

Analys av precision vid fällning av ostyrda vapen från JAS 39 Gripen

Examensarbete
utfört på **Fordonssystem**
Utfört för **Saab Aerosystems**

av
Lina Blom

Reg nr: LiTH-ISY-EX- - 06/ 3802- - SE

7 april 2006

Analys av precision vid fällning av ostyrda vapen från JAS 39 Gripen

Examensarbete

utfört på **Fordonssystem,**
Institutionen för systemteknik
Vid **Linköpings universitet**

Utfört för **Saab Aerosystems**
av **Lina Blom**

Reg nr: LiTH-ISY-EX-- 06/ 3802-- SE

Handledare: **Peter Ahlberg**

Saab Aerosystems


Mattias Krylander

Linköpings Universitet

Examinator: **Erik Frisk**

Linköpings Universitet

Linköping, 7 april 2006

Datum 7 April 2006	Institution och avdelning Fordonssystem, Institutionen för systemteknik 581 83 Linköping	 Linköpings universitet
------------------------------	--	---

Språk X Svenska Annat (ange nedan) 53 Antal sidor	Typ av publikation Licentiatavhandling X Examensarbete C-uppsats D-uppsats Rapport Annat (ange nedan)	ISBN (licentiatavhandling) ISRN LiTH-ISY-EX--06/3802--SE Serietitel (licentiatavhandling) Serienummer/ISSN (licentiatavhandling)
---	--	---

URL för elektronisk version http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:liu:diva-6233

Publikationens titel Analys av precision vid fällning av ostyrda vapen från JAS 39 Gripen Title Analysis of precision when separating unguided stores from JAS 39 Gripen Författare Lina Blom
--

Sammanfattning Abstract This report analysis the variation of the point of impact when dropping general purpose bombs from JAS 39 Gripen. Only the disturbances caused by external sources, not disturbances from the system itself, are taken into account. The external sources are the wind velocity, the mass of the bomb, the air temperature, the aerodynamic drag coefficient, the gravity, the fin angle of the bomb, the pylon position and the separation velocity. The stores used for the assignment are three different types from the MK80 series, so called <i>dumb bombs</i> . Both the effects from the individual disturbances and the effect from the combination of all disturbances are analysed. Because bomb separation tests are very resource demanding there is not enough data to draw any statistically correct conclusions. Monte Carlo-simulations are used to increase the separation samples. The result is based upon six different flight cases. In the analysed cases the variation of pylon position is the disturbance that effects the point of impact the most. The variation in temperature did not appear to have any noticeable effect on the impact point. The effect of all disturbances combined was within reasonable limits.

Nyckelord Keywords Monte Carlo-simulations, MK80 series, bomb separation, ballistic, JAS 39 Gripen, precision
--

Sammanfattning

Detta examensarbete undersöker avvikelser av nedslagsposition vid fällning av ostyrda vapen från JAS 39 Gripen. Här har endast de störningar från yttre påverkan på bomben då den faller mot marken undersökts. Med yttre påverkan menas icke systemrelaterade störningar, vilket i detta arbete har innefattat variationer av vindhastighet, bombmassa, temperatur, aerodynamisk motståndskoefficient, gravitation, bombens fenvinkel, balkläge och separationshastighet. De vapen som ingår i analysen är tre olika typer från MK80-serien, vilka är fritt fallande så kallade *dumb bombs*. Dels undersöks de enskilda primärfelen var för sig och dels undersöks den totala påverkan. Eftersom bombfällningar är ytterst resurskrävande finns inte tillräckligt många stickprov från verkliga fällningar att tillgå så för att kunna dra statistiskt korrekta slutsatser har Monte Carlo-simuleringar utförts för att utöka mängden stickprov. Resultaten är baserade på sex stycken olika flygfall. Resultatet från samtliga fall visade att variationer av balkläge, dvs bombens position relativt flygplanet vid fälltidpunkten var det primärfel som gav störst inverkan på spridningen av nedslagspositionen. Variationer av temperaturen gav ingen signifikant påverkan. Det totala ballistikfelet visade sig i sammanhanget vara inom rimlig gräns.

Nyckelord: Monte Carlo-simuleringar, MK80-serien, bombfällning, ballistik, JAS 39 Gripen, precision

Abstract

This report analysis the variation of the point of impact when dropping general purpose bombs from JAS 39 Gripen. Only the disturbances caused by external sources, not disturbances from the system itself, are taken into account. The external sources are the wind velocity, the mass of the bomb, the air temperature, the aerodynamic drag coefficient, the gravity, the fin angle of the bomb, the pylon position and the separation velocity. The stores used for the assignment are three different types from the MK80 series, so called *dumb bombs*. Both the effects from the individual disturbances and the effect from the combination of all disturbances are analysed. Because bomb separation tests are very resource demanding there is not enough data to draw any statistically correct conclusions. Monte Carlo-simulations are used to increase the separation samples. The result is based upon six different flight cases. In the analysed cases the variation of pylon position is the disturbance that effects the point of impact the most. The variation in temperature did not appear to have any noticeable effect on the impact point. The effect of all disturbances combined was within reasonable limits.

Keywords: Monte Carlo-simulations, MK80 series, bomb separation, ballistic, JAS 39 Gripen, precision

Förord

Examensarbetet är utfört på Saab Aerosystems i Linköping. Vill tacka alla som medverkat till att detta arbete blev slutfört. Först och främst vill jag tacka alla på sektionen för att ha bidragit till ett inte bara intressant utan även trevligt halvår. Anders Erlandsson som tog initiativet till detta arbete. Bertil Eronn, Sverker Gidholm och Anders Sjöquist för intressanta diskussioner och vinklingar. Mina handledare Peter Ahlberg på Saab Aerosystems och Mattias Krysander på universitetet för stöd med rapport och övrigt arbete. Mina närmaste för många timmars telefonsupport.

Lina Blom

Linköping, vargavintern 2006

Beteckningar

Variabler och parametrar

ϕ	Rollvinkel
θ	Tippvinkel
ψ	Girvinkel
α	Anfallsvinkel
β	Snedanblåsningsvinkel
γ	Banvinkel
p	Vinkelhastighet i roll-led
q	Vinkelhastighet i tipp-led
r	Vinkelhastighet i gir-led
T	Framdrivande kraft
L	Lyftkraft
N	Normalkraft
W	Tyngdkraft
D	Luftmotstånd
L_r	Moment i roll-led
Ma	Machtal
n_z	Lastfaktor
h_0	Flygplanets höjd vid fälltidpunkt
P_0	Tryck vid havsytan, standardatmosfär
T_0	Temperatur vid havsytan, standardatmosfär
ρ	Luftens densitet
a	Ljudhastigheten i luft
R_a	Gaskonstanten för luft
c_p	Specifik värmekapacitet, konstant tryck
c_v	Specifik värmekapacitet, konstant volym
q	Dynamiskt tryck
A	Tvärsnittsarea
b, c	Bombens referenslängder
m_b	Bombens massa
σ	Standardavvikelse
μ	Väntevärde
\bar{n}	Normalvektor
\bar{p}	Positionsvektor
R	Avstånd mellan flygplanet vid fälltidpunkten och bombens nedslagsposition
r	Referensavstånd från nominell nedslagsposition
ν	Spridningsvinkel

Akrynomer

CEP	Circular Error Probability
GPS	Global Positioning System
SMHI	Sveriges Meteorologiska och Hydrologiska Institut
TSC	Twin Store Carrier

Innehåll

Sammanfattning	iii
Förord	v
Beteckningar	vii
1 Inledning	1
1.1 Bakgrund	1
1.2 Problembeskrivning	2
1.3 Avgränsningar	2
1.4 Rapportens disposition	2
2 Modell	3
2.1 Teori	3
2.1.1 Koordinatsystem	3
2.1.2 Standardatmosfär	5
2.1.3 Aerodynamik	6
2.2 Val av modell	6
2.3 Beskrivning av modell	7
2.3.1 Lösningsteg	8
3 Felanalys	10
3.1 Balkläge	10
3.2 Fenvinkel	10
3.3 Separationshastighet	11
3.4 Luftmotstånd	11
3.4.1 Aerodynamisk motståndskoefficient	12
3.4.2 Vindhastigheten	12
3.4.3 Temperatur	12
3.5 Tyngdkraft	13
3.5.1 Bombmassa	13
3.5.2 Tyngdacceleration	14

4	Simuleringar	15
4.1	Monte Carlo-simuleringar	15
4.1.1	Antal simuleringar	15
4.2	Slumptalsgenerator	16
4.2.1	Verifiering	16
5	Implementering	19
5.1	Initiering	19
5.1.1	Inparametrar	19
5.1.2	Flygfall	20
5.2	Nedslagsposition	22
5.3	Primärfel	24
5.3.1	Balkläge	24
5.3.2	Fenvinkel	24
5.3.3	Separationshastighet	25
5.3.4	Aerodynamisk motståndskoefficient	25
5.3.5	Vindhastighet	25
5.3.6	Temperatur	26
5.3.7	Bombens massa	26
5.3.8	Tyngdaccelerationen	27
5.3.9	Totalt ballistikfel	27
5.4	Simuleringsloop	27
5.5	Verifiering av modell	28
6	Resultat	31
6.1	Bearbetning av simuleringsdata	31
6.1.1	Koordinattransformation	31
6.1.2	Analys av simuleringsdata	32
6.2	Enskilda primärfel	33
6.2.1	Balkläge	33
6.2.2	Fenvinkel	35
6.2.3	Separationshastighet	37
6.2.4	Aerodynamisk motståndskoefficient	38
6.2.5	Vindhastighet	40
6.2.6	Temperatur	41
6.2.7	Bombmassa	42
6.2.8	Tyngdacceleration	44
6.2.9	Sammanställning	45
6.3	Totalt ballistikfel	46
6.3.1	Flygfall	46
6.3.2	Bombtyper	47
6.3.3	Förhållande mellan primärfel	49

7 Diskussion	50
7.1 Sammanfattning av resultat	50
7.2 Framtida arbete	50
Litteraturförteckning	52

Kapitel 1

Inledning

1.1 Bakgrund

Vid utvärdering av tekniska system är det viktigt att undersöka vad eventuella störningar kan ge för inverkan på slutresultatet. Dessa störningar kan till exempel yttra sig som mätbrus, ofrånkomliga tidsfördröjningar i mjuk- och hårdvara eller yttre omständigheter som är svåra eller rent av omöjliga för systemet att ta hänsyn till. Ju mer komplext ett system är desto fler störningar kommer givetvis att påverka slutresultatet. Vilka störningar som ger en signifikant påverkan kan vara svårt att reda ut, då ett flertal felbidrag i bästa fall tar ut varandra men kan likväl anta kombinationer där de förstärker varandra.

Detta gäller i högsta grad även vapensystemet på JAS 39 Gripen. Vid bombfällningar är det viktigt att den totala spridningen av nedslagspositionen är känd. Eftersom det handlar om vapen kommer inte bara uppdraget att misslyckas om bomben inte träffar målet utan konsekvenserna kan vara förödande om bomben träffar civila byggnader etc. Vid verifiering av vapensystemet används såväl verkliga fällprov som siktesprov och simuleringar. För att dra korrekta statistiska slutsatser om hela händelseförloppet skulle det krävas tusentals verkliga fällningar. Detta är dock omöjligt att utföra i verkligheten eftersom fällproven är enormt resurskrävande, främst på grund av kostnader för den mätutrustning som används. Som komplement används siktesprov vilket innebär att piloten siktar och avfyrar en fiktiv bomb. Siktesprov ger en god bild av hur systemet fungerar men påverkan på bombens ballistik går givetvis förlorad. Ballistiken kan dock undersökas genom simuleringar, där initialvillkor hämtas från siktesprov. Hur god överensstämmelsen blir mot verkligheten beror på de antaganden som är gjorda i modelleringsarbetet.

1.2 Problembeskrivning

Avvikelser på nedslagsplatsen beroende på yttre påverkan vid fällning av ostyrd vapen från JAS 39 Gripen ska undersökas. Eftersom antalet verkliga fällningar är begränsade kommer stickproven att utökas med hjälp av Monte Carlo-simuleringar. Simuleringarna utförs genom att lämpliga slumpantal påförs på inparametrar till en simuleringsmodell. Störningar som ger ett signifikant bidrag till spridning av nedslagsplatsen ska identifieras tillsammans med deras fördelningar och spridningsmått. Störningarnas påverkan på nedslagspositionen ska redovisas dels var för sig och dels den totala.

1.3 Avgränsningar

Bomberna som ingår i analysen kommer från MK80-serien. Hänsyn kommer inte att tas till komponentfel utan systemet antas vara fullt fungerande. Resultaten kommer inte att gälla hela flygenveloppen utan fällningar sker från specifika flygfall. Endast singelfällningar kommer att utvärderas eftersom den modell som används vid simuleringarna inte tar hänsyn till den impuls som påverkar vingen vid fällning. Dessutom kommer inte Twin Store Carrier att användas, dvs bomberna antas vara monterade direkt på någon av flygplanets balkar. Felbidragens fördelningar kommer att antas vara normalfördelade respektive likformigt fördelade. Standardavvikelser och spridningsintervall kommer i den mån det går att fastställas korrekt. I andra fall kommer rimliga värden att analyseras.

1.4 Rapportens disposition

Kapitel 2: Beskrivning av modell.

Kapitel 3: Genomgång av tänkta primärfel.

Kapitel 4: Monte Carlo-simuleringar och verifiering av slumpalsgenerator.

Kapitel 5: Modifiering av modell samt initiering av simuleringsloop.

Kapitel 6: Tolkning och redovisning av resultat.

Kapitel 7: Sammanfattning av resultat och framtida arbete.

Kapitel 2

Modell

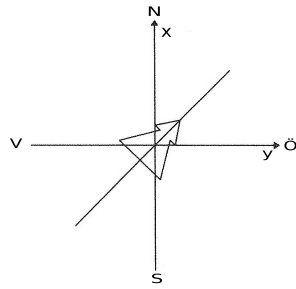
I detta kapitel beskrivs grundläggande teori som underlättar fortsatt läsning. Sedan följer motivering till modellval och beskrivning av vald modell.

2.1 Teori

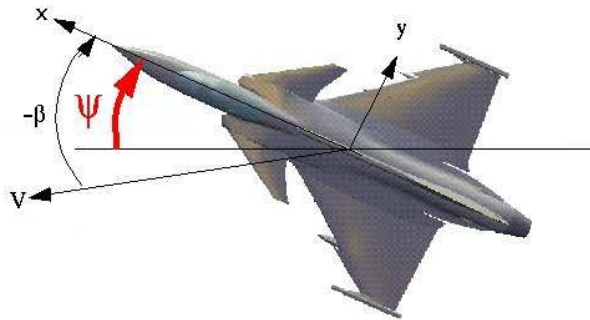
Här följer en beskrivning av de koordinatsystem och övriga vinklar som används för beskrivning av flygplanets respektive bombens rörelse och position. Dessutom kommer innebörden av standardatmosfär samt grundläggande aerodynamik att förklaras. För den som är insatt i flygmekanik kan detta avsnitt hoppas över. Vidare information ges i [11].

2.1.1 Koordinatsystem

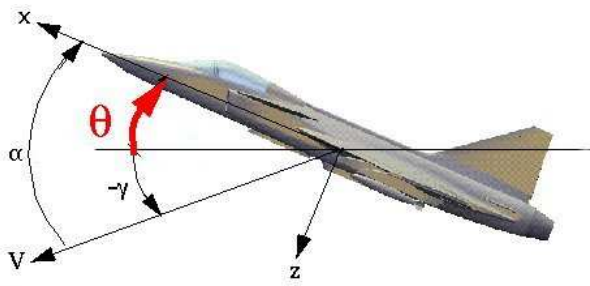
För att beskriva och beräkna bombens rörelse används tre koordinatsystem. Det ena är initialt och de andra två är kroppsfixa. Det initiala är fixt relativt jorden och dess origo sitter i flygplanets tyngdpunkt vid fälltidpunkten, \hat{x}_i pekar åt norr, \hat{y}_i åt öster och \hat{z}_i mot markplanet, se figur 2.1. De andra koordinatsystemen är rörliga och sitter i bombens respektive flygplanets tyngdpunkt. Här pekar \hat{x} i nosens riktning, \hat{y} åt styrbord och \hat{z} mot markplanet, se figurerna 2.2, 2.3 och 2.4. För att inte blanda ihop de båda rörliga koordinatsystemen sätts index b för bomben, $(\hat{x}_b, \hat{y}_b, \hat{z}_b)$, och index ac för flygplanet, $(\hat{x}_{ac}, \hat{y}_{ac}, \hat{z}_{ac})$. Vid diskussioner gällande både flygplan och bomb utelämnas index, $(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})$. Flygplanets respektive bombens orientering relativt det initiala systemet består av en translation och tre successiva rotationer kring de kroppsfixa axlarna. Där rotationerna beskrivs av eulervinklarna, ψ , θ och ϕ . Rotationen kring \hat{z} , girvinkeln, ψ , ses i figur 2.2, där även snedanblåsningsvinkel, β , definieras. Snedanblåsningsvinkeln avser vinkeln mellan kroppens rörelseriktning och flygplansnosens riktning.



Figur 2.1: Initialt koordinatsystem.



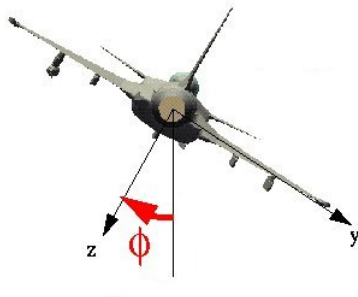
Figur 2.2: Definition av girvinkeln, ψ .



Figur 2.3: Definition av tippvinkeln, θ .

Rotationen kring \hat{y} , tippvinkeln, θ , ses i figur 2.3 där även anfallsvinkel, α , och banvinkel, γ , finns definierade. Anfallsvinkeln avser liksom snedblåsningens vinkel mellan kroppens rörelseriktning och flygplanssens riktning medan banvinkeln anger kroppens rörelseriktning relativt hori-

sontalplanet. Rotationen kring \hat{x} , rollvinkeln, ϕ , ses i figur 2.4.



Figur 2.4: Definition av rollvinkeln, ϕ .

2.1.2 Standardatmosfär

Temperaturen och trycket i atmosfären varierar beroende på årstid och position på jorden. För att underlätta olika jämförelser har begreppet standardatmosfär införts, vilket är baserat på medelvärde från uppmätta värden på olika platser på jorden. Standardtryck respektive temperatur vid havsytan definieras som $P_0 = 1.0132$ bar respektive $T_0 = 15^\circ C$. Dessutom antas temperaturen avta med $0.65^\circ C$ per 100 meter på höjder under 11000 meter, se [13]. Utgående från standardatmosfären kan temperaturen beräknas för önskad höjd, h , enligt

$$T = T_0 - 0.0065h \quad (2.1)$$

Då temperaturen är känd kan standardatmosfären även användas för att beräkna trycket

$$P = P_0(T_0/T)^{-5.2559} \quad (2.2)$$

Då luftens densitet, ρ , och ljudhastigheten, a , beror av tryck och temperatur kan även dessa beräknas enligt

$$\rho = \frac{1.225T_0P}{P_0T} \quad (2.3)$$

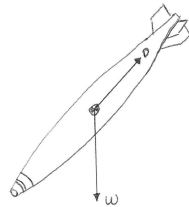
och

$$a = \sqrt{\frac{c_p}{c_v} R_a T} \quad (2.4)$$

där c_p och c_v avser den specifika värmekapaciteten för luft då tryck respektive volym är konstant och R_a betecknar luftens gaskonstant. För vidare information se [5].

2.1.3 Aerodynamik

De fyra primära krafterna som påverkar flygplanskroppen är tyngdkraften, W , riktad mot markplanet, lyftkraften, L , motriktad tyngdkraften, framdrivande kraft, T , riktad i \hat{x} -led och luftmotståndet, D , i rörelseriktningen. Den dominerande av krafterna är T och för fritt fallande projektiler kan hela luftmotståndet approximeras med $D \sim T$, se figur 2.5. Approximationen kan göras eftersom bombens orientering sammanfaller med hastighetsvektorn, med andra ord projektileten har små värden på både α och β . Vid bombfällning kommer bomben även att påverkas av aerodynamisk interferens från flygplanskroppen, vilket kommer att ge en ytterligare bromsande effekt.

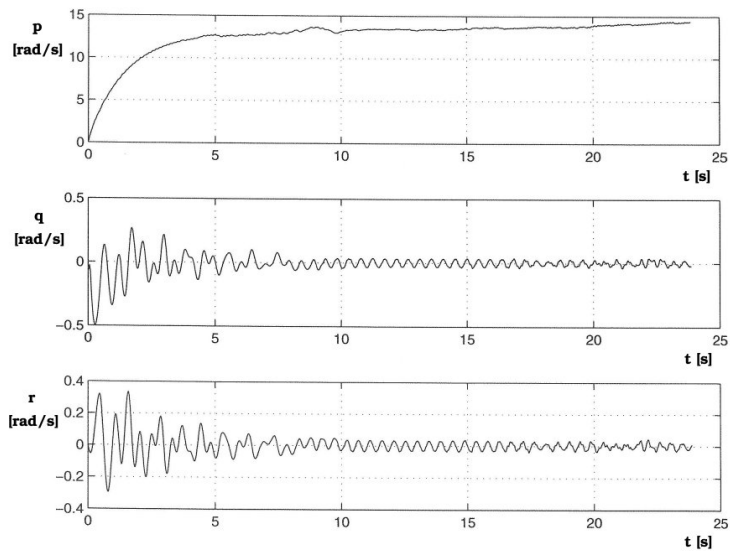


Figur 2.5: Luftmotståndets riktning vid fritt fall.

2.2 Val av modell

På Saab har ett antal modeller av bombfällning med ostyrda vapen utvecklats. Då alla modeller anses väl utarbetade togs ingen hänsyn till själva utförandet av dessa modeller utan valet av modell gjordes med hänsyn till rimlighetsbedömning av simuleringstiden och antalet frihetsgrader. För att beskriva bombens bana och nedfallsposition krävs minst tre frihetsgrader, dvs positionen i x , y och z -led. Då bomberna är utrustade med snedställda fenor kommer dock en vinkelhastighet i roll-led, p_b , att genereras, vilket bör påverka nedslagspositionen i sidled. För en fritt fallande bomb är därmed en modell med fyra frihetsgrader önskvärd. Vid fällning kommer bomben under de första kritiska millisekunderna att påverkas dels av flygplanets aerodynamik men även av den kraft som påförs bomben och trycker den bort från flygplanskroppen. Detta påverkar bomben genom att vinkelhastigheter genereras inte bara i roll-led, p_b , utan även i tippled, q_b och girled, r_b . Rörelsen kommer att dämpas relativt snabbt i både tippled och girled, se figur 2.6.

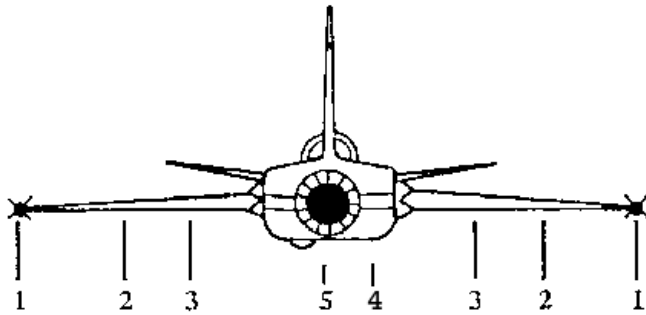
Trots den snabba dämpningen kommer de att påverka nedslagspositionen. En modell med sex frihetsgrader ger därför den information som krävs om bombens rörelse under hela fällningen, valet föll på en sådan implementerad i Fortran. Simuleringstiden visade sig också vara acceptabel då 1000 fällningar simuleras på ungefär två timmar.



Figur 2.6: Exempel på bombens vinkelhastigheter kring x, y respektive z-axeln under en fällning.

2.3 Beskrivning av modell

Modellen består av två rörliga system, flygplanet och bomben. Flygplanets rörelse vid fälltidpunkten beskrivs av höjd över målet, h_0 , Machtal, Ma_{ac} , lastfaktor, n_{zac} , rollvinkel, ϕ_{ac} , banvinkel, γ_{ac} , kurs, ψ_{ac} , och vinkelhastighet i roll-led, p_{ac} . Machtal definieras som kvoten mellan flygplanets fart och ljudhastigheten medan lastfaktor avser förhållandet mellan normalkraft och tyngdkraft. För information angående flygplanets respektive bombens rörelseekvationer, se [11], [7]. Aerodynamiken på flygplanet är inte modellerad, däremot tas hänsyn till den aerodynamiska interferens som uppstår från flygplanet på bomben. Modellen beskriver bombfällning av *dumb bombs*, dvs fritt fallande ostyrda bomber. De bomber som undersöks är tre olika typer från MK80-serien och är identiska vad avser form och material men skiljer sig i storlek. Bombernas utformning kan ses i figur 2.5. JAS 39 Gripen kan bära sin last på sammanlagt åtta balkar, vilka sitter dels under flygplanskroppen men även under vingen. De olika balklägena kan ses i figur 2.7. Indatafiler laddas automatiskt efter att användaren interaktivt valt flygfall, bombtyp, balkläge, vilken last som är monterad i närliggande balk och om Twin Store Carrier används. Indatafilerna består bland annat av defaultvärden för flyg-



Figur 2.7: Positioner för respektive balkläge.

fall, bombspecifik data och tabeller med aerodynamiska konstanter för såväl fritt fall som interferens från flygplanet. Bombspecifikdata innefattar bombens massa, tröghetsmoment, position relativt flygplanet, tvärsnittsarea och referenslängd. Simuleringen stoppas automatiskt då bomben når markplanet eller då angiven maxtid har förflutit. Bombens position och orientering beräknas genom integrering av ordinära differentialekvationer som löses numeriskt. Efter varje tidssteg, d_t , returneras bombens position i det initiala koordinatsystemet, Machtal, Ma_b , tippvinkel, θ_b , och förfluten simuleringstid, t_0 .

2.3.1 Lösningsssteg

Här följer en kort beskrivning av modellens utformning och lösningsgång

Initiering av inparametrar Modellen läser in bomb och flygfallsdata beroende på användarens val.

Initiering av aerodynamiska konstanter Aerodynamiska konstanter för beräkning av luftkrafter vid fritt fall och aerodynamiska interferensen som påverkar bomben från flygplanet läses in. Dessa beror på bombtyp, balkläge och övrig konfiguration av laster på flygplanet.

Beräkning av atmosfärdata Utgående från standardatmosfär och höjd över markplanet beräknas temperatur, tryck, luftens densitet och ljudhastighet.

Initiering av vinddata Modellen läser in vinddata från fil där vindens styrka respektive riktning definieras som funktion av höjden. Vinddatafilerna som används är uppmätta vid vindsonderingar, vilket innebär att flygplanet har mätt upp vindens riktning och fart som funktion av höjden innan siktes- respektive fällprov.

Beräkning av fränstöttningskraft I balkarna sitter pistonger monterade som vid fällning trycker bort bomben från flygplanskroppen. Fränstöttningskraften genereras från gasflaskor och beräknas utgående från angiven temperatur, T_g , i dessa flaskor, se [7].

Beräkning av vinklar Flygplanets anfallsvinkel, α , beräknas utgående från flygplanets massa, m_{ac} , höjd, h_0 , Machtal, Ma_{ac} , lastfaktor, $n_{z_{ac}}$, och luftens densitet, ρ . Modellen hanterar inte någon snedanblåsningvinkel, β , som därför approximeras till noll. Detta begränsar inte användningen av modellen avsevärt eftersom det är önskvärt med väldigt små värden på β vid fällning.

Beräkning av hastigheter Utgående från Machtalet, Ma_{ac} och anfallsvinkeln, α , beräknas flygplanets fart i \hat{x}_{ac} , \hat{y}_{ac} och \hat{z}_{ac} -led.

Beräkning av vinkelhastigheter Flygplanets vinkelhastigheter kring \hat{y}_{ac} och \hat{z}_{ac} beräknas utgående från rollvinkeln, tippvinkeln, girvinkeln och anfallsvinkeln.

Integrationsloop I subrutinen *dropdot* definieras de ordinära differentialekvationerna för varje önskad parameter. Då initialvärden finns specificerade uppstår ett begynnelsevärdesproblem som kan lösas entydigt. De är dock svåra att lösa analytiskt varför en numerisk metod används. Integrationsmetoden som används är en Runge-Kutta metod modifierad av Merson, se [6]. Initialt tidssteg sätts till 0.01 sekunder, kortare steg skulle inte bara medföra längre simuleringstid utan även generera beräkningsbrus. Vid beräkning används variabel steglängd då feltoleransen överskrids. För varje tidssteg beräknas bombens position och orientering i det initiala koordinatsystemet.

Kapitel 3

Felanalys

Här följer beskrivning av de möjliga primärfelen, dvs de störningar som kan ge en signifikant påverkan på bombens nedslagsposition. Olika metoder har använts för att fastställa så många primärfel som möjligt. Några upptäcktes vid genomgång av inparametrar till modellen. Detta var dock inte tillräckligt utan *brainstorming* och diskussioner med experter inom området krävdes.

3.1 Balkläge

I flygplanet sitter en dator som beräknar tidpunkten då fällning av bomben bör ske. Beräkningarna görs utgående från målposition och flygplanets rörelse, hänsyn tas dock inte till bombens initialposition relativt flygplanet. Initialpositionen beror på i vilket balkläge bomben är monterad. För beskrivning av balklägen se figur 2.7. MK82 och MK83 kan monteras i balkläge två, tre och fem medan MK84 som är något större endast kan monteras i balkläge tre och fem. Positionen för nedslaget antas bero linjärt av balkläget, därmed skulle en fällning per balk ge tillräcklig information om balklägets påverkan på nedslagspositionen. Bomben påverkas däremot även av aerodynamisk interferens från flygplanet som beror på Machtal, Ma_{ac} , anfallsvinkel, α_{ac} , balkläge och närliggande last. Närliggande balk kan vara tom eller också siter en last monterad där. Denna last kan bestå av en annan MK80-bomb eller en fälltank med bränsle.

3.2 Fenvinkel

Bomberna från MK80-serien är utrustade med fyra snedställda fenor, se figur 2.5. Vid fritt fall kommer rollmomentets storlek att bero på fenvinkelns storlek, större fenvinkel ger ett större moment. Denna vinkel finns inte specificerad från användaren men den aerodynamiska effekten som uppstår på

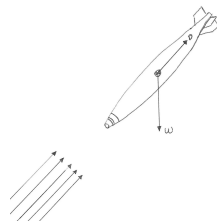
grund av den har fastställts empiriskt i vindtunneltest. I dessa tester efterliknas verkligheten genom att luft blåses på en fixerad kropp och de aerodynamiska effekterna mäts upp. Vindtunneltest ger en god bild av verkligheten men då bomberna är individer kommer variationer av fenvinkel och därmed variationer av den aerodynamiska effekten att förekomma vilket i sin tur leder till att nedslagspositionen påverkas.

3.3 Separationshastighet

Med separationshastigheten menas bombens hastighet relativt flygplanet då bomb och flygplan skiljts åt. Separationshastigheten är riktad i \hat{z}_{ac} -led och beror på flygplanets rörelse vid fälltidpunkten och på den kraft som påförs bomben vid fällning. De balkar där bomberna sitter monterade är utrustade med pistonger som trycker bort bomben från flygplanskroppen. Pistongernas uppgift är att eliminera risken för att bomben vid fällning slår upp mot flygplanskroppen. Den kraft som påförs genereras från gasflaskor och beror på trycket i dessa flaskor. Trycket vid fälltidpunkten är svårbestämt då den beror på gasens temperatur. Initialt fylls flaskorna till 350 bar vid $15^{\circ}C$, vilket gör att trycket kan beräknas utgående från gasens aktuella temperatur vid fällning. Temperaturen beror bland annat på hur länge flygplanet varit i luften och den rådande ytttemperaturen vid flygplanet, T_{ac} .

3.4 Luftmotstånd

Då bomben rör sig genom lufthavet utsätts den för ett luftmotstånd, D , som uppstår på grund av luftens strömningar. Luftmotståndet är alltid riktad motsatt bombens rörelseriktning och består av friktion, formmotstånd, och aerodynamisk interferens från flygplanet. Den aerodynamiska interferensen från flygplanet hanterades i 3.1. Friktionen uppstår då bombens yta inte är helt slät vilket kommer att innebära en bromsande effekt. Formmotståndet beror på bombens utformning och rörelseriktning, då en strömlinjeformad projektil rör sig med sin symmetriaxel parallell med luftströmmen kommer formmotståndet inte att vara nämnvärt stort, se figur 3.1.



Figur 3.1: Luftmotståndet respektive tyngdkraftens riktning.

Då friktion och formmotstånd varierar beroende på den fallande projektilens hastighet, material och utformning införs en aerodynamisk koefficient, C_D , vid beräkning av dess luftmotstånd. Luftmotståndet beror även av luftens densitet, ρ , bombens tvärsnittsarea, A , och hastigheten relativt vinden, V . Den bromsande kraften beräknas enligt

$$D = C_D q A = \frac{1}{2} (C_D \rho V^2 A) \quad (3.1)$$

Tvärsnittsarean, A , antas vara konstant. Beskrivning av variationer av C_D , vindhastighet och luftens densitet följer.

3.4.1 Aerodynamisk motståndskoefficient

Vid beräkning av luftmotståndet införs en aerodynamisk motståndskoefficient, C_D , som beror dels på bombens ytstruktur och utformning men även flygplanets Machtal. I vindtunneltest som finns beskrivet i 3.2, bestäms den dimensionslösa motståndskoefficienten C_D som funktion av Machtalet. De framtagna värden på C_D kommer inte att stämma exakt med verkliga fall, mycket beroende på att bomberna är individer och en del avvikelser i form och material förekommer. Dessutom kommer bomben att vingla något direkt efter separation vilket kommer att yttra sig som ett litet extra inducerat motstånd. Beräknar C_D enligt

$$C_D = C_{D_0} + N \sin^2 \alpha \sim C_{D_0} + N \alpha^2 \quad (3.2)$$

där N avser normalkraften.

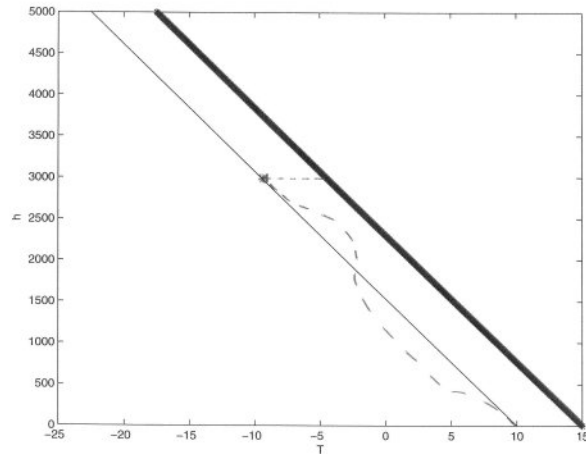
3.4.2 Vindhastigheten

Vinden är svårhanterlig eftersom både styrka och riktning varierar kontinuerligt både med avseende på tid och höjd. Vid fällning är vinden endast känd vid flygplanet och systemdatorn beräknar bombbanan utgående från denna. Då siktes- respektive fällprov utförs mäter flygplanet vinden som funktion av höjden. Ett exempel från en sådan mätning visade att vinden varierar mellan 5-20 m/s vid en stigning från 5-6000 meter över havet. Vid inmätningar av vindens hastighet under en timmes tid i inlandet kommer den maximala avvikelsen från medelvärdet att vara ungefär 100%, detta enligt uppmätningar från SMHI.

3.4.3 Temperatur

I flygplanet mäts temperatur och tryck för en given höjd. Dessa värden jämförs sedan med de teoretiska värdena beräknade utgående från standardatmosfären, se kapitel 2.1.2. Differens mellan uppmätt och teoretiskt värde ger en förskjutning av temperaturens beroende av höjd och en teoretisk temperatur

vid havsytan kan bestämmas. Kurvan som beskriver beroendet mellan höjd och temperatur kan ses i figur 3.2. I verkligheten är inte sambandet helt linjärt utan vissa variationer kommer att uppstå, visas med streckad linje i figur 3.2. Variationerna på temperaturen kommer även att påverka tryck och luftens densitet, vilka i sin tur påverkar luftmotståndet.



Figur 3.2: Förskjuten höjd/temperatur kurva.

3.5 Tyngdkraft

Tyngdkraften, W , är riktad mot jordens centrum och drar bomben mot marken, se figur 3.1. Tyngdkraften beräknas utgående från bombens massa, m_b , och tyngdaccelerationen, g , enligt

$$W = m_b g \quad (3.3)$$

Bombens massa skiljer sig mellan olika individer och tyngdaccelerationen varierar beroende på flygplanets position relativt jordens centrum vid fällning.

3.5.1 Bombmassa

Då bomberna skiljer sig relativt mycket i storlek, MK82 väger 224 kg, MK83 väger 446 kg och MK84 väger 920 kg, är det av intresse att varje bombtyp undersöks var för sig. Dessutom varierar även massan inom varje specifik bombtyp då bomberna är individer och kommer att skilja sig något i sammansättning och material. Då massan ändras kommer även tröghetsmomentet att

påverkas. Variationer i storlek såsom tvärsnittsarea och längd antas dock vara försumbara.

3.5.2 Tyngdacceleration

Tyngdaccelerationen, g , beror på avståndet till jordens centrum vid fällning. Avståndet beräknas genom att summera jordens radie, R_j , och flygplanets höjd, h_0 . Tyngdaccelerationen beräknas enligt:

$$g = G \frac{M_j}{(R_j + h_0)^2} \quad (3.4)$$

där G betecknar den för jorden specifika gravitationskonstanten och M_j är jordens massa.

Kapitel 4

Simuleringar

I detta kapitel ges en introduktion till Monte Carlo-simuleringar, därefter följer en beskrivning av hur antalet simuleringar i varje sekvens fastställts. Dessutom verifieras den slumpfelsgenerator som används för att lösa problemet.

4.1 Monte Carlo-simuleringar

För att kunna dra en statistiskt korrekt slutsats om ett system krävs att en stor mängd stickprov finns att tillgå. Då bombfällningar är enormt resurskrävande är Monte Carlo-simuleringar ett bra komplement. Monte Carlo-simuleringar är inte en specifik metod utan är ett samlingsnamn för simuleringar baserade på slumpstal. För att undersöka primärfelen som diskuterats i kapitel 3 sätts parametrar slumpmässigt. Innan simuleringar kan påbörjas måste antalet simuleringar per sekvens bestämmas. Med sekvens avses en simuleringsomgång där samma parametrar varierar. Antalet simuleringar per sekvens blir en avvägning mellan noggrannhet av standardavvikelsen på nedslagspositionen och simuleringstid. Värt att nämna är att för 10 gånger bättre noggrannhet krävs det 100 gånger fler simuleringar per sekvens, se [12].

4.1.1 Antal simuleringar

För att undersöka de olika primärfelens totala och enskilda påverkan på nedslagspositionen kommer olika lösningsmetoder att användas. Det totala balistikfelet undersöks genom att köra sekvenser bestående av 10 000 simuleringar per flygfall och bombtyp. Sekvensens storlek bestämdes till 10 000 eftersom en hög noggrannhet önskas då det är viktigt att träffa kombinationer av de olika variationer som ger avvikande resultat. Större sekvenser skulle dock inte vara lämpligt på grund av extremt långa simuleringstider. De enskilda primärfelens påverkan på nedslagsplatsen undersöks för att få en bild av vad den totala spridningen beror av. Här kommer spridningsmått att faststäl-

las genom att påföra maximala variationer för likformigt fördelade primärfel och standardavvikelsen för de normalfördelade primärfelen vilket antas ge jämförbara nedslagspositioner.

4.2 Slumptalsgenerator

Verkliga slumptal kan till exempel genereras ur radioaktivt sönderfall eller radiobrus. Vanligare är dock att låta datorer generera talen men eftersom datorer är deterministiska genereras dock inte verkliga slumptal. De flesta tillämpningar kräver heller inte verkliga slumptal utan resultatet blir tillförlitligt även om datorgenererade så kallade pseudoslumptal används. Pseudoslumptal beräknas fram ur algoritmer beroende på frösättning och föregående framtagna slumptal. Användaren bestämmer ett slumpmässigt valt frö och utgående från detta frö beräknas en talserie. I denna rapport har frösättningen gjorts genom funktionsanropet *seed()* i Python. Aktuell tid från datorns systemklocka körs genom en hashfunktion och resulterande värde används sedan som frö. Hashfunktionen tar ett stort tal och beräknar utgående från detta ett mindre tal, vilket innebär att ett flertal ingångsvärden resulterar i samma tal. Anledningen till att talen körs genom en hashfunktion är att närliggande tal sprids vilket gör att frösättningen kan antas vara relativt slumpmässig. De talsekvenser som beräknas fram är både repeterbara och periodiska. Då frösättningen sker relativt slumpmässigt är det högst osannolikt att samma talsekvens genereras flera gånger. Perioden beror på vilken algoritm som används, här har den i Python implementerade slumptalsgeneratorn använts. Den är baserad på algoritmen Mersenne Twister vilken ger en period på $2^{19937} - 1$ tal. För vidare beskrivning av Mersenne Twister se [10]. En slumptalsgenerator bör verifieras innan användning då resultatet kan bli missvisande om inte de genererade slumptalen tillhör önskad fördelning. Här följer verifiering av använd slumptalsgenerator för normalfördelade respektive likformigt fördelade slumptal.

4.2.1 Verifiering

För att testa ett givet fördelningsantagande kan χ^2 -metoden användas, vilket innebär att n stycken slumptal från den önskade fördelningen genereras och sorteras i stigande ordning i k stycken intervall. Sannolikheten att slumptalet hamnar i intervall i betecknas här med $P(i)$. Antalet slumptal för varje intervall, N_i , bestäms och jämförs med antalet tal som borde hamna innanför intervallgränserna vid given fördelning, $nP(i)$. Antalet intervall måste anpassas så att, $nP(i) \geq 5$, för att metoden ska vara gällande. Jämförelser sker genom att hjälpvariabeln

$$Q = \sum_{i=1}^k \frac{(N_i - nP(i))^2}{nP(i)} \quad (4.1)$$

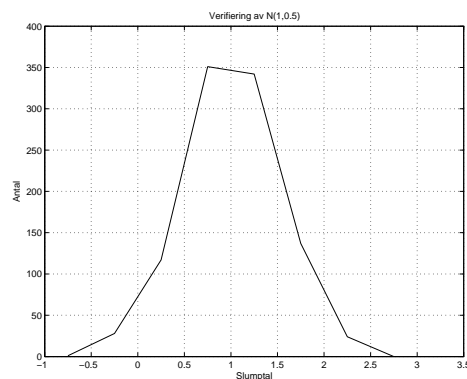
beräknas. Ju mer N_i avviker från sitt antagna väntevärde desto större blir Q och vid för stora värden på Q förkastas fördelningsantagandet. Då antagandet är sant kan hjälpvariabelns fördelning approximeras med, $Q \sim \chi^2(k-1)$, vilket ger en övre förkastningsgräns, c . För vidare information angående χ^2 -metoden och hypotestest se [3].

Slumptalsgeneratorn verifieras genom att undersöka fördelningen av 1000 slumpstal, X_i . Slumptalen genereras med funktionsanropet *normalvariate*(μ, σ) i Python där önskat väntevärde, $\mu = 1$ och standardavvikelsen, $\sigma = 0.5$, dvs $X_i \sim N(1, 0.5)$. De genererade slumpstalen sorteras in i sex stycken intervall, sammanställning ses i tabell 4.1.

Intervall	N_i	np_i
$-\infty < x < 0$	29	22.8
$0 \leq x < 0.5$	117	135.9
$0.5 \leq x < 1$	351	341.3
$1 \leq x < 1.5$	342	341.3
$1.5 \leq x < 2$	137	135.9
$2 < x < \infty$	24	22.8

Tabell 4.1: Sammanställning av normalfördelad data.

Beräknar teststorheten, $Q_N = 4.99$, vilken i detta fall kan antas vara $\chi^2(5)$ -fördelad. I tabell hämtas övre gräns för Q på nivån 0,05, se [9]. Nivån på testet anger hur stor sannolikheten är att antagandet förkastas trots att det är korrekt. Den övre gränsen för Q blev i detta fall, $c_N = 11.07$. Teststorheten Q_N visar sig vara mindre än c_N , dvs antagandet om normalfördelning kan inte förkastas. Att antagandet verkar rimligt kan ses i figur 4.1.



Figur 4.1: Normalfördelade slumpstal.

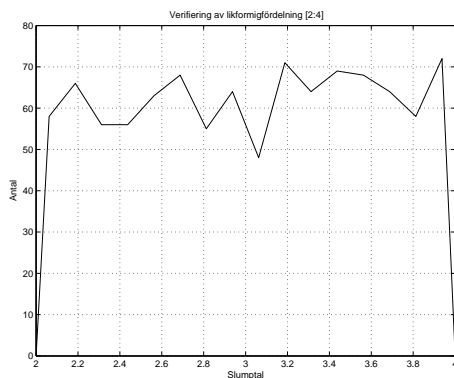
På samma sätt som ovan testas slumptalsgeneratorn då de 1000 genererade slumpstalen, Y_i , antas vara likformigt fördelade. Slumptalen genereras

i Python med funktionsanropet $random(a,b)$ där önskat minimum respektive maximum sätts till $a = 2$ och $b = 4$. Slumptalen sorteras in i sex olika intervall, för sammanställning se tabell 4.2.

Intervall	N_i	np_i
$-\infty < x < 2$	0	0
$2 \leq x < 2.5$	236	250
$2.5 \leq x < 3$	250	250
$3 \leq x < 3.5$	252	250
$3.5 \leq x < 4$	262	250
$4 < x < \infty$	0	0

Tabell 4.2: Sammanställning av likformigt fördelad data.

Utgående från dessa värden beräknas teststorheten, $Q_l = 1.376$, som antas vara $\chi^2(5)$ -fördelad. Från tabell, [9], hämtas gränsvärdet $c_l = 7.82$ på nivå 0.05. Även i detta fall kan fördelningsantagandet inte förkastas eftersom Q_l är mindre än c_l . Antagandet verkar vara rimligt vid granskning av figur 4.2, där antal slumpstal per intervall har plottats.



Figur 4.2: Likformigt fördelade slumpstal.

Allt tyder på att slumpstalsgeneratoren genererar pseudoslumpstal från önskad fördelning. Korrelationen mellan talen i sekvenserna är inte intressant då slumpstalssekvenserna är korrekt fördelade.

Kapitel 5

Implementering

I detta kapitel beskrivs hur initieringen till varje simuleringssekvens utförs och vilka flygfall som undersöks. Ett flygfall beskriver flygplanets tillstånd, dvs orientering och fart vid fälltidpunkten. Därefter följer en beskrivning av hur variationerna påförs för respektive primärfel. En genomgång av de modifieringar av den ursprungliga modellen som krävs ges också.

5.1 Initiering

I detta avsnitt beskrivs vilka inparametrar som lagts till för att kunna påföra de önskade spridningarna. Därefter specificeras de flygfall som undersöks. Det program som initierar varje simuleringssekvens är implementerat i Python. Försök att använda enklare script och även Fortran har gjorts men då det var önskvärt att använda ett avancerat men lättanvänt programmeringsspråk valdes Python. Initieringen startas med att användaren interaktivt får välja bombtyp, flygfall, balkläge, närliggande last, och vilka eller vilket primärfel som ska undersökas.

5.1.1 Inparametrar

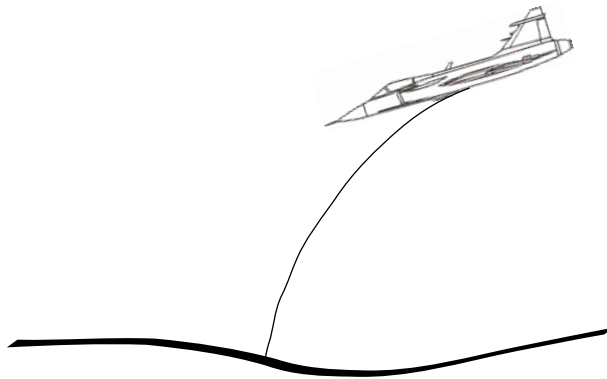
Utgående från användarens val laddas specifika värden på inparametrar från separat fil och inkluderas till modellen. De inparametrar som krävs för att påföra relevanta variationer har lagts till i ovan nämnda filer och står definierade i tabell 5.1. Anfallsvinkeln som beräknas fram utgående från flygplanets Machtal, Ma_{ac} , höjd, h_0 , lastfaktor, n_{zac} , luftens densitet, ρ , och flygplanets massa, m_{ac} , i den ursprungliga modellen har ändrats till en inparameter. Även tyngdaccelerationen som ursprungligen var satt konstant ändrades till en inparameter. De övriga inparametrarna i tabell 5.1 har inga motsvarigheter i den ursprungliga modellen.

α_0	Flygplanets anfallsvinkel vid fälltidpunkten
g	Tyngdaccelerationen
T_{ac}	Yttertemperaturen vid flygplanet
k_{cl}	Skalfaktor för rollmoment
k_{cd}	Skalfaktor för aerodynamisk konstant, C_D
c_{di}	Konstant för variationer av aerodynamisk interferens från närliggande last.
ΔT_0	Konstant för temperaturvariationer
$\Delta \bar{v}$	Vektor för variationer av vindhastighet.
\bar{n}	Bombens infallsriktning.
\bar{p}_0	Bombens nominella nedslagspunkt, dvs nedslagspositionen vid fällning med nominella indata.

Tabell 5.1: Tillägg av inparametrar till ursprunglig modell.

5.1.2 Flygfall

Ett flygfall beskriver flygplanets orientering och fart vid fälltidpunkten genom att ange Machtal, Ma_{ac} , lastfaktor, n_{zac} , höjd, h_0 , kurs, ψ_{ac} , banvinkel, γ_{ac} , rollvinkel, ϕ_{ac} , anfallsvinkel, α_{ac} , vinkelaccelerationen i roll-led, p_{ac} , och yttertemperaturen vid flygplanet, T_{ac} . Parametervärden hämtas från tidigare gjorda siktes- och fällprov vilket ger realistiska flygfall. Två typer av flygfall undersöks, med tre specifika fällningar från var typ. Den första typen av fällning sker då flygplanets tippvinkel hålls konstant. Vilket innebär att normalkraft och tyngdkraft är ungefär lika stora, dvs värdet på lastfaktorn ligger nära ett. I figur 5.1 visas bombbanan vid fällning från den första flygfalls typen. De tre specifika flygfallen från typ ett som ska undersökas specificeras i tabell 5.2. Där ses att lastfaktorn, n_{zac} , ligger nära ett i samtliga fall.

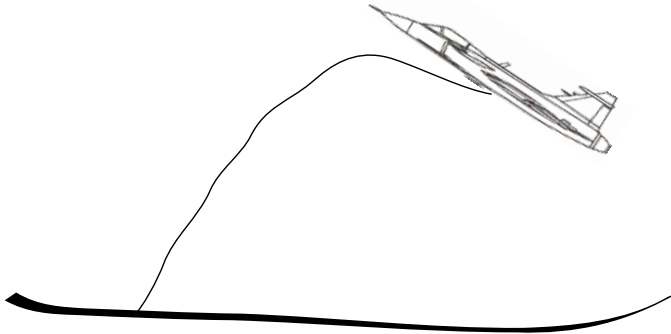


Figur 5.1: Fällning vid konstant tippvinkel.

Flygfall	103	203	202
Ma_{ac}	0.80	0.84	0.81
$n_{z_{ac}}$	1.03	1.40	1.02
h_0 [m]	1940.7	1674.2	1280.9
ϕ_{ac} [deg]	0.039	0.2	-12.9
ψ_{ac} [deg]	145.67	4.3	356.4
α_{ac} [deg]	2.7	2.6	2.3
γ_{ac} [deg]	-0.35	-30.5	-7.3
p_{ac} [rad/s]	0.039	0.015	0.009
T_{ac} [C]	-13.1	-2.5	6.7

Tabell 5.2: Tre flygfall från fällning vid konstant tippvinkel.

Den andra typen av fällning som kommer att undersökas sker vid upptagning, se figur 5.2. För fällningar vid upptagning kommer normalkraften att vara upp emot fyra gånger större än tyngdkraften. Detta kommer att innebära att bombens position i höjddled kommer att öka något efter fällning för att sedan falla mot marken. Bombens separationshastighet i z-led relativt flygplanet kommer även att minska med ökande $n_{z_{ac}}$. De tre specifika flygfallen som ska undersökas då fällning sker vid upptag specificeras i tabell 5.3. Där ses att lastfaktorn, $n_{z_{ac}}$, har värden mellan 3.5 och 4.5.



Figur 5.2: Fällning vid upptagning.

Flygfall	302	303	003
Ma_{ac}	0.82	0.895	0.806
n_{zac}	3.55	3.57	4.2
h_0 [m]	1022.4	1919.8	890.0
ϕ_{ac} [deg]	-1.58	0.16	-1.39
ψ_{ac} [deg]	127.01	1.36	325.26
α_{ac} [deg]	5.1	4.2	6.0
γ_{ac} [deg]	-14.2	-25.9	17.4
p_{ac} [rad/s]	0.42	-0.03	0.19
T_{ac} [K]	8.4	-10.5	9.2

Tabell 5.3: Tre flygfall från fällning vid upptagning.

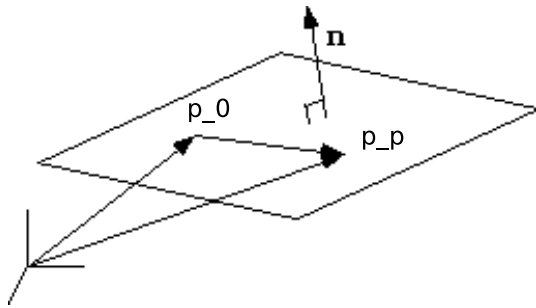
5.2 Nedslagsposition

Ett vapensystems precision anges ofta som radien till den cirkel som innefattar 50% av nedslagspositionerna. Vid utvärdering av nedslagspositioner i markplanet kommer ett fel i höjddled bidra till ett större fel än motsvarande fel i sidled. För att kunna jämföra fel i höjddled med fel i sidled korrekt sätts nedslagspositionerna till den punkt då bomben skär det plan som är ortogonalt mot infallsriktningen istället för då den träffar markplanet. För att fastställa planeekvationen bestäms en referenspunkt i planet, \bar{p}_0 , och normalvektorn till planet, \bar{n} . Referenspunkten sätts till den nominella nedslagsplatsen, dvs den punkt på marken relativt flygplanet som bomben träffar då alla parametrar är satta till sitt väntevärde och bomben sitter monterad i balkläge fem. Bombens infallsriktning tillika \bar{n} beräknas utgående från bombens position vid höjden två meter och vid markplanet. Då bomben skär planet kommer vektorn $(\bar{p}_p - \bar{p}_0)$ vara ortogonal mot \bar{n} , där \bar{p}_p är bombens aktuella position, se figur 5.3. Eftersom vektorerna är ortogonala kommer skalärprodukten vara lika med noll, $\bar{n}(\bar{p}_p - \bar{p}_0) = 0$ vilket ger på komponentform

$$n_x(p_{px} - p_{0x}) + n_y(p_{py} - p_{0y}) + n_z(p_{pz} - p_{0z}) = 0 \quad (5.1)$$

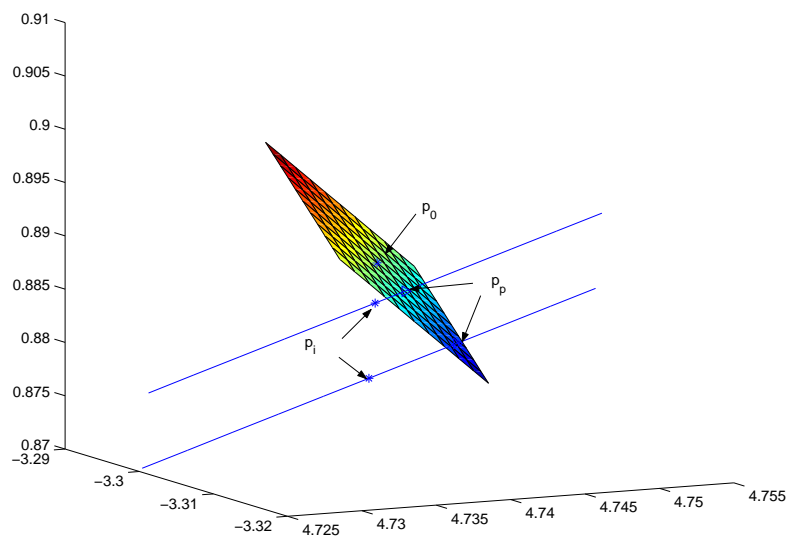
Bombposition då simuleringen stoppas, \bar{p}_i , kommer dock inte att hamna i planet eftersom den numeriska integrationsmetoden använder en steglängd på 0.01 sekunder. Bombens hastighet vid nedslaget ligger nära ljudhastighetens vilket gör att bomben faller närmare tre meter mellan två på varandra följande integreringar. Den ursprungliga modellen har därför modifierats så att simuleringen stoppas då värdet av planeekvationen byter tecken. Den egentliga skärningspunkten, \bar{p}_p , bestäms sedan genom att följa infallsriktningen tillbaka mot planet, enligt ekvationen

$$\bar{n}t + \bar{p}_i = \bar{p}_p \quad (5.2)$$



Figur 5.3: Vektorernas placering i infallsplanet.

där $t = \frac{\bar{n}}{|\bar{n}|^2} (\bar{p}_i - \bar{p}_0)$, vidare förklaring ges i [4]. I figur 5.4 ses två exempel på möjliga infall mot planet. Här ses en tydlig avvikelse mellan bombpositionen då simuleringen stoppades, \bar{p}_i , och den önskade positionen i planet, \bar{p}_p .



Figur 5.4: Följer \bar{n} från \bar{p}_i till \bar{p}_p .

5.3 Primärfel

Här följer en beskrivning av de olika primärfelens storlek och hur dessa variationer påförs önskad parameter för respektive primärfel.

5.3.1 Balkläge

Hur balkläget påverkar bombens nedslagsposition beror inte enbart på bombens balkläge vid fällning utan även på den aerodynamiska interferensen från eventuell last monterad i närliggande balk. Balkläge och närliggande last sätts genom generering av slumpstal mellan noll och ett ur en likformigt fördelad datamängd. Valet av balkläge och närliggande last sker beroende på inom vilket intervall dessa slumpstal hamnar. För MK82 och MK83 är sannolikheten för varje balkläge, $P_{b2,3} = \frac{1}{5}$ och för MK84 är motsvarande sannolikhet, $P_{b4} = \frac{1}{3}$. Vad beträffar balkläge respektive alternativ för övrig lastkonfiguration antas alla tillåtna fall vara lika sannolika. Då bomben monteras i balk fem kommer inte övrig lastkonfiguration att påverka eftersom avståndet mellan balk fem och balk tre är tillräckligt stort. Verkliga fällningar sker dock sällan från balk fem eftersom det balkläget ofta är ockuperad av en fälltank med bränsle.

Vid beräkning av den aerodynamiska interferensen från den närliggande lasten används aerodynamiska konstanter bestämda utgående från vind-tunnelprov. Då det saknas exakt data för de intressanta lastkonfigurationerna kommer detta att något felaktigt påverka bombens hastighet. För att kompensera de något felaktiga koefficienterna adderas ett litet ytterligare bidrag, c_{di} , till bombens initiala hastighet i \hat{y} -led. Denna variation antas normalfördelad med väntevärdet, $\mu = 0$, och standardavvikelsen, $\sigma = 0.2$ m/s. Standardavvikelsens värde har fastställts utgående från tidigare erfarenheter.

5.3.2 Fenvinkel

Bombens fenor är något snedställda vilket kommer att påverka rollmomentet, L_r , vid fritt fall. Fenvinkeln finns inte specificerad av användaren men effekten av den har mätts upp vid vindtunnelprov och beskrivs av en aerodynamisk konstant, $C_{l\delta} = C_{l\delta_a} \delta_a$. Då $C_{l\delta}$ beror linjärt av fenvinkeln införs en skalfaktor kcl som multipliceras med $C_{l\delta}$, för att påföra variationer. Skalfaktorn kcl är ett slumpstal från en normalfördelad mängd med väntevärdet, $\mu = 1$ och standardavvikelsen, $\sigma = 0.5$. Då fenvinkeln är ungefär 2° har en standardavvikelse på 50% ansetts rimlig. Rollmomentet beror inte enbart på fenvinkeln utan även på den aerodynamiska rollvinkeln, $\Phi = \arctan \frac{\beta}{\alpha}$, och beräknas enligt

$$L_r = (C_l(\Phi) + kclC_{l\delta_a} \delta_a)qAc \quad (5.3)$$

där A är bombens tvärsnittsarea, c är bombens referenslängd och q är det dynamiska trycket.

5.3.3 Separationshastighet

Bombens separationshastighet relativt flygplanet beror på temperaturen i de gasflaskor som genererar kraften i pistonerna vid fällning. Gastemperaturen vid fyllning, T_g , och yttertemperaturen vid flygplanet, T_{ac} , anges som inparameter till modellen. För att påföra variationer av temperaturen i gasflaskorna genereras ett slumpstal, x_{tg} , från en likformigt fördelad datamängd med värden mellan noll och ett. Temperaturen i gasflaskorna vid fälltidpunkten, T_{gac} sätts utgående från x_{tg} , den maximala temperaturen, T_g , och den minimala temperaturen, T_{ac} , enligt

$$T_{gac} = x_{tg}(T_g - T_{ac}) + T_{ac} \quad (5.4)$$

5.3.4 Aerodynamisk motståndskoefficient

Den aerodynamiska motståndskoefficienten C_D kommer att påverka luftmotståndet på bomben i \hat{x}_b -led. För att påföra variationer på C_D införs skalfaktorn kcd som är ett slumpstal från en normalfördelad mängd med standardavvikelsen, $\sigma = 0.04$ och väntevärdet, $\mu = 1$. Här har tidigare erfarenheter visat att en standardavvikelse på 0.04 kan anses vara rimlig. Luftmotståndet beräknas enligt

$$D = kcdC_DqA \quad (5.5)$$

där q är det dynamiska trycket och A är bombens tvärsnittsarea.

5.3.5 Vindhastighet

Vinddata innefattar en osäkerhet i både fart och hastighet, vilket kräver att spridningar påförs i alla riktningar. Listan med inparametrar till modellen utökas med $\Delta\bar{v} = (\Delta v_x, \Delta v_y, \Delta v_z)$. Då vindens hastighet kan variera med upp mot 100% ansågs en standardavvikelse på 2.3 m/s vara rimlig för variationer i de tre riktningarna. Bestämmer $\Delta\bar{v}$ genom att generera tre oberoende slumpstal från en normalfördelad datamängd med väntevärdet, $\mu = 0$ och standardavvikelsen, $\sigma = 2.3$ m/s. Då vindens hastighet är känd vid flygplanet får bomben falla under påverkan av nominell vind, \bar{v}_n , under de första 0.3 sekunderna innan variationen adderas. Nominell vind avser den vindprofil som mätts upp vid respektive siktes- respektive fällprov. Vindvariationen adderas inte som ett steg utan fasas in under fyra sekunder,

$$\bar{v} = \bar{v}_n + \frac{t_0}{4}\Delta\bar{v} \quad (5.6)$$

där t_0 är förfluten simuleringstid och \bar{v} är den vindhastighet som kommer att påverka bomben vid aktuell tidpunkt. Då förfluten simuleringstid, t_0 , överskrider fyra sekunder gäller $\bar{v} = \bar{v}_n + \Delta\bar{v}$.

5.3.6 Temperatur

Variation på temperaturen påförs genom addition av ΔT_0 . I praktiken innebär detta att temperaturen vid havsytan varierar vilket kommer att innebära en förskjutning av tidigare nämnd temperatur/höjd kurva enligt

$$T = (T_0 + \Delta T_0) - 0.0065h \quad (5.7)$$

Sätter ΔT_0 genom att generera ett slumpstal från en normalfördelad datamängd med standardavvikelsen, $\sigma = 2.5$, och väntevärdet, $\mu = 0$. Standardavvikelsen har bestämts efter rimlighetsbedömning.

5.3.7 Bombens massa

Bombernas nominella massor respektive standardavvikelser finns specificerade från tillverkaren, se [8]. Variation på bombens massa, Δm_b , sätts genom att ett slumpstal genereras från en normalfördelad datamängd där standardavvikelsen, σ , är 2.5% av bombens massa och väntevärdet, $\mu = 0$. Variationen, Δm_b , kommer även att påverka bombens tröghetsmoment. Använder maximalfelsuppskattning för att bestämma variationerna på bombens tröghetsmoment. Detta innebär att påverkan för extremfallet då Δm_b fördelas i bombens skal bestäms. Maximalfelsuppskattning av tröghetsmomenten, $I = (I_x, I_y, I_z)$, med avseende på massan, m_b , beräknas enligt

$$|\Delta I(m_b)| \leq \left| \frac{dI}{dm_b} \Delta m_b \right| \quad (5.8)$$

För vidare information angående maximalfelsuppskattning se [6]. Tröghetsmomenten beror på bombens utformning och massa. Bombens utformning liknas här med en ellipsoid vars tröghetsmoment beräknas enligt

$$I_x = \frac{1}{4} m_b b^2 \quad (5.9)$$

$$I_y = \frac{1}{4} m_b c^2 \quad (5.10)$$

$$I_z = \frac{1}{5} m_b (c^2 + b^2) \quad (5.11)$$

Här betecknar b och c bombens utsträckning i längd respektive bredd. Referenslängderna b och c antas vara konstanta vilket ger att tröghetsmomenten beror av en konstant, k_j , och bombmassan,

$$I_j = k_j m_b, j = x, y, z \quad (5.12)$$

Utför derivering av tröghetsmomentet med avseende på massan, vilket ger $\frac{\partial I_j}{\partial m_b} = k_j$. Maximalfelsuppskattar tröghetsmomentet genom att multiplicera ovan nämnda derivata med variationen av massan, enligt

$$|\Delta I_j(m_b)| = \frac{\partial I_j}{\partial m_b} \Delta m_b = k_j \Delta m_b, j = x, y, z \quad (5.13)$$

5.3.8 Tyngdaccelerationen

Tyngdaccelerationen beräknas beroende på jordens radie och flygplanets höjd vid fällning. För varje simuleringssekvens genereras en skalfaktor, x_r , slumpmässigt från en likformigt fördelad datamängd mellan noll och ett. Utgående från giltiga värden för avståndet till jordens centrum, här används $R_{j_{min}} = 6378.135$ km som minsta avstånd och $R_{j_{max}} = 6356.756 + h_0$ km som största, bestäms avståndet från jordens centrum enligt

$$R_j = x_r(R_{j_{max}} - R_{j_{min}}) + R_{j_{min}} \quad (5.14)$$

5.3.9 Totalt ballistikfel

Då det totala ballistikfelet undersöks kommer samtliga spridningar att påföras modellens inparametrar samtidigt. Slumptalen genereras oberoende av varandra eftersom primärfelen antas vara just oberoende. I vilket balkläge bomben är monterad och vilken gravitation som påverkar bomben beror båda på mänskliga val vilket gör dem oberoende av varandra och de övriga primärfelen. Bombens massa och dess fenvinkel beror på hur tillverkningen har utförts vilket gör att även dessa kan antas oberoende. Variationer av vind och temperatur sker kontinuerligt vad beträffar både tid och höjd och kan även dessa antas oberoende. Temperaturen i gasflaskorna beror delvis på rådande yttertemperatur men eftersom det även beror på hur länge flygplanet har varit i luften och på vilka höjder flygningen har utfört så antas även denna oberoende av de övriga.

5.4 Simuleringsloop

Utgående från användarens interaktiva val anropas den modifierade modellen i en loop där antalet anrop beror på hur många stickprov som önskas. Anropen sker genom att generera runfiler som körs med önskade inparametrar till modellen, se exempel i tabell 5.4. Runfilerna för alla fällningar i en simuleringssekvens sammanfaller vad gäller specificering av bomb och flygfall men skiljer sig vad det gäller primärfelsspecifika parametrar som slumpats fram för respektive runfil.

```

/home/Montecarlo/drop << ! % drop anropas
101 % Valt flygfall, 101
83 % Vald bombtyp, MK83
20 % Balkläge 2, babord sida.
0 % Närliggande last, tom balk.
machf0 =0.75 % Machtal, flygfallsspecifik
nzf0 = 1.0 % Lastfaktor, flygfallsspecifik
h0 = 2833.6 % Höjd, flygfallsspecifik
phf0= -1.9 % Rollvinkel, flygfallsspecifik
psf0=142.7 % Kurs, flygfallsspecifik.
alpha0=3.4 % Anfallsvinkel, flygfallsspecifik.
gammaf0=-0.5 % Banvinkel, flygfallsspecifik.
pf0=0.02 % Rollvinkelhastighet, flygfallsspecifik.
Tac=-3.4 % Yttertemperatur, flygfallsspecifik.
kcl=0.81 % Skalfaktor för variera fenvinkeln
nx=-2.3 % Nedslagsplanets normalvektor
ny=1.4 %
nz=-0.2 %
px=-4484.3 % Nominell nedslagsposition
py=3423.43 %
pz=2833.6 %
ex
!
```

Tabell 5.4: Exempel på en genererad runfil.

5.5 Verifiering av modell

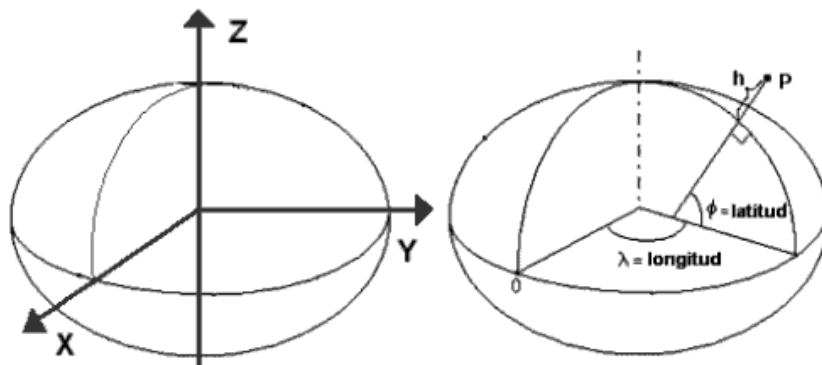
Att verifiera modellens beskrivning av hela bombbanan med avseende på alla variabler skulle kräva en stor arbetsinsats. Vi nöjer oss här med att verifiera nedslagspositionen eftersom det är den som är av intresse. Då flygfallsspecifik data har hämtats dels från siktesprov men även från verkliga fällprov kan det simulerade nedslaget jämföras med den verkliga nedslagspositionen. De flygfallsspecifika parametrarna för valt fällprov finns specificerade i tabell 5.5.

Förutom de tidigare nämnda modifieringar av modellen har även tryck och temperatur anpassats till verklig atmosfärdata, T_h , P_h , dvs för tryck och temperaturberäkningar har inte standardatmosfär använts utan kurvan med temperatur som funktion av höjden har förskjutits. Detta finns beskrivet i 3.4.3. Dessutom har skillnaden mellan önskad fälltidpunkt och den verkliga fälltidpunkten, t_{rel} , specificerats.

Ma_{ac}	=	0.8056
h_0	=	890 m
$n_{z_{ac}}$	=	4.2
ϕ_{ac}	=	-1.39°
γ_{ac}	=	17.429°
ψ	=	325.26°
p_{ac}	=	0.1962 rad/s
$longitud_{ac}$	=	66.27°
$latitud_{ac}$	=	19.29°
$Bombtyp$	=	MK83
$Balklge$	=	3, vänster
g	=	$9.819124 \frac{m}{s^2}$
t_{rel}	=	0.038s
T_h	=	285.6 K
P_h	=	1.0155 bar

Tabell 5.5: Valt flygfall för verifiering.

Modellen anger bombens nedslagsposition på marken, \bar{p}_{mb} , i det initiala koordinatsystemet. Den verkliga positionen, \bar{p}_b , har däremot uppmätts med GPS och anges i kartesiska geocentriska koordinater, där origo ligger i jordens centrum, x-axeln går genom *Greenwish-meridianen*, z-axeln pekar mot norr och y-axeln är placerad så att det bildar ett högersystem, se figur 5.5.



Figur 5.5: Geocentriskt respektive geodetiskt koordinatsystem.

Flygplanets position vid fällning, \bar{p}_{ac} är däremot angivet i geodetiska koordinater, dvs positionen anges i longitud och latitud. För att bestämma den verkliga nedslagsplatsen relativt flygplanets fällningsposition räknas positionen om till geocentriska koordinater med hjälp av en funktion i Matlab, se [2]. Differensen mellan flygplanets position, \bar{p}_{ac} , och den verkliga nedslagspositionen, \bar{p}_b , beräknas enligt

$$\bar{p}_{vb} = \bar{p}_b - \bar{p}_{ac} \quad (5.15)$$

Då hänsyn tas till jordens krökning vid bestämning av det simulerade nedslaget, \bar{p}_{mb} , måste \bar{p}_{vd} meridiankorrigeras för att kunna utföra jämförelse mellan den simulerade nedslagspositionen och den verkliga. Då breddgraden vid fällning är känd kan resultatet meridiankorrigeras så att positionerna blir jämförbara. Meridianens krökning där fällprov utförts uppskattas till $\varphi = 3.04^\circ$. Flygplanets aktuella position vid fällning visas i tabell 5.5. Den slutliga positionen betecknas x_{vdt}, y_{vdt} och beräknas enligt

$$x_{vdt} = x_{vd} \cos(\varphi) - y_{vd} \sin(\varphi) \quad (5.16)$$

$$y_{vdt} = x_{vd} \sin(\varphi) + y_{vd} \cos(\varphi) \quad (5.17)$$

Jämförelse mellan \bar{p}_{vdt} och \bar{p}_{mb} gav, $\Delta x = 13m$ och $\Delta y = -14m$. För att illustrera hur känslig nedslagspositionen är för fälltidpunkten gjordes ytterligare en jämförelse. Genom att flytta fram fälltidpunkten för den simulerade fällningen 12 ms blev resultatet vid jämförelse med den verkliga nedslagspositionen betydligt bättre, $\Delta x = 0.74m$ och $\Delta y = -6.65m$.

Eftersom modellen används för jämförelser mellan fällningar under identiska förhållanden är detta resultat tillfredställande.

Kapitel 6

Resultat

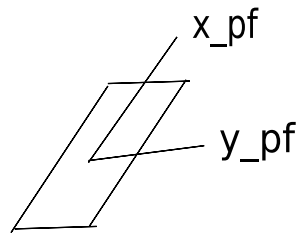
I detta kapitel beskrivs utförd analys av simuleringsdata för de enskilda primärfelen respektive det totala ballistikfelet. Dessutom redovisas resultat och slutsatser beträffande spridning av bombens nedslagsposition för respektive fall. Alla numeriska värden i detta kapitel är skalade så att endast förhållanden mellan de olika resultaten kan utläsas. Det exakta resultatet redovisas i motsvarande interna rapport på Saab.

6.1 Bearbetning av simuleringsdata

För att underlätta analysen av simuleringsdata transformeras de tredimensionella nedslagspositionerna till ett planfixt koordinatsystem, vilket beskrivs i följande kapitel. Även hur resultatet slutligen redovisas kommer att diskuteras.

6.1.1 Koordinattransformation

Bombernas nedslagspositioner från simuleringssekvenserna är angivna i det initiala koordinatsystemet, där x-axeln är riktad åt norr, y-axeln mot öster och z-axeln mot markplanet. För att underlätta verifiering transformeras nedslagspositionerna till ett planfixt koordinatsystem där den nominella fällningen utgör origo. I det planfixa koordinatsystemet kan nedslagspositionerna beskrivas med endast två koordinater, x_{pf} och y_{pf} . Planet i figur 6.1 är det mot infallsriktningen ortogonala plan som beskrivs i kapitel 5.2.



Figur 6.1: Planfixt koordinatsystem.

Transformationen innefattas av en translation och två på varandra följande rotationer. Translationen flyttar origo till den nominella nedslagspositionen, \bar{p}_0 . Nedslagspositionerna relativt \bar{p}_0 beräknas enligt

$$\bar{p}_t = \bar{p}_p - \bar{p}_0 \quad (6.1)$$

där \bar{p}_p är nedslagspositionen i det initiala koordinatsystemet. Därefter roteras koordinatsystemet ψ radianer kring z-axeln respektive θ radianer kring y-axeln. Rotationsvinklarna beräknas utgående från infallsriktningen, \bar{n} . Rotationsmatriserna definieras som

$$R_\psi = \begin{pmatrix} \cos \psi & \sin \psi & 0 \\ -\sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$R_\theta = \begin{pmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta \end{pmatrix}$$

och koordinatsystemet roteras enligt

$$\bar{p}_{pf} = R_\theta R_\psi \bar{p}_t \quad (6.2)$$

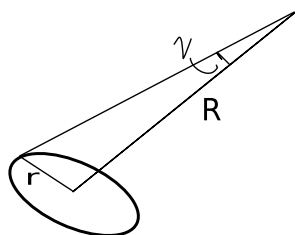
6.1.2 Analys av simuleringsdata

Det totala ballistikfelet analyseras genom att beräkna avståndet, r_i , från nominell nedslagsposition till varje nedslagsposition enligt

$$r_i = \sqrt{x_{pf}^2 + y_{pf}^2} \quad (6.3)$$

Då fördelningen av nedslagspositionerna är okänd redovisas resultatet genom att bestämma CEP, Circular Error Probability. CEP definieras som radien på den cirkel där sannolikheten att en bomb hamnar innanför är 50%. Radien, r , sammanfaller med medianen av datamängden av avstånd till alla nedslagspositioner i aktuell simuleringssekvens. Vid analys av de enskilda primärfelen har inte Monte Carlo-simuleringar utförts utan en representativ fällning per

primärfel har simulerats och avståndet, r , till denna nedslagsposition har beräknats. Då fällningar sker från olika höjder är dock inte avståndet, r , användbart för jämförelser mellan de olika flygfallen. Variationen beskrivs istället med hjälp av den vinkel, ν , som bildas mellan sikteslinjen från flygplanet till nominellt nedslag, R , respektive CEP-radien, r , se figur 6.2.



Figur 6.2: Definition av spridningsvinkeln, ν .

Avståndet, R , beräknas från fällpunkten till nominell nedslagsposition, (x_0, y_0, z_0) , enligt

$$R = \sqrt{x_0^2 + y_0^2 + z_0^2} \quad (6.4)$$

Vinkeln ν definieras som,

$$\tan(\nu) = \frac{r}{R} \quad (6.5)$$

Då vinkeln, ν , antas vara liten kan denna approximeras enligt, $\nu \sim \frac{r}{R}$. Både avståndet, r , och vinkeln, ν , är i följande redovisning av resultat skalade till dimensionslösa tal för att endast kunna utläsa storleksordningen mellan avvikelser av nedslagspositionen.

6.2 Enskilda primärfel

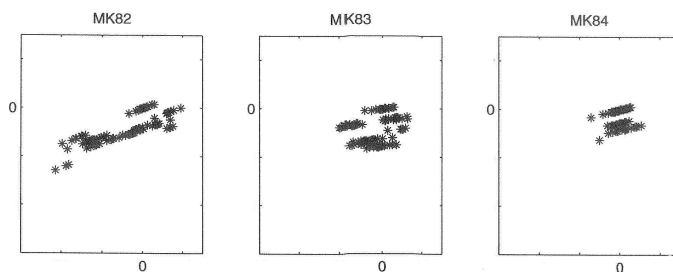
Här redovisas de resultat och slutsatser som framkommit vid analys av de enskilda primärfelens påverkan på nedslagspositionen. För att få en bild av hur nedslagspositionerna är fördelade i förhållande till det nominella nedslaget har hundra bombfällningar med den minsta bomben, MK82, simulerats för varje flygfall och primärfel. Detta ger inget underlag till någon statistisk slutsats men då endast en störning påförs åt gången kommer det ändå att ge ett stöd till analysen. För att underlätta jämförelser mellan olika flygfall, bombtyper och primärfel kommer skalningen av axlar att sammanfalla för alla grafer inom varje figur.

6.2.1 Balkläge

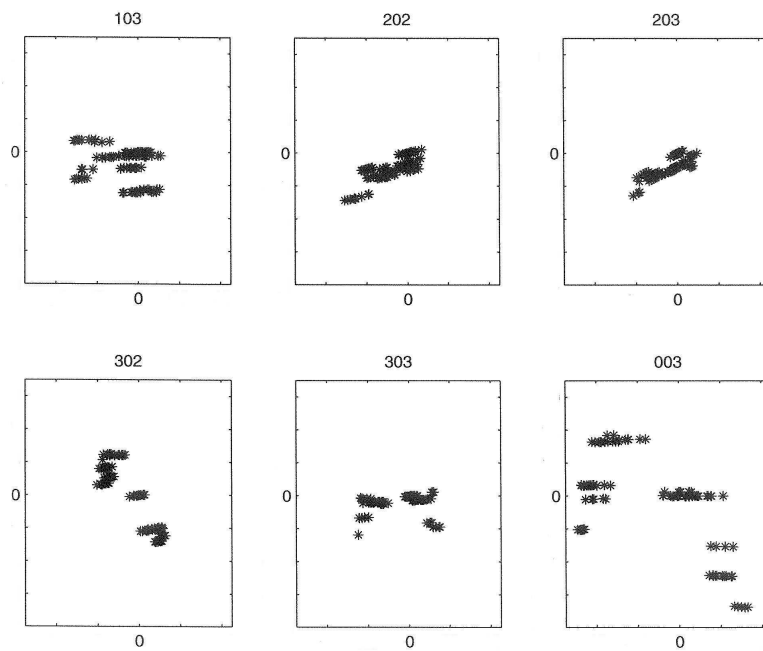
Hur nedslagspositionen påverkas av bombens balkläge undersöks genom att analysera nedslagspositioner då såväl balkläge som närliggande last varieras

enligt 5.3. Antalet kombinationer av balklägen och övriga konfigurationer är tretton stycken för MK82 och MK83, eftersom MK84 inte monteras i balkläge två blir kombinationerna för denna bomb endast sju stycken. Då antalet kombinationer är begränsade kommer de hundra simulerade fällningarna att ge en god uppfattning av nedslagspositionens spridning, se figur 6.4.

Nedslagspositionerna ligger som förväntat grupperade beroende på i vilken balk bomben var monterad vid respektive fällning. Variationer av den aerodynamiska interferensen från närliggande last ses även tydligt då grupperingarna inte är cirkulära utan utdragna i sidled. Resultatet från flygfall 302 och 003 även avviker i höjdlid, vilket antas beror på att flygplanet vid fällning har en något större rollvinkelhastighet, p_{ac} , i dessa fall jämfört med de övriga. Andra fall som skiljer sig något ifrån de övriga är 103 och 003 vars nedslagspositioner är mer utspridda. Detta beror på att bombernas fallsträcka är ungefär 75% längre än de övriga, vilket innebär att bomben kommer att avvika mer från den nominella nedslagspositionen. Fallsträckan beror inte bara på från vilken höjd bomben fälls utan även på flygplanets tippvinkel, θ_{ac} , vid fälltidpunkten, vilket kommer att påverka bombans utformning. För att jämföra eventuella skillnader för de olika bombtyperna kan simuleringsdata från flygfall 203 för respektive bomb ses i figur 6.3. Det är tydligt att en tyngre bomb kommer att påverkas mindre vilket ger en mindre spridning. Då MK84 dessutom inte fälls från balkläge två blir nedslagen än mer centrerade. För att uppskatta storleksordningen och dessutom jämföra de olika flygfallen och bombtyperna beräknas CEP-radien, r , för respektive fall. Resultatet från de olika simuleringssekvenserna ses i tabell, 6.1. Där spridningsvinkeln, ν , visar sig vara större i de fall med större lastfaktor. Detta beror på att bombens höjd över markplanet ökar direkt efter fällning vilket gör att den egentliga fallsträckan är något längre än det uträknade avståndet R . I tabell 6.1 ses även tydligt hur nedslagspositionerna vid fällning av den mindre bomben, MK82, avviker mer från den nominella nedslagspositionen än med de tyngre bomberna.



Figur 6.3: Variation av balkläge för olika bombtyper.



Figur 6.4: Variation av balkläge för olika flygfall.

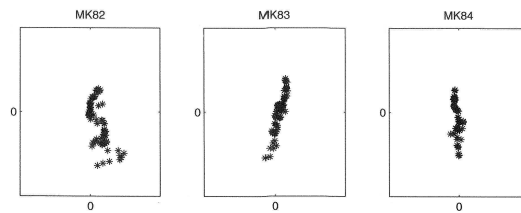
	MK82		MK83		MK84	
Flygfall	r	ν	r	ν	r	ν
302	1.50	58	0.96	37	0.72	28
003	3.31	56	1.56	26	0.45	7
303	1.19	35	0.50	15	0.39	11
203	0.72	27	0.70	26	0.33	12
202	0.94	26	0.63	18	0.44	12
103	1.12	21	0.67	13	0.73	13

Tabell 6.1: Resultat då balkläget varierar, alla värden är skalade.

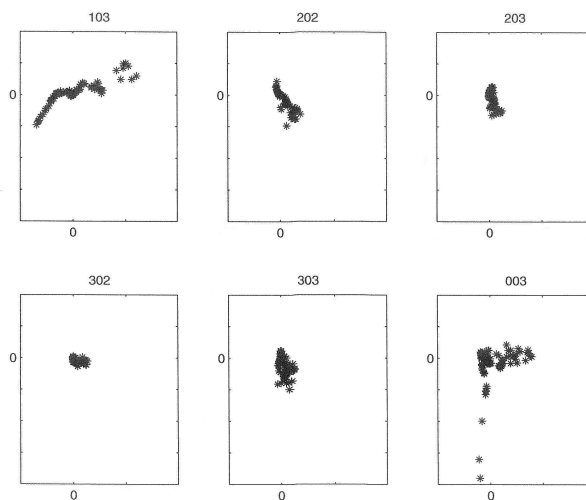
6.2.2 Fenvinkel

Här undersöks påverkan av nedslagspositionen då bombens fenvinkel varierar, enligt kapitel 5.3. Resultatet från de hundra utförda simuleringarna kan ses i figur 6.6, vilket visar att en större fenvinkel, resulterar inte bara i en avvikelse i sidled utan även i längdled. Spridningen av nedslagspositioner beror även i detta fall på fallsträckan vilket visar sig i plottarna för flygfall 103 och 003. En viss osymmetri visar sig i figur 6.6 vilket antas bero på

att rollmomentets beroende av bombens fenvinkeln inte är linjärt. I figur 6.5 ses bombnedslagen från flygfall 203 då fällningar av respektive bombtyp har simulerats. Inget tyder på att avvikelens storleksordning påverkas av bombtypen men däremot ses tydliga skillnader i utfallet. En tyngre bomb tenderar att gå rakare men variationen i längdled förblir oförändrad. För att uppskatta storleksordningen av påverkan från variationer av fenvinkeln, simuleras en fällning för respektive flygfall och bomb där skalfaktorn kcl sätts till värdet av dess standardavvikelse. Resultatet från dessa simuleringar presenteras i tabell, 6.2. Här bekräftas att en längre fallsträcka ger en större avvikelse av nedslagspositionen och att en tyngre bomb påverkas något mindre.



Figur 6.5: Variation av fenvinkel för olika bombtyper.



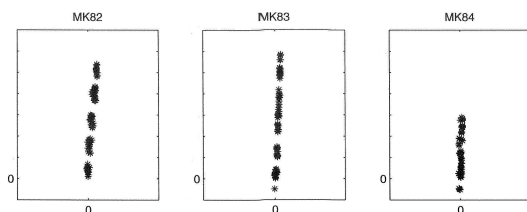
Figur 6.6: Variation av fenvinkel för olika flygfall.

	MK82		MK83		MK84	
Flygfall	r	ν	r	ν	r	ν
103	0.53	10	0.21	4	0.36	7
303	0.23	7	0.04	1	0.33	10
203	0.18	7	0.07	3	0.1	4
302	0.15	6	0.08	3	0.05	2
202	0.12	3	0.16	5	0.08	2
003	0.19	3	0.09	1	0.17	3

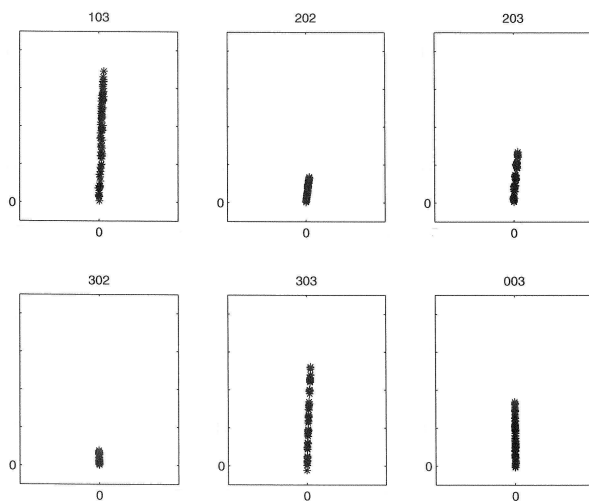
Tabell 6.2: Resultat då fenvinkeln varierar, alla värden är skalade.

6.2.3 Separationshastighet

Här undersöks påverkan av nedslagspositionen då bombens separationshastighet varierar genom förändring av temperaturen i de gasflaskor som genererar den kraft som trycker bort bomben från flygplanskroppen, enligt kapitel 5.3. Resultatet från de hundra simulerade fällningarna kan ses i figur 6.8. Flygfall 103 och 303 uppvisar en markant större spridning av bombnedslagen, vilket beror på att yttemperaturen vid dessa fällningar är lägre än i det övriga fallet vilket i sin tur leder till att temperaturen i gasflaskorna varierar inom ett större intervall, se avsnitt 3.3. I figur 6.7 ses resultaten från simuleringssekvenser vid fällningar av de tre olika bombtyperna. Endast den största bomben, MK84, skiljer sig från de andra då allt tyder på att den påverkas något mindre av borttryckningskraften än de övriga. För att uppskatta storleksordningen av påverkan från variationer av gastemperaturen, simuleras en fällning för respektive flygfall och bomb där gastemperaturen sätts till yttemperaturen vid fälltidpunkten, vilket är den mest avvikande temperaturen. För resultatet från dessa simuleringar se tabell 6.3. Det visar sig att MK84 påverkas mindre i alla analyserade flygfall. De stora skillnaderna mellan flygfallen beror som tidigare nämnts på stora variationer i de yttemperaturer som specificerats för respektive flygfall. Värt att nämna är att differensen mellan yttemperaturen i flygfall 303 och 302 är 19°C , vilket är en betydande skillnad då den maximala temperaturen på 15°C sammanfaller i alla flygfall.



Figur 6.7: Variation av gastemperaturen för olika bombtyper.



Figur 6.8: Variation av gastemperaturen för olika flygfall.

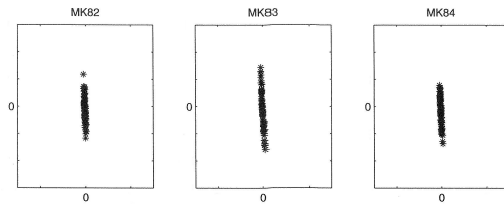
	MK82		MK83		MK84	
Flygfall	r	ν	r	ν	r	ν
303	0.52	16	0.46	14	0.24	7
103	0.69	13	0.68	13	0.41	8
203	0.3	11	0.29	11	0.12	5
003	0.34	6	0.32	5	0.17	3
202	0.12	3	0.16	4	0.09	2
302	0.08	3	0.08	3	0.05	2

Tabell 6.3: Resultat då gastemperaturen varieras, alla värden är skalade.

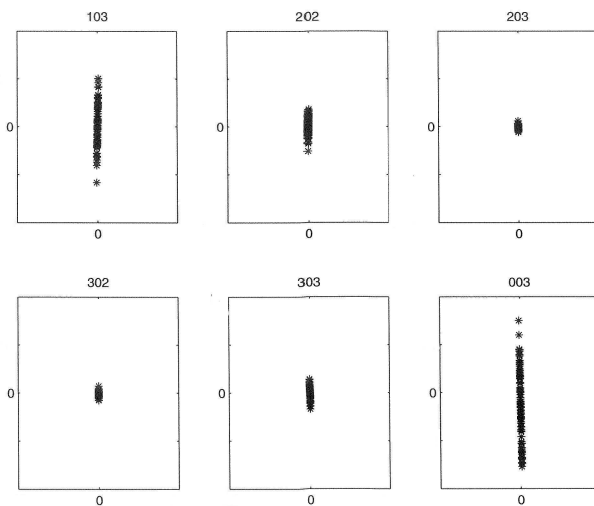
6.2.4 Aerodynamisk motståndskoefficient

Här undersöks påverkan av nedslagspositionen då bombens aerodynamiska konstant, C_D , varieras enligt kapitel 5.3. Resultatet från simuleringar för respektive flygfall kan ses i figur 6.10. Där syns tydligt hur spridningen ökar för de flygfall med längre fallsträcka, vilket beror på att bomben påverkas av luftmotståndet under en längre sträcka. Oavsett flygfall påverkas endast nedslagspositionen i längdled. I figur 6.9 ses resultaten från simuleringsskvenser vid flygfall, 203, då olika bombtyper fällts. Här verkar utfallen för de olika bomberna inte skilja sig markant åt. För att uppskatta storleksordningen av påverkan från variationer av C_D , simuleras en fällning för respektive flygfall och bombtyp där skalfaktorn k_{cd} sätts till aktuell standardavvikelse.

Resultatet från dessa simuleringar visas i tabell 6.4. Här bekräftas att vid fällning från flygfall 003 och 103 är avvikelser av nedslagspositionen större än i de övriga fallen, intressant att tillägga är även att vinkeln, ν , för dessa två fall är större än de övriga.



Figur 6.9: Variation av C_D för olika bombtyper.



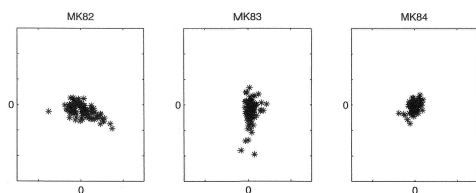
Figur 6.10: Variation av C_D för olika flygfall.

	MK82		MK83		MK84	
Flygfall	r	ν	r	ν	r	ν
003	0.87	15	0.85	14	0.65	11
103	0.45	9	0.43	8	0.32	6
202	0.17	5	0.15	4	0.11	3
303	0.14	4	0.12	4	0.10	3
203	0.06	2	0.07	3	0.07	3
302	0.05	2	0.06	2	0.05	2

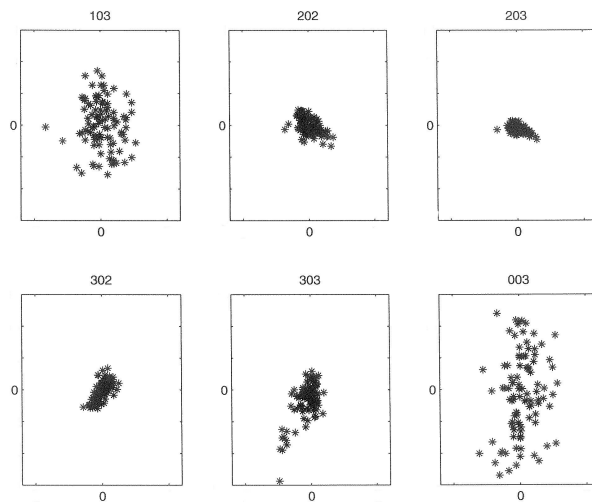
Tabell 6.4: Resultat då C_D varieras, alla värden är skalade.

6.2.5 Vindhastighet

Här undersöks påverkan av nedslagspositionen då vindhastigheten varierar genom att hastighetskomponenter, $\Delta\bar{v}$, varierar enligt kapitel 5.3. Resultatet från sekvenserna med hundra bombfällningar ses i figur 6.12. Det visar sig att i de fall då flygplanets lastfaktor är större än ett avviker nedslagspositionerna något mer i längdled än i sidled. Skillnader i storlek och utseende för avvikelser i de olika fallen beror till stor del på att den nominella vinden för respektive fall skiljer sig åt. De nominella vindhastigheterna är hämtade från respektive flygfalls vindsöndering. I figur 6.11 ses resultaten från simuleringssekvenser då fällningar med olika bombtyper har simulerats. Här verkar storleken på bomben spela en viss roll eftersom spridningen av nedslagen med MK84 ser ut att vara mer centrerade. För att uppskatta storleksordningen av påverkan från variationer av vindhastigheten simuleras en fällning för respektive flygfall och bomb där de påförda hastighetskomponenterna, $\Delta\bar{v}$ sätts till dess standardavvikelse. Resultatet från dessa simuleringar finns sammanställt i tabell 6.5. Bombfällningarna simulerade från flygfall 202 har fällts vid en större vindstyrka vilket också visar sig i en mindre påverkan på bombnedslaget då variationen av vindhastigheten är mindre relativt den nominella. Här bekräftas även att en tyngre bomb påverkas mindre av den påförda vindkomponenten.



Figur 6.11: Variation av vindhastighet för olika bombtyper.



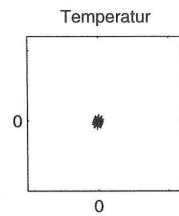
Figur 6.12: Variation av vindhastighet för olika flygfall.

	MK82		MK83		MK84	
Flygfall	r	ν	r	ν	r	ν
003	0.46	8	0.77	13	0.34	6
303	0.25	7	0.18	5	0.06	2
302	0.11	4	0.05	2	0.02	0.8
103	0.19	4	0.53	10	0.11	2
203	0.07	3	0.11	4	0.20	4
202	0.07	2	0.13	4	0.03	0.9

Tabell 6.5: Resultat då vinden varierar, alla värden är skalade.

6.2.6 Temperatur

Här undersöks påverkan av nedslagspositionen då temperaturen varierar enligt kapitel 5.3. Då det senare kommer att visa sig att temperaturen inte påverkar nedslagspositionen signifikant nöjer vi oss med att visa en simuleringssekvens från flygfall 202, se figur 6.13. För att verifiera den ringa påverkan temperaturvariationer har på nedslagspositionen simuleras även i detta fall en fällning för respektive flygfall och bomb där temperaturvariationen, ΔT , sätts till dess standardavvikelse. Resultatet från dessa simuleringar bekräftar att variationer av temperaturen inte är ett primärfel, vilket ses tydligt i tabell, 6.6.



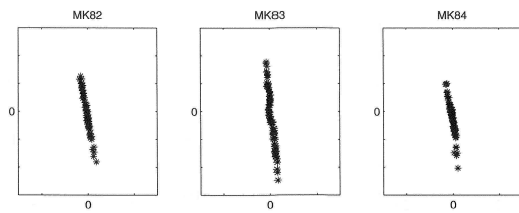
Figur 6.13: Variation av temperaturen för flygfall 202.

	MK82		MK83		MK84	
Flygfall	r	ν	r	ν	r	ν
203	0.02	0.7	0.02	0.7	0.02	0.8
103	0.03	0.5	0.03	0.5	0.01	0.3
303	0.02	0.5	0.02	0.7	0.02	0.5
302	0.02	0.6	0.01	0.5	0.02	0.6
003	0.03	0.5	0.04	0.6	0.03	0.5
202	0.02	0.4	0.01	0.4	0.02	0.5

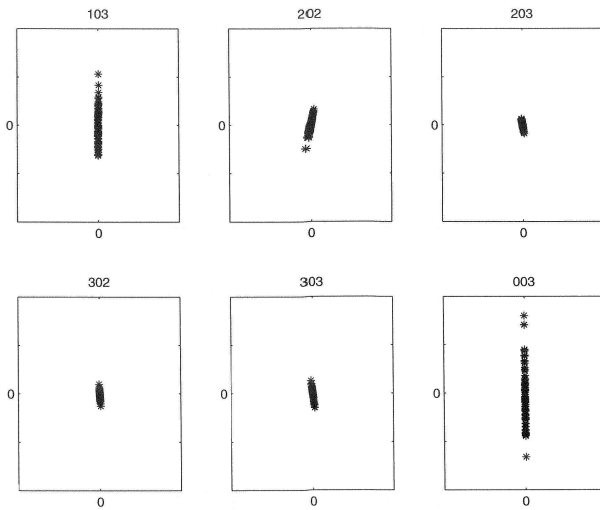
Tabell 6.6: Resultat då temperaturen varierar, alla värden är skalade.

6.2.7 Bombmassa

Här undersöks påverkan av nedslagspositionen då bombens massa varierar enligt kapitel 5.3. Resultatet från de hundra simuleringarna visas i figur 6.15. Här ses att variationer av bombmassan yttrar sig i avvikelser i längdled och som väntat ger en längre fallsträcka en större spridning, dvs för flygfall 103 och 003. I figur 6.14 ses resultaten från simuleringsssekvenser då olika bomber har använts. Spridningen verkar inte påverkas av bombtyp, vilket även bekräftas i tabell 6.7. För uppskattning av primärfelets storleksordning simulerades en fällning för respektive flygfall och bomb där bombmassan sattes till summan av dess väntevärde och standardavvikelse och dessutom indirekt även påverkade bombens tröghetsmoment. Resultatet från dessa simuleringar visas i tabell 6.7. De slutsatser som kan dras ur ovan nämnda simuleringar är att variationer av bombens massa endast kommer att påverka bomben i längdled och tyngre bomber påverkas mindre. Detta är inget anmärkningsvärt då förhållandet mellan tyngdkraften och luftmotståndet förändras och därmed även fallsträckan.



Figur 6.14: Variation av bombmassa för olika bombtyper.



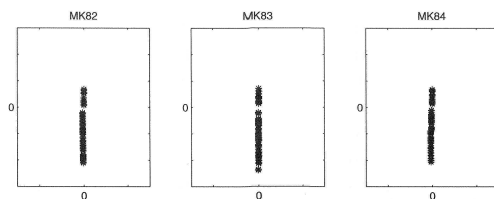
Figur 6.15: Variation av bombmassa för olika flygfall.

	MK82		MK83		MK84	
Flygfall	r	ν	r	ν	r	ν
003	0.59	10	0.51	9	0.40	7
103	0.35	7	0.30	6	0.24	5
202	0.14	4	0.15	4	0.10	3
303	0.10	3	0.12	4	0.07	2
302	0.07	3	0.07	3	0.02	0.7
203	0.07	2	0.06	2	0.03	1

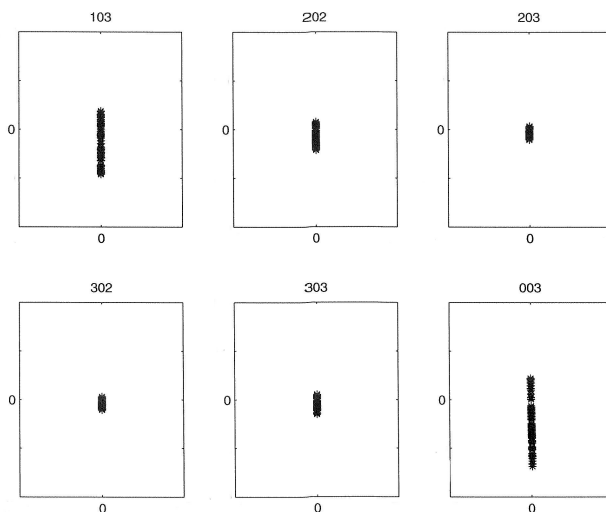
Tabell 6.7: Resultat då bombens massa varierar, alla värden är skalade.

6.2.8 Tyngdacceleration

Här undersöks påverkan av nedslagspositionen då tyngdaccelerationen, g , slumpas fram enligt kapitel 5.3. Resultatet från simuleringssekvenserna för respektive flygfall kan ses i figur 6.17. Även i detta fall beror spridningen på fallsträckan, dvs hur länge bomben påverkas av gravitationen. Bombnedslagen är osymmetriskt spridda i längdled vilket beror på att $g = 9.81m/s^2$ vid nominell fällning vilket inte är tyngdaccelerationens medelvärde utan approximerar tyngdaccelerationen i Sverige. För jämförelser mellan simuleringar av fällningar med de tre olika bombtyperna se figur 6.16. Allt tyder på att det inte är någon markant skillnad mellan de olika bombtyperna, vilket även ses i tabell 6.8. Värdena i tabellen har tagits fram genom att simulera en fällning för respektive flygfall och bomb med g satt till sitt extremvärde.



Figur 6.16: Variation av tyngdacceleration för olika bombtyper.



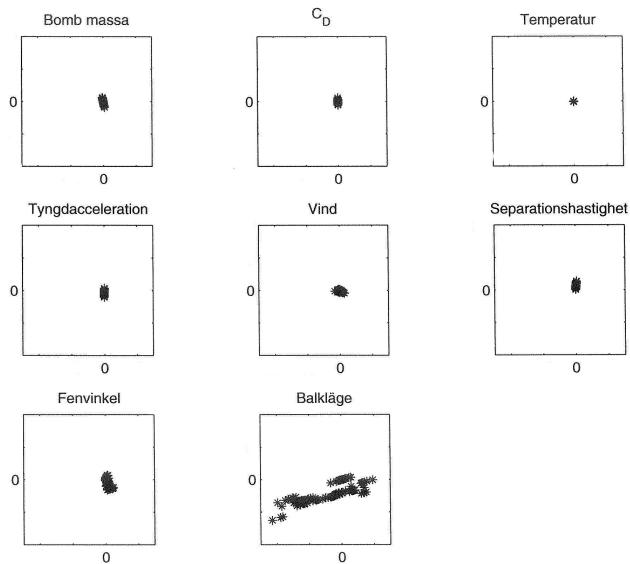
Figur 6.17: Variation av tyngdacceleration för olika flygfall.

	MK82		MK83		MK84	
Flygfall	r	ν	r	ν	r	ν
003	1.38	24	1.42	24	1.44	24
103	0.98	18	0.98	18	0.97	18
202	0.43	12	0.42	12	0.43	12
303	0.31	9	0.28	9	0.32	9
302	0.21	8	0.21	8	0.22	8
203	0.22	8	0.22	8	0.21	8

Tabell 6.8: Resultat då tyngdaccelerationen varieras, alla värden är skalade.

6.2.9 Sammanställning

Allt tyder på att balkläget är det dominerande primärfelet som påverkar nedslagspositionen mer än de övriga undersökta primärfelen. Att detta är en korrekt slutsats ses tydligt i figur 6.18 där hundra simuleringar från samma flygfall visas med enhetlig skala på axlarna. Dessutom har det visat sig att en mindre bomb påverkas mer än en tyngre.



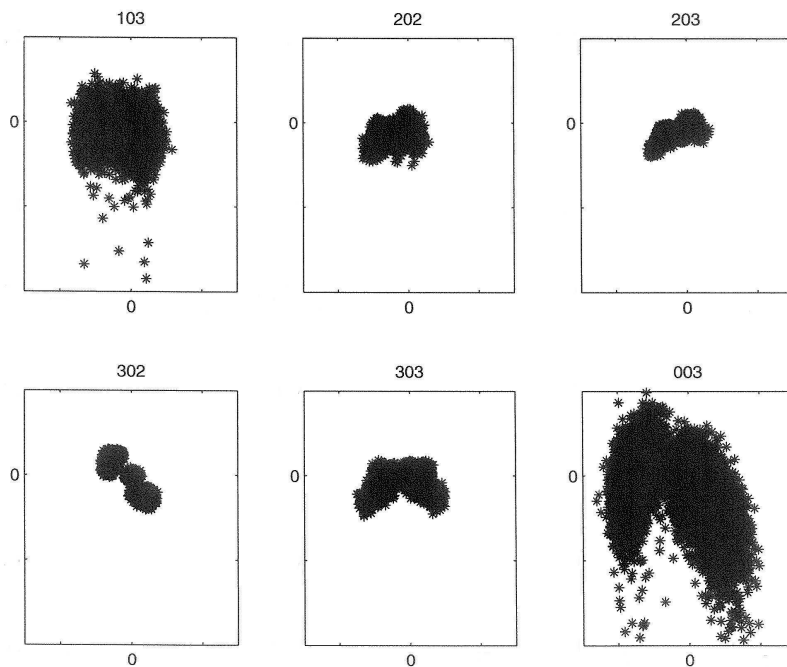
Figur 6.18: Variation av samtliga primärfel för flygfall 203.

6.3 Totalt ballistikfel

Här undersöks påverkan av nedslagspositionen då alla primärfelsspecifika parametrar varierar, vilket beskrivs i kapitel 5.3. Det intressanta i detta avsnitt är dels att analysera skillnader mellan de olika flygfallen men även att utreda hur resultatet varierar beroende på bombtyp.

6.3.1 Flygfall

Spridningen av nedslagsposition beror på flygplanets position och orientering vid bombfällningen, vilket specificeras i de olika flygfallen. Utfallet från 10000 bombfällningar med den minsta bombtypen, MK82, kan ses i figur 6.19. Här visar sig markanta skillnader mellan de olika flygfallen där 103 och 003 är mer spridda, vilket åter igen beror på den längre fallsträckan i dessa fall. Utformning av dessa spridningar beror på påverkan från val av balkläge respektive närliggande last. En sammanställning av de resulterande CEP-radier, r , och spridningsvinklar, ν ses i tabell 6.9. Spridningsvinklarna, ν , visar sig liksom vid variation av balkläge vara något större för de fall med större lastfaktor. Vilket beror på att den egentliga fallsträckan i dessa fall är längre än avståndet R .



Figur 6.19: Total spridning, MK82.

	MK82	
Flygfall	r	ν
302	1.46	57
003	3.38	57
303	1.20	36
202	0.97	27
203	0.71	26
103	1.42	26

Tabell 6.9: Resultat för MK82, alla värden är skalade.

Utseende I majoriteten av fallen är spridningen i sidled större än i längdled, vilket beror på att balkläget var det primärfel som dominerade påverkan av bombernas nedslagsposition.

Utsträckning Spridningen av nedslagspositionen då bomben faller i flygfall 103 och 003 är betydligt större än i de övriga fallen. Vilket beror på att bombens fallsträcka i dessa fall är längre. Fallsträcka beror delvis på flygplanets höjd vid fälltidpunkten men även på flygplanets orientering.

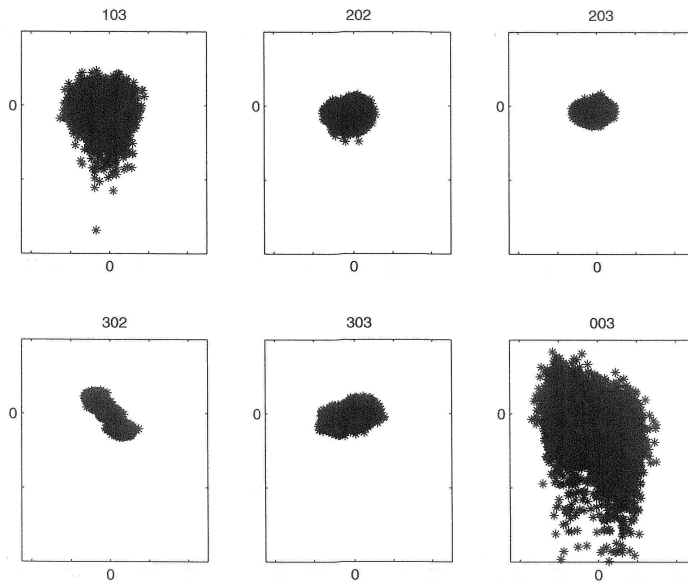
Sammanvägning Resultaten visar att de flygfall med större lastfaktor ger en större spridningsvinkel, ν . Vilket beror på att den egentliga fallsträcka var något längre än avståndet R . Spridningsvinklarna hamnar inom ett rimligt intervall.

6.3.2 Bombtyper

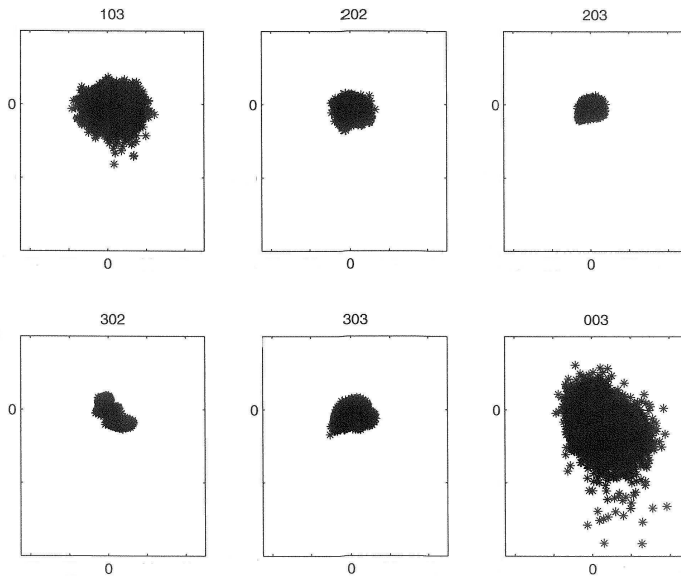
Det råder ingen tvekan om att bombens storlek påverkar spridningen av nedslagspositionen avsevärt. Detta ses tydligt vid jämförelse av figurerna, 6.19, 6.20 och 6.21. Då spridningsvinkeln, ν , beräknas för samtliga flygfall respektive bombtyp bekräftades det åter igen, se tabellerna 6.9 och 6.10.

	MK83		MK84	
Flygfall	r	ν	r	ν
302	1.03	40	0.67	26
003	1.90	32	1.20	20
303	0.64	19	0.44	13
202	0.81	23	0.53	15
203	0.64	24	0.37	14
103	0.96	18	0.72	13

Tabell 6.10: Resultat för MK83 och MK84, alla värden är skalade.



Figur 6.20: Total spridning, MK83.



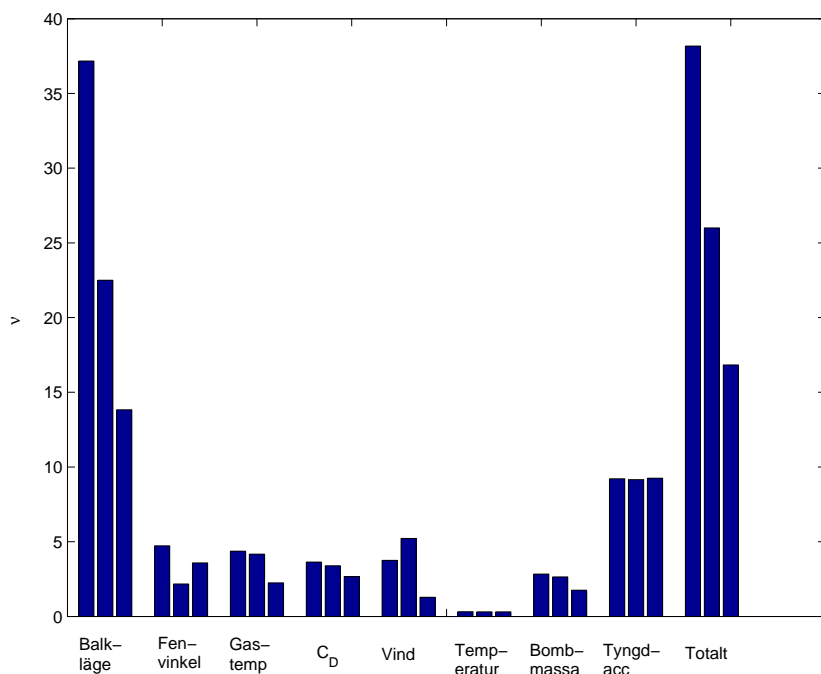
Figur 6.21: Total spridning, MK84.

6.3.3 Förhållande mellan primärfel

Vilka primärfel det totala ballistikfelet beror på ses i figur 6.22 där medelvärdet av vinkeln, ν , från alla flygfall och bombtyper finns representerade. Varje enskilt fel visas i grupper om tre där den vänstra stapeln representerar MK82, den mellersta MK83 och den högra MK84. Här har CEP-radien approximerats för samtliga enskilda primärfel. I de fall där primärfelet antas likformigt fördelad beräknas motsvarande avstånd, r , genom att påföra en variation motsvarande 50% av maxvärdet. För de normalfördelade primärfelen påförs en variation som sammanfaller med dess standardavvikelse där CEP-radien, r , approximeras med

$$r = 0.59(\sigma_x + \sigma_y) \quad (6.6)$$

I dessa fall antas referensfällningen approximera standardavvikelsen på nedslagspositionen som sedan används för att beräkna CEP-radien, enligt [1]. Detta ger inte ett statistiskt korrekt resultat utan endast primärfelens storleksordning relativt varandra. Här ses tydligt att balkläget har den största inverkan på det totala ballistikfelet. Gravitationen påverkar något mer än de övriga och temperaturen något mindre. Värt att nämna är även att det totala felet inte är summan av primärfelen utan resulterar i ett mindre värde.



Figur 6.22: Jämförelse mellan de olika primärfelen.

Kapitel 7

Diskussion

I detta kapitel kommer resultatet att sammanfattas och framtida arbete att diskuteras.

7.1 Sammanfattning av resultat

Vid analys av de enskilda primärfelen visade det sig att balkläge och övrig lastkonfiguration på flygplanet vid fällning är det primärfel som påverkar bombens nedslagspositionen mest. Variationer av temperaturen gav ingen markant avvikelse, variationer av tyngdaccelerationen gav en avvikelse på ungefär en tredjedel av balklägets påverkan, medan påverkan från de övriga primärfelen visade sig vara ungefär sju gånger mindre. För att minska den totala spridningen av nedslagspositionen beroende på yttre påverkan kan med andra ord hänsyn tas till val av balkläge då beräkningen av fälltidpunkt utförs i flygplanet.

7.2 Framtida arbete

Här diskuteras utvidgningar till detta arbete.

Tillägg av primärfel I detta arbete har endast hänsyn tagits till yttre störningar. För att beskriva den totala spridningen av bombfällning kan ytterligare systemspecifika primärfel läggas till för att kunna dra statistiskt korrekta slutsatser om det totala systemet.

Nominell nedslagsposition I detta arbete har en nominell nedslagsposition använts som referens vid verifiering av hur nedslagspositionen påverkas av störningar. Den nominella nedslagspositionen fastställs genom att simulera en bombfällning från balk fem utan att påföra någon störning. Då flygfallen är hämtade från verkliga siktesprov respektive fällprov skulle den verkliga målpositionen kunna användas som referens

punkt istället. I detta arbete har inte störningar relaterade till systemet tagits hänsyn till vilket gör att än mer intressant skulle vara att använda den målposition som systemdatorm i flygplanet beräknat som referensposition.

Modell Som diskuterats tidigare i kapitel 2 är en modell med sex frihetsgrader önskvärd för att beskriva bombens rörelse och position då bomben befinner sig i interferenszonen, dvs då bomben påverkas av flygplanskroppens aerodynamik. Då det inte krävs sex frihetsgrader för att beskriva bombens rörelse med god precision vid fritt fall, kan det vara av intresse att jämföra en modell med sex frihetsgrader mot en modell med fyra frihetsgrader. En modell med fyra frihetsgrader är önskvärd eftersom den är mindre komplex och därmed mer lätthanterlig då olika spridningar ska påföras. Simuleringarna blir heller inte lika tidskrävande.

Litteraturförteckning

- [1] P. Axelrad. Notes on positioning errors. URL: http://www.colorado.edu/ASEN/asen5190/error_notes.pdf, 0 1998. Nedladdad 2006-03-18.
- [2] Greger Bäckström. Rapport angående funktionsbibliotek till matlab för koordinattransformationer. Technical report, Saab Aerosystems AB, Linköping, Sweden, 08 1998.
- [3] Gunnar Blom. *Sannolikhets teori och statistisk teori med tillämpningar*. Studentlitteratur, Lund, 4 edition, 1989.
- [4] Peter Hackman. *Boken med Kossan på*. Linköping, Sverige, 4 edition, 1999.
- [5] Eric Granryd Ingvar Ekroth. *Tillämpad termodynamik*. Institutionen för Energiteknik, KTH, Stockholm, Sverige, 4 edition, 1999.
- [6] Linde Wittmeyer-Koch Lars Elden. *Numerisk Analys*. Studentlitteratur, Lund, Sverige, 3 edition, 1996.
- [7] Anders Lindberg. Store separation, an introduction to the methods used at saab. Technical report, Saab Aerosystems AB, Linköping, Sweden, 01 2001.
- [8] Björn Lundström. Basic data on air-to-ground stores. Technical report, Saab Aerosystems AB, Linköping, Sweden, 04 2000.
- [9] LiTH Matematiska Institutionen. *Formelsamling i matematisk statistik*, 2001.
- [10] Makoto Matsumoto and Takuji Nishimura. Mersenne twister: a 623-dimensionally equidistributed uniform pseudo-random number generator. *ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation*, 8(1):3–30, 1998.
- [11] Robert C. Nelson. *Flight stability and automatic control*. Singapore, 2 edition, 1998.

-
- [12] Yu.A. Schreider, I.M. Sobol, N.P. Buslenko, D.I. Golenko and V.G. Sragovich. *The Monte Carlo Method*, volume 87. Pergamon Press Ltd, Headington Hill Hall, Oxford, 1 edition, 1966.
- [13] Moberg Skog. *Flygteknik del 1*, fmv, 1970.