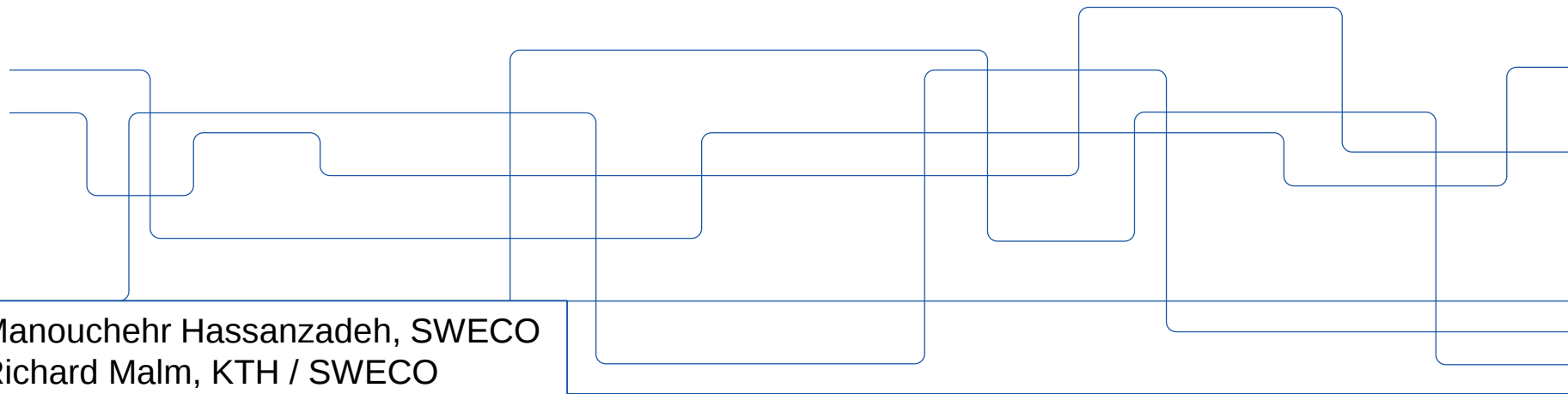




Explosionslasters inverkan på reaktorinneslutningens betongdelar

Litteraturstudie och sammanställning av analysmetoder



Manouchehr Hassanzadeh, SWECO
Richard Malm, KTH / SWECO
Håkan Hansson, KTH

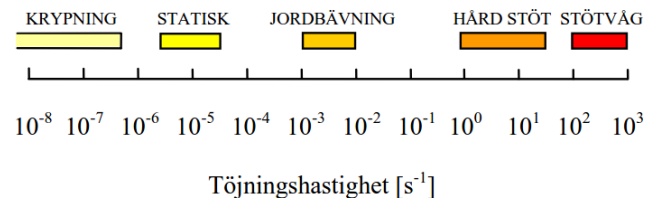
Syfte och avgränsningar



- Målsättningen är att sammanställa kunskap genom en litteraturstudie och identifiera intressanta tillämpningar för fortsatt arbete.
 - Sammanställa nationella och internationella kunskapsläget angående explosionslaster och hur dessa bör beaktas vid dimensionering och utvärdering av befintliga betongkonstruktioner.
- Endast offentligt tillgängligt material beaktas, där viktiga kunskapskällor kommer från civila tillämpningar men framförallt baserat på information från försvarsindustrin.
- I detta arbete ingår inte genomförande av analyser av explosionsbelastade betongkonstruktioner.

Extrema dynamiska belastningar

- Enligt *Dimensionering av nukleära byggnadskonstruktioner (DNB)* (SSM-rapport 2017:07);
 - Olika typer av explosioner, såväl inom (vätgasexplosion etc.) som utanför anläggningen (annan verksamhet, transportolycka, brusten pipeline etc.). Följande påverkan på byggnadskonstruktionerna kan behöva beaktas:
 - > Stötvåg (i luft, mark eller vatten)
 - > Värmestrålning
 - > Missiler
 - > Inverkan av kortvarigt eldklot
 - > Lasteffekt av brand med längre varaktighet



- Fokus i denna rapport avser explosioner som ger upphov till *stötvågsbelastning*.

Töjningshastighet i vanliga belastningssituationer (Leppänen, 2012), baserad på Bischoff och Perry (1991).

Explosioner

- Detonation
 - Karakteriseras av en hastig expansion av materia till en volym som är avsevärt större än ursprungsvolymen.
 - T.ex. de gaser som bildas då ett sprängämne detonerar, där expansionen av materialet leder till ett övertryck som pressar undan omkringliggande luft och skapar en tryckvåg
 - Tryckspridningen vid en detonation sker i överljudshastighet och energiomsättningen sker inom mikrosekunder
- Deflagration
 - Kemisk reaktion där omgivande medium antänds av temperaturökningen som uppstår när material förbränns.
 - Lågexplosiv explosion i underljudshastighet med tidsförlopp på millisekunder.

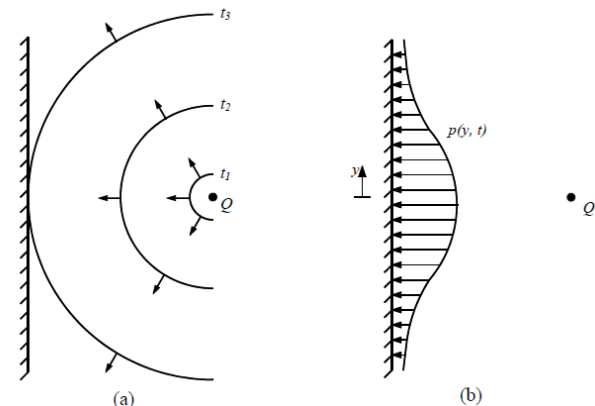


Illustration av en detonering relativt nära en vägg, a) tryckvågsfronten vid olika tidpunkter, b) reflekterande övertryck vid ytan. Från Magnusson (2007).

Stötvågsbelastning

- Många olika modeller (uttryck) för hur stötvågen varierar med tiden, dessa baseras dock på två delar; initialt övertryck och efterföljande undertryck.
 - Det efterföljande undertrycket har liten inverkan på strukturer
- Vid en explosion i en innesluten volym, får explosionsgaserna ej möjlighet att expandera fritt
 - Reflektioner av tryckvågen och avsevärt högre temperaturer än vid explosion i det fria.
- Även vid explosion utanför en byggnad så kan inre delar utsättas för tryckbelastning pga inläckage genom t.ex. dörrar fönster, etc.

Illustration av en markdetonation och hur dess tryckvåg påverkar angränsande byggnader. Från Homeland Security (2011).

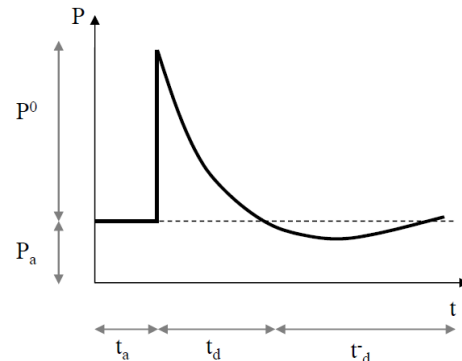
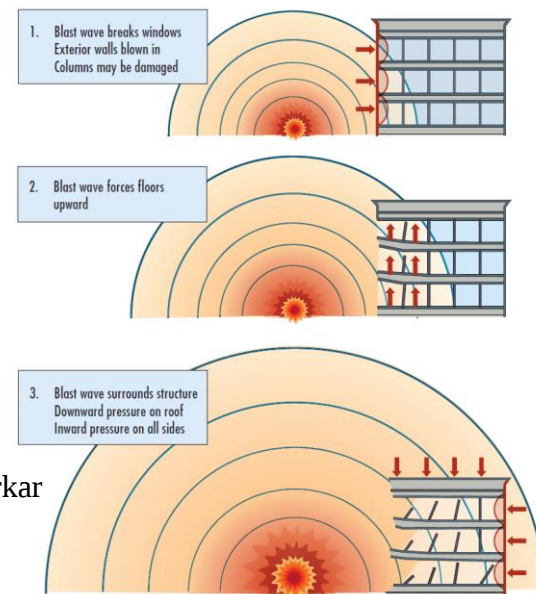


Illustration av en stötvåg. Från Morales Alonso (2013).



Explosioner

- Olyckslaster (så som explosioner) beaktas vid dimensionering till stor del för att undvika risk för fortskridande ras.
- För att förhindra detta krävs att bärande konstruktionen kan motstå den dynamiska belastningen (och deformationer) som uppstår.
- Därför dimensioneras byggnader vanligtvis så att lättare konstruktionselement så som väggar, dörrar, fönster etc, ska öppnas upp.
 - I och med detta sker ett utläckage av explosionsgaser så att övertrycket kan utjämnas med omgivningen.

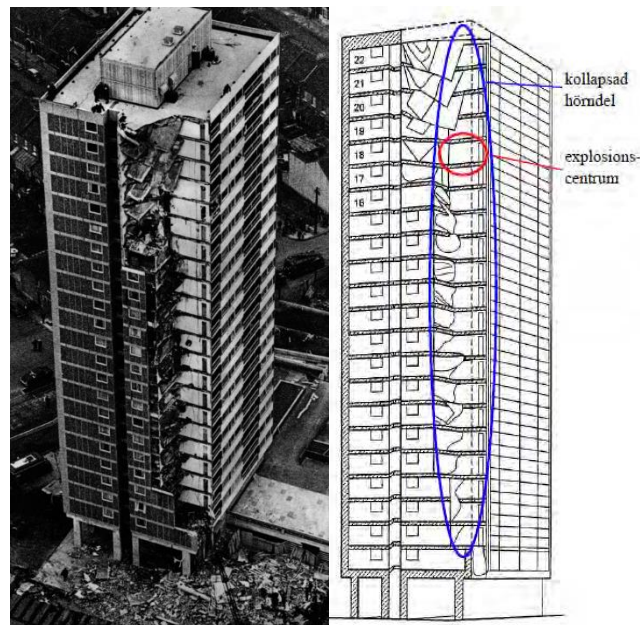


Illustration av skador vid gasexplosionen vid Ronan Point, 1968. Från Daily Telegraph respektive Johansson och Laine (2012b).

Explosioner

- Kärntekniska anläggningar är dimensionerade för att så långt som praktiskt möjligt undvika risk för explosioner.
- Vid kärntekniska anläggningar har vätgasexplosioner inträffat vid de tre större kärnkraftsolyckor
 - Harrisburg (Three Mile Island) 1979
 - Tjernobyl 1986
 - Fukushima 2011
- Vid t.ex. Fukushima syns att byggnadsstommen motstod fortskridande ras, och att lättare väggelement trycktes ut istället



Foto på reaktorbyggnad 4 vid Fukushima 1 Nuclear Power Plant. Från <https://mainichi.jp/english/articles/20160312/p2a/00m/0na/015000c>

Materialbeteende

- Icke-linjärt *statiskt* respektive *dynamiskt* beteende
 - Betong
 - Stål (slakarmering och spännarmering)

Kompaktering och avlastning av poröst material för icke-linjär tillståndsekvation, modifierad efter Riedel (2000).

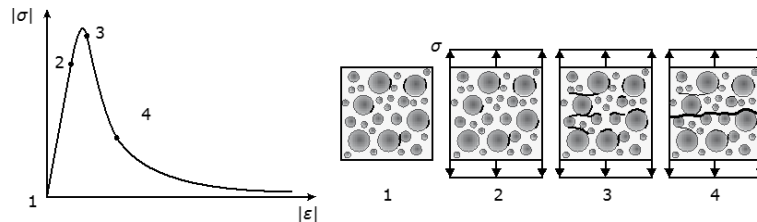
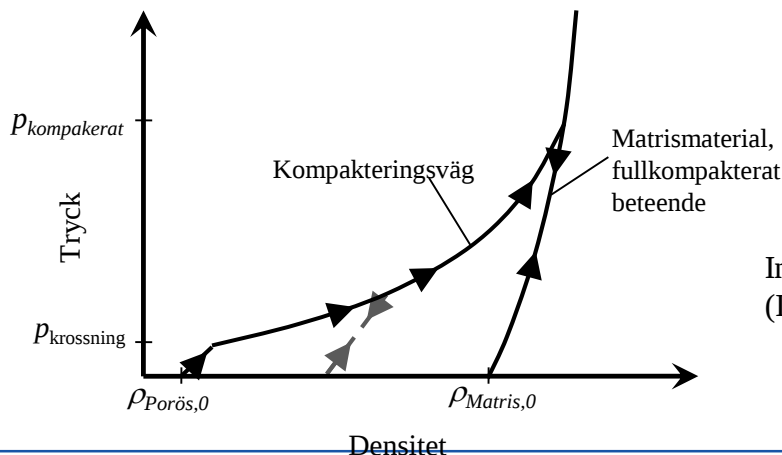
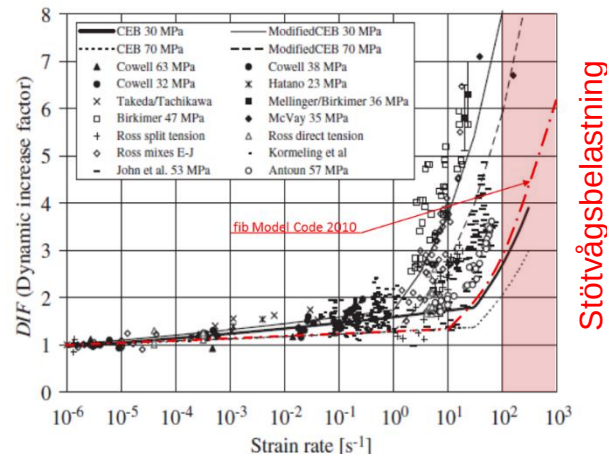


Illustration av brottförloppet hos betong vid enaxiell dragbelastning från (Gasch 2016) och (Mang m.fl. 2003).



Inverkan av töjningshastighet på betongens draghållfasthet, (Leppänen, 2006) men omarbetad av Abladey, 2012

Statisk vs dynamisk strukturell respons

- Både materialets egenskaper och strukturens verkningssätt förändras vid dynamisk belastning
 - Beror på belastningshastighet och belastningens varaktighet
- Vid hastiga dynamiska förlopp uppstår accelerationer och därigenom tröghetskrafter och kinetisk energi i (delar av) konstruktionen.
 - Hela konstruktioner hinner inte "reagera" på den hastiga belastningen och ett lokalt brott uppstår utan att lasterna fortplantats i hela konstruktionen.
 - > T.ex. en balk som går till brott vid böjbrott, kan istället gå till (direkt) skjuvbrott vid dynamisk belastning.
 - Tillämpning av dynamiska förstörningsfaktorer är därmed inte lämpligt i dessa fall

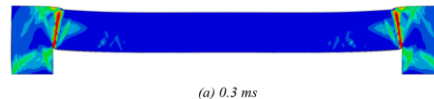
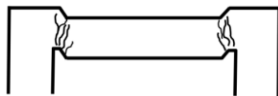
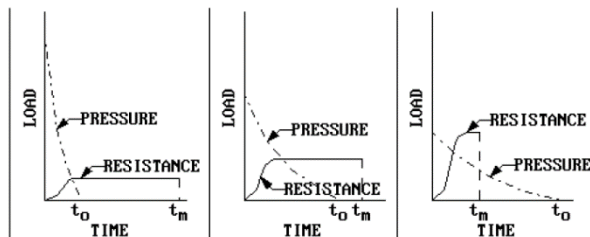


Illustration av direkt skjuvbrott vid dynamisk belastning, från Slawson (1984) och Magnusson (2019)

Utvärdering av explosionsbelastning

- En analys av ett konstruktionselement utgår från följande steg
 - Bestämning av explosionslast
 - Val av deformationskriterium
 - Beskrivning av strukturens utformning, geometri och upplagsvillkor
 - Kontroll av tvärsnittstyp med avseende på risk för skador; spjälkning, utstötning, krater, krossning och delaminering



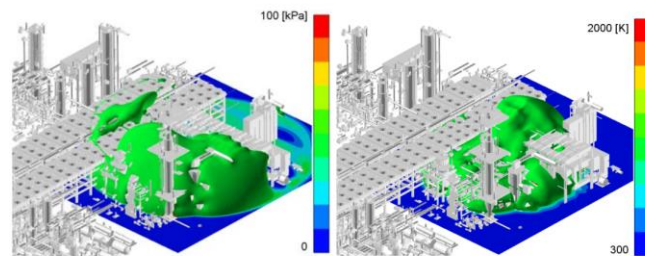
PRESSURE DESIGN RANGE	HIGH	LOW	VERY LOW
DESIGN LOAD	IMPULSE	PRESSURE-TIME	PRESSURE
INCIDENT PRESSURE	$\gg 100$ psi	< 100 psi	< 10 psi
PRESSURE DURATION	SHORT	INTERMEDIATE	LONG
RESPONSE TIME	LONG	INTERMEDIATE	SHORT
t_m / t_0	$t_m / t_0 > 3$	$3 > t_m / t_0 > 0.1$	$t_m / t_0 < 0.1$

Parametrar som definierar dimensioneringsintervallen för tryckbelastning, UFC (2008).

Bestämning av stötvågsbelastningens storlek

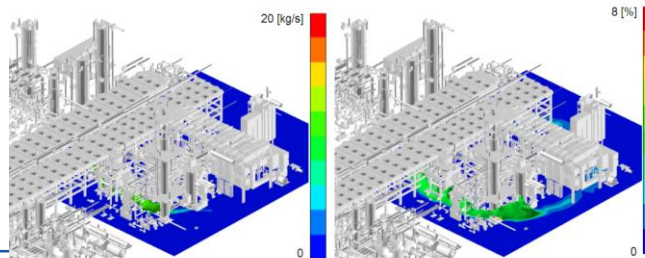
Multi-energy method, från IAEA (2018)

- Stötvågskurvor
 - baserat på ekvivalent mängd TNT, ekvivalent avstånd, etc.
- Multi-energy method (IAEA, 2018)
- Numeriska simuleringar
 - CFD
 - Specialutvecklade verktyg



(a) Overpressure

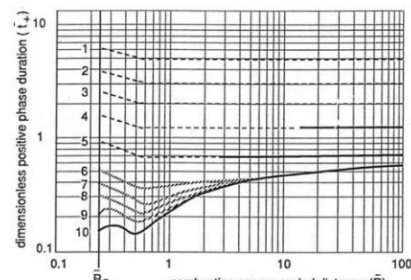
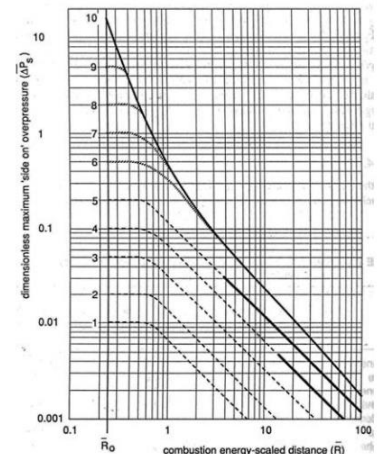
(b) Temperature



(c) Combustion rate

(d) gas concentration

Exempel på simulering av explosionsförlopp och utbredning av stötvåg, från Takahashi m fl. (2007).

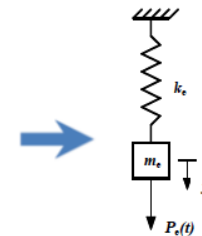
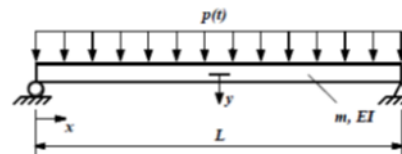


$$\Delta \bar{P}_s = \frac{\Delta P_s}{P_0}; \quad \bar{t}_+ = \frac{t_+ c_0}{(E/P_0)^{1/3}}; \quad \bar{R} = \frac{R}{(E/P_0)^{1/3}}$$

P_0 = atmospheric pressure
 c_0 = atmospheric sound speed
 E = amount of combustion energy
 R_0 = charge radius

Beräkningsmetodiker

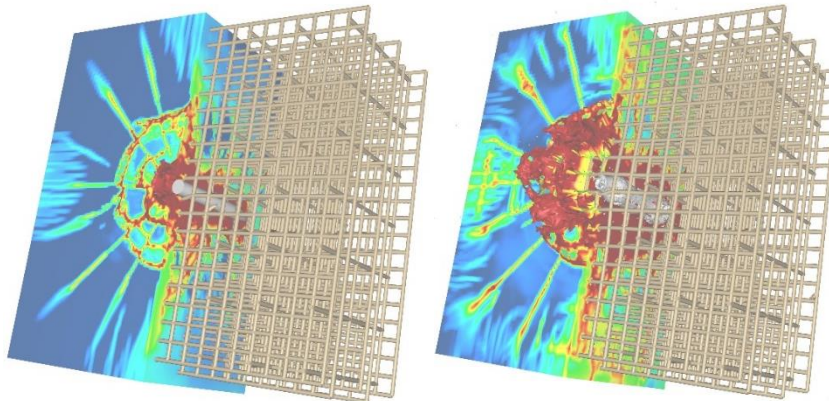
- Konventionella handboksmetoder (t.ex. UFC (2008) Department of Defense)



- En-frihetsgradssystem

Förenkling av fritt upplagd balk till ett en-frihetsgradssystem, från Magnusson (2019)

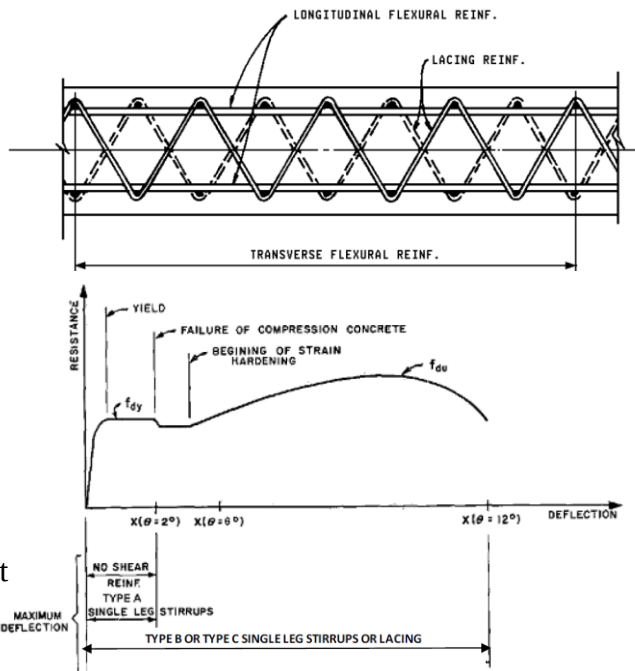
- FE simuleringar



Ackumulerad skada i betongen efter endast anslagverkan samt efter detonation av explosivämnesladdning. Figurerna visar framsidan av en väggkonstruktion med fem armeringslager.

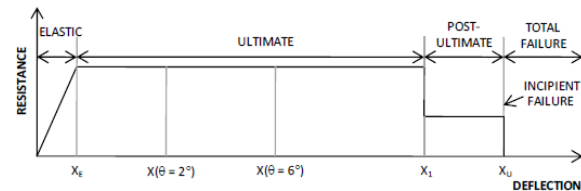
Exempel

- Exempel med snörd ("lacing") skjuvarmering för närliggande explosion



Schematisk beskrivning av resistans-böjningskurva för ett armerat betongelement utsatt för bøjning, UFC (2008).

Samband mellan dimensioneringsparametrar för element med snörd armering, UFC (2008).

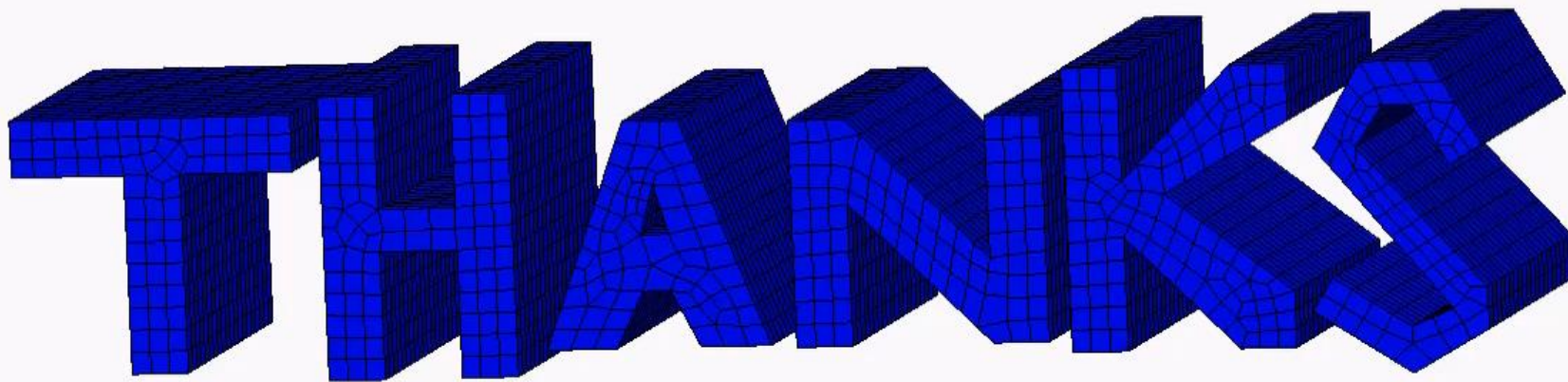


PROTECTION CATEGORY	①	②	③ & ④	
PROTECTIVE STRUCTURE	SHELTER	BARRIER		
STRUCTURE-LOAD SENSITIVITY	PRESSURE-TIME OR IMPULSE			
DESIGN RANGE	CLOSE-IN ($Z < 3.0$)			
DESIGN METHOD	RESPONSE CHARTS OR ITERATION PROCEDURE			
	IMPULSE EQUATIONS		IMPULSE EQUATIONS OR CHARTS	
DEFLECTION CRITERIA	LIMITED	LARGE		TOTAL FAILURE
DUCTILE MODE OF RESPONSE	BENDING AND SHEAR			
BRITTLE MODE OF RESPONSE	CRUSHING		SCABBING	POST-FAILURE FRAGMENTS
	DIRECT SPALLING			
CROSS-SECTION TYPE	I OR III	II OR III	III	
DESIGN STRESS	$< f_{dy}$	f_{dy}	$f_{dy} + \frac{1}{2}(f_{du} - f_{dy})$	$\frac{1}{2}(f_{dy} + f_{du})$
SHEAR REINFORCEMENT		LACING		

Sammanfattning

- Arbetet utfördes som litteraturstudie baserat på offentliga publikationer med syfte att sammanställa kunskapsläget angående explosionslaster och hur dessa bör beaktas vid dimensionering eller utvärdering av befintliga konstruktioner.
- Arbetet innefattar;
 1. Modeller som beskriver explosionsförloppet samt lasteffekter på konstruktionen eller konstruktionselementet (belastning-tid funktioner).
 2. Materialmodeller som beskriver materialets beteende vid snabba belastningar.
 3. Beräkningsmodeller som beskriver konstruktionens och konstruktionselementets linjära och icke-linjära beteende vid hastiga dynamiska belastningar.
 4. Dimensioneringsmetoder och dimensioneringsförutsättningar för att beakta belastning från explosionsförlopp (i rapporten återges beräkningsgång vid tillämpningsexempel)

Tack för er uppmärksamhet!



Manouchehr Hassanzadeh, SWECO
Richard Malm, KTH / SWECO
Håkan Hansson, KTH