

ANDERS TJERNBERG



FOI är en huvudsakligen uppdragsfinansierad myndighet under Försvarsdepartementet. Kärnverksamheten är forskning, metod- och teknikutveckling till nytta för försvar och säkerhet. Organisationen har cirka 1350 anställda varav ungefär 950 är forskare. Detta gör organisationen till Sveriges största forskningsinstitut. FOI ger kunderna tillgång till ledande expertis inom ett stort antal tillämpningsområden såsom säkerhetspolitiska studier och analyser inom försvar och säkerhet, bedömningen av olika typer av hot, system för ledning och hantering av kriser, skydd mot hantering av farliga ämnen, IT-säkerhet och nya sensorers möjligheter.

Anders Tjernberg

Simulering av avlänkning av stötvågor från
tryckverkande minor
– avlänkning mot stela ytor

Utgivare FOI - Totalförsvarets forskningsinstitut Vapen och skydd 147 25 Tumba	Rapportnummer, ISRN FOI-R--1913--SE	Klassificering Teknisk rapport
	Forskningsområde 5. Bekämpning och skydd	
	Månad, år Januari 2006	Projektnummer E2036
	Delområde 51 VVS med styrda vapen	
	Delområde 2	
Författare/redaktör Anders Tjernberg	Projektledare Bo Johansson	
	Godkänd av Patrik Lundberg	
	Uppdragsgivare/kundbeteckning Försvarsmakten	
	Tekniskt och/eller vetenskapligt ansvarig	
Rapportens titel Simulering av avlänkning av stötvågor från tryckverkande minor – avlänkning mot stela ytor		
Sammanfattning <p>De simuleringar som utförts visar att avlänkning av stötvågor från mindetonationer är en effektiv skydds metod. För en v-formad bottenplåt med vinkeln 45° mot horisontalplanet kan till exempel den vertikala impulsen på fordonet minska med ca 62 % jämfört med en plan bottenplåt. Detta gäller under förutsättning att bottenplåten är tillräckligt tjock för att inte stora deformationer skall inträffa. Vidare visar simuleringarna att den maximala vertikala kraften på fordonet minskar ca 69 %. Detta ger även motsvarande minskning av fordonets globala maximala acceleration. Ett annat sätt att uttrycka saken är att ett fordon med v-formad bottenplåt med vinkeln 45° kan klara ca 3 gånger större laddningsvikt än ett med en plan bottenplåt, det vill säga impulsen är ungefär lika i dessa två fall. Nackdelen med en v-formad bottenplåt är att fordonets höjd ökar kraftigt och att utrymmet i den nedre delen av fordonet kan vara svårt att utnyttja. Simuleringar är även gjorda med plåtvinkeln 22.5°.</p> <p>Simuleringarna har visat att laddningens form eller placering inte har någon avgörande inverkan på möjligheten till avlänkning. För en osymmetriskt placerad laddning är till exempel minskningen av impulsen (avlänkningen) nästan lika stor som för en symmetriskt placerad laddning. Vidare har simuleringarna visat att om laddningen är nedgrävd eller ligger på marken så har inte heller detta någon större betydelse för möjligheten till avlänkning.</p> <p>De jämförelser som gjorts mellan simuleringar och analytiska beräkningar, baserade på empiriska experimentella samband, har visat på bra överensstämmelse.</p>		
Nyckelord Avlänkning, stötvågor, impuls, Autodyn, minor		
Övriga bibliografiska uppgifter	Språk Svenska	
ISSN 1650-1942	Antal sidor: 24 s.	
Distribution enligt missiv	Pris: Enligt prislista	

Issuing organization FOI – Swedish Defence Research Agency Weapons and Protection SE-147 25 Tumba	Report number, ISRN FOI-R--1913--SE	Report type Technical report
	Programme Areas 5. Strike and protection	
	Month year January 2006	Project no. E2036
	Subcategories 51 Weapons and Protection	
	Subcategories 2	
Author/s (editor/s) Anders Tjernberg	Project manager Bo Johansson	
	Approved by Patrik Lundberg	
	Sponsoring agency Swedish Armed Forces	
	Scientifically and technically responsible	
Report title (In translation) Simulation of mine blast deflection - deflection from rigid surfaces		
Abstract <p>The simulations show that blast deflection from mines is an effective protection method. For a v-shaped bottom plate, with the angle 45° to the horizontal plane, the vertical impulse can be decreased by about 62 %. This is valid under the condition that the bottom plate is so thick that no large deformation occurs. Further, the simulations show that the maximum vertical force on the vehicle can be decreased by about 69 %. This will give correspondingly decrease of the global acceleration of the vehicle. Another way to express this is that a v-shaped bottom plate with the angle 45° can withstand about 3 times as much explosive weight as a flat bottom plate, that is to say the impulse is equal in the two cases. The disadvantage is that a v-shaped bottom plate will increase the height of the vehicle and the space in the lower part of the vehicle can be difficult to make use of. Simulations have also been made with the plate angle 22.5°.</p> <p>Simulations have shown that the shape or placement of the explosive do not have any large influence on the possibility to blast deflection. For an unsymmetrically placed explosive the decrease of the impulse is almost as large as for a symmetrically placed explosive. Further, the simulations have shown that if the explosive is buried or placed on the ground does not have any large influence on the possibility to deflect blast.</p> <p>Comparisons between simulations and analytical calculations, based on empirical experimental relationships, have shown good agreement.</p>		
Keywords Blast, deflection, impulse, Autodyn, mines		
Further bibliographic information	Language Swedish	
ISSN 1650-1942	Pages 24 p.	
	Price acc. to pricelist	

Innehållsförteckning

1 INLEDNING	6
2 MODELLBESKRIVNING.....	7
3 RESULTAT	10
3.1 HALVSFÄRISK LADDNING, 3D-MODELL.....	10
3.2 PLATT LADDNING, 3D-MODELL	12
3.3 PLATT LADDNING, NEDGRÄVD, 2D-MODELL	14
3.4 ANALYTISKA BERÄKNINGAR	15
3.5 JÄMFÖRELSER MELLAN SIMULERINGAR OCH ANALYTISKA BERÄKNINGAR	19
4 DISKUSSION OCH SLUTSATSER	21
REFERENSER.....	22
BILAGA 1.....	23
BILAGA 2.....	24

1 Inledning

Avlänkning är en skyddsprincip som används för att minska verkan av stötvågor från exempelvis mindetonationer. När det gäller fordon innebär detta att risken för skador på besättning eller känslig utrustning kan minskas. Avlänkning innebär att bottenpansaret utformas så att stötvågen avlänkas ut åt sidorna. Detta medför i sin tur att den vertikala impulsen och den maximala vertikala kraften på fordonet minskar. En följd av detta är att såväl den globala accelerationen av fordonet som den lokala accelerationen av bottenplåten minskar.

I rapporten beskrivs ett antal olika simuleringar utförda med AUTODYN v6.1. Avsikten var att undersöka hur den vertikala impulsen på bottenplåten kan minskas. I de fall som undersökts har impulsen av luftstötvågen mot v-formade och cylindriska ”stela” plåtar studerats. Att plåtarna förutsätts stela innebär ingen allvarlig begränsning, eftersom de i princip kan anses stela om de inte blir utsatta för en så stor belastning att de erhåller stora plastiska deformationer. De små deformationer som uppkommer vid små elastiska eller plastiska töjningar kan anses ha försumbar inverkan på möjligheten till avlänkning. Även om AUTODYN kan beräkna den totala impulsen på en plåt som deformerats kraftigt har detta inte studerats eftersom rapporten behandlar avlänkning ur ett mer principiellt perspektiv. I princip bör det vara praktiskt möjligt att dimensionera bottenplåten så att inte stora plastiska deformationer uppstår; detta gäller under förutsättning att en effektiv avlänkning av stötvågen kan uppnås.

Avlänkning har tidigare studerats med approximativa beräkningar och redovisats i en FOI-rapport [1]. I rapporten visades hur mycket den globala vertikala impulsen minskar när bottenplåten har en v-form respektive en cylindrisk form jämfört med en plan plåt.

I en litteraturgenomgång av öppna källor som gjorts har det inte gått att finna någon systematisk beskrivning av vilka resultat som kan uppnås genom avlänkning. Avlänkning tillämpas dock praktiskt för en del stridsfordon.

I denna undersökning har studerats om det finns någon skillnad när gäller möjligheten till avlänkning av stötvågen från en halvsfärisk respektive en platt laddning liggande på ett stelt underlag. Halvsfäriska laddningar används vanligen inte i minor men har här simulerats då jämförelse kan göras med analytiska överslagberäkningar. Dessa beräkningar är baserade på empiriska ekvationer som bygger på experimentella mätningar av den reflekterade impulsintensiteten (impuls per ytenhet). Vidare har möjligheten till avlänkning studerats om laddningen är osymmetrisk placerad i förhållande till fordonets centrumlinje. Dessutom har en laddning nedgrävd i sand studerats. När det gäller nedgrävda laddningar har det inte varit möjligt att studera dessa med en 3D-modell. Anledningen är att simuleringarna inte har kunnat slutföras eftersom tidsstegen minskat alltför kraftigt; orsaken till detta är för närvarande oklar. Nedgrävda laddningar har därför endast simulerats med en 2D-modell, vilket innebär att avlänkning för en stötvåg mot en konformad yta studerats istället för mot en v-formad bottenplåt.

2 Modellbeskrivning

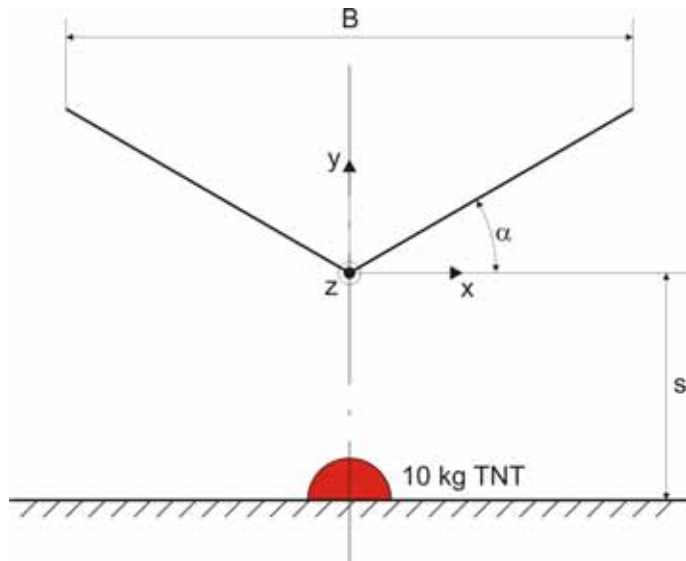
Alla simuleringar har utförts med en laddning av 10 kg trotyl (TNT), vilket ungefär motsvarar en stridsvagnsmina. Materialparametrar för TNT har hämtats från AUTODYN:s materialbibliotek och dessa är redovisade i Bilaga 1 och har sitt ursprung i [2]. I Bilaga 1 visas även materialparametrar för luft.

En halvsfärisk (radie=143 mm) respektive en platt laddning har använts i simuleringarna. I de fall när en platt laddning har använts är kvoten mellan diametern ($D=286$ mm) och höjden ($H=95$ mm) lika med 3.0. Laddningarna är placerad direkt mot en stel ”markyta” och avståndet mellan bottenplåtens lägsta punkt och det stela underlaget är 500 mm i samtliga fall (dvs. markfrigång 500 mm). I alla simuleringar utom en är laddningen placerad symmetriskt under bottenplåten, i ett senare fall är en platt laddning sidoförskjuten 250 mm från bottenplåtens mittlinje. Avsikten är att studera om möjligheterna till avlänkning är sämre om laddningen är förskjuten i sidled.

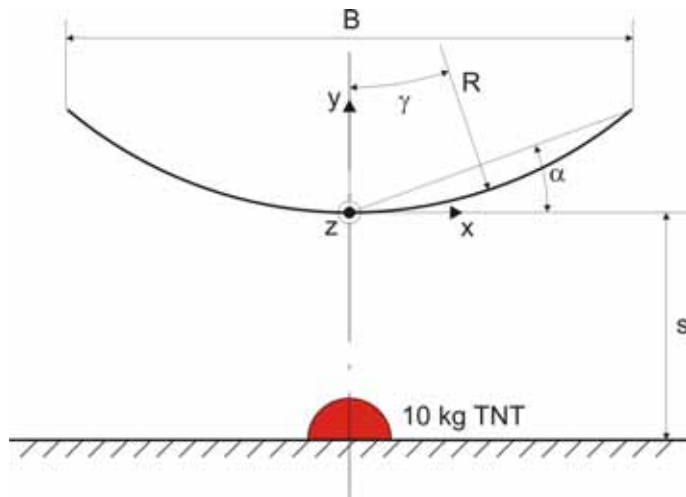
För att studera stötvågens växelverkan med en bottenplåt krävs en 3D-simulering. Detta innebär att relativt stora celler måste användas för att undvika långa simuleringstider. Stora celler medför att noggrannheten försämras. Tidigare erfarenheter (ej rapporterade resultat) av simuleringar mot plana plåtar är att den totala reflekterade impulsen inte påverkas särskilt mycket av cellstorleken. Däremot gäller att den reflekterade impulsintensiteten direkt ovanför laddningen är starkt beroende av cellstorleken. Erfarenhetsmässigt gäller att impulsintensiteten direkt ovanför laddningen ökar ju mindre celler som används upp till en viss gräns (konvergens förutsätts). När det gäller att simulera utböjningen och plastiska töjningar av plåtar som utsätts för en stötvåg är det viktigt med små celler nära laddningens centrumaxel eftersom impulsintensiteten direkt ovanför laddningen är viktig. Förutsätts det istället att plåten är stel som i de simuleringar som utförts i denna rapport är det däremot inte lika viktigt med små celler nära plåten eftersom det huvudsakligen är den totala impulsen på bottenplåten som är av intresse. Däremot är det viktigt med små celler i och runt laddningen. I rapporten redovisas impulsintensiteten direkt ovanför laddningen men denna är som tidigare påpekats inget exakt värde eftersom den beror relativt kraftigt av cellstorleken.

För att inte få en alltför stor modell görs simuleringarna med en bottenplåt som är 2 m bred och endast 2 m lång. Vidare utnyttjas de två symmetriplanen så att endast $\frac{1}{4}$ -del modelleras (för sidoförskjuten laddning finns endast ett symmetriplan). De värden i rapporten som anges för den totala impulsen och den maximala totala kraften har multiplicerats med fyra (respektive två) så att dessa gäller för en hel modell.

Simuleringar har gjorts för dels en plan bottenplåt ($\alpha=0$) och dels v-formade plåtar med vinkeln α 22.5° och 45°, se Figur 1. Simuleringar har även gjorts för cylindriska bottenplåtar med samma vinklar α , se Figur 2, motsvarande krökningsradien 1.41 m respektive 1.0 m.



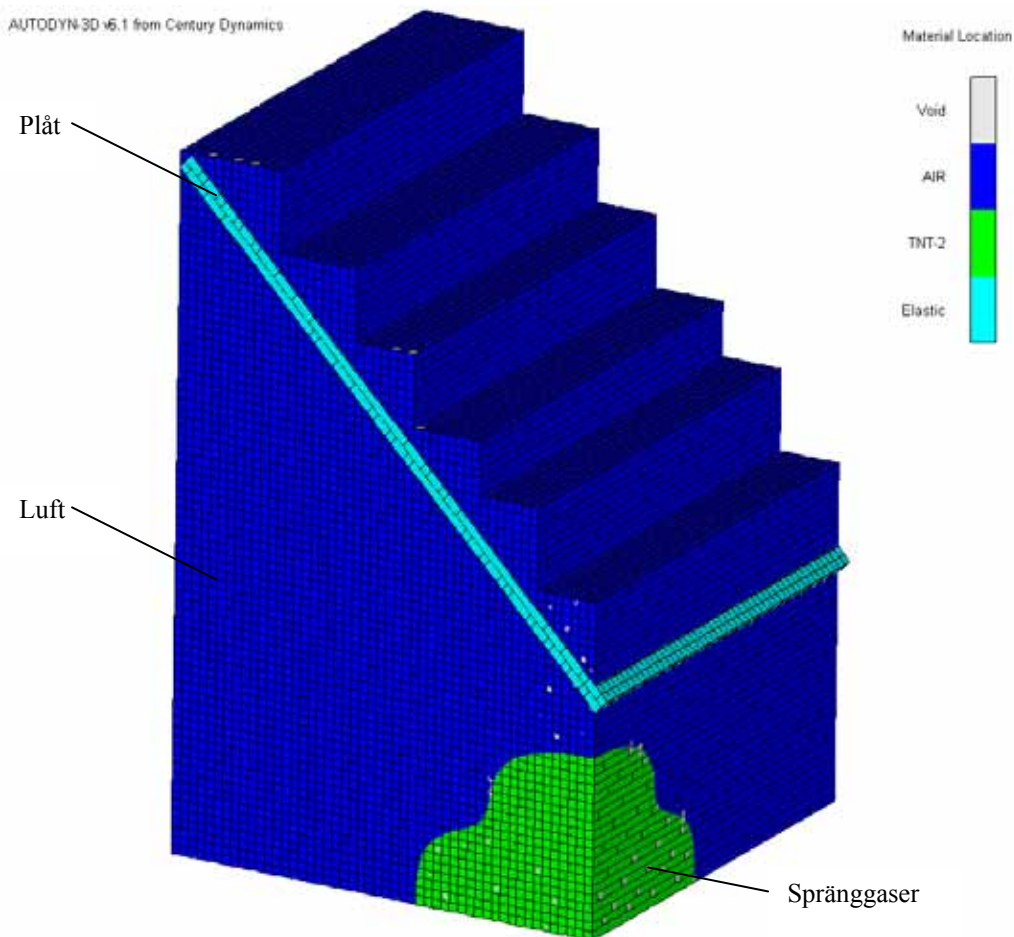
Figur 1: V-formad bottenplåt.



Figur 2: Cylindrisk bottenplåt.

Vid simuleringarna har ”mappningstekniken” som finns i AUTODYN tillämpats för att kunna använda små celler i och runt laddningen. Detta innebär att en initial simulering görs med små celler fram till en tidpunkt då stötvågen nästan har hunnit fram till bottenplåten. Resultaten från denna simulering överförs (”mappas”) sedan till en grövre 3D-modell. De initiala simuleringarna är gjorda med cellstorleken 1 mm. För fallen med en halvsfärisk laddning kan den initiala simuleringen göras med 1D-modell med så kallade ”wedge”-celler vilket gör att simuleringstiden blir mycket kort. Laddningen i denna sfäriska simulering är 20 kg TNT vilket motsvarar 10 kg TNT för en halvsfärisk laddning som ligger på ett stelt underlag. För fallen med en platt laddning görs den initiala simuleringen med en 2D-modell (cellstorlek 1 mm). De initiala simuleringarna görs fram till tidpunkten 75 μ s. Stötvågen har då fortplantat sig ca 444 mm från det stela underlaget, vilket innebär att stötvågen är ca 56 mm från bottenplåten. Den initiala simuleringen behöver bara göras en gång och kan sedan återanvändas i flera olika modeller med olika utformningar av bottenplåten.

Cellstorleken i 3D-modellerna är om inte annat anges 20 mm (i några fall har cellstorleken 10 mm använts). Detta innebär att resultaten från en 1D-modell eller en 2D-modell med cellstorleken 1 mm överförs ("mappas") till en 3D-modell med cellstorleken 20 mm. I Figur 3 visas 3D-modellen (cellstorlek 20 mm) för en v-formad plåt med $\alpha = 45^\circ$ och en platt laddning (1/4-del visas). I figuren har resultatet från den initiala 2D-simuleringen "mappats" över till 3D-modellen vid tidpunkten $75 \mu\text{s}$. I figuren visas spränggasernas expansion vid denna tidpunkt. Den sneda plåten i figuren har samtliga frihetsgrader låsta och kan därmed betraktas som stel, vilket innebär att plåttjockleken inte har någon betydelse. Plåttjockleken måste dock vara så pass tjock att inte något numeriskt läckage av stötvågstrycket sker. Detta innebär vanligen att tjockleken är 2-3 gånger större än cellstorleken i Euler-griden. Vidare är randvillkoren sådana att fri utströmning av spränggas och luft tillåts längs de yttre begränsningsytorna, vilket innebär att ingen reflektion sker mot dessa ytor. Den trappstegsformade ytan i Figur 3 beror på att celler har uteslutits i Euler-griden för att minska simuleringstiden.



Figur 3: Modell (1/4-del) med v-formad plåt $\alpha = 45^\circ$.

3 Resultat

3.1 Halvsfärisk laddning, 3D-modell

I Tabell 1 visas simuleringsresultaten (3D) för en v-formad bottenplåt. Den plana plåten i Tabell 1 befinner sig 500 mm ovanför underlaget dvs. planet går genom spetsen på den v-formade plåten. Eftersom det v-formade utrymmet under fordonet kan vara svår att praktiskt utnyttja så kan jämförelsen med en plan plåt genom spetsen på den v-formade plåten vara något orättvis. Jämförelsen skulle också kunna göras mot en plan plåt som går genom de två högsta punkterna på den v-formade plåten. Detta har tidigare studerats överslagsmässigt i [1]. Resultaten från denna studie visar att det finns fördelar med v-formen även vid jämförelser med en högt placerad plåt.

Den reflekterade impulsintensitet som visas i tabellerna är beräknad direkt ovanför laddningen, det vill säga precis i spetsen på den v-formade ytan. Som tidigare påpekats är impulsintensiteten starkt beroende av cellstorleken. En 2D-simulering med en plan yta och med cellstorleken 1-2 mm ger till exempel impulsintensiteten 19.4 kPas (se Bilaga 2), att jämföras med 3D-simuleringens 14.3 kPas i Tabell 1. Impulsintensiteten blir lägre i 3D-simuleringen eftersom cellstorleken är större än i 2D-simuleringen. CONWEP [4], som är ett program som bygger på empiriska anpassningar till experimentella resultat, ger impulsintensiteten 19.3 kPas om marken förutsätts vara stel, det vill säga utan markdämpning. Med den markdämpning som finns inlagd i CONWEP blir impulsintensiteten 17.5 kPas.

I Tabell 1 anges den totala vertikalt reflekterade impulsen för en hel modell (impulsen i modellen har multiplicerats med 4). Vidare visas den maximala vertikala kraften (kopplingskraften) som stötvågen genererar mot bottenplåten. Kraften har betydelse för fordonets globala maximala acceleration, då denna fås som kvoten mellan den maximala kraften och fordonets massa. Den totala impulsen har betydelse för fordonets globala maximala hastighet eftersom hastigheten fås som kvoten mellan impulsen och fordonets massa (gravitationen försummas). Från impulsen kan även medelaccelerationen beräknas om impulsöverföringstiden är känd. I Figur 4 visas den totala kraften som funktion av tiden för simuleringarna i Tabell 1. Tidsintegralen av denna funktion ger impulsen. Det framgår av Figur 4 att i samtliga fall är impulsöverföringstiden ca 1 ms oberoende av vinkeln α . För en platt laddning är impulsöverföringstiden ungefär lika som för en halvsfärisk laddning.

Det framgår indirekt av värdena i Tabell 1 att den totala vertikala impulsen har minskat ca 69 % om $\alpha = 45^\circ$ jämfört om plåten är plan; den maximala vertikala kraften har minskat med ca 77 %. Det är uppenbart att den maximala kraften minskar något mera än impulsen. Av detta följer att den maximala accelerationen minskar med ca 77 % och att medelaccelerationen minskar med ca 69 %. I Bilaga 2 visas avlänkningen av en stötvåg mot en kon, det självklara faktum att avlänkningen blir något större än för en v-formad plåt framgår av jämförelsen mellan Tabell 1 och Tabell C (Bilaga 2).

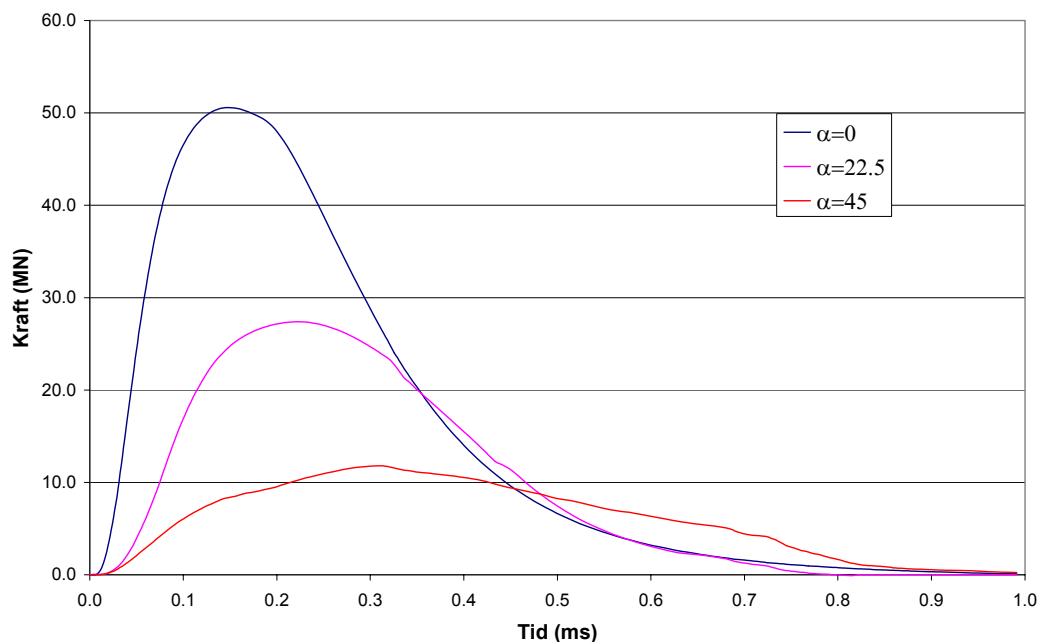
Max kraften 50.6 MN i Tabell 1 (plan plåt) ger till exempel den globala max accelerationen 86 G om fordonet väger 60 ton. Den globala medelaccelerationen under impulsöverföringen är ca 25 G, det vill säga under tiden 1.0 ms.

En simulering gjordes även med cellstorleken 10 mm (halverad cellstorlek) med en v-formad plåt med $\alpha = 45^\circ$. Impulsintensiteten direkt ovanför laddningen blev då 1.4 kPas, således en ganska marginell ökning från 1.2 kPas genom att minska cellstorleken från 20 mm till 10 mm. Impulsen ökade från 4.7 kNs till 4.8 kNs. En simulering med en plan plåt och cellstorleken 10 mm ger impulsintensiteten 17.0 kPas vilket skall jämföras med 14.3 kPas tidigare. Impulsen blir 15.4 kNs vilken skall jämföras med 15.0 kNs tidigare. Skillnaden i maximal kraft från simuleringar med 10 mm respektive 20 mm cellstorlek är liten. Dessa resultat indikerar att en cellstorlek på 20 mm är tillräcklig för att den totala impulsen och den maximala kraften skall kunna simuleras med godtagbar noggrannhet. I nästa avsnitt framgår att detta inte behöver vara fallet för platta laddningar.

I CONWEP finns det även möjlighet att beräkna impulsen mot en plan rektangulär stel plåt. Denna beräkning ger impulsen 14.8 kNs (utan markdämpning) vilket skall jämföras med 15.0 kNs i första raden i Tabell 1.

Tabell 1: Simuleringsresultat för v-formad plåt.

Vinkel α	Impulsintensitet i centrum (kPas)	Total impuls (kNs)	Max kraft (MN)	Relativ impuls
0°	14.3	15.0	50.6	1.0
22.5°	4.9	9.3	27.4	0.62
45°	1.2	4.7	11.8	0.31



Figur 4: Totalkraft som funktion av tiden.

Av resultaten i Tabell 2 följer att för en cylindrisk plåt är det inte möjligt att uppnå lika stor avlänkning av stötvågen som för en v-formad plåt. Framförallt visar det sig att α större än 22.5° inte medför någon betydande ytterligare minskning av impulsen.

Tabell 2: Simuleringsresultat för cylindrisk plåt.

Vinkel α	Impulsintensitet i centrum (kPas)	Total impuls (kNs)	Max kraft (MN)	Relativ impuls
0°	14.3	15.0	50.6	1.0
22.5°	11.0	10.5	36.3	0.70
45°	10.6	9.2	31.8	0.61

3.2 Platt laddning, 3D-modell

För platt laddning (till skillnad från halvsfäriska) i kombination med v-formade plåtar med vinkeln 22.5° visade simuleringen att den maximala kraften påverkas kraftigt av cellstorleken (10 mm respektive 20 mm), däremot påverkas inte den totala impulsen av cellstorleken nämnvärt. (Platt laddning och plåtvinkel 45° har ej undersökts i detta avseende.) Tendensen är att den maximala kraften ökar ju mindre celler som används. De resultat som redovisas i fortsättningen har dock utförts med cellstorleken 20 mm, dels för att inte få för långa simuleringstider och dels för att möjliggöra jämförelse med simuleringar med halvsfäriska laddningar. Detta innebär att de maximala krafter som redovisas i fortsättningen kan vara något osäkra, däremot har storleken på impulserna en hög noggrannhet.

I Tabell 3 och Tabell 4 visas simuleringsresultaten för en platt laddning. Det framgår att det är möjligt att avlänka nästan lika stor del av stötvågen som för en halvsfärisk laddning. Möjligheten till avlänkning påverkas således inte i någon högre grad av laddningens form.

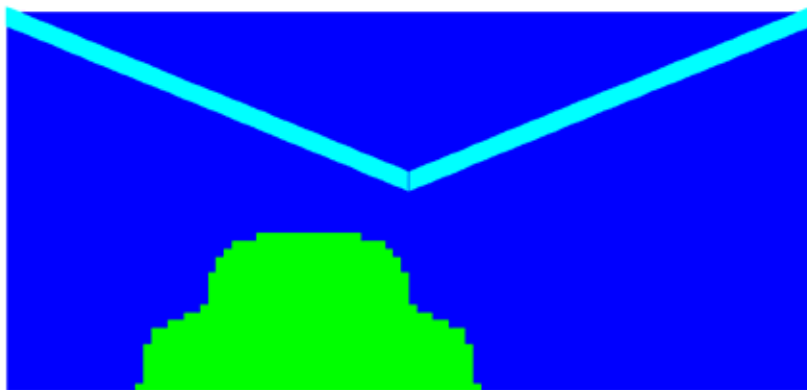
Tabell 3: Simuleringsresultat för v-formad plåt.

Vinkel α	Impulsintensitet i centrum (kPas)	Total impuls (kNs)	Max kraft (MN)	Relativ impuls
0°	55.0	16.2	56.8	1.0
22.5°	17.9	11.3	33.9	0.70
45°	3.8	6.2	17.3	0.38

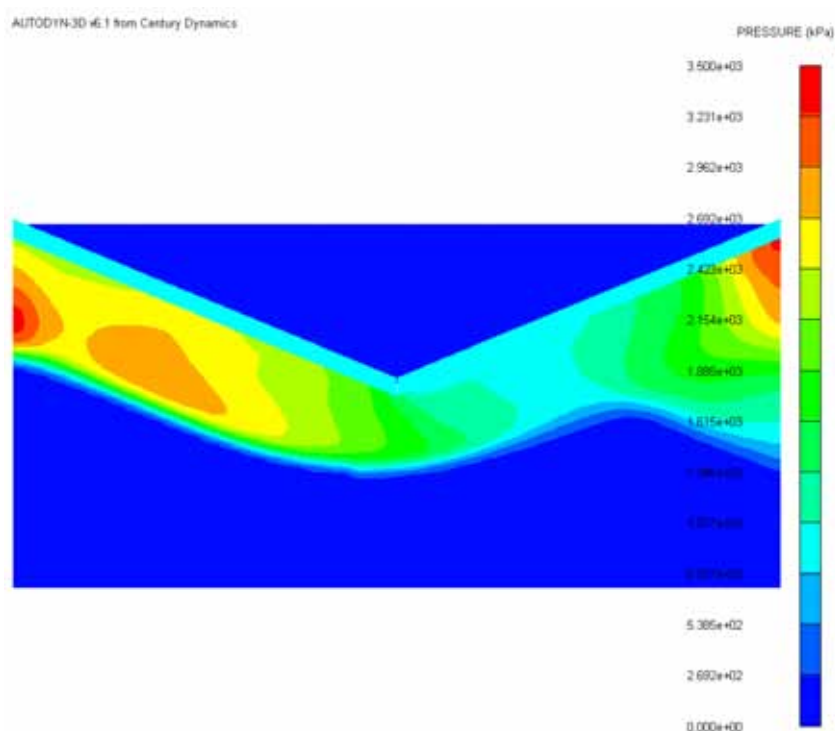
Tabell 4: Simuleringsresultat för cylindrisk plåt.

Vinkel α	Impulsintensitet i centrum (kPas)	Total impuls (kNs)	Max kraft (MN)	Relativ impuls
0°	55.0	16.2	56.8	1.0
22.5°	40.0	12.7	44.4	0.78
45°	39.2	11.6	40.8	0.72

I Figur 5 visas en modell med laddningen sidoförskjuten 250 mm och $\alpha = 22.5^\circ$. Den tidpunkt som visas är när den initiala 2D-simuleringen har överförts till 3D-modellen när spränggaserna expanderat något (resultatet har ”mappats” från den initiala 2D-simuleringen). I Figur 6 visas ett exempel på tryckfördelningen vid tiden 0.575 ms.



Figur 5: Modell med sidoförskjuten laddning.



Figur 6: Tryckfördelning vid tiden 0.575 ms.

I Tabell 5 visas simuleringsresultatet för modellen med sidoförskjuten laddning, Figur 5. Modellen är i detta fall större än tidigare eftersom endast ett symmetriplan existerar. Den totala impulsen på bottenplåtens högra och vänstra halva redovisas (resultatet från simuleringen multiplicerad med två). För $\alpha = 22.5^\circ$ blir den totala impulsen är (9.6+2.3) 11.9 kNs vilket är något större än 11.3 kNs för symmetriskt placerad laddning, se Tabell 3. För en plan plåt blir den totala impulsen (11.9+4.2) 16.1 kNs vilket endast är marginellt mindre än 16.2 kNs för symmetriskt placerad laddning. Den vertikala impulsen för $\alpha = 22.5^\circ$ blir därmed ca 26 % (11.9/16.1) mindre för en sidoförskjuten laddning relativt en plan plåt, vilket skall jämföras med ca 30 % (11.3/16.2) för symmetriskt placerad laddning. Resultaten tyder på att avlänknigen är effektiv för att minska impulsen (om än något sämre) även om laddningen är sidoförskjuten.

För $\alpha = 22.5^\circ$ blir den maximala kraften för summan av höger och vänster sida 40.0 MN; den maximala kraften för höger respektive vänster sida inträffar inte exakt samtidigt och därför kan inte värdena i Tabell 5 adderas. Den maximala kraften är ca 18 % större än för en symmetriskt placerad laddning, se Tabell 3. För en plan plåt blir den maximala kraften 52.3 MN detta är ca 8 % mindre än för en symmetriskt placerad laddning. Detta innebär att om målsättningen är att minska den totala vertikala kraften är avlänkningsen mindre effektiv för en sidoförskjuten laddning än för en symmetriskt placerad laddning.

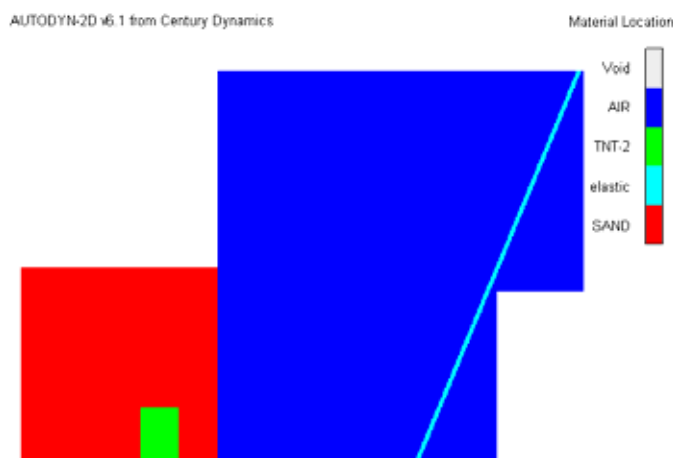
Tabell 5: Simuleringsresultat för v-formad plåt med laddningen förskjuten 250 mm (vänster).

Vinkel α	Total impuls vänster (kNs)	Total impuls höger (kNs)	Max kraft vänster (MN)	Max kraft höger (MN)
0°	11.9	4.2	40.2	13.8
22.5°	9.6	2.3	36.3	4.9

3.3 Platt laddning, nedgrävd, 2D-modell

En platt laddning ($D/H=3$) nedgrävd i sand har simulerats. Materialparametrarna för sand har hämtats från AUTODYN:s materialbibliotek vilka har sitt ursprung i [5]. Densiteten för sanden är 1674 kg/m^3 . Avståndet är 100 mm mellan laddningens övre plana yta och markytan. Avståndet mellan marken och bottenplåtens lägsta punkt är som tidigare 500 mm. Konens radie är 1 m, vilket innebär att den projicerande arean är något mindre än i 3D-modellen där $L = B = 2 \text{ m}$. För att begränsa storleken på modellen något är sanden och laddningen placerade i en stel ”grop” med radien 500 mm och djupet 500 mm, se Figur 7. Vidare tillåts fri utströmning längs den övre randen. Som förut har en del celler uteslutits i den högra delen i Euler-griden för att minska simuleringstiden. Dessa celler är inte nödvändiga eftersom ändå inget tryck kommer passera genom plåten till den högra delen av griden.

Eftersom det är en 2D-modell beräknas impulsen i detta fall mot en konformad plåtyta vilket inte är detsamma som en v-formad plåtyta. Anledningen till att en 2D-modell använts beror på att, som tidigare har påpekats, simuleringar i 3D inte har gått att slutföra på grund av alltför små tidssteg. I dessa simuleringar användes inte tekniken med en initial simulering, utan hela simuleringen utfördes i ett steg med cellstorleken 4 mm.



Figur 7: Nedgrävd laddning, $\alpha = 22.5^\circ$.

Av Tabell 6 framgår att avlänkningen fungerar lika bra som för laddningar i luft. En närmare jämförelse för 2D-fallet visas i Bilaga 2. För en nedgrävd laddning är impulsöverföringstiden ca 3-5 ms jämfört med ca 1 ms för en laddning i luft. Av Tabell 6 framgår att impulsen är högre medan den maximala kraften är något lägre än för en laddning i luft. Den maximala kraften är endast ett ungefärligt värde eftersom kraftfunktionen innehåller mycket numeriskt brus vilket gör att maxvärdet inte går att avläsa särskilt noggrant.

Tabell 6: Simuleringsresultat för en kon, laddning i sand.

Vinkel α	Impulsintensitet i centrum (kPas)	Total impuls (kNs)	Max kraft (MN)	Relativ impuls
0°	55.5	28.3	ca 40.8	1.0
22.5°	18.9	13.9	ca 18.8	0.49
45°	5.8	5.6	ca 5.0	0.20

3.4 Analytiska beräkningar

I [1] härleddes ett antal approximativa ekvationer för att studera avlänkning av den vertikala impulsen när laddningen har en halvsfärisk form. Dessa beräkningar baseras på empiriska ekvationer avseende den reflekterade impulsintensiteten för olika avstånd från laddningen. De beräkningar som redovisas i denna rapport är i princip lika som de i [1], med den skillnaden att nu studeras även en sidoförskjuten laddning kombinerad med en v-formad plåt. Vidare studeras en symmetriskt placerad laddning och en godtycklig symmetrisk form på bottenplåten. Detta kan till exempel användas för att undersöka om det går att hitta optimal form på bottenplåten. Resultaten från dessa beräkningar har använts som jämförelser med simulerade resultat.

När det gäller den maximala kraften (maximala accelerationen) har det inte gått att finna något approximativt sätt att beräkna denna. Följaktligen måste denna kraft beräknas med simuleringar i AUTODYN. Det är således endast impulsen som kan uppskattas utgående från dessa empiriska ekvationer.

Enligt [6] kan den reflekterade impulsintensiteten I_0 (Pas) för en halvsfärisk laddning i luft beräknas med en empirisk ekvation som ges av

$$I_0(d, m) = m^{1/3} 10^{2.7059 - 0.9495U(d, m) + 0.1121(U(d, m))^2 - 0.0251(U(d, m))^3}, \quad (1)$$

där

$$U(d, m) = -0.2462 + 1.3342 \log(d/m^{1/3}). \quad (2)$$

Parametern d är avståndet i meter till laddningen och m är sprängämnets massa (kg) multiplicerad med trotylekvivalenten. Ekvationen gäller för en halvsfärisk laddning på ett plant underlag vid vinkelrätt anslag mot en stel yta, när $0.0674 < d/m^{1/3} < 40$. Parametern d kan hanteras som en vektor som går från en godtycklig punkt på den reflekterande ytan till laddningens centrum. Vid snett anslag kan impulsintensiteten vinkelrätt mot ytan approximeras genom att projicera enhetsvektorn av \vec{d} på ytans normalvektor \vec{n} och multiplicera med impulsintensiteten enligt ekv. (1). Denna approximation har tidigare jämförts med AUTODYN-simuleringar när stötvågen infaller snett mot en plan yta. Approximationen har undersökts för vinklar upp till 45° mellan ytans normalvektor och den infallande stötvågen. Vid stora vinklar tycks dock impulsöverföringen överskattas.

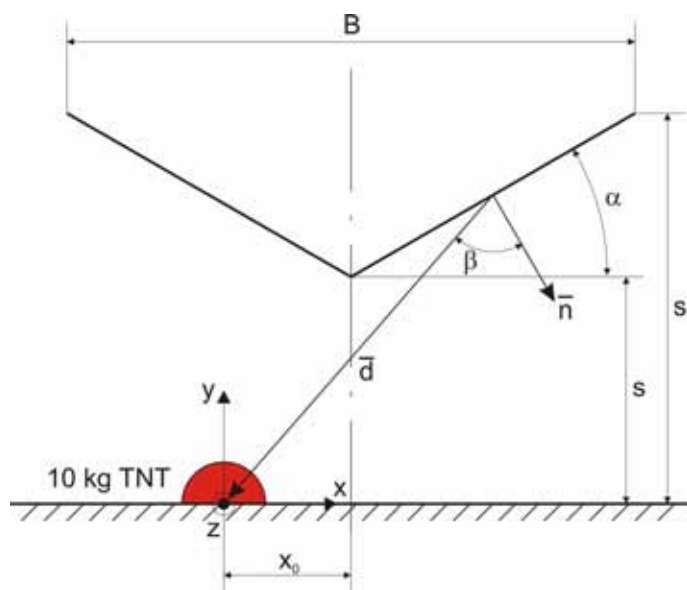
För att uppskatta impulsöverföringen skall följaktligen cosinus för vinkeln mellan \vec{n} och \vec{d} beräknas och multipliceras med impulsintensiteten. Cosinus för vinkeln beräknas med hjälp av skalärprodukten $\vec{n} \cdot \vec{d} / |\vec{n}| |\vec{d}|$.

Ekvationerna (1) och (2) används även i CONWEP. Dessa gäller med hänsyn tagen till markdämpningen. För en laddning placerad på ett stelt underlag blir impulsen något större än den som ges av ekv. (1). Ekvationer för en sfärisk laddning finns även i [6] och dessa kan användas för en halvsfärisk laddning på ett stelt underlag om dubbla massan av laddningen används i ekvationerna.

Om bottenplåten är v-formad enligt Figur 8 ges längden av vektorn \vec{d} av

$$|\vec{d}| = F_1(x, z, x_0, \alpha, s) = \sqrt{x^2 + (s + |x - x_0| \tan(\alpha))^2 + z^2}, \quad (3)$$

där s är avståndet mellan marken och den lägsta punkten på bottenplåten. Vidare är x_0 sidoförskjutningen av laddningen och s_1 avståndet mellan marken och den högsta punkten på bottenplåten ($s_1 = s + B/2 \tan(\alpha)$).



Figur 8: Sidoförskjuten laddning och v-formad plåt.

Cosinus för vinkeln β mellan \bar{n} och \bar{d} ges av

$$\cos(\beta) = F_2(x, z, x_0, \alpha, s) = \frac{s \cos(\alpha) - x_0 \sin(\alpha) \begin{cases} 1 & \text{om } x > x_0 \\ -1 & \text{om } x < x_0 \end{cases}}{F_1(x, z, x_0, \alpha, s)} \begin{cases} 0 & \text{om } (x_0 \tan(\alpha) > s) \text{ och } (x > x_0) \\ 1 & \text{annars} \end{cases}. \quad (4)$$

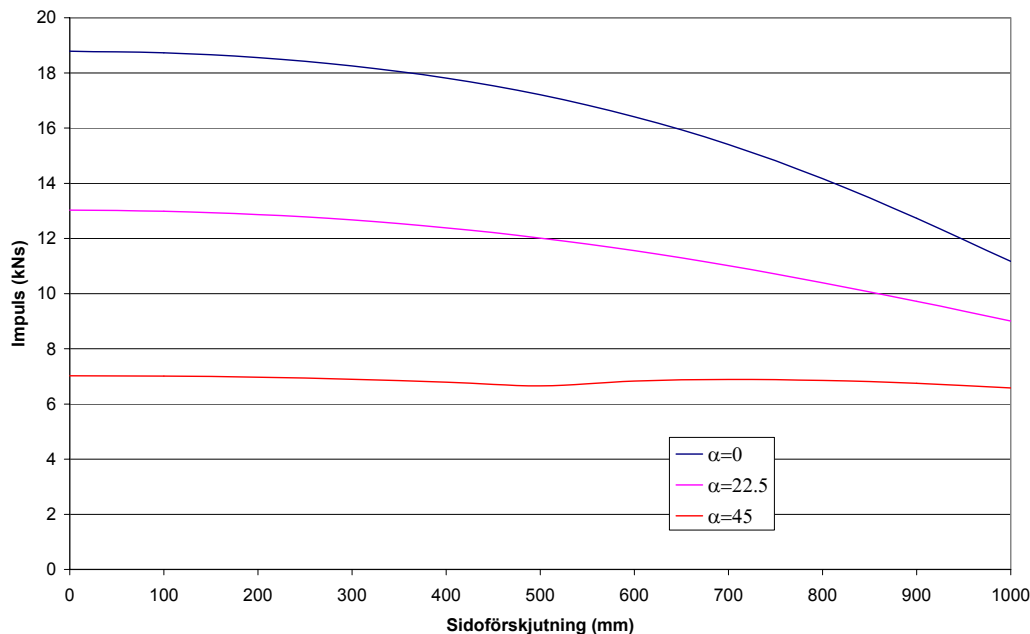
Med denna ekvation tas hänsyn till att den högra sidan av fordonet inte får någon impuls alls om x_0 och α är så stora att stötvågen avskärmas.

Den totala impulsen i y-riktningen ges av

$$I_{total}(x_0, \alpha) = 2 \int_0^{L/2} \left(\int_{-B/2+x_0}^{B/2+x_0} I_0 [F_1(x, z, x_0, \alpha, s), m] F_2(x, z, x_0, \alpha, s) dx \right) dz, \quad (5)$$

där L är längden och B är bredden av bottenplåten. I alla beräkningsresultat som redovisas i fortsättningen är $L=2$ m, $B=2$ m, $s=0.5$ m och $m=10$ kg. I Figur 9 visas en beräkning med ekv. (5).

I härledning ovan har impulsen av det så kallade "side-on" trycket försumrats, det vill säga den impuls (incident impulse) som uppstår när stötvågen fortplantar sig parallellt med ytan. Denna impuls är väsentligt lägre än den reflekterade impulsen om stötvågen infaller vinkelrätt mot ytan. Om däremot den infallande stötvågen är nästan parallell med ytan kan dock den impulsintensitet som verkar vinkelrät mot ytan enligt ekv. (1-5) bli mindre än den som genereras av "side-on" trycket.



Figur 9: Beräkning av impuls med ekv. (5).

Om laddningen är symmetriskt placerad ($x_0=0$ i Figur 8) och bottenplåten har en godtycklig symmetrisk profil $y(x)$ med avseende på centrumlinjen ges cosinus för vinkeln β av

$$\cos(\beta) = F_3(x, z) = \frac{-x + y(x)/y'(x)}{\sqrt{(1 + (1/y'(x))^2)(x^2 + y(x)^2 + z^2)}} \begin{cases} 1 & \text{om } y'(x) > 0 \\ -1 & \text{om } y'(x) < 0 \end{cases} \quad (6)$$

där $y'(x)$ betecknar derivatan av $y(x)$ med avseende på x .

Den totala impulsen i y-riktningen ges av

$$I_{total} = 4 \int_0^{L/2} \int_0^{B/2} I_0 \left[\sqrt{x^2 + y(x)^2 + z^2}, m \right] F_3(x, z) \begin{cases} 1 & \text{om } F_3(x, z) > 0 \\ 0 & \text{om } F_3(x, z) < 0 \end{cases} dx dz. \quad (7)$$

Eftersom cosinus för vinkeln β kan bli negativ måste integranden sättas till noll i dessa fall. Detta inträffar för de områden som inte träffas direkt av stötvågen (avskärmas) och därmed kan ingen impulsöverföring ske. Ekv. (7) kan användas för att hitta en optimal form $y(x)$ förutsatt att s och s_1 är givna (även L , B , m är givna).

Om bottenplåten har en v-form ges $y(x)$ av

$$y(x) = s + \tan(\alpha)x. \quad (8)$$

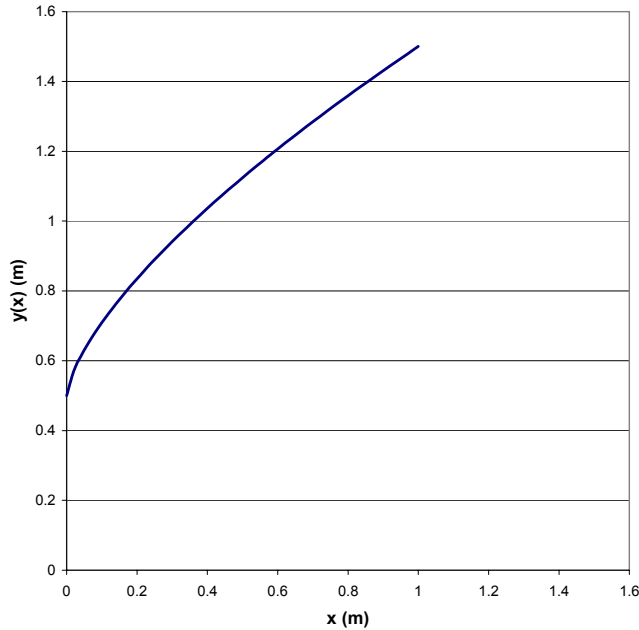
Om bottenplåten har en cylindrisk form ges $y(x)$ av

$$y(x) = R + s - \sqrt{R^2 - x^2}, \quad (9)$$

där plåtens krökningsradien R ges av

$$R = \frac{B(\tan^2(\alpha) + 1)}{4 \tan(\alpha)}. \quad (10)$$

Om ekv. (7) används för att hitta en optimal form på $y(x)$ för att minimera impulsen, visar beräkningar att det inte går att minska impulsen speciellt mycket jämfört med en v-formad plåt (med raka flanker). Vanligen är minskning av impulsen mindre än 10 % jämfört med v-formen om s_1 är lika i de två fallen. Slutsatsen är att det inte lönar sig med en mera komplicerad form på bottenplåten än en v-form, eftersom vinsten är så liten. Dessutom, om laddningen är förskjuten i sidled är den optimala formen troligen inte lika som den form som är optimal för en symmetriskt placerad laddning. I Figur 10 visas ett exempel på en möjlig optimal form (ena halvan av bottenplåten visas). I detta exempel är $s=0.5$ m, $s_1=1.5$ m och ekvationen för profilen är $y(x) = 0.5 + x^{0.68}$. Denna profil ger en impuls som är endast ca 7 % mindre än en v-form med $s_1=1.5$ m (dvs. $\alpha=45^\circ$).



Figur 10: Möjlig optimal form.

3.5 Jämförelser mellan simuleringar och analytiska beräkningar

Som förut påpekats gäller ekvationerna enbart för en halvsfärisk laddning, vilket innebär att exakta jämförelser inte kan göras mot simuleringar med platta laddningar. Simuleringarna har dock visat att det inte är så stor skillnad när det gäller möjligheten till avlänkning mellan en halvsfärisk och en platt laddning. I Tabell 7 och Tabell 8 visas en jämförelse när laddningen är halvsfärisk. Det framgår att med ekvationerna fås en något högre impuls trots att en viss markdämpning ingår. Detta beror huvudsakligen på att impulsöverföringen överskattas när ekv. (1) multipliceras med $\cos(\beta)$, denna överskattning ökar ju större vinkeln β är.

Den relativa impulsen fås om den aktuella impulsen vid vinkeln α divideras med impulsen för en plan plåt (på höjden s). Det framgår av Tabell 7 och Tabell 8 att den relativa impulsen stämmer mycket bra med simuleringarna. Detta betyder att ekvationerna är användbara för att bedöma hur stor del av stötvågen som avlänkas. Det framgår att för $\alpha = 45^\circ$ är den vertikala impulsen endast 31 % till 37 % av den som gäller för en plan plåt.

Tabell 7: Jämförelse av simuleringar och ekvationer, v-formad yta.

Vinkel α	Simuleringsresultat från Tabell 1		Med ekvationerna (1), (6)-(8)	
	Impuls (kNs)	Relativ impuls	Impuls (kNs)	Relativ impuls
0°	15.0	1.0	18.8	1.0
22.5°	9.3	0.62	13.0	0.69
45°	4.7	0.31	7.0	0.37

Om plåten är v-formad med $\alpha = 22.5^\circ$ visar beräkningar med ekvationerna (1), (6)-(8) att laddningens massa måste ökas från 10 kg till 15 kg för att uppnå impulsen 18.8 kNs, som gäller för en plan plåt. Fordonet kan därmed klara en laddning som är ca 50 % tyngre utan att

impulsen ökar. Om $\alpha = 45^\circ$ måste laddningens massa ökas tre gånger från 10 kg till 30 kg för att impulsen 18.8 kNs skall uppnås.

Tabell 8: Jämförelse av simuleringar och ekvationer, cylindrisk yta.

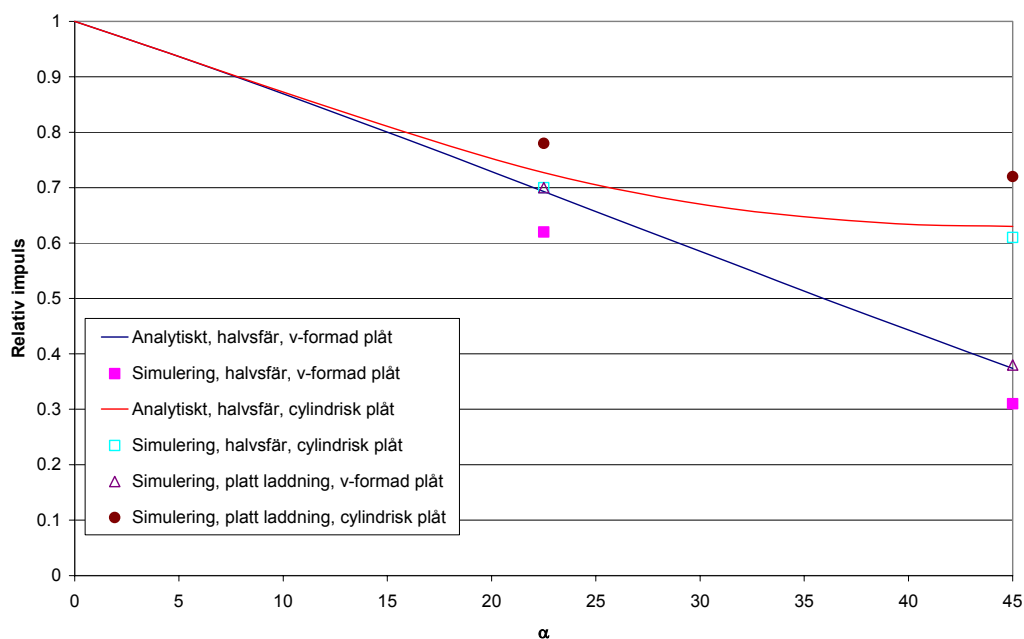
Vinkel α	Simuleringsresultat från Tabell 2		Med ekvationerna (1), (6), (7), (9), (10)	
	Impuls (kNs)	Relativ impuls	Impuls (kNs)	Relativ impuls
0°	15.0	1.0	18.8	1.0
22.5°	10.5	0.70	13.7	0.73
45°	9.2	0.61	11.8	0.63

I Tabell 9 visas en något oegentligt jämförelse mellan en platt laddning respektive en halvsfärisk laddning när plåten har en v-form. I båda fallen är laddningen förskjutet 250 mm i sidled. För den platta laddningen kommer resultaten från simuleringar (Tabell 5) medan resultaten för den halvsfäriska laddningen beräknats med ekv. (5). Det är uppenbart att den relativa impulsen blir ganska lika i de två fallen.

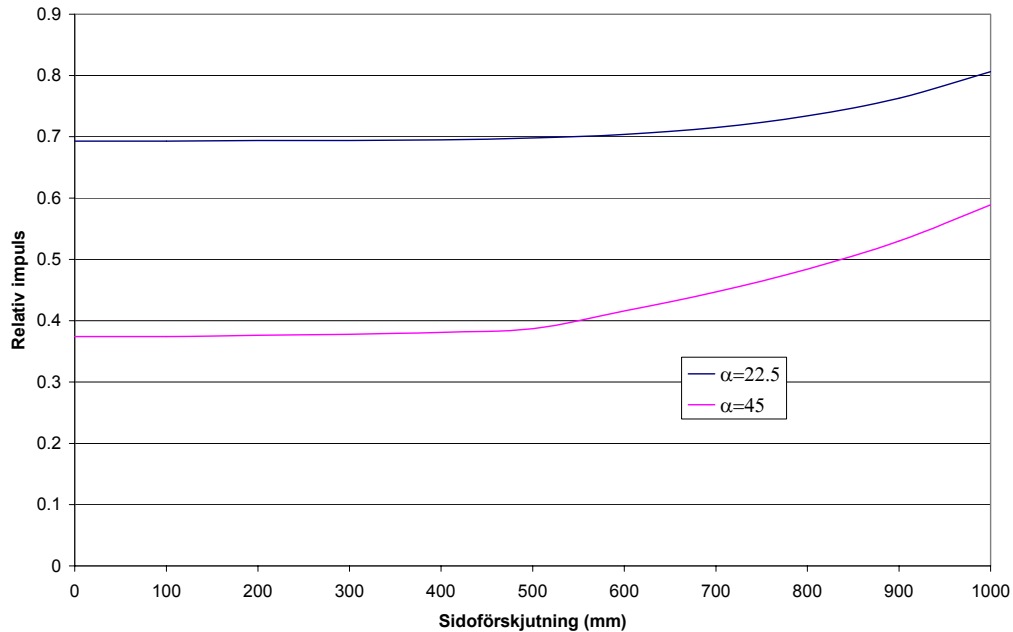
Tabell 9: Jämförelse av simuleringar och ekvationer, osymmetrisk placerad laddning

Vinkel α	Simuleringsresultat från Tabell 5		Med ekvationerna (1), (3)-(5)	
	Total impuls (kNs)	Relativ impuls	Total impuls (kNs)	Relativ impuls
0°	16.1	1.0	18.4	1.0
22.5°	11.9	0.74	12.8	0.69

I Figur 11 visas grafiskt de jämförelser som tidigare har presenterats i Tabell 7 och Tabell 8 (halvsfärisk laddning). Vidare visas simuleringsresultatet för en platt laddning och en halvsfär. Det framgår att de analytiska beräkningarna följer simuleringsresultaten relativt väl. I Figur 12 visas att den relativa impulsen beräknad med ekv. (5) påverkas relativt lite av sidoförskjutningen.



Figur 11: Jämförelse av relativ impuls.



Figur 12 : Relativ impuls beräknad som $I_{total}(x_0, \alpha)/I_{total}(x_0, 0)$.

Beräkningar med de ekvationer som tidigare har presenterats visar att den relativa impulsen påverkas mycket lite av laddningsvikten (m) och markfrigången (s). Vid måttliga variationer av bredden (B) och längden (L) av bottenplåten visar ekvationerna även på litet inflytande på den relativa impulsen. Att alla simuleringar bara har gjorts för ett enda värde på m , s , B och L har därför liten betydelse för möjligheterna till avlänkning.

4 Diskussion och slutsatser

De simuleringar som utförts visar att avlänkning av stötvågor från mindetonationer är en effektiv skyddsmetod. För en v-formad bottenplåt med vinkeln 45° kan till exempel den vertikala impulsen på fordonet minska med ca 62 % (30 % för vinkeln 22.5°) jämfört med en plan bottenplåt. Detta gäller under förutsättning att bottenplåten är tillräckligt tjock för att inte stora deformationer skall inträffa. Vidare visar simuleringarna att den maximala vertikala kraften på fordonet minskar ca 69 % (40 % för vinkeln 22.5°). (Som påpekats förut kan storleken på den maximala kraften i vissa fall vara något osäker.) Detta ger även motsvarande minskning av fordonets globala maximala acceleration. Ett annat sätt att uttrycka saken är att ett fordon med v-formad bottenplåt med vinkeln 45° kan klara ca 3 gånger större laddningsvikt än en plan bottenplåt, det vill säga impulsen är ungefär lika i dessa två fall. För vinkeln 22.5° blir motsvarande ökning av laddningsvikten ca 1.5 gånger. Detta går att visa genom att variera massan i till exempel ekv. (5). Nackdelen med en v-formad bottenplåt är att fordonets höjd ökar kraftigt och att utrymmet i fordonets nedre del kan vara svårt att utnyttja.

Simuleringarna har visat att laddningens form eller placering inte har någon avgörande inverkan på möjligheten till avlänkning. För en osymmetrisk placerad laddning är till exempel minskningen av impulsen (avlänkningen) nästan lika stor som för en symmetrisk placerad laddning. Vidare har simuleringarna visat att om laddningen är nedgrävd eller ligger på marken inte har någon större betydelse för möjligheten till avlänkning.

De jämförelser som gjorts mellan simuleringar och analytiska beräkningar baserade på empiriska experimentella samband har visat på bra överensstämmelse.

Referenser

- [1] Johansson B., Tjernberg A., Holmberg L., Sundel T., Inventering av skyddsprinciper mot tryckverkande fordonsminor, FOI-R--1813--SE, Swedish Defence Research Agency, 2005.
- [2] LLNL Explosives Handbook, Properties of Chemical Explosives and Explosive Simulants, B.M. Dobrat z, P.C. Crawford, Jan 31 1985.
- [3] Equation of State and Strength Properties of Selected Materials”. Steinberg D.J. LLNL. Feb 1991.
- [4] ConWep, Weapons effects calculations, TM 5-855-1 “Fundamentals of Protective Design for Conventional Weapons”, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, USA, 1992.
- [5] Laine L., Sandvik A., ”Derivation of mechanical properties for sand”, 4th SILOS, CI-Premier LTD, p361-367.
- [6] Kingery C. N., Bulmash K. J., Airblast parameters from TNT spherical air burst and hemispherical surface burst, Ballistic Research Laboratory, Aberdeen Proving Ground, Technical Report ARBRL-TR-02555, USA, 1984.

Tabell A: TNT; Tillståndsekvation Jones-Wilkins-Lee, [2].

Densitet	1630 kg/m ³
Parameter A	371 GPa
Parameter B	3.23 GPa
Parameter R1	4.15
Parameter R2	0.95
Parameter W	0.3
Detonationshastighet	6930 m/s
Energi E ₀	7.0 GJ/m ³
Tryck P _{CJ}	21.0 GPa

Tabell B: Luft; Tillståndsekvation ideal gas, [3].

Densitet	1.225 kg/m ³
Gamma (C _p /C _v)	1.4

Simuleringar i 2D (axi-symmetri)

Laddning i luft

Halvsfärisk laddning med 10 kg TNT på ett stelt underlag. Avståndet mellan konens spets och underlaget är 0.5 m och konens radie är 1.0 m. Cellstorlek 1 mm i den initiala simuleringen ”mappas” över till en modell med cellstorleken 2 mm.

Tabell C: Simuleringsresultat för en kon.

Vinkel α	Impulsintensitet i centrum (kPas)	Total impuls (kNs)	Relativ impuls	Max kraft (MN)	Relativ kraft
0°	19.4	15.2	1.0	54.0	1.0
22.5°	12.0	6.9	0.45	21.6	0.40
45°	0.9	2.9	0.19	5.9	0.11

Nedgrävd laddning

För att möjliggöra jämförelse mellan en laddning i sand och i luft medtas tabellen nedan, denna återfinns även som Tabell 6 i rapporten.

Tabell D: Simuleringsresultat för en kon, laddning i sand.

Vinkel α	Impulsintensitet i centrum (kPas)	Total impuls (kNs)	Relativ impuls	Max kraft (MN)	Relativ kraft
0°	55.5	28.3	1.0	ca 40.8	1.0
22.5°	18.9	13.9	0.49	ca 18.8	0.46
45°	5.8	5.6	0.20	ca 5.0	0.12