

# Beräkningsanvisningar för strukturell dynamisk respons vid explosionsbelastning

Den strukturella responsen hos en explosionsbelastad konstruktion kan skilja sig väsentligt från den som fås vid en statisk belastning. Myndigheten för samhällsskydd och beredskap (MSB) har, som en del i sitt ansvarsområde om det fysiska skyddet, tagit fram en omfattande kunskapsbank inom området dynamisk respons. För en ökad samhällsnytta är det önskvärt att vetskapen om denna når ut till en större krets så att framtagna kunskaper även kan användas vid andra tillämpningar för hantering av extrema dynamiska laster i bebyggelsen.

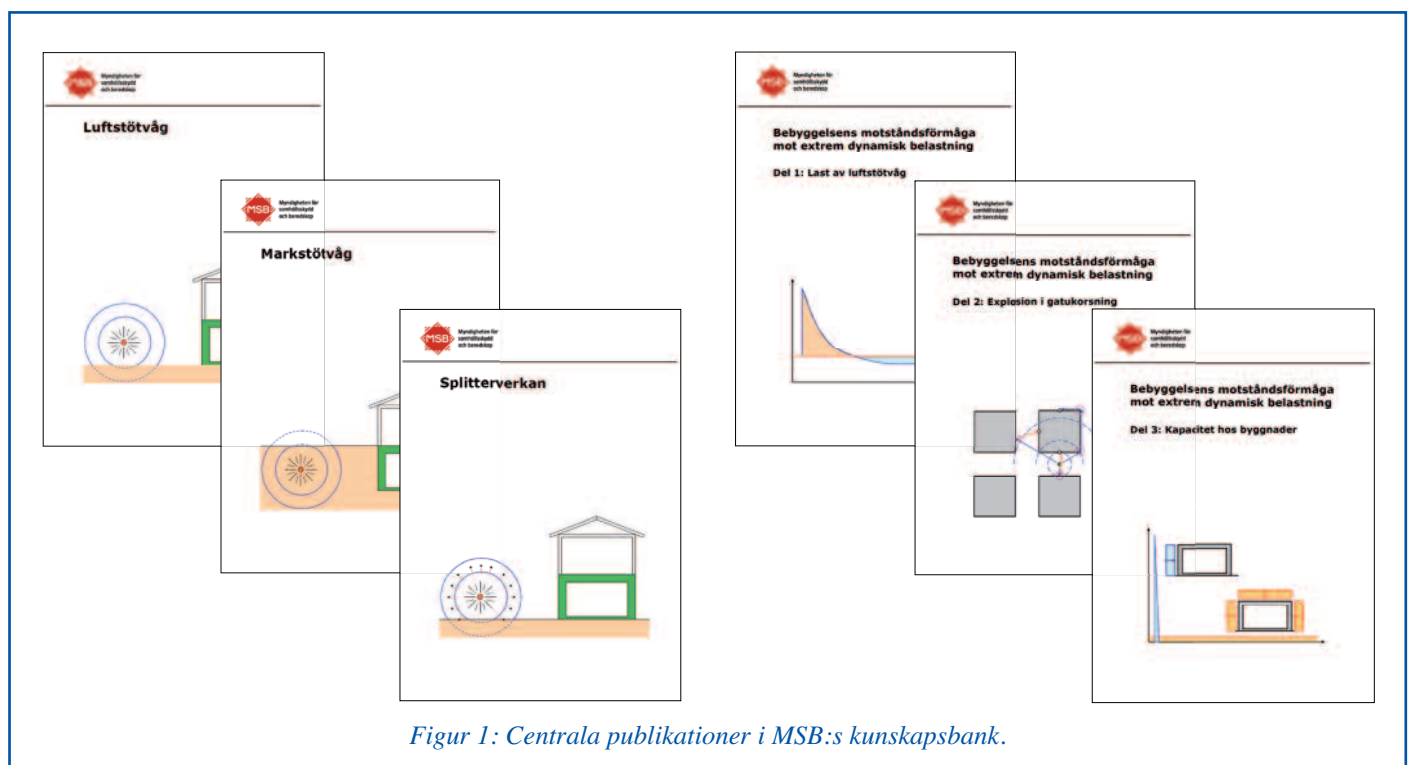
MSB ansvarar bland mycket annat för området fysiskt skydd för befolkningen. Detta ställer höga krav på kunskap om och förståelse för effekterna av extraordinära belastningar såsom impulslaster från explosioner. En konstruktions beteende blir fysikaliskt annorlunda vid denna typ av belastning jämfört med normala, statiska belastningar och detta måste beaktas

genom att krav och lösningar i normgivningen baseras på adekvat kunskap.

För att införskaffa, bevara samt utveckla en sådan kunskap är det nödvändigt att i detalj kunna studera den strukturella dynamiska responsen. Ett sätt att göra detta är att utföra olika typer av fältförsök med explosionsbelastning. Detta är dock både dyrt och omständligt samt ger inte nödvändigtvis en tillräckligt klar bild av det fysikaliska skeendet. Ett annat, betydligt mindre resurskrävande, tillvägagångssätt är att med avancerade datamodeller beskriva den ingående fysiken så att den strukturella responsen istället kan simuleras med tillräcklig noggrannhet. Med detta som grund har MSB sedan många år ett avtal med Chalmers tekniska högskola att på forskarnivå studera och utveckla sådana beräknings- och analys hjälpmedel. De forskare som kunnat disputerat genom detta arbete har sedan blivit anlitade för fortsatt kunskapsuppbyggnad och analysarbete, främst genom företagen Reinertsen, Cowi och LL Engineering. Arbetet har då också parallellt kunnat generera den erforderliga kunskapsmassan, något som i Sverige på forskningsnivå tidigare inte funnits dokumenterat på ett tillfredsställande sätt.



I sitt arbete inom kunskapsområdet fysiskt skydd har MSB utarbetat en dokumentstruktur på olika nivåer:



- Styrande dokument (Skyddsrumregler, Komponenter)
- Implementerande dokument (Exempelsamling, Seminarserie, artiklar i Bygg & teknik med flera)
- Kunskapsdokument (Luftstötuvåg, Markstötuvåg, Splitterverkan med flera)

Resultatet finns redovisat i ett antal publikationer, vilka tillsammans utgör MSB:s referensdokument inom området, och finns tillgängligt för alla på MSB:s hemsida. Denna hemsida innehåller såväl forskningsresultat som tillämpningslitteratur och exempellösningar.

För MSB är det väsentligt att ha ett stort teoretiskt djup inom kunskapsområdet fysiskt skydd för att därigenom kunna vara säkra på att de konstruktioner som man ansvarar för håller den kvalitet som lagstiftaren förväntat sig. Nyttan av den uppbyggda kunskapsbanken är dock betydligt större än att enbart tillgodose MSB:s behov. Det har därför, som ett vidgat tillskott till samhällsnyttan, ansetts viktigt att föra ut information till andra intressenter om hur kunskapen om dynamiska förlöpp har sin giltighet i hantering av bebyggelsen.

Det är också väsentligt att kunskapsuppbyggnadens bevarande över tiden får en tillräcklig stabilitet så att man inte riskerar att hamna i ett alltför sårbart per-

sonberoende. Bedömningen är att kunskapen bäst odlas och vidmakthålls om den får en bred och gränsöverskridande tillämpning och förståelse. Här har Chalmers även en viktig roll att fungera som kunskapsbärare, något som garanterar att kunskapens bevarande blir mer stabil över tiden.

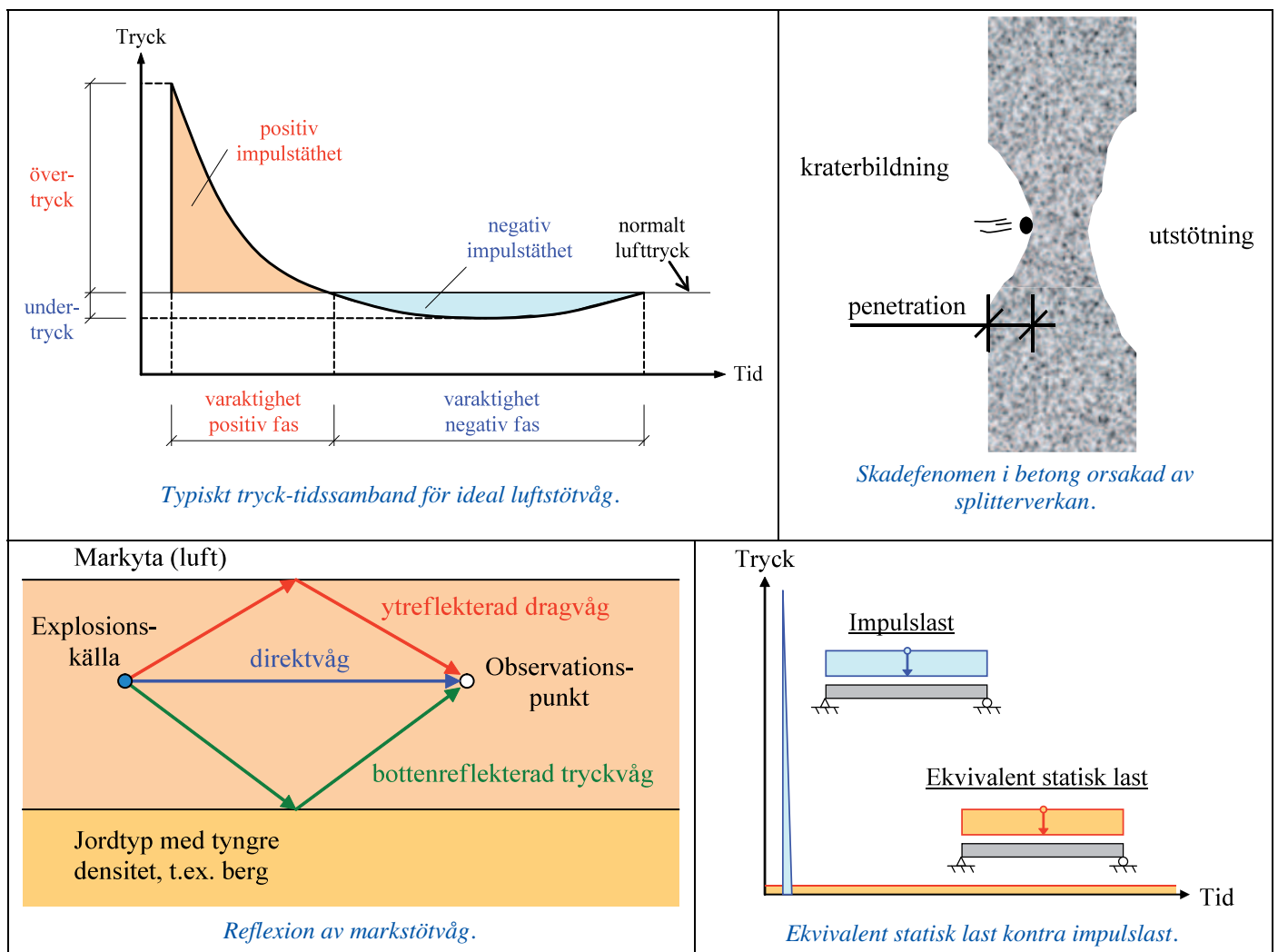
För att ytterligare bidra till en ökad kunskapsspridning inom området planerar MSB att under nästa år genomföra ett eller flera seminarier utifrån kunskapsdokumenten Luftstötuvåg, Markstötuvåg, Splitterverkan samt Bebyggelsens motståndsförmåga, se *figur 1*. På hemsidan har därför byggts upp en avdelning med mer information om detta där man kan anmäla sitt intresse för dessa frågor samt att delta i det planerade seminariet. Tanken är att kunna fånga upp kunniga och intresserade människor kring dessa frågor samt sprida framtaget specialkunnande till verksamma konstruktörer, särskilt i form av konkreta tillämpningsexempel.

### Laster från explosionslast

Stommen i MSB:s kunskapsbank utgörs av framtagna kunskapsdokument, av vilka publikationerna behandlande luftstötuvåg, markstötuvåg samt splitterverkan utgör en central del. Samtliga dessa publikationer ger en grundlig genomgång inom respek-

tive ämnesområde. Som ett viktigt komplement till dessa har även tre publikationer om bebyggelsens motståndsförmåga tagits fram, vilka utgör en mer tillämpad inriktning för strukturell dynamisk respons hos explosionsbelastade konstruktioner. Nedan ges en kort introduktion av dessa kunskapsdokument med anspelning till illustrationer i *figur 2*.

**Luftstötuvåg.** En explosion i luft ger upphov till en kompakt gas med stort energiinnehåll som under högt tryck tvingar tillbaka den omgivande atmosfären. Denna plötsliga expansion ger upphov till en stötuvåg som i överljudshastighet rör sig ut från explosionens centrum. Omedelbart bakom stötuvågsfronten finns en region där bland annat tryck och temperatur kan vara markant högre än i den ostörda luften framför fronten. Alltefter som stötuvågen avlägsnar sig från explosionens källa, avtar dock energiintensiteten i den påverkade volymen, vilket leder till att tryck och temperatur snabbt återgår till sitt ursprungliga läge. Ett typiskt tryck-tidssamband hos en ideal luftstötuvåg visas i *figur 2*. Av detta framgår att stötuvågen kan delas upp i en positiv och en negativ fas där den förra uppvisar betydligt högre tryck men kortare varaktighet än den senare. En stötuvåg utgör ett högst dynamiskt fenomen där väldigt



Figur 2: Representativa bilder av luftstötuvåg, markstötuvåg, splitterverkan samt ekvivalent statisk last mot struktur.

höga lastvärden kan verka under en mycket begränsad tidsperiod, något som medför att det kan vara mer relevant att använda begreppet impulstäthet än tryck för att beskriva dess lastegenskaper. Vad som har störst betydelse – övertryck eller impulstäthet – beror dock på lastens varaktighet i förhållande till den studerade strukturens dynamiska egenskaper.

**Markstötväg.** Principerna för en markstötväg är i flera avseenden desamma som för en luftstötväg. Skillnader i jordmaterialets sammansättning medför dock även att det finns viktiga skillnader. En löst packad jord minskar laststyrkan medan en hårt packad jord leder till en ökad last. Vidare fås en ökad lasteffekt om jordens tomrum, porvolymen, är vattenfyllt. En annan betydelsefull parameter är på vilket djup under markytan som en explosion inträffar – ju närmare ytan explosionen sker desto mindre last förs ner i marken eftersom spridning sker upp i luften. Även i ett sådant fall har jordmaterialets egenskaper stor betydelse på slutlig lastnivå. En annan skillnad gentemot en luftstötväg är att den last som verkar i en given punkt i marken i större grad påverkas av reflexion mot överliggande (markytan) och underliggande (till exempel berg eller grundvattennivå) material, vilket resulterar i att markstötvägen får ett mer komplicerat utseende än vad som är fallet med den ideala luftstötvägen, se figur 2.

**Splitterverkan.** När en bomb detonerar kan, förutom en luftstötväg, även splitter i varierande storlek skapas. Splitter uppkommer då en bombs hölje fragmenteras och består av delar från höljet av varierande form och storlek. Splitter som träffar ett mål kan antingen penetrera – tränga in i – eller perforera – tränga igenom – målet. Vid splittrträff av en betongkonstruktion kommer betongen närmast anslaget att krossas och kraterbildning att ske såsom schematiskt visas i figur 2. Penetrationsförloppet kan även orsaka omfattande sprickbildning och den uppkomna kraterbildningen gör att konstruktionens effektiva tjocklek, och därmed bärförmåga, lokalt minskar. Vidare kan armering som träffas av splitter skadas eller gå av. Är penetrationsdjupet tillräckligt stort kan även utstötning fås på anslaget baksida, det vill säga att betong slits loss från den belastade konstruktionen. Detta sker när en tryckväg, orsakad av exempelvis en infallande stötväg eller splitter, reflekteras till en dragväg på väggens baksida som överstiger betongens draghållfasthet.

**Ekvivalent statisk last.** Den strukturella responsen hos en statiskt respektive dynamiskt belastad konstruktion kan skilja sig åt väsentligt. Detta gäller framförallt för en intensiv men kortvarig impulslast där konstruktionens maximala statiska lastkapacitet ofta får en underordnad betydelse. Istället är det konstruktionens massa samt kombination av lastkapacitet och

deformationsförmåga som blir avgörande för dess förmåga att utstå aktuell last. Det är vanligt att inte explicit beakta dynamiken vid dimensioneringen mot en impulslast utan istället använda en så kallad ekvivalent statisk last. Denna statiska last ges samma utbredning som den verkande impulslasten och dess storlek väljs så att den genererar samma yttre arbete som impulslasten. För flertalet tillämpningar fungerar en sådan metodik bra och har även fördelen att den ger verksamma konstruktörer, som normalt är vanare att använda statiska laster, en ökad förmåga att tillfredsställa hantera aktuell lastsituation.

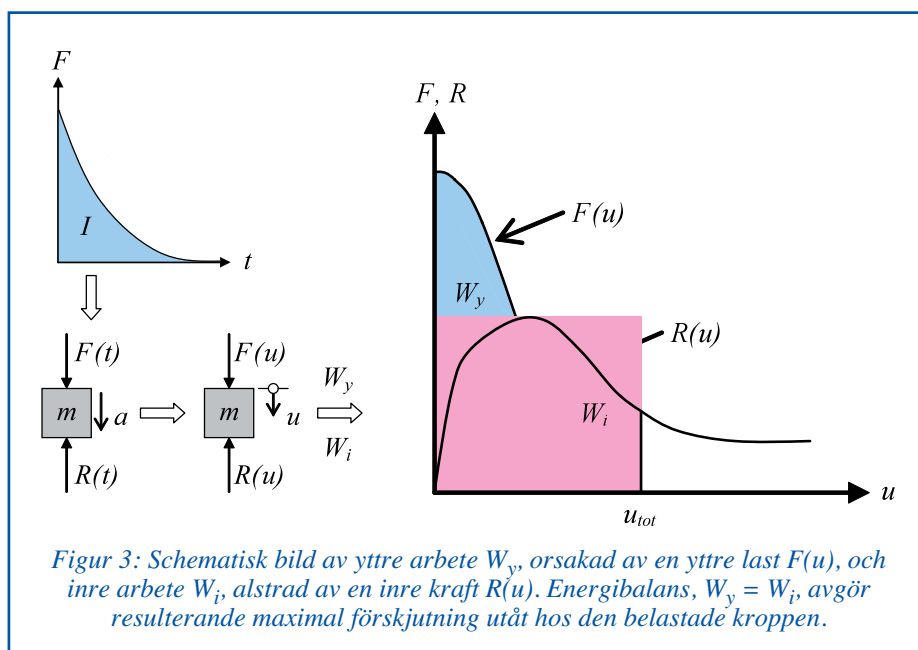
Det är dock viktigt att inse att den ekvivalenta statiska last som tagits fram för en given kombination av dynamisk last och belastad konstruktionsdel bygger på vissa bestämda förutsättningar. Om inte dessa uppfylls blir inte heller den ekvivalenta statiska lasten representativ. Vidare måste man som konstruktör vara medveten om, samt beakta, att en dynamiskt belastad konstruktion kommer svänga fram och tillbaka, något som även orsakar laster i en riktning motsatt den som den yttre lasten verkar i. Det är värt att poängtera att även om metodik med ekvivalent statisk last fungerar bra för att bestämma maximal påkänning i konstruktionen så kan det råda betydande skillnader i den initiala globala responsen hos en dynamiskt belastad konstruktion jämfört mot vad som fås vid en belastning av motsvarande ekvivalenta statiska lastfall. Om den verkande impulslasten är tillräckligt intensiv är det exempelvis möjligt att en del av konstruktionen går till lokalt brott innan en annan konstruktionsdel ens har påverkats – förenklat kan sägas att den senare konstruktionsdelen för ett sådant fall är "ovetande" om att en belastning har skett. Anledningen till detta är att det tar tid för informationen om en yttre last att färdas genom materialet och konstruktionens re-

spons i de inledande skedena kan därför betraktas som att dess randvillkor är tidsberoende.

### Beräkningskoncept för lastupptagning vid impulsbelastning

Beräkningskonceptet vid en impulsbelastning är att det ska råda energibalans mellan det yttre arbetet  $W_y$  och det inre arbetet  $W_i$ . För en byggnad som förväntas utsättas för extrem impulsbelastning är det därför generellt av vikt att den är utformad på ett sådant sätt att den kan uppvisa en seg strukturell respons med bibehållen bärförmåga. En seg respons hos utsatt konstruktion säkerställer en effektiv energiupptagande förmåga med möjlighet till kraftomlagringar så att ett lokalt brott inte leder till total kollaps. Denna devis gäller även vid statisk belastning men är särskilt viktigt vid exceptionell dynamisk belastning såsom är fallet vid explosionslast. För en konstruktion utsatt för en sådan last är det inte heller dess maximala lastkapacitet som är av primärt intresse. Istället är det dess totala energiupptagande förmåga, det vill säga dess deformationsförmåga i kombination med tillhörande lastupptagning, som blir avgörande för dess lämplighet som skydd.

För att illustrera den strukturella responsen hos en impulsbelastad konstruktion används här ett enfrihetsgradssystem av en kropp med massan  $m$  som utsätts för en last  $F(t)$  och vars förskjutning  $u$  motverkas av ett inre statiskt motstånd  $R(u)$  såsom illustreras i figur 3. Impulslasten  $F(t)$  som verkar mot kroppen ger upphov till en förskjutning  $u$  hos denna och från det resulterande last-förskjutningssambandet  $F(u)$  kan det yttre arbetet  $W_y$  bestämmas. Detta balanseras av ett inre arbete  $W_i$ , vilket baseras på den inre kraft  $R(u)$  som alstras i kroppen vid förskjutning. Hur sambandet för denna inre kraftupptagning  $R(u)$  ser ut beror på i konstruktionen ingående material och ut-



formning och kan således variera stort. Generellt gäller dock att en styv konstruktion ger små deformationer med krav på stora mot-hållande krafter medan en vek konstruktion resulterar i stora deformationer i kombination med små krafter.

### Beräkningsmetod

Om varaktigheten hos lasten  $F(t)$  är så kort att det inre arbetet  $\Delta W_i$  som utförts när hela lasten lagts på är litet,  $\Delta W_i \ll W_y$ , så kan lasten liknas vid en idealisk impulslast, det vill säga en tidsberoende last med oändligt högt tryck och infinitesimal varaktighet, med den karakteristiska impulsen  $I_k$ . För ett sådant fall kan det yttre arbetet  $W_y$  likställas med den rörelseenergi  $E_k$  som alstras hos en impulsbelastad kropp, och av detta kan kända dynamiska samband användas för att koppla impulslast till yttre arbete.

Inverkan av en karakteristisk impuls  $I_k$  på en kropp med massan  $m$  kan tecknas som

$$I_k = mv \quad (1)$$

och rörelseenergin  $E_k$  hos samma kropp med hastigheten  $v$  kan uttryckas som

$$E_k = \frac{mv^2}{2} \quad (2)$$

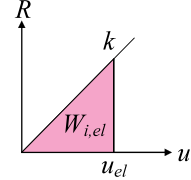
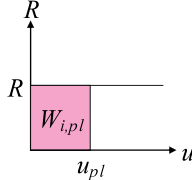
Tillsammans ger detta att rörelseenergin, och därmed det yttre arbetet  $W_y$ , som alstras i den belastade kroppen kan uttryckas som

$$W_y = E_k = \frac{I_k^2}{2m} \quad (3)$$

Det yttre arbetet  $W_y$  ska balanseras av ett inre arbete  $W_i$ . Här utgås från två idealiserade fall – linjärelastisk samt plastisk respons – där uttryck för inre arbete, maximal förskjutning samt ekvivalent statisk last sammanfattas i *tabell 1*.

För att kunna använda här presenterade uttryck på verkliga konstruktioner är det nödvändigt att först transformera studerad konstruktion, exempelvis en balk, till ett enfrihetsgradssystem. Detta är möjligt genom att använda så kallade transformationsfaktorer  $\kappa$  som väljs så att rörelseenergi samt utträttat yttre- och inre arbete i balk och enfrihetsgradssystem förblir desamma. För detta nyttjas antagandet att utböjningsformen hos belastad balk förblir densamma oavsett lastnivå, något som gör det möjligt att beskriva utböjningen längs hela balken genom att enbart ange förskjutningen i en punkt. Denna punkt, den så kallade systempunkten, ges egenskaper så att dess förskjutning  $u_s$  speglas av den i ett ekvivalent enfrihetsgradssystem, se *figur 4*.

Den dynamiska grundekvationen för ett odämpat enfrihetsgradssystem kan tecknas som

Begrepp	Elastisk respons	Plastisk respons
		
Yttre arbete	$W_{y,el} = E_k = \frac{I_k^2}{2m}$	$W_{y,pl} = E_k = \frac{I_k^2}{2m}$
Inre arbete	$W_{i,el} = \frac{ku_{el}^2}{2}$	$W_{i,pl} = Ru_{pl}$
Maximal förskjutning	$u_{el} = \frac{I_k}{m\omega}$	$u_{pl} = \frac{I_k^2}{2mR}$
Ekvivalent statisk last	$Q_{el} = I_k\omega$	$Q_{pl} = R$
Vinkel-frekvens	$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$	-

*Tabell 1: Uttryck för att beräkna yttre arbete, inre arbete, maximal förskjutning samt ekvivalent statisk last för ett enfrihetsgradssystem med linjärelastisk eller plastisk respons.*

$$m\ddot{u} + R(u) = F(t) \quad (4)$$

där  $\ddot{u}$  betecknar systempunktens acceleration. För att transformera balkens system till ett ekvivalent enfrihetsgradssystem utgås från dess respons i vald systempunkt. I systempunkten appliceras en ek-

kvivalent massa  $m = \kappa_m m_b$ , en ekvivalent mot-hållande kraft  $R(u) = \kappa_k R_b(u)$  samt en ekvivalent yttre last  $F = \kappa_F F_b(t)$  så att den dynamiska grundekvationen kan uttryckas som

$$\kappa_m m_b \ddot{u} + \kappa_k R_b(u) + \kappa_F F_b(t) \quad (5)$$

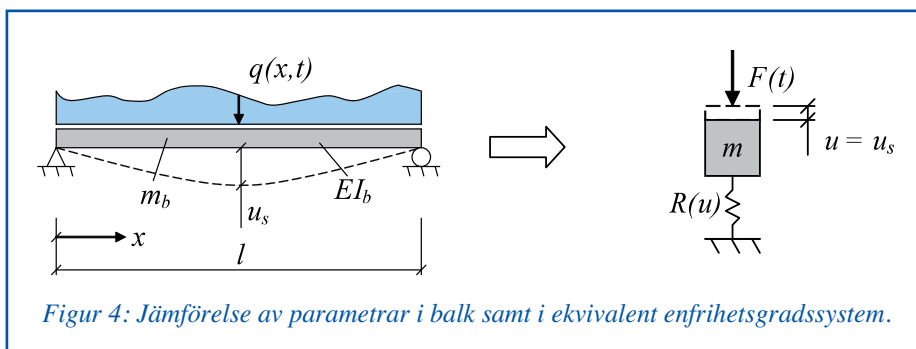
Det går att visa att  $\kappa_k = \kappa_F$  och detta tillsammans med definitionen  $\kappa_m = \kappa_m / \kappa_F$  ger att den dynamiska grundekvationen för balkens ekvivalenta system kan uttryckas som

$$\kappa_m m_b \ddot{u} + R_b(u) = F_b(t) \quad (6)$$

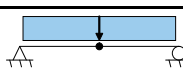
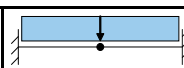
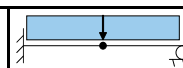
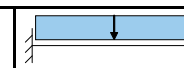
Enda skillnaden i detta uttryck jämfört med ekvation (4) är parametern  $\kappa_m$  som applicerats på balkens massa  $m_b$ . I praktiken innebär detta att det enbart är balkens massa som behöver transformeras medan inre kraft (styvhet) och yttre last är desamma som verkar på balken. En sammanställning av transformationsfaktorer för balk belastad med en jämnt utbredd last ges i *tabell 2*.

### Illustrerande exempel

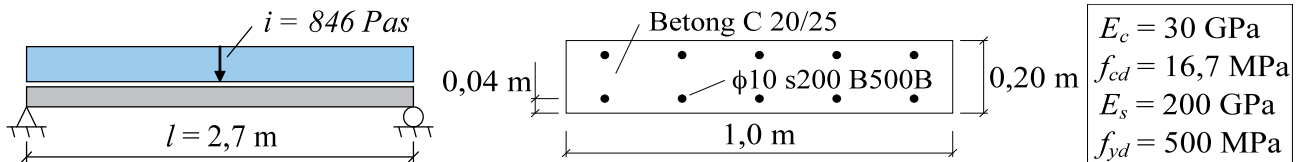
För att övergripande illustrera visad beräkningsmetod ges här ett kort beräkningsexempel på en impulsbelastad, tvåsidigt upplagd platta enligt *figur 5*. Trycket approximeras att vara detsamma över



*Figur 4: Jämförelse av parametrar i balk samt i ekvivalent enfrihetsgradssystem.*

	Jämnt utbredd last			
				
	Utböjningskurva vid elastisk respons			
$\kappa_M$	0,504	0,406	0,483	0,257
$\kappa_F$	0,640	0,533	0,600	0,400
$\kappa_{MF}$	0,787	0,762	0,805	0,642
	Utböjningskurva vid plastisk respons			
$\kappa_M$	0,333	0,333	0,333	0,333
$\kappa_F$	0,500	0,500	0,500	0,500
$\kappa_{MF}$	0,667	0,667	0,667	0,667

*Tabell 2: Transformationsfaktorer för balk belastad med en jämnt utbredd last. Svart punkt markerar läget för vald systempunkt.*



Figur 5: Studerad plattstrimla utsatt för explosionslast genererad av en marknära laddning om 100 kg TNT på avståndet 15 m.

hela plattan varför en 1,0 m bred plattstrimla studeras. Kontroll görs med antagande om linjärelastisk respons (sprucket tvärsnitt, stadium II) samt plastisk respons (lastkapacitet i brottgräns, stadium III).

Plattstrimlans massa uppgår till

$$m_b = \rho \cdot b \cdot h \cdot l = 2400 \cdot 1,0 \cdot 0,20 \cdot 2,7 = 1296 \text{ kg} \quad (7)$$

För enfrihetsgradssystemet modifieras detta med värdet på  $\kappa_{mF}$  enligt tabell 2, varvid fås

$$m_{II} = \kappa_{mF,II} \cdot m_b = 0,788 \cdot 1296 = 1021 \text{ kg} \quad (8)$$

$$m_{III} = \kappa_{mF,III} \cdot m_b = 0,667 \cdot 1296 = 864 \text{ kg} \quad (9)$$

Styvheten  $k$  beräknas enbart för det linjärelastiska fallet och för ett sprucket tvärsnitt fås, vid antagande om ren böjning samt försummande av armering på tryckt sida, att tröghetsmomentet  $I_{II} = 5,3 \cdot 10^{-5} \text{ m}^4$ . Baserat på detta kan styvheten för linjärelastiskt system beräknas som

$$k_{II} = \frac{384}{5} \cdot \frac{EI_{II}}{l^3} = \frac{384}{5} \cdot \frac{30 \cdot 10^9 \cdot 5,3 \cdot 10^{-5}}{2,7^3} = 6,2 \cdot 10^6 \text{ N/m} \quad (10)$$

och vinkelfrekvensen som

$$\omega_{II} = \sqrt{\frac{k_{II}}{m_{II}}} = \sqrt{\frac{6,2 \cdot 10^6}{1021}} = 78 \text{ rad/s} \quad (11)$$

På säker sida försummas inverkan av armering på tryckt sida varvid plattstrimlans momentkapacitet kan beräknas till  $M_{Rd} = 30,3 \text{ kNm}$  och den inre mothållande kraften  $R$  bestämmas som

$$R = ql = \frac{8M_{Rd}}{l} = \frac{8 \cdot 30,3}{2,7} = 90 \text{ kN} \quad (12)$$

På säker sida ansätts lasten motsvara en ideal impulsbelast som uppgår till

$$I = b \cdot l \cdot i = 1,0 \cdot 2,7 \cdot 846 = 2284 \text{ Ns} \quad (13)$$

Nu kan systempunktens förskjutning beräknas och för system med linjärelastisk respons fås att

$$u_{II} = \frac{I}{m_{II}\omega_{II}} = \frac{2284}{1021 \cdot 78} = 28,7 \quad (14)$$

medan system med plastisk respons ger att

$$u_{III} = \frac{l^2}{2m_{III}R} = \frac{2284^2}{2 \cdot 864 \cdot 90 \cdot 10^3} = 33,3 \text{ mm} \quad (15)$$

För elastiskt system kan den ekvivalenta statiska lasten för plattstrimlan slutligen beräknas till

$$q_{II} = \frac{k_{II}u_{II}}{l} = \frac{6,2 \cdot 10^6 \cdot 28,7 \cdot 10^{-3}}{2,7} = 66 \text{ kN/m} \quad (16)$$

och för plastiskt system som

$$q_{III} = \frac{R}{l} = \frac{90}{2,7} = 34 \text{ kN/m} \quad (17)$$

Det kan noteras att för linjärelastisk respons (stadium II) motsvarar impulslasten en ekvivalent statisk last som är större än kapaciteten vid plastisk respons (stadium III). I praktiken innebär detta att balken först kommer spricka upp och därefter plasticera. Med andra ord så är ett antagande om stadium II för studerad balk oralistiskt med hänsyn till den last som applicerats. Utförda beräkningar för detta stadium ska därför främst ses som ett illustrativt exempel på vilken skillnad som fås för olika statiska responser hos impulsbelastad konstruktion.

För balk med elastisk respons behöver inte någon kontroll av deformationsförmågan göras. Där utgörs kontrollen istället av att beräknad lastkapacitet är tillräcklig. För en balk med plastisk respons är lastkapaciteten dock låst och kapacitetskontrollen övergår här istället till att kontrollera konstruktionens deformationsförmåga. Någon sådan kontroll utförs dock inte i här redovisad beräkning. För ytterligare information hänvisas till beräkningsexempel som kan laddas ner på MSB:s hemsida.

## Slutord

Ett mål i MSB:s arbete är att sprida kunskap och förmåga att hantera den typ av belastning som kan uppstå i samband med en explosion. Ovan nämnda kunskapsdokument är en viktig förutsättning för detta men bedöms inte vara fullt tillräckligt för att den verkamme konstruktören ska kunna ta till sig kunskapen. Därför pågår framtagning av dokumentation med en mer tillämpad inriktning i form av flera fristående beräkningsexempel. Syftet med dessa är att på ett tydligt

och pedagogiskt sätt belysa hur innehållet i övriga kunskapsdokument kan användas för olika tillämpningar.

Dessa exempel kommer fungera som levande dokument som läggs upp på MSB:s hemsida varifrån den intresserade enkelt kan ladda ner dem. Avsikten är att hemsidan regelbundet ska uppdateras med nya beräkningsexempel allteftersom dessa tas fram. Intresserade konstruktörer uppmuntras även att komma in med åsikter och förslag på lämpliga frågeställningar som kan komma att behandlas i framtida exempel. Som ytterligare komplement kommer det även läggas upp dokument som sammanfattar viktiga uttryck från de grundläggande kunskapsdokumenten som krävs för att lösa aktuella beräkningsexempel.

Förhoppningen med detta arbete är att öka kompetensen om hur explosionsbelastade konstruktioner kan hanteras och som en del av detta planeras seminarieverksamhet under 2013. För vidare information se hemsidan. ■

## Referenser

- Johansson M. (2012): *Luftstövåg. Myndigheten för samhällsskydd och beredskap*. Publ.nr MSB448, Karlstad.
- Laine L. (2012): *Markstövåg. Myndigheten för samhällsskydd och beredskap*. Publ.nr MSB344, Karlstad.
- Leppänen J. (2012): *Splitterverkan. Myndigheten för samhällsskydd och beredskap*. Publ.nr MSB345, Karlstad.
- Johansson M. & Laine L. (2012): *Byggens motståndsförmåga mot extrem dynamisk belastning, Del 1: Last av luftstövåg*. Myndigheten för samhällsskydd och beredskap. Publ.nr MSB449, Karlstad.
- Johansson M. & Laine L. (2012): *Byggens motståndsförmåga mot extrem dynamisk belastning, Del 2: Explosion i gatukorsning*. Myndigheten för samhällsskydd och beredskap. Publ.nr MSB450, Karlstad.
- Johansson M. & Laine L. (2012): *Byggens motståndsförmåga mot extrem dynamisk belastning, Del 3: Kapacitet hos byggnader*. Myndigheten för samhällsskydd och beredskap, Publ.nr MSB 0142-10, Karlstad.
- Samtliga referenser finns att ladda ner gratis på MSB:s hemsida: [www.msb.se/skyddsrum](http://www.msb.se/skyddsrum).