



Initialstrålning som verkansform med fokus på neutroner

KARIN ANDGREN

Karin Andgren

Initialstrålning som verkansform med fokus på neutroner

Titel	Initialstrålning som verkansform med fokus på neutroner
Title	Effects of initial radiation with focus on neutrons
Rapportnr/Report no	FOI-R--5004--SE
Månad/Month	Augusti
Utgivningsår/Year	2020
Antal sidor/Pages	36
ISSN	1650-1942
Kund/Customer	Försvarsdepartementet
Forskningsområde	CBRN-frågor
FoT-område	Inget FoT-område
Projektnr/Project no	A405620
Godkänd av/Approved by	Åsa Scott
Ansvarig avdelning	CBRN-skydd och säkerhet
Exportkontroll	Innehållet är granskat och omfattar ingen information som är underställd exportkontrollagstiftningen

Detta verk är skyddat enligt lagen (1960:729) om upphovsrätt till litterära och konstnärliga verk, vilket bl.a. innebär att citering är tillåten i enlighet med vad som anges i 22 § i nämnd lag. För att använda verket på ett sätt som inte medges direkt av svensk lag krävs särskild överenskommelse.

This work is protected by the Swedish Act on Copyright in Literary and Artistic Works (1960:729). Citation is permitted in accordance with article 22 in said act. Any form of use that goes beyond what is permitted by Swedish copyright law, requires the written permission of FOI.

Sammanfattning

Resultat från beräkningar med KlangVerk [3] redovisas och verkansradier för olika detonationshöjder och verkansformer illustreras. För en oskyddad person utomhus har värmestrålningen klart störst verkansradie för förlorad stridsduglighet. För person i stridsvagn har initialstrålningen störst verkansradie för förlorad stridsdugligheten om laddningen är under ~100 kt och för laddningar över ~100 kt är det verkansradien för luftstöt vågen som är störst.

Därefter redovisas resultat för vapen med förhöjd strålning (ibland kallat neutronbomb). De värden som återfinns i en FOA-tidning från 1977 återskapades. Det framgår att det sannolikt antagits att fusionsdelen för ett vapen med förhöjd strålning utsöndrar 35 % av energin i form av stötvåg och värmestrålning. Värdet är för lågt, då det antagits att alla neutroner som skapas vid fusioner lämnar vapenresterna i form av initialstrålning. Trots att verkan från värmestrålning och stötvåg underskattats blir skillnaden i verkansradie för ett kärnvapen med förhöjd strålning och ett vanligt kärnvapen måttlig.

Faktorer som påverkar verkansradien för initialstrålningsskador har undersökts närmare genom simuleringar i MCNP [13]. Både fukthaltig luft och detonation ovanför vatten medför minskad verkansradie för initialstrålningsskador. Avslutningsvis undersöktes neutronaktivering av stridsvagnsmaterialet och dess strålskärmande förmåga. En rimlig skyddsfaktor är 0,25 vid neutronbomb och neutronaktivering medför inte någon akut påverkan på stridsdugligheten.

Nyckelord: Kärnvapen, initialstrålning, neutron, verkansradie

Summary

Results from calculations using KlangVerk are presented and damage radii for different detonation heights and weapon effects are illustrated. Heat radiation gives the largest damage radius for loss of combat effectiveness outdoors. Inside a tank, the initial radiation has the largest damage radius if the yield is less than ~100 kt. If the yield is larger, the blast wave gives the largest damage radius.

In addition, results are presented for enhanced radiation weapons. Damage radii presented in a FOA-paper from 1977 were recreated. It appears that the assumption was made that 35% of the energy was released as blast wave and heat radiation. To reach this low percentage one has to assume that all of the fusion neutrons leave the weapon residues as initial radiation, which is not the case. Despite the underestimation of effects of blast wave and heat radiation, the difference in damage radius for an enhanced radiation weapon and a regular nuclear weapon is moderate.

Simulations using MCNP show that both humid air and detonation above water gives smaller damage radius for initial radiation. A reasonable shielding factor for a tank is 0.25 and neutron activation of the tank does not imply any direct limitation of the combat effectiveness.

Keywords: Nuclear weapon, initial radiation, neutron, damage radius

Innehåll

1	Inledning	7
2	Dominerande skadeverkansform	8
2.1	Fritt i luft	8
2.1.1	Joniserande strålning.....	8
2.1.2	Luftdetonation	9
2.1.3	Värmestrålning.....	11
2.1.4	Luftstöt våg	12
2.1.5	Fritt i luft - Sammanfattning.....	13
2.2	Skyddat utrymme - Exempel stridsvagn	13
2.2.1	Joniserande strålning.....	13
2.2.2	Värmestrålning.....	14
2.2.3	Luftstöt våg	14
2.2.4	Stridsvagn - Sammanfattning.....	16
2.3	Skyddat utrymme - Exempel flervåningshus i betong.....	16
2.3.1	Joniserande strålning.....	16
2.3.2	Värmestrålning.....	16
2.3.3	Luftstöt våg	17
2.3.4	Flervåningshus - Sammanfattning	18
2.4	Sammanfattning	18
2.5	Diskussion	18
3	ERW – enhanced radiation weapon	20
3.1	Utformning.....	20
3.1.1	Laddningsstyrka.....	21
3.2	Jämförelse av verkansytor och verkansradier	24
3.3	Stråldosens fördelning.....	26
3.4	Inverkan av strålskärm (luft eller stridsvagn)	26
3.4.1	Multiplikationsfaktor och simuleringsdetaljer	27
3.4.2	Resultat.....	27
3.5	Neutronaktivering	29
3.6	Sammanfattning	31
4	Slutsats	33
5	Fortsatta studier	34
6	Referenser.....	35

1 Inledning

Direktverkan av kärnvapen är ett av många områden som legat i dvala under Totalförsvarets strategiska paus. I syfte att återta samt utveckla kunskap om direktverkan från kärnvapen startades 2018 ett nytt projekt inom området. Med direktverkan menas här verkan under den första minuten efter detonationen och innefattar formerna joniserande initialstrålning, termisk strålning, stötvåg (luft, mark och vatten) och elektromagnetisk puls (EMP).

Inom uppdraget har initialstrålningens direktverkan i närområdet tidigare studerats [1]. I föreliggande rapport diskuteras initialstrålningens verkan jämfört med verkansformerna värmestrålning och stötvåg på längre avstånd från detonationspunkten. Vid jämförelse mellan de olika verkansformerna har skadekriterier för när en person kan anses vara begränsat tjänstbar använts. Ofta används termen (förlorad) stridsduglighet, vilken i föreliggande rapport har samma betydelse som begränsat tjänstbar. Initialstrålningen för en viss laddningsstyrka beror på kärnladdningens utformning. I den senare delen av rapporten studeras effekterna från vapen utformade för att maximera initialstrålningen mer ingående.

I kapitel 2 presenteras resultat från en genomgång av olika verkansformers förhållande till varandra. Resultaten är baserade på beräkningar med KlangVerk [3]. Resultat från en liknande studie presenteras i [2]. Till skillnad från de resultat som presenteras i [2] redovisas här verkansradier för olika detonationshöjder och en mer ingående beskrivning av skyddsfaktorer för stridsvagn och flerfamiljshus görs.

I det tredje kapitlet studeras effekterna från ett vapen med förhöjd strålning. Syftet är att utreda om initialstrålningens verkansradie kan ökas med vapen av denna typ.

I samtliga fall redovisas verkansradierna för de olika verkansformerna separat. Kombinerad verkan där ett mål på ett visst avstånd erhåller skador av betydelse från mer än en verkansform studeras inte.

2 Dominerande skadeverkansform

I detta kapitel utreds vid vilken detonationshöjd och laddningsstyrka som verkansradien för förlorad stridsduglighet bestäms av initialstrålningen. De direktverkansformer som är relevanta i sammanhanget är joniserande initialstrålning, värmestrålning och stötvåg. Resultaten som presenteras nedan är baserade på beräkningar utförda med KlangVerk [3] och motsvarande implementation i Python [6].

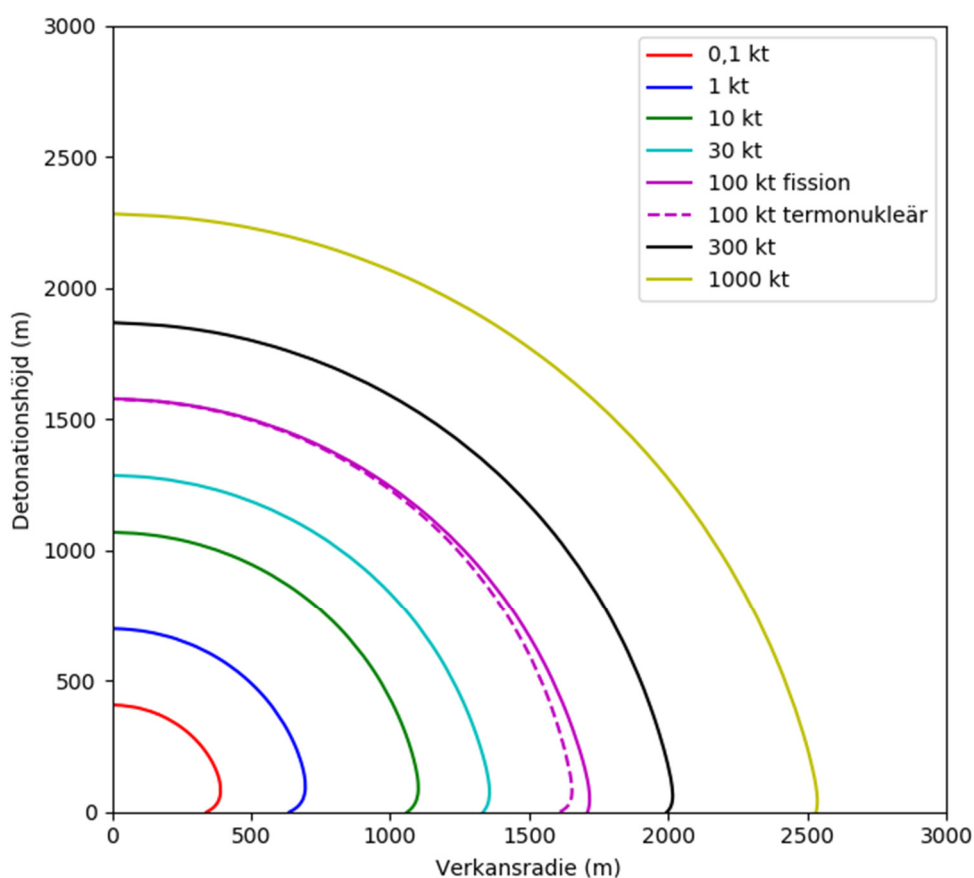
I det nedanstående avsnittet presenteras först skadeverkan fritt i luft. Därefter följer avsnitt med skadeverkan i stridsvagn och i flervåningshus.

2.1 Fritt i luft

2.1.1 Joniserande strålning

I dokumentet NATO-ATP-3.8.1 vol 1 "CBRN DEFENSE ON OPERATIONS- VOLUME I" finns en tabell (tabell 10F-4) som beskriver stridsdugligheten vid olika stråldoser. Ur tabellen kan till exempel utläsas att i intervallet 8,3 Gy till 30 Gy antas personens stridsduglighet vara förlorad för icke-krävande uppgifter efter sju timmar. Enligt samma tabell kan persons stridsduglighet vara förlorad inom tre minuter efter att personen erhållit en stråldos på mer än 80 Gy. Här antas en övre gräns på 10 Gy för stridsduglighet, eller begränsad tjänstbarhet. Den relativa biologiska effekten (RBE-faktorn) för neutroner antas vara 1.

Nära detonationen dominerar neutrontosen och på längre avstånd från detonationen är det dosen från gammastrålning som dominerar. Fotoner från neutroninteraktioner i luft (till exempel inelastisk spridning eller neutroninfångning) ingår i gammadosen.



Figur 1. Verkansradie för dosen 10 Gy vid olika detonationshöjder och laddningsstyrkor.

Med hjälp av de Python-funktioner [6] som finns framtagna för att återskapa tabellerna i Wigg [7] har nollpunktsavståndet (eller verkansradien) för 10 Gy beräknats för olika laddningsstyrkor. Resultaten presenteras i figur 1. I enlighet med KlangVerk antas laddningsstyrkor till och med 100 kt vara av fissionstyp och laddningsstyrkor över 100 kt antas vara termonukleära. Det finns egentligen ingen tydlig gräns för när en kärnladdning kan antas vara termonukleär. Brytpunkten på 100 kt är antagligen något hög för moderna kärnvapen. Fissionsladdningen motsvarar laddningstyp III i CNW [4] och fusionsladdning motsvarar laddningstyp VII. Mer om den parametrering som valts för de olika laddningstyperna finns i [8]. För termonukleära laddningar adderas stråldos från gammastrålning från fissionsprodukter för en laddningsstyrka motsvarande hälften av den totala laddningsstyrkan. Valet av andel av laddningen som utgörs av fission är avgörande för den resulterande dosen, som domineras av gammastrålning från fissionsprodukter, på de avstånd för termonukleära laddningar som återges i figur 1. Verkansradien för förlorad stridsduglighet är som störst i det fall detonationen sker nära marken. Vid mycket låga explosionshöjder (< 100 m) sker dock en viss minskning av verkansradien.

2.1.2 Luftdetonation

Enligt ”*Capabilities of Nuclear Weapons*” [4] avsnitt 1-5 definieras en luftdetonation som att den sker på en sådan höjd att vapnets verkan inte påverkas nämnvärt av markytan. Luftdetonationshöjden beror alltså på vilken verkansform som studeras.

Om till exempel stötvåg är av intresse sker en luftdetonation på en sådan höjd att den i marken reflekterade stötvågen inte hinner ifatt den primära stötvågen *ovanför* eldklotet. Den minsta höjden för att kravet ska vara uppfyllt är $H = 49 \times W^{0,35}$ [4], där H är höjden i meter och W är laddningsstyrkan i kt. Påverkan av marken på stötvågen i höjd med eldklotet eller nedanför ingår alltså inte i definitionen ovan. Den reflekterade markstötvågen påverkar den resulterande stötvågen under eldklotet vid betydligt högre höjder än vad som anges av formeln ovan.

För värmestrålning sker en luftdetonation på en sådan höjd att värmen nära marken inte påverkas av ytfenomen, som värmeöverföring till marken. Den minsta höjden som krävs för att värmestrålningen inte ska påverkas av markytan är $H = 55 \times W^{0,4}$, vilket är detsamma som eldklotsradien vid luftdetonation.

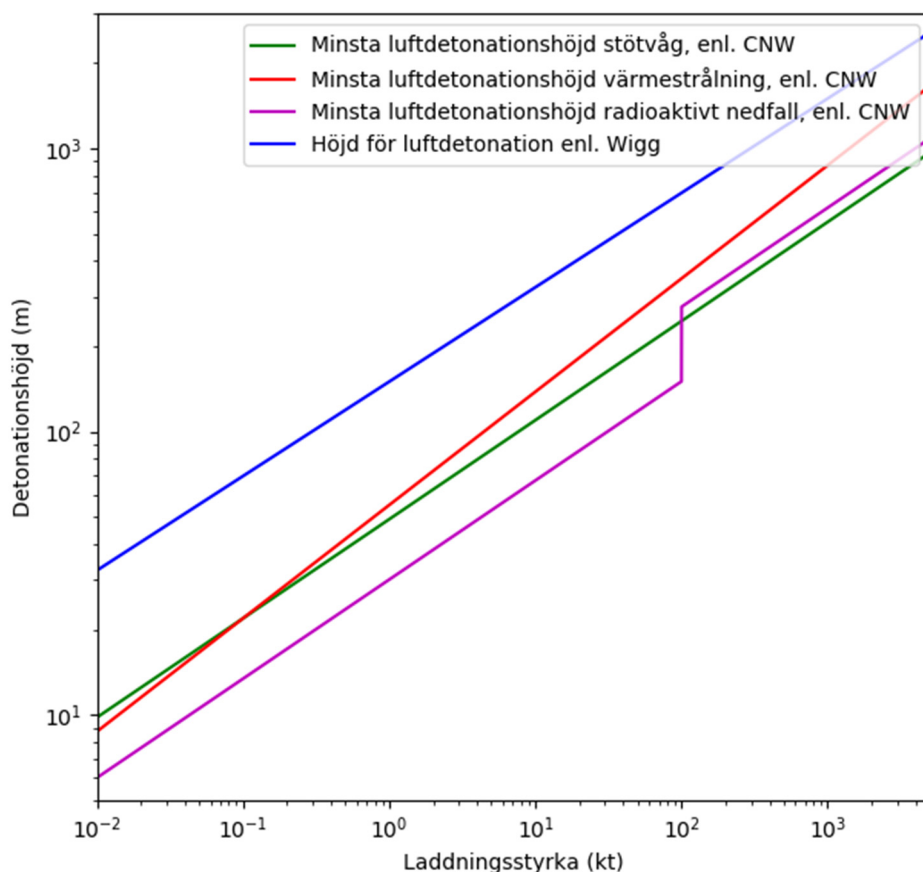
Den minsta luftdetonationshöjd som behövs för att radioaktivt nedfall (inte en direktverkansform) inte ska bli relevant i militära sammanhang är $H = 30 \times W^{0,35}$ och för laddningar över 100 kt är höjden $H = 55 \times W^{0,35}$. I ”*The Effects of Nuclear Weapons*” [5] 2.128 står istället att den minsta höjden för när radioaktivt nedfall inte blir ett allvarligt problem är $H = 55 \times W^{0,4}$, vilket även är den minsta höjd som anges för värmestrålning i CNW (se ovan). I det fall samtliga tre verkansformer ovan är av intresse blir alltså den *minsta höjden* för luftdetonation $H = 55 \times W^{0,4}$ (i det fall laddningsstyrkan överstiger 1 kt).

En skalningslag kan användas för att beräkna en ekvivalent höjd för tryckvåg vid olika sprängstyrkor. Enligt ekvation 3.62 i ENW [5] är den ekvivalenta höjden för en luftexplosion $H = H_1 \times W^{1/3}$. I manualen till KlangVerk [3] står det på s. 22 att: ”Ett ofta använt standardvärde för luftexplosion är $H_1 = 150 \text{ m}$ ”. I Wigg [7] används samma formel, $H = 150 \times W^{1/3}$, för att bestämma luftdetonationshöjd. Ursprunget till formel för bestämning av luftdetonationshöjd är oklart, men den motsvarar antagligen höjden, för given laddningsstyrka, där god verkan uppnås mot ett typiskt mål som kan vara ett standardhus. Formeln är alltså inte till för att beskriva minsta möjliga luftdetonationshöjd utan beskriver höjden där god verkan uppnås. Minsta möjliga luftdetonationshöjd och detonationshöjd (för god verkan) enligt Wigg för olika laddningsstyrkor redovisas i tabell 1.

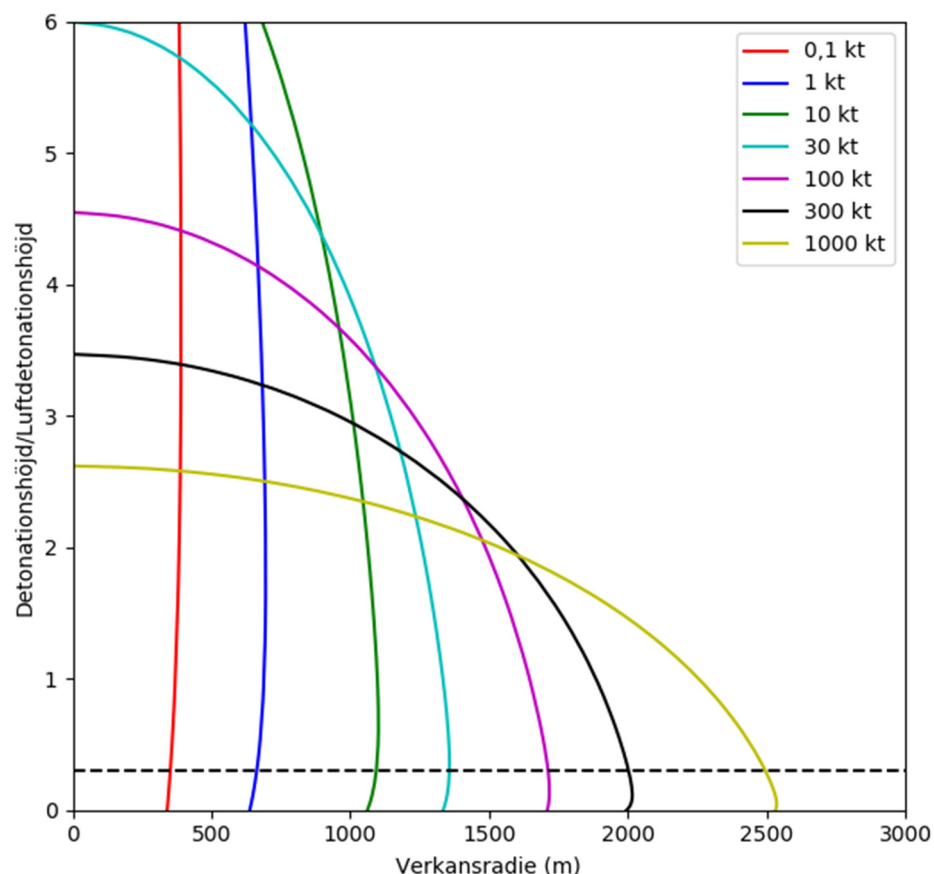
Tabell 1. Luftdetonationshöjd för olika laddningsstyrkor.

Laddningsstyrka (kt)	Minsta luftdetonationshöjd enl. CNW 1-5 och ENW 2.128	Luftdetonationshöjd enl. Wigg
0,1	22	70
1	55	150
10	138	323
30	214	466
100	346	696
300	537	1004
1000	870	1500

Ur tabell 1 kan utläsas att luftdetonationshöjden definierat enligt Wigg [7], som väntat, är högre än den lägsta höjd för vilken vapnets verkan inte påverkas nämnvärt av markytan. I figur 2 visas luftdetonationshöjd som funktion av laddningsstyrka. Den röda kurvan visar den minsta höjden för att detonationen, enligt CNW [4] och ENW [5], ska definieras som en luftdetonation. Den blå kurvan visar den ekvivalenta detonationshöjden enligt [5] och [7].

**Figur 2.** Detonationshöjd som funktion av laddningsstyrka.

I figur 3 presenteras verkansradien för 10 Gy där detonationshöjden anges i andelar av minsta luftdetonationshöjd. Det vill säga, om laddningsstyrkan är 100 kt motsvarar 1 en detonationshöjd på 346 m. Motsvarande höjd för laddningsstyrkan 10 kt är 138 m. I figuren visas den höjd som motsvarar minsta luftdetonationshöjden $\times 0,3$ med en streckad linje. Denna höjd medför inte det största möjliga nollpunktsavståndet, men kan i flera sammanhang vara en approximation för maximal verkansradie som är god nog.



Figur 3. Verkansradie för 10 Gy för olika kvoter (detonationshöjd/minsta luftdetonationshöjd).

2.1.3 Värmestrålning

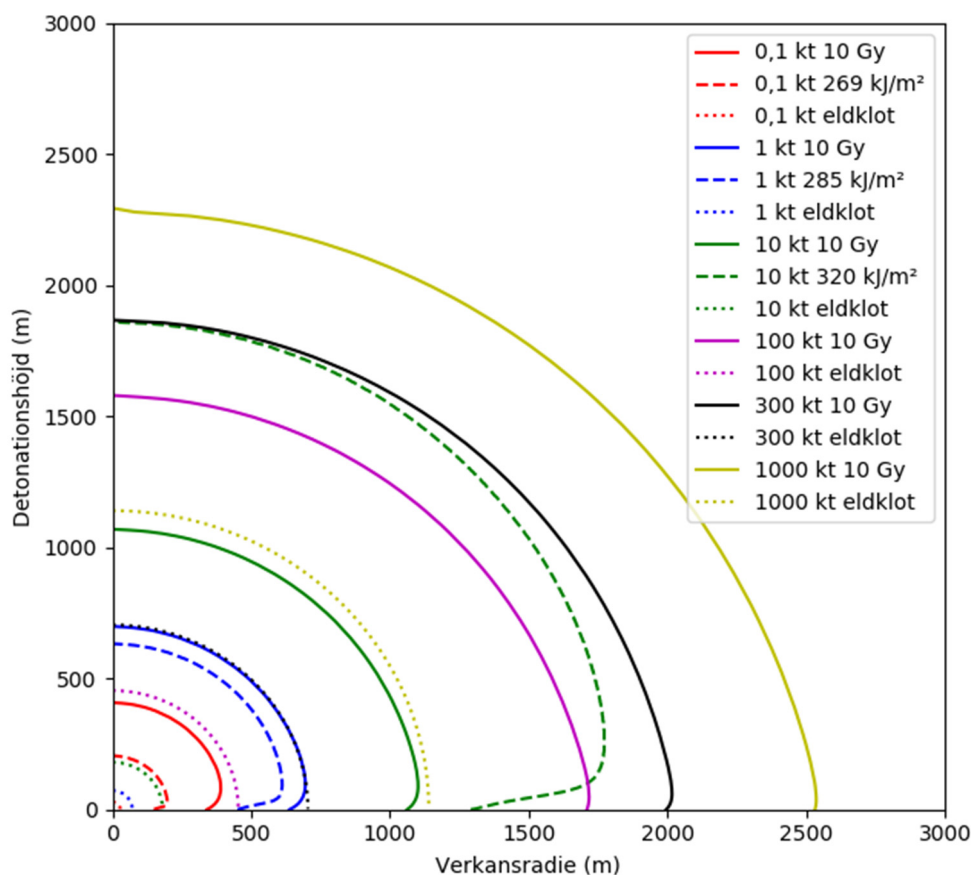
Verkansradie för tredje gradens brännskada för laddningsstyrkor och detonationshöjder enligt figur 4 beräknades. Sikten antogs vara 20 000 m, vilket motsvarar god sikt, i samtliga beräkningar. Den värmestrålning som motsvarar tredje gradens brännskada valdes enligt tabell 6.6 i Wigg [7] och visas även nedan i tabell 2.

Tabell 2. Värmestrålning som ger tredje gradens brännskada vid olika laddningsstyrkor.

Laddningsstyrka (kt)	Luftdetonationshöjd (m)	Bestrålning som ger tredje gradens brännskada (kJ/m ²)
0,1	70	269
1	150	285
10	323	320
100	696	383
300	1004	417
1000	1500	452

I figur 4 visas verkansradie för tredje gradens brännskada från värmestrålning (streckade linjer) och stråldosen 10 Gy från joniserande strålning (heldragna linjer). Dessutom visas radien för eldklotet vid ytdetonation, vilken beräknas genom att eldklotsradien vid luftdetonation ($R = 55 \times W^{0.4}$) justeras för att laddningsstyrkan vid ytdetonation fördelas i en hälften så stor luftvolym. Eldklotsradien vid ytdetonation blir därmed $R = 55 \times (2W)^{0.4}$, se ENW stycke 2.127. Markytan som täcks av eldklotet minskar

egentligen med detonationshöjden. Här antas dock konservativt att markytan som befinner sig i eldklotet är konstant och densamma som vid ytdetonation.



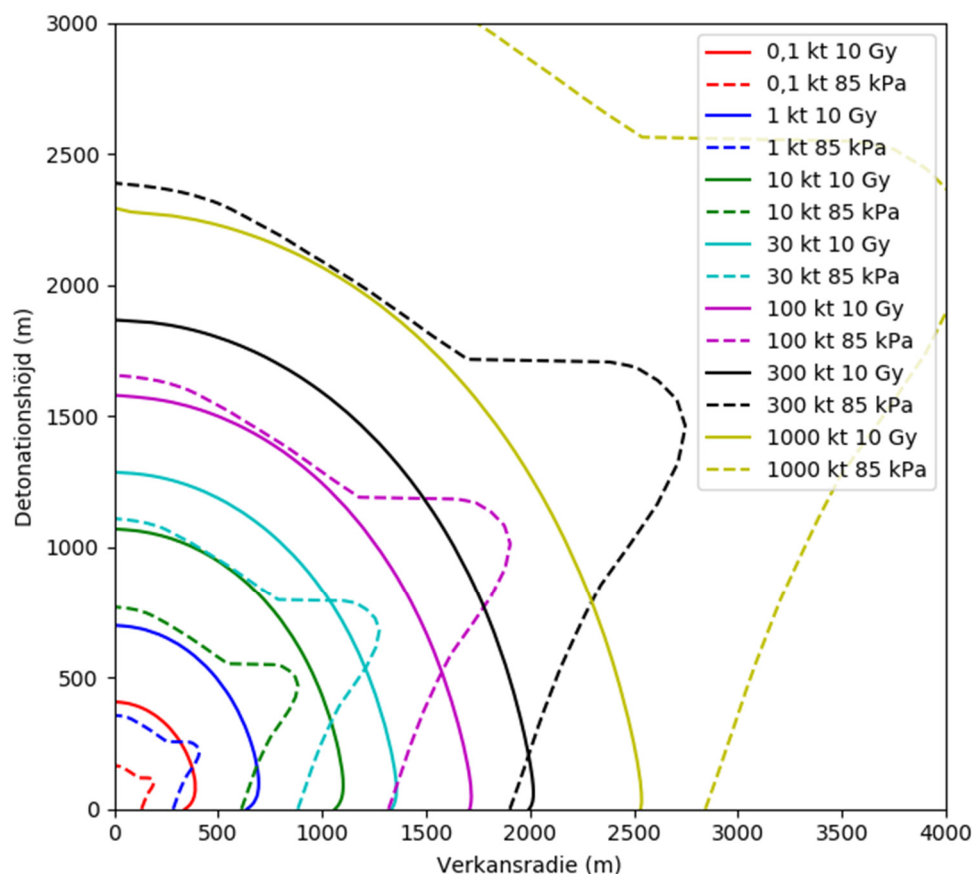
Figur 4. Verkansradie vid olika detonationshöjder och laddningsstyrkor. Heldragna linjer motsvarar en stråldos på 10 Gy och streckade linjer motsvarar värmestrålningen för tredje gradens brännskada (285 kJ/m² för 1 kt). Verkansradier för $W > 10$ kt ryms inte i figuren. Radien för eldklotet för de olika laddningsstyrkorna visas med en prickad linje.

Vid mycket låga laddningsstyrkor (< 1 kt) är verkansradien för skador till följd av initialstrålning större. För laddningsstyrkor över 1 kt är det värmestrålningen för tredje gradens brännskada som har störst verkansradie. Skillnaden är som störst för ett termionukleärt vapen med en hög detonationshöjd. I det fall detonationshöjden för ett vapen med laddningsstyrka 1 Mt överstiger 2500 m når inte den joniserande strålningen ner till marken, till skillnad från värmestrålningen. Verkansradien för värmestrålning vid en marknära detonation på 100 kt och däröver är mer än 3000 m och ryms därför inte i figuren. Radien för eldklotet, för en viss laddningsstyrka, är betydligt mindre än verkansradier för initialstrålning och värmestrålning.

2.1.4 Luftstöt våg

En viss stöt vågparameter (till exempel dynamiskt tryck, statiskt övertryck, tryck vågens varaktighet eller vindhastighet) ger upphov till en viss skada. För att exempelvis oskadliggöra en person kan det, beroende på laddningsstyrkan, vara olika stöt vågparameterar som är begränsande. Skadekriterier för luftstöt våg brukar därför översättas till statiskt övertryck från laddningsstyrkan 1 kt. Sedan anges hur motsvarande verkansradie ska skalas om för andra laddningsstyrkor (se Wigg [7] avsnitt 3.2). Enligt tabell 3.10 i Wigg blir en stående person begränsat tjänstbar vid en luftstöt våg med 85 kPa statiskt övertryck från en detonation med laddningsstyrkan 1 kt. Trycket motsvarar en verkansradie (eller nollpunktsavstånd) på 370 m vid luftexplosion. Denna radie skalas sedan om enligt:

$R = R_1 \times W^k$, där $k = 1/3$ och $W^{1/3} = \frac{H}{H_1}$. I figur 5 visas verkansradie för luftstöt-våg (streckade linjer) och stråldos från joniserande strålning (heldragna linjer). Vid laddningsstyrkor över ungefär 30 kt kan verkansradien för skador till följd av luftstöt-vågen vara större än verkansradien för initialstrålningen, beroende på detonationshöjd. Enligt figur 4 och figur 5 är det dock värme-strålningen som är begränsande vid laddningsstyrkor över 1 kt.



Figur 5. Verkansradie vid olika detonationshöjder och laddningsstyrkor. Heldragna linjer motsvarar en stråldos på 10 Gy och streckade linjer motsvarar stötvågstrycket för en begränsat tjänstbar stående person (85 kPa).

2.1.5 Fritt i luft - Sammanfattning

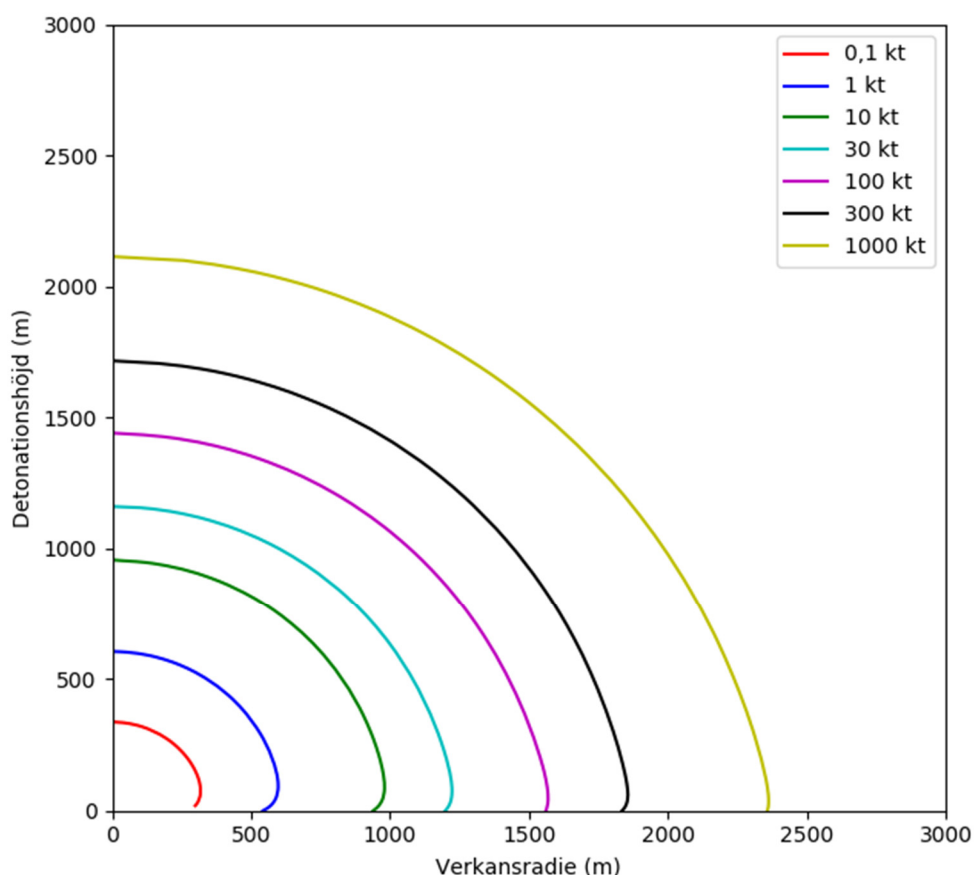
För mycket låga laddningsstyrkor (< 1 kt) är verkansradien för förlorad stridsduglighet som störst till följd av initialstrålning. För laddningsstyrkor över 1 kt är det värme-strålningen som har störst verkansradie. Verkansformen joniserande initialstrålning har störst betydelse i utrymmen som skärmar värme-strålningen, till exempel bakom en betongvägg, i en stridsvagn eller annat skärmat utrymme. I följande avsnitt diskuteras olika skade-verkansformer i skyddade utrymmen.

2.2 Skyddat utrymme - Exempel stridsvagn

2.2.1 Joniserande strålning

Enligt avsnitt 6.5.2 i [3] antas att stridsvagn har en skyddsfaktor 0,5. Det innebär att stråldosen för en person i stridsvagnen är halverad jämfört med en oskyddad person. Antagandet överensstämmer med den halveringstjocklek för neutronstrålning som antas i tabell

712 i [9]. Enligt tabellen är halveringstjockleken i stål för neutronstrålning 10 cm. Halveringstjockleken i stål för fotonstrålning är endast 4 cm. En stridsvagn kan antas ha en godstjocklek motsvarande ca 10 cm stål. Nollpunktsavståndet för 10 Gy i stridsvagn (det vill säga 20 Gy för oskyddad person) visas i figur 6.



Figur 6. Verkansradie för dosen 20 Gy vid olika detonationshöjder och laddningsstyrkor.

Det minsta lutande avståndet som modellen är giltig för är 300 m [3]. Detta medför att kurvan för 0,1 kt i figur 6 inte når helt ner till höjden 0 m. När detonationshöjden är 0 m för en laddning på 0,1 kt är den absorberade dosen drygt 15 Gy för ett avstånd på 300 m.

2.2.2 Värmestrålning

Värmestrålningen antas förstöra stridsvagnen i det fall den befinner sig i eldklotet. Om stridsvagnen är utanför eldklotet antas att värmen inte når igenom stridsvagnens skal. Radien för eldklotet vid ytdetonation för olika laddningsstyrkor kan utläsas i figur 4.

Initialstrålningen gör att stridsdugligheten förloras inom eldklotsradien, vilket gör att värmestrålningen inte förändrar den från initialstrålningen bestämda verkansradien för person i stridsvagn.

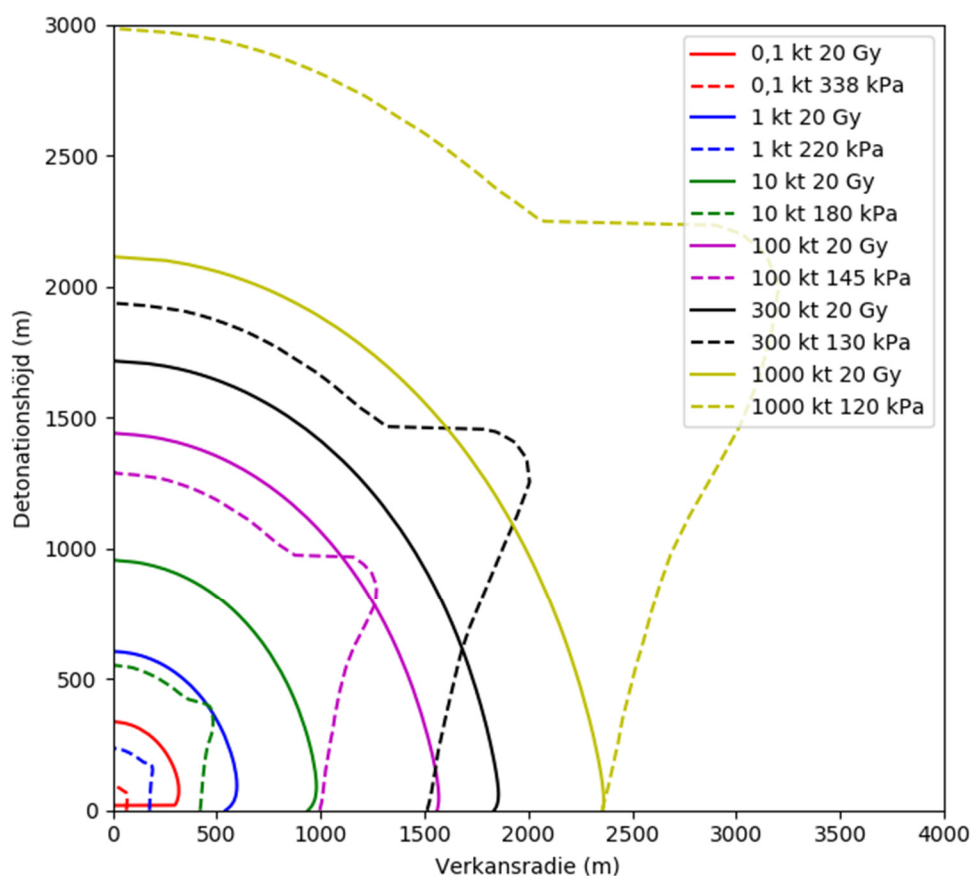
2.2.3 Luftstöt våg

Enligt kapitel 3.3 i [7] bedöms personer bli begränsat tjänstbara i de fall då fordonen blir måttligt skadade. Enligt tabell 1 i [3] och tabell 3.13 i [7] blir en stridsvagn måttligt skadad vid en luftstöt våg med 220 kPa statiskt övertryck från en detonation med laddningsstyrkan 1 kt. Trycket motsvarar en verkansradie på 192 m. Denna radie skalas sedan om med laddningsstyrkan enligt: $R = R_1 \times W^k$, där $k = 0,5$ för $W < 1$ kt och $k = 0,4$ för $W > 1$ kt. Motsvarande tryck vid den bestämda verkansradien bestäms därefter med KlangVerk. I

tabell 3 anges de statistiska övertryck som motsvarar måttlig skada på stridsvagn för olika laddningsstyrkor.

Tabell 3. Verkansradier och dess motsvarande statistiska övertryck för måttlig skada på stridsvagn.

Laddningsstyrka (kt)	Måttlig skada stridsvagn (statistiskt övertryck kPa)	Detonationshöjd (m)	Verkansradie (m)
0,1	338	70	61
1	220	150	192
10	180	323	482
100	145	696	1211
300	130	1004	1880
1000	120	1500	3043



Figur 7. Verkansradie vid olika detonationshöjder och laddningsstyrkor. Heldragna linjer motsvarar en stråldos på 20 Gy och streckade linjer motsvarar måttlig skada på stridsvagn (220 kPa vid 1 kt laddningsstyrka).

I figur 7 visas verkansradier vid olika detonationshöjder och laddningsstyrkor för 20 Gy vilket motsvarar 10 Gy inuti stridsvagnen, med heldragna linjer och motsvarande avstånd för måttlig skada på stridsvagn (220 kPa vid 1 kt) med streckade linjer. Vid laddningsstyrkor under 100 kt är det den joniserande initialstrålningen som är dimensionerande för stridsdugligheten för en person i stridsvagn, oavsett detonationshöjd. För en laddningsstyrka på 300 kt är initialstrålningen dimensionerande vid detonationshöjder under 600 m. Vid högre detonationshöjder är det istället luftstöt vågen som är dimensionerande. Verkan från markstöt vågen är betydligt mer lokal. Till exempel är kraterradien 234 m för en laddning på 1000 kt.

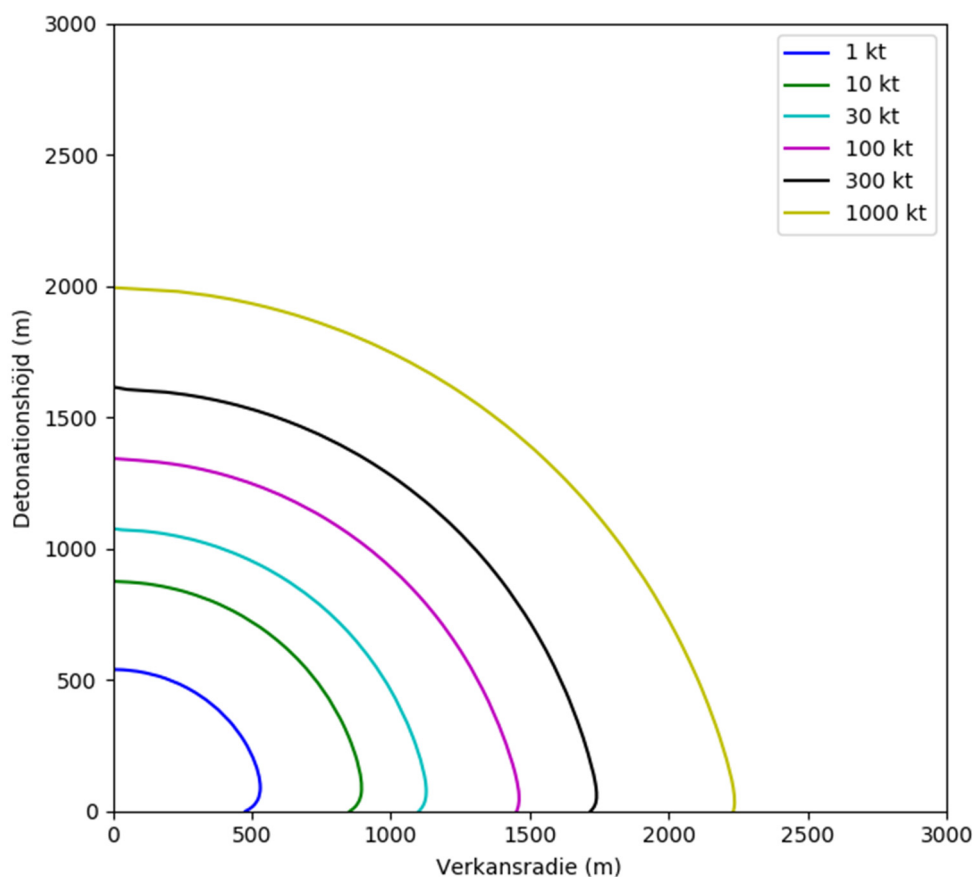
2.2.4 Stridsvagn - Sammanfattning

Vid laddningsstyrkor under ~100 kt är verkansradien för förlorad stridsduglighet som störst till följd av initialstrålning. För kraftiga laddningsstyrkor över ~1000 kt är det istället luftstöt vågen som har störst verkansradie. För laddningsstyrkor mellan 100 kt och 1000 kt har initialstrålningen störst verkansradie vid lägre detonationshöjder, medan luftstöt vågen har störst verkansradie vid högre detonationshöjder. Vare sig värmestrålning, eller markstöt våg påverkar verkansradien för förlorad stridsduglighet för en person i stridsvagn.

2.3 Skyddat utrymme - Exempel flervåningshus i betong

2.3.1 Joniserande strålning

Enligt avsnitt 6.5.2 i [3] antas att ett flervåningshus har en skyddsfaktor 0,3 på våningsplan ovan jord. Verkansradien för 10 Gy på våningsplan i flervåningshus (det vill säga 33 Gy för oskyddad person) visas i figur 8.



Figur 8. Verkansradie för dosen 33 Gy vid olika detonationshöjder och laddningsstyrkor.

Vid laddningsstyrkan 0,1 kt är det lutande avståndet som ger 33 Gy mindre än 300 m och modellen är därmed inte giltig i detta fall.

2.3.2 Värmestrålning

Initialstrålningen gör att personens stridsduglighet går förlorad inom eldklotsradien, vilket gör att värmestrålningen inte förändrar den från initialstrålningen bestämda verkansradien för personskador i flervåningshus. Effekter av instrålning genom fönster samt brandförlopp studeras inte här.

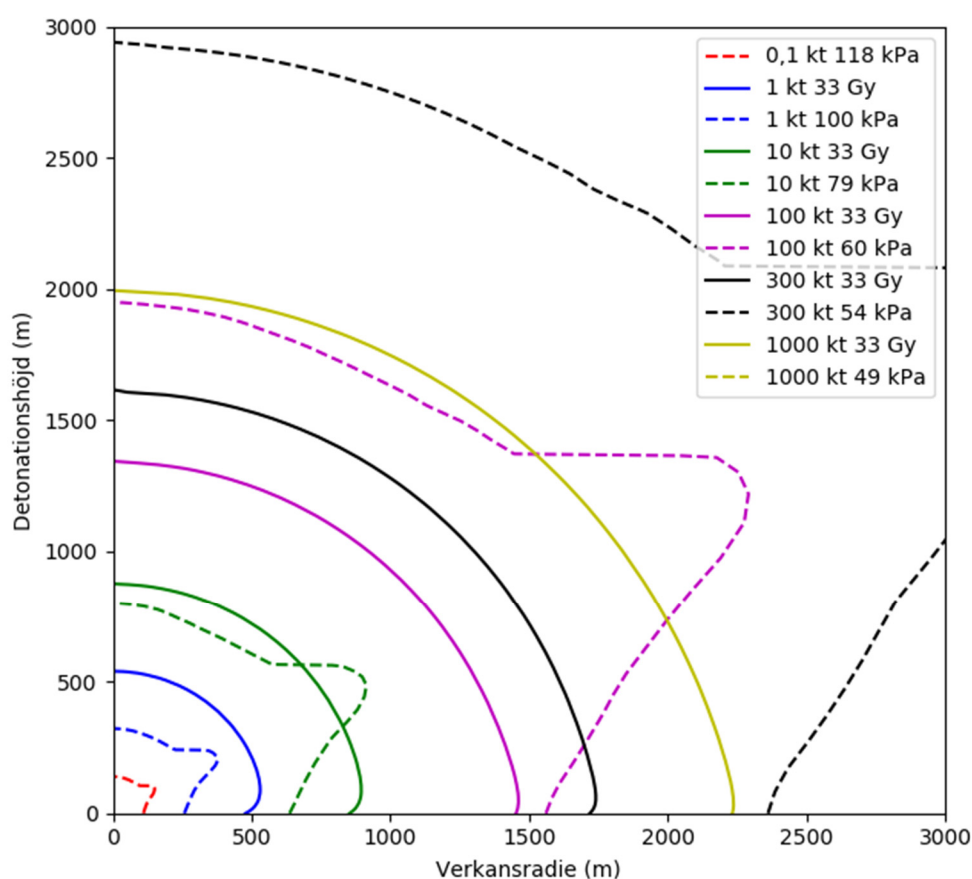
2.3.3 Luftstöt våg

Enligt tabell 1 i [3] förstörs flervåningshus i betong vid en luftstöt våg med 100 kPa statiskt övertryck från en detonation med laddningsstyrkan 1 kt. Trycket motsvarar en verkansradie på 343 m. Denna radie skalas sedan om med laddningsstyrkan enligt:

$R = R_1 \times W^k$, där $k = 0,38$ och detonationshöjden skalas om enligt $H = H_1 W^{1/3}$. Motsvarande tryck vid den bestämda verkansradien och detonationshöjden bestäms därefter med KlangVerk. I tabell 4 anges de statistiska övertryck som motsvarar svår skada på flervåningshus för olika laddningsstyrkor.

Tabell 4. Verkansradier och dess motsvarande statistiska övertryck för svår skada på flervåningshus.

Laddningsstyrka (kt)	Svår skada flervåningshus (statiskt övertryck kPa)	Detonationshöjd (m)	Verkansradie (m)
0,1	118	70	143
1	100	150	343
10	79	323	823
100	60	696	1974
300	54	1004	2996
1000	49	1500	4735



Figur 9. Verkansradie vid olika detonationshöjder och laddningsstyrkor. Heldragna linjer motsvarar en stråldos på 33 Gy och streckade linjer motsvarar förstört flervåningshus (100 kPa vid 1 kt laddningsstyrka).

I figur 9 visas verkansradier vid olika detonationshöjder och laddningsstyrkor för 33 Gy, motsvarande 10 Gy i flervåningshuset, med heldragna linjer och motsvarande avstånd för svår skada på flervåningshus (100 kPa vid 1 kt) med streckade linjer. Vid laddningsstyrkor under 10 kt är det för de flesta detonationshöjder den joniserande initialstrålningen

som har störst verkansradie för förlorad stridsduglighet för en person i flervåningshus. Vid större laddningsstyrkor är verkansradien för att huset förstörs större än radien för akuta skador till följd av initialstrålningen.

2.3.4 Flervåningshus - Sammanfattning

Vid laddningsstyrkor under 10 kt medför den joniserande strålningen stridsdugligheten förloras. För större laddningsstyrkor är det istället att huset förstörs av luftstöt vågen som ger den största verkansradien. Vare sig eldklotet, eller markstöt vågen påverkar verkansradien. Brandförlopp i stadsbebyggelse förväntas dock ha avgörande betydelse för överlevnaden, se till exempel [11] och [12].

2.4 Sammanfattning

För person utomhus har värmestrålningen klart störst verkansradie för förlorad stridsduglighet. För person i stridsvagn är verkansradien för initialstrålning dimensionerande för laddningar under 100 kt och för laddningar över 100 kt är det verkansradien för luftstöt vågen som är dimensionerande. För person i flervåningshus är skyddet mot initialstrålning bättre, medan skyddet mot luftstöt våg är sämre, jämfört med person i stridsvagn. Om laddningen är under 10 kt är initialstrålningen dimensionerande och om laddningen överstiger 10 kt är luftstöt vågen dimensionerande.

Verkansradier för initialstrålning är baserade på laddningstyper III (fissionsladdning) och VII (fusionsladdning) i CNW [4]. Frågan uppstår då om det är möjligt att utforma kärnvapen som ger en större verkansradie för effekter av joniserande strålning. I kapitel 3 diskuteras verkan från vapen med förhöjd strålning.

2.5 Diskussion

Enligt ovan är skyddsfaktorn bättre för en person som befinner sig i flervåningshus jämfört med en person i stridsvagn. Det innebär att strålskärmen för en person i hus motsvarar mer än 10 cm stål, vilket är vad som antagits för stridsvagn. I till exempel [10] beskrivs de antaganden som görs vid bestämning av skyddsfaktor 0,3 i flervåningshus. Skyddsfaktorn bestämdes i fyra punkter på varje våningsplan. Fönster, ytterväggar, väggar mellan lägenheter och bjälklag inkluderades för att bestämma absorptionen för både neutron- och fotonstrålning. Ytterväggen i betonghus antogs vara 20 cm tjock. En standardutformning för våningsplan användes och i varje punkt där skyddsfaktorn bestämdes representerades en person av en träffyta som delats in i 15 delytor. Den totala träffytan var $1,7 \times 0,3 \text{ m}^2$. Skyddsfaktorn bestämdes därefter som ett medelvärde för de fyra beräkningspunkterna, de 15 delytorna samt 24 horisontalvinklar.

Resultaten är alltså medelvärdesbildade både för person i inhomogent strålfält och för flera personer som befinner sig på olika platser i huset. En person har därmed skyddsfaktor 0,3 i *medel* i ett flervåningshus. Skyddsfaktor för stridsvagn är istället mer representativ för just den person som befinner sig i stridsvagnen.

Om hjärnan hos en person i flerfamiljshuset är oskärmad och får en absorberad dos på 10 Gy och resten av kroppen är helt skärmad, kommer skyddsfaktorn för denna person att bli $1/15 = 0,07$. Om hjärnan får en absorberad dos på 10 Gy hjälper det dock föga att resten av kroppen fått 0 Gy. En skyddsfaktor på 0,3 kan användas för befolkning i flervåningshus, men inte för en enskild individ. Däremot kan skyddsfaktor 0,5 i stridsvagn användas både för individ och som ett medelvärde för flera individer. Det innebär att de verkansradier som presenteras för initialstrålning i flervåningshus inte kan användas för att bestämma när en viss individ, eller en liten grupp av individer, är stridsduglig(a). Vid en viss verkansradie har personer mottagit motsvarande 10 Gy i medel, och det finns därmed sannolikt personal som fortfarande är stridsduglig. Verkansradien för att all personal i flervåningshus förlorar stridsdugligheten är betydligt större än den verkansradie som presenteras för person i flervåningshus ovan.

För stridsvagnen gäller däremot verkansradien för att all personal i stridsvagn förlorar stridsdugligheten. Skyddsfaktorn på 0,5 är rimlig, eftersom den motsvarar en skärmning på 10 cm stål. Om fler detaljer kring stridsvagnens konstruktion är kända, som om det till exempel finns en bor-liner, kan skyddsfaktorn bestämmas mer noggrant.

3 ERW – enhanced radiation weapon

I kapitel 2 presenteras radier för de olika verkansformerna beräknade med standardvapen enligt KlangVerk [3]. I detta kapitel presenteras först en bakgrund till vapen med förhöjd strålning, så kallade *ERW* eller *Enhanced Radiation Weapons*, och därefter resultat från olika beräkningar med både KlangVerk, MCNP [13] och FISPACT [14] i syfte att uppskatta effekterna av denna vapentyp.

Neutronbomber eller vapen med förhöjd strålning är en idé som är nästan lika gammal som idén om termonukleära vapen. Konceptet lämnade prototypstadiet under den senare delen av 1970-talet och det finns/fanns två huvudsakliga användningsområden

1. antingen som ett taktiskt slagfältsvapen eller
2. som en antiballistisk stridsspets.

Amerikanerna utvecklade stridsspetsarna W-66 och W-70 på 1970-talet [15]. Tanken med W-66 är att den monteras på en antiballistisk robot och att neutronflödet gör att motståndarens kärnvapen desarmeras genom att delar av materialet fissionerar i förväg. Stötvågen har liten effekt på höga höjder, medan effekten av joniserande strålning tvärtom förbättras, eftersom absorption och spridning minskar till följd av den lägre densiteten. Motståndarens kärnvapen kan med denna typ av vapen alltså slås ut på hög höjd där atmosfären är tunn. Sådana stridsspetsar förbandssattes 1975, men pensionerades snart därefter [15].

Den sista versionen av W70 var W70-3 och hade en laddningsstyrka på 1 kt. Vapnet färdigställdes 1981 och var tänkt att användas på kortdistansroboten MGM-52 Lance, men förbandssattes aldrig i Europa. Systemet pensionerades 1992 [16].

Dessutom tillverkades två typer av artillerigranater (W79 och W82). Även dessa pensionerades i samband med Sovjetunionens sönderfall [15]. I Sovjetunionen/Ryssland används eventuellt fortfarande stridsspetsar med förhöjd strålning på antiballistiska roboten ABM-3 Gazelle (även kallad 53T6) [16].

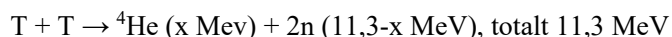
3.1 Utformning

Trots den flitiga debatten om neutronvapen under 1970- och 1980-talen är det sparsamt med teknisk information i den öppna litteraturen. Resultat i form av verkansradier för vapen med förhöjd strålning har presenterats av bland annat FOA på 1970-talet. Nedan följer enklare fysikaliska resonemang kring hypotetiska laddningar och tillhörande laddningsstyrkor som kan ha legat till grund för de beräkningar vars resultat till exempel presenteras i en artikel i FOA-tidning nr 5 från 1977 [17] med titeln: *"Den nygamla neutronbomben"*. Resultat från jämförelseberäkningar redovisas i avsnitt 3.2 nedan.

Ett sätt att öka initialstrålningen kan vara att den omkringliggande tampen på fusionsdelen av ett kärnvapen görs i ett neutrongenomskinligt material eller neutronmultiplicerande material, till exempel beryllium som ökar antalet neutroner genom reaktionen: ${}^9\text{Be}(n,2n){}^4\text{He}$. Den fusionsreaktion som ger flest högenergetiska neutroner per reaktion är:



Det finns andra alternativa fusionsreaktioner som ger neutroner, till exempel:



Även om antalet neutroner är fler är deras sammanlagda energi lägre än i DT-reaktionen. Det är inte trivialt att bestämma energifördelningen hos de utgående partiklarna, se till exempel [18]. Dessutom är tvärsnittet för TT-reaktionen mycket lägre än tvärsnittet för DT-reaktionen, se till exempel [19]. Vid en antagen temperatur på $2 \times 10^7 \text{ K}$ är till exempel reaktionsratskonstanten för DT $2,6 \times 10^{-23} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ medan reaktionsratskonstanten för TT

är $8,6 \times 10^{-26} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. För de resonemang, uppskattningar och simuleringsresultat som presenteras nedan antas att fusionsmaterialets strålkälla består av neutroner från DT-reaktioner.

3.1.1 Laddningsstyrka

Laddningsstyrkans fördelning på de olika formerna stötvåg, värmestrålning och joniserande initialstrålning, beror på kärnladdningens utformning. Nedan beskrivs kortfattat fördelningen av laddningsstyrka för fission, fusion och vapen med förhöjd strålning.

Fission

Fördelningen av fissionsenergi från fissioner av ^{239}Pu är ungefär enligt tabell 5 **Tabell 5**.

Tabell 5. Fördelning av energi vid fission av ^{239}Pu .

	MeV
Kinetisk energi hos klyvningsprodukter	176
Prompt gammastrålning	8
Kinetisk energi hos prompta neutroner	6
Total omedelbar energifrigörelse	190
Betapartiklar	5
Antineutrinos	7
Fördröjd gammastrålning	5
Total energi från klyvningsprodukter	17

När ett vapens laddningsstyrka, eller *yield*, bestäms menas vanligtvis den omedelbara energifrigörelsen, se till exempel ENW 1.45, det vill säga 190 MeV för ett plutonium-baserat vapen. Den omedelbara energifrigörelsen i tabell 5 kan jämföras med den som antas, oberoende av fissionerande nuklid, i ENW 1.45 på 180 MeV.

I varje fission av ^{239}Pu skapas tre nya neutroner i medel, men eftersom neutroner både går åt i kedjereaktionen och även absorberas i vapenmaterialet kan det inte antas att samtliga neutroner som skapas lämnar vapnet. Till exempel visade kriticitetsexperiment utförda på 1950-talet med uranklot (Godiva) eller plutoniumklot (Jezebel) att 1,7 neutroner per fission lämnar klotet [20]. Enligt de resultat som rapporteras i [1] beräknades antalet neutroner som lämnar klotet också till 1,7 per fission. Ett kt TNT antas motsvara $4,184 \times 10^{12} \text{ J}$, vilket betyder att vid 1 kt ren fissionsladdning lämnar $2,3 \times 10^{23}$ neutroner laddningen. Antalet är drygt dubbelt så stort som det värde som presenteras i CNW tabell 5-1 på $9,97 \times 10^{22}$ neutroner per kt. Orsaken kan vara att de data som redovisas i CNW beskriver spektrumet utanför hela vapnet, det vill säga inklusive eventuellt explosivämne, övriga vapendelar och behållare.

Medelenergin för en fissionsneutron är 2 MeV och, eftersom inte samtliga tre neutroner förväntas lämna vapenmaterialet, är förhållandet mellan neutronstrålningsenergi och kinetisk energi hos klyvningsprodukterna $(2 \times 1,7)/176$ för en fissionsladdning.

Fusion

Den energi som frigörs per DT-fusion är 17,6 MeV, eller $2,82 \times 10^{-12} \text{ J}$, där neutronen har 14,1 MeV och heliumkärnan 3,5 MeV. Förhållandet mellan neutronstrålningsenergi och kinetisk energi hos heliumkärnan är därmed som mest 14,1/3,5 för en fusionsladdning. Vid fusion frigörs $1,48 \times 10^{24}$ neutroner per kt, eller 1 neutron/17,6 MeV, vilket kan jämföras med 1,7 neutroner/190 MeV vid fission. Därmed kan upp till sex gånger fler neutroner frigöras per kt TNT vid fusion av deuterium och tritium jämfört med fission ($190 \text{ MeV}/(17,6 \text{ MeV} \times 1,7) \approx 6$).

För samma mängd frigjord energi kan det alltså skapas sex gånger fler neutroner vid fusion jämfört med fission. Andelen av den omedelbart frigjorda energin som utgörs av

neutronstrålning ökar från 2 % vid fission ($1,7 \times 2 \text{ MeV}/190 \text{ MeV}$) till 80 % ($14,1 \text{ MeV}/17,6 \text{ MeV}$) vid fusion.

Resonemanget ovan är förenklat i den meningen att det antas att de neutroner som skapas vid fission eller fusion lämnar vapenresterna utan att minska i energi. I avsnitt II i [20] antas att 1/3 av neutronenergin vid DT-fusion förloras inom eldklotet, vilket innebär att istället för 80 %, är det omkring 50 % av den totala omedelbara energifrigörelsen som utgörs av neutronstrålning. Mer om svårigheterna i att uppskatta neutronspektrum utanför eldklotet finns till exempel i [21]. Resultaten ska dock tas med en nypa salt bland annat eftersom den antagna vapenkonstruktionen, som presenteras i figur 1 i [21], har oklart ursprung.

Vapen med förhöjd strålning

Ett ERW kan inte enbart bestå av fusioner. I likhet med alla termionukleära laddningar innehåller den ett förstasteg i form av en fissionsladdning. Som exempel bestod strids-spetsen W-70 av 60 % fusionsenergi och 40 % fissionsenergi [22].

Styrkan på fissionsladdningen bedöms vara åtminstone 1 kt i [17]. Följande resonemang stödjer bedömningen: Antag att kinetisk energi överförs till inre energi, vilket ger

$$\begin{aligned}\frac{1}{2}mv^2 &= V \frac{3}{2}(n_i + n_e)k_B T \rightarrow \\ v^2 &= \frac{3(n_i + n_e)k_B T}{\rho} \rightarrow \\ v &= \sqrt{\frac{3N_p N_A k_B T}{A}}.\end{aligned}$$

Implosionshastigheten vid temperaturen $T = 2 \times 10^7 \text{ K}$ blir då $6 \times 10^5 \text{ m/s}$. N_p är antalet joner och elektroner per molekyl. För DT är $N_p = 4$. A är atomvikten som är ungefär 5 för DT-gas. Antalstätheten (cm^{-3}) för joner är n_i och antalstätheten för elektroner är n_e . Anta att andrasteget väger 10 kg. För att nå ovanstående implosionshastighet i andrasteget måste då förstastegets styrka vara ungefär 1 kt, under antagande att värmestrålningen utgör knappt hälften av den totala laddningsstyrkan. Värmestrålningens andel av den totala fissionsladdningsstyrkan utgör en separat frågeställning. För de beräkningar vars resultat presenteras i föreliggande rapport antas ett neutronvapen bestående av 1 kt fissionsenergi och 4 kt fusionsenergi.

Fördelningen på de verkansformer som är relevanta i det initiala skedet (stötvåg, värmestrålning och joniserande strålning) presenteras i tabell 6 för luftdetonation. Andelen av den totala energifrigörelsen för ett fissionsvapen som utgörs av stötvågen är typiskt 0,5 och motsvarande för värmestrålningen är typiskt 0,35 [23]. Den omedelbara energifrigörelsen är i sin tur ungefär 90 % av den totala frigörelsen, vilket medför att omkring 6 % av den totala energifrigörelsen utgörs av initialstrålning, vilket stämmer relativt väl med de värden som anges i tabell 5. Fördelningen mellan stötvåg och värmestrålning antas vara samma för fusionsdelen av vapnet som för fissionsdelen. Om det antas att 80 % av energifrigörelsen i sekundärsteget utgörs av neutronstrålning (initialstrålning) erhålls de värden som presenteras under kolumnen med titeln ERW (Arbman) i tabell 6. Om istället det värde för initialstrålningen på 50 % som anges i [20] antas erhålls de värden som presenteras under ERW (Los Alamos).

Tabell 6. Andel av den omedelbara energifrigörelsen.

	Fission	ERW (Arbman)	ERW (Los Alamos)	Rysk film ¹
Stötvåg + värmestrålning	0,94	$0,94 \times 0,2 + 0,2 \times 0,8 = 0,35$	$0,94 \times 0,2 + 0,5 \times 0,8 = 0,59$	
Stötvåg	0,55	0,20	0,35	0,42
Värmestrålning	0,39	0,15	0,24	0,32
Initialstrålning	0,06	0,65	0,41	0,26

Värdena i tabellen ovan kan jämföras med de som presenteras i tabell 1 i [23] och som återges i tabell 7. Jämförelsen ger att det i [23] antagits att all neutronenergi från vapnets fusionsdel lämnat vapenresterna i form av initialstrålning.

Tabell 7. Fördelning av energin på olika verkansformer enligt tabell 1 i [23].

	Procent av energin	
	Standardkv	Neutronkv
Stötvåg	50	15-25
Värmestrålning	35	10-20
Joniserande initialstrålning		
gamma	2-3	1
neutroner	2-3	60-65
EMP	0,01	0,01
Radioaktivt nedfall	10	2

Enligt fortifikationshandboken [24] kan man om man vill beräkna luftstötvågseffekten använda tumregeln: "W(kT) neutronbomb ger samma luftstötvåg som $0,15 \times W(kT)$ vanlig kärnladdning". Det är alltså inte alls detsamma som bestämts i föreliggande rapport, det vill säga $0,37 \times W(kT)$ ($0,2036/0,55 = 0,37$ där det avrundade värdet 0,20 visas i tabell 6 istället för 0,2036), om luftstötvågens andel av laddningsstyrkan bestäms i enlighet med [23], eller $0,63 \times W(kT)$ ($0,344/0,55 = 0,63$ där det avrundade värdet 0,35 visas i tabell 6) i enlighet med [20]. Det är oklart hur fortifikationshandbokens tumregel är framräknad², men om tumregeln används kommer luftstötvågseffekten sannolikt att underskattas.

Kommentar kring termonukleära vapen

Med anledning av resonemanget ovan dras slutsatsen att fördelningen mellan stötvågs-verkan, värmeverkan och initialstrålningsverkan inte är densamma för ett fissionsvapen som för ett termonukleärt vapen (oavsett om det är ett vapen med förhöjd strålning eller inte). Då andelen av laddningsstyrkan som består av fusioner ökar kommer även andelen av den omedelbara energifrigörelsen som består av initialstrålning att öka på bekostnad av stötvågs- och värmevågsverkan. De neutroner som skapas vid fusion kommer, beroende på vapenkonstruktion, dock att bromsas in och delvis bidra till värmeutvecklingen. Dessutom varierar andelen fission i andrasteget, varför förhållandet mellan de olika verkansformerna inte är trivialt att uppskatta hos ett termonukleärt vapen. Den skalningslag för stötvågens verkanradie vid olika laddningsstyrkor som anges i ENW 3.61 påstås ändå gälla för "yields up to (and including) the megaton range".

¹ Data kommer från en rysk instruktionsfilm gissningsvis från 1970-talet, som informerar soldater om skydd mot neutronbomber. нейтронное оружие, publicerad 31 januari 2013 av användaren Сергей Гамолко på YouTube, <https://www.youtube.com/watch?v=3AEAUDctJL>.

² Om det antas att hela laddningsstyrkan utgörs av fusioner och att ingen av de neutroner som produceras bidrar till stötvågen utgör stötvågen 12 % av den omedelbara energifrigörelsen. I detta fall skulle W (kt) neutronbomb ge samma luftstötvåg som $0,12/0,55 \times W(kT)$.

3.2 Jämförelse av verkansytor och verkansradier

Nedan presenteras en jämförelse av verkansytor för de fem fall som presenteras på sidan 5 i [17]:

1. ”50 kt fissionsvapen på 300 m höjd (en rimlig laddningsstyrka för större taktiska vapen och en explosionshöjd som ger god verkan mot trupp i pansarfordon utan att ge radioaktivt nedfall)
2. 15 kt fissionsvapen på 550 m höjd (en insats liknande den som gjordes mot Hiroshima)
3. 5 kt fissionsvapen på 200 m höjd (endast för jämförelse med fall 4)
4. 5 kt hypotetiskt neutronvapen på 200 m höjd (en höjd som för denna tänkta laddning ger maximal täckning för initialstrålningsverkan)
5. 5 kt hypotetiskt neutronvapen på 1000 m höjd (ger god täckning för initialstrålningen men avsevärt mindre stötvågsverkan vid marken än fall 4)”

I tabell 8 presenteras verkansradier beräknade med KlangVerk [3]. För stråldos från joniserande initialstrålning för neutronvapen (fall 4 och 5 i listan ovan) används laddningstyp V i tabell 5-3 i CNW. Parametriseringen för laddningstyp V beskrivs i [8]. Stråldosen från neutronstrålning och neutroninducerad gammastrålning för aktuell laddningstyp bestäms genom att använda den till Python portade koden [6] för KlangVerk. Dessutom adderas stråldos från fissionsprodukternas gammastrålning. I KlangVerk sätts fissionsandelen till 100 % för laddningsstyrkor till och med 100 kt. För laddningsstyrkor över 100 kt sätts fissionsandelen, för beräkning av stråldos från fissionsprodukternas gammastrålning, till 50 %. Fissionsandelen för laddningstyp V är inte specificerad i CNW, men den valdes här till 20 % (1 kt fission + 4 kt DT-fusion), i enlighet med avsnittet ovan om verkansformer.

För att bestämma verkan från stötvåg och värmestrålning för neutronvapen antogs ett vanligt fissionsvapen med laddningsstyrka skalad i enlighet med [23], det vill säga 1,9 kt ($5 \times 0,37$ kt). Verkan från stötvåg och värmestrålning underskattas antagligen därmed, eftersom motsvarande skalade laddningsstyrka enligt [20] är 3,1 kt ($5 \times 0,63$ kt). Om däremot skalning från fortifikationshandboken [24] använts skulle laddningsstyrkan för bestämning av verkan från stötvåg och värmestrålning endast bli 0,75 kt och de tillhörande verkansradierna skulle underskattas.

Den stråldos som visas inom parentes motsvarar dosen i det fria (utan skyddsfaktor). Den stråldos som ger 50 % sannolikhet för dödlig utgång, LD₅₀, antas vara 300 rad (vilket motsvarar 3 Gy) i det fria [17]. I till exempel Wigg [7] antas begränsad tjänstbarhet en timme efter bestrålning vid en erhållen dosekvivalent på 5 Sv, där en kvalitetsfaktor på två antas för neutronstrålning. Dosekvivalent är ett föråldrat begrepp som användes innan det aktuella strålskyddssystemet, som beskrivs i ICRP publikation 103 från år 2007. Oavsett system är det tveksamt att använda enheten Sv, som används vid strålskydd mot stokastiska effekter som cancer, vid utvärdering av akuta strålskador. Akuta strålskyddsskador utvärderas genom att multiplicera den absorberade dosen med relevant faktor för relativ biologisk effekt (RBE). Den resulterande dosen benämns då ibland med enheten gray-ekvivalent (GyEq), alternativt behålls enheten Gy.

Liksom för de data som presenteras i kapitel 2, antas här att RBE-faktorn är ett. Mer om de olika enheterna som används för stråldos finns i [1] och [27]. I KlangVerk multipliceras den absorberade neutront dosen, i Gy, med kvalitetsfaktor två för att få dosekvivalenten, i Sv. I det fall de siffror som presenteras i föreliggande rapport jämförs med de värden som finns i till exempel [7] ska alltså den med KlangVerk beräknade neutront dosen, i Gy, multipliceras med två innan den adderas till fotondosen.

Verkansradier beräknade från de verkansytor som presenteras i tabell 2 i [17] visas i kursiv stil inom parentes.

Tabell 8. Verkansradier för de fem fallen beräknade med Klangverk

1	2	3	4	5
50 kt fi, 300 m	15 kt fi, 550 m	5 kt fi, 200 m	5 kt ERW, 200 m	5 kt ERW, 1000 m
Verkansradie (m)				
Svår stötvågsskada på vanlig bebyggelse				
2200 (2200)	1800 (1700)	1100 (1000)	820 (740)	40 (0)
Stötvågsskada på pansarfordon				
870 (690)	200 (600)	350 (300)	250 (250)	8 (0)
Andra gradens brännskada på bar hud				
4300 (3300-4700)	2600 (2000-3000)	1600 (1000-2000)	1000 (800-1000)	350 (0)
Brand i bebyggelse eller skog				
3300 (1300-3300)	2100 (800-2200)	1300 (400-1300)	770 (250-800)	0 (0)
Akuta strålskador (1 Gy)				
2000 (2000)	1500 (1700)	1400 (1400)	2000 (2100)	1800 (2000)
LD₅₀ i det fria (3 Gy)				
1700 (1700)	1300 (1400)	1200 (1200)	1800 (2000)	1500 (1800)
LD₅₀ i normalskyddsrum (60 Gy)				
1100 (1100)	660 (700)	660 (700)	1200 (1300)	630 (1100)
80 Gy i pansarfordon (160 Gy)				
890 (890)	440 (440)	520 (540)	980 (1100)	120 (1000)
180 Gy i pansarfordon (360 Gy)				
740 (690)	210 (250)	410 (400)	840 (1000)	0 (800)

Enligt [17] är pansarfordon detsamma som stridsvagn och skyddsfaktorn är 0,5, normal-skyddsrum antas ha skyddsfaktor 0,05. Svår stötvågsskada på vanlig bebyggelse antas vid 30 kPa statiskt luftstötvågstryck för 1 kt. Vid stötvågsskada på pansarfordon antas 220 kPa statiskt luftvågstryck vid 1 kt. Verkansyta för stötvågsskador är omräknat enligt exempel 8.7 i Klangverksmanualen [3]. Skalade kriterier för värmebestrålning (i kJ/m²) är beräknade enligt Wigg-rapporten.

Skillnaden mellan de resultat som presenteras i tabell 8 är som mest en faktor två, med undantag för stötvågsskada på pansarfordon i fall 2 och för skärmade stråldoser i fall 5. Verkansradien för stråldoser i pansarfordon för fall 5 är betydligt lägre enligt Klangverk jämfört med de värden som presenteras i [17], vars underlag inte har hittats och det är därför svårt att veta varför skillnaden blir så pass stor. Dock kan sägas att skillnaden i stråldos med Klangverk mellan fall 4 och fall 5 är betydligt mer realistisk. Den generellt goda överensstämmelsen med de värden som presenteras i [17] tyder på att de antaganden om vapenutformning och laddningsstyrkans fördelning som gjorts här är desamma som de som gjordes i det tidigare arbetet.

3.3 Stråldosens fördelning

Stråldosens fördelning mellan neutrondos, neutroninducerad fotondos och fotondos från fissionsprodukternas gammastrålning, enligt KlangVerk, visas för fall 3 (fissionsvapen) och fall 4 (neutronvapen) i tabell 9. Den neutroninducerade fotondosen kommer antingen från absorption, (n, γ)-reaktioner, eller inelastisk spridning (n, n')-reaktioner.

Tabell 9. Stråldosens fördelning mellan neutron- och gammados.

	n-dos		n-ind dos		fissionsprod-dos	
	Fall 3	Fall 4	Fall 3	Fall 4	Fall 3	Fall 4
Akuta strålskador (1 Gy)	0,38	0,36	0,21	0,64	0,41	0,004
LD ₅₀ i det fria (3 Gy)	1,3	1,3	0,59	1,7	1,1	0,01
LD ₅₀ i normalskyddsrum	1,8	1,8	0,46	1,2	0,71	0,01
80 Gy i stridsvagn	53	52	12	28	15	0,3
180 Gy i stridsvagn	127	123	25	56	28	0,6

Jämförelsen av dosfördelning mellan fall 3 och fall 4 visar att neutrondosen är ungefär densamma för de båda fallen. Avståndet till detonationspunkten vid vilket dosen är bestämd är dock olika för de två fallen (se tabell 8). Däremot kommer största delen av fotondosen från neutroninducerad gammastrålning i fall 4 och från fissionsprodukternas gammastrålning i fall 3.

3.4 Inverkan av strålskärm (luft eller stridsvagn)

För att studera hur den omgivande miljön påverkar stråldosen gjordes beräkningar med hjälp av MCNP [13].

Grundmodellen bestod av en punktkälla med 14 MeV-neutroner på 200 m höjd ovan mark. Berget under mark antogs vara granit, material #267 i [25], och luften, material #4 i [25], innehöll inget vatten. Stråldosen bestämdes på de verkansradier som beräknats i KlangVerk för fall 4 (se till exempel tabell 8). Beräkningar gjordes därefter för tre miljöförändringar:

- luftfuktighet på 30 g/m³
- vattenyta istället för mark samt
- inuti stridsvagn.

Den valda luftfuktigheten motsvarar 100 % relativ luftfuktighet vid 30 °C, vilket medför en luftdensitet på 1235 g/m³. Som jämförelse anger SMHI att den absoluta medelluftfuktigheten i Stockholm är 4 g H₂O/m³ i januari och 11 g H₂O/m³ i juli [26].

3.4.1 Multiplikationsfaktor och simuleringsdetaljer

Fusion av 1 kt DT innebär att $1,48 \times 10^{24}$ neutroner skapas, se även avsnitt 0. Vid fusion av 4 kt frigörs därmed $4 \times 1,48 \times 10^{24} = 5,92 \times 10^{24}$ neutroner och resultaten från MCNP som alltid är *per källpartikel*, multipliceras alltså med $5,92 \times 10^{24}$. Det antas därmed att neutronerna inte förlorar någon energi på vägen ut ur vapnet eller eldklotet. Beräkningsgeometrin utgjordes av en cylinder med radien 3000 m. Strålkällan placerades 200 m ovan mark och 100 m luft ovanför strålkällan inkluderades i simuleringen. En cylindrisk mesh-tally av typ F4 placerades ovanpå den fysikaliska geometrin. En mesh-box hade utbredningen -10 m +10 m i radiell led och -1 m +1 m i höjddled. Samtliga doser som presenteras i tabellen nedan är för höjden 1 m ovan mark. Resultaten multiplicerades genom att använda DE och DF samt dosomvandlingsfaktorer från ICRP 116 [27]. Omvandlingsfaktorer för benmärg hos kvinna valdes från tabell B.9 för fotoner och C.9 för neutroner. Mer om motiveringen till valda faktorer finns i [1]. I de beräkningar vars resultat presenteras här valdes iso-geometri eftersom strålningen i detta fall kommer att vara i det närmaste isotropisk. Antalet källpartiklar var 1×10^8 i samtliga simuleringar utom den för stridsvagn, vilket medförde att det statistiska relativa felet blev mindre än 0,1, eller 10 %.

För att beräkna dosrat i en stridsvagn modellerades en tunnel för var och en av de sex nollpunktsavstånden. Stridsvagnen approximerades med en tunnelgeometri, med väggsammansättning enligt förväntade material i en stridsvagn, för att få tillräcklig statistik i MCNP-simuleringen. Tunneln sattes till 2 m bredd samt 2 m höjd. Stridsvagnstunnelns väggar och tak antogs bestå av likadant material med likadan tjocklek. Materialsammansättningen hämtades från figur 7 i [28]. "Steel" antogs vara det mycket vanliga rostfria stålet med ASTM-beteckning 304 (#298 i [25]). Diesel antogs bestå av $C_{12}H_{24}$ med en densitet på $0,82 \text{ g/cm}^3$. Materialet som kallas "CH₂+B(10 %)" beskrivs som polyeten i artikeln och dess sammansättning hämtades från [25] (material #247), vilket innebär att densiteten sattes till $0,12 \text{ g/cm}^3$. Dosen bestämdes med en F4-tally för den cell som motsvarar luften i tunneln. Antalet källpartiklar ökades till 1×10^9 för att förbättra statistiken inuti stridsvagnstunneln. Det statistiska relativa felet blev då mindre än 0,1 för alla beräkningar utom neutrons på 2030 m avstånd.

3.4.2 Resultat

I nedanstående avsnitt presenteras resulterande stråldoser för grundmodellen och de olika miljövariationerna.

Grundmodellen

Resultaten från MCNP-simuleringarna presenteras i tabell 10 nedan tillsammans med resultaten från KlangVerk.

Tabell 10. Jämförelse mellan resultat beräknade med KlangVerk eller MCNP. Siffran, inom parentes, efter resultatet från MCNP motsvarar andelen av den med KlangVerk beräknade stråldosen.

Verkansradie (m)		Neutrondos (Gy)		Neutroninducerad dos (Gy)	
Klangverk	MCNP	KlangVerk	MCNP	Klangverk	MCNP
Akuta strålskador (1 Gy)					
2035	2030	0,36	0,064 (18 %)	0,64	0,34 (53 %)
LD₅₀ i det fria (3 Gy)					
1767	1770	1,3	0,37 (29 %)	1,7	1,1 (64 %)
LD₅₀ i normalskyddsrum (60 Gy)					
1157	1150	36	22 (61 %)	24	16 (67 %)
80 Gy i stridsvagn (160 Gy)					
977	970	104	77 (74 %)	56	41 (73 %)
180 Gy i stridsvagn (360 Gy)					
837	830	246	200 (81 %)	112	85 (74 %)
1000 Gy					
679	670	723	619 (86 %)	274	209 (76 %)

Trots de mycket konservativa antagandena gällande neutronspektrum i MCNP-simuleringen överensstämmer resultaten med de som erhålls med KlangVerk vid höga doser och därmed kortare avstånd till detonationspunkten. Överensstämmelsen försämrats därefter med ett ökande avstånd till nollpunkten. Partikelspektrum på avstånd från laddningen och doser i CNW kapitel 5 är baserade på transportsimuleringar av strålkällan direkt utanför laddningen, se sid 5-6: *"An extensive set of tabulated results of computer calculations of neutron fluxes and doses is contained in "Time-Dependent Neutron and Secondary Gamma-Ray Transport in Air-Over-Ground Geometry", ORNL-4289, Vol. II ", (see bibliography). These data were used to obtain the spectra shown in..."*. En förklaring till skillnaden i resultaten skulle kunna vara om neutronernas spridning i luft underskattas i de beräkningar vars resultat presenteras i CNW och i ORNL-4289 [29]. Dosbidraget från neutroninducerad gammastrålning dominerar dock vid större verkansradier även enligt det data som presenteras i CNW.

Miljövariationer

Nedan presenteras resultaten från MCNP-beräkningar för de tre typerna av miljöförändringar som beskrivs i avsnitt 3.4. I tabell 11 visas resulterande stråldoser då torr luft ersatts med luft med en fukthalt på 30 g/m³ och då även graniten, under mark, ersatts med vatten.

Tabell 118. Stråldoser vid fukthaltig luft samt ovanpå vattenyta.

Verkans-radie (m)	Neutronsos (Gy)			Neutroninducerad dos (Gy)		
	Torr luft	Luft med fukthalt 30 g/m ³	Vatten under & fukt i luften	Torr luft	Luft med fukthalt 30 g/m ³	Vatten under & fukt i luften
2030	0,064	0,039	0,026	0,34	0,31	0,29
1770	0,37	0,23	0,17	1,1	0,97	0,93
1150	22	16	12	16	15	15
970	77	58	45	41	37	37
830	200	161	124	85	79	79
670	619	518	407	209	196	197

Skärmningen till följd av fukthaltig luft och underliggande vatten är bättre vid längre avstånd från strålkällan. Regn eller snö skulle medföra en ännu bättre strålskärm. I tabell 12 presenteras stråldoser inuti stridsvagn.

Tabell 12. Stråldoser inuti stridsvagn.

Verkans-radie (m)	Neutronsos (Gy)		Neutroninducerad dos (Gy)	
	Torr luft	Stridsvagn	Torr luft	Stridsvagn
2030	0,064	0,0097	0,34	0,095
1770	0,37	0,041	1,1	0,29
1150	22	2,8	16	7,0
970	77	10	41	21
830	200	27	85	50
670	619	86	209	142

Resultaten som presenteras i tabell 12 medför att stridsvagnen har en skyddsfaktor på omkring 0,25 (0,23-0,28). Stråldos från aktivering är dock inte inkluderat. Dess eventuella påverkan på resultaten utreds närmare i nästa avsnitt. Det förekommer att strålskärmingen inuti stridsvagn uppskattas till betydligt bättre än 0,25. I sådana fall kan det vara värt att studera om även den neutroninducerade fotondosen inkluderats i strålskärmsberäkningen.

3.5 Neutronaktivering

För att utreda om neutroninfångningen i en bepansrad stridsvagn gör att bepansringen själv strålar ut dödlig joniserande strålning i samband med betasönderfall hos aktiveringsprodukterna har aktiveringsberäkningar gjorts, vars resultat presenteras nedan.

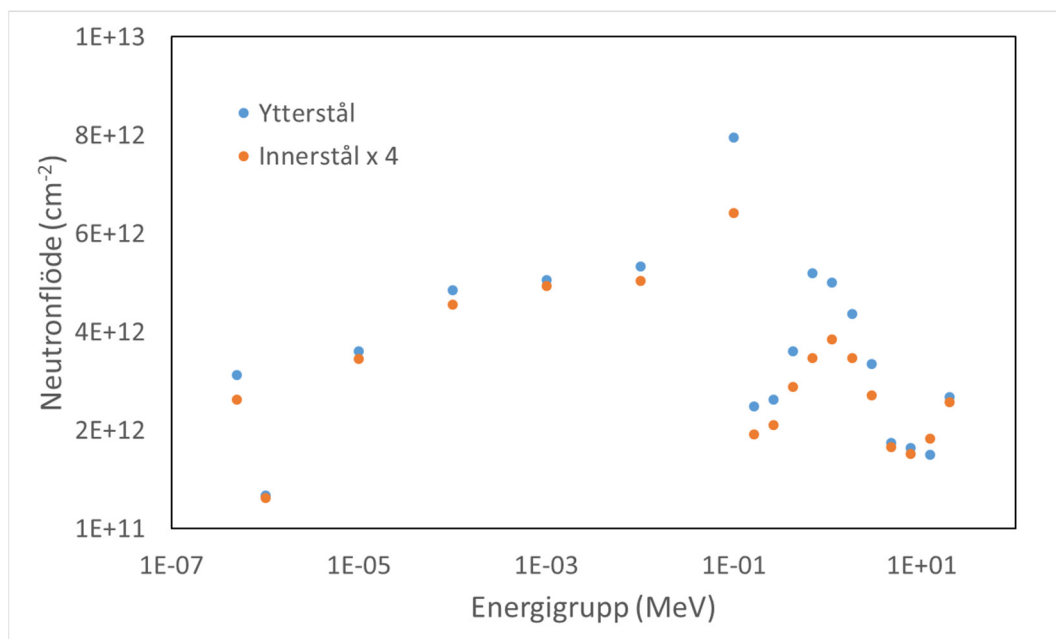
Aktiveringsberäkningarna gjordes med Fispact [14]. Neutronflödet hämtades från MCNP-simuleringar och materialsammansättningen antogs vara densamma som de som används för rostfritt stål (SS 304) i aktiveringsanalyser inom kärnkraftsbranschen och presenteras i tabell 13 nedan. Stålsammansättningen enligt material #298 i [25] redovisas också i tabellen.

Tabell 13. Materialsammansättning i SS 304.

Grundämne	Vikt-% (kärnkraftsbranschen)	Vikt-% (#298 i [25])
C	0,04	0,04
N	0,04	
O	0,01	
Al	0,002	
Si	0,6	0,5
P	0,02	0,024
S	0,015	0,015
Cl	0,0001	
Ti	0,01	
V	0,001	
Cr	18,5	19
Mn	1,3	1
Fe	69,011	70
Co	0,1	
Ni	10	9,25
Cu	0,1	
As	0,01	
Nb	0,01	
Mo	0,2	
Sn	0,01	
Sb	0,001	
Ta	0,01	
W	0,01	

Inledande beräkningar visar att dominerande dosbidrag (nära 40 %) från stridsvagnsstålet kommer från ^{52}V ($t_{1/2} = 3,7$ min) och skapas främst via reaktionen $^{52}\text{Cr}(n,p)^{52}\text{V}$. Största delen av resterande dos kommer från ^{28}Al ($t_{1/2} = 2,2$ min, drygt 20 % av dosen) och ^{56}Mn ($t_{1/2} = 2,6$ h) som står för 20 % av dosen vardera. De nukliderna skapas främst via reaktionerna $^{28}\text{Si}(n,p)^{28}\text{Al}$ och $^{55}\text{Mn}(n,g)^{56}\text{Mn}$.

De aktiveringsprodukter som dominerar stråldosen är desamma för det yttre och det inre stålet. Den specifika aktiviteten (Bq/g) är dock omkring en faktor fyra lägre för respektive nuklid (^{52}V , ^{28}Al och ^{56}Mn) i det inre ställagret jämfört med det yttre. I figur 10 visas neutronspektrum för de olika ställagren. Neutronflödet i innerstålet har multiplicerats med fyra, för att bättre kunna utläsa skillnader i de två spektrumen. Ur figuren kan utläsas att de två spektrumen är relativt lika. I ytterstålet är det relativa flödet dock något högre omkring 1 MeV. I och med att spektrumen är likartade förväntas liknande förhållande mellan aktiveringsprodukter i det yttre och det inre stålet, vilket också är fallet.



Figur 10. Neutronspectrum för det yttre och det inre stridsvagnsstålet.

Stråldosraten från ^{56}Mn uppskattas enligt nedan eftersom dess halveringstid är > 1 h. Den specifika aktiviteten för ^{56}Mn är $1,8 \times 10^5$ Bq/g och om vikten hos innerstålet uppskattas till 240 kg ($= 3 \times 100 \times 100 \times 8 \times 10^{-3}$ kg) blir den totala aktiviteten $4,3 \times 10^{10}$ Bq. När nukliden sönderfaller utsöndras bland annat en foton med 847 keV (intensitet 99 %). Stråldosraten, $\dot{D}$, från en oskärmad punktkälla bestående av $4,3 \times 10^{10}$ Bq ^{56}Mn blir 0,5 Gy/h.

$$\dot{D} = \frac{SE \frac{\mu_t}{\rho}}{4\pi r^2} = \frac{4,3 \times 10^{10} \times 0,847 \times 0,03}{4\pi \times 10^2} \text{ MeVs}^{-1} \text{ g}^{-1} = 0,5 \frac{\text{Gy}}{\text{h}},$$

där S är källstyrkan i s^{-1} , E är strålningens energi i MeV, μ_t/ρ är massabsorptionskoefficienten för vävnad, vilken antas vara $0,03 \text{ cm}^2/\text{g}$ vid 847 keV, och r är avståndet till strålkällan i cm.

Det är därmed möjligt att aktivering av stridsvagnsstålet medför en dödlig stråldos på längre sikt. I exemplet ovan är dosen från aktiveringsprodukterna inte tillräckligt hög för att omedelbart ta en person ur stridbart skick. Den akuta påverkan härrör istället från initialstrålningen.

Det går även att utforma stridsvagnsstål på ett sådant sätt att neutronaktivering minimeras, till exempel genom att minimera innehållet av aluminium, mangan och vanadin.

3.6 Sammanfattning

De värden som redovisas i tabell 2 i FOA-tidning nr 5 från 1977 (se tabell 8 i avsnitt 3.2) återskapades. De flesta värden har en god överensstämmelse, vilket visar på en god förståelse för de antaganden som ligger till grund för de tidigare siffrorna från 1970-talet. Det framgår att det i underlaget till FOA-tidningen antagits att fusionsdelen för ett vapen med förhöjd strålning utsöndrar 35 % av energin i form av stötvåg och värmestrålning. Värdet är för lågt eftersom det medför att det antagits att alla neutroner som skapas vid fusioner lämnar vapenresterna i form av initialstrålning. Trots att verkansradier för värmestrålning och stötvåg underskattats för fall 4 i tabell 8 är skillnaden i verkansradier mellan fall 3 och fall 4 inte betydande. Resultaten tyder på att skillnaden i verkansradier för ett kärnvapen med förhöjd strålning och ett vanligt kärnvapen är mindre än vad som ofta antyds.

Faktorer som påverkar verkansradien för olika initialstrålningsskador har undersökts närmare genom simuleringar i MCNP. Både fukthaltig luft och detonation ovanför vatten (istället för mark) medför en minskad verkansradie för initialstrålningsskador. Avslutningsvis undersöktes stridsvagnens strålskärmande förmåga och baserat på beräkningarna är en rimlig skyddsfaktor för person i stridsvagn omkring 0,25. Neutronaktivering av stridsvagnsstålet bidrar till stråldosen, men medför inte någon akut påverkan på stridsdugligheten

4 Slutsats

Förenklade beräkningar med KlangVerk ger att värmestrålningen har klart störst verkansradie för förlorad stridsduglighet då personen befinner sig utomhus. För stridsdugligheten hos person i stridsvagn är verkansradien för initialstrålning dimensionerande för laddningar under ~100 kt och för laddningar över ~100 kt är det verkansradien för luftstöt-vågen som är dimensionerande. För enskild person i flervåningshus är skyddet mot initialstrålning helt avhängigt av var någonstans i huset personen befinner sig och det går därför inte att uttala sig om tjänstbarheten för enskild individ i flervåningshus.

Jämförelse av verkansradier för vapen med förhöjd strålning och vanligt kärnvapen pekar på att skillnaderna kan vara mindre än vad som ofta antyds. Det går att tillverka ett kärnvapen med låg laddningsstyrka där så mycket som möjligt av initialstrålningen lämnar vapenresterna, men skillnaden i verkansradie för olika verkansformer jämfört med ett vanligt kärnvapen bör inte överdrivas. Skillnaden i fördelning på de olika verkansformerna motsvarar inte skillnaden i energifördelning vid fusion jämfört med fission. För att tända fusionen behövs alltid en fissionsdel och dessutom bromsas både fusions- och fissions-neutroner in i de olika vapendelarna. All neutronenergi ger därför inte upphov till initialstrålning.

För att bestämma en mer exakt verkansradie vid kärnvapen användning, behövs kännedom om miljöförhållanden på platsen. Faktorer som påverkar inkluderar luftfuktighet, nederbörd, underlag och terrängförhållanden. Avslutningsvis medför neutronaktivering av stridsvagn inte någon akut påverkan på stridsdugligheten.

5 Fortsatta studier

Energins fördelning på de olika verkansformerna på olika avstånd från detonationspunkten kan studeras vidare. Det vore också intressant att närmare studera neutron- och fotonspektrum direkt utanför olika vapenutformningar. En jämförelse mellan figurer i ENW och CNW, med beräkningar i MCNP skulle till exempel kunna göras.

6 Referenser

- [1] K. Andgren, "Verkan av joniserande initialstrålning – inledande beräkningar", FOI rapport, D—0869--SE (2019).
- [2] N. Palmqvist och J. Bahar Gogani, "Verkansradier för joniserande initialstrålning vid en kärnvapendetonation – en jämförelse med andra verkansformer", FOI rapport, R—4910—SE (2019).
- [3] L. Björklund och M. Goliath, "Kärnladdningars skadeverkningar", FOI rapport, R—2741—SE (2009).
- [4] P. J. Dolan (ed.), "Capabilities of Nuclear Weapons", Defense Nuclear Agency (1978).
- [5] S. Glasstone and P. J. Dolan (eds.), "The Effects of Nuclear Weapons" (3rd ed.), US Department of Defense and Energy (1977).
- [6] Kod i Python 2 framtaga av M. Goliath (2016).
- [7] L. Wigg, "Handbok för kärnvapenverkan", FOA rapport, R—96-00378-4.1—SE (1996).
- [8] L. Björklund, G. Danielson, O. Schelin och L. Wigg, "PC-program för verkan av kärnvapen. Luft- och vattenstöt våg, värme strålning samt joniserande initialstrålning", FOA rapport, C 40314-4.1 (1993).
- [9] Fortifikationshandbok del 1, Vapenverkan (1973).
- [10] O. Schelin och E. Ambolt, "Skydd mot initialstrålning i bostadshus i stadsbebyggelse", FOA rapport, A 4362-4725 (1964).
- [11] S. Lindqvist och B. Oscarsson, "Underlagsstudier till civilförsvarets preliminära grundsyn ABC. Del III. Konsekvenser av kärnvapeninsatser mot befolkningsmål", FOA rapport, C 20541-A3 (1984).
- [12] L. Wigg, G. Danielsson, T. Ulvsand och K. Rosander, CISK 2 Vapenverkan "Konsekvenser för civilbefolkningen vid olika skyddsalternativ", FOA rapport, C 20709-2.6 (1988).
- [13] D. B. Pelowitz, A. J. Fallgren and G. E. McMath, "MCNP6™ User's Manual Code Version 6.1", Los Alamos National Laboratory, report LA-CP-13-00634 (2013).
- [14] M. Fleming, T. Stainer and M. Gilbert (eds.), "The Fispack-II User Manual", UK Atomic Energy Authority, UKAEA-R(18)001 (2018).
- [15] <http://nuclearweaponarchive.org/Usa/Weapons/Allbombs.html> (hämtad 2019-11-19).
- [16] <https://www.globalsecurity.org/wmd/systems/w70.htm> (hämtad 2019-11-18).
- [17] A. Fröman, T. Larsson och G. Wallinder, "Den nygamla neutronbomben", FOA-tidning nr 5 sid. 2- (1977).
- [18] D. T. Casey et al., "Measurements of the $T(t,2n)^4\text{He}$ Neutron Spectrum at Low Reactant Energies from Inertial Confinement Implosions", Phys. Rev. Lett. 109 025003 (2012).
- [19] L. Beckman, "Thermonuclear reaction rates in a deuterium-tritium plasma", FOA rapport, C 20283-A2 (1978).
- [20] H. A. Sandmeier et al., "How to calculate effects of tactical low yield enhanced radiation and fission warheads", LANL rapport, LA-9434 (1982).
- [21] S. Sahin och B. Sarer, "Assessment of the neutron leakage spectrum of an enhanced radiation warhead for peaceful applications", Kerntechnik 58 No. 5 (1993).
- [22] G. Hultén och L. Johansson, "Neutronbomben behov av detektering", FOA rapport, C 40125-A3 (1980).
- [23] G. Arbman, "Beskrivning av och förenklad verkansmall för neutronvapnet", FOA 1979-02-23 (1979).
- [24] Fortifikationshandbok del 2, FortH 2 M7747-707122 s. 20 (1987).
- [25] R. J. McConn Jr et al., "Compendium of material composition data for radiation transport modelling", Pacific Northwest National Laboratory, PNNL-15870 Rev. 1 (2011).

- [26] <https://www.smhi.se/kunskapsbanken/meteorologi/luftfuktighet-1.3910> (hämtad 2019-11-18).
- [27] C. H. Clement (ed.), "Conversion Coefficients for Radiological protection Quantities for External Radiation Exposures", ICRP Publication 116, Ann. ICRP 40(2-5) (2010).
- [28] S. Sahin och A. Kumar, "*The effects of the spectrum softening within the enhanced radiation warhead (ERW) on the biological dose*", Kerntechnik 45 No. 2 (1984).
- [29] E. A. Straker, "*Time-dependent neutron and secondary gamma-ray transport in an air-over-ground geometry volume II. Tabulated data*", Oak Ridge National Laboratory, ORNL-4289, Vol. II (1968).

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
164 90 Stockholm

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

www.foi.se