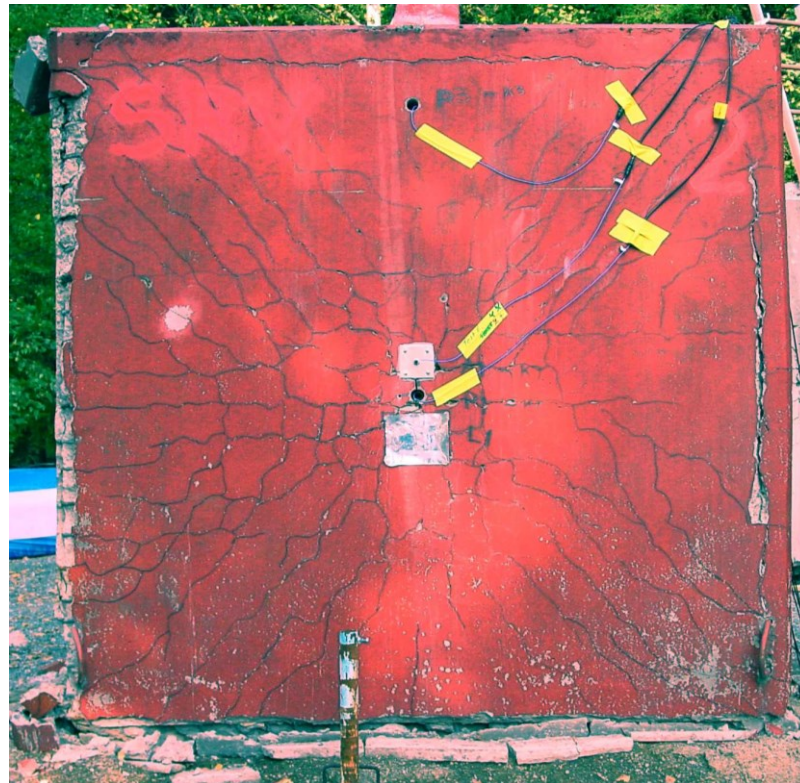


CIR webinarium 2024-06-03,
Fysiskt skydd och beredskap – med säkerhet i fokus
Strukturrepons vid explosionsbelastning



Morgan Johansson

Kort om Morgan

- Norconsult, Göteborg
 - Tekn doktor i betongkonstruktioner
 - Adj professor Chalmers
 - Teknisk expert på explosioner och impulsbelastade konstruktioner
 - MSB:s expert inom ämnesområdet Fysiskt skydd
- Kontaktuppgifter
 - Morgan.johansson@norconsult.com

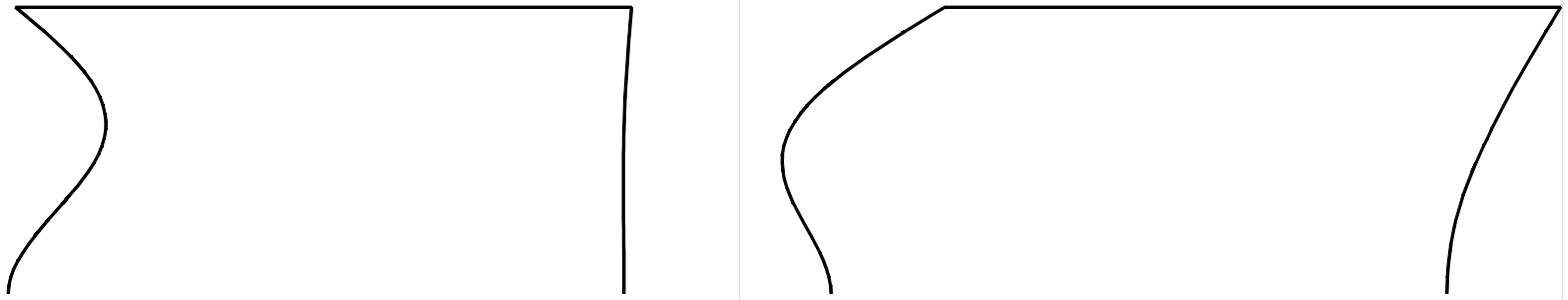


Innehåll

- Strukturrepons
 - Skillnad i respons jämfört med statisk last
 - Enfrihetsgradssystem (SDOF)
 - Energi och arbete, energibalans
 - Kritiska parametrar
 - Respons vid impulslast
 - Ekvivalent statisk last
 - Omvandling till SDOF
- MSB:s kunskapsbank
- Beräkningsexempel

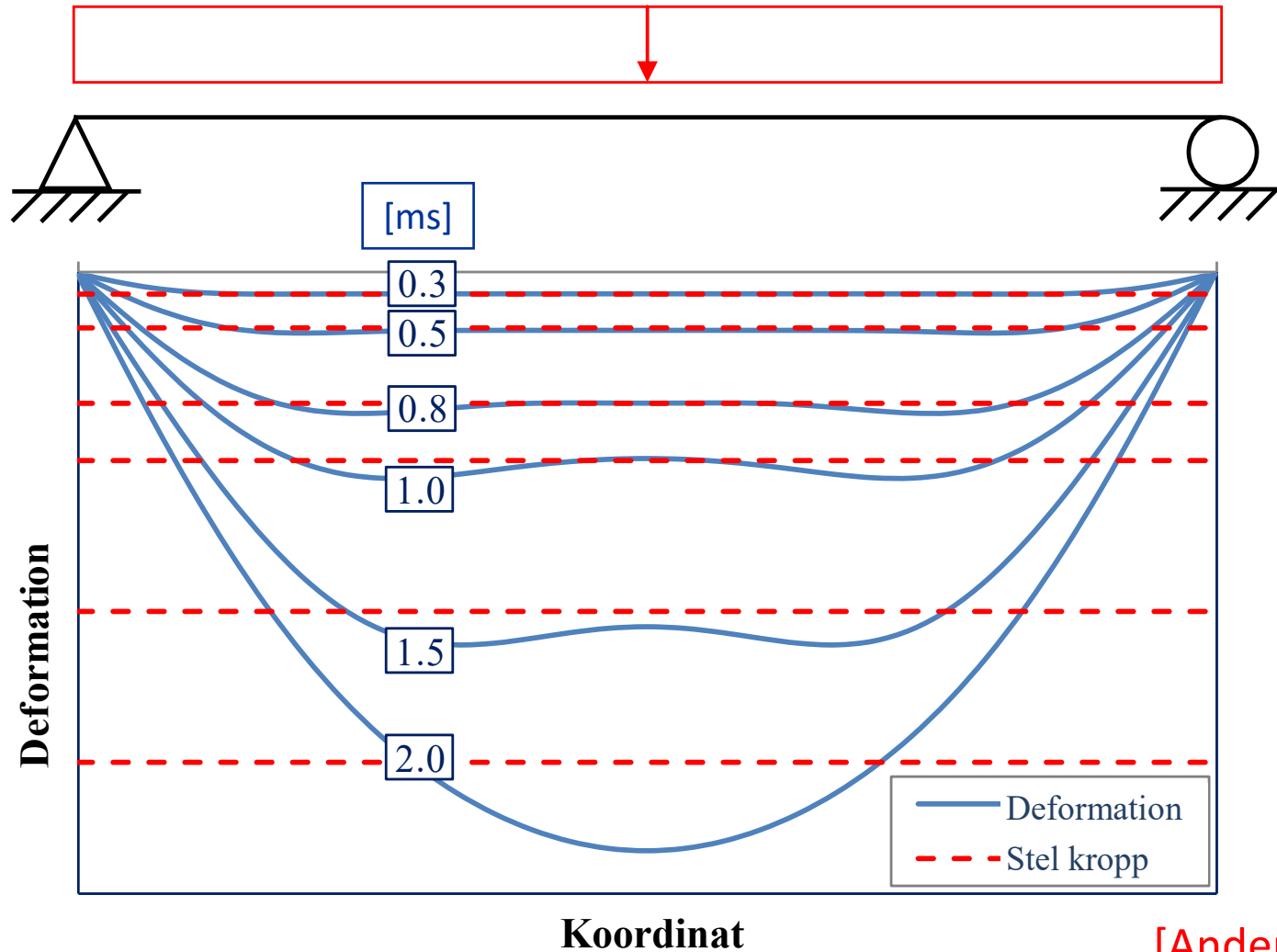
Introduktion

- Skillnad i respons jämfört med statisk last
 - Snabb belastning påverkar ingående materialegenskaper
 - Masströghetskrafter
 - Tar tid för information att färdas genom strukturen



- Tidsberoende randvillkor, andra brottfenomen möjliga
- Struktur svänger fram och tillbaka

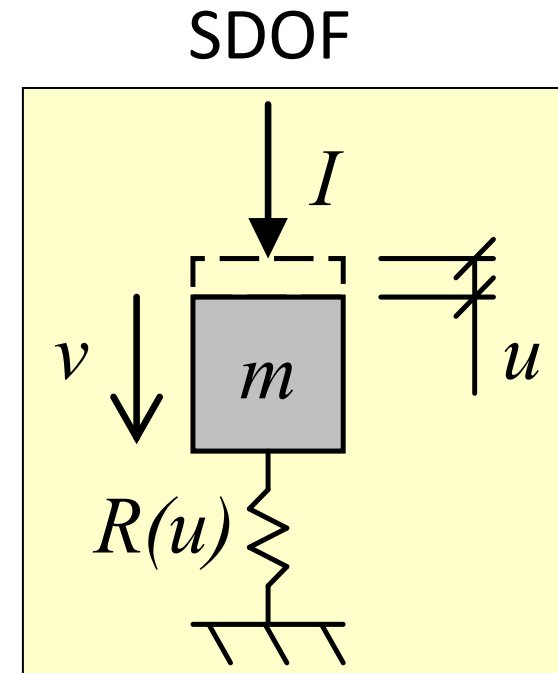
Initial balkrörelse



[Andersson och
Karlsson (2012)]

Enfrihetsgradssystem, SDOF

- Resonemang utgår från enfrihetsgradssystem
 - *Single degree of freedom (SDOF)*
- Ingående parametrar
 - Kropp
(massa m)
 - Strukturrespons
(styvhet k ; kapacitet R)
 - Last
(last F ; impuls I)
 - Rörelse
(deformation u ; hastighet \dot{u} , v ; acceleration \ddot{u} , a)



Typ av dynamisk last

- Karakteristisk impulslast

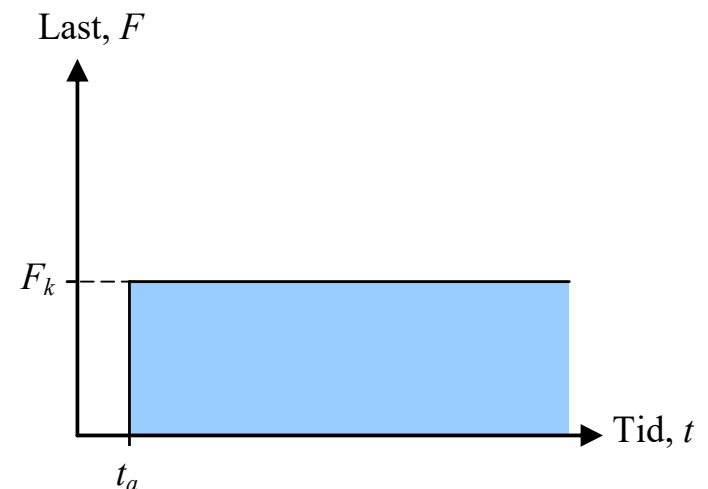
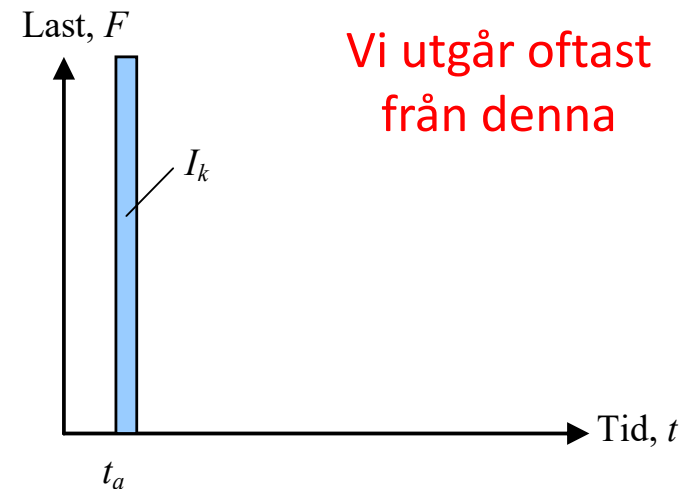
- Hög intensitet, kort varaktighet

- Detonation av sprängämne eller gasexplosion med stor blockering
 - Kort avstånd
 - Vek och tung struktur

- Karakteristisk trycklast

- Lägre intensitet, lång varaktighet

- Gasexplosion (liten blockering)
 - Långt avstånd, innesluten explosion
 - Styv och lätt struktur

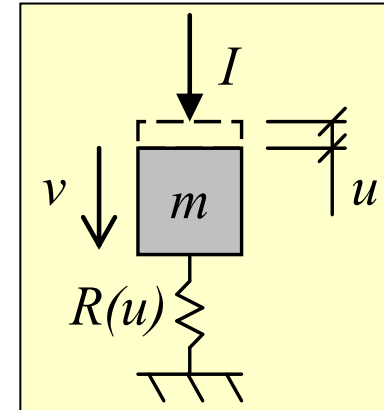


Energi och arbete

- Yttre arbete

- Rörelseenergi
- Rörelsemängd

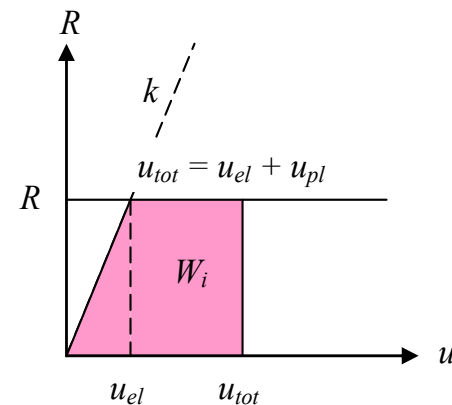
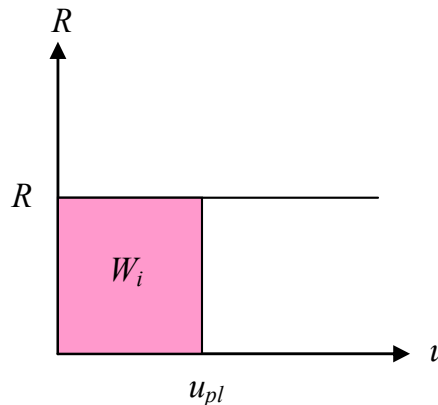
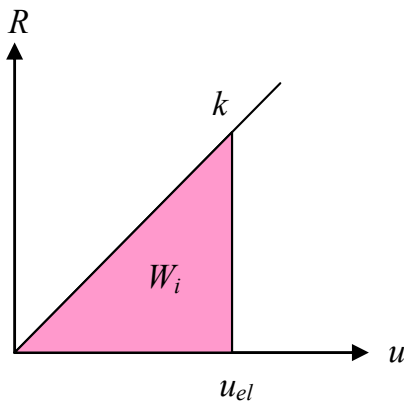
$$\left. \begin{aligned} E_k &= \frac{mv^2}{2} \\ I_k &= m \cdot v \end{aligned} \right\} W_y = E_k = \frac{I_k^2}{2m}$$



- Inre arbete

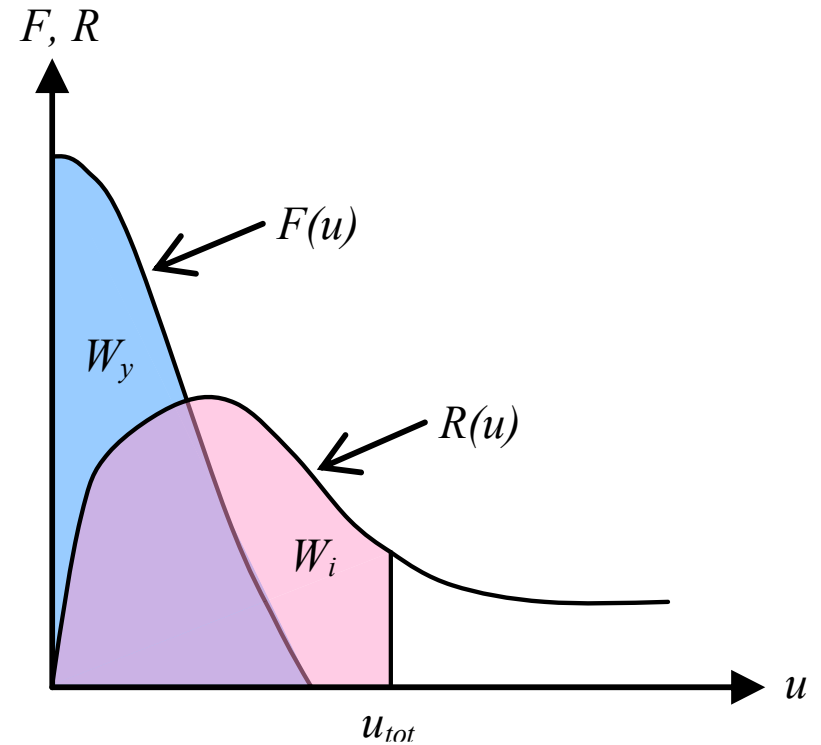
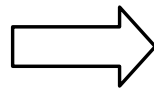
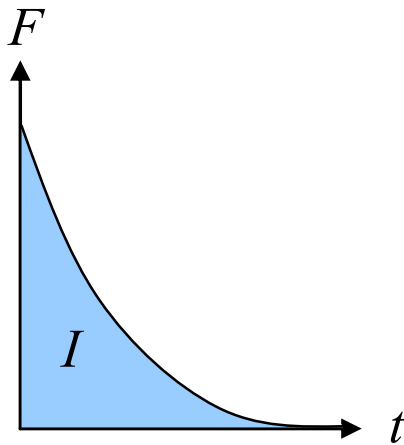
- Definition
- Elastisk, plastisk, elastoplastisk respons

$$W_i = \int_0^u R(u) du$$



Energibalans

- Yttre arbete = Inre arbete



Kritiska parametrar

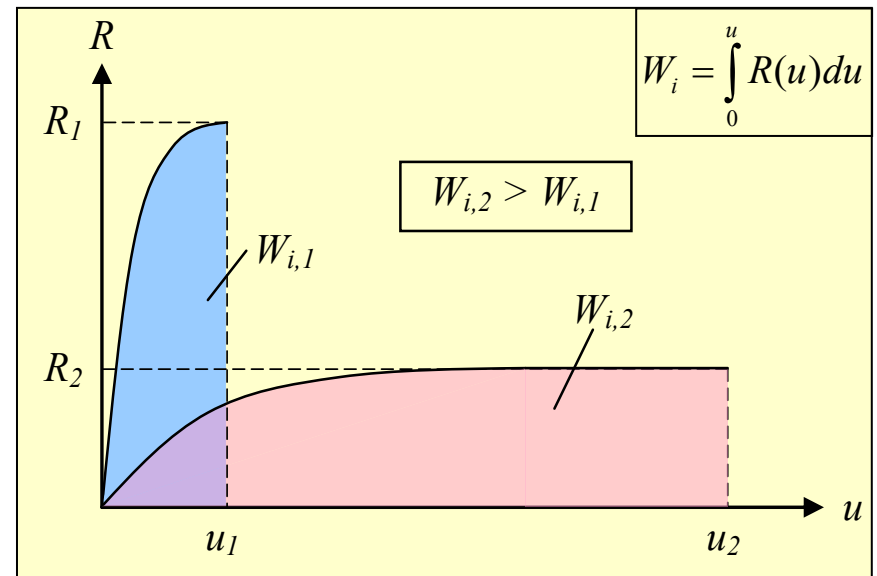
- Massa (yttre arbete)

$$W_y = \frac{I_k^2}{2m}$$

- Strukturegenskaper (inre arbete)

- Styvhet
- Hållfasthet
- Deformationsförmåga

Energiupptagningsförmåga, W_i

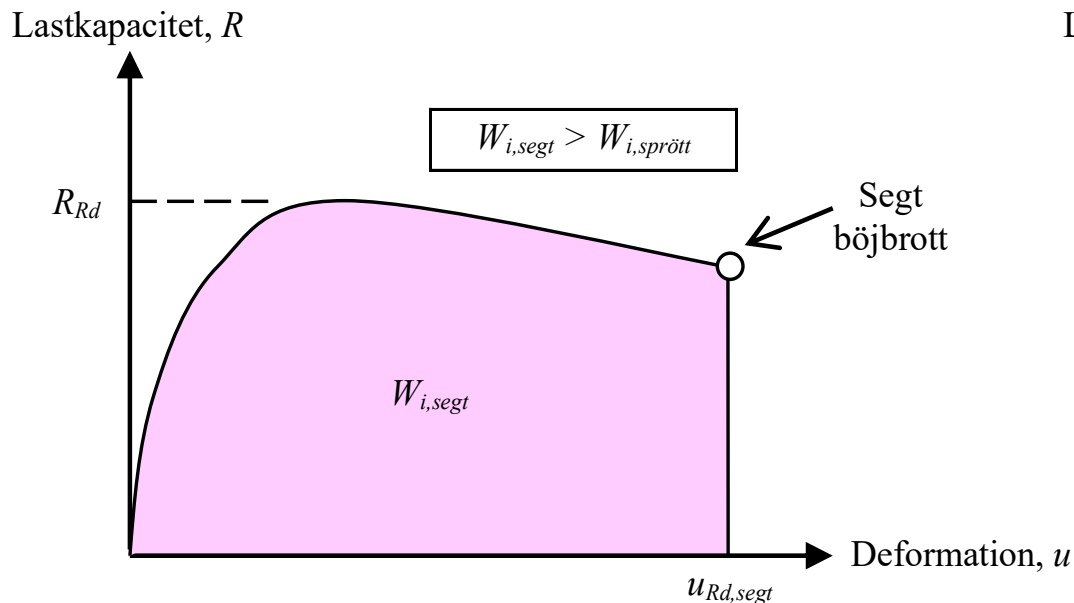


- Statisk last:
hög styvhet/kapacitet önskvärt
- Impulslast:
inte nödvändigtvis bra egenskaper

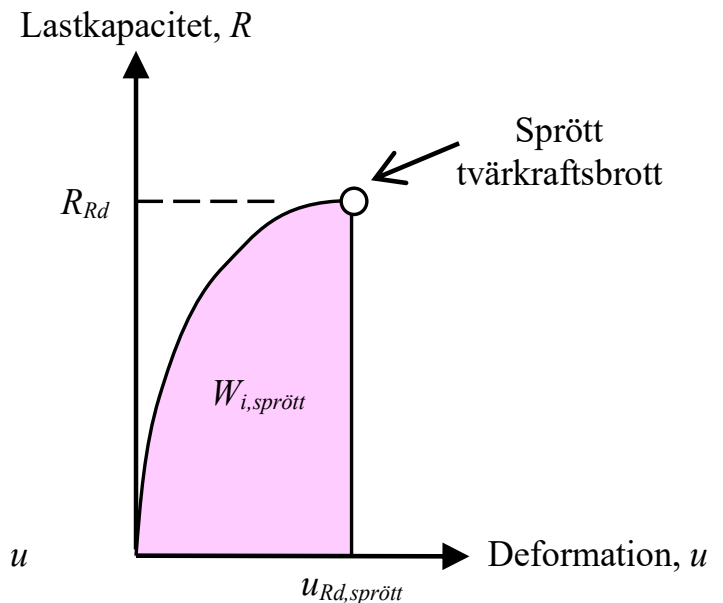
Hur erhålla stor energiupptagning?

- Stor deformationsförmåga

- Säkerställ segt böjbrott
- Undvik sprött brott (t.ex. tvärkraftsbrott)



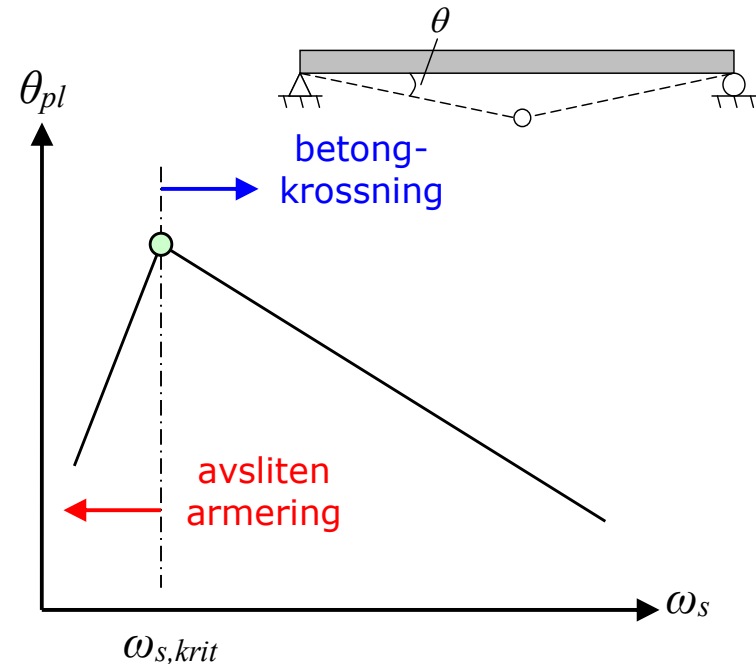
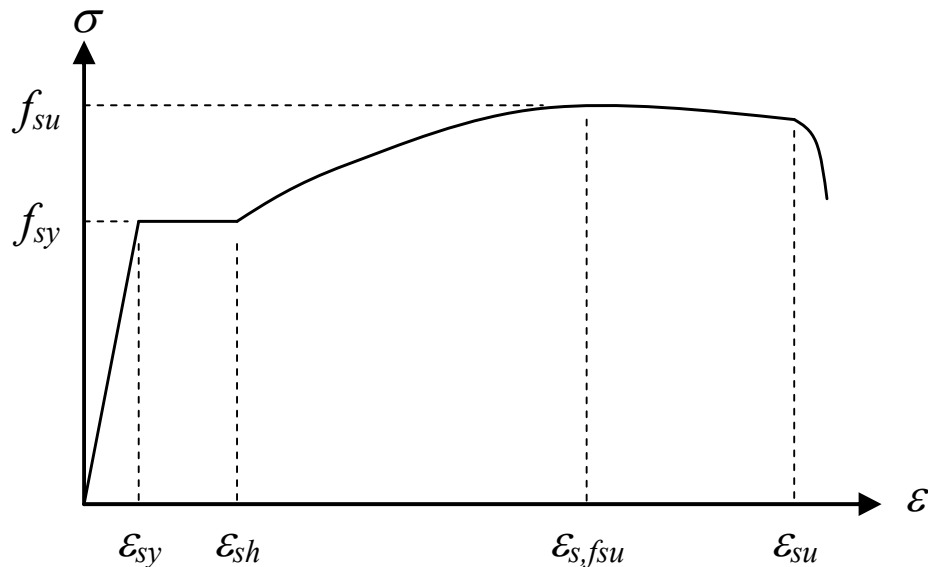
(a)



(b)

Hur uppnås ett segt böjbrott?

- Material
- Utformning
 - Betong – armeringstyp, mekanisk armeringsmängd
 - Stål – tvärsnittets utseende



Responstyp för olika material

- Elastisk respons

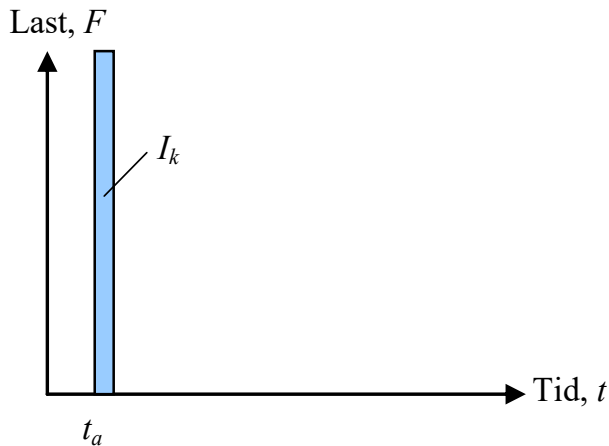
- Trä
 - Alla
- Stål
 - Tvärsnittsklass 2-4
 - Krav på små def.
- Betong
 - Förspänd armering
 - Krav på små def.

- Plastisk respons (önskas)

- Trä
 - Inga
- Stål
 - Tvärsnittsklass 1
(uppfylls av standardtvärsnitt)
- Betong
 - Slakarmering

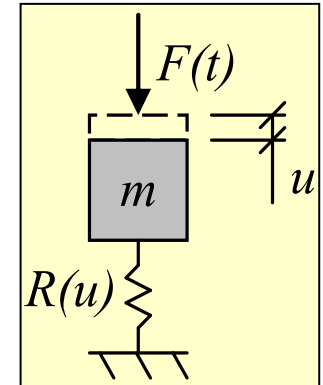
Respons vid impulslast (I)

- Karakteristisk impuls



Yttre arbete

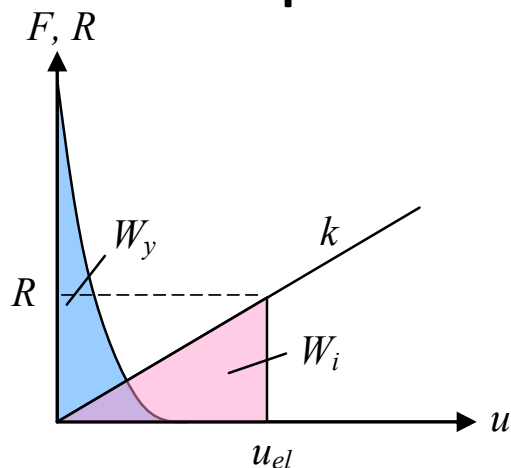
$$W_y = E_k = \frac{I_k^2}{2m}$$



Energibalans

$$u_{el} = \frac{I_k}{\sqrt{mk}} = \frac{I_k}{m\omega}$$

- Elastisk respons



Inre arbete

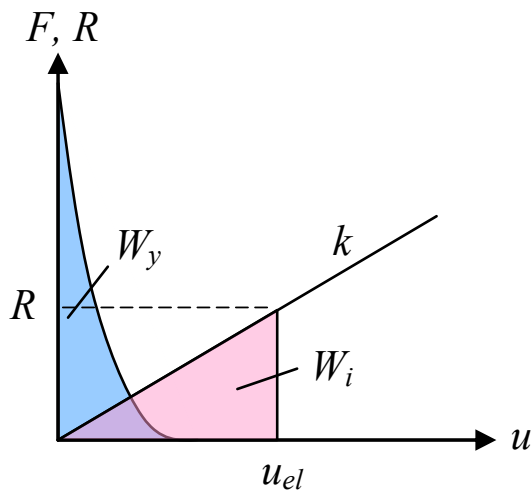
$$W_i = \frac{ku_{el}^2}{2}$$

Vinkelfrekvens

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

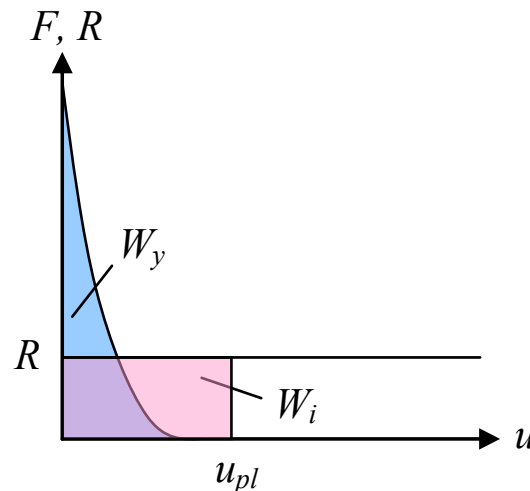
Respons vid impulslast (II)

- Deformation vid olika typer av respons



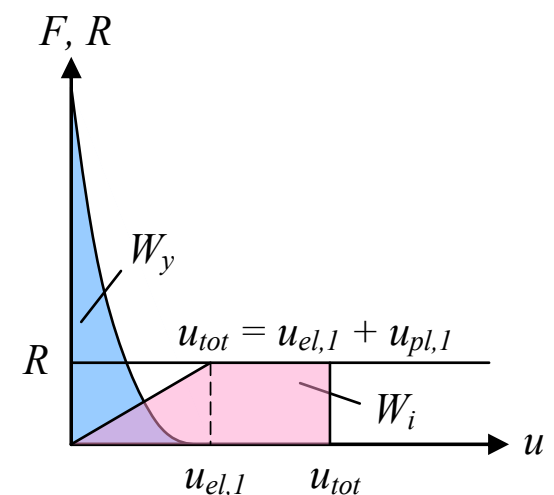
Elastisk

$$u_{el} = \frac{I_k}{m\omega}$$



Plastisk

$$u_{pl} = \frac{I_k^2}{2mR}$$



Elastoplastisk

$$u_{pl,1} = u_{pl} - \frac{u_{el,1}}{2}$$

$$u_{tot} = u_{el,1} + u_{pl,1} = u_{pl} + \frac{u_{el,1}}{2}$$

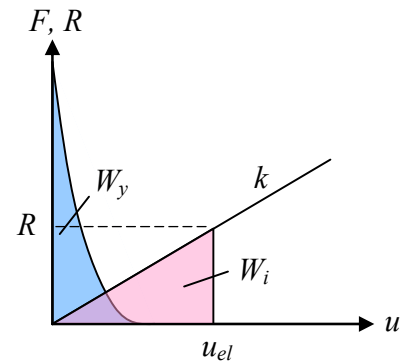
Respons vid impulslast (III)

- Ekvivalent statisk last

- Elastisk respons:

- samma deformation som dynamisk last

$$\left. \begin{aligned} Q &= ku_{el} \\ u_{el} &= \frac{I_k}{m\omega} \end{aligned} \right\} \boxed{Q = I_k \omega}$$



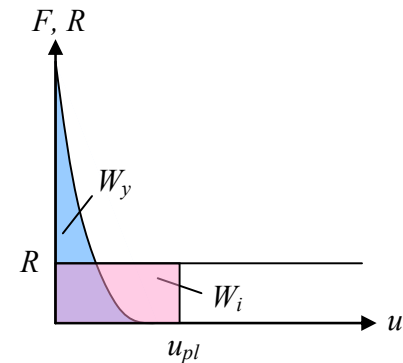
- Plastisk respons:

- maximal statisk kapacitet

$$\boxed{Q = R}$$

- plastisk deformationsförmåga styr kapacitet

$$\boxed{u_{pl} = \frac{I_k^2}{2mR} \leq u_{rd}}$$



Ekvivalent statisk last (I)

- Vanligt att använda vid dynamisk belastning
 - T.ex. explosioner
 - Möjliggör "normal" statisk dimensionering
- Definition
 - Den statiska last som uträttar samma arbete som en dynamisk last
 - Vid linjärelastisk respons → den statiska last som ger samma maximala deformation som aktuell dynamisk last

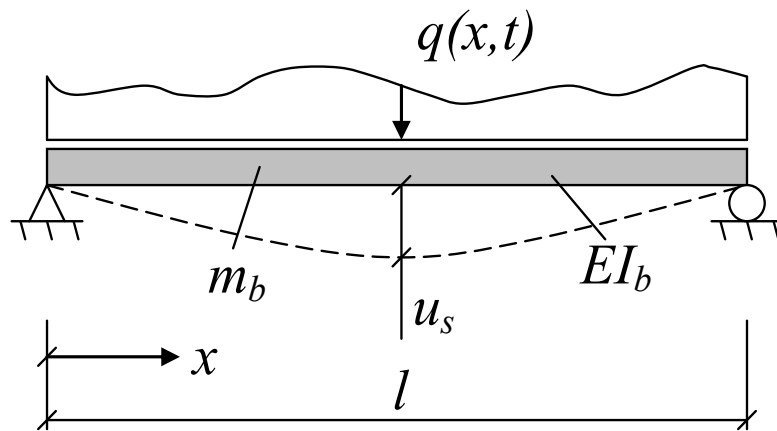
Ekvivalent statisk last (II)

- Lastens storlek beror på flera faktorer
 - Lastens egenskaper
 - Lastform, lasttopp, varaktighet, impuls
 - Bärverkets (mothållets) egenskaper
 - Massa, styvhet, lastkapacitet
- Ej möjligt att generellt bestämma storlek på ekvivalent statisk last enbart utgående från dynamisk last

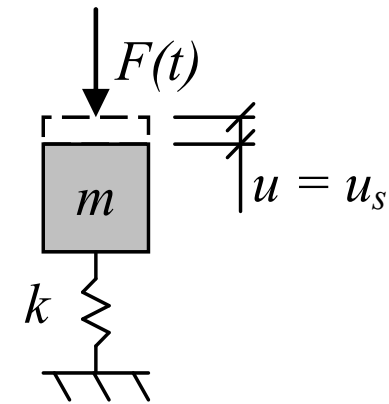
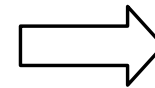
Omvandling av struktur till SDOF

SDOF = Single Degree of Freedom

- Hitta ekvivalent system



$$m_b \ddot{u} + c_b \dot{u} + k_b u = F_b(t)$$



$$m \ddot{u} + c \dot{u} + k u = F(t)$$

$$\left. \begin{aligned} \kappa_m m_b \ddot{u} + \kappa_k k_b u &= \kappa_F F_b(t) \\ \kappa_k &= \kappa_F \end{aligned} \right\}$$

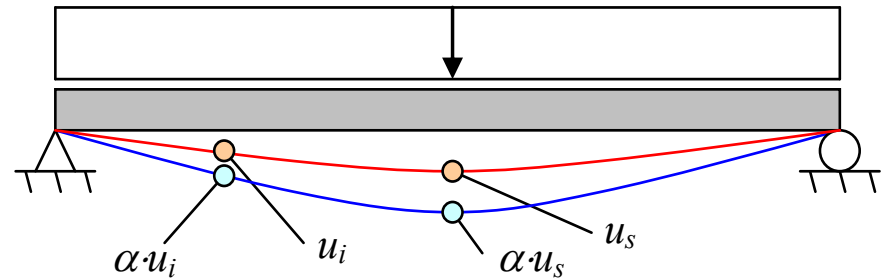
$$\kappa_{mF} m_b \ddot{u} + k_b u = F_b(t)$$

$$\kappa_{mF} = \frac{\kappa_m}{\kappa_F}$$

Koncept för omvandling

- Utböjningsform given

- Systempunktens rörelse beskrivs

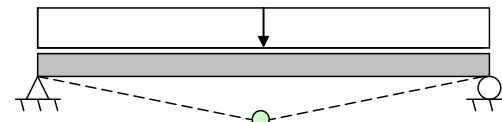
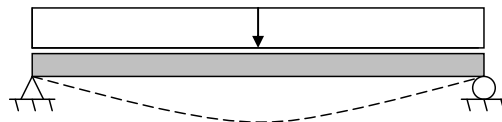


- Bibehållen energi/arbete

- Rörelseenergi $\rightarrow K_m$
- Inre arbete $\rightarrow K_k$
- Yttre arbete $\rightarrow K_F$

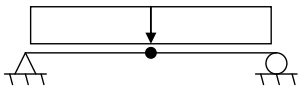
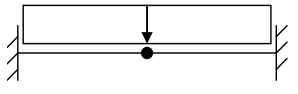
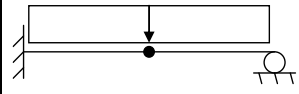
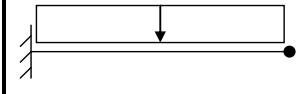
- Utböjningsform påverkar faktor

Elastisk



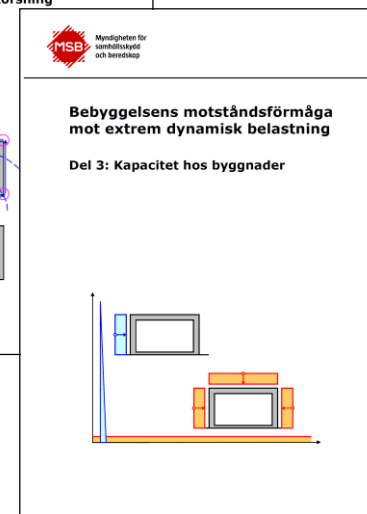
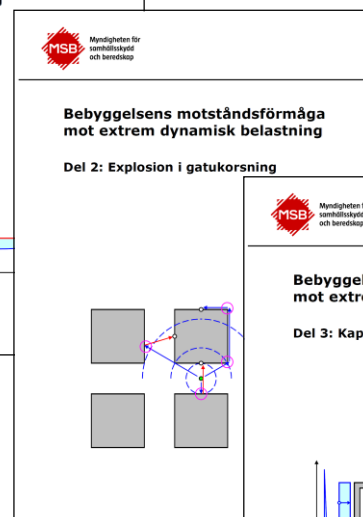
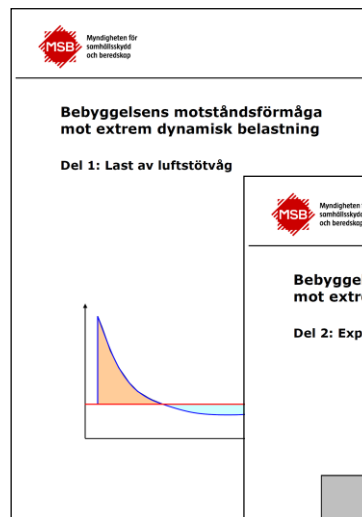
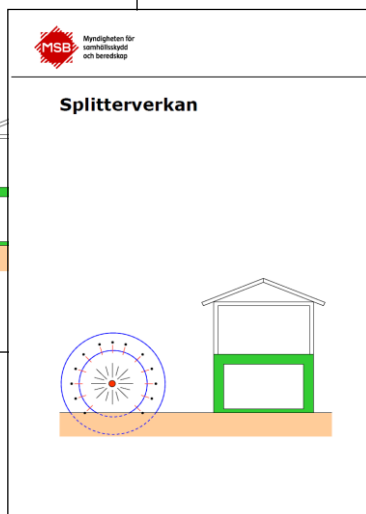
Plastisk

Transformationsfaktorer

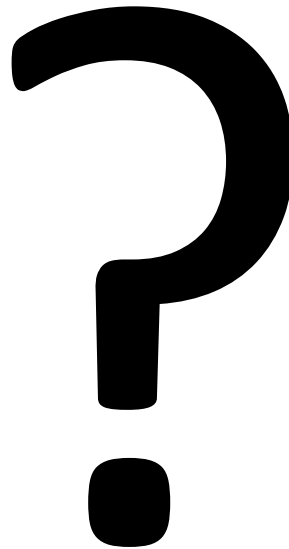
	Jämnt utbredd last			
				
	Utböjningskurva elastiskt fall			
K_m	0,504	0,406	0,483	0,257
K_F	0,640	0,533	0,600	0,400
K_{mF}	0,787	0,762	0,805	0,642
	Utböjningskurva plastiskt fall			
K_m	0,333	0,333	0,333	0,333
K_F	0,500	0,500	0,500	0,500
K_{mF}	0,667	0,667	0,667	0,667

Var finns mer information?

- MSB:s kunskapsbank: www.msb.se/skyddsrum



Frågor



MSB:s kunskapsbank (I)

- Mångårigt samarbete med MSB
 - Stor mängd litteratur om explosionslast och impulsbelastade konstruktioner
 - Last
 - Strukturrespons
 - Teoretisk bakgrund
 - Implementerande dokument
 - Beräkningsanvisningar
 - Beräkningsexempel

MSB:s kunskapsbank (II)

- Teoretisk bakgrund
 - www.msb.se/skyddsrum

Krisberedskap & civilt försvar

Om krisberedskap

Om totalförsvar och civilt försvar

Inriktning och ramverk ▼

Befolkningskydd ▲

Skyddsrum ▲

Frågor och svar om skyddsrum

Frågor och svar för fastighetsägare

Hitta ditt närmaste skyddsrum

Skyddsrumsdagarna 2019

Föreskrifter och handböcker för skyddsrum

Skyddsrumslitteratur

Referenslitteratur

[Dynamisk lastpåverkan, föreläsningsserie.pdf](#)

[Dynamisk lastpåverkan, referensbok.pdf](#)

[Luftstöt våg.pdf](#)

[Markstöt våg.pdf](#)

[Splitterverkan.pdf](#)

Bebyggelsens motståndsförmåga

[Bebyggelsens motståndsförmåga, en introduktion.pdf](#)

[Explosion i gatukorsning.pdf](#)

[Kapacitet hos byggnader.pdf](#)

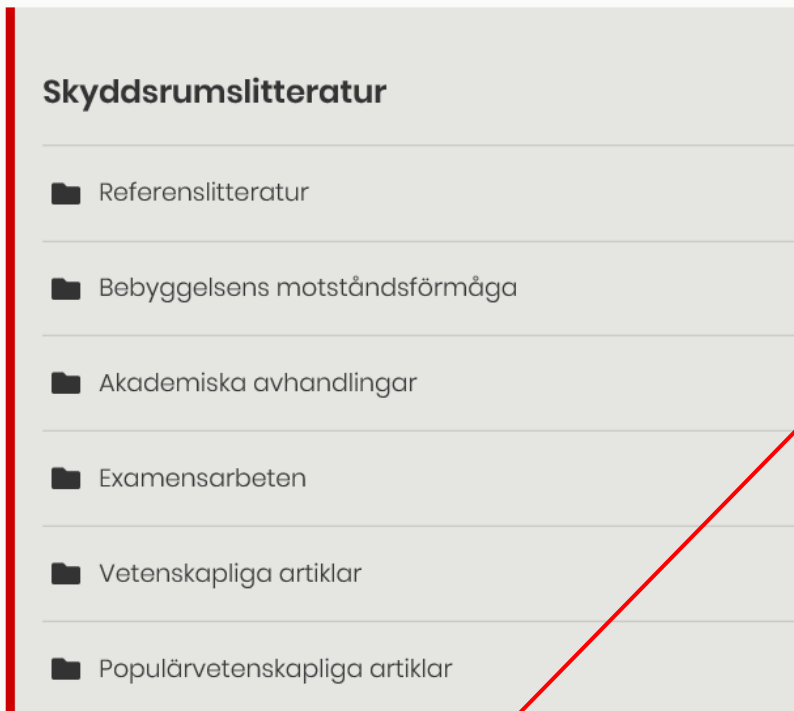
[Last av luftstöt våg.pdf](#)

Akademiska avhandlingar

MSB:s kunskapsbank (III)

- Implementerande dokument

- www.msb.se/skyddsrum



Skyddsrumslitteratur

- Referenslitteratur
- Bebyggelsens motståndsförmåga
- Akademiska avhandlingar
- Examensarbeten
- Vetenskapliga artiklar
- Populärvetenskapliga artiklar



Beräkningar, lösningar och komponenter för skyddsrum

Impulslastberäkningar

Anvisningar och exempel för konstruktion av byggnad med avseende impulslast.

- + [B01. Samlingsdokument](#)
- [B02. Beräkningsanvisning för last](#)
 - B02-111 - TNT-explosion i det fria_121015.pdf
 - B02-121 - Gasexplosion i det fria_130311.pdf
 - B02-201 - Splitterverkan_130523.pdf
 - B02-202 - Kombinerad luftstötväg och splitter_130523.pdf
 - B02-301 - Beräkningsanvisning För Markstötvägslast Från
- [B03. Beräkningsanvisning för strukturens respons](#)
 - B03-101 - Strukturens respons vid impulsbelastning_140416.pdf
 - B03-102 - Central differensmetod_121015.pdf
- + [B04. Beräkningsexempel för last](#)
- [B05. Beräkningsexempel för strukturens respons](#)
 - B05-101 - Enkelspänd betongvägg_150806.pdf
 - B05-102 - Stålräm.pdf
 - B05-201 - Splitter mot enkelspänd betongvägg.pdf
- + [B06. Beräkningsstöd](#)

MSB:s kunskapsbank (IV)

- Examensarbeten
 - www.msb.se/skyddsrum

Skyddsrumslitteratur

- Referenslitteratur
- Bebyggelsens motståndsförmåga
- Akademiska avhandlingar
- Examensarbeten**
- Vetenskapliga artiklar
- Populärvetenskapliga artiklar

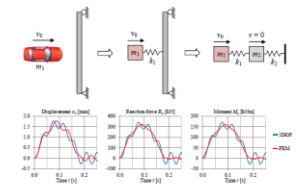


Beräkningar, lösningar och komponenter för skyddsrum

L04. Examensarbeten

- L04-001_Examensarbeten utförda i sam
- L04-101_Splicing of Reinforcement Loop
- L04-102_Concrete wall subjected to frag
- L04-103_Design with regard to explosio
- L04-104_Design with Regard to Blast- a
- L04-105_Design of reinforced concrete slab with regard to explosions.pdf
- L04-106_Structural Response of Reinforced Concrete Beams Subjected to Exp
- L04-107_Structural response with regard to explosions.pdf
- L04-108_Structural Response of Reinforced Concrete Frames Subjected to Ex
- L04-109_Design with Regard to Collision Impact (Elastic Beam).pdf**
- L04-110_Design with Regard to Explosion (Design of a Structural System).pd
- L04-111_Design with Regard to Collision Impact (Concrete Slabs).pdf
- L04-112_Stress Wave Propagation Between Different Materials.pdf
- L04-113_Spalling in Concrete Subjected to Shock Wave Blast.pdf
- L04-114_Concrete Beams Subjected to Drop Weight Impact.pdf
- L04-115_Concrete Beams Subjected to Drop-Weight Impact and Static Load.ı
- L04-116_Concrete Beams Subjected to Repeated Drop-Weight Impact and St
- L04-117_Structural Response of Concrete Beams Subjected to Drop Weight Iı
- L04-118_Reinforced Concrete Beams Subjected to Drop-Weight Impact.pdf

CHALMERS



Design with Regard to Collision Impact
Comparison of Response between a Simplified 2DOF system and FE analysis for Impact on a Simply Supported Elastic Beam
Master of Science Thesis in the Master's Programme Structural Engineering and Building Technology

ERIK ASPLUND
DANIEL STECKMEST

Department of Civil and Environmental Engineering
Division of Structural Engineering
Concrete Structures
CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY
Gothenburg, Sweden 2014
Master's Thesis 2014:80

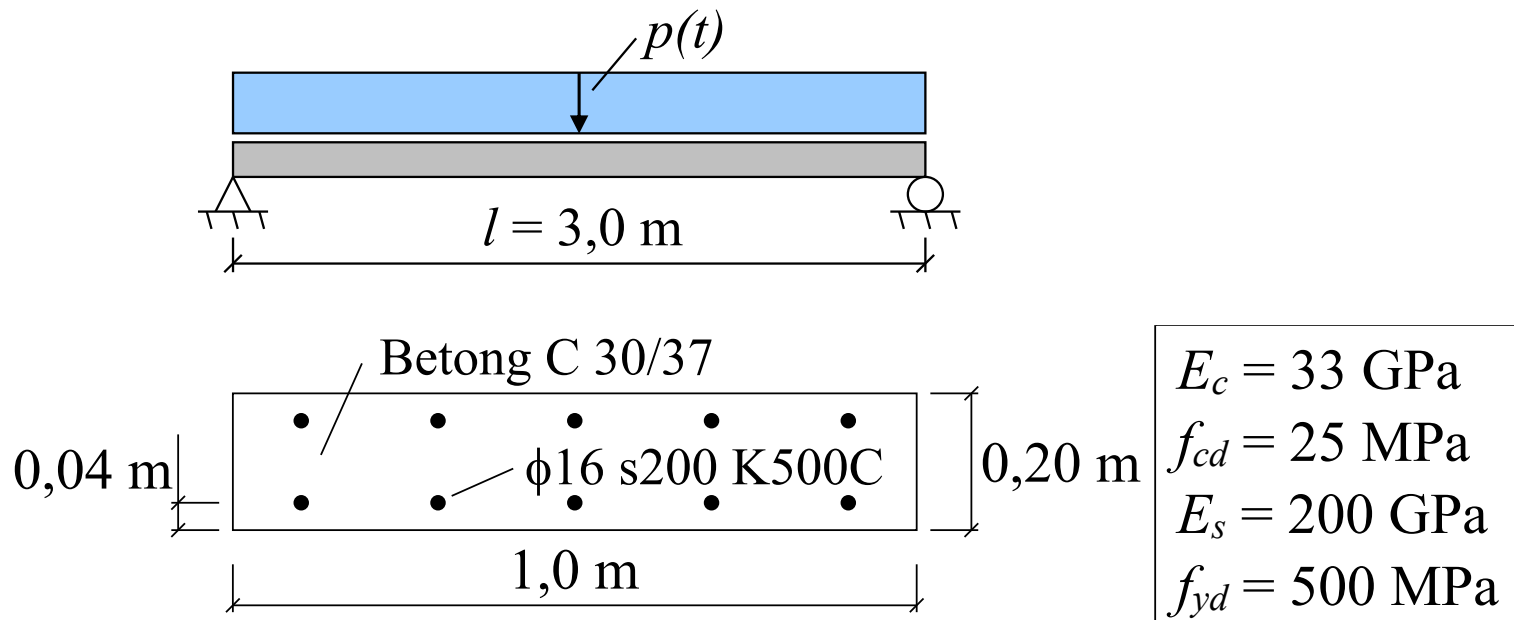
Fortifikationsverket

- Fortifikationsverkets konstruktionsregler, FKR 2011
 - För konstruktörer – anvisningar för kontroll av explosionsutsatta konstruktioner
- Handbok Skydd av byggnad
 - Större målgrupp – fokus på skydd av byggnad mot aktiva handlingar (t.ex. terrorism, sabotage)



Exempel - Plattstrimla (I)

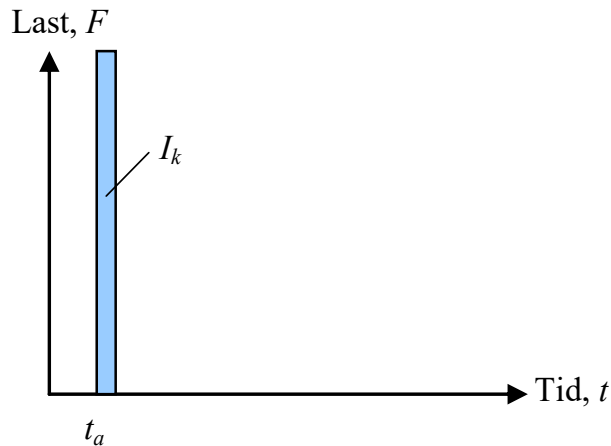
- Betongvägg utsatt för explosionslast
 - Enkelspänd platta



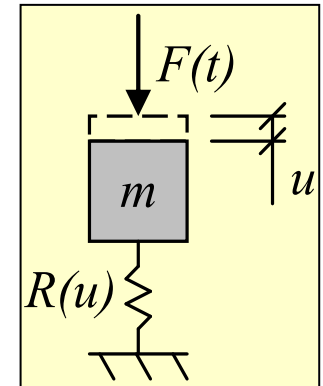
- Betrakta som en $1,0 \text{ m}$ bred balkstrimla
- $M_{Rd} = 75 \text{ kNm}$, $u_{Rd} = 0,075 \text{ m}$

Exempel - Plattstrimla (II)

- Karakteristisk impuls



$$W_y = E_k = \frac{I_k^2}{2m_{ef}}$$



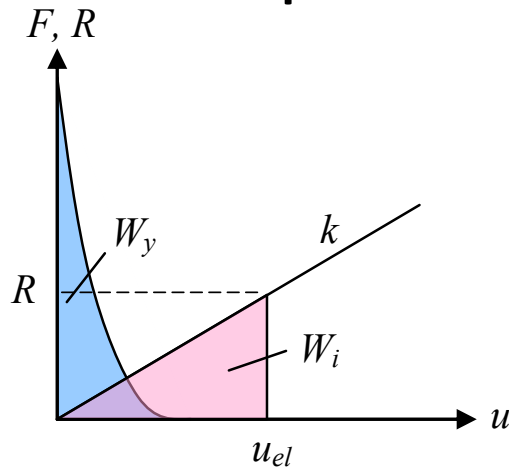
- $I_k = 5400 \text{ Ns}$ ($i_k = 1800 \text{ Pas}$, $A = 3 \text{ m}^2$)
- $m_{ef} = 1000 \text{ kg}$ ($m = 1500 \text{ kg}$, $K_{mF,pl} = 0,667$)

- Yttre arbete: $W_y = \frac{5400^2}{2 \cdot 1000} = 14,6 \text{ kJ}$

För att förenkla exemplet används $K_{mF,pl}$ för både elastisk och plastisk respons

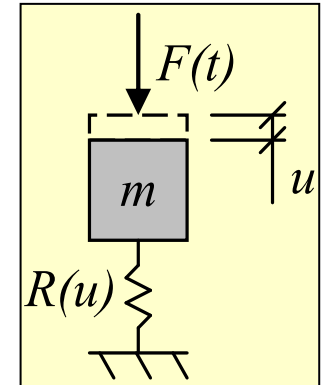
Exempel - Plattstrimla (III)

- Elastisk respons



Inre arbete

$$W_i = \frac{ku_{el}^2}{2}$$



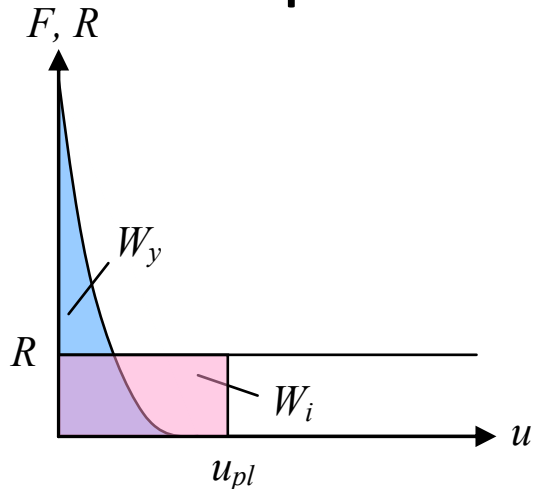
- $k = 1,0 \cdot 10^7$ N/m (styvhet för punkt i fältmitt)

- Energibalans: $u_{el} = \sqrt{\frac{2W_y}{k}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 14,6 \cdot 10^3}{1,0 \cdot 10^7}} = 0,054$ m

$$Q_{ekv,el} = ku_{el} = 1,0 \cdot 10^7 \cdot 0,054 = 540 \text{ kN} \rightarrow q_{ekv,el} = \frac{540}{3,0} = 180 \text{ kN/m}$$

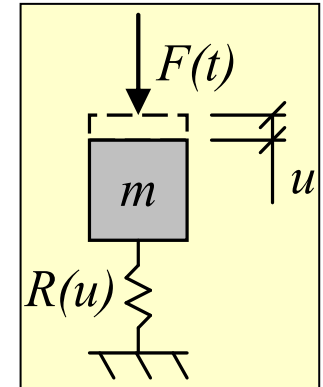
Exempel - Plattstrimla (IV)

- Plastisk respons



Inre arbete

$$W_i = R u_{pl}$$



$$q_{Rd} = \frac{8 \cdot M_{Rd}}{l^2} = \frac{8 \cdot 75}{3,0^2} = 67 \text{ kN/m} \rightarrow R_{Rd} = q_{Rd} \cdot l = 67 \cdot 3,0 = 200 \text{ kN}$$

- Energibalans:

$$u_{pl} = \frac{W_y}{R_{Rd}} = \frac{14,6 \cdot 10^3}{200 \cdot 10^3} = 0,073 \text{ m}$$

- $u_{Rd} = 0,075 \text{ m} > u_{pl} = 0,073 \text{ m}$ ok! $\rightarrow q_{ekv,pl} = q_{Rd} = 67 \text{ kN/m}$

Exempel - Plattstrimla (V)

- Sammanställning

- $q_{ekv,el} = 180 \text{ kN/m}$ ($u_{max} = 54 \text{ mm}$)

- $q_{ekv,pl} = 67 \text{ kN/m}$ ($u_{max} = 73 \text{ mm}$)

- Observation

- En hög massa m ger ett lågt yttre arbete W_y

- En minskad styvhet k ger lägre last $q_{ekv,el}$

- En ökad deformationsförmåga u_{pl} medger lägre last $q_{ekv,pl}$

- Plastisk deformationsförmåga kan vara mycket gynnsamt

- Eftersträvas i impulsbelastade konstruktioner!