,0$  m från skyddsrummet, enligt Figur 3.1, medför att träffsannolikheten motsvarar ca 25 %.



Figur 3.1 Plan av rektangulärt skyddsrum om en omkringliggande 5 m bred, respektive 7 m bred zon. I skyddsrumreglerna godtas även icke-rektangulära skyddsrum.

Träffsannolikhet beräknas utifrån att 500 kg fälls på en yta på 10 000 m<sup>2</sup> (ett hektar), vilket ger 125 kg TNT som briserar på en yta på 2 500 m<sup>2</sup>. Skyddsrummets bruttoarea, vilket inkluderar dess omslutande väggar ( $A_s + A_v$ ), kan tecknas som  $(b \cdot h)$  enligt Figur 3.1. Arealen runt om skyddsrummet  $A_z$  kan beräknas som:

$$A_z = 2(b + h) \cdot r + \pi \cdot r^2 \quad (3.3)$$

## Beräkning av impulsbelastad konstruktion

Träffsannolikhet  $P$  för att en bomb skall träffa innanför avståndet  $r$  från ett skyddsrum för en yta på  $2\,500\text{ m}^2$  kan beräknas som:

$$P = \frac{(A_s + A_v) + A_z}{2\,500} = \frac{(b \cdot h) + 2(b + h) \cdot r + \pi \cdot r^2}{2\,500} \quad (3.4)$$

Bruttoarean ( $b \cdot h$ ) väljs så att ekvation (3.1) och ekvation (3.2) blir uppfyllda när  $r = 5,0$  m. Genom att kombinera dessa två ekvationer fås följande uttryck som måste uppfyllas:

$$(A_s + A_v) + A_z \leq 440 \quad (3.5)$$

där  $(A_s + A_v) = (b \cdot h)$  enligt Figur 3.1. Ekvation (3.3) nyttjas för att beräkna arean  $A_z$  runt om skyddsrummet, varvid fås med bruttoarea  $(b \cdot h) = (13 \cdot 10)\text{ m}^2$  samt avståndet  $r = 5,0$  m:

$$(b \cdot h) + 2(b + h) \cdot r + \pi \cdot r^2 = (13 \cdot 10) + 2(13 + 10) \cdot 5 + \pi \cdot 5^2 = 439\text{ m}^2 \leq 440\text{ m}^2 \quad \text{OK!} \quad (3.6)$$

Insatt i ekvation (3.4) fås träffsannolikheten för att en bomb skall träffa inom sträckan  $r' = 7,0$  m från ett sådant skyddsrum som:

$$P = \frac{(13 \cdot 10) + 2(13 + 10) \cdot 7 + \pi \cdot 7^2}{2\,500} = 24,2\% \quad (3.7)$$

För varierande  $b$  och  $h$  fås också en sannolikhet på omkring 25 %.

Den verkliga bomben antas ha en hemisfärisk utbredning, vilket innebär att spegling skall beaktas och en zonbredd på  $r' = 7,0$  m. Enligt dokument B02-111 fås en speglingsfaktor på 1,8 varvid en ekvivalent laddningsvikt för sfärisk utbredning kan beräknas som:

$$W_{\text{mod}} = 1,8 \cdot 125\text{ kg} = 225\text{ kg} \quad (3.8)$$

Baserat på detta kan resulterande tryck och impulstäthet beräknas för ett avstånd på 7,0 m, vilka jämförs med motsvarande data för arkivbomben (125 kg TNT och 5,0 m avstånd) i Tabell 3.1. Av detta framgår att impulstätheten för de två belastningsfallen blir ungefär lika stora. Det reflekterade trycket och varaktigheten hos lasten skiljer sig visserligen mellan dessa två belastningsfall. Inverkan av detta är dock försumbar, eftersom det är impulsen som är avgörande för strukturresponsen vid en så kortvarig last som är fallet här. Gällande splitterbelastning så ökar splittertätheten och splitterhastigheten för ett kortare avstånd och det blir därför på säker sida att anta ett avstånd på 5,0 m. Sammanfattningsvis, så kan därför sägas att den last som genereras av arkivbomben täcker in lasten från en laddning på 125 kg på ett avstånd på 7,0 m med hemisfärisk utbredning.

Tabell 3.1 Stötvågsparametrar för två olika, avstånd  $r$  och laddningsvikt  $W$ .

| $r = 5$ m, $W = 125$ kg, sfärisk utbredning |           | $r = 7$ m, $W_{\text{mod}} = 225$ kg, sfärisk utbredning <sup>1)</sup> |           |
|---|-----------|--|-----------|
| $P_r^+$                                     | 5 006 kPa | $P_r^+$  | 3 318 kPa |
| $i_r^+$                                     | 2 795 Pas | $i_r^+$  | 2 835 Pas |
| $t_{r,\Delta}^+$                            | 1,12 ms   | $t_{r,\Delta}^+$   | 1,71 ms   |

<sup>1)</sup> Motsvarar en 125 kg laddning på 7 m avstånd vid hemisfärisk utbredning.

### 3.2 Stötvågsbelastning

Enligt SR 15 så skall bombens last, det vill säga den stötvåg och det splitter som orsakas av arkivbomben, motsvara den från en 250 kg minbomb med 50 viktprocent trotyl (TNT) som briserar 5,0 meter från skyddets utsida vid fri sfärisk tryckavlastning. Lasten för stötvåg beräknas utifrån en laddning utan hölje på 125 kg TNT.

### 3.3 Splitterbelastning

Splitterdata från arkivbomben är baserat på ett verkligt försök med en minbomb med en icke cylindrisk form och splitterdata enligt Tabell 3.2. Splitter från en sådan laddning har samlats ihop och indelats i olika viktklasser. För varje viktklass har antalet splitter respektive massan för dessa tagits fram. Den totala splittergivande massan hos minbomben blev ca 117 kg och antalet splitter blev ca 26 000 st.

Tabell 3.2 Data för en minbomb m/50 som nyttjas för framtagning av splitterdata för arkivbomben.

| Viktklass   | Splitterdata för respektive viktklass |        | Ackumulerat splitterdata |        |           |
|-------------|---------------------------------------|--------|--------------------------|--------|-----------|
|             | [g]                                   | Antal  | Massa [g]                | Antal  | Massa [g] |
| > 63,5      |                                       | 128    | 16 121                   | 128    | 16 121    |
| 32,5 - 63,5 |                                       | 452    | 18 191                   | 580    | 34 312    |
| 15,5 - 32,5 |                                       | 1 547  | 33 582                   | 2 127  | 67 894    |
| 8,5 - 15,5  |                                       | 1 407  | 15 944                   | 3 534  | 83 838    |
| 3,8 - 8,5   |                                       | 2 794  | 15 187                   | 6 328  | 99 025    |
| 2,5 - 3,8   |                                       | 1 682  | 5 233                    | 8 010  | 104 258   |
| 1,5 - 2,5   |                                       | 2 463  | 4 769                    | 10 473 | 109 027   |
| 1,0 - 1,5   |                                       | 2 370  | 2 955                    | 12 843 | 111 982   |
| 0,5 - 1,0   |                                       | 3 606  | 2 632                    | 16 445 | 114 614   |
| 0,1 - 0,5   |                                       | 9 683  | 2 372                    | 26 128 | 116 986   |
| Summa:      |                                       | 26 128 | 116 986                  |        |           |

Arkivbomben ges en cylindrisk form, en ekvivalent cylinder, vilket förenklar beräkning av data för framtagning av splitterbelastning. Splitterfördelningsparametern  $M_A$  för en ekvivalent cylinder beräknas som:

$$M_A = B^2 \cdot t_h^{5/3} \cdot d_i^{2/3} \left(1 + \frac{t_h}{d_i}\right)^2 \quad (3.9)$$

där  $B$  är Motts konstant,  $t_h$  är höljets tjocklek och  $d_i$  är bombens innerdiameter.



## Beräkning av impulsbelastad konstruktion

---

Antalet splitter  $n_{ms}$  med massan större än  $m_s$  beräknas som:

$$n_{ms} = \frac{M_h}{2M_A} e^{-\sqrt{\frac{m_s}{M_A}}} \quad (3.10)$$

Där  $M_h$  är höljets massa och  $M_A$  är splitterfördelningsparameter enligt ekvation (3.9).

För att bestämma bombens innerdiameter beräknas först volymen av sprängmedel som:

$$V_W = \frac{W}{\rho_{TNT}} \quad (3.11)$$

där  $W$  är laddningsvikt och  $\rho_{TNT} = 1630 \text{ kg/m}^3$  är densiteten för TNT.

Genom att lösa ut diametern för en cylinder kan bombens innerdiameter  $d_i$  bestämmas som:

$$d_i = \sqrt{\frac{4 \cdot V_W}{\pi \cdot L}} \quad (3.12)$$

där  $L$  är längden hos ekvivalent cylinder.

Ytterdiameter  $d_b$  för bomben beräknas som:

$$d_b = 2t_h + d_i \quad (3.13)$$

där  $t_h$  är höljets tjocklek och volymen för höljet kan beräknas som:

$$V_h = \pi \cdot L \left( \frac{d_b^2}{4} - \frac{d_i^2}{4} \right) \quad (3.14)$$

Med kännedom om höljets volym kan höljets massa  $M_h$  beräknas till:

$$M_h = V_h \rho_{stål} \quad (3.15)$$

där densitet för stål har antagits till  $\rho_{stål} = 7800 \text{ kg/m}^3$ .

En splitterfördelningsparameter, enligt ekvation (3.9), beräknas för fyra olika ekvivalenta cylindrar med längderna 2,5 m, 2,2 m, 2,0 m och 1,5 m. Utifrån splitterfördelningsparametern kan antalet splitter med massa större än en viss splittermassa  $m_s$ , enligt ekvation (3.10), bestämmas för de olika ekvivalenta cylindrarna. Den ekvivalenta längden hos arkivbomben har valts till 2,2 m.

Valet baserades på jämförelse med försök och resultat för de olika ekvivalenta cylindrarna enligt Figur 3.2 och Figur 3.3. Arkivbomben ger bäst resultat i jämförelse med stora splitter och bra resultat för olika splitterstorlekar. För små splitter blir avvikelser större än i jämförelse mellan arkivbomb och med en ekvivalent cylinder med längden 2,5 m. Däremot blir avvikelse stor för en ekvivalent cylinder med längden på 2,5 m i jämförelse med arkivbomben för stora splitter. En bedömning är att de stora splittren är av större betydelse för strukturens respons än de allra minsta

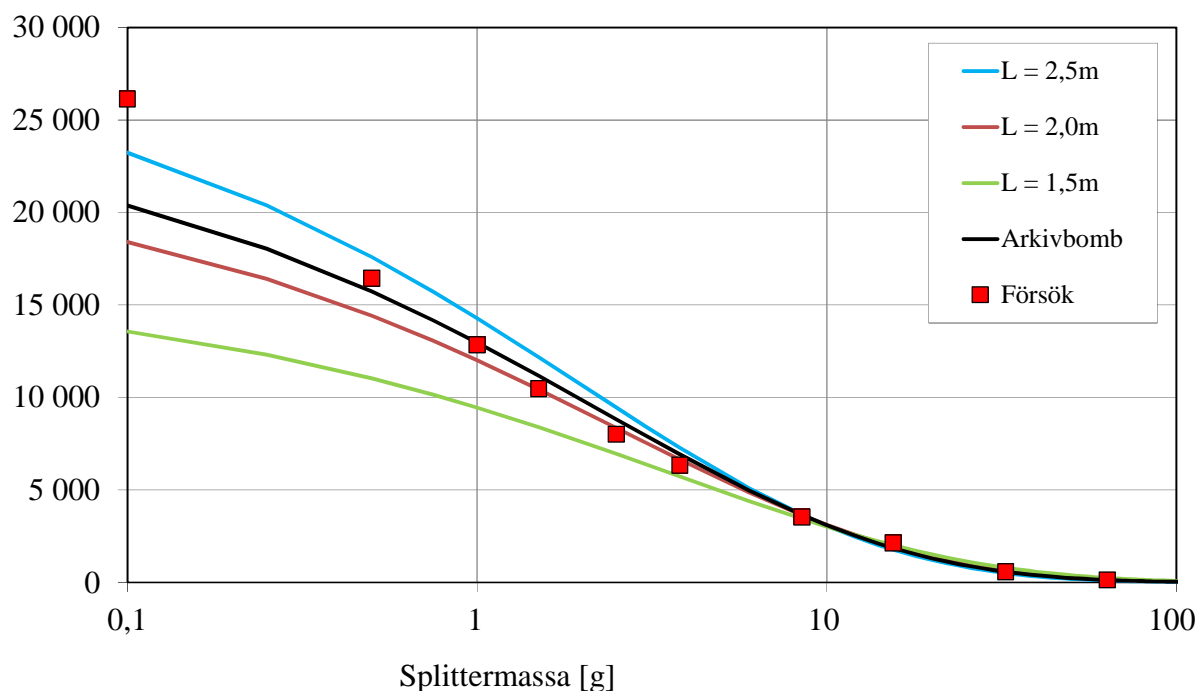
## Beräkning av impulsbelastad konstruktion

splittren, varav ekvivalent cylinder med en längd på 2,5 m valdes bort. Ekvivalent cylinder med längd på 2,0 m ger bäst resultat för splitterstorlekar på ca 1,5 g upp till ca 8,5 g, men däremot så är avvikelserna större jämfört med arkivbomben för stora splitter samt de allra minsta splittren, varav denna också valdes bort. En längd hos ekvivalent cylinder på 1,5 m gav bäst resultat för splitterstorlekar på 15,5 g, men avvikelserna blir mycket stora både för stora som små splitter, varav denna längd heller inte blev aktuell.

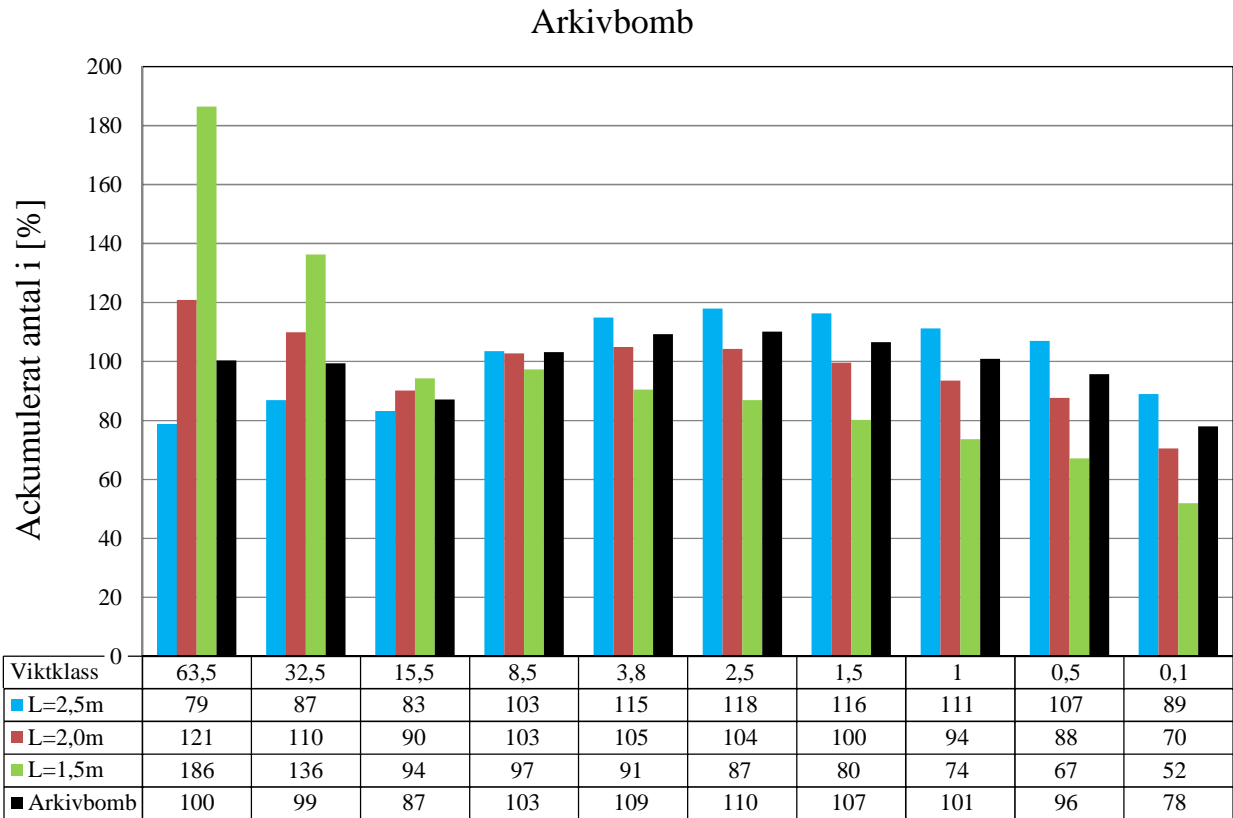
Sammanfattningsvis så ger en ekvivalent cylinder på 2,2 m bäst överensstämmelse med försök för de stora splittren, samt god överensstämmelse för medelstora och små splitter, varav denna längd har valts för arkivbomben.

För beräknade värden hos arkivbomb avrundades cylinderns dimensioner, varav den splittergivande massan blir 114,6 kg istället för den antagna 115 kg. Mängden sprängmedel blir avrundat med en decimal noggrannhet till 125 kg. Data för arkivbomb vid framtagning av splitterbelastning redovisas i Tabell 2.3.

### Antalet splitter



Figur 3.2 Antalet splitter med en massa större än  $m_s$ . Jämförelse mellan splitter från en minbomb  $m/50$  och fyra olika ekvivalenta cylindrar. Arkivbomben har längden 2,2 m.



Figur 3.3 Ackumulerat antal splitter i % av splitter från en minbomb m/50 från fyra olika ekvivalenta cylindrar. Arkivbomben har längden 2,2 m.