

B02-301

Beräkningsanvisning av markstötståg Markstötståg från nedgrävd laddning

Författare: Leo Laine. Ansvarig utgivare: Lars Gråberg

1 Orientering	2
1.1 Samlingsdokument	2
1.2 Om detta dokument	2
2 Förutsättningar	3
3 Maximala markstötstågsvärden vid avståndet r	6
4 Tryck och partikelhastighet som funktion av tid	8
4.1 Koncept	8
4.2 Ankomsttid och stigtid	9
4.3 Exponentialfunktioner för tidsavklingning	9
5 Inverkan av reflexioner från markytan och underliggande jordmaterial	10
5.1 Koncept	10
5.2 Avstånden för direkt-, avlastnings- och bottenreflektad våg	11
5.3 Tryckvågornas amplitud och som funktion av tiden	11

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 behandlas hur den fria lasten från markstötståg kan beräknas för en fullt eller delvis nedgrävd laddning som exploderar. Presenterade beräkningsanvisningar utgår från kända empiriska ekvationer som hanterar olika laddningsavstånd, laddningsstorlek, laddningsdjup, och jordmaterial. Teoretisk bakgrund för här redovisade samband behandlas i kapitel 9, Laine (2012).

2 Förutsättningar

Förutsättningarna för här presenterade empiriska ekvationer ska anses vara giltiga är att laddningen har placerats i jordmaterial som är närbesläktade med de som anges i Tabell 2.1. I tabellen syns det att torr sand, tät sand, våt sandig lera, vattenmättad sandig lera, fullt vattenmättad lera, är jordfyllnadsmaterial som med enkelhet kan användas i de empiriska ekvationerna för att prediktera trycklast och partikelhastighet i jorden. Däremot är till exempel inte berg eller sprängsten representerade i tabellen. Däremot så kan grus till exempel till viss del representeras av torr sand med viss ökning i dämpningskoefficienten.

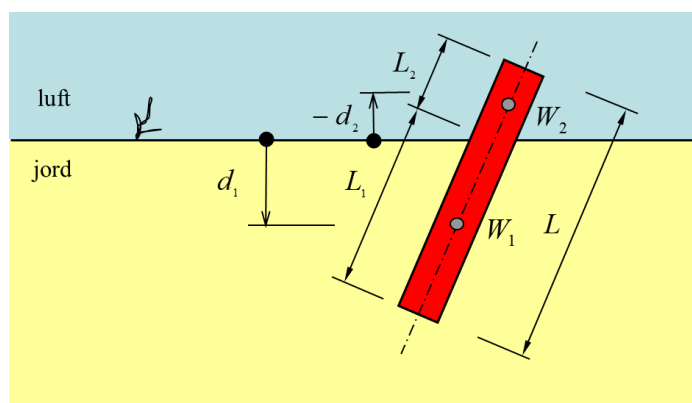
Tabell 2.1 Jordmaterialkoefficienter för olika jordtyper.

Jordtyp	Densitet ρ [kg/m ³]	Seismisk hastighet c [m/s]	Akustisk impedans [kPa/m/s]	Dämpnings koeff. n [-]
lös, torr sand med låg relativ densitet	1490	183	271	3,1
torr sand, och återfyllning	1630	305	498	2,75
tät sand, med hög relativ densitet	2030	488	995	2,5
våt sandig lera med > 4 % luftporer	1990	549	1086	2,5
vattenmättad sandig lera med < 1 % luftporer	1920	1524	2941	2,4
fullt vattenmättad lera	2030	1829	3732	1,5

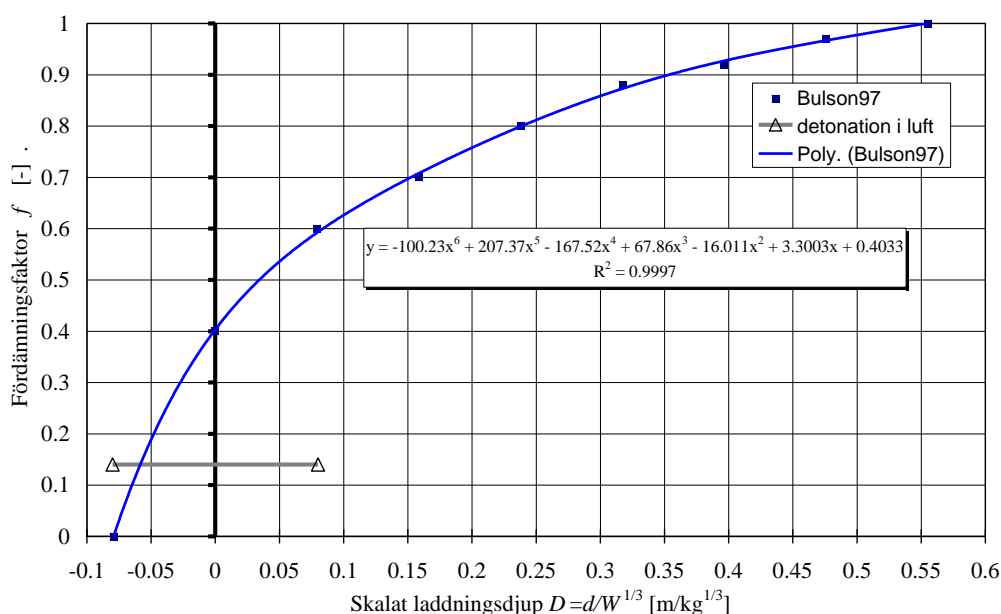
En annan viktig förutsättning för de empiriska ekvationerna är fördämpningsfaktorn f som beskriver hur stor andel av laddningens energi som förs ner i marken. För detta används skalat laddningsdjup

$$D = \frac{d}{W^{1/3}} \text{ [m/kg}^{1/3}\text{]} \quad (2.1)$$

för att beskriva var i marken som laddningen detonerar och hur mycket av den detonerade laddningens frisläppta energi som sprids till marken respektive till luften. Här anger d och W laddningens djup respektive laddningsvikt, se Figur 2.1 som visas en detonerande cylindrisk laddning som är delvis lokaliserad under markytan.



Figur 2.1 Den totala fördämningsfaktorn f för en laddning kan sammanställas av flera fördämningsfaktorer f_i hos laddningens olika delar som befinner sig i olika materia vid tidpunkten för detonation.



Figur 2.2 Fördämningsfaktorn, f , som funktion av skalat laddningsdjup. Om laddningen detonerar i luft är $f = 0,14$.

För fallet med en cylindriskt formad laddning beräknas en total fördämningsfaktor med hjälp av ekvation (2.2). Själva fördämningsfaktorn för varje cylinderdel fås från Figur 2.2. Vid det skalade laddningsdjupet $D = 0 \text{ m/kg}^{1/3}$ (vid markytan) är fördämningsfaktorn $f = 0,4$ och vid det skalade laddningsdjupet $D = 0,55 \text{ m/kg}^{1/3}$ (motsvarar en fullt nedgrävd laddning) fås $f = 1,0$. Explosion ovan mark räknas som fördämningsfaktor $f = 0,14$, vilket nås vid ett skalat laddningsdjup mindre än $D = -0,07 \text{ m/kg}^{1/3}$.

$$f = \sum_{i=1}^n f_i \left(\frac{L_i}{L} \right) \quad (2.2)$$

där

Beräkning av markstövåg från nedgrävd laddning

$$L = \sum_{i=1}^n L_i \quad (2.3)$$

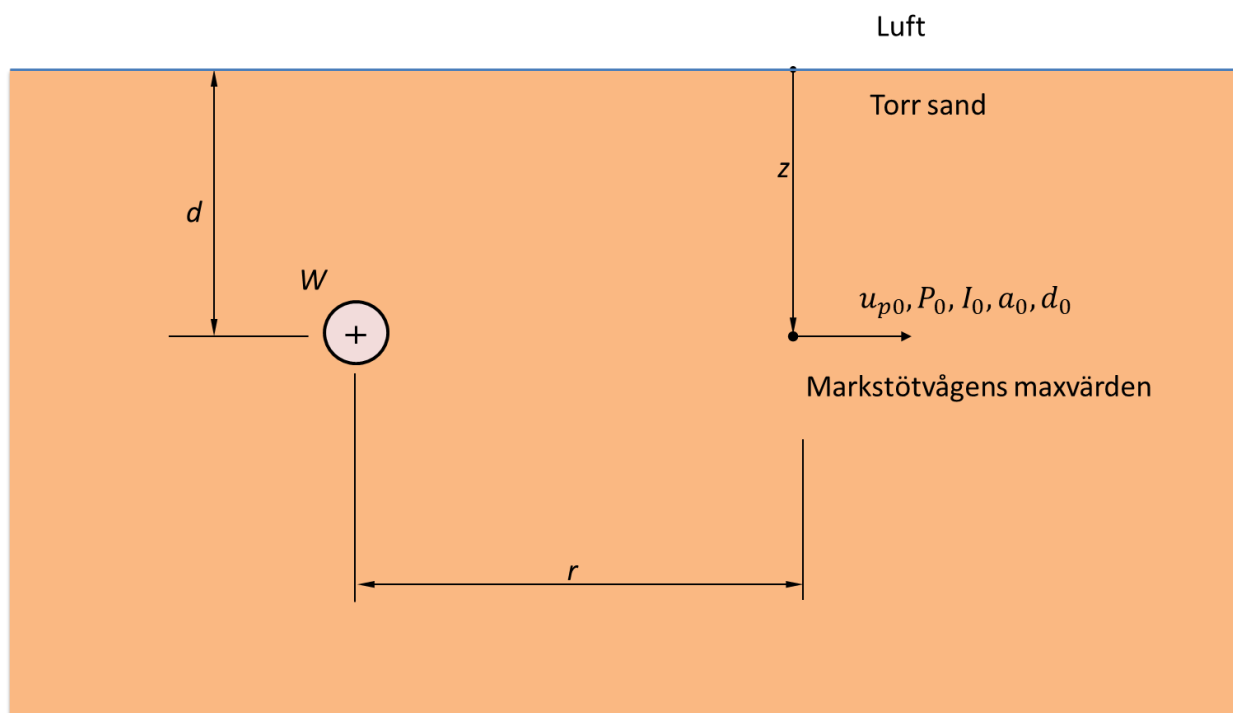
En annan viktig aspekt är att de empiriska ekvationerna beskrivna här utgår från sprängämnet Composition C-4, se Tabell 2.2. Om exempelvis sprängämnet TNT ska studeras måste laddningsvikten därför först divideras med 1,37 när maximalt tryck och partikelhastighet bestäms och med 1,19 för att bestämma maximal impulsstäthet.

Tabell 2.2 Viktskalningsfaktorer för olika typer av sprängämnen. I detta dokument givna samband utgår från Composition C-4.

Sprängämne	Ekvivalent vikt	
	Tryck	Impuls
ANFO	0,82	0,82
Composition A-3	1,09	1,07
Composition B	1,11	0,98
Composition C-4	1,37	1,19
Cyclotol	1,14	1,09
HBX-1	1,17	1,16
HBX-3	1,14	0,97
H-6	1,38	1,15
Minol II 70/30	1,20	1,11
Octol 75/25	1,06	1,06
PETN	1,27	
Pentolite	1,42	1,00
Tetryl 75/25	1,07	
Tetrytol 70/30	1,06	
TNETB	1,36	1,10
TNT	1,00	1,00
Tritonal	1,07	0,96

3 Maximala markstöt vågsvärden vid avståndet r

Här ges beräkningsanvisningar till hur markstöt vågens maximala partikelhastighet, oreflektat tryck, impulstäthet, acceleration och förskjutning på avståndet r , ($r = z$), kan beräknas för fallet med nedgrävd laddning med laddningsvikten W som detonerar på laddningsdjupet d , se Figur 3.1



Figur 3.1 Nedgrävd laddning i jord, där markstöt vågens maxvärden studeras på avståndet r .

Den maximala partikelhastigheten kan beräknas som

$$u_{p0} = 48,768 \cdot f \cdot \left(2,520811 \cdot \frac{r}{W^{1/3}} \right)^{-n} \text{ [m/s]} \quad (3.1)$$

där W är ekvivalent laddningsvikt i C-4 [kg], r är laddningsavstånd [m], n är jordmaterialets dämpningskoefficient [-] och f är fördämpningsfaktorn [-] som beror på det skalade laddningsdjupet D [$\text{m/kg}^{1/3}$], se Figur 2.2. Ekvation (3.1) är endast giltig för $Z \geq 0.4 \text{ m/kg}^{1/3}$, där

$$Z = \frac{r}{W^{1/3}} \text{ [m/kg}^{1/3}\text{]} \quad (3.2)$$

är det skalade laddningsavståndet. Vid kortare laddningsavstånd är det detonationsvågen från laddningen som blir avgörande för partikelhastigheten och trycket.

Beräkning av markstövåg från nedgrävd laddning

Det maximala oreflekterade trycket kan beräknas som

$$P_0 = \rho \cdot c \cdot u_{p0} = 48,768 \cdot f \cdot \rho \cdot c \cdot \left(2,520811 \cdot \frac{r}{W^{1/3}} \right)^{-n} \quad [\text{Pa}] \quad (3.3)$$

där densitet ρ och seismisk hastighet c återfinns i Tabell 2.1 för olika jordmaterial.

Maximal impulstäthet kan beräknas med¹

$$I_0 = 9,870892 \cdot W^{1/3} \cdot \left(\frac{\rho}{515,3179} \right) \cdot \left(2,520811 \cdot \frac{r}{W^{1/3}} \right)^{-n+1} \quad [\text{kPas}] \quad (3.4)$$

där W är laddningsvikt i ekvivalent C-4 [kg], ρ är densitet [kg/m^3], r avståndet i [m] mellan laddning och mätpunkt och n är dämpningsfaktorn för jordmaterialet.

Maximal acceleration kan beräknas med

$$a_0 = 1236,4578 \cdot \frac{f \cdot c}{W^{1/3}} \cdot \left(2,520811 \cdot \frac{r}{W^{1/3}} \right)^{-n-1} \quad [\text{m/s}^2] \quad (3.5)$$

Maximal förskjutning kan beräknas med²

$$d_0 = 60,4567 \cdot f \cdot W^{1/3} \cdot \frac{1}{c} \cdot \left(2,520811 \cdot \frac{r}{W^{1/3}} \right)^{-n+1} \quad [\text{m}] \quad (3.6)$$

¹ I Laine (2012) har motsvarande ekvation, ekvation (9:31m), felaktigt angetts att den första faktor i ekvationen är ”7,5842”. I denna beräkningsanvisning används rätt faktor ”9.870892”.

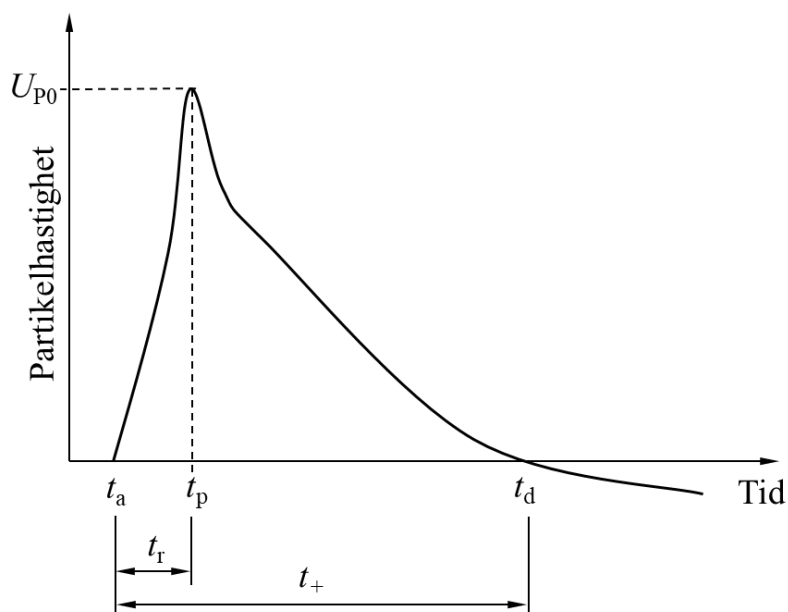
² I Laine (2012) har motsvarande ekvation, ekvation (9:31r), i Laine(2012) felaktigt angetts utan faktorn ”2,520811” i den sista parentesen. I denna beräkningsanvisning har denna faktor dock lagts till.

4 Tryck och partikelhastighet som funktion av tid

4.1 Koncept

I kapitel **Fel! Hittar inte referenskälla.** ges uttryck för hur maximal partikelhastighet, tryck, impulstäthet, acceleration och förskjutning kan bestämmas för en markstövåg på avståndet r från en fullt eller delvis nedgrävd laddning som detonerar i marken. Dessa uttryck fyller ett viktigt syfte i att de är enkla att använda samt ger en snabb och konservativ bedömning av aktuella maxvärden för den fria markstövågen. För mer detaljerade beräkningar av dynamisk last är det dock även av intresse att studera partikelhastighet och tryck som funktion av tiden vid en viss punkt från laddningen, se Figur 3.1.

En stövåg utan reflexioner kan förenklat beskrivas med en belastningskurva enligt Figur 4.1. På den horisontella axeln visas hur ankomsttiden t_a , tiden för maxvärde t_p , tiden för positiva fasen t_d , restiden t_r samt den positiva varaktigheten t_+ definieras. Den vertikala axeln visar partikelhastigheten där maximal partikelhastighet U_{p0} är definierad.



Figur 4.1 Partikelhastighet som funktion av tid för en oreflekterad markstövåg.

4.2 Ankomsttid och stigtid

Ankomsttiden för en stötståg kan beräknas som

$$t_a = \frac{r}{c} \quad (4.1)$$

där r är avståndet från explosionens centrum till studerad punkt och c är den seismiska våghastigheten eller aktuell stötståghastighet i jordmaterialet, se Tabell 2.1.

Stigtiden för markstötstågen kan beräknas som

$$t_r = 0,1 \cdot t_a \quad (4.2)$$

4.3 Exponentialfunktioner för tidsavklingning

När det gäller beskrivningen av tryck och partikelhastighet som funktion av tid kan följande ekvationer användas

$$P(t) = P_0 \cdot e^{-\alpha t / t_a} \quad (4.3)$$

och

$$U_p(t) = U_{p0} \cdot (1 - \beta \cdot t / t_a) e^{-\beta t / t_a} \quad (4.4)$$

där tiden $t \geq t_a + t_r$, P_0 maximalt tryck kan beräknas ur ekvation (3.3) och maximal partikelhastighet U_{p0} beräknas med ekvation (3.1). Tidskonstanterna α och β varierar med den aktuella platsen men som approximation kan följande värden användas:

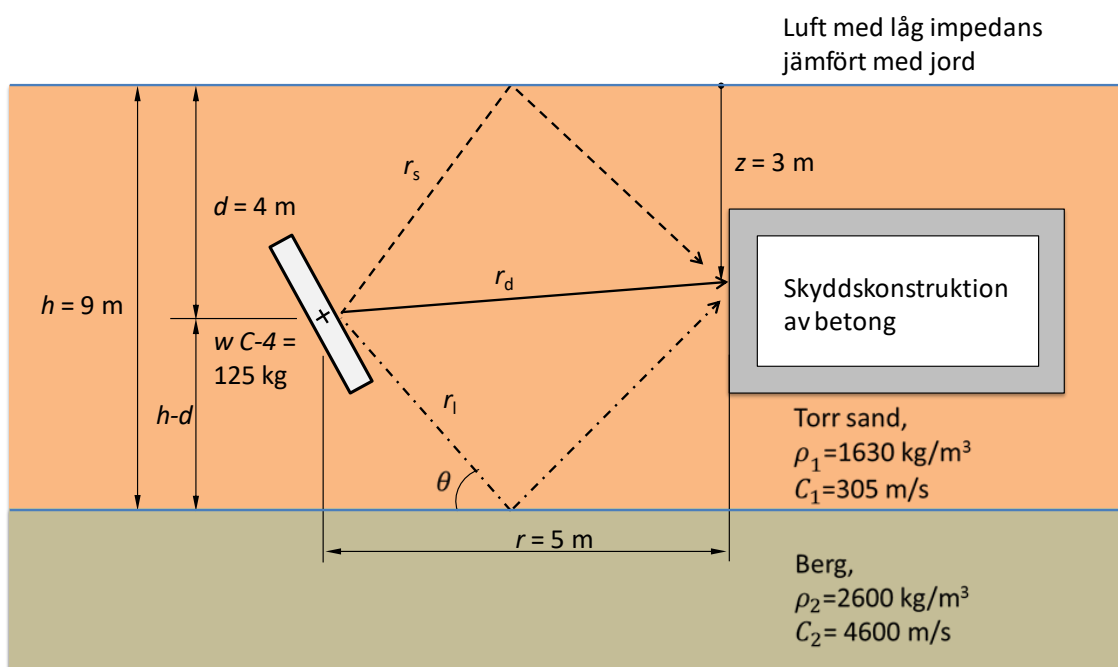
$$\alpha = 1,0 \text{ och } \beta = 1/8,5 \quad (4.5)$$

5 Inverkan av reflexioner från markytan och underliggande jordmaterial

5.1 Koncept

Generellt propagerar inte en markstötståg genom ett homogent medium. Istället är det normalt att detta består av flera olika typer av jordlager, varierande grundvattennivåer, berg, luft ovan jord, och byggnadskonstruktioner under marknivå som utgör medier som markstötstågen reflekterar mot. I detta avsnitt ges en förenklad metod för beräkning av sådana reflexioner.

I Figur 5.1 illustreras hur den slutliga stötstågen mot en skydds konstruktion egentligen byggs upp av bidrag från flera olika vågor. En direktvåg r_d , en avlastningsvåg från ytan r_s och en botten-reflektad våg r_l . Här kommer dessa vågors sammansättning att tas fram med enklare ekvationer.



Figur 5.1 Beskrivning av generella avstånd för direkt-, ytreflektad-, avlastnings- och botten-reflektad våg mot en skydds konstruktion.

5.2 Avstånden för direkt-, avlastnings- och bottenreflekterad våg

Avstånden kan beräknas med följande ekvationer

$$r_d = \sqrt{(d - z)^2 + r^2} \quad (5.1)$$

$$r_s = \sqrt{(d + z)^2 + r^2} \quad (5.2)$$

$$r_l = \sqrt{(2h - d - z)^2 + r^2} \quad (5.3)$$

där h är jordlagrets tjocklek, d är laddningsdjup, r är laddningens horisontella avstånd till skydds-konstruktionen och z är vertikalt djup från ytan för studerad punkt på skydds-konstruktionen.

5.3 Tryckvågornas amplitud och som funktion av tiden

När stötstågornas avstånd har beräknats enligt kapitel 4 kan initialt tryck P_0 bestämmas för alla tre stötstågorna. Utgående från detta kan sedan tryck-tidssamband för dessa tryckstötståg beräknas som

$$P_d = P_0(r_d) \cdot e^{(-\alpha/t_d)} \quad (5.4)$$

$$P_s = -P_0(r_s) \cdot e^{(-\alpha/t_s)} \quad (5.5)$$

$$P_l = K \cdot P_0(r_l) \cdot e^{(-\alpha/t_l)} \quad (5.6)$$

där tryck-tidssambanden har justerats för aktuella avstånd. Direktvågen beräknas enligt kapitel 4. I ekvation (5.5) har dock avlastningsvågen fått ett tryck med ett negativt värde, det vill säga en dragvåg, och den bottenreflekterade vågen P_l har multiplicerats med en reflexionskoefficient K .

Denna reflexionskoefficienten beräknas som

$$K = \begin{cases} \frac{\cos \theta - K_0}{\cos \theta + K_0} & \text{för } 1 - \left(\frac{c_1}{c_2} \sin \theta \right)^2 \\ 1,0 & \text{annars} \end{cases} \quad (5.7)$$

där koefficienten K_0 kan beräknas som

$$K_0 = \frac{\rho_1 \cdot c_1}{\rho_2 \cdot c_2} \sqrt{1 - \left(\frac{c_1}{c_2} \sin \theta \right)^2} \quad (5.8)$$

Här indikerar index 1 densitet och seismisk hastighet för det övre lagret och index 2 indikerar densitet och seismisk hastighet för det undre lagret.

Beräkning av markstövåg från nedgrävd laddning

Vinkeln θ definieras som

$$\sin \theta = \frac{r}{r_l} \quad (5.9)$$

och

$$\cos \theta = \frac{2h - d - z}{r_l} \quad (5.10)$$

där längderna är illustrerade i Figur 5.1.