

Dynamisk lastpåverkan Föreläsningsserie

Dynamisk lastpåverkan

Föreläsningsserie

Materialet har utarbetats av en arbetsgrupp bestående av

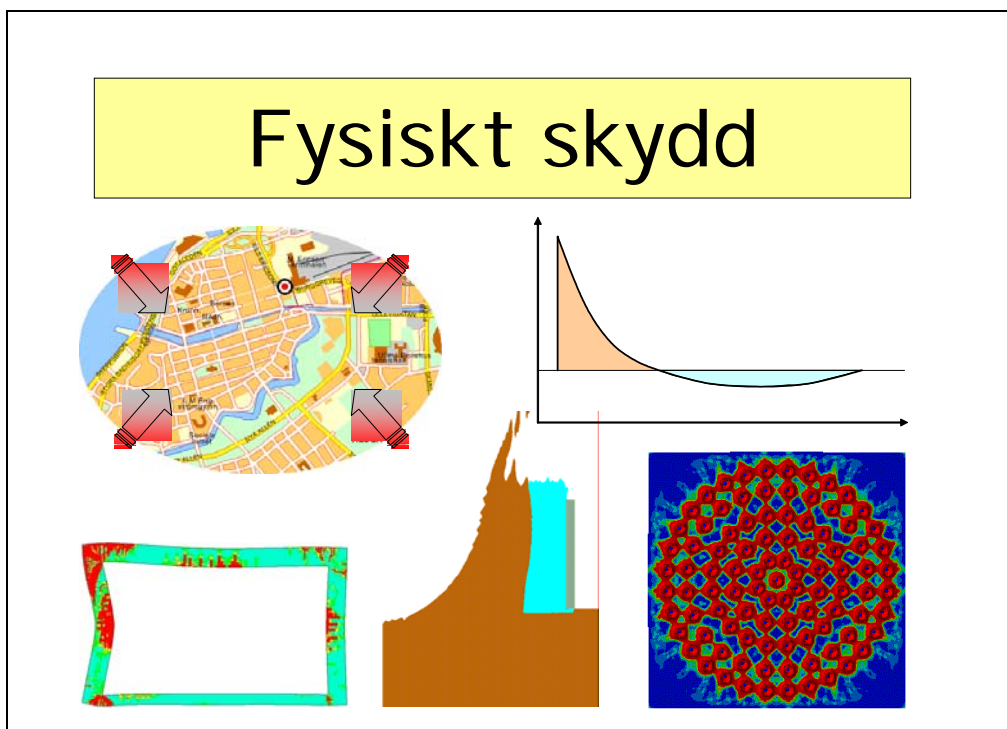
Björn Ekengren, Räddningsverket (projektledare)

Håkan Jansson, Byggutbildarna (samordnare)

Morgan Johansson, Reinertsen Sverige AB (expert luftstötståg)

Joosef Leppänen, Chalmers Konstruktionsteknik (expert splitterverkan)

Leo Laine, Anker-Zemer Engineering A/S (expert markstötståg)



Räddningsverket har ett ansvar rörande det olycksförebyggande- och skadebegränsande arbetet i samhället. Det är därför också nödvändigt att inneha erforderlig kompetens och kunnande om den befintliga bebyggelsens förmåga att hantera dynamiska laster.

Med anledning av detta sker ett fortlöpande arbete med att vårda och bygga ut den kunskapsbas som existerar rörande bland annat dynamiska laster samt det fysiska skyddets förmåga att absorbera och motstå de påfrestningar det kan utsättas för av dessa. Följande bildmaterial med tillhörande förklarande text är ett led i arbetet att sprida befintlig kunskap till en bredare publik. Materialet behandlar dynamiska laster i form av luftstötstång, markstötstång samt splitter.

Materialet utgör en föreläsningsserie i populärvetenskaplig form. För varje moment som avhandlas finns en fördjupningsreferens angiven till boken *Dynamisk lastpåverkan*, referensbok. Både föreliggande material och referensboken är utformade för att i första hand läsas i dator, varvid båda dokumenten med fördel kan vara öppna samtidigt för enkel sökning till önskat textavsnitt.

Referens: Dynamisk lastpåverkan, referensbok.

Onormala lasttyper

- Fysiskt skydd
 - kunskapsområde
- Skyddsrum
 - tillämpning
- Omvärldsbetraktelse
 - vardagsolyckor:
stor mängd
 - väpnat angrepp:
sällan eller aldrig



Ett alternativt betraktelsesätt behövs för dynamik

I figuren illustreras olika principiella lasttyper som kan drabba bebyggelsen. Dessa laster kan ha sin grund i naturliga fenomen såsom stormar och jordbävningar eller orsakas av olyckor inom industrin och trafiken. En extremare variant, som sker sällan eller aldrig, kan även uppstå i aktioner vilka syftar till avsiktlig skada, såsom grov kriminalitet, terrorism eller krig. Gemensamt för dessa lasttyper är dock att de uppvisar flera likheter med de påfrestningar som kan uppstå mot ett skyddsrum i händelse av krig.

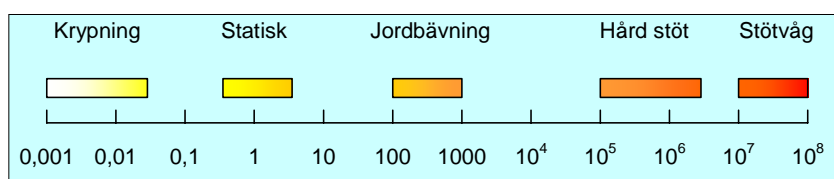
I Räddningsverkets ansvarsområde ingår att förebygga olyckor i vardagen samt förse befolkningen med erforderligt skydd i händelse av krig. I detta ingår att underhålla samt utveckla den kunskap som krävs för att klara denna uppgift. Ett skyddsrum ska klara påfrestningar från exceptionella dynamiska laster och förvaltningen av skyddsrum är en tillämpning inom detta kunskapsområde. I samhället finns även en varierande bebyggelse som löper risk att utsättas för liknande onormala lasttyper.

Egenskaperna hos dylika laster kan skilja sig väsentligt från "normala" statistiska belastningsfall. Därför krävs också ett alternativt betraktelsesätt för dessa lasttyper – kunskap om snabba belastningsförlopp och dynamisk respons blir en förutsättning för förmågan att skapa fysiskt skydd för människor.

Referens: Kapitel 2:11 i Dynamisk lastpåverkan, referensbok.

Dynamisk kontra statisk last

- Magnitud och varaktighet
- Strukturell respons
- Materialegenskaper



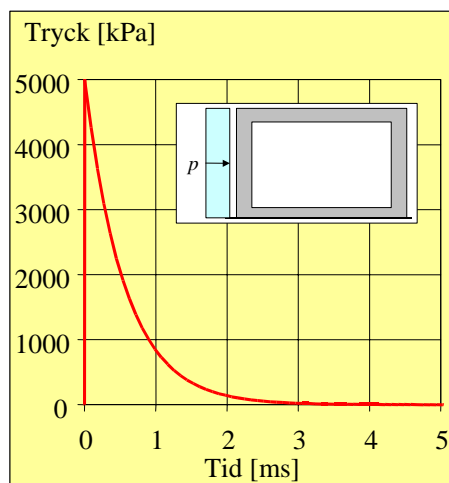
Dynamisk och statisk belastning uppvisar ett antal påtagliga skillnader. Lastens magnitud och varaktighet är en avgörande sådan skillnad som resulterar i att den strukturella responsen kan skilja sig betänkligt för en och samma konstruktion. Vidare påverkar belastningshastigheten ett materials egenskaper – generellt genom ökad hållfasthet och styvhet.

Figuren åskådliggör principiell skillnad i hastighet hos olika former av laster. Skalan är normerad mot en statisk last, därav dess placering omkring 1. En långtidsbelastning med medföljande krypning motsvarar en belastningshastighet som är en faktor 0,001-0,01 gånger så snabb som statisk belastning. På samma sätt är en jordbävning omkring 100-1000 gånger snabbare än en statisk last. För en hård stöt och stötvågsutbredning genom materialet uppgår belastningshastigheten till 0,1-1,0 miljoner respektive 10-100 miljoner gånger snabbare belastning än en statisk last. Dessa skillnader i lasthastighet påverkar också lastens utseende samt dess verkan.

Referens: Kapitel 2:21 i Dynamisk lastpåverkan, referensbok.

Lastens magnitud och varaktighet

- Trycknivå
- Varaktighet
- Impuls



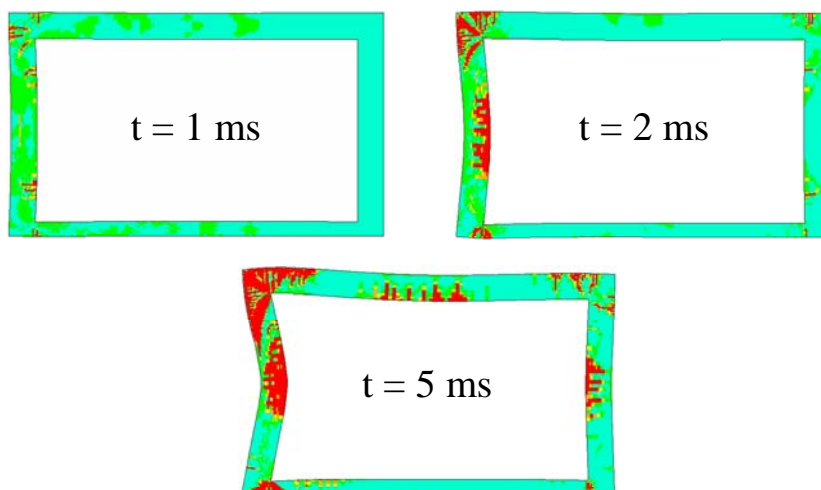
Vid en explosionsbelastning fås en extrem belastning under en kort tidsperiod. Dessa lastegenskaper gör att det, till skillnad mot statiskt belastade konstruktioner, inte blir lika aktuellt att prata i termer om lastens trycknivå. Istället används begreppen impuls eller impulsintensitet för att beskriva belastningsnivån.

Ett skyddsrum ska klara av belastningen från en explosion av 125 kg TNT som detonerar på ett avstånd av fem meter. Detta är Räddningsverkets såkallade "arkivbomb" och motsvarar ingen verklig bomb. Istället representerar detta den kortvariga vapenverkan som ett skyddsrum ska klara av utan risk för kollaps. Denna lastförutsättning resulterar i en maximal trycklast på drygt 5 000 kPa och ett tryck-tidssamband enligt figuren. Detta tryck är hundra gånger större än den statiska ekvivalentlast som används vid dimensionering av skyddsrum. Lastens varaktighet är dock mycket kort och efter enbart 3 ms har trycket gått ner till enbart 20 kPa. En dylik last – högt tryck kombinerat med kort varaktighet – gör det nödvändigt att införa begreppet impulsintensitet, dvs. produkten av trycket och varaktigheten.

Den stora skillnaden i storlek och varaktighet hos den statiska och dynamiska belastningen gör det svårt att direkt jämföra de båda med varandra. En jämförelse är dock möjlig genom att utgående från energibetraktelser bestämma skadeverkan av respektive last.

Referens: Kapitel 2:24 i Dynamisk lastpåverkan, referensbok.

Strukturell respons



I figuren belastas den vänstra väggen i ett skyddsrum (höjd 3 m, bredd 5 m) av en jämnt utbredd explosionslast motsvarande den från en arkivbomb. Efter 1 ms har sprickor (röd markering) uppstått i den främre väggen medan den bakre väggen fortfarande är helt oskadad. Efter 2 ms har belastningsvågen nått den bakre väggen och gett upphov till sprickor där, medan sprickbilden i den främre väggen har utvecklats till något som kan förväntas vid en statisk belastning. Efter 5 ms nås den maximala utböjningen av den främre väggen, dvs. omkring 2 ms efter det att lasten slutat verka på skyddsrummet.

Explosionslastens korta varaktighet gör att konstruktionen uppfattar belastningen på ett annat sätt än vad vi är vana vid från statisk belastning. En tryckvåg i betong rör sig med en hastighet av omkring 3 500 m/s. För ett skyddsrum med en utbredning av 5 m innebär detta att det kommer ta drygt 1,4 ms för tryckvågen att ta sig från den främre till den bakre väggen.

Detta innebär att det är möjligt för vissa delar i ett skyddsrum att nå brott innan andra delar i samma skyddsrum ens erhållit några påkänningar av samma belastning. Denna informationsfördröjning gör även att randvillkoren för ingående konstruktionsdelar kommer vara tidsberoende, något som ytterligare kan ge upphov till betydande skillnader i det strukturella uppförandet.

Referens: Kapitel 2:24 i Dynamisk lastpåverkan, referensbok.

Hur skyddar man sig?

Primärt

- Avstånd till laddning
- Skyddande massa

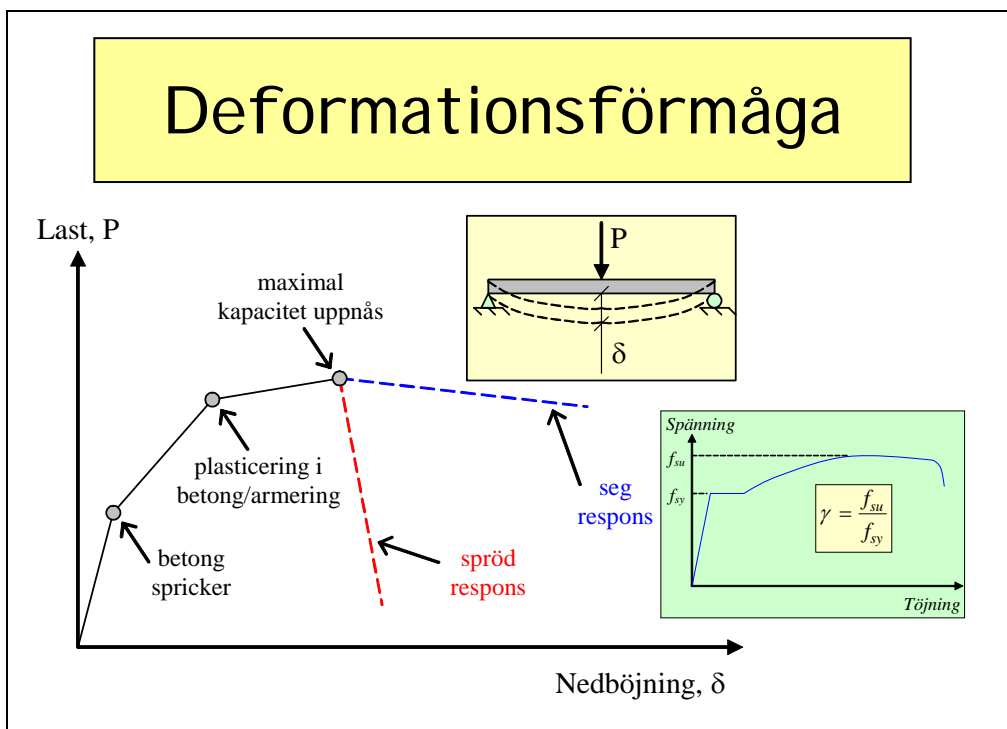
Sekundärt

- Energiupptagande konstruktion
- Smart utformning

För att skydda sig mot en explosion hjälper primärt två saker: avstånd och en skyddande massa. I det fria kommer explosionens energiinnehåll snabbt tunnast ut, varför lasteffekten av en given explosion också snabbt avtar med avståndet. Om det inte är möjligt att säkerställa ett tillräckligt avstånd till en explosion är en avskärmande massa det bästa skyddet. Explosionen verkar som en impulsbelastning på sin omgivning. En massa som är placerad i dess väg – exempelvis en skyddsrumsvägg – kommer dock att absorbera denna impuls och sättas i rörelse av densamma. En stor massa gör att detta rörelsebehov minskar, vilket i sin tur leder till en lägre rörelseenergi i väggen. En stor massa kan därför sägas vara ett effektivt sätt att dämpa effekten av en impulsbelastning.

En skyddande vägg är dock till liten hjälp om den själv kastas iväg av den rörelse den erhåller. Här kommer därför vikten av en god energiupptagningsförmåga i konstruktionen in. Genom att säkerställa att väggen har en bra deformationsförmåga fås en seg konstruktion som ger goda möjligheter att motstå den rörelseenergi som genereras av explosionen. En smart utformning av konstruktionen som väggen är en del av kan vidare ge ytterligare lastminskningar, alternativt undvika onödiga lastökningar på grund av olyckliga reflexioner eller fördämningseffekter.

Referens: Kapitel 2:23 i Dynamisk lastpåverkan, referensbok.

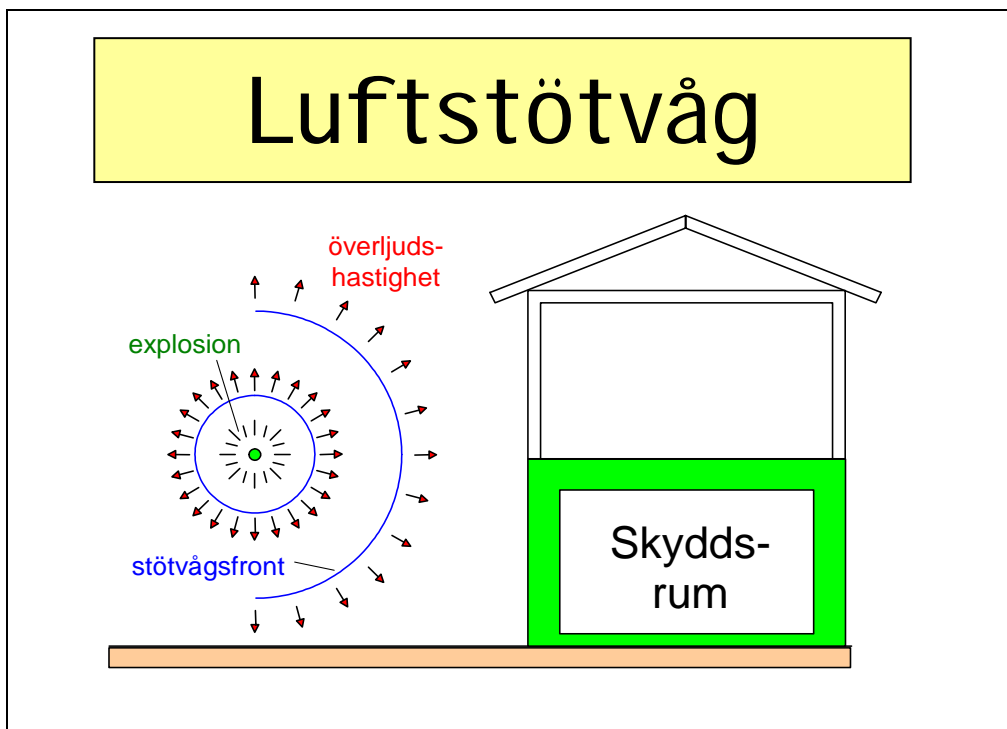


Figuren visar ett principiellt last-nedböjnings samband för en armerad, fritt upplagd betongbalk med sprött respektive segt brott. Upp till den maximala kapacitetsnivån är balkens respons densamma. Därefter uppträder dock en viktig skillnad. En balk med sprött beteende får en snabb minskning i lastkapaciteten medan den för en konstruktion med god deformationsförmåga erhåller en seg respons med liten minskning av lastkapaciteten vid ökad nedböjning.

Arean under last-nedböjningskurvan är ett mått på balkens energiupptagande förmåga. Av detta framgår att en seg respons också kan resultera i en flerfaldigt högre energiupptagning. Detta är av stor vikt eftersom en explosionsbelastning kan resultera i så stora kortvariga belastningsnivåer att den maximala bärförmågan, uttryckt i kraft, kommer att uppnås oavsett kapacitetsnivå. Det är därför av största vikt att en skyddskonstruktion har en god deformationskapacitet och kan uppvisa ett segt beteende. Därigenom ökar dess energiupptagning, vilket också möjliggör undvikande av fullständig kollaps.

För att säkerställa en seg respons hos skyddskonstruktionen är materialegenskaperna hos den ingående armeringen mycket viktig. För skyddsrum regleras detta genom att kvoten mellan armeringens brottspänning f_{su} och flytspänning f_{sy} inte får understiga 1,15.

Referens: Kapitel 2:23 i *Dynamisk lastpåverkan*, referensbok.

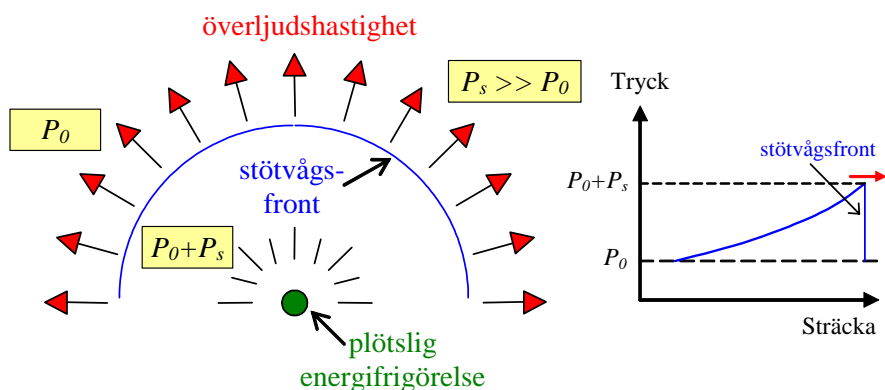


En luftstöt våg uppstår vid en plötslig energifrigörelse, vars källa exempelvis kan vara en explosion. Detta ger upphov till utbredningen av en mycket distinkt vågfront som rör sig genom luften i överljuds-hastighet.

Stöt vågens påverkan på omgivningen beror framförallt på det utlösande energiinnehållet samt av avståndet från explosionens källa. Här behandlas vad som menas med en stöt våg, hur den uppkommer samt hur den uppfattas av omgivningen. Vidare görs en övergripande genomgång av olika luftstöt vågsfenomen såsom normal- och sned reflexion, Machreflexion, spegling samt diffraktion. Avslutningsvis behandlas innebörden av innesluten explosion, fördämningseffekter samt utförs en jämförelse av avståndets och laddningens betydelse för den last som uppstår vid en explosion.

Referens: Kapitel 3 i Dynamisk lastpåverkan, referensbok.

Vad är en stötvåg?

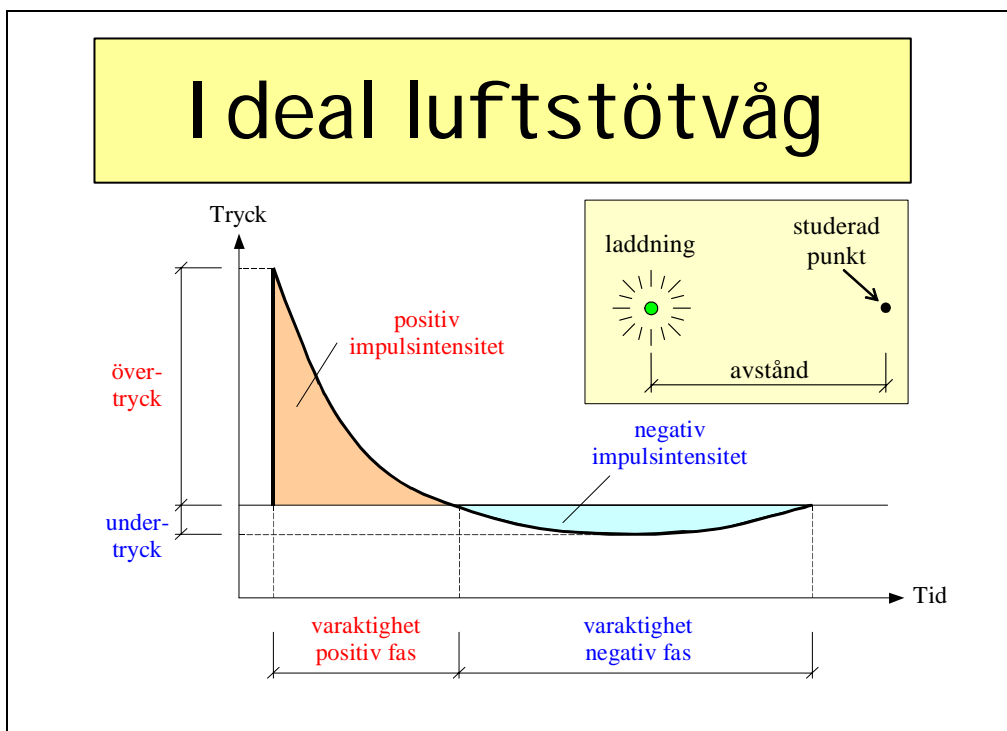


Figuren visar en principiell bild av en explosion och den efterföljande stötvågsutbredningen. Detonation av laddningen ger upphov till en plötslig energifrigörelse varvid en stötvåg bildas som breder ut sig i överljudshastighet.

Stötvågen karakteriseras av en distinkt vågfront som rör sig genom ett medium i överljudshastighet. Framför stötvågsfronten råder normala förhållanden (tryck P_0) medan det direkt bakom fronten kan vara mycket höga tryck ($P_0 + P_s$, där $P_s \gg P_0$) med förhöjd temperatur och densitet. Detta resulterar i en tryckvåg med högt tryck och kort varaktighet som i sitt uppförande skiljer sig väsentligt från en vanlig ljudvåg.

Denna skillnad resulterar bland annat i att superposition av olika vågor inte är tillämpligt. Istället fås en kraftigt ökad effekt vid exempelvis en rätvinklig reflexion. Där trycket hos en akustisk våg dubblas kommer det för en stötvåg, beroende på dess styrka, istället medföra en avsevärt större tryckökning.

Referens: Kapitel 3:11 - 3:12 i *Dynamisk lastpåverkan, referensbok*.



Figuren ger en schematisk bild av en ideal luftstötuvåg som visar tryck-tidssambandet i en punkt på ett godtyckligt avstånd från en given laddning. Laddningen detonerar vid tiden noll. Efter en kort stund – stötuvågen rör sig i överljudshastighet – når stötuvågsfronten fram till den studerade punkten. Detta resulterar i en omedelbar tryckstegring där stigtiden kan sägas vara noll och maximalt övertryck registreras. Därefter avtar trycket snabbt och når snart åter det normala lufttrycket. Denna del betecknas som positiv fas – övertrycksfas – och resulterar i en positiv impulsintensitet. Därefter följer den negativa fasen – undertrycksfasen – som resulterar i en negativ impulsintensitet. Den negativa fasen utgörs av ett sug och kan i princip uppfattas som ett partiellt vakuum.

För storleken på övertrycket finns ingen begränsning medan det för undertrycket begränsas till det normala lufttrycket, dvs. omkring 101 kPa. Vidare kan allmänt sägas att varaktigheten för den negativa fasen är längre än för den positiva fasen.

Vid karakterisering av en stötuvågs egenskaper är det normalt intressant att prata om termer som tryck, impulsintensitet samt varaktighet. Dessa parametrar utgör viktig information om lastens styrka och energiinnehåll varifrån dimensioner hos en erforderlig skyddsanordning kan bestämmas.

Referens: Kapitel 3:13 i Dynamisk lastpåverkan, referensbok.

Vad inverkar på lasten?

- Explosionens energiinnehåll
 - massa
 - typ av sprängämne
 - detonationshastighet
- Omgivning
 - utbredningsmöjligheter
 - spegling / reflexioner
 - avstånd och läge till utsatt punkt
- Målets utseende
 - reflexion
 - fördämning
 - diffraktion

Den resulterande belastningen av en given explosion beror på en mängd olika faktorer. Dessa kan delas upp i tre huvudgrupper: energiinnehåll, omgivningens beskaffenhet samt målets geometriska utformning.

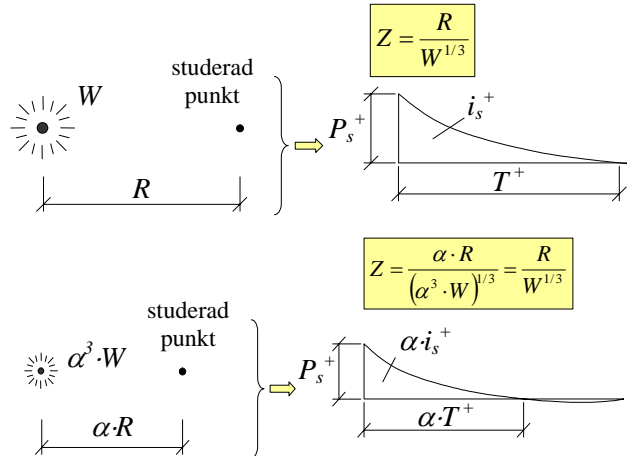
Explosionens energiinnehåll beror på sprängämnets massa, vilken typ av sprängämne som detonerar samt med vilken hastighet detta sker. Stor massa, och hög detonationshastighet resulterar i större frisläppt energimängd per tidsenhet och därmed större belastning.

Hur omgivningen kring explosionen ser ut har stor betydelse. Begränsningar i stötvågens utbredningsmöjligheter resulterar i fler reflexioner och koncentrerings av explosionens energiinnehåll till begränsade volymer, något som resulterar i större belastning. Vidare har avståndet mellan laddning och belastad byggnad en avgörande betydelse på lastens storlek – minskat avstånd resulterar i större last.

Även den geometriska utformningen hos belastad byggnad har inverkan på den resulterande belastningen. För en olämpligt utformad byggnad kan belastningen öka via flerfaldiga reflexioner och/eller fördämningseffekter. Exempelvis är inåtgående hörn i en byggnad av ondo eftersom detta kan ge upphov till att lasten "fångas" in i ett begränsat utrymme och ge lasten ökat tryck och varaktighet.

Referens: Kapitel 3:3 i Dynamisk lastpåverkan, referensbok.

Skalat avstånd



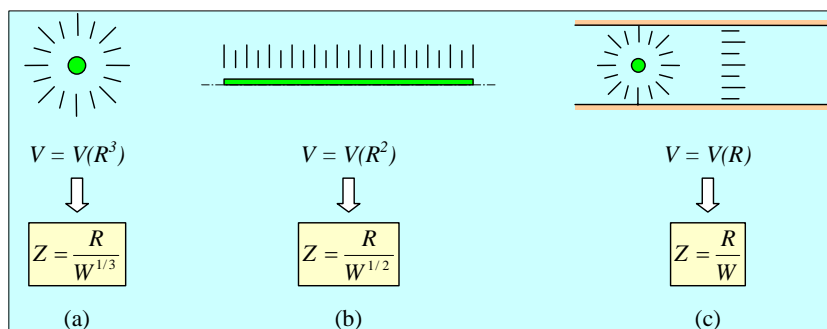
För en stötvåg från en explosion gäller allmänt att dess egenskaper beror på laddningens energiinnehåll och avståndet mellan laddning och studerad punkt. Vid bedömning av en explosions styrka används normalt begreppet "skalat avstånd" Z . Denna storhet används vid handhavandet av explosionslaster för att kunna jämföra effekten av olika laddningsstorlekar detonerande på varierande avstånd.

Figuren visar det principiella tryck-tidssambandet för två laddningar av olika storlek men med studerad punkt på olika avstånd sådant att det skalade avståndet blir detsamma för de två. För en explosion med möjlighet till fri utbredning definieras det skalade avståndet Z som kvoten av avståndet R och kubikroten av laddningsvikten W . Denna definition bygger på observationen att en laddning med massan $\alpha^3 \cdot W$ ($\alpha = \text{konstant}$) som exploderar på avståndet $\alpha \cdot R$ från en given punkt ger samma övertryck som en laddning med massan W och avståndet R . Impulsintensitet och varaktighet ökar dock båda med en faktor α . Lågt värde på Z innebär högt tryck och impulsintensitet men kortare varaktighet.

Detta innebär att 125 kg TNT som exploderar på ett avstånd av 5 m från en punkt ger samma övertryck som om 1 kg TNT detonerar 1 m från samma punkt. Impulsintensiteten och varaktigheten blir dock en faktor 5 större för den större laddningen.

Referens: Kapitel 3:33 i Dynamisk lastpåverkan, referensbok.

Omgivningens inverkan



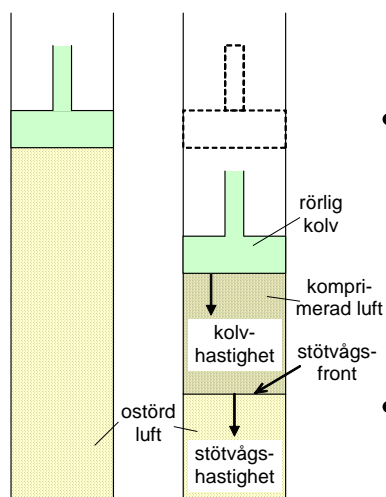
Omgivningen kan ha stor inverkan på den resulterande impulsbelastningen från en explosion. I figuren visas den principiella utbredningen för en explosion som breder ut sig i en, två eller tre riktningar i rummet.

Vid fri utbredning är den volym som innesluts av stötvågsfronten proportionell mot utbredningen R i kubik, dvs. volymen $V = V(R^3)$. Motsvarande volymförhållanden blir för en linjeladdning $V = V(R^2)$ medan den inneslutna volymen i ett endimensionellt fall, exempelvis en tunnel, ökar proportionellt mot enbart R , dvs. $V = V(R)$.

På lite större avstånd innebär detta en avsevärd skillnad i explosionens energiintensitet. Detta innebär att en explosion i en tunnel generellt också genererar betydligt större laster än vad som är fallet vid fri utbredning. Förenklat kan sägas att det skalade avståndet för en explosion i en tunnel kan skrivas som $Z = R/W$ istället för $Z = R/W^{1/3}$ som är fallet vid fri utbredning.

Referens: Kapitel 3:33 i Dynamisk lastpåverkan, referensbok.

Grundläggande samband



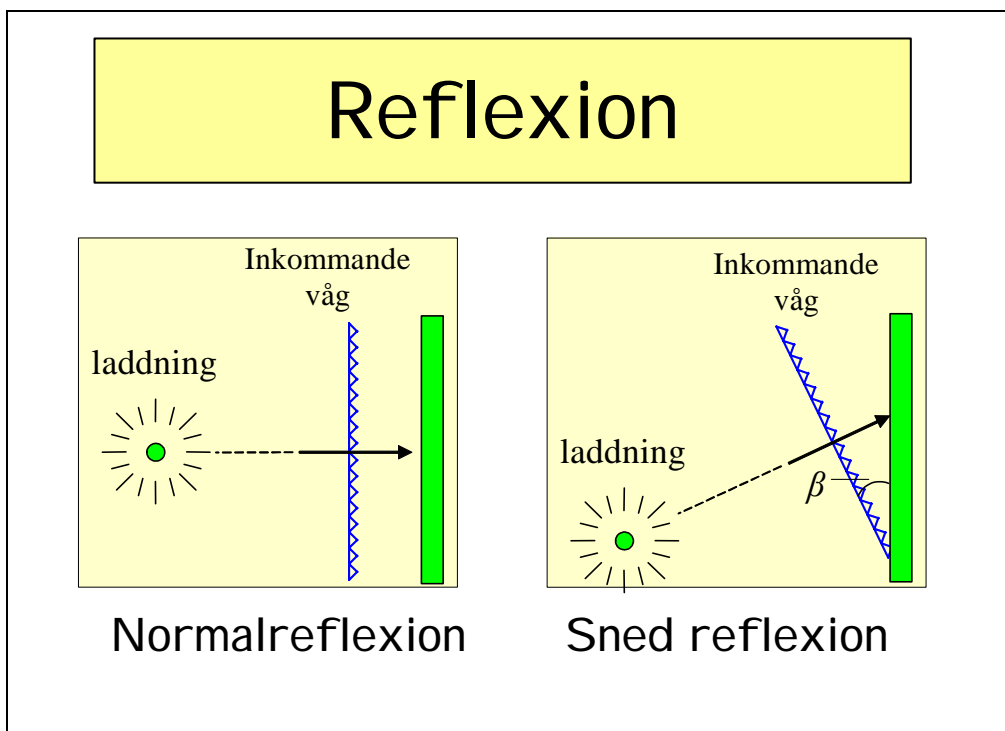
- Konservering av
 - massa
 - rörelsemängd
 - energi
- Tillståndsekvation

I figuren illustreras en tub med konstant tvärsnittsarea som är fylld med en gas med ett givet tryck, densitet samt energiintensitet. I tubens ena ände finns en rörlig kolv som initialt är stillastående.

Därefter sätts kolven i rörelse med en konstant hastighet, varvid gasen framför kolven sätts i rörelse och en tryckvåg – en stötvåg – rör sig framåt i tuben med en hastighet som är större än kolvens. Skillnad i hastighet gör att det skapas ett område mellan kolven och den framrusande stötvågen. För gasen i denna volym har trycket, densiteten samt energiintensiteten ändrats. Framför den framrusande stötvågen är gasen dock fortfarande opåverkad, varför dess egenskaper är oförändrade. Stötvågsfronten kan således uppfattas som ett plan vilket separerar rörlig och stillastående gas i en tub med en rörlig kolv.

Utgående från ovanstående kan termodynamiska samband, konservering av massa, rörelsemängd och energi, ställas upp. Tillsammans med en såkallad tillståndsekvation för gasen är det möjligt att beskriva sambandet mellan olika parametrar såsom tryck, stötvågshastighet och densitet på ömse sidor om vågfronten. Dessa samband används även för att bestämma förhållandet mellan exempelvis reflekterat och oreflekterat tryck.

Referens: Kapitel 3:211 i Dynamisk lastpåverkan, referensbok.



När en stötvåg träffar ett fastare medium uppstår en reflexion. På grund av att stötvågen far fram i överljudshastighet skiljer sig denna dock från den reflexion som normalt förknippas med exempelvis enkla ljudvågor.

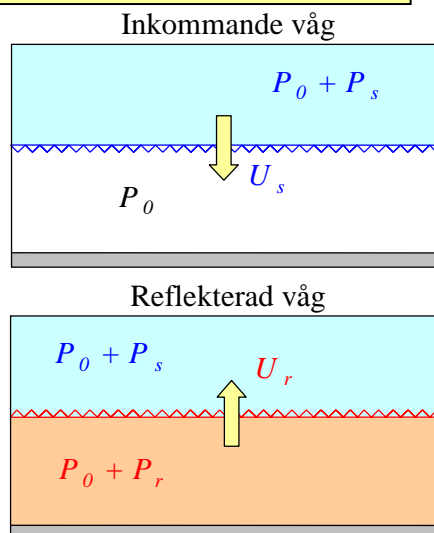
Reflexionen av en stötvåg kan delas upp i två principiellt olika typer: reguljär reflexion och såkallad Machreflexion. Principen för reguljär reflexion påminner i mångt och mycket om den som erhålls för en ljudvåg och kan, som figuren visar, delas upp i normalreflexion samt sned reflexion. Machreflexion i sin tur är ett fenomen som uppstår i samband med sned reflexion.

Normalreflexionen syftar på en stötvåg som kommer in med rät vinkel mot en reflekterande yta medan den sneda reflexionen kommer in mot ytan med en godtycklig vinkel β . Av detta framgår att normalreflexionen är ett specialfall av den sneda reflexionen. I de flesta fall är det dock just normalreflexion som det syftas på när det talas om exempelvis reflekterat tryck.

Referens: Kapitel 3:22 i Dynamisk lastpåverkan, referensbok.

Normalreflexion

- Superposition fungerar ej
- $P_r/P_s \approx 2-20$



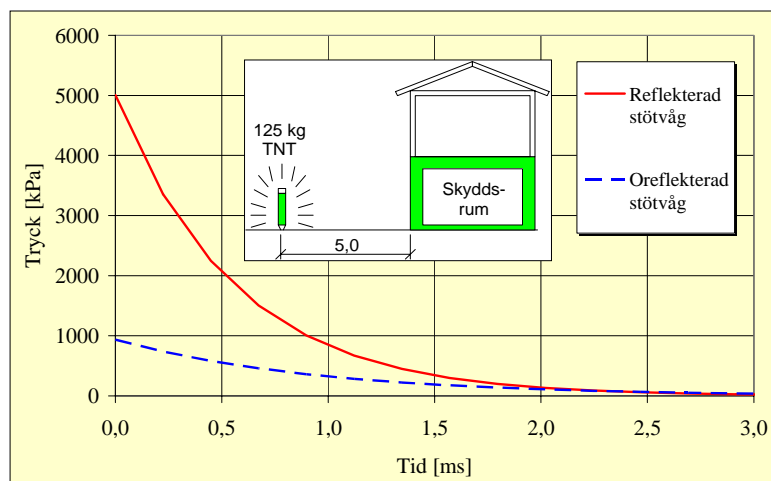
Figuren illustrerar en stötvåg som med stötvågshastigheten U_s närmar sig en reflekterande yta. Framför stötvågsfronten råder ostörda förhållanden och luften har atmosfärstryck på $P_0 \approx 101$ kPa. Bakom stötvågsfronten har vi dock ett övertryck P_s som normalt är många gånger större än så. När stötvågsfronten når fram till den reflekterande ytan uppstår en reflekterad stötvågsfront som rör sig med hastigheten U_r tillbaka mot den ursprungliga färdriktningen. Bakom denna vågfront uppstår ett reflekterat övertryck P_r som är betydligt större än det infallande trycket.

Stötvågens speciella egenskaper gör att superposition av tryck inte gäller allmänt för reflekterade stötvågor. För svaga stötvågor blir det reflekterande trycket dubbelt så stort som det infallande trycket – något som överensstämmer med en vanlig ljudvåg. För kraftiga stötvågor kan kvoten mellan reflekterat och oreflekterat tryck, den så kallade reflexionskoefficienten, dock bli betydligt högre och kan i extrema fall resultera i ett reflexionstryck upp till tjugo gånger högre än det infallande övertrycket.

Det kan således konstateras att trycket, och därmed även impulsen, påverkas av reflexionen medan varaktigheten förblir oförändrad. Vidare gäller att ju starkare stötvåg, desto större reflexionskoefficient.

Referens: Kapitel 3:222 i Dynamisk lastpåverkan, referensbok.

Reflexionens effekt på lasten

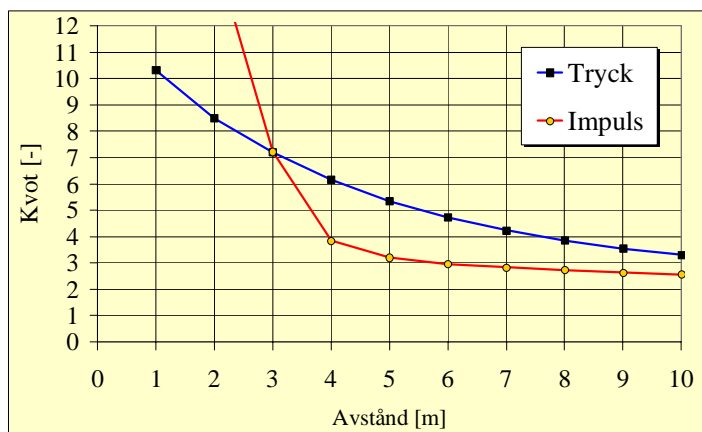


Figuren jämför tryck-tidssambandet för en reflekterad och oreflekterad stötvåg genererad av Räddningsverkets arkivbomb – 125 kg TNT detonerande på 5 m avstånd med möjlighet till fri sfärisk utbredning.

Av detta framgår att det maximala trycket ökar från knappt 1000 kPa för den oreflekterade stötvågen till drygt 5000 kPa för den reflekterade, dvs. en ökning med drygt en faktor fem. Varaktigheten förblir densamma medan impulsintensiteten också ökar märkbart, här en faktor på omkring 3,2. Med undantag av väldigt kraftiga laddningar och/eller i kombination med korta avstånd gäller allmänt att ökningen av det reflekterade trycket är större än motsvarande ökning av den reflekterade impulsintensiteten.

Referens: Kapitel 3:222 och Bilaga 3:A:5 i Dynamisk lastpåverkan, referensbok.

Reflexionens variation med avståndet



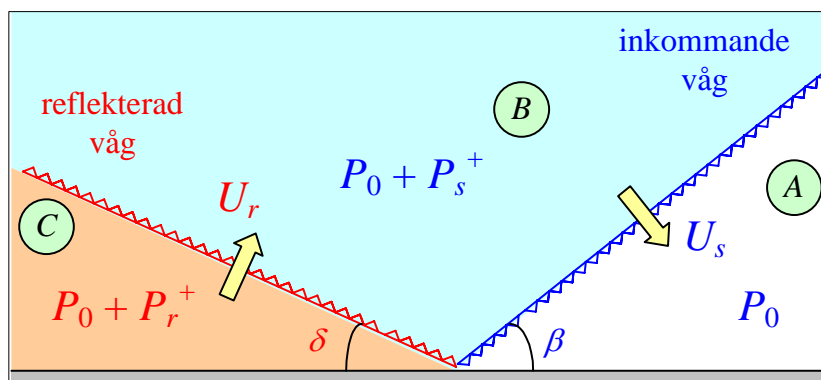
Reflexionen hos en stötvåg genererar en betydande ökning i tryck och impulsintensitet jämfört med en oreflekterad våg. För trycket beror den procentuella ändringen på storleken hos det oreflekterade trycket i den infallande stötvågen medan det för impulsintensiteten även beror på det skalade avståndet.

Figuren visar hur denna ökning varierar för en laddning på 125 kg TNT som detonerar på ett avstånd av mellan 1 och 10 m. I denna kan utläsas att ökningen i tryck och impulsintensitet för en arkivbomb (avstånd 5 m) är omkring 5,4 respektive 3,2 för en reflekterad våg jämförd med en oreflekterad.

En minskning av avståndet till 3 m medför en ökning med en faktor 7,2 för både tryck och impulsintensitet medan en ökning av avståndet till 7 m ger en tryckökning på 4,2 och en impulsökning med en faktor 2,8. En ändring gentemot arkivbombens "standardavstånd" på 5 m med en sträcka av 2 m resulterar således i en betydande skillnad i lastens styrka.

Referens: Bilaga 3:A:5 i Dynamisk lastpåverkan, referensbok.

Sned reflexion

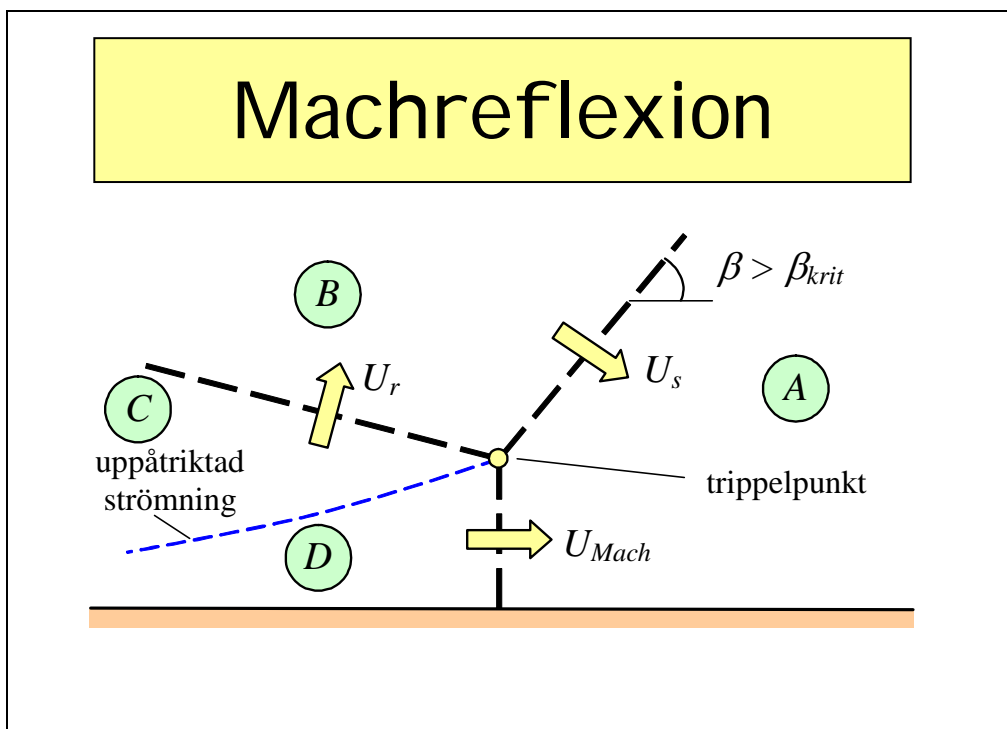


En sned reflexion uppstår när stötvågsfronten faller in med en sned vinkel mot en reflekterande yta. I figuren faller en stötvåg med hastigheten U_s in mot ett plant underlag med vinkeln β . En resulterande reflekterad stötvåg med vinkeln δ uppstår och lämnar den reflekterande ytan med hastigheten U_r . Detta ger upphov till uppkomsten av tre områden med skilda egenskaper: (A) ostörd luft; (B) inkommande våg med oreflekterade egenskaper; samt (C) reflekterad våg med reflekterade egenskaper.

Storleken på vinkeln β hos den inkommande vågen skiljer sig normalt från vinkeln δ för den reflekterade vågen, $\beta \geq \delta$. Detta beror på det jämviktstillstånd som behöver uppfyllas i den reflekterade ytan och är en funktion av den infallande vinkeln β samt den infallande vågens hastighet U_s .

En starkare stötvåg resulterar i en ökad skillnad i vinklarna mellan infallande och reflekterad stötvåg. För en svag stötvåg gäller dock att $\beta = \delta$, dvs. samma som en vanlig ljudvåg.

Referens: Kapitel 3:223 i Dynamisk lastpåverkan, referensbok.



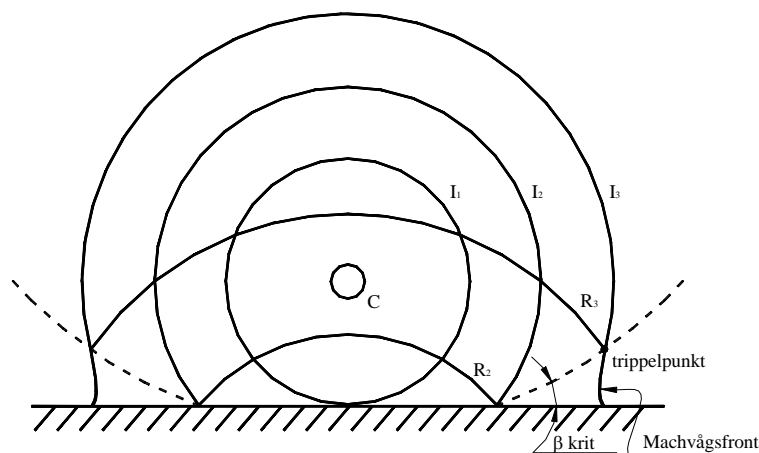
Machreflexion är ett fenomen som uppstår när en stötvåg faller in tillräckligt flackt mot en reflekterande yta. När den infallande vågen når en kritisk vinkel $\beta = \beta_{krit} \approx 40^\circ$ studsar den infallande vågen inte längre iväg från den reflekterande ytan. Istället uppstår ett mellanting där vågen delvis kanar längs den reflekterande ytan och delvis reflekteras mot densamma.

En uppåtriktad strömning gör att skärningspunkten mellan inkommande (U_s) och reflekterad våg (U_r), den så kallade trippelpunkten, gradvis rör sig uppåt. Detta resulterar i att en ny stötvåg – en Machvåg – tar form vinkelrätt mot ytan som far fram med en hastighet $U_{mach} > U_s$. Detta kallas Machreflexion och innebär att ett fjärde område, (D), uppstår vars termodynamiska egenskaper skiljer sig från de övriga tre områden som annars erhålls vid sned reflexion: (A) ostörd luft; (B) oreflekterad stötvåg och (C) reflekterad stötvåg.

Geometriskt sett kommer det alltid att uppstå en situation där den infallande vågen mot en reflekterande yta överstiger den kritiska vinkeln β_{krit} . Fenomenet Machreflexion innebär därmed att det för en stötvåg på ett givet avstånd från detonationscentrum också alltid kommer uppstå en vertikal vågfront, en så kallad Machvågsfront, som rusar fram parallellt med det reflekterande underlaget.

Referens: Kapitel 3:224 i *Dynamisk lastpåverkan*, referensbok.

Stötvågens utbredning

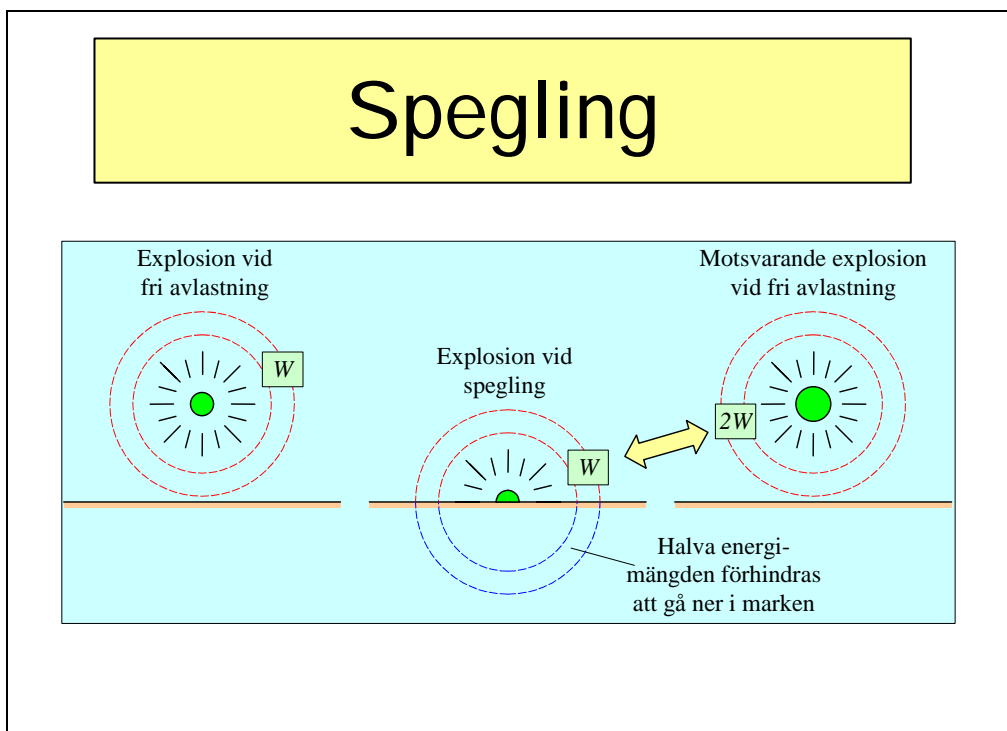


Figuren illustrerar reflexionsprocessen hos en stötvåg uppdelad i tre separata delar. I det första stadiet har den infallande vågen I_1 precis nått fram till den reflekterande ytan. Infallsvinkeln är dock inte större än den kritiska vinkeln β_{krit} varför enbart reguljär sned reflexion fås och bildandet av någon Machvåg inte sker.

Liksom den infallande vågen så expanderar även den reflekterande vågen. Den senare kommer dock inte anta en sfärisk form eftersom reflexionsvinkeln δ är mindre än infallsvinkeln β . Detta skiljer sig därmed mot vad som inträffar för en reflekterad akustisk ljudvåg. Denna skulle ha antagit en sfärisk form eftersom den infallande och reflekterande vinkeln i det fallet är lika stora.

I det andra stadiet har den infallande vågen I_2 rört sig så långt från explosionens källa att dess infallsvinkel β är lika med den kritiska vinkeln β_{krit} . Detta resulterar i en övergång från sned reflexion till en Machreflexion och betecknar startpunkten för bildandet av en Machvåg. När stötvågen expanderar ytterligare växer Machvågen och omsluter allteftersom de infallande och reflekterande vågorna. Detta representeras i figuren av den streckade linjen, vilken beskriver den såkallade trippelpunktens tillväxt. I det tredje stadiet domineras stötvågen I_3 nära marken av Machvågens framfart där en nära nog vertikal vågfront har bildats.

Referens: Kapitel 3:224 i *Dynamisk lastpåverkan*, referensbok.

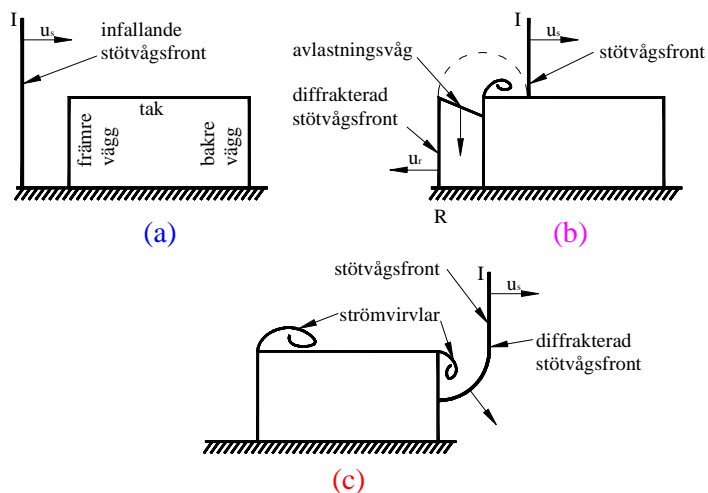


När en explosion sker nära en reflekterande yta kommer detta påverka stötvågens styrka och utbredning. Eftersom stötvågens egenskaper är en funktion av dess energiintensitet betyder detta också att de är beroende av den volym i vilken utbredningen sker. Om stötvågens utbredning hindras på något sätt innebär detta att omsluten volym minskar och därmed också att aktuell energiintensitet inte minskar i samma takt.

För en explosion som sker i kontakt med en reflekterande yta minskar volymen som stötvågen kan breda ut sig över till hälften jämfört med en explosion som sker uppe i luften. En sådan situation illustreras i figuren, betecknas som spegling och kan sägas utgöra en typ av reflexion. I ett idealiserat fall innebär detta att den stötvåg som genereras av en explosion på marken motsvarar en stötvåg orsakad av en dubbelt så stor laddning som detonerar med möjlighet för fri sfärisk avlastning. Detta innebär att en laddning med storleken W som detonerar på marken, där ingen energi försvinner neråt utan istället speglas upp i luften, resulterar i en stötvåg med samma egenskaper som den stötvåg som fås av en laddning med storleken $2W$ som detonerar uppe i luften med möjlighet till fri tryckavlastning.

Referens: Kapitel 3:225 i Dynamisk lastpåverkan, referensbok.

Diffraktion

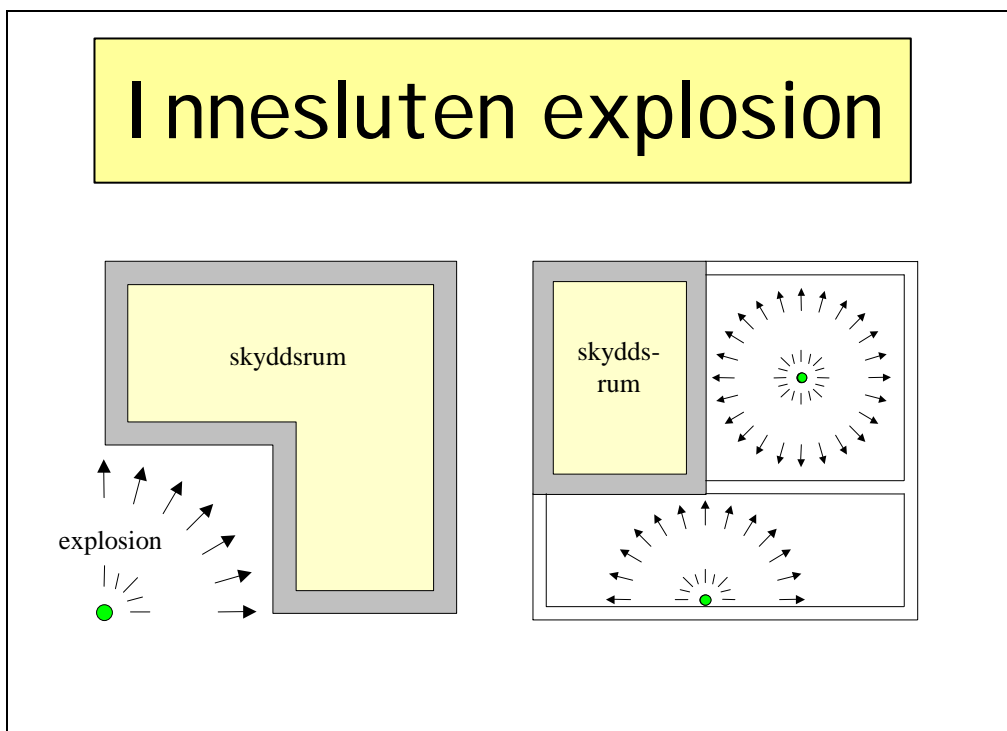


När en stötvåg når fram till ett hinder kommer denna att störas i sin framfart och interagera runt hindret. Detta fenomen benämns diffraktion och kan ha stor betydelse för hur en utsatt byggnad påverkas av en stötvåg. I figuren visas schematiskt vad som händer i ett tvådimensionellt fall när en plan stötvåg når fram till en byggnad.

- (a) En plan stötvåg I rusar med hög hastighet fram mot byggnaden. Vid byggnaden råder fortfarande helt ostörda förhållanden.
- (b) När den infallande vågen I når den främsta väggen uppstår en reflexionsvåg R i motsatt riktning. Detta ger upphov till ett reflekterat tryck vid den främre väggen. Ovanför väggen fortsätter stötvågen sin färd framåt över taket och belastar detta med ett orefleterat tryck. Framför stötvågen råder fortfarande ostörda förhållanden. Eftersom trycket är lägre på taket än vid väggen uppstår en avlastningsvåg och en luftvirvel bildas vid hörnet som ytterligare minskar trycket i området.
- (c) När stötvågen når byggnadens baksida diffrakterar den ned bakom hörnet varvid en andra luftvirvel skapas och trycket på byggnadens baksida blir något lägre än det orefleterade trycket på taket. Hela byggnaden har nu påverkats medan luften framför den framrusande stötvågen fortfarande är helt ostörd.

Referens: Kapitel 3:23 i *Dynamisk lastpåverkan*, referensbok.

Innesluten explosion



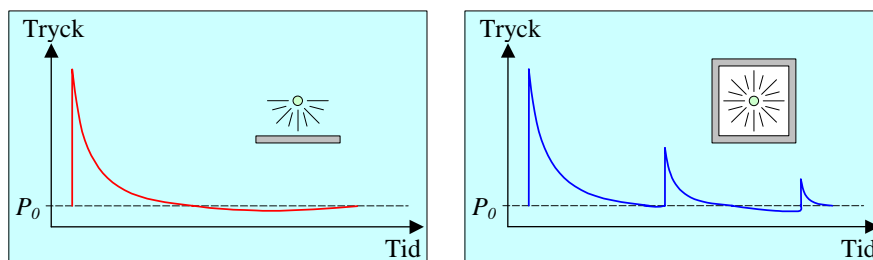
Inverkan av en explosion i ett slutet utrymme kan bli betydligt kraftfullare än explosioner i det fria. Anledningen till detta är att den frisläppta energin hindras i sin utbredning varvid avlastningen fördröjs. Detta resulterar i sin tur till ett ökat tryck men framförallt till ökad varaktighet och impulsintensitet.

I figuren exemplifieras två fall: en explosion vid ett ingående hörn i ett skyddsrum och en explosion inne i en byggnad som enbart delvis består av ett skyddsrum. I det första fallet kommer multipla reflexioner uppstå inne i hörnet vilket leder till ökad belastning. I det andra fallet kommer det även att uppstå fördämningseffekter i det slutna utrymmet utanför skyddsrummet eftersom byggnadens ytterväggar hindrar frigjorda explosionsgaser från att ventileras bort tillräckligt snabbt. Detta resulterar i ett långvarigt men mindre intensivt övertryck och är särskilt uttalat i ett slutet utrymme med få öppningar.

Ett motsvarande fall är den effekt som fås vid explosion inne i en tunnel. Tunnelns utformning, med två öppna ändar, möjliggör avlastning i enbart en riktning. Därmed fås en förhindrad energiavlastning jämfört med fri avlastning och kan liknas vid den effekt som fås vid såkallad spegling. På avstånd som vid fri avlastning skulle få relativt liten belastning kan detta innebära en markant lastökning.

Referens: Kapitel 3:32 i Dynamisk lastpåverkan, referensbok.

Flerfaldig reflexion

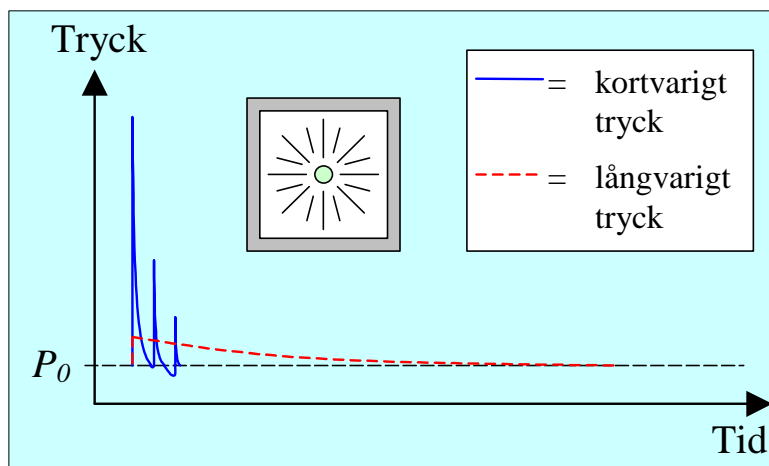


Antalet reflexioner ökar ofrånkomligt i ett slutet utrymme. Beroende på utrymmets beskaffenhet ger detta upphov till en serie av sekundära reflexioner. I figuren visas två principiella tryck-tidssamband för vad som händer vid en reflekterande yta i två olika fall. Laddningen är densamma medan den geometriska omgivningen skiljer sig i de två fallen. I det första fallet finns enbart en reflekterande yta medan det i det andra fallet finns flera. Angivet tryck motsvarar lasten vid den reflekterande ytan i den punkt där normalreflexion fås av den infallande stötvågen.

I fallet med en reflekterande yta fås en tryck-tidskurva motsvarande den ideala lastkurvan med en tydlig övertrycksfas och en efterföljande, betydligt lägre, undertrycksfas. Vid flera reflekterande ytor fås dock flera trycktoppar. Den första trycktoppen är identisk med den som uppstår i fallet med enbart en reflekterande yta. Därefter erhålls dock en skillnad i lasten eftersom det i det slutna utrymmet uppkommer en serie av efterföljande reflexioner. Varaktigheten mellan dessa reflexionstoppar beror på läge hos studerad punkt, utrymmets geometri och avstånd samt styrkan i explosionen, varför överlappande trycktoppar kan uppstå.

Referens: Kapitel 3:32 i Dynamisk lastpåverkan, referensbok.

Fördämningseffekter

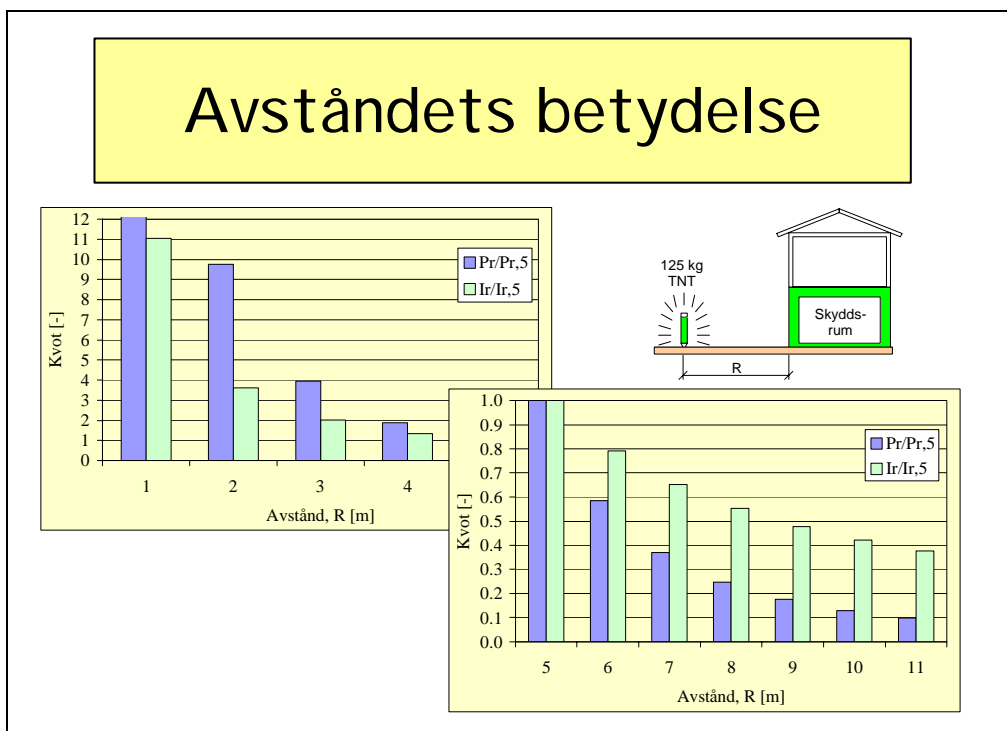


I figuren visas den principiella skillnaden mellan det kortvariga tryck som erhålls av flerfaldig reflexion samt det långvariga tryck som är ett resultat av fördämningseffekter. Det tryck som fås i det förstnämnda fallet är betydligt högre än det som fås av de instängda spränggaserna. Dock blir varaktigheten, och därmed även impulsintensiteten, betydligt större i det senare fallet.

Begränsning i en innesluten volym resulterar i såkallade fördämningseffekter vilket gör att explosionstryckets varaktighet kan öka markant. När de explosionsgaser som uppstår inte kan ventileras bort tillräckligt snabbt bildas ett långvarigt tryck. Storleken och varaktigheten på detta tryck blir därmed en funktion av laddningsviktens förhållande till den inneslutna volymen samt hur snabbt spränggaserna kan sippra ut ur ventiler och andra öppningar från det slutna utrymmet.

Ett tätare utrymme begränsar möjligheten till fri avlastning, vilket gör att explosionens styrka bibehålls längre. Detta leder till längre varaktighet och därmed ökad belastning mot omgivningen.

Referens: Kapitel 3:32 i Dynamisk lastpåverkan, referensbok.

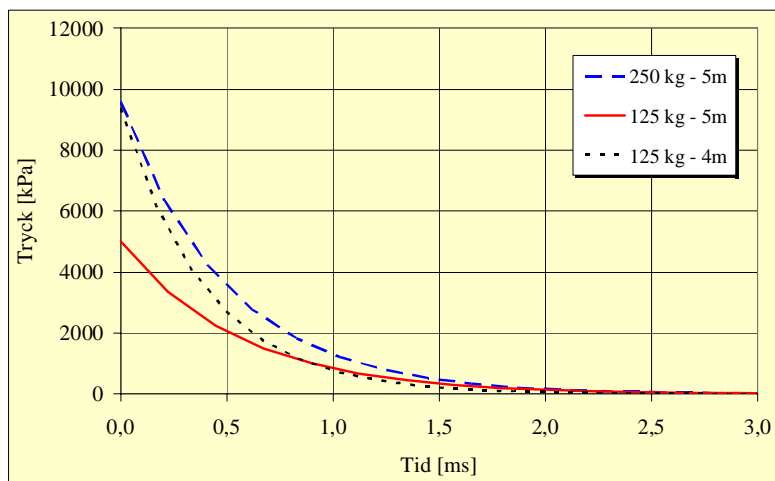


Utgående från de skallagar som gäller för en explosion kan det konstateras att avståndet mellan detonationscentrum och utsatt byggnad har en avgörande betydelse för den last som kommer verka på byggnaden. Detta belyses i figuren där det reflekterade trycket (blå staplar) och den reflekterade impulsintensiteten (gröna staplar), orsakade av en laddning på 125 kg TNT detonerande på olika avstånd, jämförs. Resultaten presenteras som en kvot mellan tryck och impulsintensitet för aktuellt avstånd jämfört med tryck respektive impulsintensitet för en laddning på 5 m avstånd (Räddningsverkets arkivbomb).

Av detta framgår att det reflekterade övertrycket P_r ökar snabbt vid minskande avstånd medan motsvarande ökning för impulsintensiteten I_r är långsammare. På samma sätt minskar övertrycket snabbt med ökande avstånd medan impulsintensitetens avtagande är betydligt långsammare.

Referens: Bilaga 3:A:3 i *Dynamisk lastpåverkan*, referensbok.

Laddningen kontra avståndet



Laddningens vikt och avstånd mellan detonationscentrum och byggnad inverkar på de lastvärden som uppstår mot byggnaden. Av dessa båda parametrar har avståndet störst betydelse. Utgående från befintliga skallagar kan det konstateras att likvärdigt skalat avstånd Z erhålls om laddningsvikten dubblas och avståndet R mellan byggnad och laddning ökar med 25%, dvs.

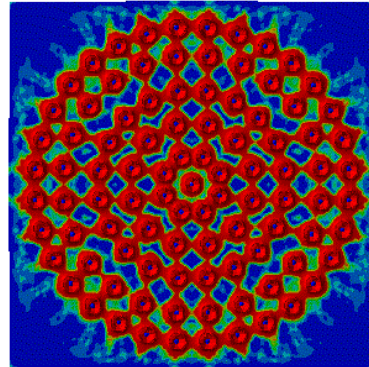
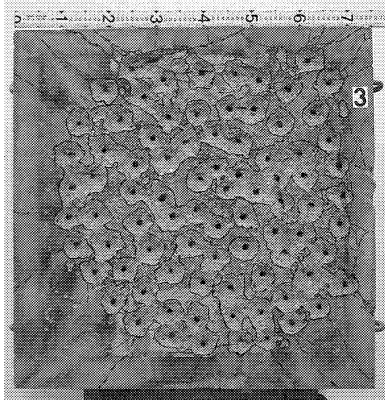
$$Z_1 = \frac{R}{W^{1/3}} \quad Z_2 = \frac{1,25R}{(2W)^{1/3}} \approx \frac{R}{W}$$

Detta innebär att erhållet tryck är ungefär detsamma medan impulsintensiteten ökar med kubikroten av ändring i laddningsvikt. I figuren jämförs effekten av den såkallade arkivbomben (125 kg TNT på 5 m avstånd) med en dubbelt så stor laddning men bibehållet avstånd samt bibehållen laddning men avståndet minskat till 4 m.

Av figuren framgår att den reflekterade tryck-tidskurvan för en 250 kg laddning, detonerande på 5 m avstånd, ger god överensstämmelse med en laddning på 125 kg som detonerar på 4 m avstånd. Erhållna övertryck är nästan desamma medan impulsintensiteten ökar med en faktor på omkring $2^{1/3} \approx 1,25$ för den dubblerade laddningen.

Referens: Bilaga 3:A:6 i *Dynamisk lastpåverkan*, referensbok.

Splitterverkan



Splitter skapas av en bomb som fragmenteras. Det finns olika typer av bomber där en del är helt eller delvis förfragmenterade. Splitters storlek för en bomb varierar och är beroende av bombhöljets form, tjocklek och materialegenskaper, samt sprängämnets mängd och typ. Splitterhastigheten beror främst på bombens massa och mängd sprängämnen. Hastighet och storlek hos splittret är avgörande för vilken skada som uppkommer i en byggnad som träffas av splitter.

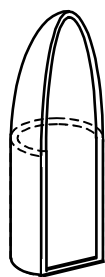
Betongkonstruktioner utsatta för explosionslaster där en stötvåg och splitter träffar byggnaden uppför sig väldigt annorlunda än en byggnad utsatt för statisk belastning. Betongens materialegenskaper är inte desamma vid dynamisk belastning; hållfastheten och styvheten ökar.

I figuren visas ett foto på ett splitterförsök med tillhörande utvärdering genom numerisk analys. Experiment är en viktig och nödvändig del av kunskapsuppbyggandet. En stor fördel med numeriska analyser är dock att repeterbara parameterstudier kan genomföras på ett kostnadseffektivt sätt och fungera som ett kraftfullt komplement till experiment.

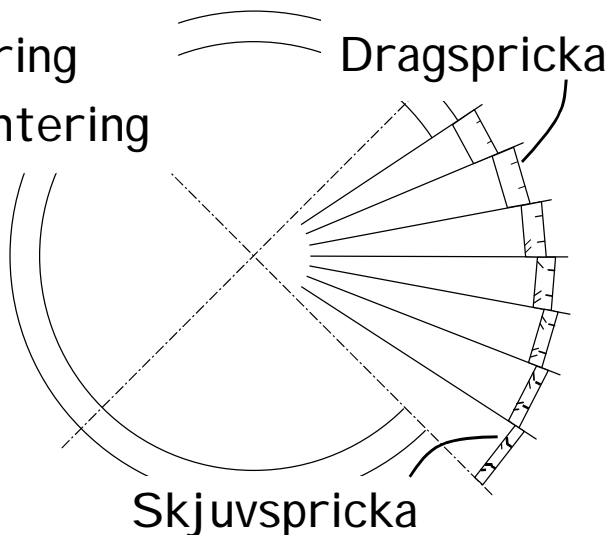
Referens: Kapitel 4 i Dynamisk lastpåverkan, referensbok.

Vad är splitter?

- Fragmentering
- Förfragmentering



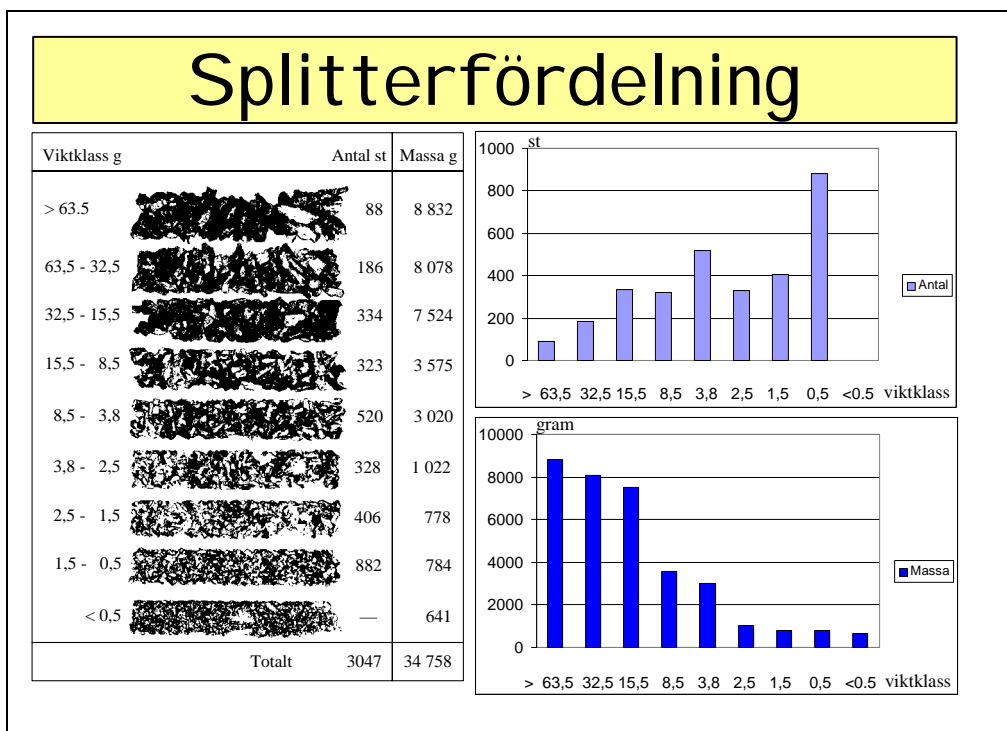
Bomb



Splitter uppkommer då en bombs hölje fragmenteras och består av metalldelar av varierande form och storlek. Fragmentering är ett samlingsnamn på alla processer som sönderbryter eller delar en bombs hölje, dock finns förfragmenterade bomber där fragmenteringen är helt eller delvis fullbordad innan detonationen sker. Fragmenteringen är beroende på ett flertal faktorer, såsom höljets form, tjocklek och materialegenskaper samt sprängämnets mängd och materialegenskaper.

För att klarlägga fragmenteringen studerar vi en ideal cylinder. Figuren visar en principskiss över fragmenteringsförloppet. När sprängämnet exploderar uppstår ett spränggastryck som får höljet att expandera. Under expansionen töjs höljet i tangentiell riktning, tjockleken minskar och höljet spricker. När sprickan utbreder sig inåt möter den ett tryck som permanent eller delvis förhindrar dess utbredning. Dock fortsätter expansionen av höljet, vilket deformeras utefter ett antal glidlinjer i riktningarna för maximala skjuvspänningar. När de inifrån kommande skjuvsprickorna möter de radiella sprickorna är fragmenteringen fullbordad; höljet delas upp i mindre bitar och slungas iväg ifrån bomben i form av splitter.

Referens: Kapitel 4:1 i Dynamisk lastpåverkan, referensbok.

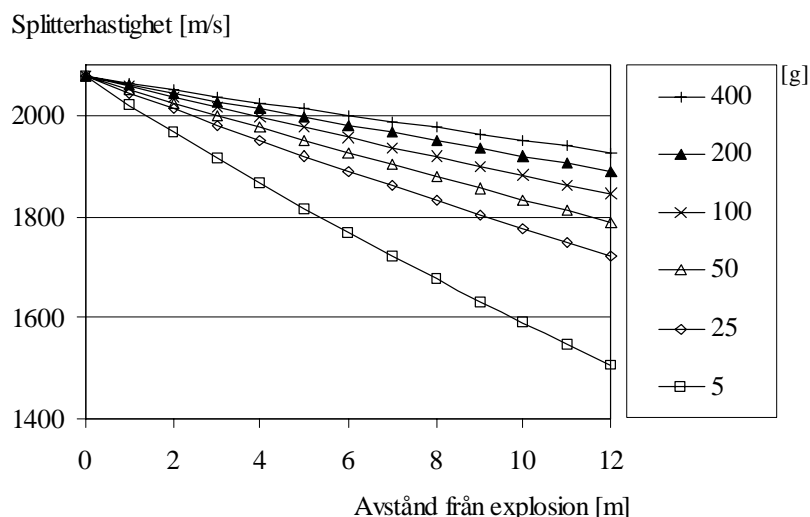


Storleken på splitter kan variera kraftigt för en och samma bomb. Ett exempel på en splitterfördelning från en 155 mm spränggranat fördelade i viktklasser visas till vänster i figuren. Till höger visas två diagram. Den övre visar antalet splitter och den undre visar totala splittermassan för de olika viktklasserna.

Antalet av de större splittren är få men med en större totalmassa. För viktklass där splittermassan är mer än 63,5 gram finns det enbart 88 splitter, medan det för exempelvis viktklassen 1,5 – 0,5 gram finns 882 splitter. Det är de större splittren som orsakar den främsta skadan på konstruktionen. Den totala splittermassan ökar också med ökande viktklass trots att antalet av de tunga splittren är få. För den högsta viktklassen är totala splittermassan 8 832 gram, medan för viktklassen 1,5 – 0,5 gram är den enbart 784 gram.

Referens: Kapitel 4:1 i Dynamisk lastpåverkan, referensbok.

Splitterhastighet



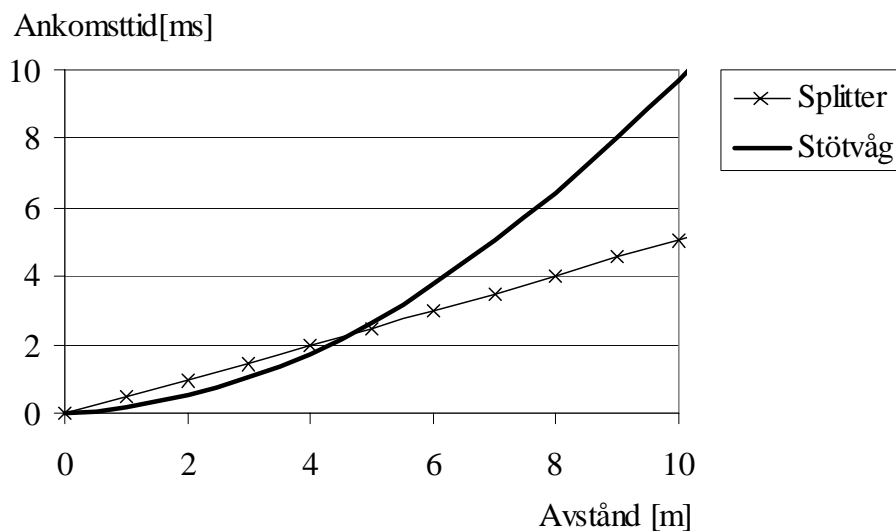
Enligt Räddningsverkets skyddsrumregler skall ett skyddsrum tåla verkan av en tryckvåg motsvarande den som åstadkoms av en bomb innehållande 125 kg TNT som briserar på 5 meter från skyddets ut-sida vid fri tryckavlastning. Detta motsvarar Räddningsverkets såkallade arkivbomb och resulterar i en utgångshastighet för splittret på 2 075 m/s.

Splittrets massa för arkivbomben antas varierar mellan 1 och 50 g. Dock kan något enstaka splitter ha högre massa, men det bortses från i arkivbomben. Figuren visar splittrets hastighet på varierande avstånd för splittremassor mellan 5 och 400 gram. Ju mindre massan är desto snabbare avtar hastigheten. Exempelvis minskar hastighe-ten för splitter med massan 50 gram från 2 075 till 1 950 m/s på ett avstånd av 5 meter, medan hastigheten för massan 5 gram på detta avstånd redan minskat till cirka 1 820 m/s.

Utgångshastigheten hos splitter kan beräknas utgående från mäng-den sprängmedel och höljets massa. Respons hos utsatt byggnad beror på splittrets massa och anslagshastighet. Ju högre massa och hastighet splittret har vid anslaget desto större blir skadan i konstruk-tionen.

Referens: Kapitel 4:1 i Dynamisk lastpåverkan, referensbok.

Ankomsttid för splitter och stötvåg

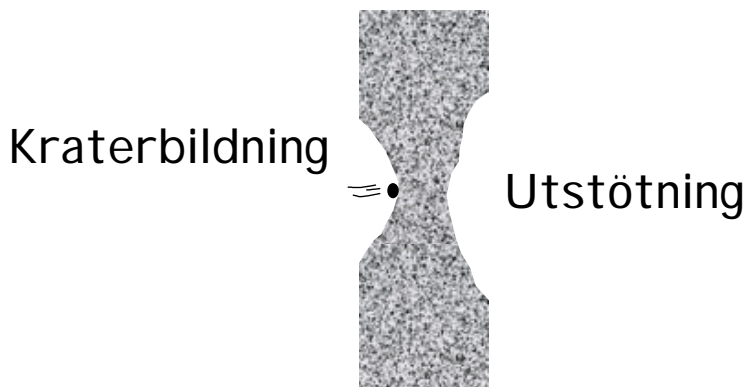


Vid detonation av en bomb utbreder sig förutom splitter även en stötvåg. Beroende på avstånd till byggnad och detonationens storlek kan antingen stötvågen eller splittret träffa byggnaden först, alternativt samtidigt.

I figuren visas ankomsttiden som funktion av avståndet för en laddning på 125 kg TNT. För arkivbomben, där detonationen sker på ett avstånd av 5 meter, är ankomsttiden för de större splittren på 50 gram och stötvåg ungefär densamma, drygt 2 millisekunder. För samma bomb, på ett avstånd upp till cirka 5 meter, kommer stötvågen att träffa byggnaden innan splittret når fram och på längre avstånd kommer splittret att träffa före stötvågen. På ett avstånd på 10 meter har ankomsttiden för splitter halverats jämfört med stötvågen.

Referens: Kapitel 4:2 i Dynamisk lastpåverkan, referensbok.

Skadefenomenen



Penetration eller perforation
Sprickbildning och skador på armering

När en splittersvärm träffar en armerad betongkonstruktion uppkommer en del skadefenomen i konstruktionen. Figuren visar ett splittret som kommer farande från vänster mot en betongvägg med hög hastighet. När splittret träffar betongväggen orsakas kraterbildning vid anslaget och splittret penetrerar betongen. Penetration betyder splittetrinträngning och tillsammans med kraterbildning kan detta ses som att splittret eroderar betongens yta.

Är splittrets hastighet och massa tillräckligt hög kan utstötning ske på baksidan eller att splittret perforerar väggen. Utstötning innebär att betong slits av på baksidan av den belastade väggen och perforation innebär att splittret tränger igenom. Dessutom uppkommer kraftig sprickbildning i betongen och armeringen kan skadas eller till och med slitas av helt.

Skadan på konstruktionen beror dels på splittrets egenskaper (främst massa och hastighet) och dels på betongens materialegenskaper samt armeringsinnehåll.

Referens: Kapitel 4:2 i Dynamisk lastpåverkan, referensbok.

Penetration

- Kraterbildning



Effektiv
tjocklek
minskar



- Armering kan skadas



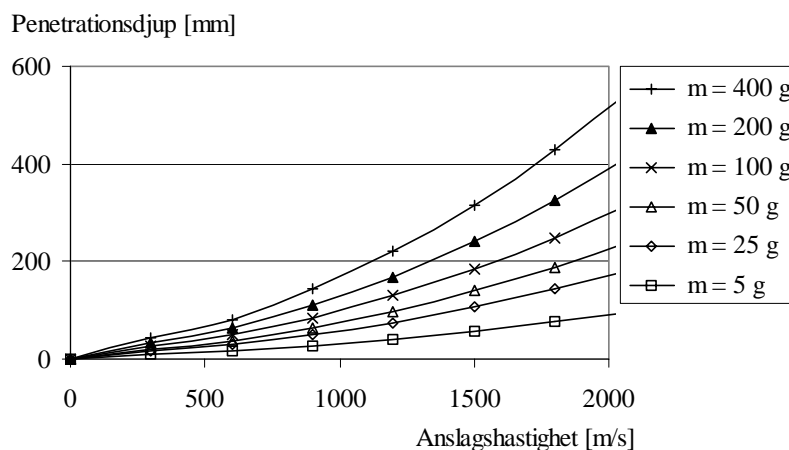
Bärförmågan minskar

En kritisk faktor för splitterbelastning är penetrationsdjup av splitter eftersom betongens yta eroderar och armeringen kan skadas eller slitas av. Penetration betyder splitterinträngning, medan perforation innebär att splittret tränger igenom konstruktionen.

Fotot i figuren visar en splitterbelastad armerad betongvägg, där det går att se att betongen har eroderats så att armeringen är delvis blottlagd. Den eroderade ytan medför att väggens effektiva tjocklek minskar och därmed minskar bärförmågan. Bärförmågan minskar också om armeringen skadas eller delvis slits av, dessutom reduceras vidhäftningen mellan betong och armering på grund av sprickbildning och vibration.

Referens: Kapitel 4:2 i Dynamisk lastpåverkan, referensbok.

Penetrationsdjup

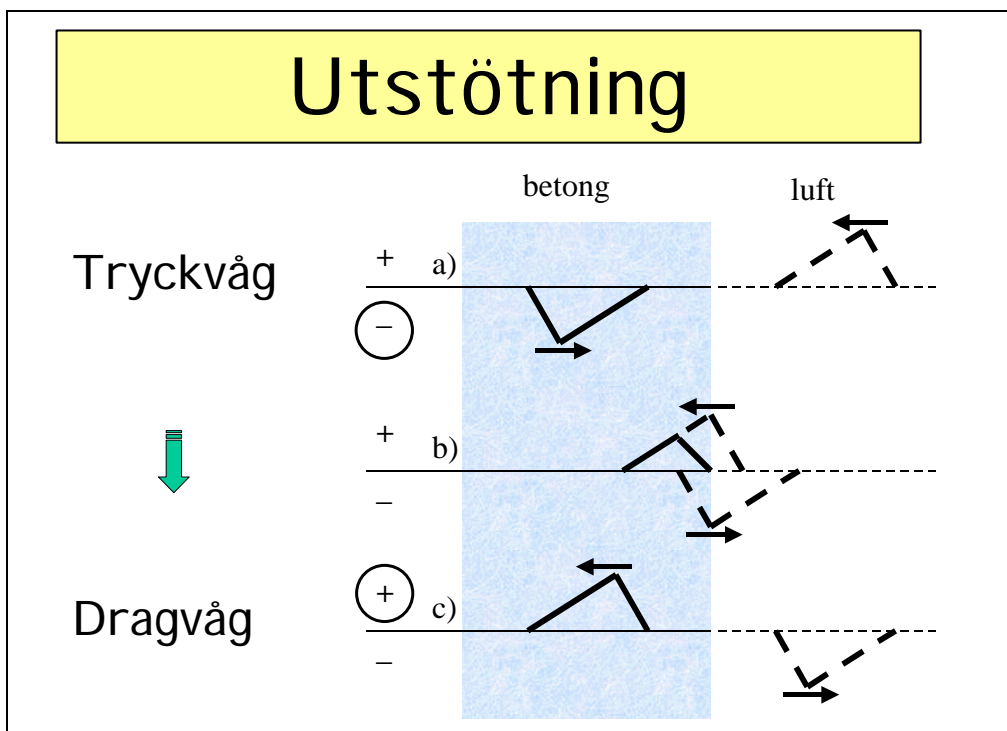


Figuren visar penetrationsdjup som funktion av anslagshastighet för varierande splitterstorlekar mellan 5 och 400 g. Penetrationsdjupet är beroende av massan och anslagshastigheten hos splittret. Tyngre splittermassa och högre anslagshastighet resulterar i större penetrationsdjup.

Som exempel blir penetrationsdjupet cirka dubbelt så stort för massan 400 gram som för massan 50 gram. Det kan även konstateras att en stor splittermassa bromsas upp långsammare av luftmotståndet varför dessa också kommer att ha högre anslagshastighet än splittret med lägre massa.

För arkivbomben varierar splittermassan mellan 1 och 50 gram. Anslagshastigheten för splittret med massan 50 gram är 1 950 m/s, vilket resulterar i maximal inträngningsdjup på cirka 200 mm.

Referens: Kapitel 4:2 i Dynamisk lastpåverkan, referensbok.



Utstötning innebär att betong slits loss på baksidan av den belastade strukturen. I figuren utsätts en betongvägg, omgiven av luft på fram- och baksidan, för en triangelformad tryckvåg från vänster.

a) När en tryckvåg orsakad av stötvågs- och splitterbelastning träffar en betongvägg fortplantar sig lasten som en tryckvåg genom betongväggen (heldragen linje på negativ sida). Den streckade linjen symboliserar en fiktiv dragvåg på positiv sida med samma storlek och avstånd, som rör sig i motsatt riktning.

b) När tryckvågen når den bakre betongytan i gränsskiktet mellan vägg och luft reflekterar denna. Den reflekterade vågen byter tecken på grund av impedansskillnaden mellan betong och luft i gränsskiktet och den infallande tryckvågen blir därmed en dragvåg. I figuren framställs detta som en fiktiv tryck- och dragvåg (streckade linjer) vilka superponeras till den heldragna linjen till en dragvåg.

c) Den reflekterade vågen fortplantar sig tillbaks i konstruktionen som en dragvåg. Eftersom betongens förmåga att motstå dragspänningar är betydligt sämre än dess förmåga att motstå tryckspänningar kan detta leda till att den reflekterade dragvågen ger upphov till dragbrott varvid delar av betongväggens baksida lossnar. Denna utstötning kan ske även om splittret inte har perforerat betongen.

Referens: Kapitel 4:2 i Dynamisk lastpåverkan, referensbok.

Perforation

Anslagshastighet [m/s]	Splittrets massa [g]					
	5	25	50	100	200	400
300	22	39	50	65	84	108
600	30	54	70	91	118	153
900	39	74	97	127	167	220
1200	53	101	134	177	235	312
1500	70	135	180	239	318	424
1800	90	175	233	312	416	556
2100	112	220	295	394	528	707
2400	138	271	363	487	653	877
2700	166	327	439	590	792	1064
3000	196	389	522	702	943	1268

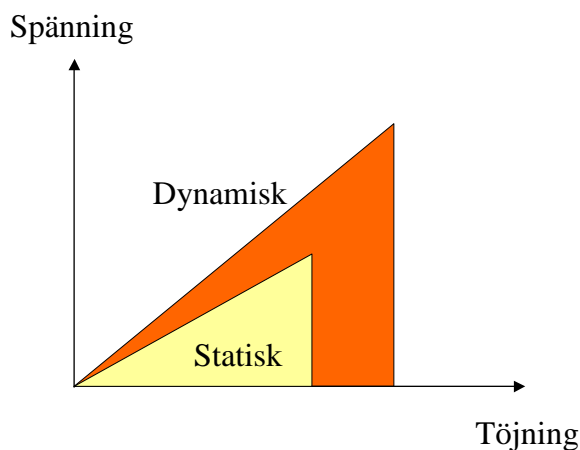
Med perforation menas att splittret tränger igenom konstruktionen. Utstötning kan dock ske även om splittret inte perforerar väggen. Tabellen redovisar erforderlig tjocklek med olika splittermassor och splitterhastigheter för att undvika perforation för en betongvägg med tryckhållfasthet på 30 MPa.

Ett skyddsrum's tjocklek ovan mark bör vara minst 350 mm. Det blåmarkerade området i tabellen visar splitter med olika massor och hastigheter där perforationsdjupet överskrider detta gränsvärde. Som ett exempel ger ett splitter med massan 100 gram och anslagshastighet på 2 100 m/s en erforderlig väggjocklek på 394 mm för att undvika perforation.

För arkivbomben varierar splittrets massa mellan 1 till 50 gram, och hastigheten för ett 50 gram splitter på ett avstånd på 5 m är cirka 1 950 m/s. För dessa är perforation inget problem. Dock, för enstaka splittermassor som är större än cirka 100 gram kan perforation ske.

Referens: Kapitel 4:2 i Dynamisk lastpåverkan, referensbok.

Betongens materialegenskaper

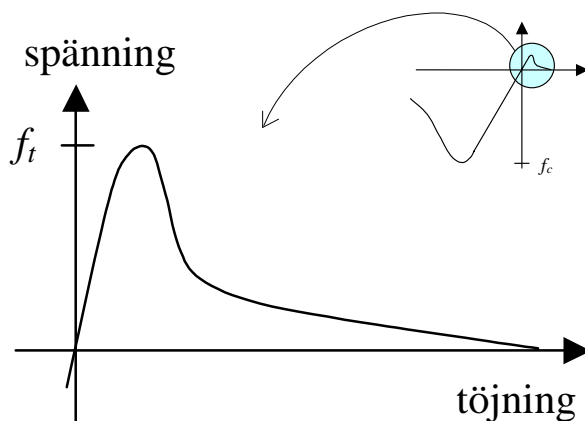


Dynamisk belastning innebär ökad belastningshastighet i betong jämfört med statisk belastning. Detta medför att betongens materialegenskaper förändras. Det är viktigt med förståelse för det statiska strukturella beteendet för att förklara den dynamiska responsen. Detta innebär att begrepp som brottenergi i drag, samt omslutnings-effekt i tryck är av vikt även vid dynamisk belastning.

När betong utsätts för splitterbelastning handlar det om en extrem dynamisk belastning kombinerad med höga tryck. Detta medför att betongens styvhet och hållfasthet ökar jämfört med statiska förhållanden, vilket illustreras principiellt i figuren. Eftersom det uppstår fler sprickor vid dynamisk belastning resulterar detta i en högre töjning. Dessutom, vid höga omgivande tryck ökar betongens tryckhållfasthet avsevärt och betongen blir segare.

Referens: Kapitel 4:3 i Dynamisk lastpåverkan, referensbok.

Betongens arbetskurva



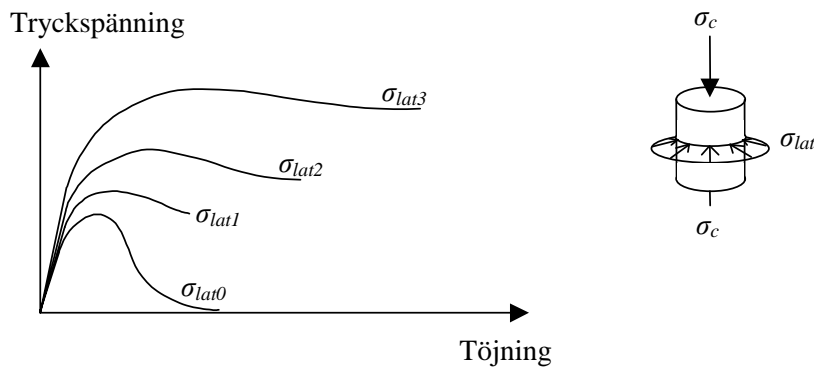
Betongens materialegenskaper karakteriseras ofta med det enaxiella spännings-töjningssambandet, vilket illustreras i figuren. Inringad del i figuren visar schematiskt spännings-töjningssambandet i drag.

Betongens draghållfasthet, f_t är betydligt lägre, mindre än en tiondel, än tryckhållfastheten, f_c . Betong är dessutom ett mycket sprött material, vilket innebär att när draghållfastheten uppnås minskar dess hållfasthet snabbt med ökande töjning. Dock har betongen en viss draghållfasthet kvar, den s k nedåtgående grenen.

Betongens brottenergi i drag definieras som arean under betongens draghållfasthet och sprickbredd då spänningen har sjunkit till noll. Brottenergin, vilken är energislukande, är av stor betydelse för sprickbildning i betong, exempelvis utstötning.

Referens: Kapitel 4:3 i Dynamisk lastpåverkan, referensbok.

Betong i tryck

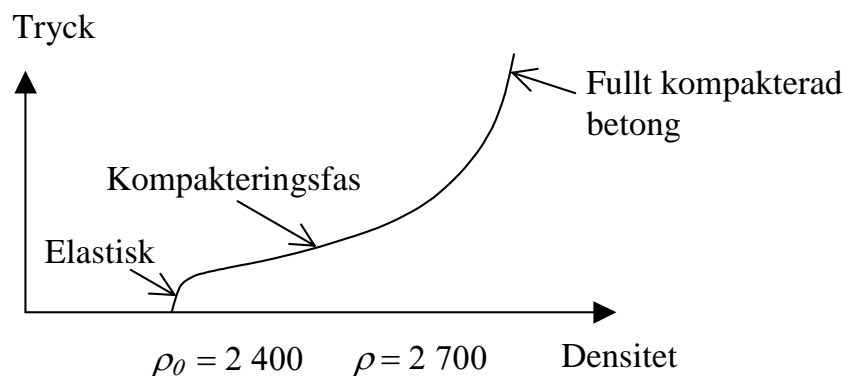


I figuren visas en cylinder som belastas axiellt med trycket σ_c och ett omgivande tryck σ_{lat} . Diagrammet i figuren visar tryckspänning mot töjning för varierande omgivande tryck. I fallet då det omgivande trycket är noll fås den enaxiella tryckhållfastheten. När betongen utsätts för fleraxiellt spänningstillstånd ökar dess tryckhållfasthet. Ju större omslutningstryck man har, desto högre blir tryckhållfastheten.

Såsom illustreras i figuren ökar dessutom materialets seghet med ökande omslutningstryck. Genom försök har det visats att betongens tryckhållfasthet kan mångdubblas om det omgivande trycket är tillräckligt stort. Vid splitterbelastning erhålls stora passiva omslutningstryck när splittret penetrerar betongen och därmed ökar tryckhållfastheten.

Referens: Kapitel 4:3 i Dynamisk lastpåverkan, referensbok.

Betongens tillståndsekvation

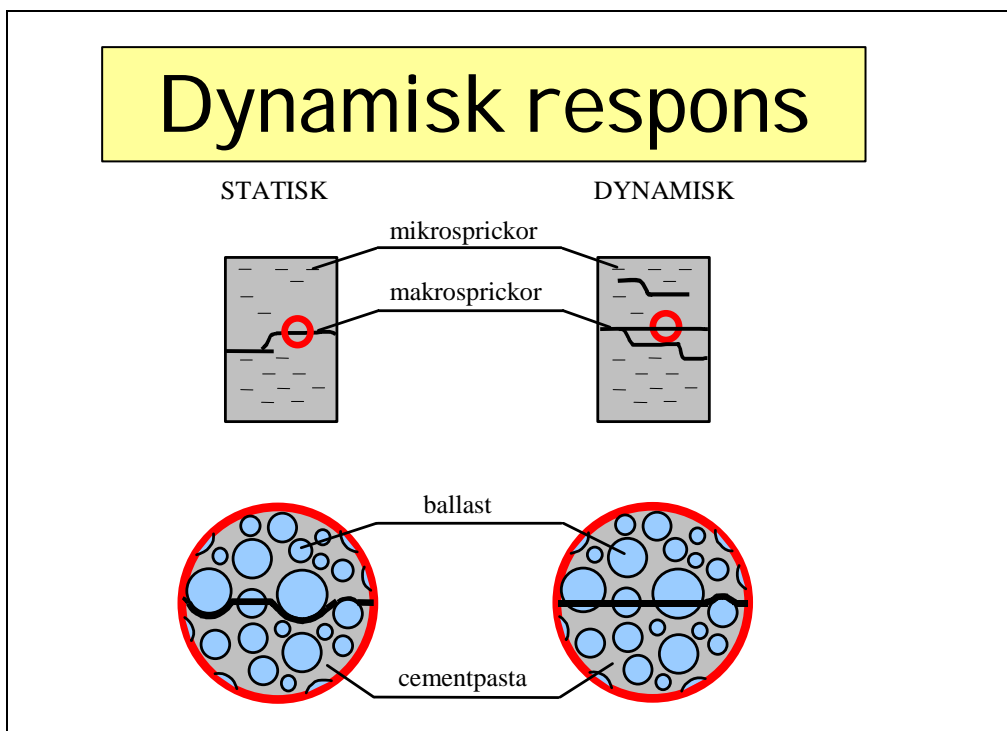


Betong utsatt för höga tryck kan karakteriseras med sin tillståndsekvation. Denna visar principiellt i figuren och uttrycker sambandet mellan hydrostatiskt tryck, det vill säga medelspänningen av de tre huvudspänningarna, och densitet.

För låga belastningar gäller linjärelastiska förhållanden och densiteten är omkring $2\,400 \text{ kg/m}^3$. Dessa förhållanden motsvarar normal statisk belastning. För ökad hydrostatisk pålastning uppstår mikrosprickbildning i betongen och porerna i betongen kollapsar, vilket medför att responsen blir icke-linjär, den så kallade kompakteringsfasen. Vid ytterligare pålastning kompakteras betongen tills alla porer har kollapsat och förhållandet mellan hydrostatiskt tryck och densitet blir linjärt. När detta inträffar har betongens densitet ökat till omkring $2\,700 \text{ kg/m}^3$.

Vid stötvågs- och splinterbelastning kan trycket bli så stort att kompakteringsfasen nås. Detta leder till att betongen når den icke-linjära delen av tillståndsekvationen, vilket utgör en viktig del för att förklara betongens respons vid höga tryck.

Referens: Kapitel 4:3 i Dynamisk lastpåverkan, referensbok.



Figuren visar schematiska sprickbilder av betongprov utsatta för statisk och dynamisk dragbelastning. Inringningarna i den övre delen av figuren är uppförstorade i den nedre delen.

Vid statisk belastning tar sprickan den väg som är mest energibesparande. I betong är normalt ballasten starkare än den omgivande cementpastan, varför sprickan letar sig fram genom denna runt ballastkornen. Vid dynamisk belastning ges dock inte den tid som behövs för detta, varför sprickan istället ofta tvingas skära rakt igenom ballasten. Den ökade hållfastheten i ballasten resulterar därför också i en förhöjd betonghållfasthet vid dynamisk belastning.

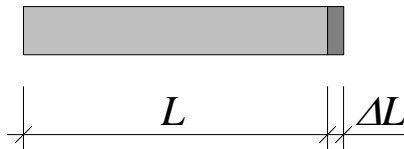
Andra fysikaliska fenomen som förklarar den förhöjda hållfastheten är viskösa effekter på grund av vatteninnehållet i betongen och masströghetskrafter samt omslutningseffekter i tryck.

Referens: Kapitel 4:3 i Dynamisk lastpåverkan, referensbok.

Töjningshastighet

Töjning

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}$$



Töjningshastighet

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\varepsilon}{\Delta t}$$

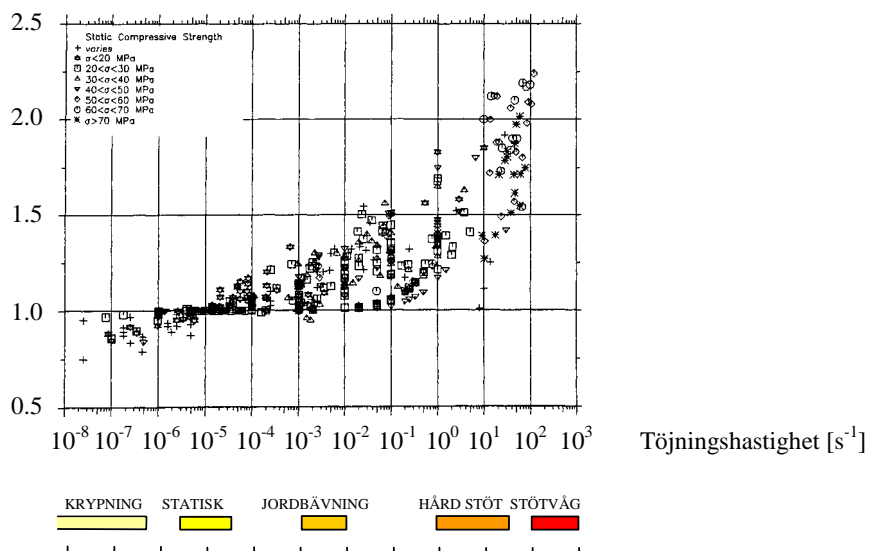
Figuren visar en stav som utsätts för enaxiell töjning. Töjning definieras som längdändring delat med ursprunglig längd. Töjningshastighet definieras som töjning per tidsenhet, det vill säga hur snabbt materialet deformeras.

Vid dynamisk belastning ökar töjningshastigheten i betongen. Detta har en direkt påverkan på betongens materialegenskaper.

Referens: Kapitel 4:3 i Dynamisk lastpåverkan, referensbok.

Dynamisk belastning vid tryck

Dynamisk förstöringsfaktor

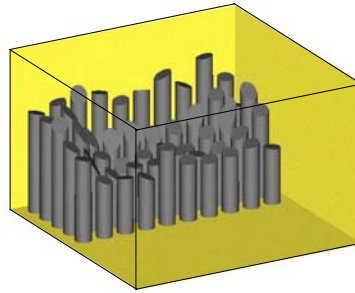
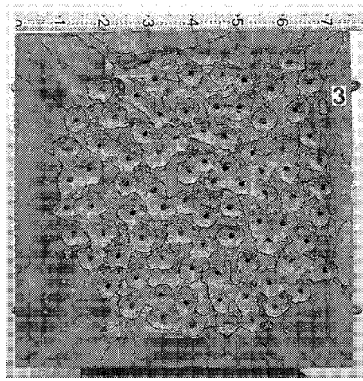


Figuren visar ett förhållande mellan dynamisk förstöringsfaktor och töjningshastighet för experiment av tryckt betong. Dynamisk förstöringsfaktor definieras som förhållande mellan den dynamiska och den statiska hållfastheten medan töjningshastighet definieras som töjning per tidsenhet. I nedre delen av figuren visas vilken töjningshastighet olika belastningar har från krypning till stötvåg.

Statisk belastning definieras som en töjningshastighet på omkring $10^{-5} s^{-1}$. För långsammare belastning, krypning, reduceras betongens hållfasthet. Vid snabbare belastning ökar dock hållfastheten och vid töjningshastigheter mer än $10 s^{-1}$, exempelvis vid stötvågs- och splitlerbelastning (hård stöt enligt figur), kan betongens tryckhållfasthet mer än fördubblas. Motsvarande för betong i drag kan den dynamiska förstöringsfaktorn bli upp till sju.

Referens: Kapitel 4:3 i *Dynamisk lastpåverkan*, referensbok.

Experiment med splitterbelastning

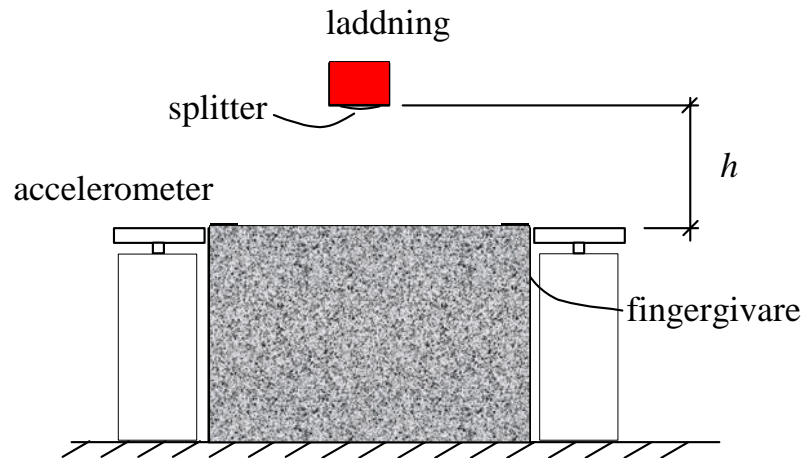


Betongens materialegenskaper förändras vid splitterbelastning och det är högst väsentligt att bilda en uppfattning om skadan i betongen. För att få tag på materialegenskaper för splitterbelastad betong har en metod utvecklats, vilken innebär att en splittersvärm beskjuts mot ett tjockt betongblock. Ur dessa betongblock borrar materialprover ut på varierande djup från anslagsytan för vidare analys för att undersöka den skada som uppkommit på grund av splitterbelastningen.

Frågor som hur betongens tryck- och draghållfasthet påverkas av en splitterskur samt hur den resulterande sprickbilden ser ut har studerats. Dessa experiment har resulterat i en kvantifiering av åstadkommen skada som tidigare inte varit kända. Ett annat resultat med experimenten har varit att få underlag för numeriska simuleringar.

Referens: Kapitel 4:4 i Dynamisk lastpåverkan, referensbok.

Försöksuppställning



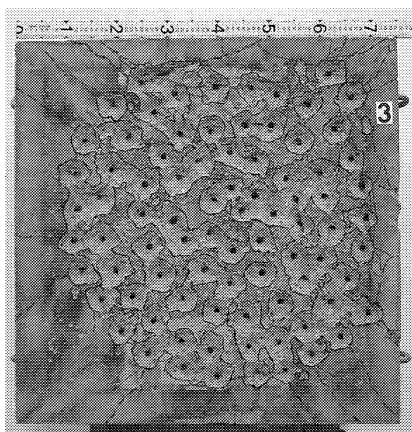
Figuren visar en försöksuppställning för att kvantifiera skadan i betongen efter splitterbelastning. Splittret beskjuts i denna från varierande höjd, från 0,6 m upp till 1,0 m, genom att avfira en splitterpreparerad laddning mot ett tjockt betongblock. Blocken har dimensionerna $750 \times 750 \text{ mm}^2$ med en tjocklek på 500 mm. Splitterladdningen tillverkas genom att gjuta fast stålkulor på en sfärisk yta.

I denna försöksserie har totalt sju laddningar skjutits med vikten på 1,3 kg vardera. För att mäta splitterhastigheten används accelerometrar och fingergivare. I försöken var splitterhastigheten omkring 1 650 m/s.

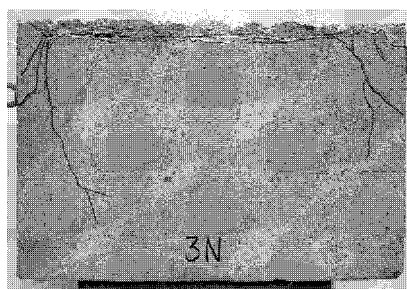
Referens: Kapitel 4:4 i Dynamisk lastpåverkan, referensbok.

Fotografier efter splitterbelastning

anslagsyta



tvärsnitt



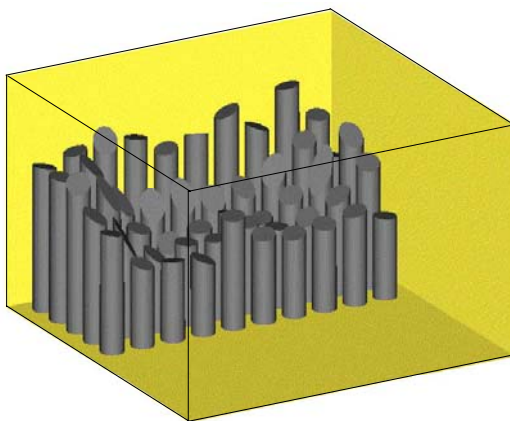
Efter splitterbeskjutning fotograferas och sågas betongblocken mitt itu för att studera sprickbildning. Figuren visar fotografier från ett av betongblocken där skadan från splittersvärmen visas för anslagsytan och i sågat tvärsnitt.

Den kraterdiameter som beskjutningen åstadkom blev cirka 50 mm för respektive splitteranslag och penetrationsdjupet varierade mellan 30 och 50 mm, där störst inträngning blev i centrum av splittersvärmens anslag.

Splittersvärmen orsakar avskalning på betongytan. Den stötvåg som genereras av detonation fortskrider som en tryckvåg genom betongblocket. När tryckvågen når ränderna av blocket reflekteras den som en dragvåg, vilken orsakar sprickbildning eftersom betongens draghållfasthet är betydligt lägre än tryckhållfastheten.

Referens: Kapitel 4:4 i Dynamisk lastpåverkan, referensbok.

Borrkärnor

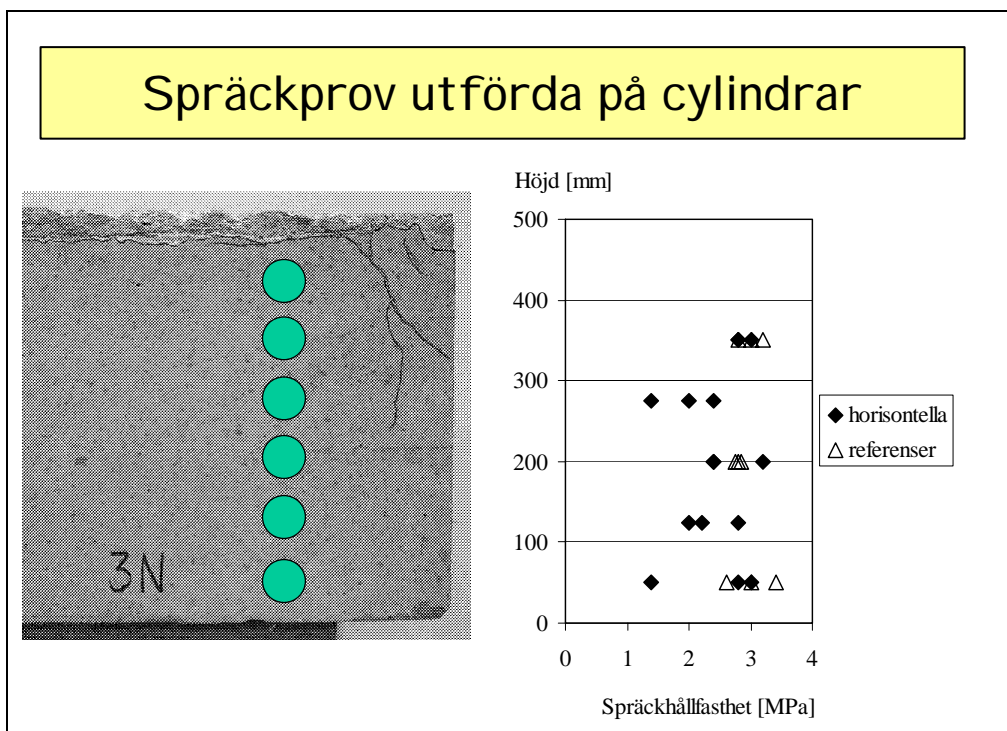


För att kunna genomföra materialprover borrar cylindrar ur de splitterbelastade betongblocken. I utförda prover togs cylindrar ut i såväl vertikal som horisontell riktning. Figuren illustrerar vertikalt utborrade kärnor, diameter 50 mm, från ett av de splitterbelastade betongblocken.

En större global spricka orsakades av splitterbelastningen. Detta resulterade i att cylindrarna delades i två och i figuren visas de undre delarna. Därmed framgår också sprickplanets läge.

Borrkärnor sågas i längder om 100 mm från varierande djup för att kunna genomföra standardiserade tryck- och spräckprov. Genom jämförelse av dessa med tryck- och spräckprover utborrade från ett obelastat betongblock, fås en bild av hur hållfastheten ändras på grund av splitterbelastningen med djupet i betongen.

Referens: Kapitel 4:4 i Dynamisk lastpåverkan, referensbok.

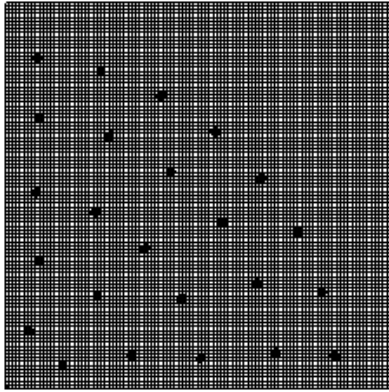


Till vänster i figuren visas ett itusågat tvärsnitt av ett av de betongblock som har beskjutits med splitter och där cylindrar har borrats ut för materialprovning. Prover togs ut på varierande höjd på betongblocken och markeras som gröna cirklar. Till höger visas resultat från spräckprov samt resultat från referensprover; spräckprov från utborrade prover från det splitterbelastade betongblocket användes för att jämföra med referensprover utborrade från ett obelastat betongblock.

Proverna visade att hållfastheten var opåverkad på ett avstånd som var drygt två gånger det maximala penetrationsdjupet för splittret, det vill säga 100 mm. För den nedre delen av betongblocket samt vid sidorna var hållfastheten dock lägre. Detta beror på en utstötnings-effekt som ger upphov till mikrosprickbildning nära den fria kanten. Närvaron av dessa mikrosprickor reducerar i sin tur betongens hållfasthet.

Referens: Kapitel 4:4 i Dynamisk lastpåverkan, referensbok.

Numerisk simulering av splitterbelastad betong



- Olinjär arbetskurva
- Tillståndsekvation
- Töjningshastighet

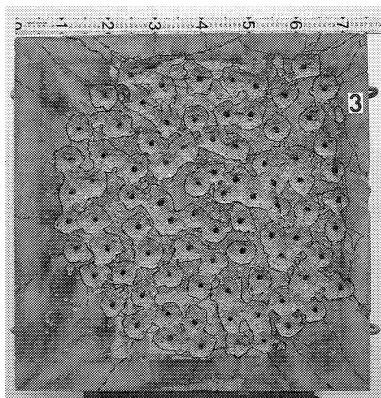
För att få en ökad förståelse av splitterbelastning och dess verkan i betong används numeriska metoder. Ett belastningsfall kan med hjälp av datorsimulering analyseras med datorkraft flera gånger och kan därmed användas för att minska och effektivisera det experimentella arbetet. Experiment är dock fortfarande en viktig och framförallt nödvändig del i kunskapsuppbyggandet för att validera de numeriska metoderna.

Betongens materialegenskaper förändras vid splitterbelastning. Det är mycket viktigt att detta beaktas vid numeriska analyser för att få en korrekt beskrivning av materialet. Det numeriska verktyget använt för betongen beaktar dess olinjära arbetskurva såväl i drag och tryck, inverkan av töjningshastighet, kompaktering av betong samt omslutningseffekter.

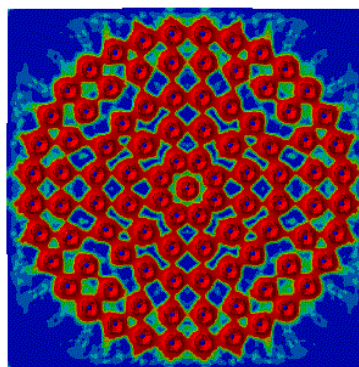
Referens: Kapitel 4:5 i Dynamisk lastpåverkan, referensbok.

Simulering av splitterbelastning - plan

Experiment



Simulering



I figuren jämförs experiment med resultat från en numerisk simulering. En splittersvärm har träffat ett betongblock med en hastighet på 1 650 m/s och orsakat kraterbildning på anslagsytan.

Till vänster i figuren visas ett foto från försök av betongblockets anslagsyta och till höger resultat från en numerisk analys. I analysen markerar rött förstörd betong medan blått innebär oskadad betong.

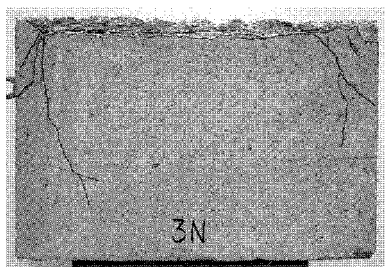
Analysen överensstämmer väl med utförda experiment. Kratrar som uppkommer av splittersanslaget överlappar med varandra, vilket väl fångas upp i analysen. Kraterstorleken är främst beroende på betongens draghållfasthet medan själva inträngningsdjupet främst styrs av betongens förmåga att motstå tryck.

Såväl drag- som tryckhållfastheten ökar av de höga töjningshastigheter som uppstår vid splittersanslaget. För tryckhållfastheten fås även ökad kapacitet på grund av de omslutningseffekter som uppstår vid splitters anslag.

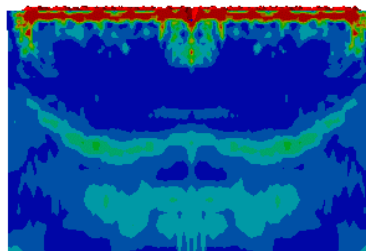
Referens: Kapitel 4:5 i Dynamisk lastpåverkan, referensbok.

Simulering av splitterbelastning - tvärsnitt

Experiment



Simulering

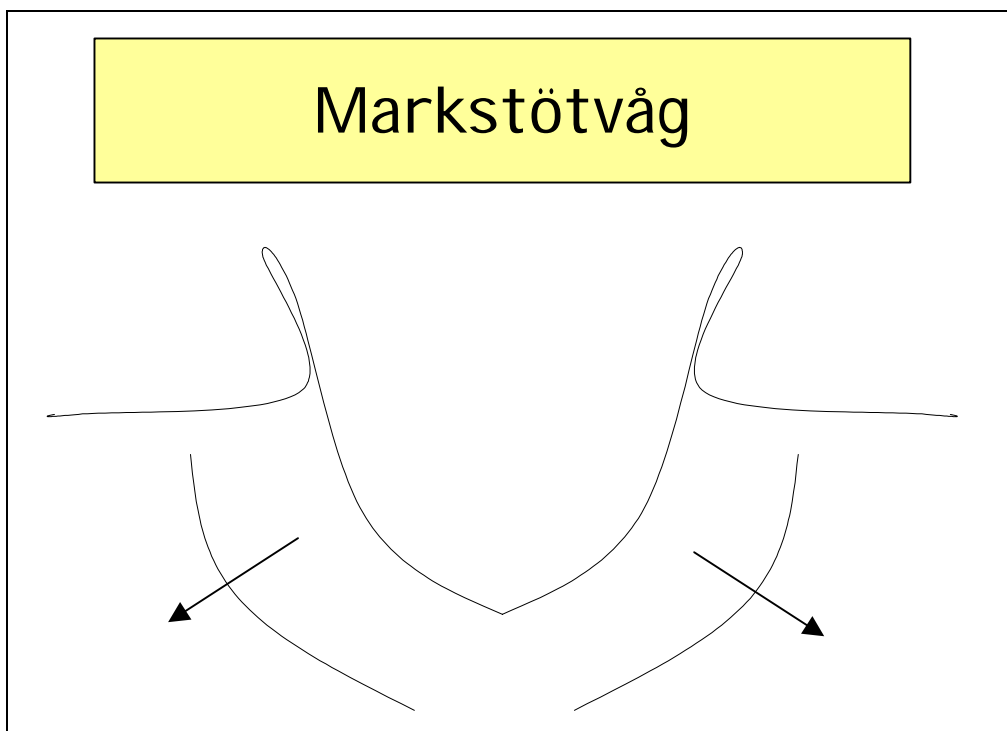


I figuren visas experiment och resultat från en numerisk analys sett i tvärsnitt av splitterbelastat betongblock. I analysen markerar rött förstörd betong, vilket motsvarar den kraterbildning som uppstår av splitterbelastningen. Mörkblått innebär oskadad betong och ljusblått område indikerar nedsatt hållfasthet i betongen.

Analysen ger att betongen är oskadad på ett avstånd om drygt två gånger det maximala penetrationsdjupet. Vidare uppstår skada vid ränderna på grund av den reflekterade stötvågen, vilket även detta fångas upp i analysen. Detta stöds av materialprover som utförts i samband med experimenten.

Detta visar att numeriska simuleringsverktyg är en kraftfull metodik för att ge en djupare förståelse för splitterbelastad betong. Dock är numeriska analyser tidskrävande med stort behov av kunskap om beräkningsverktyget samt förståelse för materialegenskaper vid dynamisk belastning för att uppnå tillförlitliga resultat.

Referens: Kapitel 4:5 i Dynamisk lastpåverkan, referensbok.



En markstöt våg bildas av att jordmaterialet accelereras av en yttre last, exempelvis orsakad av en detonerad sprängladdning som är helt eller delvis begrävd i jorden eller av en kraftig stöt. Vid fallet med laddning maximeras överföringen från laddningens frigörelse av energi till markstöt våg när laddningen är fullt nergrävd.

Markstöt vågens magnitud påverkas huvudsakligen av faktorer som energiinnehåll och snabbheten hos energifrigörelsen hos laddning, laddningens begravningsdjup, avståndet från laddningen till studerad punkt, jordmaterialens innehåll och sammansättning, och reflexioner med omgivande material.

Här förklaras hur markstöt våg uppkommer samt hur jordens sammansättning påverkar dess egenskaper. En allmän genomgång ges om hur markstöt vågens stöt vågsp parametrar kan bestämmas. Dessutom ges en introduktion till hur empiriska samband kan användas för att beräkna tryck och partikelhastighet som funktion av tid av markstöt vågen från en bomb som detonerar på ett visst avstånd. Därefter ges en överblick om hur Finita elementsimuleringar används för att beräkna verkan från markstöt vågen. Slutligen ges förslag på passivt skydd som skulle kunna användas för att minska markstöt vågens verkan för nergrävda skyddsrum.

Referens: Kapitel 5 i Dynamisk lastpåverkan, referensbok.

Vad är en markstöt våg?



En markstöt våg uppstår vanligtvis av att en explosion sker under markytan. Markstöt vågor uppstår även vid jordbävning, kraftfulla skred och liknande naturlaster. I denna framställning ligger fokus dock på kraftig markstöt våg.

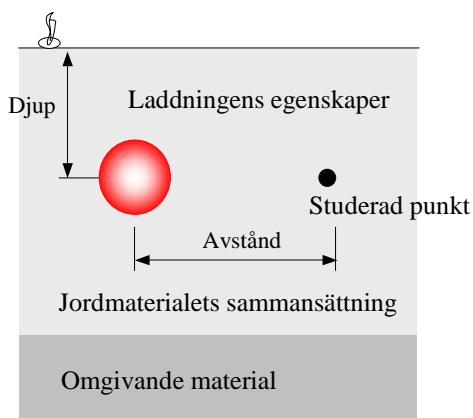
När laddningen detonerar så bildas spränggaser som har högt tryck och hög temperatur. Dessa spränggaser vill expandera för att nå samma jämviktstillstånd som omgivande material hade före detonationen. Expansionen leder till att en stötvåg bildas i det omgivande jordmaterialet. Detta komprimeras kraftigt och en stötvågsfront bildas mellan okomprimerat material framför och komprimerat material bakom fronten.

I figuren illustreras hur spränggaserna komprimerar omkringliggande media så att en stötvåg bildas. Stötvågsfronten utgör en tydlig diskontinuitet med avseende på tryck-, densitet-, och energitillstånd hos materialet. Alldeles efter stötvågsfronten inträder materialet i ett stötvågstillstånd som benämns Hugoniotillståndet. Därefter sker en avlastning av stötvågen som oftast kan beskrivas med en avtagande exponentialfunktion.

Referens: Kapitel 5.3 i Dynamisk lastpåverkan, referensbok.

Vilka faktorer påverkar markstötstången?

- Energiinnehåll och snabbhet av frigörelse hos laddning
- Laddningsdjup
- Avstånd
- Jordmaterialens innehåll och sammansättning
- Reflexioner mot omgivande material



Energiinnehållet ger en bild av storleksordningen av det arbete som kan utföras. Därutöver är det alltid hastigheten av frigörelsen som avgör den totala verkan som laddningen kan ha.

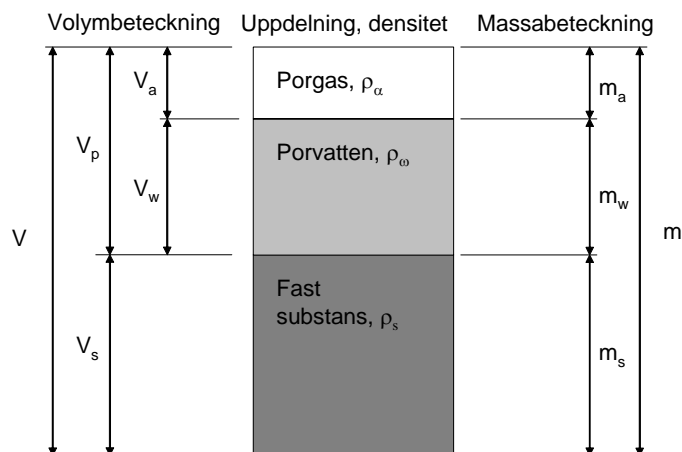
Laddningsdjupet påverkar direkt hur mycket energi som transmitteras ner i marken, vilket resulterar i en markstötstång. Resterande delen av energin ger upphov till luftstötstång ovan mark.

Avståndet till studerad punkt påverkar hur mycket av energin som hinner sprida sig till omgivningen. Energiutbredningen sker sfäriskt, varför ett kort avstånd ger stor energikoncentration och därmed stor lasteffekt.

Om ett jordmaterial absorberar mycket energi minskar styrkan snabbare hos den transmitterade stötstången så att en mindre farlig situation uppstår för den skyddande konstruktionen. Omvänt kan ett reflekterande material ge upphov till stötstångor som samverkar med varandra och kan därmed förvärra belastningsfallet.

Referens: Kapitel 5.3 i Dynamisk lastpåverkan, referensbok.

Jordmaterialet



Jordmaterialets uppbyggnad har inverkan på markstövågens utbredning. Figuren visar hur ett jordmaterial är uppbyggt av porgas, porvatten och den fasta substansen. Den totala volymen utgörs av fasta substansens volym V_s , porvolymen V_p , som i sin tur delas upp i porvattenvolym V_w och porgasvolym V_a . Porvolymen ger ett mått på hur mycket tomrum som finns i jordmaterialet. Tillsammans med den totala volymen ger detta materialets porositet, V_p/V , vilken är av betydelse för materialets stötvågsegenskaper.

Jordtyper består av partiklar som tillsammans formeras till ett skelett. Mellan kornen bildas hålrum, vilka antingen är fyllda av gas eller vatten eller både och. Jord är således sammansatt av både fasta partiklar, gasformiga delar, och vätskor.

Referens: Kapitel 5.5 i *Dynamisk lastpåverkan, referensbok*.

Jordmaterialets betydelse vid markstötståg

- **Den fasta substansen**
kornstorlek och hårdhet påverkar skjuvhållfasthet.
- **Porositet**
Hög porositet ger hög dämpning av markstötståg
- **Porvatten**
Mycket porvatten ger låg dämpning av markstötståg

Den fasta substansen, porositeten samt mängden porvatten i jordmaterialet är viktiga egenskaper som påverkar markstötstågens styrka och avtagande.

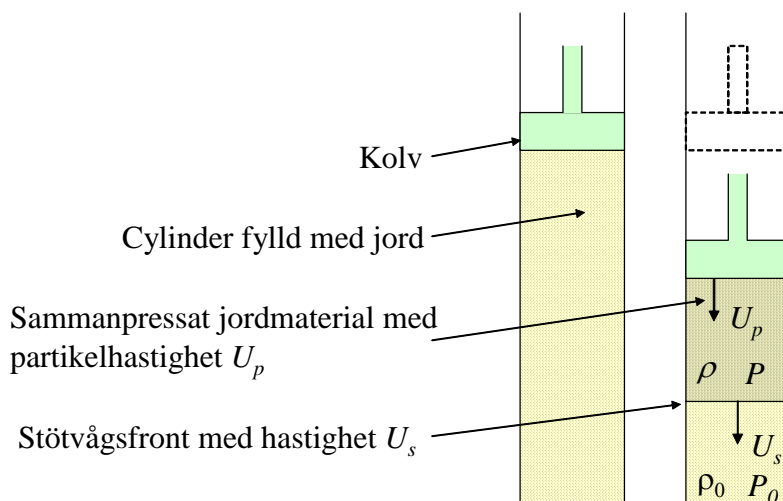
De fasta partiklarnas kornstorlek och hårdhet påverkar vilken skjuvbelastning jordmaterialet kommer att klara av. Om man tar jämförelsen lera och sand, vilka har en tydlig skillnad på kornstorlek, så klarar sanden högre skjuvbelastning i jämförelse med lera. I jordar med låg friktion, såsom lera, består markstötstågen därför huvudsakligen av en ren tryckståg utan någon större skjuvkomponent.

Låg porositet leder till att jordmaterialet har högre densitet och mindre energi går åt till att packa ihop materialet. För att få en starkt avtagande markstötståg är det därför önskvärt att ha hög porositet. Detta leder till att energi förbrukas när en framförande markstötståg packar ihop materialet.

Av störst betydelse är mängden porvatten, vilket ges av vattenmättnadsgraden. Om porerna i jordmaterialet är fyllda med vatten leder detta till, på grund av vattnets inkompressibla egenskaper, väldigt låg dämpning av den framrusande stötstågen.

Referens: Kapitel 5.53 i Dynamisk lastpåverkan, referensbok.

Markstötståsparametrar



Figuren illustrerar hur en kolv rör sig i en cylinder fylld med jordmaterial. Denna kolveffekt illustrerar en sprängladdning i mark. När kolven rör sig framåt med hastigheten U_p (partikelhastighet) komprimeras jorden framför kolven och en stötståsfront rusar framåt med hastigheten U_s (stötståshastighet). Observera att stötståshastigheten alltid är större än partikelhastigheten. Mellan kolven och stötståsfronten har det komprimerade jordmaterialet högre tryck och densitet. Detta område ökar med tiden.

För att analytiskt beskriva stötståsfenomenet används tre konserveringslagar, nämligen bevarande av massan, rörelsemängd och energi. Dessa lagar används, tillsammans med jordmaterialets tillståndsekvation, för att beräkna tryck, densitet, partikelhastighet, stötståshastighet och energi hos Hugoniotillståndet.

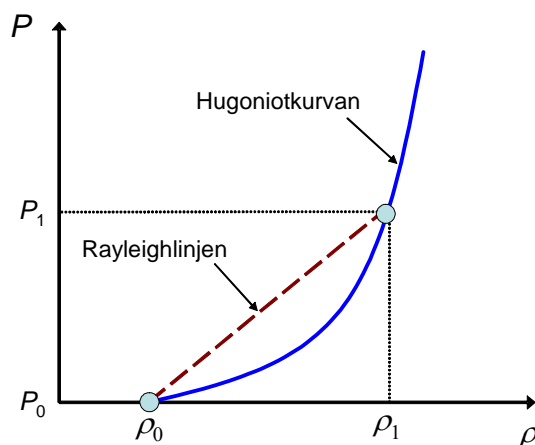
Hugoniotillståndet beskriver tillståndet hos det sammanpressade jordmaterialet i utrymmet mellan kolven och stötståsfronten.

Referens: Kapitel 3:21 i Dynamisk lastpåverkan, referensbok.

Stötvågshastigheter

$$U_s = V_0 \sqrt{\frac{P_1 - P_0}{V_0 - V_1}}$$

$$U_p = \sqrt{\frac{P_1 - P_0}{V_0 - V_1}}$$

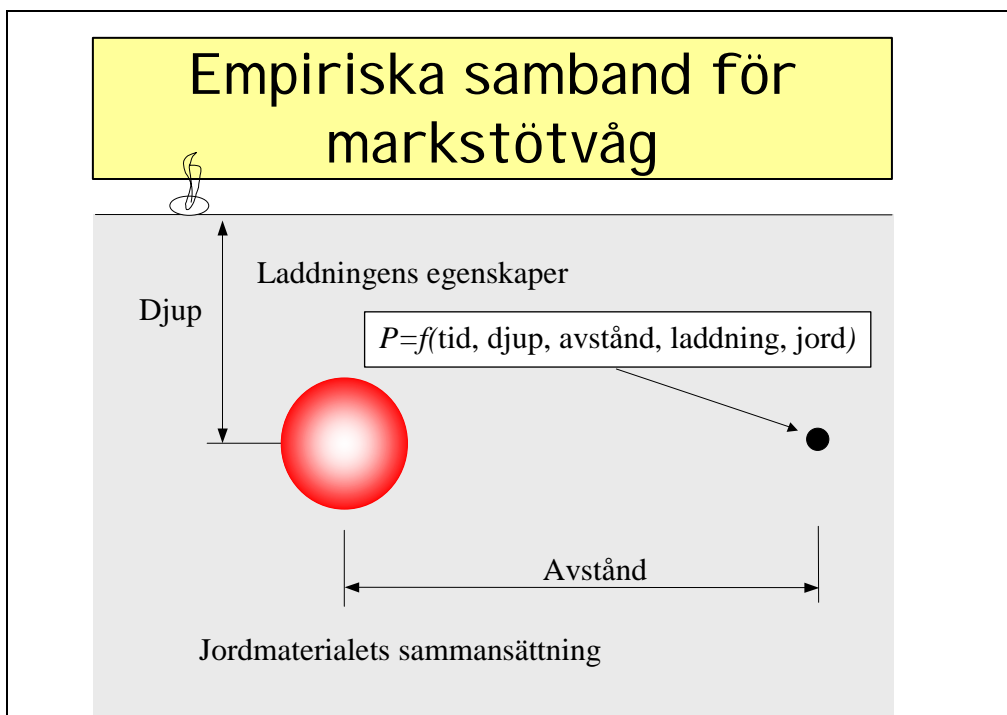


Figuren illustrerar tryck P som funktion av densitet ρ . Den blå linjen visar tillståndsekvationen (Hugoniotkurvan) för ett jordmaterial, vilket beskriver hur trycket i materialet ändras när densiteten höjs.

Vid långsam tryckökning P_0 till P_1 kommer ökningen av jordmaterialets densitet ρ_0 till ρ_1 följa den blå linjen. Vid stötvågsbelastning blir detta dock inte fallet. Istället sker ett hopp längs den rödstreckade linjen. Denna linje kallas för Rayleighlinjen och dess lutning är direkt proportionell till stötvågsfrontens hastighet U_s och partikelhastigheten U_p .

Detta innebär att för olika belastningsfall kan stötvågsfrontens hastighet U_s och partikelhastigheten U_p alltid bestämmas så länge tillståndsekvationen är känd. Dessa beräknas med hjälp av trycket P och den specifika densiteten $V=1/\rho$.

Referens: Kapitel 5.43 - 5.44 i Dynamisk lastpåverkan, referensbok.

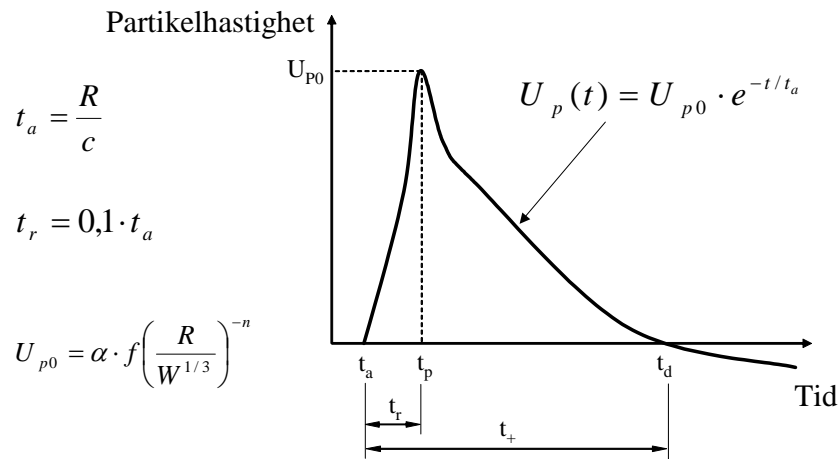


Det är komplext att utgående från laddningsdata och jordegenskaper exakt bestämma vilken lasteffekt som fås vid en explosion i mark. För att underlätta detta har empiriska samband tagits fram med hjälp av ett stort antal experiment. Detta har resulterat i ett övergripande och lättanvänt verktyg för att uppskatta vilka laster en markstöt våg ger upphov till.

Dessa empiriska samband är utformade så att de beskriver markstöt vågens tryck P som funktion av tid. Andra parametrar som påverkar det tryck som erhålles är laddningsdjup, avstånd mellan laddning och studerad punkt samt laddningens och jordens egenskaper. De ger en bild av belastningsfallet som kan förväntas om man känner till mängden sprängmedel som detonerar i det specifika jordmaterialet samt laddningsdjup och avstånd till mätpunkt.

Referens: Kapitel 5:6 i Dynamisk lastpåverkan, referensbok.

Uppskattning av partikelhastighet



Figuren illustrerar partikelhastigheten som funktion av tid t och avstånd R . Partikelhastighetens variation i tiden, bakom en oreflekterad stötvåg, illustreras schematiskt i figuren. Ankomsttiden t_a beskriver den tid det tar från detonationsögonblicket till dess att markstötvågen har nått fram till studerad punkt och bestäms approximativt som kvoten mellan avstånd R och seismisk jordhastighet c . Stigtiden t_r är den tid det tar för att uppnå maximal partikelhastighet U_{p0} och brukar uppskattas till en tiondel av ankomsttiden.

För att bestämma den maximala partikelhastigheten U_{p0} behövs laddningskonstanten α , jordmateriallets dämpningskoefficient n , fördämningsfaktorn f , avstånd R mellan laddning och studerad punkt samt laddningsvikten W uttryckt i ekvivalent mängd TNT. Dämpningskoefficienten beror på vilket jordmaterial som explosionen inträffar i medan fördämningsfaktorn beskriver hur stor andel av laddningens magnitud som förs ner i marken.

När maximal partikelhastighet U_{p0} har bestämts kan vi uttrycka hur partikelhastigheten U_p varierar som funktion av tiden med hjälp av en avtagande exponentialfunktion.

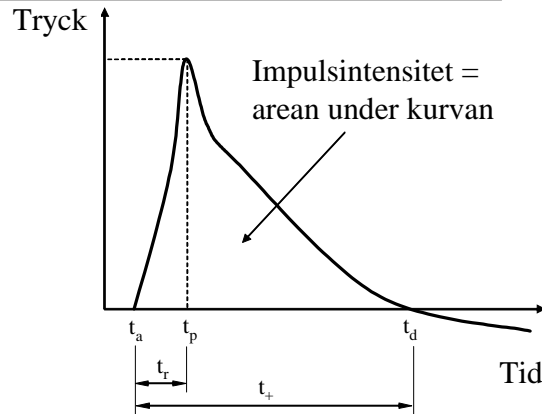
Referens: Kapitel 5:62 i Dynamisk lastpåverkan, referensbok.

Tryck som funktion av tid för markstötståg

$$U_p = U_{p0} \cdot e^{-t/t_a}$$

$$P(t) = \rho \cdot c \cdot U_p(t)$$

$$P(t) = \rho \cdot c \cdot \alpha \cdot f \cdot \left(\frac{R}{W^{1/3}} \right)^{-n} e^{-t/t_a}$$



Vid dimensionering av en stötstågsbelastad konstruktion är parametrar såsom tryck, varaktighet och impulsintensitet av intresse. Med vetskap om partikelhastigheten U_p kan trycket P som funktion av tid bestämmas. Vidare behövs information om jordmaterialets densitet ρ samt dess seismiska hastighet c såsom visas i ekvationerna i figuren.

För stötstågsbelastade konstruktioner är det inte tillräckligt med vetskap om den maximala trycknivån. Istället erfordras information om tryckvariation i tiden. Den samlade effekten av tryck-tidsvariation kan uttryckas som lastens impulsintensitet. Denna bestäms som arean under tryck-tidkurvan. Denna ger en bild av den totala lasten som en stötstågsbelastad konstruktion utsätts för.

Referens: Kapitel 5:62 i Dynamisk lastpåverkan, referensbok.

Jordmaterialegenskaper

Jordtyp	Densitet [kg/m ³]	Seismisk hastighet c [m/s]	Dämpningskoefficient n [-]
lös, torr sand med låg relativ densitet	1490	183	3,1
torr sand, och återfyllning	1630	305	2,75
tät sand, med hög relativ densitet	2030	488	2,5
våt sandig lera med > 4 % luftporer	1990	549	2,5
vattenmättad sandig lera med < 1 % luft	1920	1524	2,4
fullt vattenmättad lera	2030	1829	1,5

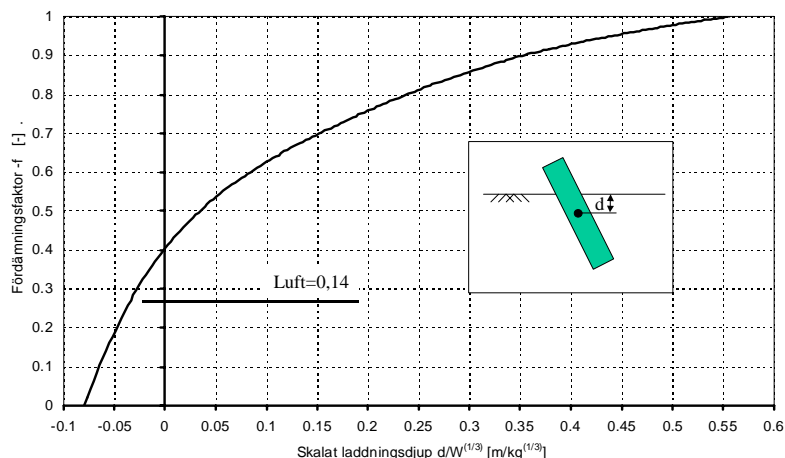
Vid uppskattning av partikelhastigheten och tryck i en stötvåg behövs information om densitet, seismisk jordhastighet och dämpningskoefficient. Jordmaterial med hög seismisk hastighet c innebär att markstötvågen propagerar snabbare samt att trycket i stötvågsfronten avtar långsammare med avståndet. Generellt gäller att hög densitet leder till hög seismisk hastighet.

Ett materials dämpningskoefficient beskriver materialets förmåga att absorbera energi där hög absorptionsförmåga representeras av en hög dämpningskoefficient. Generellt leder en ökad porvattenmängd i jorden till en lägre dämpning.

Tabellen i figuren visar densitet, seismisk hastighet, och dämpningskoefficient för olika jordmaterial. Exempelvis gäller för lös torr sand med låg relativ densitet att den seismiska hastigheten är 183 m/s och dämpningskoefficienten 3,1. Detta kan jämföras med motsvarande värden för fullt vattenmättad lera där seismiska hastigheten ökar med en faktor tio och dämpningskoefficienten halveras. Detta resulterar i att den fullt vattenmättade leran leder till ett mycket farligare lastfall i jämförelse med den lösa torra sanden.

Referens: Kapitel 5:62 i Dynamisk lastpåverkan, referensbok.

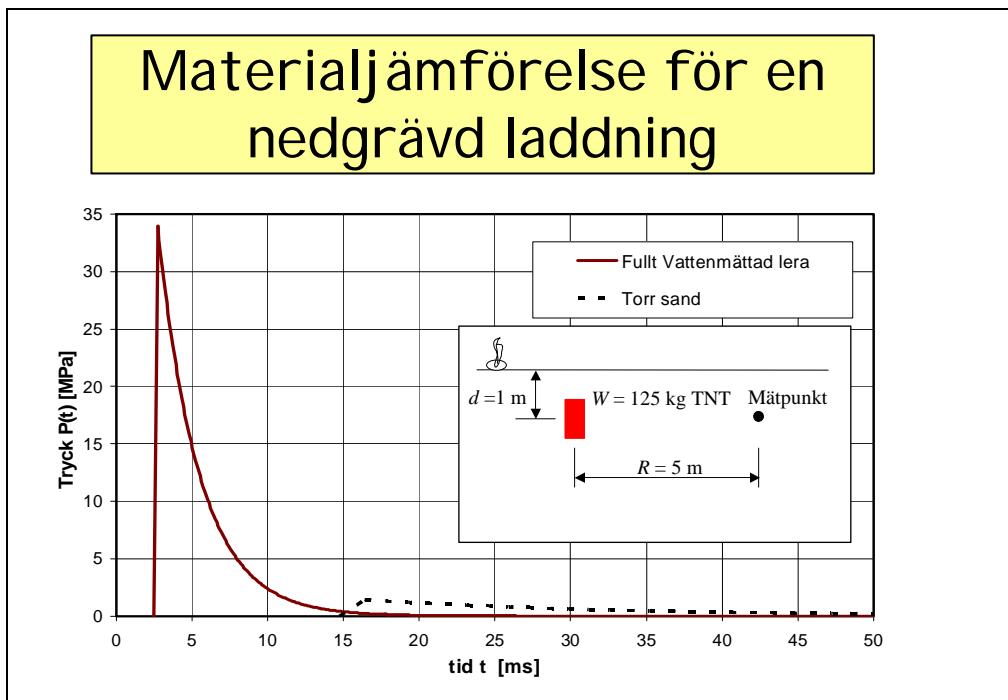
Fördämpningsfaktorn



Fördämpningsfaktorn f beskriver hur stor del av energin av en laddning som förs ned i marken och ger upphov till en markstöt våg. Detta är en viktig parameter för att bestämma partikelhastighet och trycknivå för markstöt vågen. En laddning placerad djupt ner i marken resulterar i en starkare markstöt våg än en laddning placerad närmare ytan. Detta beskrivs av fördämpningsfaktorn; ökat laddningsdjup ger ökad fördämpningsfaktor.

Figuren visar ett empiriskt samband för fördämpningsfaktorn f som funktion av skalat laddningsdjup $d/W^{1/3}$. Med skalat laddningsdjup beaktas effekten av laddningens storlek W . Exempelvis, om laddningen på 1 kg TNT detonerar på markytan ($d = 0$ m) ger kurvan att fördämpningsfaktorn $f = 0,4$. Om den däremot detonerar på djupet 0,55 m eller djupare fås $f = 1,0$, vilket betyder att hela den frigjorda laddningsenergin bidrar till markstöt vågen. Det skalade avståndet säger att en motsvarande laddning på 8 kg TNT på dubbla laddningsdjupet ger samma resultat. I figuren markeras att $f = 0,14$ för luft. Detta anger ett undre gränsvärde för fördämpningsfaktorn när laddningen detonerar ovan mark.

Referens: Kapitel 5:62 i *Dynamisk lastpåverkan, referensbok*.



För att illustrera användandet av befintliga empiriska samband för partikelhastighet och tryck utförs här ett numeriskt exempel.

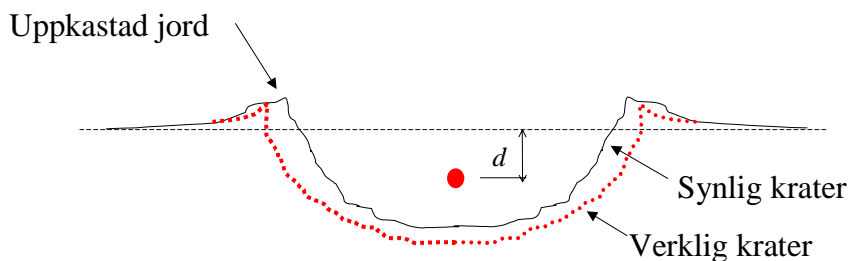
I figuren visas en laddning med vikten $W = 125$ kg TNT som antas explodera på djupet $d = 1$ m. Här studeras det oreflekterade trycket som funktion av tiden i en mätpunkt på avståndet $R = 5$ m från laddningen. Effekten av laddningen studeras för två olika jordmaterial – fullt vattenmättad lera och torr sand.

Det resulterande trycket P som funktion av tiden visas i figuren. Av detta kan konstateras att leran (brun heldragen linje) får en betydligt kortare ankomsttid och stigtid än vad som fås för den torra sanden. Vidare erhålls en hög trycklast, cirka 34 MPa, för leran. Sanden har ett mycket långsammare förlopp och är betydligt beskedligare med ett maximalt tryck på 1,4 MPa. Trycket är således cirka 23 gånger större i den fullt vattenmättade leran i jämförelse med den torra sanden. Motsvarande värden för impulsintensiteten (arean under kurvan) är 91 respektive 23 kPas, det vill säga omkring 4 gånger större för leran.

Detta exempel understryker jordmaterialets betydelse för markstötvågens utbredning.

Referens: Kapitel 5:63 i Dynamisk lastpåverkan, referensbok.

Kraterbildning



När en laddning, som inte är för djupt begraven, detonerar i marken bildas en krater. Denna består av en grop i marken där jord trängts undan och krönts av en vall av uppkastad jord. Själva kratern består av en synlig och en verklig del. Den verkliga kratern bildas av den jord som är undantryckt medan den synliga kratern är det som syns när uppkastad jord fallit tillbaka. Således är den verkliga kratern alltid större än den synliga kratern.

I figuren illustreras formen hos en krater där ursprunglig markyta är svartstreckad och synlig krater visas som heldragen svart linje. Den verkliga kratern är redovisad som röd punktlinje.

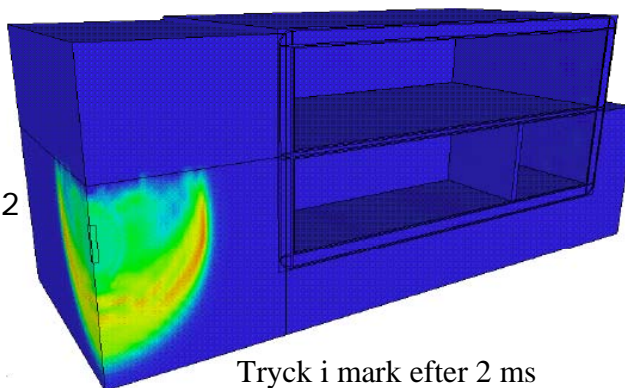
Kraterbildningen, dess form, och storlek påverkas av jordmaterial, laddningsdjup d , samt av typ, form och mängd laddning. För att få ett begrepp om jordmaterialets inverkan har kraterstorleken för en laddning om 125 kg TNT, nedgrävd 1,5 m, bestämts för torr sand och våt lera med hjälp av empiriska samband.

För torr sand blir den synliga diametern 6,4 m och det synliga djupet 2,2 m. För våt lera gäller 11,4 m respektive 4,4 m. Således en markant skillnad som erhålls på grund av lerans ogynnsamma material-egenskaper. Det verkliga djupet är cirka 0,1 m djupare.

Referens: Kapitel 5.64 i Dynamisk lastpåverkan, referensbok.

Finita elementsimulering

Räddningscentral
utsatt för mark-
stötvåg från MK82



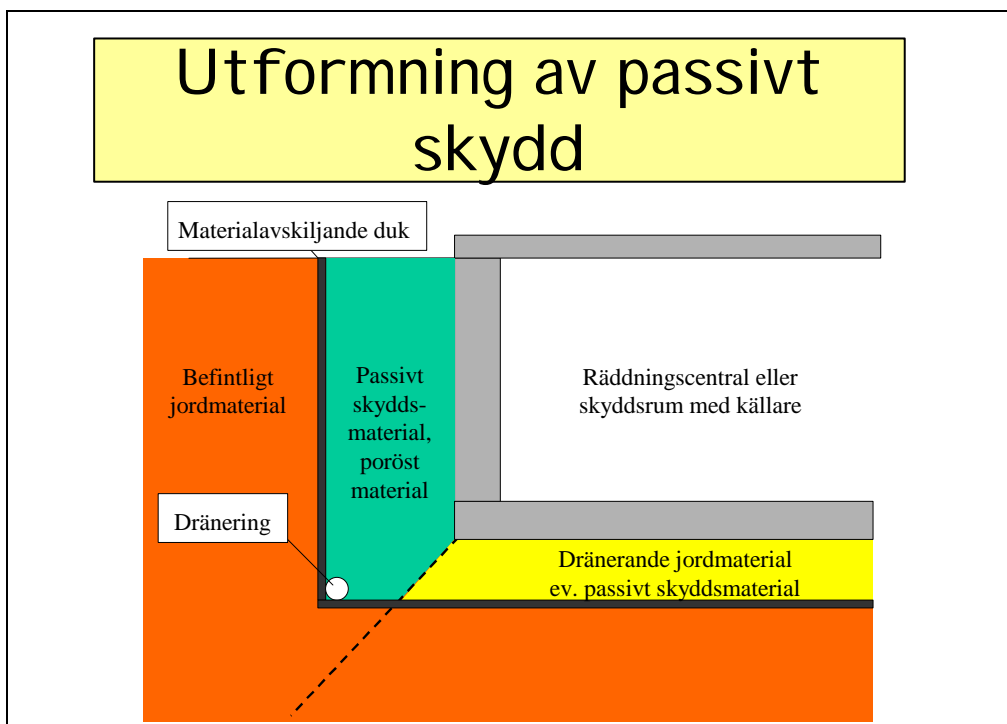
Tryck i mark efter 2 ms

Med empiriska samband är det möjligt att på ett enkelt sätt få en grov uppfattning om hur belastningen ser ut. Verkligheten är dock betydligt mer komplicerad, varför dylika samband kan vara otillräckliga.

Figuren visar en finita elementsimulering (FE) av en räddningscentral utsatt för markstötvåg från en laddning som kallas MK82. Denna laddning innehåller cirka 110 kg TNT och är nedgrävd 1,5 m. I figuren visas hur markstötvågen sprider sig i marken och vid tillfället nått halvvägs till den skyddande konstruktionen.

Ett försök att efterlikna verkligheten så mycket som möjligt är att simulera den med hjälp av FE-analyser. I sådana analyser återges geometrier som i en tredimensionell värld, där geometrierna delas in i ett finit antal element. I varje element beskrivs respektive materials egenskaper i minsta detalj. Detta gör det möjligt att i FE-analyserna fånga hur belastningen uppkommer från detonation till hur stötvågen propagerar genom olika medier, såsom jord och luft, samt hur den skyddande strukturen upplever belastningen. Dessa analyser är dock mycket tidskrävande att förbereda och simulera. Vidare kräver dylika verktyg en stor kunskap hos användaren varför FE-analyser inte är något för den ovane att utföra markstötvågsberäkningar med.

Referens: Kapitel 5:7 i Dynamisk lastpåverkan, referensbok.



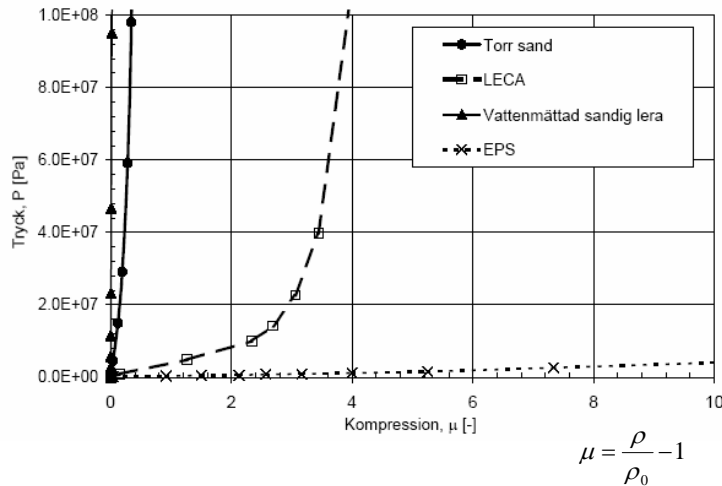
För att skydda en nedgrävd konstruktion kan passiva skydd utformas. Det enklaste sättet att utforma ett passivt markskydd är att anlägga ett vertikalt materialskikt i marken intill den skyddade konstruktionen, ett så kallat skyddsskikt. Detta skydd kommer då att absorbera energin från markstövågen och minimerar skadan på byggnadskonstruktionen.

Lämpliga material för skyddsskiktet är ett poröst material som inte har vattenfyllda utrymmen i porerna. Det är viktigt att det porösa materialet inte är för enkelt att komprimera eftersom dess energiabsorption då påverkas negativt.

Figuren visar en schematisk skiss över hur det passiva skyddet kan utformas för en räddningscentral eller skyddsrum med källare. Intill utsida källarvägg ersätts befintligt jordmaterial med passivt skyddsmaterial. Mellan befintligt jordmaterial och det passiva skyddsskiktet bör man använda en materialavskiljande duk för att undvika blandning av de olika materialen. För att säkerställa funktionen hos det passiva skyddet är det även viktigt att skyddsskiktet hålls torrt, varför god dränering är en förutsättning.

Referens: Kapitel 5:81 i Dynamisk lastpåverkan, referensbok.

Jämförelse av materialegenskaper för olika material

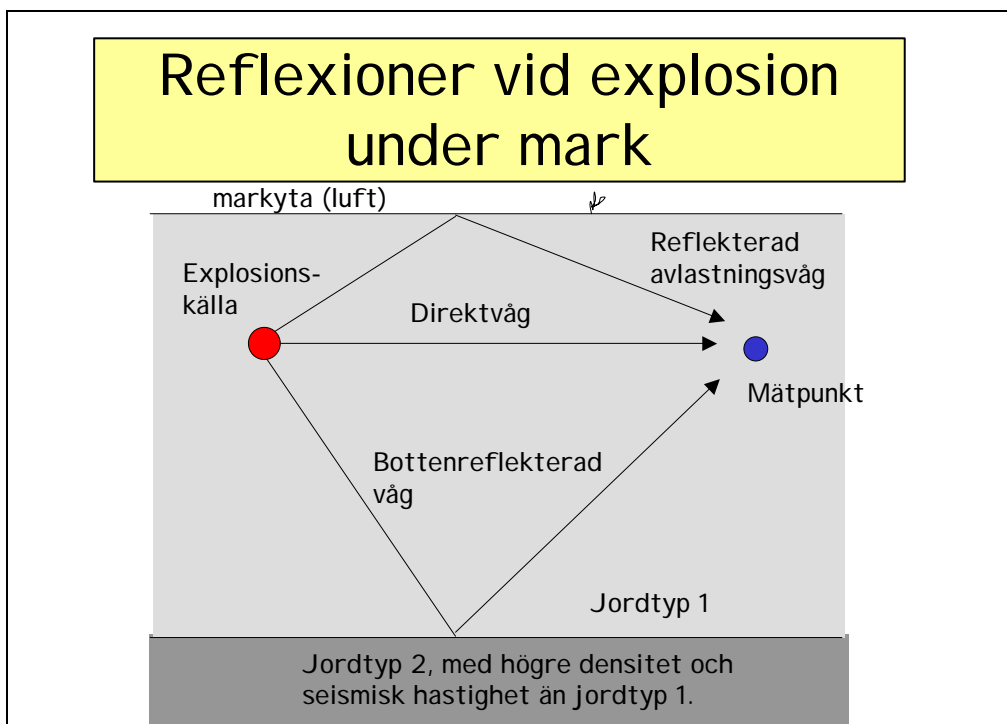


Figuren visar tryck P som funktion av kompression μ för vattenmättad sandig lera, torr sand, LECA och expanderad polystyren (EPS). Kompression definieras som aktuell densitet dividerat med initiell densitet minus ett. Arealen under tryck-kompressionskurvan kan ses som volymetrisk energiabsorption för aktuellt material.

Som figuren visar är vattenmättade jordar (fyllda trianglar) nästan helt inkompressibla vid trycknivåer under 100 MPa. Den torra sanden (fyllda cirklar) är mer kompressibel på grund av att kornen och luftporerna lättare kan packas samman och därmed kan en större del volymetrisk energi absorberas i den torra sanden än lera. Det andra extrema materialet är EPS (kryss), vilket betar sig väldigt mjukt och absorberar väldigt lite volymetrisk energi även vid stora kompressioner. Detta kan visa sig vara ett ogynnsamt material att använda om bomben briserar i eller strax intill EPS:en, eftersom detta kan resultera i ett ogynnsamt scenario såsom en fördämd explosion i luft.

LECA (ofyllda kvadrater) absorberar irreversibelt stora mängder energi när LECA-kulorna krossas, både under ren kompression men också under skjuvdeformation. Av figuren framgår att LECA placerar sig mellan ytterligheterna lera och EPS. Den absorberar mycket mer energi än jordmaterialen med hänsyn till ett visst tryck. Därmed är LECA ett lämpligt material för det passiva skyddet.

Referens: Kapitel 5:81 i Dynamisk lastpåverkan, referensbok.

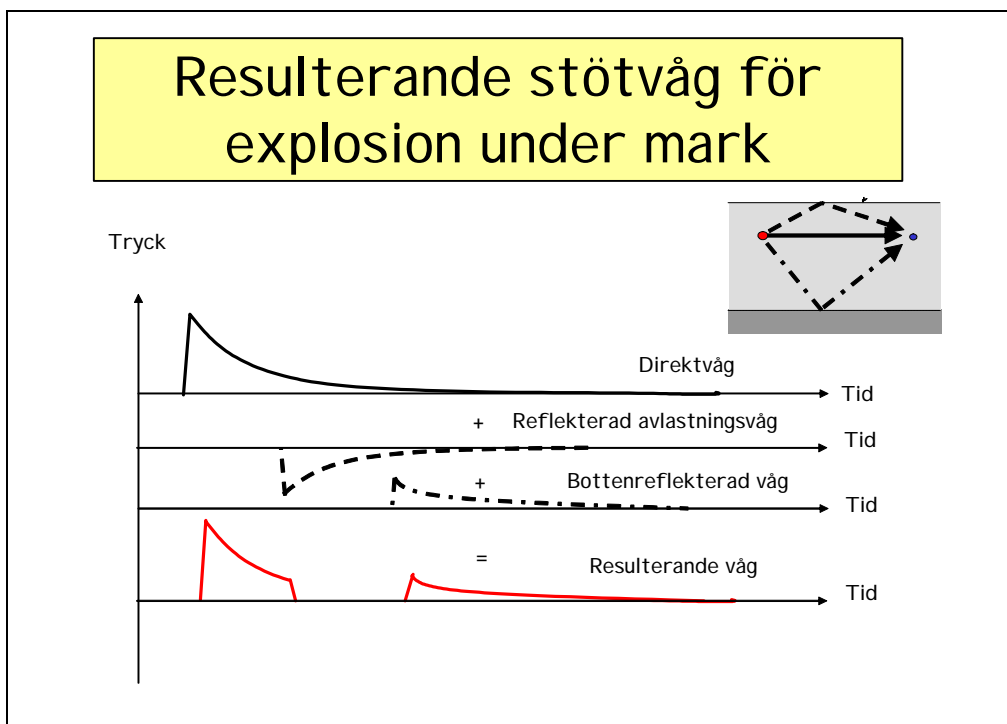


En explosion under mark kan, på grund av reflexioner som samverkar, ge upphov till en mer komplex lastbild. Denna lastbild kan principiellt delas upp i tre delar: direktvåg, bottenreflekterad våg samt reflekterad avlastningsvåg. Direktvågen är den primära stötvågen som representerar det oreflekterade fallet. Den bottenreflekterade vågen uppstår i gränsytan mellan två jordtyper och är normalt en tryckvåg som förstärker direktvågen. Den reflekterade avlastningsvågen uppstår när direktvågen når markytan.

Figuren visar att när trycket mäts i en specifik mätpunkt (blå punkt), så är det summan av flera tryckvågor som faktiskt mäts. Om inga reflexioner sker så är det endast direktvågen som kommer fram till mätpunkten. Är mätpunkten och laddningen nära markytan uppstår en reflekterande avlastningsvåg som faktiskt reducerar direktvågens verkan.

En tredje våg som kan komma i fråga är den bottenreflekterande vågen från ett djupare materiallager med högre densitet och seismisk hastighet. Exempel på sådana lager är berg eller där grundvattennivån befinner sig. Alla dessa tre möjliga reflexioner bidrar till den resulterande vågens utseende.

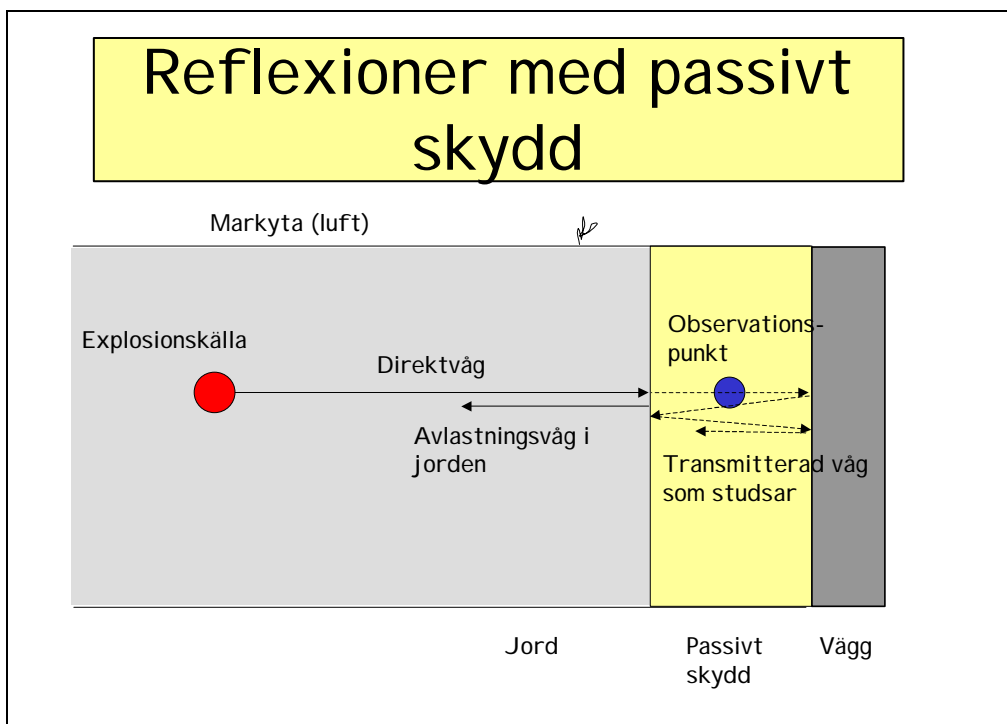
Referens: Kapitel 5:81 i Dynamisk lastpåverkan, referensbok.



Figuren visas en schematisk bild av tryck-tidssambanden för inkommande vågor i en mät punkt för en explosion under mark. Vid mät punkten superponeras den resulterande vågen av tre inkommande vågor: direktvågen (heldragen linje), den reflekterade avlastningsvågen (streckad linje) och den bottenreflekerade vågen (punktstreckad linje). Det mätta trycket (röd linje) är summan av alla reflekterade vågor samt direktvågen.

Direktvågen når alltid fram först till mät punkten. Därefter följer reflekterad avlastningsvåg eller bottenreflekerad våg, beroende på stötvågens färdsträcka. Om direktvågen summeras med reflekterad avlastningsvåg reduceras trycket under en viss tid. Däremot ger en summering av direktvågen och den bottenreflekerade vågen en ökning av trycket. I figuren bidrar dock alla tre till en resulterande våg.

Referens: Kapitel 5:81 i Dynamisk lastpåverkan, referensbok.



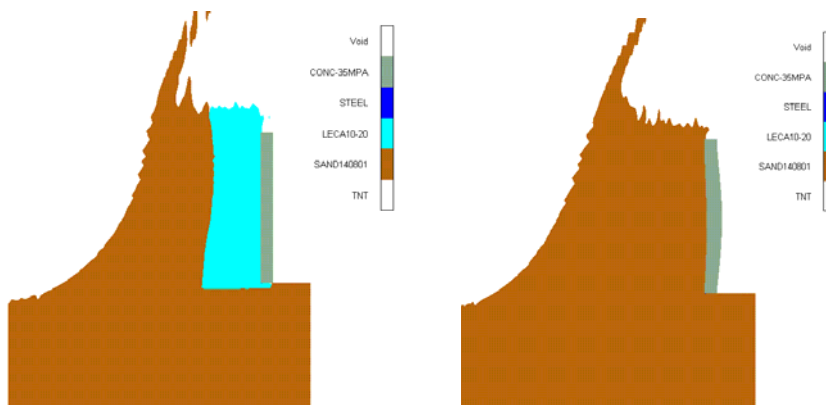
Om vi har ett passivt skydd med hög porositet (låg densitet, låg seismisk hastighet) intill en skydds konstruktion kommer det bildas reflekterande vågor när den infallande stötvågen når fram till gränsskiktet. Figuren visar hur en explosion sker utanför det passiva skyddet. När direktvågen når fram till det passiva skyddet kommer denna delas upp i en avlastningsvåg samt en transmitterad våg.

Avlastningsvågen reflekteras tillbaka mot laddningen och reducerar därmed den inkommande direktvågen. Den transmitterade vågen som går in i det porösa passiva skyddet har lägre tryck än den ursprungliga direktvågen i jorden.

Den transmitterade tryckvågen i det passiva skyddet förlorar mycket energi och därmed minskar den energimängd som slutligen når fram till väggen och förmår göra mindre skada på konstruktionen. Emellertid kommer nu den transmitterade tryckvågen studsas mellan befintligt jordskikt och vägg, vilket kan leda till något ökad tryckbelastning. Den energiabsorberande effekten övervinner dock denna negativa effekt.

Referens: Kapitel 5:81 i Dynamisk lastpåverkan, referensbok.

Finita elementsimulering av passivt skydd



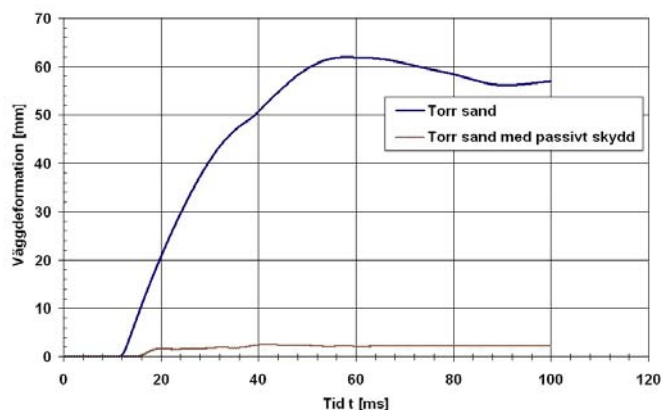
250 mm armerad betongvägg, torr sand
med och utan 1,25 m LECA

För att analysera effekten av ett passivt skydd har finita elementanalyser genomförts. Figuren visar två fall: en 250 mm armerad betongvägg (grått) med och utan passivt skydd. Det passiva skyddet består av 1,25 m LECA (turkos färg) i direkt anslutning till väggen. Laddningsmängden var 125 kg TNT placerad 5 m från väggen och 1,5 m under markytan i torr sand (brunt).

Figuren visar deformation och kraterbildning från simuleringarna vid tiden 100 ms efter detonation. Simuleringarna visar att väggen deformeras mer utan det passiva skyddet. En annan positiv effekt är att det passiva skyddet lätt deformeras vertikalt uppåt vid kraterbildningen. Därmed tas mer energi upp av det passiva skyddet, vilket annars hade varit väggens uppgift.

Referens: Kapitel 5:82 i Dynamisk lastpåverkan, referensbok.

Jämförelse av utböjning hos källarvägg



250 mm armerad betongvägg, torr sand med och utan 1,25 m LECA

Finita elementanalyser har utförts för att simulera inverkan av passivt skydd framför en stötvågsbelastad 250 mm tjock armerad betongvägg under mark. Markstötvågen orsakades av 125 kg TNT som detonerade 5 m från väggen och 1,5 m under markytan.

Figuren visar ytterväggens mittdeformation i millimeter som funktion av tiden i millisekunder för två fall: med och utan passivt skydd. Det passiva skyddet bestod av 1,25 m LECA i direkt anslutning till väggen.

Den blå linjen visar vägg utan passivt skydd och den bruna linjen med passivt skydd. Beräkningarna visar att den maximala deformationen för väggen minskade med 96 % och maxhastigheten hos väggen minskade med 79 % när passivt skydd användes.

Referens: Kapitel 5:82 i *Dynamisk lastpåverkan*, referensbok.

Slutsatser kring passivt skydd

LECA är ett bra material för passivt skydd:

- LECA absorberar mycket volymetrisk energi
- Inkommande stötvåg i jord delas upp i en avlastningsvåg och en transmitterad våg
- Stora deformationer tas upp av LECA vid kraterbildning

En kombination av teoretiska studier, experiment, samt finita elementsimuleringar har visat att LECA är ett bra material för passivt skydd mot markstötvågor.

LECA absorberar mycket volymetrisk energi när LECA-kulorna börjar krossas, vilket sker redan vid relativt låga trycknivåer. Energiabsorptionen är god upp till de tryckintervall som kan förväntas vid den här antagna typen av hot.

När en direktvåg i jorden når fram till det passiva skyddet bestående av LECA bildas en reflekterande avlastningsvåg i gränsskiktet mellan jorden och LECA-materialet. Detta reducerar den bildade tryckfördämningen i jorden som uppstår på grund av impedansskillnader mellan jord och LECA. Dessutom minskar magnituden på den transmitterade tryckvågen genom det passiva skyddet eftersom LECA har lägre impedans.

Vid explosion under mark kommer den resulterande markstötvågen trycka ihop LECA-materialet så att detta pressas upp vertikalt framför den skyddande konstruktionen. Därmed lättar trycket mot den bakomliggande skyddande konstruktionen.

Referens: Kapitel 5:83 i Dynamisk lastpåverkan, referensbok.