



# Verkansvärderingsmodeller för UV-effekter i AVAL

MATS HARTMANN

FOI är en huvudsakligen uppdragsfinansierad myndighet under Försvarsdepartementet. Kärnverksamheten är forskning, metod- och teknikutveckling till nytta för försvar och säkerhet. Organisationen har cirka 1000 anställda varav ungefär 800 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, bedömning av olika typer av hot, system för ledning och hantering av kriser, skydd mot och hantering av farliga ämnen, IT-säkerhet och nya sensorers möjligheter.



FOI  
Totalförsvarets forskningsinstitut  
Försvars- och säkerhetssystem  
164 90 Stockholm

Tel: 08-55 50 30 00  
Fax: 08-55 50 31 00

[www.foi.se](http://www.foi.se)

FOI-R--3259--SE Teknisk rapport  
ISSN 1650-1942 September 2011

**Försvars- och säkerhetssystem**

Mats Hartmann

# Verkansvärderingsmodeller för UV-effekter i AVAL

Titel	Verkansvärderingsmodeller för UV-effekter i AVAL
Title	Assessment models for underwater warhead effects in AVAL
Rapportnr/Report no	FOI-R--3259--SE
Rapporttyp/ Report Type	Teknisk rapport / Technical report
Sidor/Pages	17 p
Månad/Month	September / September
Utgivningsår/Year	2011
ISSN	ISSN 1650-1942
Kund/Customer	Försvarsmakten
Projektnr/Project no	E20528
Godkänd av/Approved by	Bengt Eiderfors

FOI, Totalförsvarets Forskningsinstitut	FOI, Swedish Defence Research Agency
Avdelningen för Försvars- och säkerhetssystem	Defence & Security, Systems and Technology
164 90 Stockholm	SE-164 90 Stockholm

## Sammanfattning

Värderingsverktyget AVAL används för att värdera stridsdelars verkan i olika typer av mål och målets förmåga att motstå verkan från stridsdelar av olika typer. Utvärderingen sker på plattformsnivå för att bedöma vilka funktionsförändringar som inträder hos det bekämpade målet, t.ex. kan rörelseförmågan eller eldgivningsförmåga med huvudbeväpningen slås ut. AVAL hanterar konventionella stridsdelstyper och mål i luften, på marken och på vattenytan. För vissa typer av mål finns speciella modeller, t.ex. vatteninströmning (fartyg), strukturell hållfasthet för flygplansvingar (flygplan) och minverkan mot band och hjul (markfordon).

Rapporten beskriver kortfattat de modeller som f.n. finns implementerade i AVAL för att hantera verkan från undervattensvapen. Modellerna är medvetet enkla vilket innebär en förenkling av det verkansförlopp som uppstår till följd undervattensdetonationer. Det innebär ingenjörsmässiga uppskattningar krävs av de viktigaste skadeparametrarna. I förekommande fall föreslås möjliga förbättringar, utveckling och nyutveckling av modeller.

## Nyckelord

AVAL, fartyg, undervattensvapen, verkan

## Summary

The V/L-assessment tool AVAL is used to estimate different warheads' effects in different types of targets and the targets' ability to withstand the warhead effects. The estimation is on a platform level and defines the changes in functionality that occurs in the attacked target, e.g. the mobility or fire power with the main gun might be killed. AVAL considers conventional warheads and targets in air, on land and on the sea surface. There are specialized models for some kinds of targets, e.g. water inflow (naval targets), structural strength of wings (fixed wing aircrafts) and mine effects against wheels and tracks (land vehicles).

The report gives a short summary of the current AVAL-models used to treat underwater warheads effects on surface ships. The models are deliberately simple which implies a simplification of the effects from underwater detonations. This also implies that engineering based judgements are required to define the damage parameters. Improvements, further development and new models are proposed when applicable.

## Keywords

AVAL, ship, underwater weapons, effects

# Innehåll

<b>1 Inledning</b>	<b>7</b>
<b>2 Tryckverkan från undervattensladdning</b>	<b>9</b>
2.1 Begränsningar i modellen . . . . .	9
2.2 Förbättringsmöjligheter . . . . .	10
<b>3 Stötbelastning på komponenter från undervattensladdning</b>	<b>11</b>
3.1 Begränsningar i modellen . . . . .	13
3.2 Förbättringsmöjligheter . . . . .	13
<b>4 Whipping</b>	<b>15</b>
4.1 Begränsningar i modellen . . . . .	16
4.2 Förbättringsmöjligheter . . . . .	16
<b>5 Slutsatser och rekommendationer för fortsatt arbete</b>	<b>17</b>



# 1 Inledning

AVAL (Assessment of Vulnerability and Lethality) är ett svenskutvecklat verktyg för att värdera vapens verkan i olika typer av mål och målens förmåga att överleva vapenverkan. AVAL används för att värdera konventionella vapens verkan i mål i luften, på marken och på havet.

Mycket kortfattat kan AVAL beskrivas som ett verktyg där ett anfallsscenario definieras, simuleringar genomförs för att bestämma vilka komponenter i målet som träffas eller på annat sätt påverkas av angreppet, vilka komponenter som upphör att fungera på grund av angreppet och hur detta påverkar målets förmåga att verka. Exempel på målförmågor som normalt ingår i värderingar är eldgivningsförmåga, rörelseförmåga samt besättningsens välbefinnande.

Beräkningsmodellerna i AVAL är medvetet enkla, både för att simulerings-tiderna ska hållas korta och för att det normalt sett inte behövs enormt hög resultatupplösning på plattformsnivå. Genom att AVAL ställer stora krav på indata för mål- och stridsdelsbeskrivningar istället för att ha kompletta beräkningsmodeller är det möjligt att kommersiellt sälja programmet även utanför Sverige, dock med vissa restriktioner gällande export av krigsmateriel.

I kapitel 2 - 4 beskrivs kortfattat de modeller som är speciellt anpassade för undervattensstridsdelars verkan mot ytfartyg. I dagsläget finns inga specialmodeller för att hantera verkan mot ubåt, men till viss del är de befintliga modellerna troligen användbara även för simulering av verkan mot ubåt. AVAL hanterar tre typer av belastningar från undervattensvapen med helt separata beräkningsmodeller, trots att de i verkligheten är samverkande och kan orsakas av samma undervattensladdning.

- Tryck - Tryckmodellen i AVAL används likartat ovan och under vattenytan. Den används både för att bedöma om komponenter är placerade för nära en detonerande laddning för att klara sig utan skada (vilket avses motsvarar en stötvågsskada orsakad av en luft- eller vattenstötvåg) och för att beräkna kvasistatiskt övertryck i luftfyllda volymer och därmed avgöra om komponenter skadas av övertrycksfasen. Komponenter som skadas enligt denna tryckmodell kan ges hål av en storlek som beror på komponentens tålighet och laddnings läge och storlek eller enbart klassas som utslagna. Genom att modellen kan generera hål i komponenter används den även för stora strukturer som t.ex. ett fartygsskrov. Tryckpåverkan genereras av en detonerande laddning över eller under vattenytan.
- Stöt - Stötmodellen används för att bedöma om en komponent, t.ex. en radioapparat monterad på en vägg, skadas av för höga accelerationer eller förskjutningar överförda via fartygsstrukturen och komponentens infästning, orsakade av en detonerande laddning under vattenytan. Komponenter klassas som utslagna eller inte efter en simulering.
- Whipping - Whippingmodellen beräknar fartygsglobala böjsvängningar efter en undervattensdetonation. Modellen beräknar spänningar vid värdäck och kölen vilka jämförs med i indata ansatta gränsvärden. Whipping anses skada fartyget om gränsvärdena överskrider i någon beräkningspunkt vid någon tidpunkt.

Denna kortfattade genomgång avser att belysa de möjligheter som finns med AVAL idag och ge några förslag på förbättringar som ökar möjligheterna i framtiden.



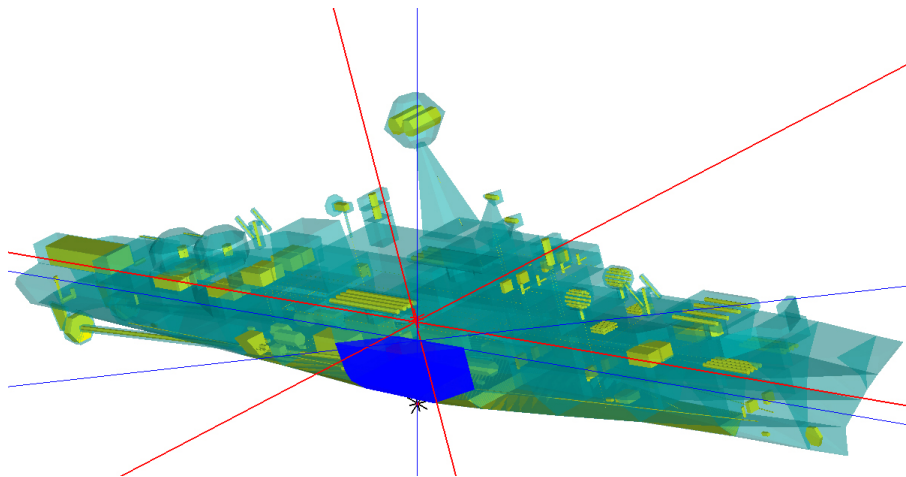


## 2 Tryckverkan från undervattensladdning

För att kunna hantera verkan som sker i en stor volym (t.ex. temperatur, rökfylld, vattenfylld och övertryck) till skillnad från penetrationsskador som inträffar på komponenter som träffas definieras i AVAL speciella beräkningsvolym. Väggarna på dessa beräkningsvolym kan ges egenskaper för att motstå tryckbelastningar till en viss nivå innan de brister och trycket kan passera genom dem.

Vid en undervattensdetonation beräknas avståndet mellan laddningen och alla tryckkänsliga volymväggar under vattenytan som är riktade mot laddningen. Ett kritiskt avstånd bestäms utifrån laddningens storlek, korrektionsfaktorer för djup, avstånd och vinkel mellan ytans normalriktning och riktningen till laddningen samt väggens angivna egenskaper. Om avståndet till laddningen är mindre än det beräknade kritiska avståndet kommer ett hål att skapas i väggen, genom vilket vatten kan strömma in och fylla delar av fartyget. Det kommer även att genereras en tryckbelastning innanför väggen.

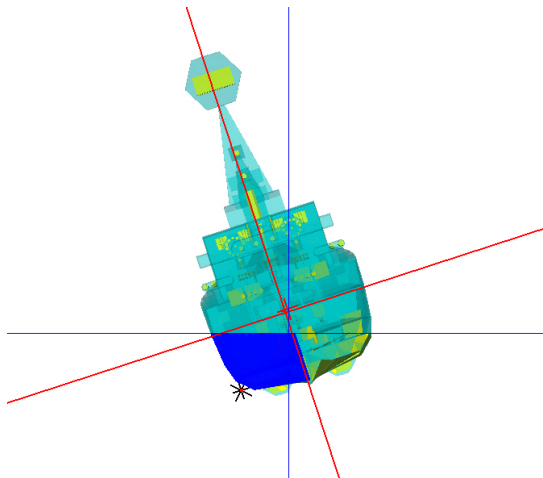
Då vatten strömmar in i fartyget kommer, förutsatt att tillräckliga indata finns, fartygets flytegenskaper bestämmas över tiden med hänsyn taget till länsystemets kapacitet att pumpa bort inströmmande vatten. Komponenter ombord på fartyget kan skadas av att hamna under vatten, vilket i sin tur kan påverka fartygets status. Det går även att ansätta en kritisk lutningsvinkel för fartyget vid vilken fartyget bedöms förlorat eller kapsejsat. Data för flytstabilitet anges som indata till AVAL. Figur 2.1 och 2.2 visar resultatet från en simulering där en undervattensladdning orsakat ett hål i skrovet och vatten har strömmat in i fartyget.



Figur 2.1: Exempel på simulering där skrovet skadats av en undervattensladdning och vatten strömmat in i fartyget. Det röda koordinatsystemet är målfixt och följer fartygets eventuella lutning, det blåa är globalt och ligger alltid horisontellt/vertikalt.

### 2.1 Begränsningar i modellen

Eftersom data för volymväggarnas tryckbelastningstålighet ges för respektive yta är det mycket svårt om ens möjligt att direkt ta hänsyn till eventuella förstärkningar på skrovets insida. Styvheten hos dessa måste på något sätt fördelas



Figur 2.2: Exempel på simulering där skrovet skadats av en undervattensladdning och vatten strömmat in i fartyget. Det röda koordinatsystemet är målfixt och följer fartygets eventuella lutning, det blå är globalt och ligger alltid horisontellt/vertikalt.

över skrovsidorna. Vidare bör tåligheten även vara beroende av ytans storlek, något som oftast försummas då samma skadekriterium sätts på i princip samtliga ytor av samma material och tjocklek. Även den geometriska representationen av ytan spelar roll, då skadans d.v.s. hålets storlek begränsas till ytans storlek. Det kan därmed inträffa fall där vatteninströmningen underskattas på grund av en för detaljerad geometrisk beskrivning.

## 2.2 Förbättringsmöjligheter

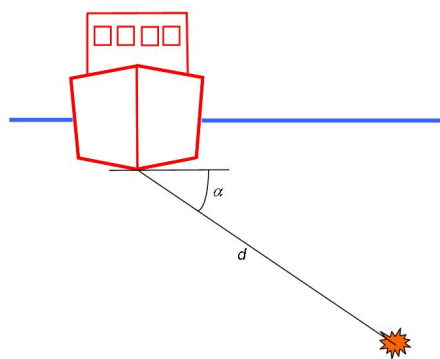
Dagens tryckmodell i AVAL har stora begränsningar genom att den inte beräknar tryck och impuls utan baserar stötbelastningsdelen på avstånd, laddningsstorlek och motsvarande gränsvärden ansatta som skadekriterier för komponenter. En halvempirisk modell som ska ge belastningar i form av tryck och impulser är under utveckling. Det är dock osäkert hur denna modell kan anpassas för en undervattenstillämpning.

Att skapa en metodik och underlag för att ansätta skadekriterier både för skrovet och för komponenter ombord på fartyget skulle underlätta målbeskrivningsarbetet. På motsvarande sätt skulle arbetet underlättas om en metodik och underlag för att ansätta data till tryckmodellen fanns tillgänglig.

### 3 Stötblastning på komponenter från undervattensladdning

Acceleration och förskjutning av komponenter som följd av en undervattensdetonation bestäms via så kallade stötfaktorer. Stötfaktorerna,  $K_{sf}$ , unika för respektive komponent baserat på komponentens läge i fartyget, bestäms av laddningens storlek,  $M$ , avståndet,  $d$ , mellan kölen under den aktuella komponenten och laddningen samt vinkeln,  $\alpha$ , till laddningen, se figur 3.1.

$$K_{sf} = \frac{\sqrt{M}}{d} \frac{1 + \sin(\alpha)}{2} \quad (3.1)$$



Figur 3.1: Illustration av några ingående parametrar för att bestämma stötfaktorer.

Med hjälp av en transmissionsfaktor,  $\gamma$ , bestäms sedan komponentens maximala förskjutningshastighet,  $v_{max}$ , enligt ekvation 3.2. Transmissionsfaktorn anges som indata och beskriver hur stötvågen propagerar genom fartygsstrukturen och påverkar komponenten. Frekvensen,  $\omega$ , med vilken komponenten svänger efter en stötblastning bestäms enligt ekvation 3.3 utifrån dess massa,  $m$ , och en fjäderkonstant,  $k$ , som representerar komponentens infästningsanordning (och till viss del även fartygsstrukturen). Värdet på  $\gamma$  ligger ofta i intervallet  $1 < \gamma < 10$ , där de lägre värdena gäller för lättare flexibelt upphängd elektronik och de högre för tunga fast installerade komponenter som t.ex. motorer.

$$v_{max} = \gamma K_{sf} \quad (3.2)$$

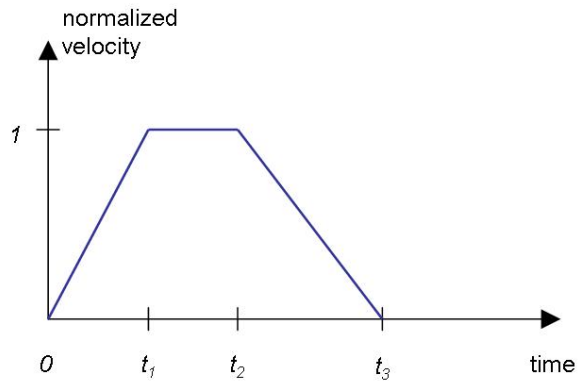
$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (3.3)$$

Förskjutningens hastighet och svängningsfrekvensen används därefter för att bestämma en normaliserad förskjutningsfunktion baserad på fyra tidpunkten, varav den första är tiden 0 s och de övriga,  $t_1 - t_3$ , anges i indata.

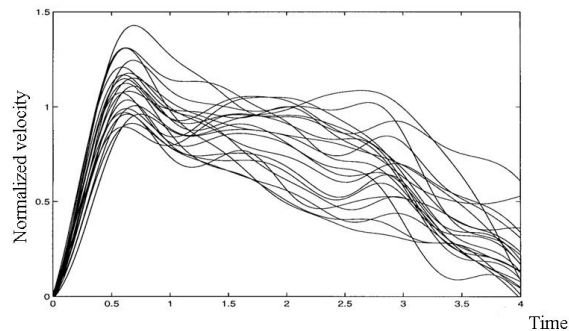
Den beräknade förskjutningen jämförs med komponentens angivna kritiska förskjutningar (i två vertikala riktningar, uppåt respektive nedåt) för att bestämma om och i så fall när komponenten skadas på grund av förskjutning. De maximala förskjutningarna i kombination med svängningsfrekvensen ger komponentens maximala acceleration, enligt ekvation 3.5, vilken även denna

jämförs med i indata angiven kritisk acceleration för att bestämma om komponenten skadas på grund av acceleration. Förskjutningarna beräknas enligt ekvation 3.4. Se även figur 3.2 som beskriver en normaliserad förenklad förskjutningskurva och figur 3.3 som visar en mer verklighetsnära förskjutningskurva.

$$\begin{aligned}
 D(t) &= -\frac{v_{max}}{\omega^2 t_1} (1 - \cos(\omega t)) & t \leq t_1 \\
 D(t) &= \frac{D(t_1)}{\cos(\omega t_1)} \cos(\omega t) & t_1 < t \leq t_2 \\
 D(t) &= \left( D(t_2) + \frac{v_{max}}{(t_2 - t_3)\omega^2} \right) \frac{1}{\cos(\omega t_2)} \cos(\omega t) - \frac{v_{max}}{(t_2 - t_3)\omega^2} & t_2 < t \leq t_3 \\
 D(t) &= \frac{D(t_3)}{\cos(\omega t_3)} \cos(\omega t) & t_3 < t
 \end{aligned} \tag{3.4}$$



Figur 3.2: Normaliserad hastighet orsakad av stöbelastning.



Figur 3.3: Experimentell mätning av hastighet orsakad av stöbelastning.

$$A_{max} = \omega^2 \max[|D_{max}|, |D_{min}|] \tag{3.5}$$

### **3.1 Begränsningar i modellen**

Att modellen är enkel och därmed har begränsningar i noggrannhet är uppenbart, men det stora problemet och därmed största osäkerhetsfaktorn är att det är svårt att ansätta de fartygsspecifika transmissionsfaktorerna som beskriver hur stötbelastningen propagerar genom fartyget till komponenten. Fullskaleförsk mot fartyg kan ge underlag för att ansätta transmissionsfaktorerna och en simuleringsbaserad metod vore värdefull.

### **3.2 Förbättringsmöjligheter**

Ett stöd för att ansätta data på komponenter och stötfaktorer behövs.

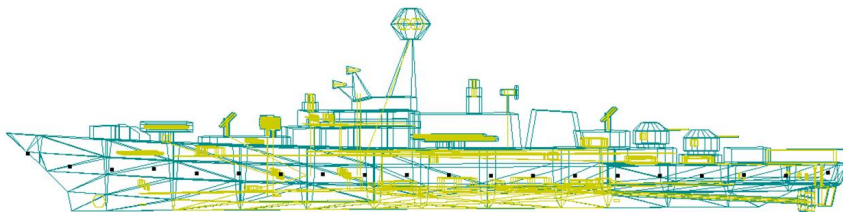


## 4 Whipping

Whipping-modellen beskriver fartygets globala böjsvängningar efter en undervattensdetonation. Modellen kallas i AVAL 'Hull girder vibration'. Böjsvängningarna uppkommer på grund av att spränggaserna skapar en bubbla i vattnet som växer och kollapsar med viss periodicitet varvid omkringliggande vatten ges en hastighet ut från bubblan eller in mot den kollapsade bubblan. Genom att vattnet kommer att ha en hastighet mot eller från fartygets skrov belastas detta. Även stötvågen som genereras av detonationen kan ge ett tillskott till böjsvängningarna beroende på avståndet mellan laddning och fartyg.

För att beräkna whipping i AVAL måste fartygsskrovet delas i ett antal lika långa delar, där antalet bland annat bestäms utifrån skrovets komplexitet. För varje del antas massan vara koncentrerad till mitten av den aktuella sektionen och sektionerna beskrivs av balkelement som kan hantera krafter och böjande moment. För varje balkelement bestäms tröghetsmoment och effektiv skjувarea och utifrån dessa i kombination med materialdata för skrovmaterialen skapas en styvhetsmatris för hela fartyget. Dessa data anges som indata till AVAL som del av målbeskrivningen.

Notera att balkmodellen inte är geometriskt kopplad till den geometriska beskrivningen av målet. Punkterna där massan är angiven kan visas i samma bild som målbeskrivningen, se figur 4.1, men det hanteras i AVAL som två helt separata modeller.



Figur 4.1: Fartyg med markerade masspunkter för balkmodellen som används av whipping-modellen.

Den del av whipping-modellen som hanterar den pulserande bubblan baseras på energikonservering i det oscillerande systemet, vilket ger ett antal differentialekvationer som kan integreras och ge den resulterande vattenaccelerationen som funktion av tiden. Belastningen på balkbeskrivningen av fartygsskrovet beror av avstånden mellan laddningen och de olika balkelementen. Gasbubblans karaktäristik beror i modellen av laddningsstorlek och detonationsdjup, påverkan av avstånd mellan laddningen och mål, havsyta eller botten ingår inte i modellen. För att beräkna de dynamiska lasterna mot fartygsskrovet tas även hänsyn till rörelsemängden i den medsvängande vattenmassan intill skrovet, vilken anges som indata.

Via en kraftekvation bestäms därefter spänningarna vid väderdäck och köl och dessa beräknade spänningar jämförs med ansatta gränsvärden som anges som indata till modellen. Om något av gränsvärdena överskrids kan man i skadeutvärderingen via målbeskrivningens felträd få reda på att en whipping-relaterad skada uppkommit.



## 4.1 Begränsningar i modellen

Whipping-modellen tar inte hänsyn till lokala belastningar och därav följande effekter på fartygsskrovet. Bubblan med spränggaser antas förenklat vara sfärisk, vilket inte stämmer då bubblan är närmre än ca. dubbla maximala bubbelradien från någon begränsningsyta. Vidare beaktas endast den vertikala delen av vibrationerna i fartyget och det är endast belastningar längs kölen och väderdäck som beräknas.

Whipping-modellen är inte kopplad till den geometriska beskrivningen av målet utan baseras helt på balkmodellen. Detta medför att belastningen inte kan skada komponenter i målbeskrivningen på samma sätt som andra fenomen i AVAL gör. För att hantera skador orsakade av whipping måste en specialmodell utnyttjas i målbeskrivningens felträd, vilken skapar något som kan kallas en virtuell felträdshändelse. Denna felträdshändelse kan sedan användas i felträdet, lämpligen på högsta nivån och ingå som del i en 'Fartyget förlorat' händelse. Det är dock möjligt att whipping-orsakade skador får olika konsekvenser beroende på var i fartyget skadan uppstår, men det kan inte hanteras idag.

## 4.2 Förbättringsmöjligheter

Den whipping-relaterad rörelsen i fartyget kan idag inte orsaka förskjutnings- eller accelerationsskador på komponenter (enligt kapitel 3) då balkmodellen är separerad från den geometriska målbeskrivningen. Dessa två modeller bör vara knutna till varandra, mer än genom att samma laddning ger båda sorternas påverkan.

För att kunna hantera detonationer som sker nära skrovet behöver modellen förändras, bland annat genom att ta hänsyn till stora lokala belastningar.

Att alltid klassa ett fartyg som förlorat då whipping-skador uppkommit är en grov förenkling, som skulle kunna förfinas i en framtida modellversion.

Beskrivningen av modellen i AVAL Reference Manual bör förbättras, det finns bland annat variabler som inte beskrivs i variabelistan vilket gör modellen svårare att förstå. Dagens beskrivning av modellen hjälper inte heller målbeskrivaren att välja hur balkmodellen ska delas upp och hur de olika parametrarna ska ansättas, något som skulle kunna förbättras.

## 5 Slutsatser och rekommendationer för fortsatt arbete

AVAL har idag modeller för att hantera en del av de verkansformer som förekommer vid undervattensdetonationer t.ex. modeller för stötverkan, böjsvängning och tryckverkan. Ingen av dessa modeller är anpassad för att hantera en närverkande laddning. Stötverkan är något som förknippas med avståndsverkan vilket (med avståndsverkan avses en laddning som detonerar på mer än 2ggr den maximala bubbelradien), till del, även gäller böjsvängning. Det sistnämnda uppstår även då laddning detonerar inom den ovan angivna gränsen men till det fallet är modellen inte anpassad. Tryckverkan har ingen inbyggd begränsning vad avser närverkande laddning men är en modell som kräver mycket arbete för att initiera indata. Även böjsvängningsmodellen kräver en arbetsinsats i ett externt program för att generera indata till AVAL. Ingen av modellerna innehåller någon tydlig begränsning för att inte hantera typmålet ubåt. Dock så är modellerna framtagna med ytfartyg i åtanke varför ett framtida arbete bör kontrollera modellerna för detta fall. Modellen för tryckverkan kräver indata i form av maximalt tryck som en panel tål varför det krävs indata i form av antingen experimentella data, uppskattningar eller beräkningar. En kombination av det sistnämnda tillsammans med ett fåtal validerande experiment kan utgöra en rimlig kompromiss i ett framtida arbete. En utvidgning av AVAL till att hantera närverkande laddningar innebär ett långsiktigt experimentellt, teoretiskt samt beräkningsmässigt arbete vilket har pågått en tid inom ett Trilateralt samarbete med Holland och Kanada. De flesta beräkningsmodellerna i AVAL kan vidareutvecklas både för att ge bättre, noggrannare resultat samt för att ge användaren stöd i ansättandet av data som modellen kräver. Båda punkterna är del av ett ständigt förbättrande av en kod. En annan beröringspunkt är det arbete som genomförs inom ramen för projektet Stryktålighet örlogsfartygsom FMV driver och där syftet bl.a. är att skapa designhandböcker som stöd för utvärdering av ytfartygs förmåga att tåla vapenverkan.