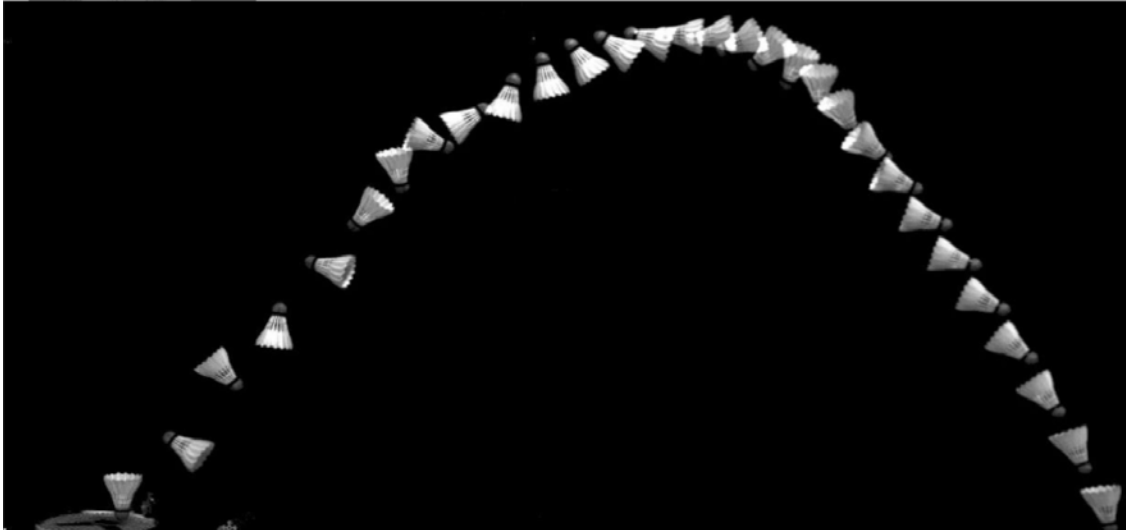




CHALMERS



Ballistik och aerodynamik av badmintonbollar

En studie av olika typer av badmintonbollars egenskaper
kopplade till ballistik och aerodynamik

Kandidatarbete vid Mekanik och Maritima vetenskaper

Karl Aadland
Max Frogemar
Noah Granerås
Loisa Larsson
Melker Manne

INSTITUTIONEN VID MEKANIK OCH MARITIMA VETENSKAPER

CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY
Gothenburg, Sweden 2025
www.chalmers.se

KANDIDATARBETE 2025

Ballistik och Aerodynamik av badmintonbollar

En studie av olika typer av badmintonbollars egenskaper kopplade till ballistik och aerodynamik

Karl Aadland
Max Frogemar
Noah Granerås
Loisa Larsson
Melker Manne



CHALMERS

Institutionen vid Mekanik och Maritima vetenskaper
CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY
Gothenburg, Sweden 2025

Ballistik och Aerodynamik av badmintonbollar
En studie av olika typer av badmintonbollars egenskaper kopplade till ballistik och aerodynamik
Karl Aadland
Max Frogemar
Noah Granerås
Loisa Larsson
Melker Manne

Handledare: Valery Chernoray, Institutionen vid Mekanik och Maritima vetenskaper
Examinator: Isak Jonsson, Institutionen vid Mekanik och Maritima vetenskaper

Kandidatarbete 2025
Institutionen vid Mekanik och Maritima vetenskaper
Chalmers University of Technology
SE-412 96 Gothenburg

Omslag: En badmintonbolls flygbana, digitaliserad i Matlab

Typeset in L^AT_EX
Printed by Chalmers Reproservice
Gothenburg, Sweden 2025

Sammandrag

Badminton är den snabbaste bollsporten i världen, där kraven på spelarnas snabbhet, reflexer och smidighet blir höga. Detta ställer också höga krav på materialet och tåligheten hos bollarna. Syftet med denna rapport är att beskriva skillnader och likheter mellan några av bollarna som spelas med idag. Detta för att kunna avgöra hur bollarna flyger men också varför de flyger som de gör.

För att studera detta har bollarnas flygbanor filmats och simulerats. Bollarnas olika tröghetsmoment har beräknats och de har även modellerats i CAD.

Viktiga resultat från studien visade att tröghetsmomentet hos badmintonbollar påverkade deras flygbeteende. Ett högre tröghetsmoment, I_{xx} , (roll axis) resulterade i större spridning i sidled, medan ett högre tröghetsmoment, I_{yy}, I_{zz} , minskade tumling.

Vidare indikerade resultaten att även om tröghetsmomenten har tydliga effekter, är de sannolikt inte de enda faktorerna som påverkar bollens flygegenskaper. De aerodynamiska egenskaperna och bollens geometri påverkar också flygbeteendet. Här rekommenderas fortsatt forskning inom området.

Slutligen föreslogs en standardiserad testmetod för badmintonbollar baserad på mätningar av standardavvikelser för exempelvis sidoavvikelse, räckvidd och tumling. Detta skulle möjliggöra en mer praktisk bedömning av bollarnas kvalitet och prestanda. Detta arbete har därmed lagt grunden för en ökad förståelse av hur olika egenskaper hos badmintonbollar påverkar deras flygbeteende och kan bidra till framtida utveckling av bollar med förbättrade flygegenskaper.

Förord

Denna rapport är ett kandidatarbete skriven på Institutionen för Mekanik och Maritima vetenskaper på Chalmers Tekniska Högskola. Kandidatarbetet pågick under våren 2025.

Vi vill rikta ett stort tack till vår handledare Valery Chernoray, för kontinuerlig och värdefull vägledning under projektets gång. Vi vill även rikta ett stort tack till Christoffer Johansson och Christer Forsgren, vilka båda har bidragit med stor expertis kring området. Tack även till vår examinator, Isak Jonsson, för medverkande.

Lista på akronymer

Nedan listas de akronymer vilka använts i projektet.

6-DOF	6 Degrees Of Freedom
CAD	Computer Aided Design
CFD	Computational Fluid Dynamics
fps	Frames Per Second

Nomenklatur

Parametrar/Variabler

m	Massa (Kg)
I	Tröghetsmoment (Kgm^2)
I_l	Längsgående tröghetsmoment (Kgm^2)
I_t	Tvärgående tröghetsmoment (Kgm^2)
I_{xx}	Tröghetsmomentet kring roll-axeln (Kgm^2)
I_{yy}	Tröghetsmomentet kring pitch-axeln (Kgm^2)
I_{zz}	Tröghetsmomentet kring yaw-axeln (Kgm^2)
g	Tyngdaccelerationen (m/s^2)
R	Avståndet från masscentrum till de "viktlösa" trådarna(m)
T	Periodtiden (s)
L_s	Trådlängden(m)
ρ	Luftdensiteten (kg/m^3)
\vec{V}	Hastighetsvektorn
ρ	Luftdensiteten (kg/m^3)
v	Hastighetsvektorn med hänsyn tagen till luften
\vec{x}	Enhetsvektor längs med projektilens rotationssymmetriaxel
\vec{h}	Vinkelmoment-vektorn dividerat med det tvärgående tröghetsmomentet
t	Tid (s)
S	Referensarea (Vanligtvis $\pi d^2/4$)
C_D	Dragkraftskoefficienten
$C_{L\alpha}$	Lyftkraftskoefficienten
$C_{N_{p\alpha}}$	Magnuskraftskoefficienten
$(C_{N_q} + C_{N_\alpha})$	Pitch dämpningskoefficienten
C_{L_p}	Spinn dämpningskoefficienten

C_{L_b}	Lyftkraftskoefficienten
C_{M_α}	Pitchmomentkoefficienten
$(C_{M_q} + C_{M_\alpha})$	Pitch dämpningskoefficienten
δ_F	fenans rälsvinkel
\vec{g}	accelerationsvektorn till följd av gravitationen
$\vec{\Lambda}$	Coriolis accelerationsvektorn
T	Raketkraft
r_t	avståndet från masscentrumet till halsen på nosen
r_e	avståndet från masscentrumet till nosens avslut
T_s	rullande moment till följd av raketens spinmoment
\dot{m}	Derivatans av projektilens massförändring
σ	Standardavvikelse
μ_i	Medelvärde
N	Antal slag

Innehåll

Lista på akronymer	vi
Nomenklatur	viii
Figurer	xiii
Tabeller	xvii
1 Introduktion	1
1.1 Bakgrund	1
1.2 Syfte	2
1.3 Avgränsningar	2
2 Teori	5
2.1 6-DOF	5
2.2 Tröghetsmoment	6
3 Metoder	9
3.1 Filma och digitalisera flygbanor för tumlande bollar	9
3.1.1 Mängdtest av bollarna	10
3.2 Skapa CAD-modeller	11
3.3 Experimentell mätning av tröghetsmoment	14
3.4 6-DOF beräkningar	17
4 Resultat	19
4.1 Filma och digitalisera flygbanor för tumlande bollar	19
4.1.1 Mängdtest av bollarna	20
4.2 Skapa CAD-modeller	22
4.3 Experimentell mätning av tröghetsmoment	23
4.4 6-DOF beräkningar	26
5 Diskussion	31
5.1 Filma och digitalisera flygbanor för tumlande bollar	31
5.1.1 Mängdtest av bollarna	31
5.2 Skapa CAD-modeller	32
5.3 Experimentell mätning av tröghetsmoment	34
5.3.1 Jämförelse av beräknade tröghetsmoment	35

5.4	6-DOF beräkningar	37
6	Slutsats	39
	Bibliography	41
A	Appendix 1	I
A.1	Digitalisering bilder	I
A.2	Resultat mängdtestet	V
A.3	Mått badmintonbollar	VI
A.4	6-DOF grafer pitch	XII
A.5	6-DOF grafer drift	XIII
A.6	6-DOF grafer range/height	XVI
B	Appendix 2	XIX
B.1	Förslag på vidare forskning (CFD)	XIX

Figurer

1.1	De olika bollarna som användes under arbetet. Mizuno Tech med två olika massor: 5.3g och 5.1g	3
2.1	Beskrivning av hur koordinatsystemet ser ut och vilka tillhörande rotationer som finns. Yaw Axis Corrected (Auawise, 2010). CC BY-SA	5
3.1	Förenklad skiss av riggen som visar hur badmintonracket roterar för att träffa bollen	9
3.2	Badmintonrigg som simulerar badmintonslag. Vänster bild: Vakuumsystem som håller badmintonbollen tillsammans med lasersensor. Höger bild: Badmintonracket som roterar medurs och träffar bollen när det har roterat 135°.	10
3.3	Rutnätet som användes låg placerat 184 cm från racket och användes som en referens för att lättare och mer noggrant avläsa längd och sidoavvikelse.	11
3.4	Fjäderbollen Yonex tournament isärklippt i olika delar	12
3.5	Syntetbollen Mizuno Tech (5.1g) isärklippt i olika delar	12
3.6	Syntetbollen Mizuno Tech (5.3g) isärklippt i olika delar	13
3.7	Plastbollen från Wilson isärklippt i olika delar	13
3.8	En skiss över experimentet. Trifilar swing (Cooke, 1992). CC BY-SA	14
3.9	Upphängning av badmintonbollen i trifilar swing experimentet, för att mäta I_{xx}	14
3.10	En skiss över experimentet. Bifilar swing (Cooke, 1992). CC BY-SA	15
3.11	Upphängning av badmintonbollen i bifilar swing experimentet, för att mäta I_{zz}, I_{yy}	15
3.12	En skiss över experimentet. Centre of Gravity (Cooke, 1992). CC BY-SA	16
3.13	Valideringstestet med toapappersrulle med känt tröghetsmoment . . .	17
3.14	Bild som visar beräkningen av vinkel för bollbanan	18
3.15	Bild som visar beräkningen av pitchrate	18
4.1	Den digitaliserade flygbanan för de fyra olika bollarna vid 45°lutning på racket.	20
4.2	Grafer som visar spridningen för varje boll för olika vinklar, från 15-60°	20
4.3	Medelantal varv i pitch-riktning innan stabilisering för olika bollar och vinklar. Data från tio slag per vinkel.	21

4.4	Visuell representation av plastbollen Wilson. CAD-modellen visas från olika vinklar tillsammans med ett fotografi av den faktiska bollen överlappande med strukturen för CAD-modellen.	22
4.5	Visuell representation av den syntetiska fjäderbollen Mizuno Tech. CAD-modellen visas från olika vinklar tillsammans med ett fotografi av den faktiska bollen överlappande med strukturen för CAD-modellen.	22
4.6	Visuell representation av fjäderbollen Yonex Tournament. CAD-modellen visas från olika vinklar tillsammans med ett fotografi av den faktiska bollen överlappande med strukturen för CAD-modellen.	23
4.7	Jämförelse av tröghetsmoment mellan olika badmintonbollar.	24
4.8	Jämförelse av tröghetsmoment I_{yy}, I_{zz} mellan våra uppmätta värden, värden från CAD samt värden från litteratur.	24
4.9	Jämförelse av tröghetsmoment I_{xx} mellan våra uppmätta värden, värden från CAD samt värden från litteratur.	25
4.10	Jämförelse av de uppmätta tröghetsmomenten från experimentet med cylindern och de beräknade tröghetsmomenten för cylindern.	25
4.11	Toleransberäkningar för de olika tröghetsmomenten.	26
4.13	Tabell över de framtagna parametrarna	27
4.14	Ändring av pitch-vinkel i relation till hur långt bollen har flugit för bollarna vid 45° på racket.	27
4.15	Ändring av sidoavvikelse i relation till hur långt bollen har flugit för bollarna vid 45° på racket.	28
4.16	Bollbanan för bollarna vid 45° på racket.	29
5.1	Jämförelse mellan tröghetsmoment I_{yy}, I_{zz} och tumling för samtliga bollar. Tumling är i detta fallet ett genomsnitt från mängdtesterna, där tumlingen är hur mycket bollen roterar från utgångsläget, tills dess att den vänder tillbaka.	36
5.2	Jämförelse mellan tröghetsmoment I_{xx} och drift för samtliga bollar. Där driften är ett genomsnitt på standardavvikelsen för drift i sidled från mängdtesterna.	37
A.1	Tumling för de 4 bollarna, 15 grader	I
A.2	Tumling för de 4 bollarna, 22.5 grader	II
A.3	Tumling för de 4 bollarna, 30 grader	II
A.4	Tumling för de 4 bollarna, 37.5 grader	III
A.5	Tumling för de 4 bollarna, 45 grader	III
A.6	Tumling för de 4 bollarna, 52.5 grader	IV
A.7	Tumling för de 4 bollarna, 60 grader	IV
A.8	Fjäderbollens resultat på mängdskjutningen	V
A.9	Syntetbollens 5,1g resultat på mängdskjutningen	V
A.10	Syntetbollens 5,3g resultat på mängdskjutningen	V
A.11	Plastbollens resultat på mängdskjutningen	V
A.12	Pitch för bollarna vid 15°slag	XII
A.13	Pitch för bollarna vid 30°slag	XII
A.14	Pitch för bollarna vid 60°slag	XII
A.15	Sidoavvikelse för alla bollar vid 15°slag	XIII

A.16 Sidoavvikelse för alla bollar vid 30°slag	XIV
A.17 Sidoavvikelse för alla bollar vid 60°slag	XV
A.18 Range för alla bollar vid 15°slag	XVI
A.19 Range för alla bollar vid 30°slag	XVII
A.20 Range för alla bollar vid 60°slag	XVIII
B.1 Simulering för syntetboll 5.3 där hastighetsfältet över bollen visas. Från dessa simuleringar kan aerodynamiska koefficienter som exempelvis C_D erhållas.	XIX
B.2 Mesh-scenen för syntetboll 5.3. Den rektangulära formen kring bollen rör sig över bollen, vilket simulerar bollens tänkta rörelse genom luften.	XIX

Tabeller

4.1	Tabellen visar tröghetsmomenten från CAD-modellerna för de olika bollarna	23
5.1	Felkällor vid mängdtester	32
5.2	Felkällor vid skapandet av CAD-modeller	33
5.3	Felkällor vid mätning av tröghetsmoment och dess konsekvenser . . .	34
5.4	Felkällor vid mätning av tröghetsmoment och dess lösningar	34
5.5	Tröghetsmoment I_{xx} från CAD-beräkningar och trådberäkningar. . .	35
5.6	Tröghetsmoment I_{yy}, I_{zz} från CAD-beräkningar och trådberäkningar.	35
5.7	Felkällor för 6-DOF simuleringarna	38

1

Introduktion

Badminton är den snabbaste racketsporten i världen, där den högsta uppmätta hastigheten är 493 km/h. Detta gör att spelarna måste erhålla hög reaktionsförmåga, explosivitet och blixtnabba reflexer (Vårvindens BMK, u.å). Detta gör också att bollarna ständigt slits på och måste bytas ut flera gånger under en match.

1.1 Bakgrund

Badmintonbollar finns i flera varianter. De vanligaste badmintonbollarna som används i professionella tävlingar har gåsfjädrar eller ankfjädrar, samt en botten av kork (Vårvindens BMK). Korken längst ut är överdragen av antingen skinn eller plast (Warnström, 2020). Dessa tävlingskvalificerade bollar är dyrare än plastbollar.(Badmintonshoppen.se, 2025).

Enligt Warnström är tillverkningsprocessen för fjäderbollar en komplicerad process. Fjädrarna plockas, sorteras, tvättas, torkas och skärs till för att sedan delas upp efter färg, form, storlek och fjädrarnas vinkel. För att få bästa resultat på bollarna bör fjädrarna vara så lika som möjligt, vilket gör att vissa fjädrar inte passar. Sedan görs även fjäderbollarna för hand genom hela processen. Detta resulterar i noggrann kontroll av hur bollarna skapas, vilket också leder till dyr arbetskraft. I en artikel från Svenska Dagbladet (TT, 2005) kan man läsa om hur fjäderbollarnas produktion minskade under en stor fågelinfluensa i Kina, där stora delar av fjäderbollar produceras. Detta resulterade i att priserna steg med 15%.

Det finns andra alternativ i form av plastbollar och syntetiska bollar. Enligt badmintonshoppen.se har dessa längre livslängd men sämre egenskaper kopplade till precision jämfört med fjäderbollen. Syntetiska bollar är gjorda av ett plastmaterial, men skiljer sig från vanliga plastbollar, då den är uppbyggd av 16 plastfjädrar.

I en intervju med Christer Forsgren, forskare och professionell testare av badmintonbollar, förklaras skillnaderna mellan bollarna ytterligare (Christer Forsgren, 2025-02-18). Christer anser att skillnaden mellan att spela med de olika bollarna är stor, t.ex. då fjäderbollen låter på ett sätt som de andra bollarna inte gör. Om man skulle välja att spela med ett annat material på tävlingar kan spelarna vänja sig vid den skillnaden, så länge det är lika för alla. Ytterligare en skillnad är hur bollarna tumlar. Alltså dess instabila och okontrollerade rörelse i luften.

Christer förklarar att det i nuläget inte finns en komplett metod för att godkänna bollar inför tävling. Metoden som används idag är en form av smashtester. Bollen ska klara av minst 10 smashar innan den blir mjuk. I andra racketsporter, som tennis och padel, finns det tester där bollarna släpps från en höjd och skall studsas tillbaka till en viss höjd för att bli godkända. Detta blir problematiskt när det kommer till badmintonbollar, och Christer förklarar därför att det behövs fler typer av testmetoder för att kunna göra en komplett och rättvis bedömning av bollarna. Exempelvis metoder där bollarnas flygbeteende och precision testas.

Livslängden på fjäderbollarna är ytterligare ett problem berättar Christer. Under ett tävlingsspel byter man boll flera gånger under samma match eftersom de lätt blir mjuka och tufsiga, vilket gör att dynamiken i slaget blir annorlunda. Att därför utveckla en boll i annat material hade kunnat hjälpa till att minska förbrukningen av bollarna.

1.2 Syfte

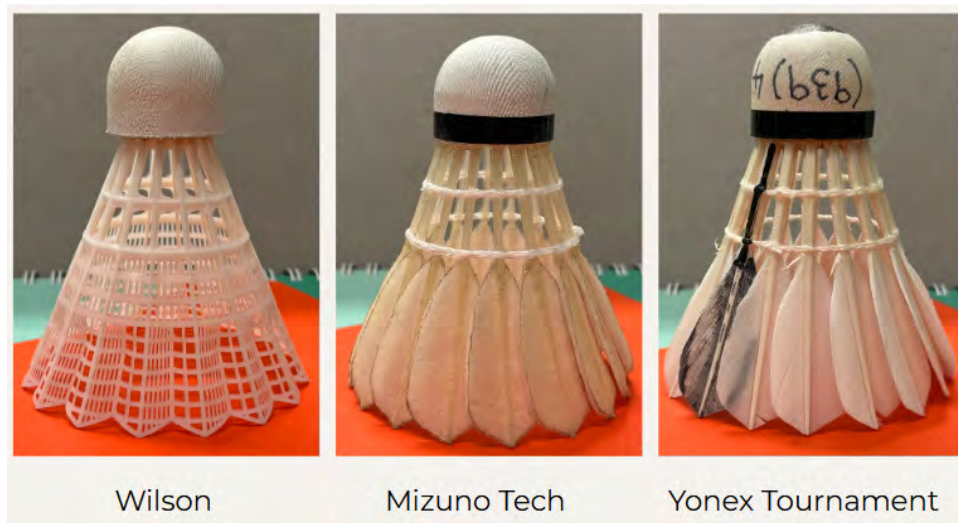
Syftet med arbetet är att redogöra för de aerodynamiska och ballistiska skillnaderna mellan plast-, syntet- och fjäderbollar. Vidare ska arbetet kunna ligga till grund för utvecklingen av plast/syntet-bollar, för att de på ett bättre sätt ska kunna efterlikna fjäderbollarnas flygbeteende. Ytterligare åsyftar arbetet att studera möjligheterna till en standardiserad testmetod för badmintonbollar.

1.3 Avgränsningar

Analysen ska göras experimentellt och beräkningsmässigt på redan existerande badmintonbollar och en ny fysisk modell kommer därmed inte tas fram. Resurserna till arbetet innefattar en testrigg för att testa badmintonbollar, höghastighetskamera för att filma flygbanan, några olika typer av badmintonbollar, en CAD-modell av en fjäderboll samt kod för att digitalisera experimentella flygbanor och för att utföra ballistiska beräkningar. Utifrån dessa har arbetet avgränsats till att analysera följande badmintonbollar.

Badmintonbollar modeller:

- Fjäderboll (Yonex Tournament)
- Syntetisk fjäderboll (massa: 5.3g) (Mizuno tech)
- Syntetisk fjäderboll (massa: 5.1g) (Mizuno tech)
- Plastboll (Wilson)



Figur 1.1: De olika bollarna som användes under arbetet. Mizuno Tech med två olika massor: 5.3g och 5.1g

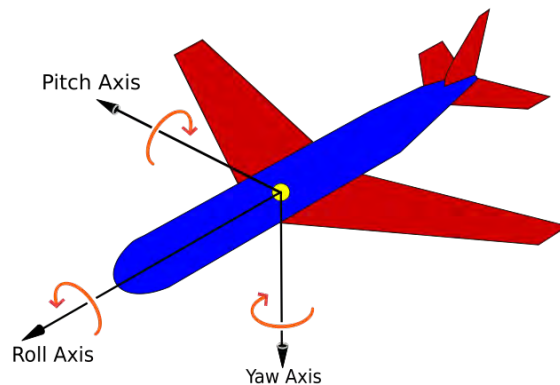
2

Teori

För att kunna analysera och beskriva rörelsen hos ett flygande objekt krävs en grundläggande förståelse för dess rörelsedynamik. Hur rörelsedynamiken påverkas beror på många olika fysikaliska parametrar. Två centrala begrepp inom detta område är objektets sex frihetsgrader (6-DOF), samt tröghetsmomentet. Dessa begrepp förklarar objektets rörelse och svårigheten att förändra denna rörelse.

2.1 6-DOF

6-DOF beskriver hur en kropp rör sig i 3D-rummet. Alltså längs med x-,y- och z-axlarna, men också hur den roterar kring dessa axlar kallat roll, pitch och yaw (se figur 2.1). Beräkningarna baseras på Newtons och Eulers formler samt rörelseekvationer. Ekvationerna som nyttjas i rapporten hämtas från (McCoy, 1999), där ekvationerna kan sammanfattas till två ekvationer. Den ena beskriver rörelsen för projektilens masscentrum (2.1) och den andra beskriver projektilens vinkelrörelser (2.2).



Figur 2.1: Beskrivning av hur koordinatsystemet ser ut och vilka tillhörande rotationer som finns. Yaw Axis Corrected (Auawise, 2010). CC BY-SA

Ekvationen för masscentrumets rörelse:

$$\begin{aligned}
 \frac{d\vec{V}}{dt} = & -\frac{\rho v S C_D}{2m} \vec{v} + \frac{\rho S C_{L\alpha}}{2m} [v^2 \vec{x} - (\vec{v} \cdot \vec{x}) \vec{v}] \\
 & - \frac{\rho S d C_{N\alpha}}{2m} \left(\frac{I_y}{I_x} \right) (\vec{h} \cdot \vec{x}) (\vec{x} \times \vec{v}) \\
 & + \frac{\rho v S d (C_{Nq} + C_{N\alpha})}{2m} (\vec{h} \times \vec{x}) \\
 & + \vec{g} + \vec{\Lambda} + \frac{gT}{m} \vec{x} \\
 & + \left(\frac{I_y}{mr_t} - \frac{\dot{m} r_e}{m} \right) (\vec{h} \times \vec{x})
 \end{aligned} \tag{2.1}$$

Ekvationen för vinkelrörelsen:

$$\begin{aligned}
 \frac{d\vec{h}}{dt} = & \frac{\rho v S d^2 C_{l_r}}{2I_z} (\vec{h} \cdot \vec{x}) \vec{x} + \frac{\rho v^2 S d \delta_F C_{l_r}}{2I_y} \vec{x} \\
 & + \frac{\rho v S d C_{M\alpha}}{2I_y} (\vec{v} \times \vec{x}) + \frac{\rho S d^2 C_{M\beta}}{2I_x} (\vec{h} \cdot \vec{x}) [\vec{v} - (\vec{v} \cdot \vec{x}) \vec{x}] \\
 & + \frac{\rho v S d^2 (C_{Mq} + C_{M\alpha})}{2I_y} [\vec{h} - (\vec{h} \cdot \vec{x}) \vec{x}] + \frac{gT_s}{I_y} \vec{x} \\
 & - \left(\frac{I_y - \dot{m} r_e r_t}{I_y} \right) [\vec{h} - (\vec{h} \cdot \vec{x}) \vec{x}]
 \end{aligned} \tag{2.2}$$

Emellertid tar dessa ekvationer hänsyn till krafter, vilka är kopplade till raketkrafter. Således används förenklade versioner av dessa ekvationer till denna rapport där raketkrafter samt den dämpande pitch-kraften försummas. Ytterligare en förenkling är kopplad till att badmintonbollen är rotationssymmetrisk. Symmetrin leder till att den snurrande rörelsen (roll) helt kan frångopplas från yaw- och pitchrörelsen. Med dessa förenklingar fås nu två nya ekvationer för masscentrumets rörelse (2.3) och vinkelrörelsen (2.4).

Förenklad ekvation för masscentrumets rörelse:

$$\frac{d\vec{V}}{dt} = - [\tilde{C}_D] \vec{v} + [\tilde{C}_{L\alpha}] \vec{v} \times (\vec{x} \times \vec{v}) + [\tilde{C}_{Np\alpha}] (\vec{v} \times \vec{x}) + \vec{g} + \vec{\Lambda} \tag{2.3}$$

Förenklad ekvation för vinkelrörelsen:

$$\frac{I_x p}{I_y} \left(\frac{d\vec{x}}{dt} \right) + (\vec{x} \times \frac{d^2 \vec{x}}{dt^2}) = [\tilde{C}_{M\alpha}] (\vec{v} \times \vec{x}) + [\tilde{C}_{Mp\alpha}] [\vec{x} \times (\vec{v} \times \vec{x})] + [\tilde{C}_{Mq}] (\vec{x} \times \frac{d\vec{x}}{dt}) \tag{2.4}$$

2.2 Tröghetsmoment

Ett föremåls tröghetsmoment beskriver hur mycket vridmoment som krävs för att förändra dess rotationshastighet kring en viss axel under en viss tid (Wikipedia, 2025). Tröghetsmomentet är den mest grundläggande och bestämmande

parametern för att avgöra vinkelbeteendet hos badmintonbollar (Lin, 2015). I_{xx} , alltså tröghetsmomentet runt roll-axeln, påverkar det axiella spinnbeteendet, medan I_{yy} och I_{zz} , alltså tröghetsmomentet kring pitch- och yaw-axeln, påverkar vinkelresponsen när bollen vrider sig. För att få liknande spinn-beteende mellan en fjäder och syntet boll krävs att de har liknande tröghetsmoment, förklarar Lin.

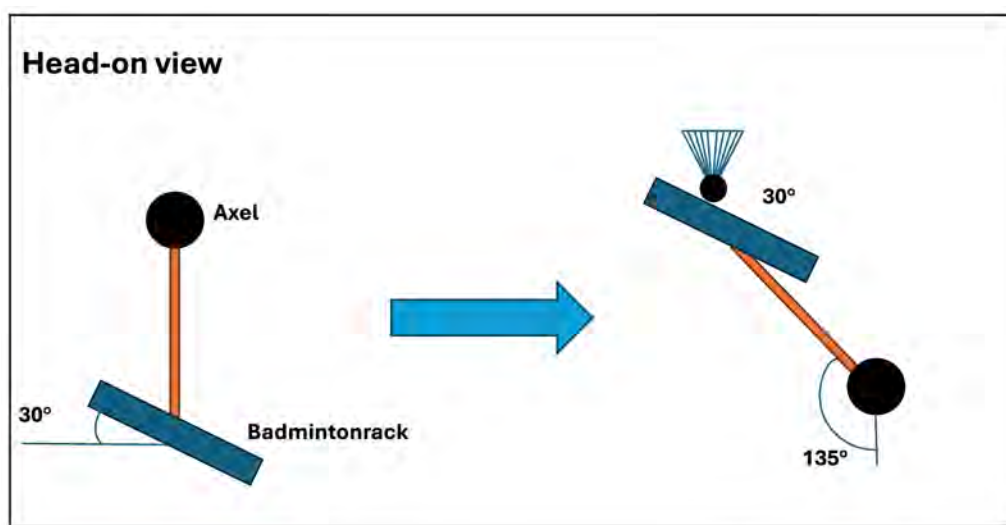
3

Metoder

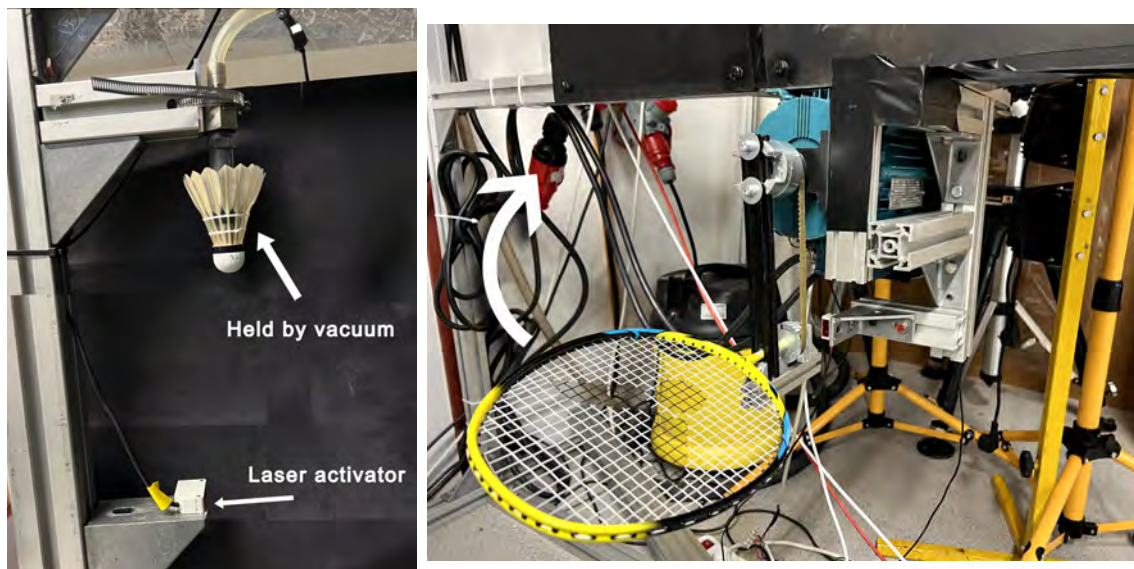
Metoderna som användes för att undersöka badmintonbollens rörelse och egenskaper var filmning av bollens bana, mängdtester, experimentellt test av tröghetsmoment, samt skapande av CAD-modeller. Av dessa genomfördes 6-DOF-beräkningar och CFD-simuleringar.

3.1 Filma och digitalisera flygbanor för tumlande bollar

För att studera tumlingen hos badmintonbollar användes en särskilt konstruerad rigg som möjliggjorde systematiska variationer av badmintonrackets vinkel. Racket var monterat på en motoriserad axel vilket skapade en kontrollerad roterande rörelse (se figur 3.2 och 3.1). Badmintonbollen placerades ovanför racket och hölls på plats med hjälp av ett vakuumsystem. Vid aktivering släpptes bollen och passerade en laser-sensor som initierade racketens rörelse. Denna rörelse motsvarade en rotationsvinkel på 135° på axeln och startpositionen var neråt.



Figur 3.1: Förenklad skiss av riggen som visar hur badmintonracket roterar för att träffa bollen



Figur 3.2: Badmintonrigg som simulerarade badmintonslag. Vänster bild: Vakuumsystem som håller badmintonbollen tillsammans med lasersensor. Höger bild: Badmintonracket som roterar medurs och träffar bollen när det har roterat 135° .

Genom att justera en tidsfördröjning på sensorn kunde träffpositionen där bollen träffar racket hållas konstant oavsett vinkel på racket. Samtliga slag filmades och spelades in i 240 fps.

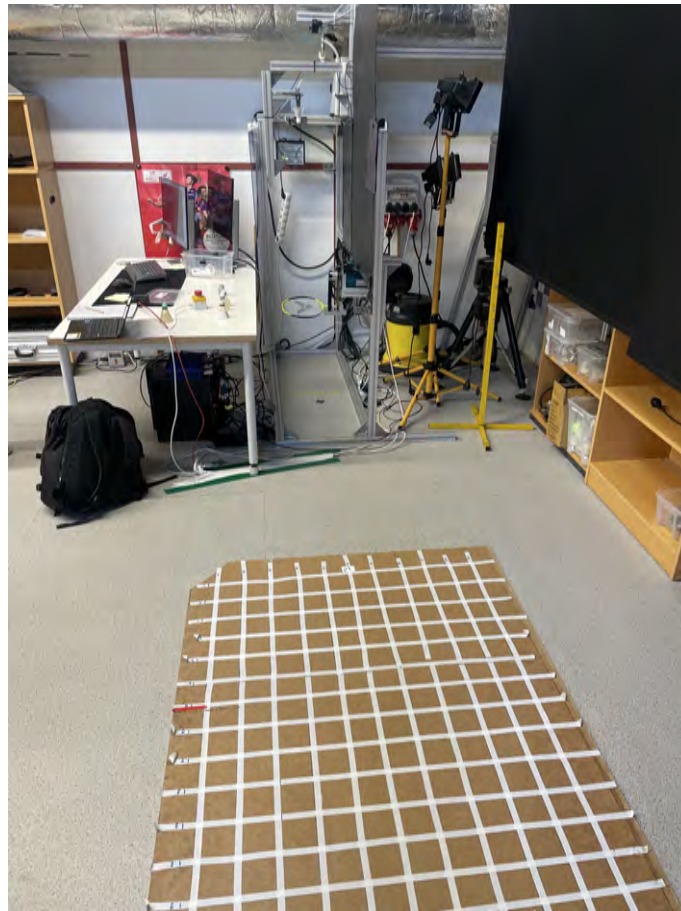
Filmningen genomfördes för fyra olika typer av badmintonbollar, där racket hade vinklarna 15° , 22.5° , 30° , 45° , 52.5° och 60° . För att förbättra bildanalysen användes en svart bakgrund, vilket gav hög kontrast.

Digitaliseringen utfördes i ett MATLAB-skript. Koden hämtar in videon. Programmet identifierar badmintonbollen och sparar bollpositionen var femte bildruta och överlappar bilderna för att skapa resultatbilden.

3.1.1 Mängdtest av bollarna

Vid slag med riggen som i teorin ska slå identiska slag uppstod vissa variationer i distans och avvikelse, trots samma bolltyp, vinkel och hastighet. Detta indikerade att små variationer i systemet påverkade utfallen av slagen. För att undersöka dessa skillnader upprepades slagen 10 gånger för varje boll och för varje vinkel. Vinklarna på racket var 15° , 30° , 45° , 60° . Detta gjordes för att avläsa avstånd, sidoavvikelse och initiala rotation. Resultaten möjliggjorde bestämning av ett medelvärde för varje bolltyp samt en standardavvikelse.

Utförandet av detta mängdtest gjordes med hjälp av riggen (Se figur ovan 3.2). Avståndet mättes med en tumstock utifrån ett referensrutnät på golvet (Se figur 3.3). Samtidigt filmades bollen så att avläsning av rotationen var möjlig.



Figur 3.3: Rutnätet som användes låg placerat 184 cm från racket och användes som en referens för att lättare och mer noggrant avläsa längd och sidoavvikelse.

För att analysera slagen lades resultaten in i tabeller (se appendix A.8) och placerades in i ett koordinatsystem för att lättare kunna visualisera vart träffarna hamnade. En metod för att systematiskt beskriva spridningen är med hjälp av standardavvikelse, σ (Lewis, u.å.). Standardavvikelse beskrivs via följande formel:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2}{N}} \quad (3.1)$$

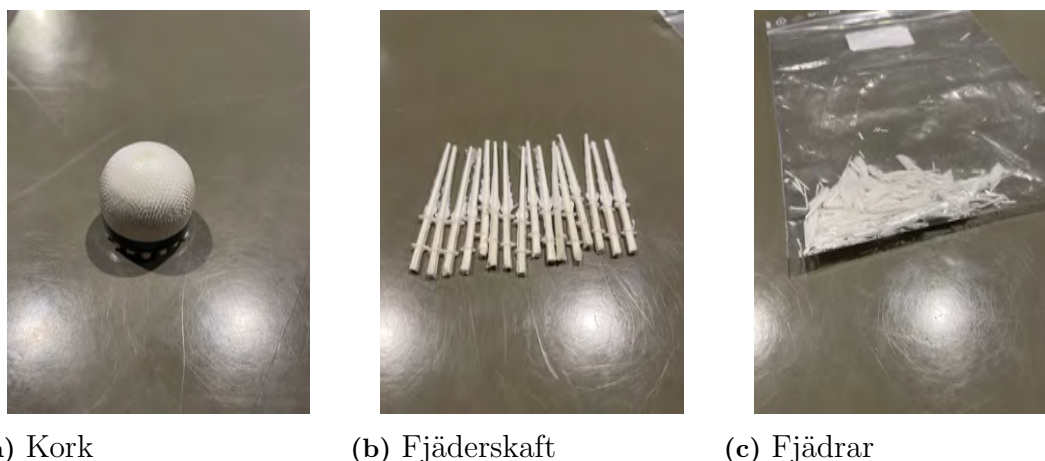
Här är $N = 10$ antalet mätningar, x_i själva mätvärden och μ medelvärdet. Via denna ekvation fås därför ett standardiserat medelvstånd för att beskriva bollens spridning. Detta värde har sedan multiplicerats med 3 för att alla punkter ska vara med i området. Resultatet σ ger ett mått på hur mycket träffarna avviker, vilket visar hur konsekvent bollen är över upprepade slag.

3.2 Skapa CAD-modeller

Syftet med CAD-modellerna var att möjliggöra användning av modellerna i CFD-beräkningar samt innebar ytterligare ett sätt att beräkna tröghetsmomentet. Samtliga badmintonbollar mättes med ett skjutmått och dokumenterades (se

appendix A.3). Modeller skapades för plastbollen från Wilson, syntetbollen Mizuno Tech och fjäderbollen Yonex Tournament i programvaran SolidWorks.

Fjäderbollen Yonex Tournament delades upp i tre huvudsakliga komponenter: korken, fjäderskaften och fjädrarna (se figur 3.4). Dessa delar var gjorda av olika material med olika densitet. I Solidworks skapades tre parts-filer för motsvarande delar i verkligheten. Genom att väga varje del separat kunde massorna tilldelas korrekt i CAD-programmet. Därefter sammanfogades alla delarna i en assembly för att få fram en modell av bollen.



Figur 3.4: Fjäderbollen Yonex tournament isärklippt i olika delar

Syntetbollarna av Mizuno Tech delades på samma sätt upp i tre sektioner: kork, fjäderskaft och fjädrar. För syntetbollens geometri skapades tre delar i SolidWorks baserat på uppmätta mått. Sedan justerades massan för varje del utifrån de uppmätta massorna för syntet 5.1 och syntet 5.3. Från delarna skapades varsin assembly för bollarna med respektive massor. Detta säkerställde att den totala massan och tröghetsmomentet i modellerna överensstämde med respektive fysisk boll så bra som möjligt (se figur 3.5 och 3.6).



Figur 3.5: Syntetbollen Mizuno Tech (5.1g) isärklippt i olika delar



(a) Kork

(b) Fjäderskaft

(c) Fjädrar

Figur 3.6: Syntetbollen Mizuno Tech (5.3g) isärklippt i olika delar

För plastbollen från Wilson användes en annan metod. Den delades upp i flera band, där varje band bestod av samma material och liknande tjocklek. Genom att klippa upp bollen och väga varje band separat (se figur 3.7) kunde massan fördelas exakt i modellen. Denna metod säkerställde att varje del hade en korrekt volym och därmed att massfördelningen i CAD-modellen överensstämde med den fysiska bollen. Genom att tilldela massa till varje del direkt istället för att använda densitet blev det särskilt viktigt att modellens volym motsvarade verkligheten. Att dela upp bollen i band med liknande tjocklek underlättade detta genom att möjliggöra en mer exakt geometrisk modellering.



(a) Kork

(b) Band 1

(c) Band 2



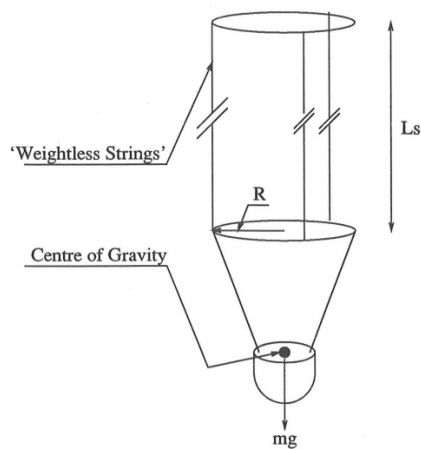
(d) Band 3

(e) Band 4

Figur 3.7: Plastbollen från Wilson isärklippt i olika delar

3.3 Experimentell mätning av tröghetsmoment

Metoden för att experimentellt beräkna tröghetsmomenten för de olika bollarna hämtades ur Cooke (1992) och Lin (2015). Det längsgående tröghetsmomentet, I_l , vilket representerar tröghetsmomentet i x-led, beräknades genom användandet av en pendel med tre trådar (se figur 3.8). Badmintonbollarna hängdes i tre ”masslösa” trådar, alla med avståndet R från masscentrum av bollen och alla med längden L_s . Efter upphängning sattes bollen i rotation, där den initiala vinkeln behövde vara $< 10^\circ$, (1992, s.138). För att kunna fästa tråden på bollarna, fästes tråden längre ned på kjolen, då det var svårt att fästa tråden i själva fjädern (se figur 3.9)



Figur 3.8: En skiss över experimentet. Trifilar swing (Cooke, 1992). CC BY-SA



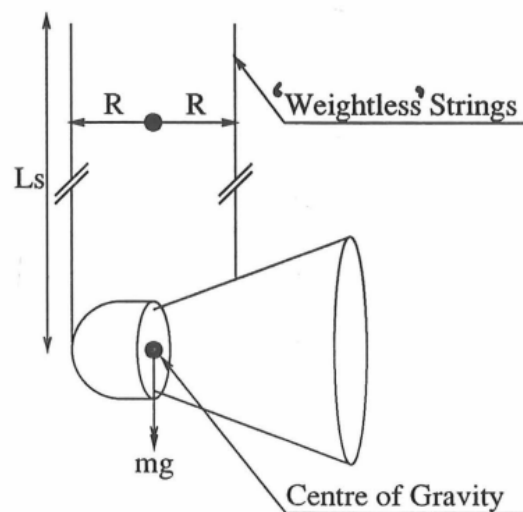
Figur 3.9: Upphängning av badmintonbollen i trifilar swing experimentet, för att mäta I_{xx} .

Tröghetsmomentet beräknades sedan med ekvation:

$$I = \frac{mgR^2T^2}{(2\pi)^2L_s} \quad (3.2)$$

Massan för de olika bollarna uppmättes med en våg med noggrannheten 4 värdesiffror. Längden på trådarna, L_s , mättes med en tumstock och R mättes med skjutmått. Periodtiden T , uppmättes genom att mäta tiden för 10 svängningar. Till följd av en tydlig varians i den uppmätta periodtiden utfördes 5 stycken beräkningar för varje boll.

På liknande sätt kunde det tvärgående momentet, I_t , vilket representerar tröghetsmomenten i y - och z -led beräknas, med skillnaden att bollen nu hängdes upp i två trådar kring dess masscentrum (se figur 3.12). Trådarna fästes med tejp på korken (se figur 3.11)

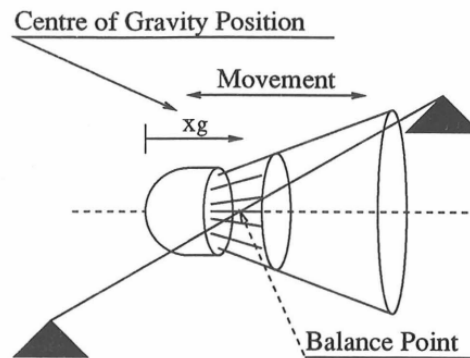


Figur 3.10: En skiss över experimentet. Bifilar swing (Cooke, 1992). CC BY-SA



Figur 3.11: Upphängning av badmintonbollen i bifilar swing experimentet, för att mäta I_{zz} , I_{yy} .

För att bestämma bollarnas masscentrum fördes en tråd in genom bollen. Bollarna flyttades sedan i sidled tills dess att de kunde hänga stabilt utan stöd. Vid denna punkt fanns deras masscentrum. Punkten vilken trådarna sedan kunde placeras med avståndet R ifrån, för att beräkna det tvärsgående tröghetsmomentet.



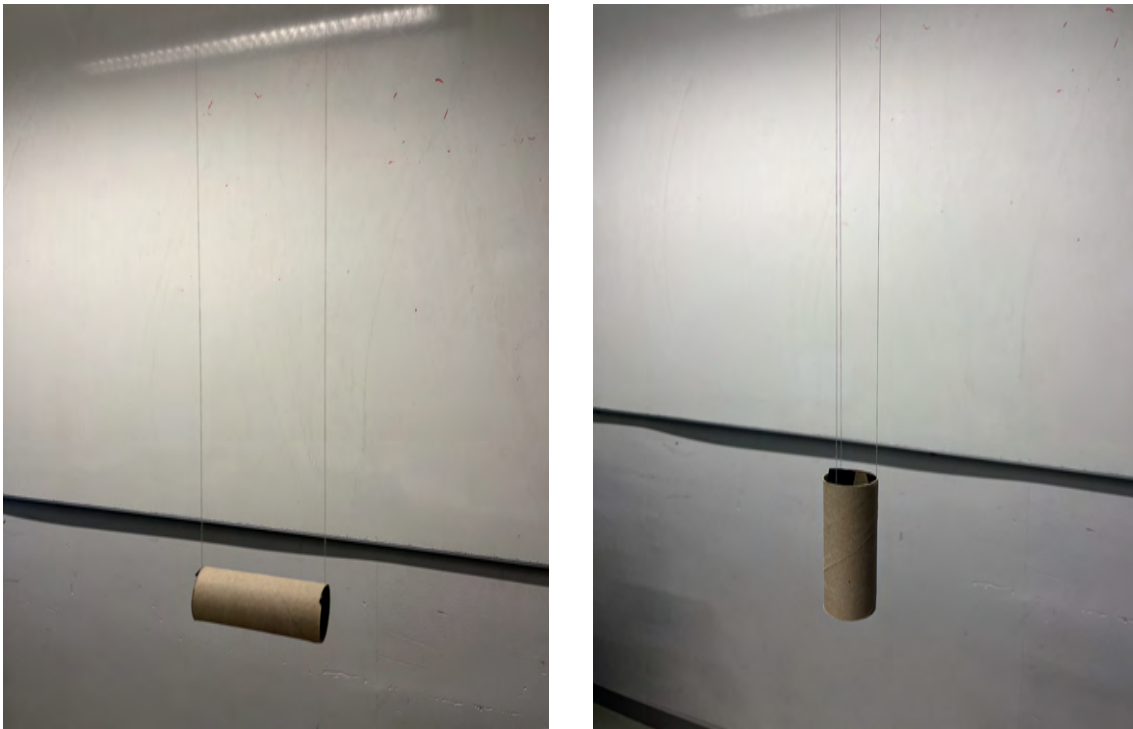
Figur 3.12: En skiss över experimentet. Centre of Gravity (Cooke, 1992). CC BY-SA

För att bedöma trovärdigheten i experimentet utfördes samma tester fast med en enklare geometri, med ett känt tröghetsmoment. En ihålig cylinder med liknande massa och form nyttjades (se figur 3.13). Det kända tröghetsmomentet beräknades enligt ekvation 3.3 samt ekvation 3.4.

Tröghetsmoment för ett rät cirkulärt cylinderskal (LTH, u.å):

$$I_x = mr^2 \quad (3.3)$$

$$I_y = \frac{mr^2}{2} + \frac{mh^2}{12} \quad (3.4)$$



Validering av tröghetsmoment i Y/Z-led Validering av tröghetsmoment i X-led

Figur 3.13: Valideringstestet med toapappersrulle med känt tröghetsmoment

3.4 6-DOF beräkningar

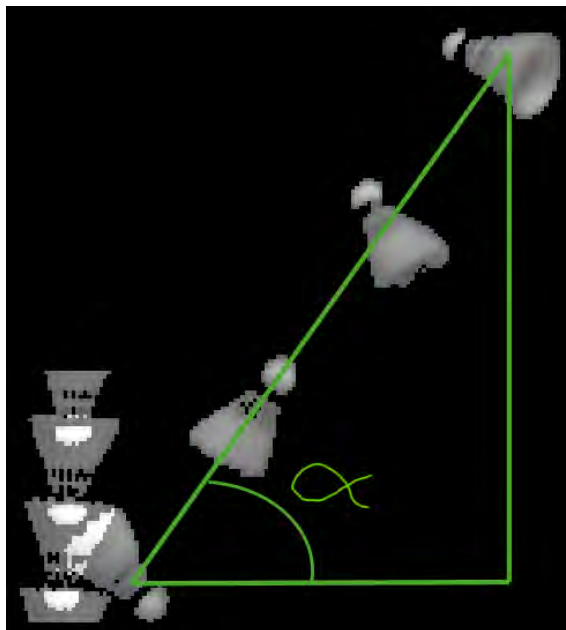
För att utföra 6-DOF beräkningarna användes en delad MATLAB-kod (Lefevre, 2024). Koden baseras på ekvationerna (2.3) och (2.4) och använder dessa för att beräkna bollarnas bana och rotation med hjälp av tidigare framtagna tröghetsmoment. Ytterligare parametrar, vilka behövde beräknas, var initiala hastigheten och initiala vinkeln för bollbanan, initiala pitch-vinkeln samt initiala pitch-raten. Beräkningarna utfördes genom att studera de digitaliserade flygbanorna. Mellan varje boll är det 5 bildrutor vilka fotograferats med 240 fps. Tiden mellan varje boll blir således:

$$t = \frac{5}{240} = 0.0208s \quad (3.5)$$

För att på ett enkelt och noggrant sätt studera den initiala hastigheten och övriga parametrar, förs den digitaliserade banan in i PowerPoint. Hastigheten fås sedan genom att mäta avståndet mellan två bollars masscentrum, där den kända korklängden på bollen används som referensmått för att få rätt skala. Därefter nyttjas ekvation (3.6) för att få ut hastigheten:

$$V = \frac{S}{t} \quad (3.6)$$

Vinkeln för bollbanan fås genom att mäta vinkeln mellan masscentrumet för två bollar (se figur 3.14).



Figur 3.14: Bild som visar beräkningen av vinkel för bollbanan

Pitch-raten fås sedan genom att beräkna vinkelrotationen/s. Detta görs genom att först kolla hur mycket bollen har roterat mellan 2 synliga bollar (se figur 3.15) och sedan dividera med hur lång tid som gått mellan 2 synliga bollar, alltså hur lång tid det har gått mellan 5 bildrutor.



Figur 3.15: Bild som visar beräkningen av pitchrate

Pitch vinkeln beräknas sedan genom att kolla den initiala vinkeln för bollen direkt efter träff med bollbanans riktning. Detta då koden alltid utgår ifrån bollbanans riktning för att beräkna rotation på bollen.

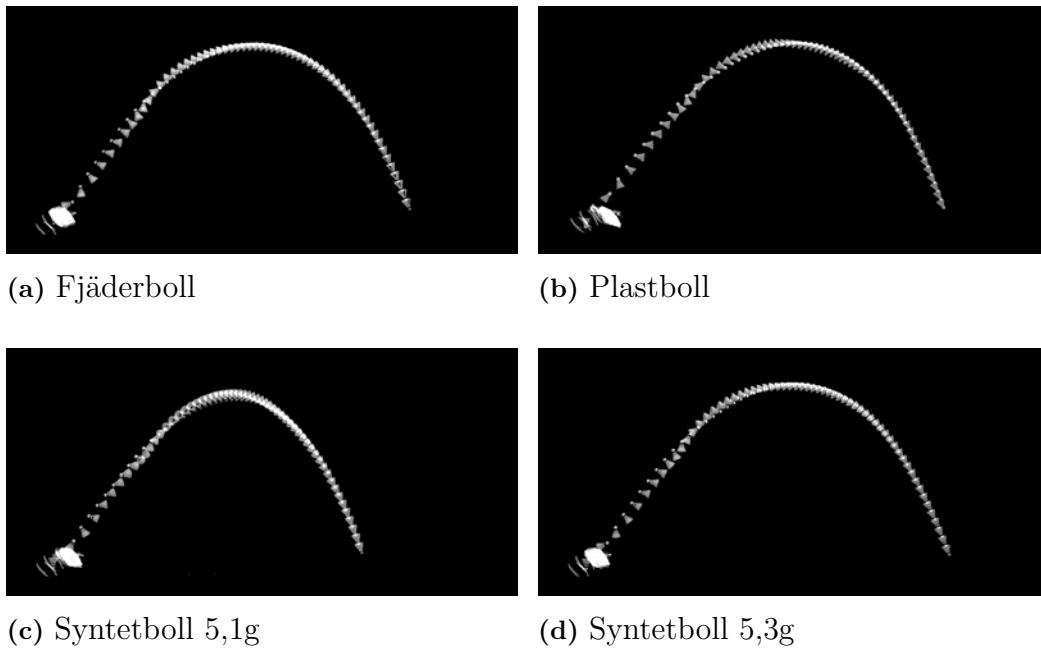
4

Resultat

Kapitlet redogör för de digitaliserade bilderna, sammanställningen av mängdtesterna, de färdiga CAD-modellerna, jämförelse av tröghetsmomenten samt en sammanställning av de simulerade 6-DOF graferna.

4.1 Filma och digitalisera flygbanor för tumlande bollar

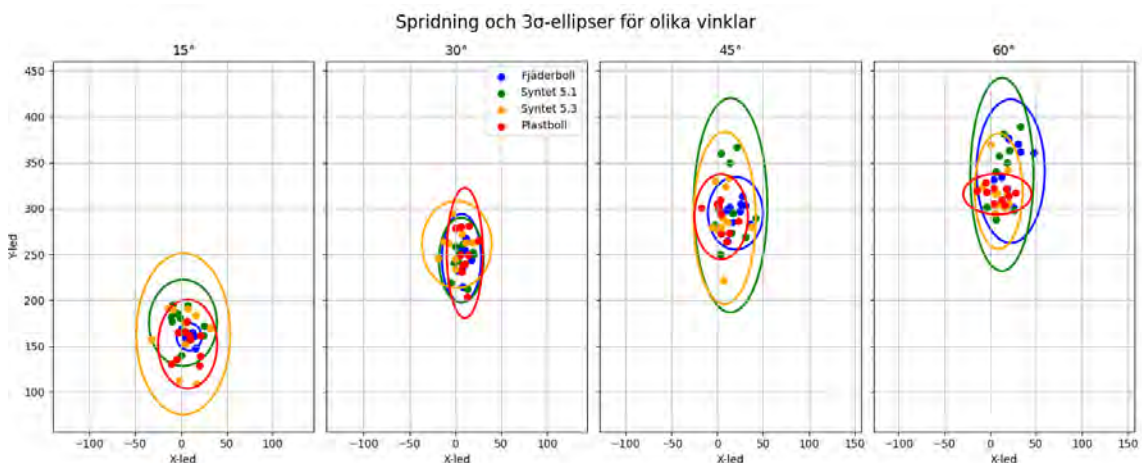
Nedan presenteras bilder av de olika badmintonbollarnas flygbanor (Fjäder, Plast, Syntet 5.1 g och Syntet 5.3 g). Bilderna har digitaliserats med hjälp av ett MATLAB-skript och därefter kombinerats för att underlätta jämförelsen av deras flygbanor och tumling. I detta resultatkapitel visas enbart slagen för 45° . Under projektet var det flera tillfällen då nya filmer togs för att säkerställa god bildkvalitet samt i flera vinklar. I vissa bilder blockerades delar av flygbanan trots den höga kontrasten och vid vissa skarpa vinkelslag flög bollen utanför bildrutan. Totalt var alla vinklar som filmades 15° , 22.5° , 30° , 37.5° , 45° , 52.5° och 60° . Dessa kompletterande bilder finns i Appendix A.1.



Figur 4.1: Den digitaliserade flygbanan för de fyra olika bollarna vid 45° lutning på racket.

4.1.1 Mängdtest av bollarna

Nedan följer resultatet från mängdtestet där varje punkt i koordinatsystemet representerar vart bollen landade just det slaget. De fyra graferna innehåller slagen från alla fyra bollarna, och de individuella graferna beskriver vinklarna 15° , 30° , 45° respektive 60°

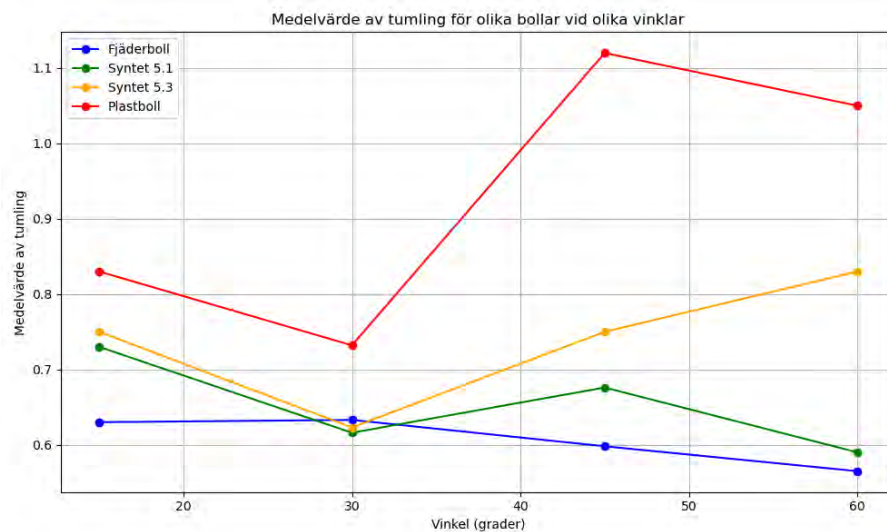


Figur 4.2: Grafer som visar spridningen för varje boll för olika vinklar, från 15° till 60°

Resultatet visar att fjäderbollen har lägst spridning av bollarna. För de lägre vinklarna har den tyngre syntetbollen sämst träffsäkerhet och för de högre vinklarna har den lättare syntetbollen sämst träffsäkerhet.

Resultatet för den initiala tumlingen av bollarna presenteras i figur 4.3. Med initial tumling avses det genomsnittliga antalet rotationer i pitch-riktning som bollen genomför innan den stabiliserar sin flygbana.

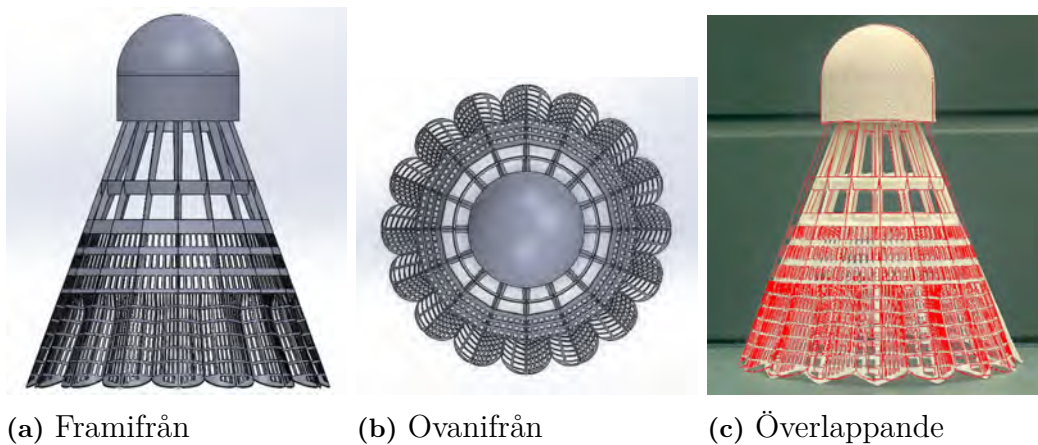
Figuren visar medelantalet varv för varje bolltyp vid olika racketvinklar. Varje datapunkt baseras på tio upprepade slag.



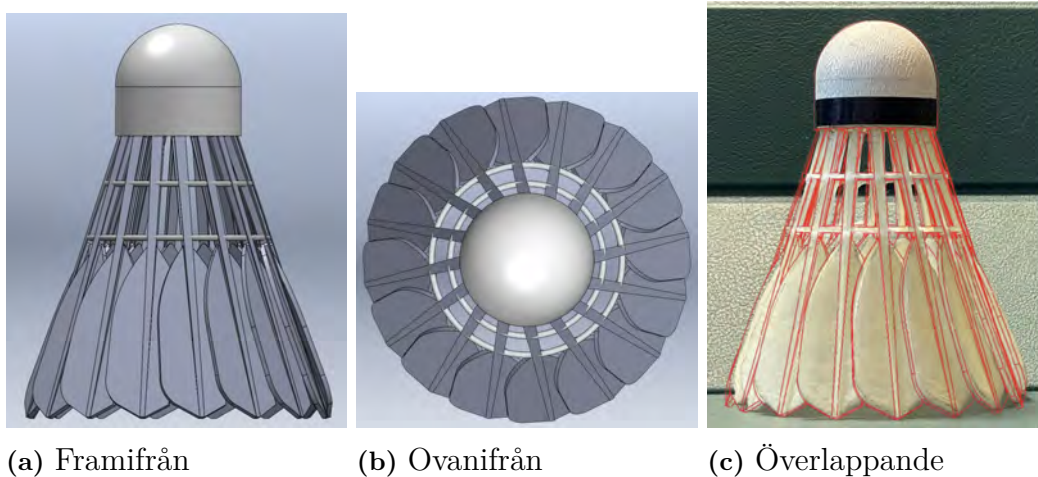
Figur 4.3: Medelantal varv i pitch-riktning innan stabilisering för olika bollar och vinklar. Data från tio slag per vinkel.

4.2 Skapa CAD-modeller

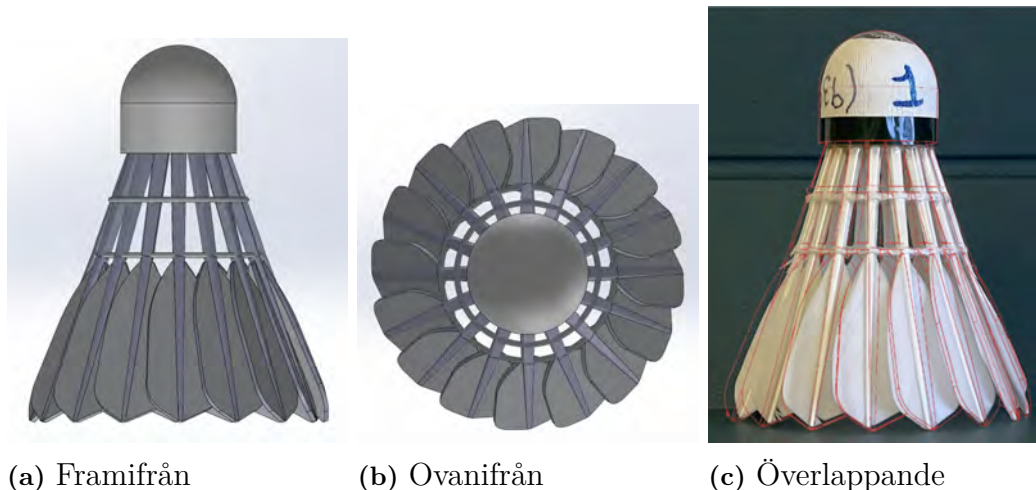
I de CAD-modellerna som har skapats har noggrannhet varit ett viktigt fokus. För att säkerställa CAD-modellernas trovärdighet har ytterlinjerna lagts på fotograferade bilder av de riktiga bollarna. Detta för att visa CAD-modellernas trovärdighet och därmed stärka det tröghetsmoment som man får fram via SolidWorks-programmet.



Figur 4.4: Visuell representation av plastbollen Wilson. CAD-modellen visas från olika vinklar tillsammans med ett fotografi av den faktiska bollen överlappande med strukturen för CAD-modellen.



Figur 4.5: Visuell representation av den syntetiska fjäderbollen Mizuno Tech. CAD-modellen visas från olika vinklar tillsammans med ett fotografi av den faktiska bollen överlappande med strukturen för CAD-modellen.



Figur 4.6: Visuell representation av fjäderbollen Yonex Tournament. CAD-modellen visas från olika vinklar tillsammans med ett fotografi av den faktiska bollen överlappande med strukturen för CAD-modellen.

Utifrån CAD-modellen kan programmet SolidWorks räkna ut ett tröghetsmoment och dessa presenteras nedan i tabell 4.1.

Tabell 4.1: Tabellen visar tröghetsmomenten från CAD-modellerna för de olika bollarna

Modell	Tröghetsmoment (I_{xx}) [kgm^2]	Tröghetsmoment (I_{yy} & I_{zz}) [kgm^2]
Yonex Tournament (Fjäder)	$1,15 \times 10^{-6}$	$2,66 \times 10^{-6}$
Wilson (Plast)	$1,19 \times 10^{-6}$	$2,91 \times 10^{-6}$
Mizuno Tech 5.1g (Syntet)	$1,15 \times 10^{-6}$	$2,52 \times 10^{-6}$
Mizuno Tech 5.3g (Syntet)	$1,11 \times 10^{-6}$	$2,37 \times 10^{-6}$

Resultatet visar små skillnader i I_{xx} och större skillnader i I_{yy}, I_{zz} .

4.3 Experimentell mätning av tröghetsmoment

Beräkningarna av tröghetsmoment presenteras i figur 4.7. För att underlätta jämförelsen mellan de olika badmintonbollarna har resultaten normaliserats mot fjäderbollen. På så sätt tydliggörs skillnader och likheter mellan bollarna.

Resultatet visar att fjäderbollen har det lägsta tröghetsmomentet i I_{xx} , medan den har det högsta tröghetsmomentet i I_{yy}, I_{zz} .

4. Resultat

I _{xx} beräkning		m (kg)	Ls (m)	R (m)		1	2	3	4	5	Average	Period T (s)	Tröghetsmoment (kgm ²)	Avvikelse i % jämfört med fjäderboll
Fjäderboll	0,0053	1,01	0,033	Oscillation (#):	15	15	15	15	15	15	15	1,16	1,91×10 ⁻⁰⁶	0,00%
				Tid (s):	15,91	16,8	17,07	18,64	18,89	17,4				
Plastboll	0,0053	1,01	0,03265	Oscillation (#):	15	15	15	15	15	15	15	1,21	2,05×10 ⁻⁰⁶	7,16%
				Tid (s):	18,1	18,54	18,2	18,04	18,31	18,205				
Syntetiskboll 5.1	0,0051	1,01	0,03205	Oscillation (#):	15	15	15	15	15	15	15	1,36	2,40×10 ⁻⁰⁶	25,62%
				Tid (s):	20,57	20,09	21,16	20,49	20,37	20,47				
Syntetiskboll 5.3	0,0053	1,01	0,03205	Oscillation (#):	15	15	15	15	15	15	15	1,31	2,31×10 ⁻⁰⁶	20,79%
				Tid (s):	19,57	20,01	19,81	19,79	19,81	19,69				
L _{yy} och L _{zz} beräkning		m (kg)	Ls (m)	R (m)		1	2	3	4	5	Average	Period T (s)	Tröghetsmoment (kgm ²)	Avvikelse i % jämfört med fjäderboll
Fjäderboll	0,0053	1,01	0,028	Oscillation (#):	5	5	5	5	5	5	5	1,71	2,97×10 ⁻⁰⁶	0,00%
				Tid (s):	8,65	8,55	8,55	8,7	8,4	8,525				
Plastboll	0,0053	1,01	0,027	Oscillation (#):	5	5	5	5	5	5	5	1,66	2,63×10 ⁻⁰⁶	-11,65%
				Tid (s):	8,5	8,23	8,25	8,12	8,12	8,31				
Syntetiskboll 5.1	0,0051	1,01	0,028	Oscillation (#):	5	5	5	5	5	5	5	1,69	2,82×10 ⁻⁰⁶	-5,24%
				Tid (s):	8,47	8,6	8,43	8,58	8,45	8,46				
Syntetiskboll 5.3	0,0053	1,01	0,027	Oscillation (#):	5	5	5	5	5	5	5	1,65	2,60×10 ⁻⁰⁶	-12,60%
				Tid (s):	8,25	8,35	8,33	8	8,28	8,265				

Figur 4.7: Jämförelse av tröghetsmoment mellan olika badmintonbollar.

Sedan jämfördes de experimentellt uppmätta värdena på tröghetsmomenten med de värden, vilka uppmätts i CAD, samt de värden vilka hämtats från litteratur. Resultatet visar att de experimentella värdena och värdena från Lin, har liknande storleksordning för I_{yy} , I_{zz} tröghetsmomenten. Jämfört med värdena från CAD-modellen skiljer det sig något, där plastbollen har högst tröghetsmoment.

		Tröghetsmoment I _{yy} , I _{zz} (kgm ²)	Avvikelse i % jämfört med fjäderbollen
Trådberäkningar	Yonex tournament (fjäder)	2,97×10 ⁻⁰⁶	0,00%
	Wilson (plast)	2,63×10 ⁻⁰⁶	-11,45%
	Mizuno tech (5.1g) (syntet)	2,82×10 ⁻⁰⁶	-5,05%
	Mizuno tech (5.3g) (syntet)	2,60×10 ⁻⁰⁶	-12,46%
CAD-modeller	Yonex tournament (fjäder)	2,66×10 ⁻⁰⁶	0,00%
	Wilson (plast)	2,91×10 ⁻⁰⁶	9,40%
	Mizuno tech (5.1g)	2,52×10 ⁻⁰⁶	-5,26%
	Mizuno tech (5.3g)	2,37×10 ⁻⁰⁶	-10,90%
Lin	Yonex AS40 (fjäder)	3,32×10 ⁻⁰⁶	0,00%
	Babolat Tour (fjäder)	2,96×10 ⁻⁰⁶	-10,84%
	Li-Ning X800 (green) (syntet)	2,73×10 ⁻⁰⁶	-17,77%
	Li-Ning X800 (blue) (syntet)	2,67×10 ⁻⁰⁶	-19,58%
	Yonex Mavis 350 (syntet)	2,70×10 ⁻⁰⁶	-18,67%
Cooke	Feather (fjäder)	2,87×10 ⁻⁰⁶	0,00%
	Pro Cork (plast)	2,52×10 ⁻⁰⁶	-12,20%
	Tournament (plast)	2,93×10 ⁻⁰⁶	2,09%
	Championship (plast)	2,98×10 ⁻⁰⁶	3,83%

Figur 4.8: Jämförelse av tröghetsmoment I_{yy} , I_{zz} mellan våra uppmätta värden, värden från CAD samt värden från litteratur.

		Tröghetsmoment I_{xx} (kgm ²)	Avvikelse i % jämfört med fjäderbollen
Trådberäkningar	Yonex tournament (fjäder)	$1,91 \times 10^{-6}$	0,00%
	Wilson (plast)	$2,05 \times 10^{-6}$	7,33%
	Mizuno tech (5.1g) (syntet)	$2,40 \times 10^{-6}$	25,65%
	Mizuno tech (5.3g) (syntet)	$2,31 \times 10^{-6}$	20,94%
CAD-modeller	Yonex tournament (fjäder)	$1,15 \times 10^{-6}$	0,00%
	Wilson (plast)	$1,19 \times 10^{-6}$	3,48%
	Mizuno tech (5.1g)	$1,15 \times 10^{-6}$	0,00%
	Mizuno tech (5.3g)	$1,11 \times 10^{-6}$	-3,48%
Lin	Yonex AS40 (fjäder)	$1,39 \times 10^{-6}$	0,00%
	Babolat Tour (fjäder)	$1,19 \times 10^{-6}$	-14,39%
	Li-Ning X800 (green) (syntet)	$1,25 \times 10^{-6}$	-10,07%
	Li-Ning X800 (blue) (syntet)	$1,34 \times 10^{-6}$	-3,60%
	Yonex Mavis 350 (syntet)	$1,28 \times 10^{-6}$	-7,91%
Cooke	Feather (fjäder)	$1,16 \times 10^{-6}$	0,00%
	Pro Cork (plast)	$1,08 \times 10^{-6}$	-6,90%
	Tournament (plast)	$1,26 \times 10^{-6}$	8,62%
	Championship (plast)	$1,17 \times 10^{-6}$	0,86%

Figur 4.9: Jämförelse av tröghetsmoment I_{xx} mellan våra uppmätta värden, värden från CAD samt värden från litteratur.

Experimentet visar att trots skillnader i I_{xx} värdena är det procentuella förhållandet mellan de olika bollarna likt. Experimentets resultat visar att fjäderbollen har lägst tröghetsmoment, vilket även Lins resultat visar. Samma gäller för Cooke om endast fjäderbollen jämförs med Pro Cork bollen. Tröghetsmomenten från CAD skiljer sig där samtliga ligger kring samma värde.

Resultaten från experimentet, där metoden valideras med en enklare geometri presenteras nedan, se figur 4.10. Resultaten visar att mätningen avviker med 0,49% i x-led och 3,57% i y/z-led.

I_{xx}	Tröghetsmoment från experiment (kgm ²)	Beräknat tröghetsmoment (kgm ²)	Avvikelse i % jämfört med beräknat tröghetsmoment
Cylinder	$2,04 \times 10^{-6}$	$2,03 \times 10^{-6}$	0,49%
I_{yy}, I_{zz}	Tröghetsmoment från experiment (kgm ²)	Beräknat tröghetsmoment (kgm ²)	Avvikelse i % jämfört med beräknat tröghetsmoment
Cylinder	$5,51 \times 10^{-6}$	$5,32 \times 10^{-6}$	3,57%

Figur 4.10: Jämförelse av de uppmätta tröghetsmomenten från experimentet med cylindern och de beräknade tröghetsmomenten för cylindern.

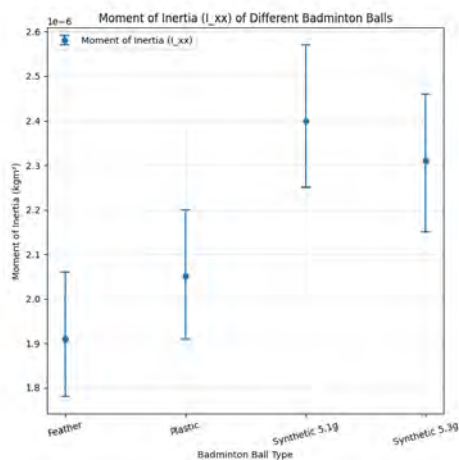
För att ge en uppfattning om osäkerheten i mätningarna har toleransberäkningar genomförts. Dessa visas i figur 4.13 och baseras på mätosäkerheter i massa, radie och periodtid.

4. Resultat

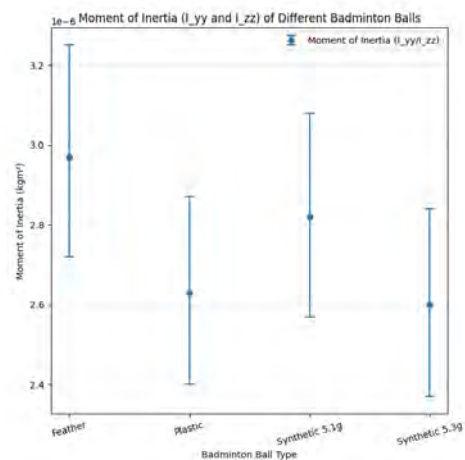
Toleransberäkning av våra värden												
Massa (kg)			Längd tråd (Ls)			Radi (R) I_xx						
	kg	Mätverktyg	Intervall	m	Mätverktyg	Intervall	m	Mätverktyg	Intervall			
Fjäder	0,0053	Digitalväg	\+/-0,0001	1,01	Tumstock	\+/-0,0035	0,033	Skjutmått	\+/-0,000007			
Plast	0,0053	Digitalväg	\+/-0,0001	1,01	Tumstock	\+/-0,0035	0,03265	Skjutmått	\+/-0,000007			
Syntet 5.1	0,0051	Digitalväg	\+/-0,0001	1,01	Tumstock	\+/-0,0035	0,03205	Skjutmått	\+/-0,000007			
Syntet 5.3	0,0053	Digitalväg	\+/-0,0001	1,01	Tumstock	\+/-0,0035	0,03205	Skjutmått	\+/-0,000007			
Reasoning	Avrundades till närmste 0,1g, online källor +/-0,05g			Flera saker: Tumstock kan variera +/-1mm/m och vi mätte 5 meter +/-3mm, Generell mätning pga syn och metod +/-3mm, Andra variabler +/-1mm, sedan delar vi längden på tråden med 2 (detta delar också felstör)!			Väldigt exakt verktyg +/- 0,02 enligt online källor, avrundades till närmsta 0,05mm					
Toleransberäkning av våra värden												
Oscillationer (#)			Tid (T) I_xx			Radi (R) I_yyzz			Tid (T) I_yyzz			
	#	Mätverktyg	Intervall	s	Mätverktyg	Intervall	m	Mätverktyg	Intervall	s	Mätverktyg	Intervall
Fjäder	10	Räknade manuellt	\+/-0	1,16	Video av experiment	\+/-0,029	0,028	Skjutmått	\+/-0,000007	1,71	Video av experiment	\+/-0,029
Plast	10	Räknade manuellt	\+/-0	1,21	Video av experiment	\+/-0,029	0,027	Skjutmått	\+/-0,000007	1,66	Video av experiment	\+/-0,029
Syntet 5.1	10	Räknade manuellt	\+/-0	1,36	Video av experiment	\+/-0,029	0,028	Skjutmått	\+/-0,000007	1,69	Video av experiment	\+/-0,029
Syntet 5.3	10	Räknade manuellt	\+/-0	1,31	Video av experiment	\+/-0,029	0,027	Skjutmått	\+/-0,000007	1,65	Video av experiment	\+/-0,029
Reasoning	Osannolikt att felräkningar sker här			\+/-1/fps (16ms for 60fps), + human reaction time 200ms/15 (median taken from humanbenchmark.com)			Same as before but for yyzz values			Annan tolerans för period zzy, +/- 1 frame (16ms) +/- 200ms/5(human reaction time/oscillations)		

Figur 4.11: Toleransberäkningar för de olika tröghetsmomenten.

De slutgiltiga tröghetsmomenten med tillhörande felmarginaler presenteras i figurerna nedan.



(a) Tröghetsmoment längs X-axeln (I_{xx}).



(b) Tröghetsmoment längs YZ-axeln ($I_{yy/zz}$).

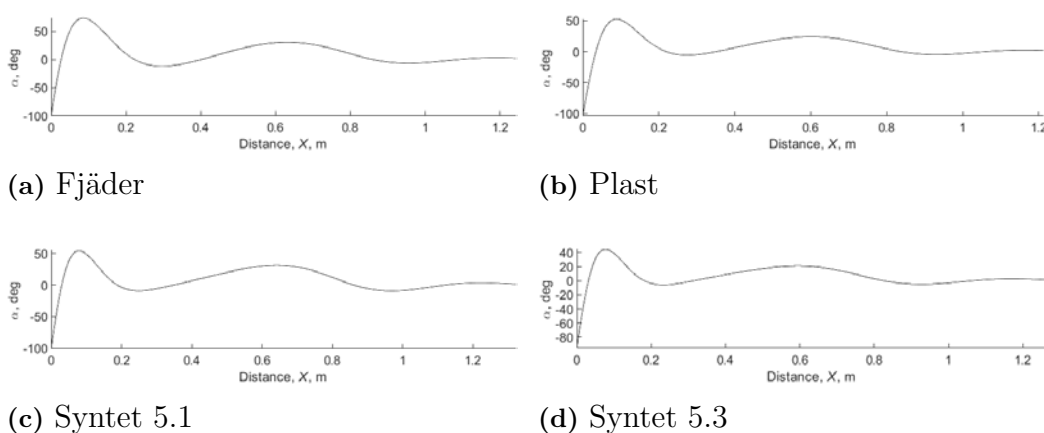
4.4 6-DOF beräkningar

Tabellen nedan visar de olika parametrarna som användes i koden för att ta fram de olika graferna för bollarnas rörelser.

	Vinkel på racket	15°	30°	45°	60°
Yonex tournament (fjäder)	Hastighet (m/s)	9	8,52	7,33	7,73
	Pitch Rate (rad/s)	86,4	85,11	75,86	66,15
	Initial Banvinkel	68,4	60,4	55,22	37,3
	Initial Pitch Vinkel(°)	-113,4	-105,4	-100,22	-82,3
Wilson (plast)	Hastighet (m/s)	10,46	10,4	7,39	8,97
	Pitch Rate (rad/s)	102	103,2	62	80,55
	Initial Banvinkel	64,64	59,44	54,5	35,13
	Initial Pitch Vinkel(°)	-109,64	-104,44	-99,5	-80,13
Mizuno tech (5.1g) (syntet)	Hastighet (m/s)	9,6	10,81	7,51	8,55
	Pitch Rate (rad/s)	75,52	75,52	67,9	67,13
	Initial Banvinkel	61,52	55,01	55,5	32,65
	Initial Pitch Vinkel(°)	-106,52	-100,01	-100,5	-77,65
Mizuno tech (5.3g) (syntet)	Hastighet (m/s)	9,4	10,69	7,52	8,925
	Pitch Rate (rad/s)	75,52	77,83	62,22	69,27
	Initial Banvinkel	63,43	54,22	50,77	32,76
	Initial Pitch Vinkel(°)	-108,43	-99,22	-95,77	-77,76

Figur 4.13: Tabell över de framtagna parametrarna

I figurerna nedan visas 4 grafer per figur som beskriver hur bollarnas pitch-vinkel, sidoavvikelse och bollbana ser ut för de olika vinklarna på racket. I de första 4 figurerna visas bollarnas pitch-vinkel. Viktig observation vid samtliga grafer nedan är att vinkeln som visas är i relation till vinkel på bollens färd bana. Alltså när grafen visar 0° betyder detta att bollen har samma vinkel som riktning den färdas. I de nästkommande figurerna visas bollarnas sidoavvikelse vid samma grader alltså hur mycket de rör sig i sidled under flygning. I de sista 4 figurerna kan man se hur långt samt högt bollarna flyger för varje slag. Nedan visas bara graferna för slag vid 45° för slag med graderna 15° , 30° och 60° se appendix A.4

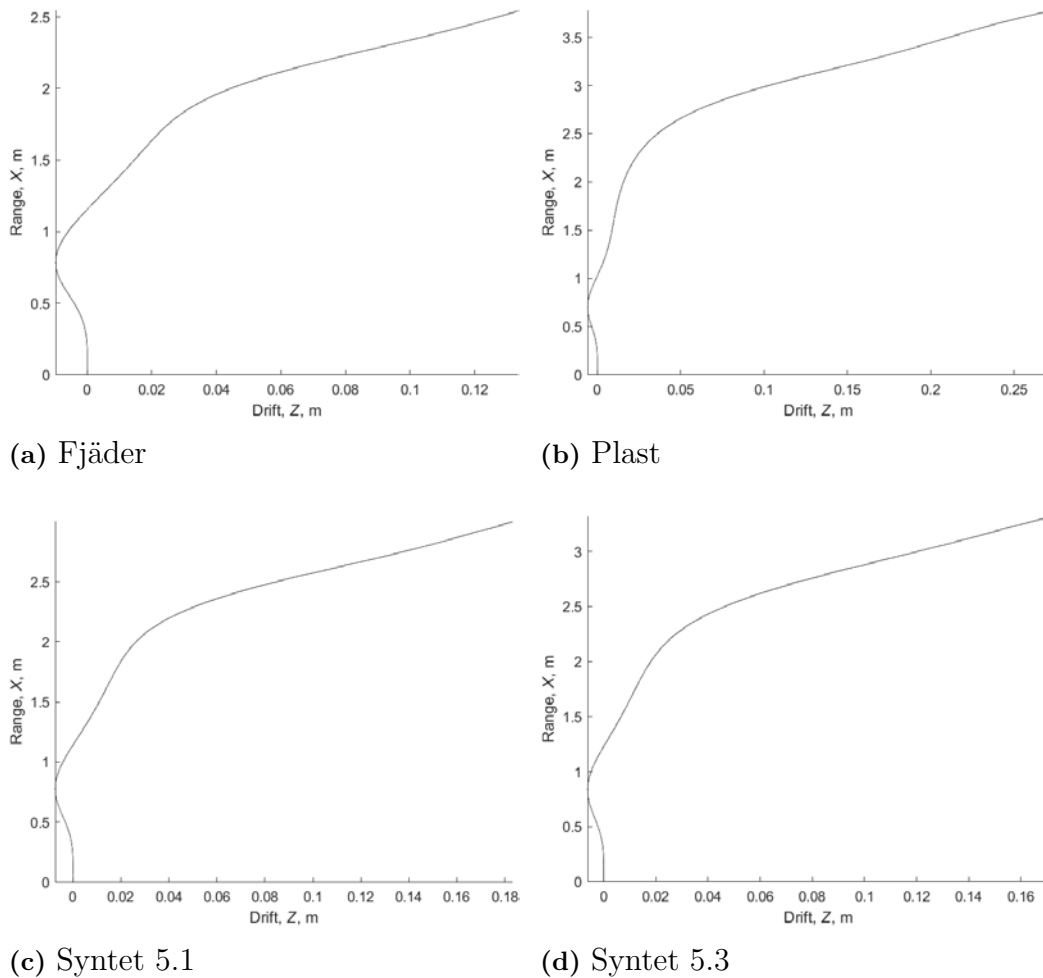


Figur 4.14: Ändring av pitch-vinkel i relation till hur långt bollen har flugit för bollarna vid 45° på racket.

Nedan kommer graferna som visar sidoavvikelsen hos bollarna i relation till hur långt

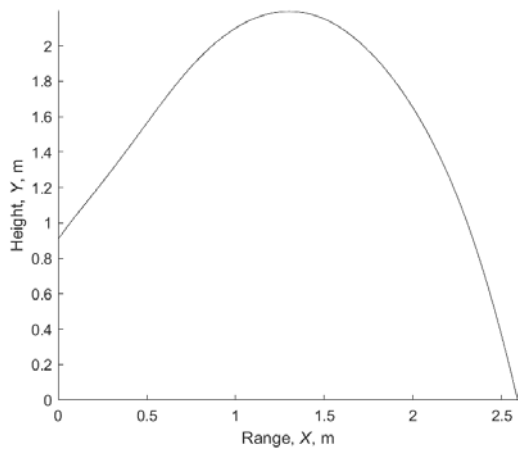
4. Resultat

bollen har flugit. Man kan se att fjäderbollen inledningsvis har mer drift men totalt har en mindre avvikelse från startposition, medan plastbollen har mest sidoavvikelse för samtliga slag. För resterande grafer se appendix A.5

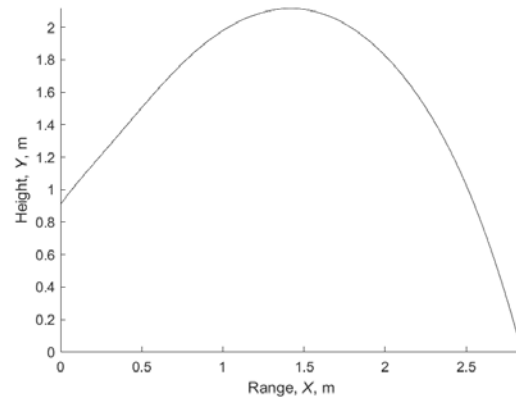


Figur 4.15: Ändring av sidoavvikelse i relation till hur långt bollen har flugit för bollarna vid 45° på racket.

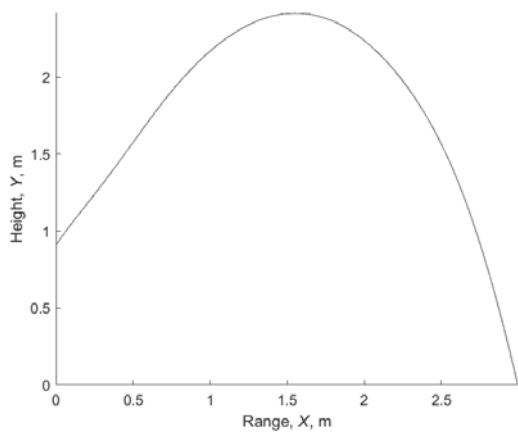
Nedanför syns graferna för bollbanan, alltså hur långt och högt bollarna flyger vid slagen. Största skillnaden syns i hur långt de flyger. Största skillnaden är upp till 1 meter mellan bollarna. För resterande grafer se appendix A.6.



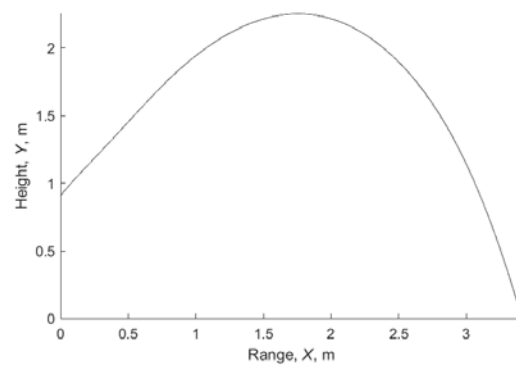
(a) Fjäder



(b) Plast



(c) Syntet 5.1



(d) Syntet 5.3

Figur 4.16: Bollbanan för bollarna vid 45° på racket.

5

Diskussion

De erhållna resultaten diskuteras i relation till delprojektens syften och hur de genomförts. Fokus ligger på att tolka resultaten, analysera vad de innebär samt bedöma i vilken utsträckning felkällor och mätosäkerheter kan ha påverkat resultaten. Genom att kritiskt granska data och metodik undersöks tillförlitligheten och relevansen av de data som genererats i delprojekten.

5.1 Filma och digitalisera flygbanor för tumlande bollar

Resultatet från de digitaliserade flygbanorna visar vissa förväntade trender såsom en skarpare parabel vid större vinklar. Utöver det är det svårt att utläsa kvantitativ information direkt från bilderna. Ett mål var att använda MATLAB-kod för att automatisera placering av masscentrum och kork och på det viset kvantifiera tumlingen över hela flygbanan. Detta program blev dock aldrig tillräckligt bra. För att få en mer konkret bild av bollarnas rörelse används därför resultaten från mängdtesterna och den initiala rotationen i nästa avsnitt.

Målet med digitaliseringen var att få en grundläggande uppfattning om bollarnas bollbana och tumling, men eftersom vissa bollar, särskilt vid högre vinklar, flög utanför bildrutan, var det inte möjligt att göra en fullständig kvantitativ analys av tumlingsbeteendet utifrån filmerna.

5.1.1 Mängdtest av bollarna

Ty en fullständig analys av tumlingen ej kunde genomföras från digitaliseringen av bollbanorna, utfördes en förenklad analys baserad på bollens initiala rotation från mängdtesterna. Trots metodens enkelhet går det att urskilja tydliga trender. Plastbollen tumlade konsekvent mer än övriga bollar vid samtliga vinklar, medan fjäderbollen tumlade minst, utom vid 30° där syntetbollarna roterade mindre. Detta stödjer den generella uppfattning som ofta uttrycks av badmintonspelare, nämligen att plastbollar tumlar mer.

Det andra syftet med mängdtesterna var att analysera spridningen i landningspunkter genom att kvantifiera variationen i längd och sidled (se figur 4.2). Dessa grafer bör tolkas genom att studera storleken på områdena: ju mindre

spridning, desto mer konsekvent är bollens bana. Noterbart är att spridningen skiljer sig mellan slagen för samma boll. Detta trots att de initiala villkoren för riggen är de samma. Detta beror på att riggen inte är perfekt och inte slår exakt samma slag varje gång. Exempelvis kan racket få olika hastighet, signalen från lasern till racket kan vara olika snabb och bollen kan träffa olika på racket. Felkällan att riggen inte är konsekvent för alla slag begränsas genom att slå flera slag för varje boll. Detta leder till att spridningen mellan de olika bollarna ej beror på riggen utan istället på bollarnas design, tröghetsmoment och andra parametrar.

Vid analys av mängdtesterna observerades att fjäderbollen uppvisade det mest konsekventa flygbeteendet vid låga vinklar på racket. Fjäderbollen hade klart minst avvikelse i sid- och längdled vid 15°. För 30° och 45° hade den minst avvikelse tillsammans med syntet 5.1 vid 30° och med plastbollen vid 45°. Vid 60° skiljer sig resultatet från de lägre graderna, däremot noterades vissa oregelbundna slag vid utförandet av 60° testerna. Detta berodde på att kjolen på bollen träffades vid vissa slag. Försök gjordes att säkerställa rena korkträffar, men vid så hög vinkel var det svårt att undvika helt. När kjolen träffades minskade tumlingen och bollen färdades generellt även längre. På grund av detta bör främst 15°, 30° och 45° analyseras vid mängdtesterna eftersom dessa hade god reproducerbarhet.

Nedan sammanfattas identifierade felkällor som kan ha påverkat resultaten från mängdtesterna:

Tabell 5.1: Felkällor vid mängdtester

Felkälla:	Konsekvens:
Avläsningen av bollens position är en uppskattning på vart den landade.	Positionen för bollarna blir inte exakta.
Avläsningen av bollens rotation uppskattades med ögonmått utifrån filmerna.	Rotationen för bollarna blir inte exakta.
Riggen är ej perfekt och kan ge olika hastighet för slagen.	Bidrar till variation mellan slagen.

5.2 Skapa CAD-modeller

Modellerna skapades för CFD-simuleringar, men också som ett sätt att erhålla bollarnas tröghetsmoment. CFD-simuleringar utfördes inte i hög utsträckning under detta projekt (se B.1), således är de framtagna modellerna istället värdefulla underlag för framtida simuleringar och tester.

Geometrin hos badmintonbollarna skiljer sig mellan de olika typerna. Fjäderbollen Yonex Tournament är unik eftersom varje fjäder är unik. Vid mätningarna blev detta tydligt då fjädrarnas bredd varierade något mellan olika exemplar. Detta innebär att varje boll skiljer sig lite från varandra, eftersom fjädrarnas form, längd och vinkel

kan variera, vilket i sin tur påverkar både massfördelningen och flygbeteendet. CAD-modellen återspeglar inte denna variation utan bygger på en förenklad, symmetrisk representation där alla fjädrar är identiska. Detta gör modellen konsekvent och lättanvänd vid simuleringar, men innebär samtidigt att den inte fullt ut speglar de små skillnader som kan finnas mellan verkliga fjäderbollar.

Plastbollen från Wilson skiljer sig tydligt från fjäderbollen. Eftersom den tillverkas med en standardiserad process är varje exemplar nästan identiskt, med minimala variationer mellan bollarna. Detta gör att CAD-modellen kan representera plastbollarna mycket realistiskt, eftersom både geometrin och massfördelningen är nästintill identiska mellan olika exemplar av samma badmintonbollsmodell.

Syntetbollen Mizuno Tech befinner sig mellan dessa ytterligheter. Trots att konstruktionen är mer standardiserad än fjäderbollens, då fjädrarna inte är riktiga fjädrar från djur, kan skillnader i material och tillverkningsprocess orsaka små variationer i massa och tröghetsmoment. Vid mätningarna observerades att vissa detaljer, såsom fjädrarnas form och storlek, kunde variera något. CAD-modellen för syntetbollen är därför också en förenklad representation som inte fullt ut speglar alla små variationer som kan förekomma i verkligheten.

Några av de felkällor som finns kring detta delmoment presenteras i nedanstående tabell.

Tabell 5.2: Felkällor vid skapandet av CAD-modeller

Felkälla:	Konsekvens:
Mätfel, många små mått	Modellen blir inte exakt
Skjutmåttets felmarginal	Modellen blir inte exakt
Vågens felmarginal	Påverkar tröghetsmomentet

5.3 Experimentell mätning av tröghetsmoment

Efter första mätningen av tröghetsmomentet identifierades en rad felkällor (se tabell 5.3). För att säkerställa ett mer noggrant resultat identifierades lösningar på dessa, varpå nya mätningar utfördes (se tabell 5.4). Identifieringen av felkällor är en viktig grund till diskussionen, då de påverkar resultatet. Emellertid påverkar felkällorna resultatet för varje boll lika mycket, därför är det mer intressant att studera relationen mellan bollarnas tröghetsmoment, mer än faktiska värden. Felkällorna som identifierades var i synnerhet kopplade till utrustningen och hur denna nyttjades, men även hur mätningarna utfördes.

Tabell 5.3: Felkällor vid mätning av tröghetsmoment och dess konsekvenser

Felkälla:	Konsekvens:
Ej lodrät tråd vid bifilar mätning	Bidrar till förändrad periodtid (kortare)
Tejpens massa	Bidrar till förändrat masscentrum
Ej samma vinkel vid början på alla mätningar	Bidrar till förändrad periodtid
Ej masslösa trådar	Bidrar till förändrat masscentrum
Icke noggrann mätning av masscentrum	Bidrar till förändrat masscentrum
Icke noggrann mätning av tiden	Bidrar till förändrad periodtid

Tabell 5.4: Felkällor vid mätning av tröghetsmoment och dess lösningar

Felkälla:	Lösning:
Ej lodrät tråd vid bifilar mätning	Säkerställa att vinkeln är 90
Tejpens massa	Använda tunnare och mindre mängd tejp
Ej samma vinkel vid början på alla mätningar	Mäta startvinkeln vid alla mätningar
Ej masslösa trådar	-
Icke noggrann mätning av masscentrum	Mäta med skjutmått
Icke noggrann mätning av tiden	Filma oscillationerna med ett tidtagarur i bakgrunden

5.3.1 Jämförelse av beräknade tröghetsmoment

Syftet med jämförelsen av metoderna var dels att stärka trovärdigheten i metoderna, men även att avgöra vilken av metodernas resultat som skulle nyttjas till övriga delprojekt i arbetet. Vid jämförelse mellan de experimentellt framtagna tröghetsmomenten och de CAD-beräknade tröghetsmomenten identifierades diverse skillnader. Vid jämförelse av I_{xx} skiljde sig storleksordningen mellan metoderna avsevärt. Ordningen var tvärtom, där fjäder- och plastbollen hade lägst enligt trådexperimentet, men högst enligt CAD-beräkningarna (se tabell 5.5). För jämförelsen av I_{yy}, I_{zz} kunde samma resonemang föras, storleksordningen var ej densamma (se tabell 5.6). Emellertid hade den tyngre syntetiska bollen lägst i båda fallen.

Tabell 5.5: Tröghetsmoment I_{xx} från CAD-beräkningar och trådberäkningar.

Boll	Tröghetsmoment CAD I_{xx}	Tröghetsmoment tråd I_{xx}
Yonex tournament	$1,15 \times 10^{-6}$	$1,91 \times 10^{-6}$
Wilson	$1,19 \times 10^{-6}$	$2,05 \times 10^{-6}$
Mizuno tech (5,3g)	$1,11 \times 10^{-6}$	$2,31 \times 10^{-6}$
Mizuno tech (5,1g)	$1,15 \times 10^{-6}$	$2,40 \times 10^{-6}$

Tabell 5.6: Tröghetsmoment I_{yy}, I_{zz} från CAD-beräkningar och trådberäkningar.

Boll	Tröghetsmoment CAD I_{yy}, I_{zz}	Tröghetsmoment tråd I_{yy}, I_{zz}
Mizuno tech (5,3g)	$2,37 \times 10^{-6}$	$2,60 \times 10^{-6}$
Wilson	$2,91 \times 10^{-6}$	$2,63 \times 10^{-6}$
Mizuno tech (5,1g)	$2,52 \times 10^{-6}$	$2,82 \times 10^{-6}$
Yonex tournament	$2,66 \times 10^{-6}$	$2,97 \times 10^{-6}$

Eftersom resultaten från CAD och trådexperimentet skiljde sig åt behövdes slutsatser kring huruvida vilken metod som skulle nyttjas dras på annat sätt. De felkällor som tidigare diskuterats var liknande i båda fallen då de i synnerhet kopplades till mätningen av diverse mått men även utrustningens felmarginaler.

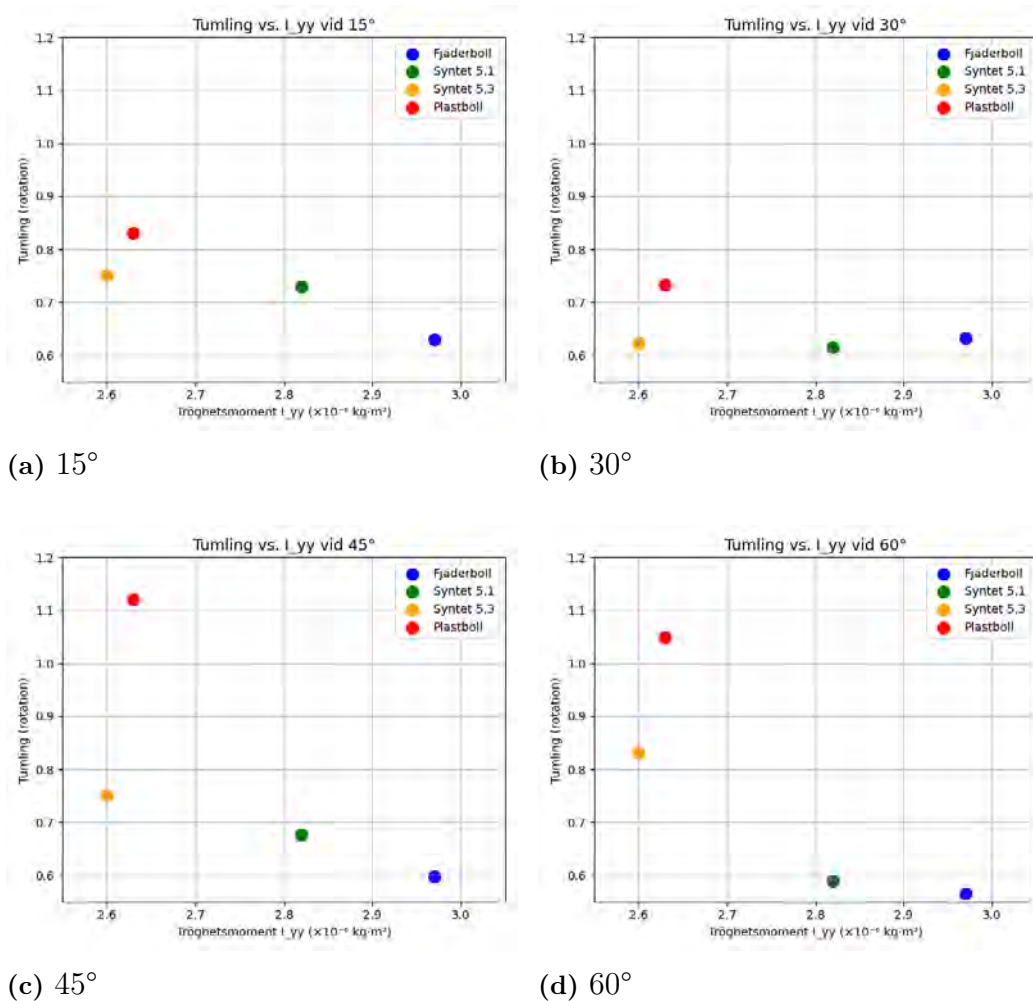
I experimentet med den enklare geometrin (se figur 3.13) visades en hög noggrannhet jämfört med det förväntade tröghetsmomentet. Detta blev ett kvantifierbart resultat på att metoden kunde anses trovärdig, något som saknades för CAD-beräkningarna. Detta betydde inte att beräkningarna från CAD:en ej var användbara, men tröghetsmomenten från tråd-experimentet blev de som nyttjades i övriga delprojekt och även i jämförelsen med tröghetsmomenten från Lin och Cooke.

Det kan vid jämförelse av trådexperimentets relation för tröghetsmomentet i I_{yy}, I_{zz} och Lin och Cookes erhållna tröghetsmoment, identifieras likheter (se figur 4.8). Fjädersnåren erhöll det högsta tröghetsmomentet i både trådexperimentet och i Lins studie. I Cookes fall erhöles ett liknande resultat vid jämförelse med Pro Cork

5. Diskussion

plastbollen.

Resultatet visar även att den lättare av de två syntetbollarna har ett tröghetsmoment mer likt fjäderbollens. Detta tycks även leda till ett flygbeteende mer likt fjäderbollens, där den roterar mindre än den tyngre syntetbollen. Detta blir tydligt i figur 5.1, där ett högre tröghetsmoment i I_{yy}, I_{zz} , visar på mindre tumling. Graferna är en sammanställning från mängdtesterna där tumling i detta fall avser rotationen från det att bollen släpps från rigg-anordningen, tills dess att den roterar tillbaka. Träffen vid varje slag blir således en stor faktor till resultatet, ty ett medelvärde för 10 slag nyttjades.

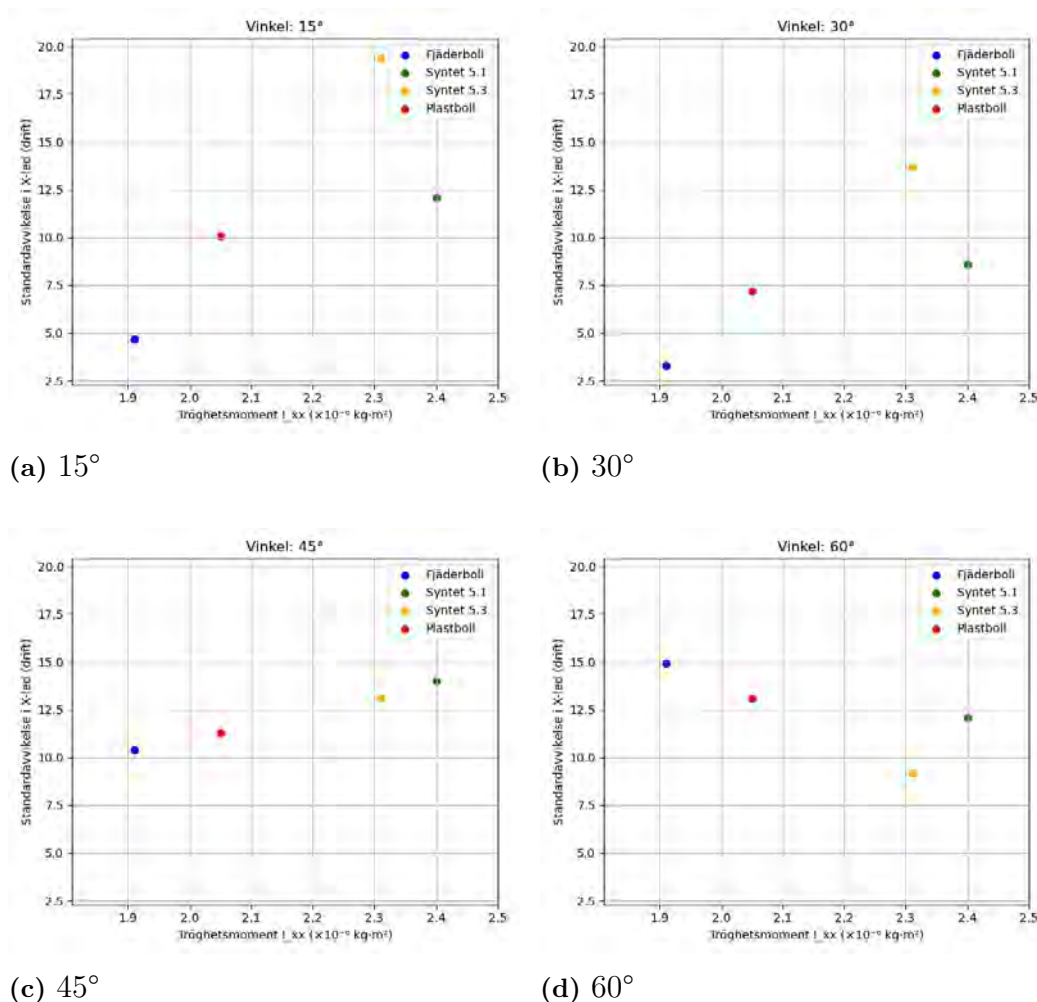


Figur 5.1: Jämförelse mellan tröghetsmoment I_{yy}, I_{zz} och tumling för samtliga bollar. Tumling är i detta fallet ett genomsnitt från mängdtesterna, där tumlingen är hur mycket bollen roterar från utgångsläget, tills dess att den vänder tillbaka.

För tröghetsmomentet I_{xx} visade experimentet att fjäderbollen hade det lägsta. Syntetbollarna hade ett betydligt högre tröghetsmoment, i jämförelse med Lin var detta oväntat, där fjäderbollen hade det högsta tröghetsmomentet.

Vid jämförelse mellan tröghetsmomentet och avvikelse i sidled, tycks det finnas

ett samband. Ett högre tröghetsmoment tycks leda till en mindre träffsäker boll, åtminstone för mindre vinklar på racket. Vid högre vinklar flyger bollarna längre och den generella träffsäkerheten blir då sämre. Detta kan dock bero på felträffarna vid 60° som diskuterades i avsnitt 5.1.1.



Figur 5.2: Jämförelse mellan tröghetsmoment I_{xx} och drift för samtliga bollar. Där driften är ett genomsnitt på standardavvikelsen för drift i sidled från mängdtesterna.

5.4 6-DOF beräkningar

6-DOF graferna skapades för att få förståelse för hur bollarna skiljde sig i rotation, sidoavvikelse och flyglängd. De framtagna resultaten skiljde sig vid jämförelse med det som observerats vid filmning av bollbanor samt mängdtestet. Koden som nyttjades tar ej hänsyn till geometriska skillnader mellan bollarna utöver massa och kjolradie. Vid simuleringarna nyttjades även samma aerodynamiska koefficienter för samtliga bollar, vilket blir en förenkling av verkligheten. Därmed blir de resulterande graferna mer en indikation på hur samma bolls rörelse skiljde sig om tröghetsmomentet ändras.

Från graferna fås resultatet att pitch- rotationen minskar med ett minskat I_{yy}, I_{zz} . Detta motsäger de tidigare erhållna resultaten från de digitaliserade bilderna. Detta tyder på att förenklingen av geometri och aerodynamiska koefficienter blev för stor och teorin om att dessa spelar en stor roll i bollarnas flygbeteende förstärks.

I jämförelse med 6-DOF och mängdtesterna så stämmer de bra överens framförallt när racket var inställt på 15 deg vid högre grader ses lite mer skillnader framförallt mellan plast och resterande. Enligt 6-DOF vid de högre graderna har plastbollen tydligt mer drift och flyger längre medan det är tvärt om i mängdtestet. Återigen kan detta vara ett resultat av att geometri och aerodynamiska egenskaper inte tas hänsyn till i 6-DOF simuleringarna.

Detta blir även en förklaring till att graferna för plast- och syntetbollarna roterar klart mindre i 6-DOF simulationen jämfört med vad vi kunde se vid filmningen av bollbanorna.

Tabell 5.7: Felkällor för 6-DOF simuleringarna

Felkälla:	Konsekvens:
Endast fjäderbollens geometri	Blir svår att jämföra med andra tester
Tröghetsmomentets felkällor	Fel värden på parametrarna
Mätfel	Parametrarna blir inte exakta

Om man vill generera grafer som kan jämföras med filmerna och mängdtesterna skulle man behöva beräkna de nödvändiga parametrarna för att ändra geometri och aerodynamiska egenskaper i koden. Detta skulle kunna göras med hjälp av ett CFD-program där man kontrollerat och reproducerbart kan simulera flödesförhållanden.

6

Slutsats

Syftet med detta arbete var att redogöra för de aerodynamiska och ballistiska skillnaderna mellan plast-, syntet- och fjäderbollar samt till att ge en grund för vidare utveckling av plast- och syntetbollar för att bättre efterlikna fjäderbollars flygbeteende.

Genom en kombination av experimentella metoder och analytiska beräkningar har badmintonbollar av olika modeller undersökts, inklusive plast, syntet och fjäderbollar. Ett flertal parametrar som påverkar bollarnas egenskaper har analyserats för att identifiera samband som kan förklara hur dessa egenskaper påverkar flygbeteendet.

Från analysen av alla resultat kan två möjliga samband dras mellan en badmintonbolls utformning och dess flygbeteende. Det första är att tröghetsmomentet i X-axeln (roll axis) har ett samband med bollens drift (sidoavvikelse). Specifikt observerades att ett större tröghetsmoment i X, leder till större spridning i sidled. Detta bekräftades genom analys av standardavvikelsen för sidoavvikelsen för olika bollar vid mängdtester. Vidare konstaterades att ett större tröghetsmoment i Y resulterar i mindre tumling. Tumling definierades i detta arbete som den initiala rotationen i pitch axeln innan bollen stabiliseras i sin flygbana.

Dessa samband erbjuder en potentiell förklaring till hur tröghetsmoment påverkar flygbeteendet hos badmintonbollar. Det rekommenderas däremot att sambanden undersöks vidare i framtida studier för att bekräfta eller förkasta dem. Projektets avgränsning till fyra olika bollar samt det begränsade antalet tester innebär att resultaten måste tolkas med försiktighet. Det är möjligt att de observerade sambanden är specifika för de utvalda modellerna och testförhållandena. För att säkerställa resultatens generaliserbarhet och trovärdighet krävs ett större urval av bolltyper och omfattande upprepade tester under varierande förhållanden.

Trots att tröghetsmomenten visade på tydliga effekter är de sannolikt inte de enda faktorerna som styr bollens flygegenskaper. Resultaten indikerar att det finns mer att upptäcka, särskilt hur de aerodynamiska egenskaperna och bollens geometri påverkar. Detta undersöktes till viss mån i detta arbete, men inte tillräckligt djupgående för att kunna dra tydliga slutsatser. Istället kan detta vara en bas för framtida studier där mer kraft läggs på CFD-simuleringar och andra metoder för att undersöka aerodynamiken.

En annan viktig slutsats från detta arbete är hur en standardiserad testmetod för badmintonbollar skulle vara möjlig. Istället för att fastställa gränsvärden för enskilda parametrar, såsom tröghetsmomentet eller kjolradie, föreslås att en testmetod utformas där bollarnas faktiska flygbeteende utvärderas genom mängdtester. En sådan metod skulle baseras på mätningar av exempelvis standardavvikelse för sidoavvikelse, räckvidd och tumling. Detta skulle möjliggöra en mer direkt och praktiskt tillämpbar bedömning av bollarnas kvalitet och prestanda.

Sammanfattningsvis har detta arbete bidragit till en ökad förståelse för hur olika egenskaper hos badmintonbollar påverkar deras flygbeteende. Resultaten och de observerade sambanden utgör en grund för vidare studier och förbättring av testmetoder för att säkerställa enhetliga och högkvalitativa badmintonbollar på marknaden.

Litteraturförteckning

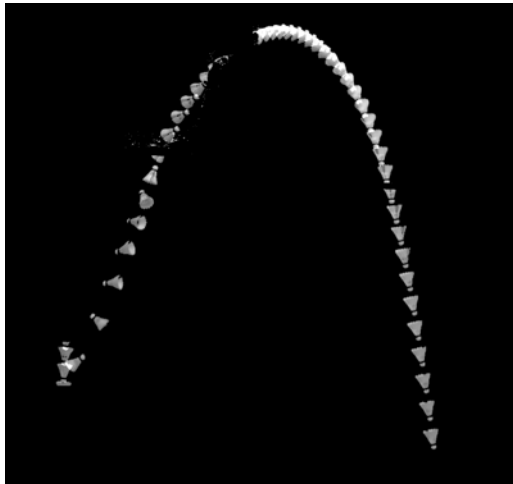
- [1] Auawise. (2024). *Yaw Axis Corrected.svg* [Photografi]. Wikipedia. https://en.wikipedia.org/wiki/Aircraft_principal_axes#/media/File:Yaw_Axis_Corrected.svg
- [2] Badmintonshoppen. (2025). *Yonex Badmintonbollar*. <https://badmintonshoppen.se/kategori/bollar/yonex-bollar/>
- [3] Chalmers. (2025). *Genomföra kandidatarbete* <https://www.chalmers.se/utbildning/dina-studier/kandidat-och-examensarbete/kandidatarbete/genomfora-kandidatarbete/#samhalleliga-och-etiska-aspekter>
- [4] Cooke, A.J. (1992). *The aerodynamics and mechanics of shuttlecocks*.
- [5] Lefevre, L. (2024). *Advanced Ballistic Analysis and Modeling of Badminton Shuttlecock Trajectories* [Opublicerad praktikrapport]. Chalmers Tekniska Högskola
- [6] Lewis, R.E. (u.å.). *Steps to identify outliers using standard deviation*. Study.com. <https://study.com/skill/learn/determining-outliers-using-standard-deviation-explanation.html>
- [7] Lin, Calvin Shenghuai. *Understanding and Evaluation of Badminton Shuttlecocks through Flight Dynamics and Experimental Approach*. 2015. Thesis. dr.ntu.edu.sg, <https://doi.org/10.32657/10356/65286>
- [8] Lunds Tekniska Högskola. (u.å.). *Formelsamling*. <https://www.mek.lth.se/fileadmin/mek/Education/FMEA05oFMEA15/formelsamling.pdf>
- [9] MacCoy, Robert. *Modern Exterior Ballistics: The Launch and Flight Dynamics of Symmetric Projectiles*. Schiffer Military History, 1999.
- [10] TT. (2005, 7 december). *Fågelinfluensan slår mot badminton*. Svenska Dagbladet. <https://www.svd.se/a/dad08ecc-78f7-396f-88e2-9f5bb3ae477a/fagelinfluensan-slar-mot-badminton>

- [11] Verma, Aekaansh, m.fl. *Aerodynamics of Badminton Shuttlecocks*. Journal of Fluids and Structures, vol. 41, augusti 2013, s. 89–98. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2013.01.009>
- [12] Vårvinden. (u.å.). *Badminton – fakta*. <https://www.varvinden.com/Traning/badminton-fakta>
- [13] Warnström, K. (2020, 26 augusti). *Bollkontroll – Bakom kulisserna i bollfabriken*. MATCHi. <https://playmore.matchi.com/sv/matchi-insights/bollkontroll-bakom-kulisserna-i-bollfabriken>
- [14] Wikipedia. (2025, 9 februari). *Tröghetsmoment*. <https://sv.wikipedia.org/wiki/Tr%C3%B6ghetsmoment>

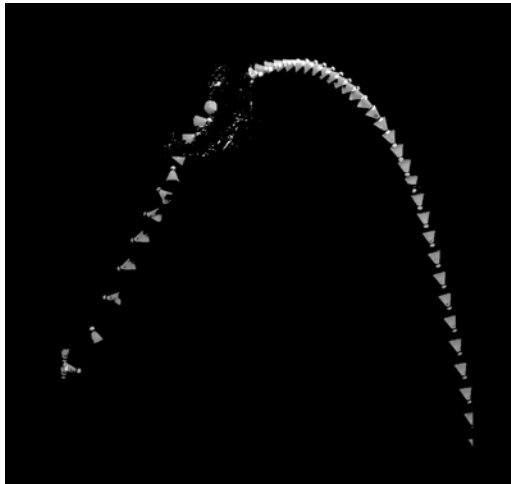
A

Appendix 1

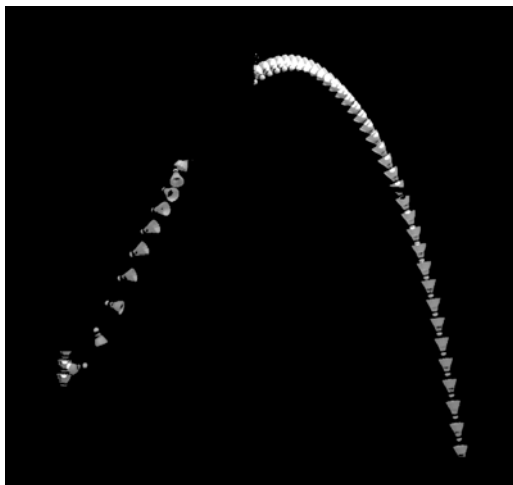
A.1 Digitalisering bilder



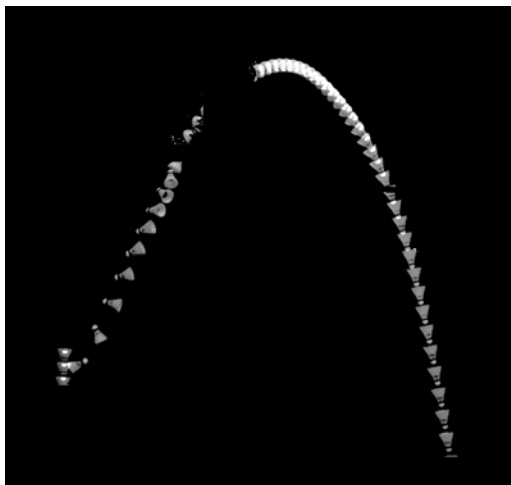
(a) Fjäderboll



(b) Plastboll

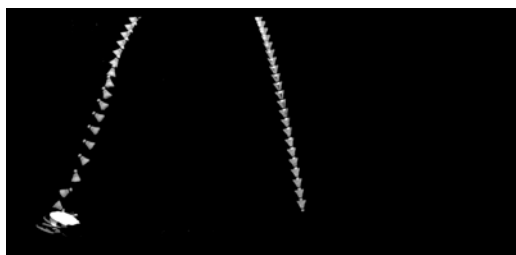


(c) Syntetboll 5,1g

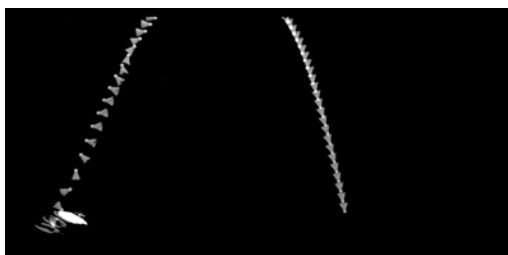


(d) Syntetboll 5,3g

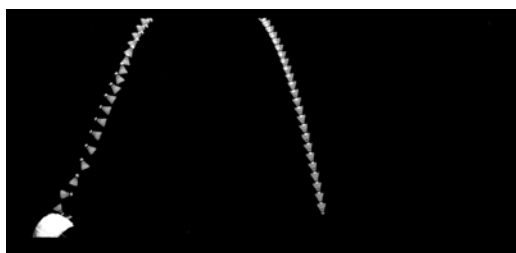
Figur A.1: Tumling för de 4 bollarna, 15 grader



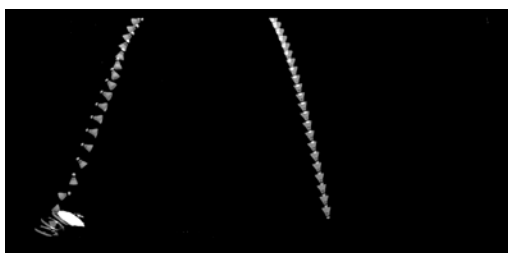
(a) Fjäderboll



(b) Plastboll

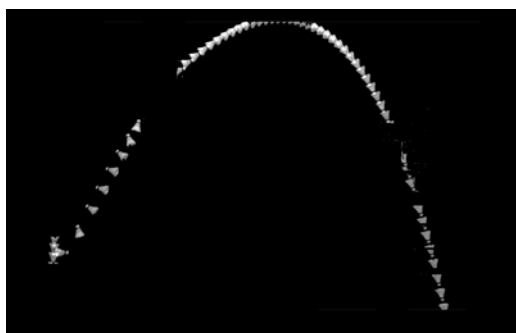


(c) Syntetboll 5,1g

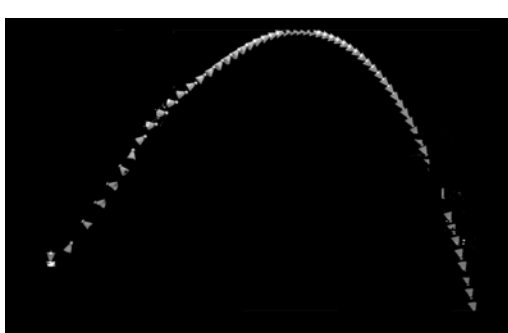


(d) Syntetboll 5,3g

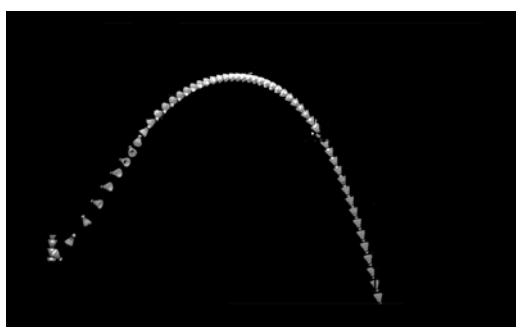
Figur A.2: Tumling för de 4 bollarna, 22.5 grader



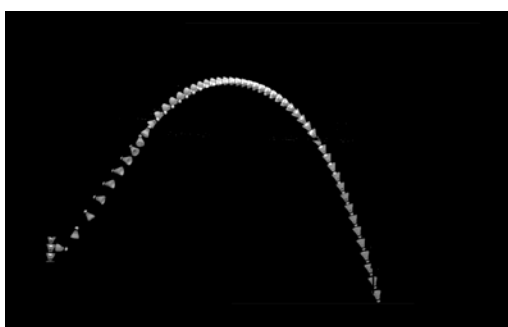
(a) Fjäderboll



(b) Plastboll

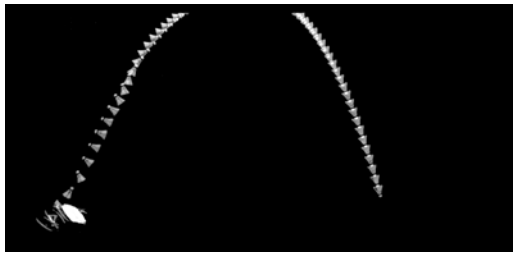


(c) Syntetboll 5,1g

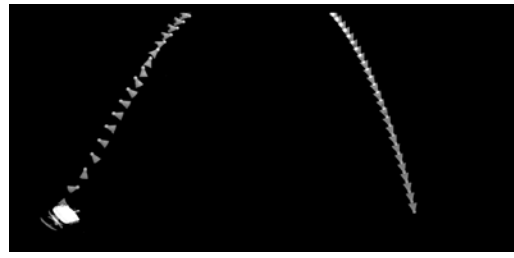


(d) Syntetboll 5,3g

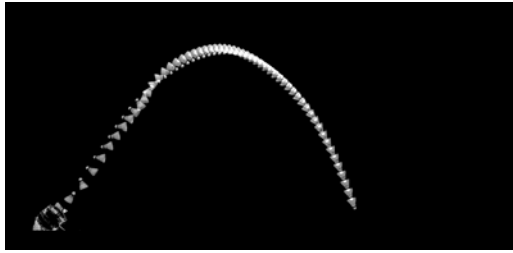
Figur A.3: Tumling för de 4 bollarna, 30 grader



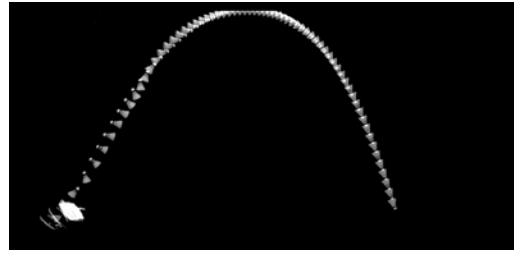
(a) Fjäderboll



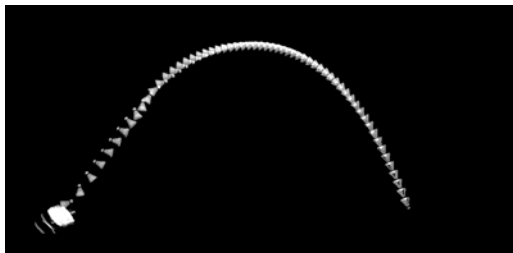
(b) Plastboll



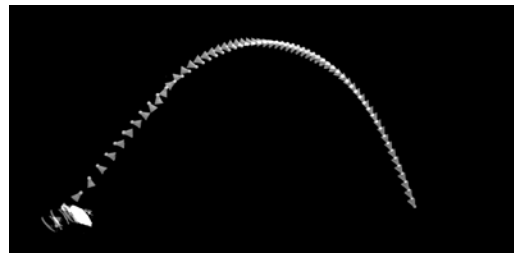
(c) Syntetboll 5,1g



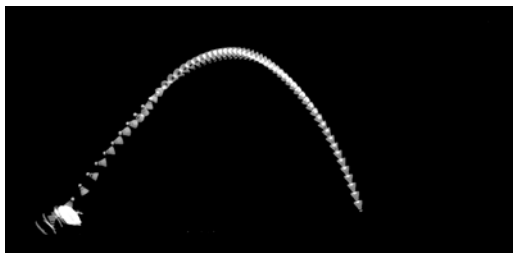
(d) Syntetboll 5,3g

Figur A.4: Tumling för de 4 bollarna, 37.5 grader

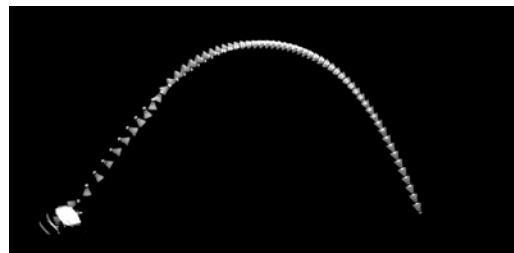
(a) Fjäderboll



(b) Plastboll

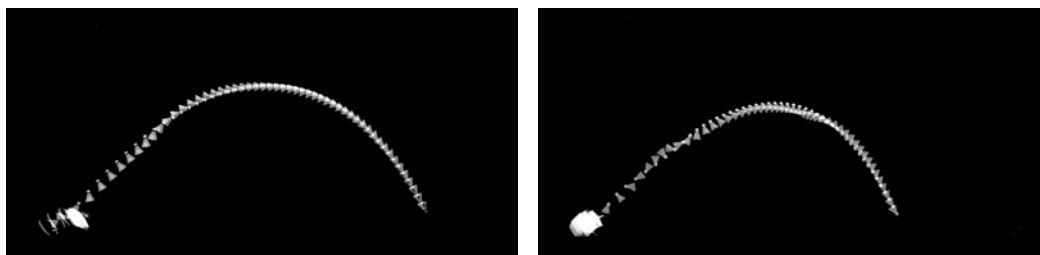


(c) Syntetboll 5,1g



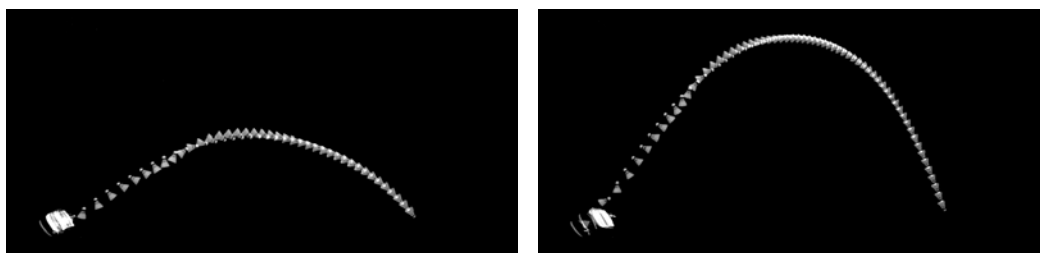
(d) Syntetboll 5,3g

Figur A.5: Tumling för de 4 bollarna, 45 grader



(a) Fjäderboll

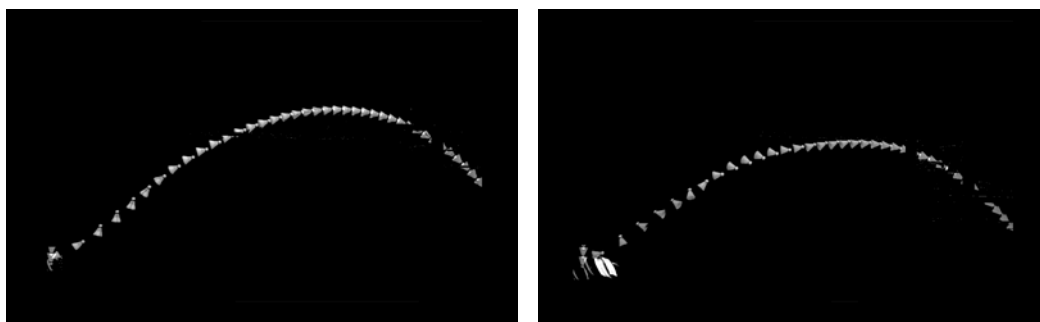
(b) Plastboll



(c) Syntetboll 5,1g

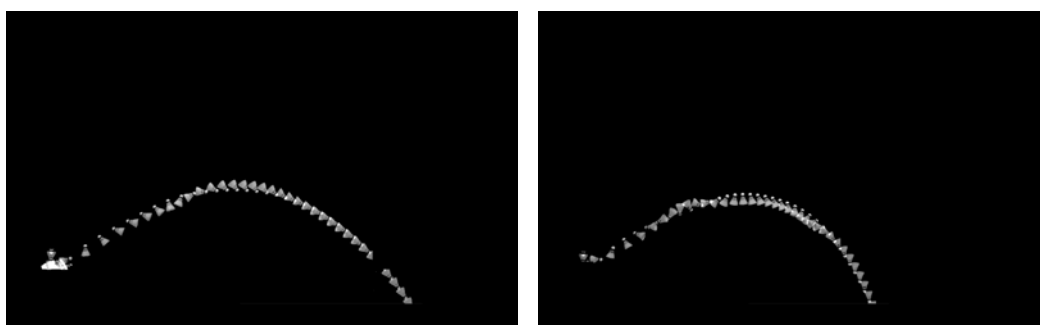
(d) Syntetboll 5,3g

Figur A.6: Tumling för de 4 bollarna, 52.5 grader



(a) Fjäderboll

(b) Plastboll



(c) Syntetboll 5,1g

(d) Syntetboll 5,3g

Figur A.7: Tumling för de 4 bollarna, 60 grader

A.2 Resultat mängdtestet

Här presenteras resultatet från mängdtestet där alla mått och rotationer visas i tabeller.

Fjäderboll 15 grader										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Y-led	-32	-15	-27	-23	-22	-18	-20	-25	-26	-22
X-led	16	-12	9	14	12	0	5	5	9	8
varv (tumling)		0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7

Fjäderboll 30 grader										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Y-led	60	73	53	31	72	82	48	47	83	70
X-led	17	8	9	8	6	-12	-3	7	11	10
varv (tumling)	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62	0,75	0,62	0,62

Fjäderboll 45 grader										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Y-led	130	119	121	118	113	81	99	114	101	112
X-led	27	31	26	14	25	11	36	10	17	3
varv (tumling)	0,62	0,62	0,7	0,62	0,7	0,62		0,7	0,7	0,7

Figur A.8: Fjäderbollens resultat på mängdskjutningen

Syntet 5,1 15 grader										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Y-led	10	-12	-7	-3	-22	-2	11	-44	-18	2
X-led	-7	25	-10	-1	24	-11	-9	0	1	-4
varv (tumling)	0,7	0,75	0,7	0,7	0,75	0,7	0,75	0,75	0,75	0,75

Syntet 5,1 30 grader										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Y-led	35	89	75	77	65	66	28	59	67	57
X-led	-5	19	0	8	-4	20	13	3	-4	-2
varv (tumling)		0,75	0,7	0,62	0,7	0,7	0,62	0,7	0,62	0,75

Syntet 5,1 45 grader										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Y-led	166	106	111	66	89	115	98	176	85	183
X-led	14	42	17	3	15	2	-3	4	31	21
varv (tumling)	0,5	0,75	0,75	0,62	0,82	0,75	0,75	0,5	0,82	0,5

Figur A.9: Syntetbollens 5,1g resultat på mängdskjutningen

Syntet 5,3 15 grader										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Y-led	6	-71	0	-32	7	-9	-27	-14	-75	-8
X-led	-9	-2	16	5	7	5	-32	32	17	-14
varv (tumling)	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75

Syntet 5,3 30 grader										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Y-led	79	78	88	80	61	50	80	111	79	62
X-led	11	-8	7	23	0	0	-13	-3	18	-19
varv (tumling)	0,75	0,75	0,62	0,62	0,75	0,75	0,62	0,75	0,62	

Syntet 5,3 45 grader										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Y-led	140	95	92	101	106	38	95	146	96	149
X-led	9	4	1	11	6	7	-5	-2	38	13
varv (tumling)	0,75	0,75	0,75	0,75	1	1	1	0,75	0,75	

Figur A.10: Syntetbollens 5,3g resultat på mängdskjutningen

Plastboll 15 grader										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Y-led	-22	-53	-45	-48	-22	-18	-19	-55	-27	-7
X-led	9	-11	21	-5	21	5	-3	20	10	6
varv (tumling)	0,87	0,87 (mycket rot)	0,87	0,87	0,75	0,8	0,8	0,87	0,8	0,8

Plastboll 30 grader										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Y-led	20	65	96	56	54	47	97	81	65	94
X-led	13	14	6	10	8	7	15	25	5	0
varv (tumling)	0,75	0,62	0,75	0,75	0,75	0,8	0,7	0,75	0,75	0,7

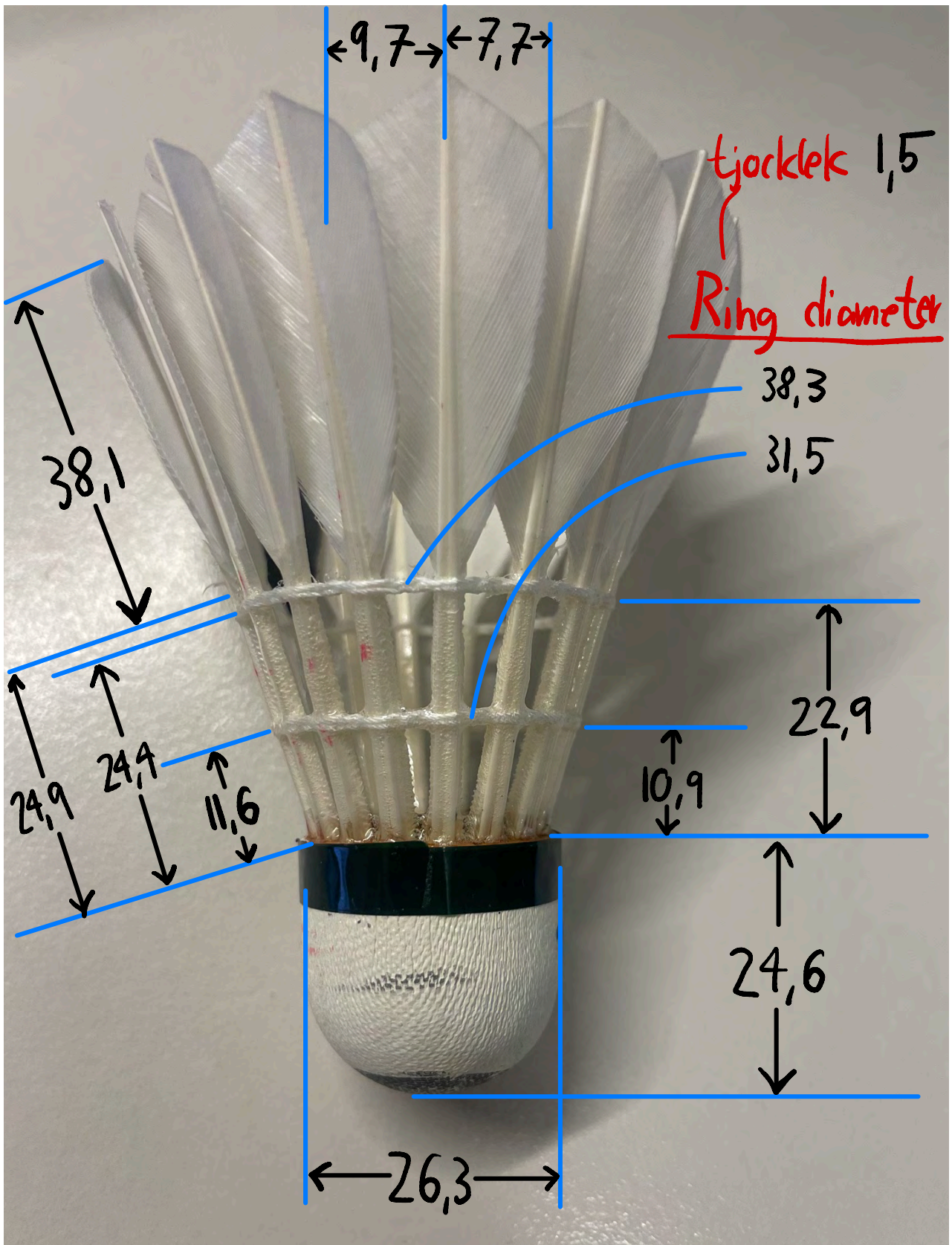
Plastboll 45 grader										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Y-led	102	121	89	125	118	110	88	117	80	121
X-led	23	2	13	3	2	4	4	-17	10	0
varv (tumling)	1,75		0,8	0,8	0,8	1,5	0,8	1,5	1,75	1,5

Figur A.11: Plastbollens resultat på mängdskjutningen

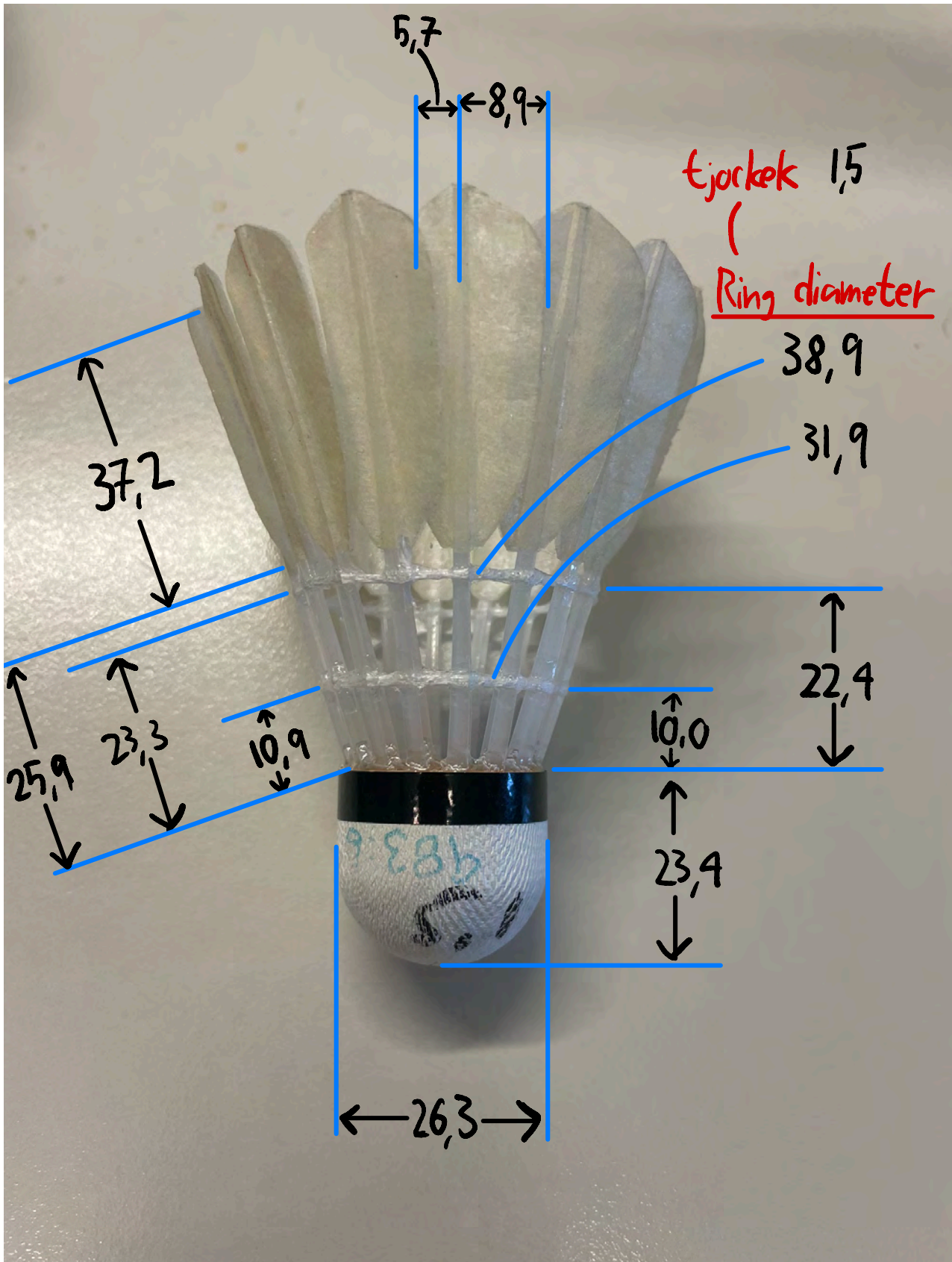
A.3 Mått badmintonbollar

Här visas måtten på badmintonbollarna uppmätta med ett skjutmått.

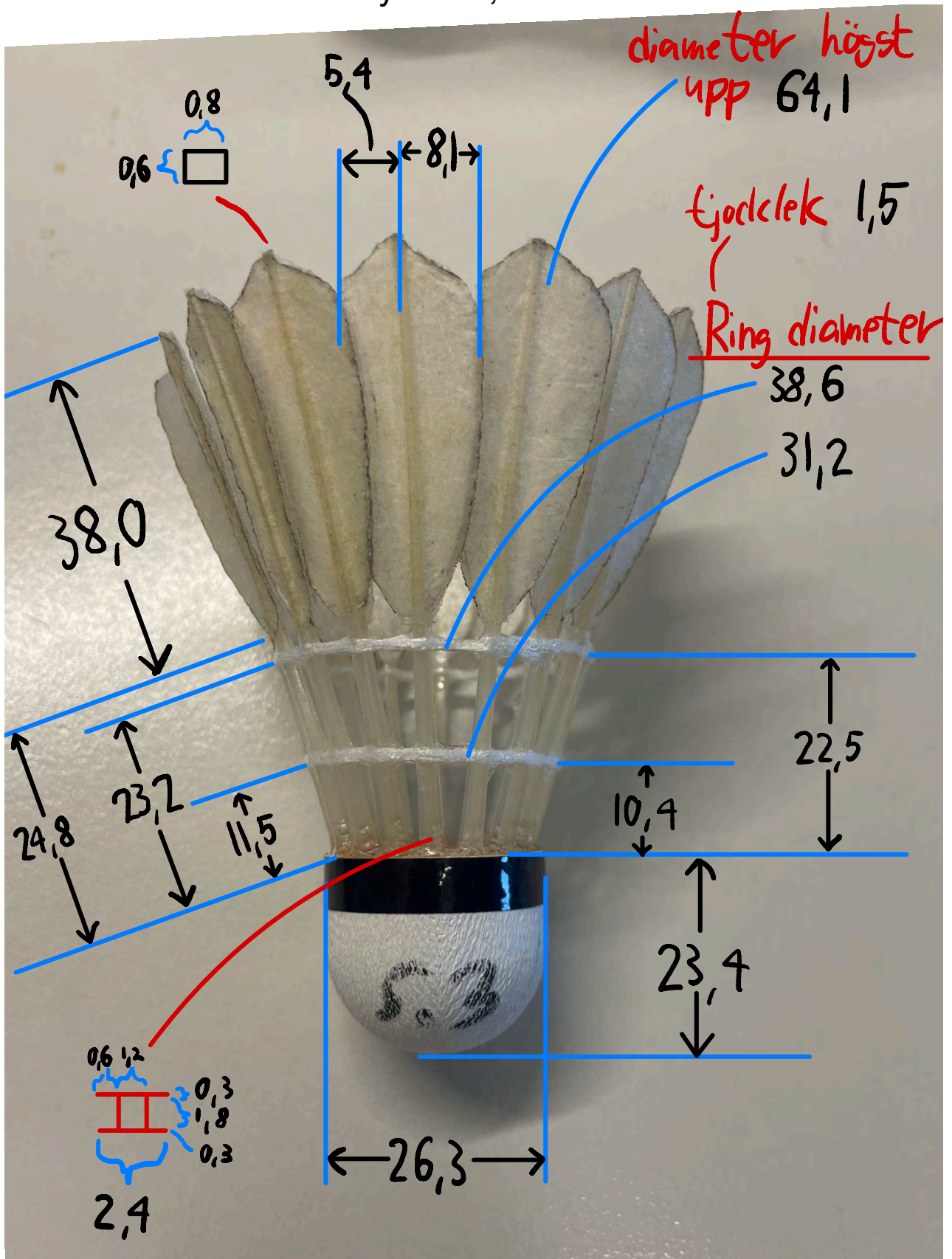
Fjäder



Syntet 5,1



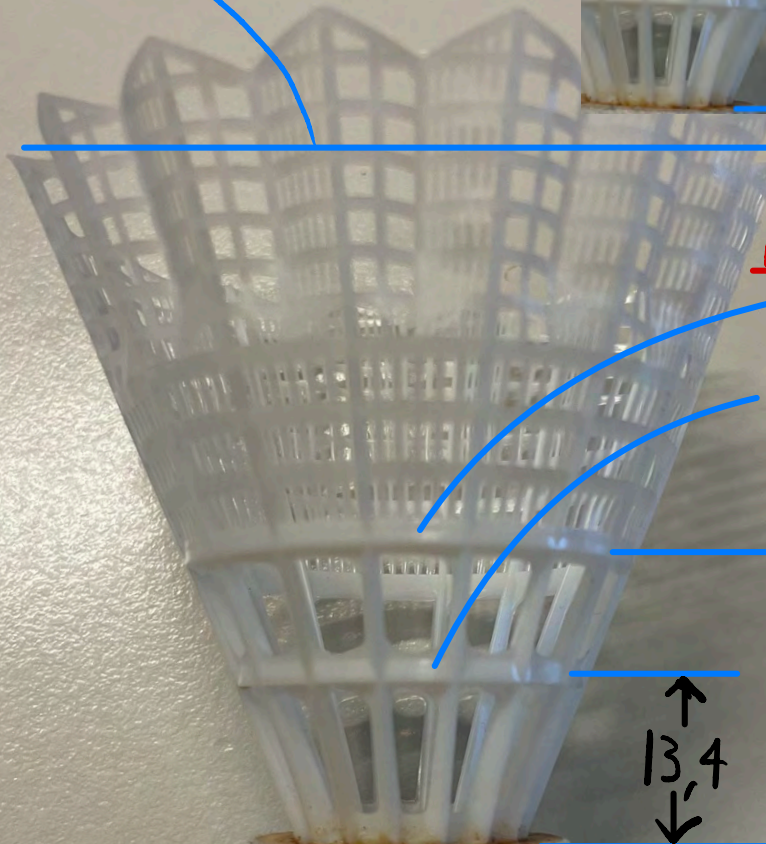
Syntet 5,3



Plast

diameter högst upp
65,3

→
nästa
sida



Ring diameter

38,4

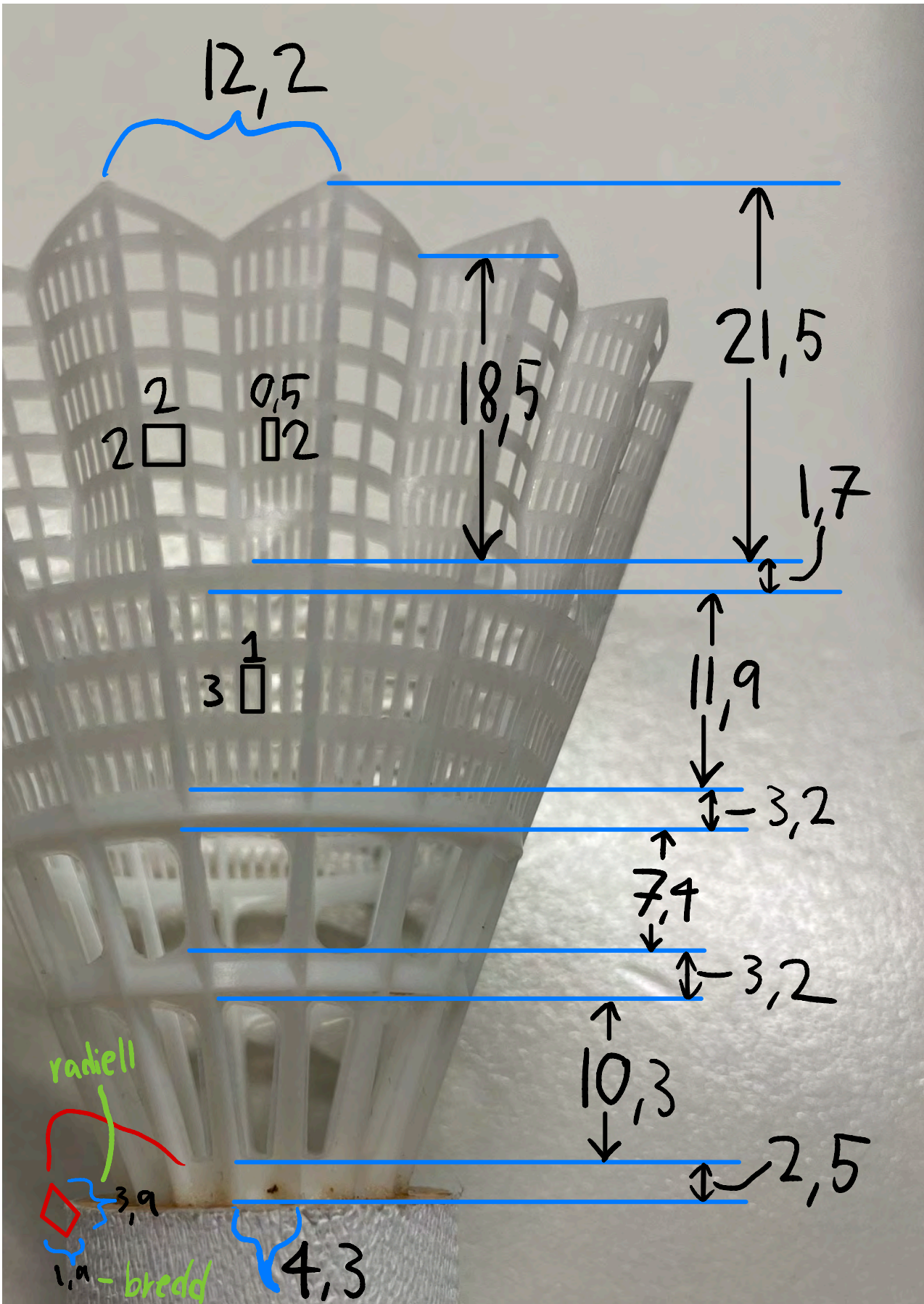
30,3

↑
23,2
↓

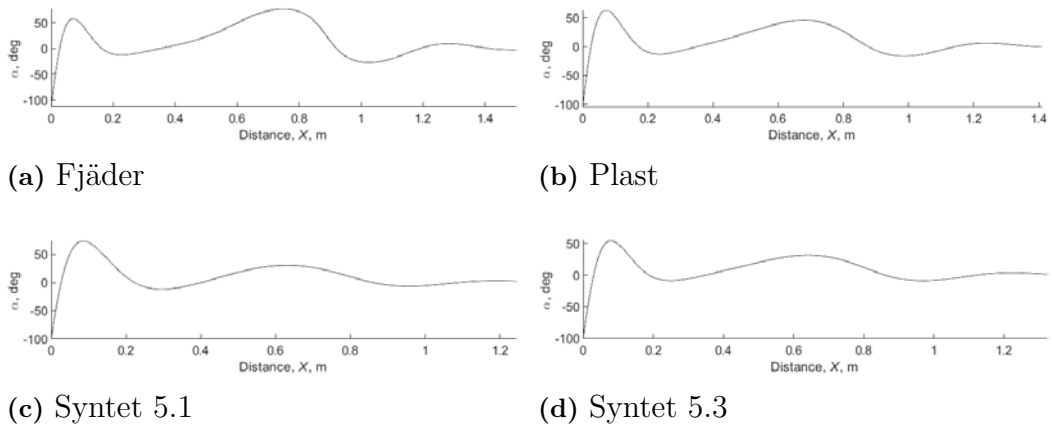
↑
13,4
↓

↑
22,9
↓

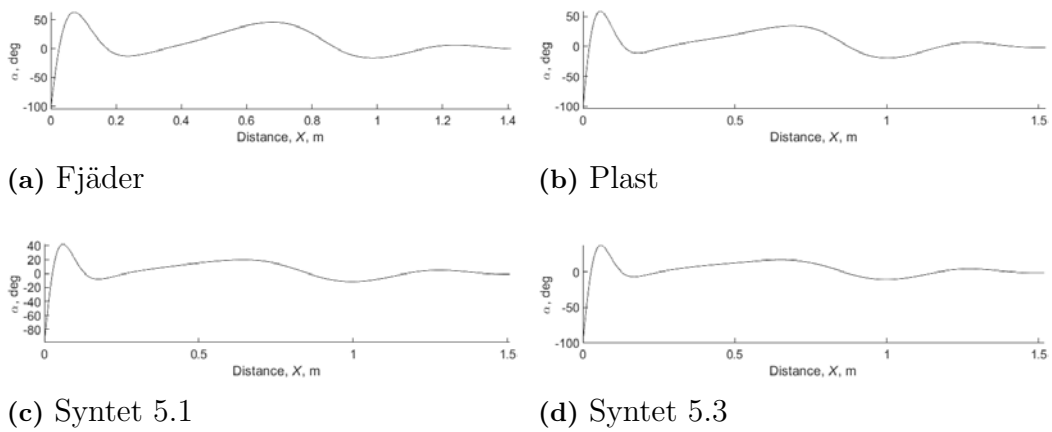
← 26,3 →



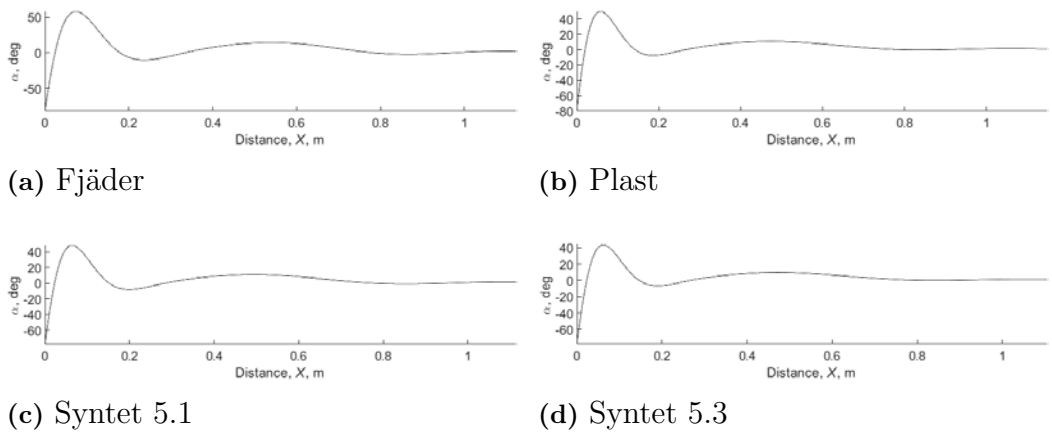
A.4 6-DOF grafer pitch



Figur A.12: Pitch för bollarna vid 15°slag

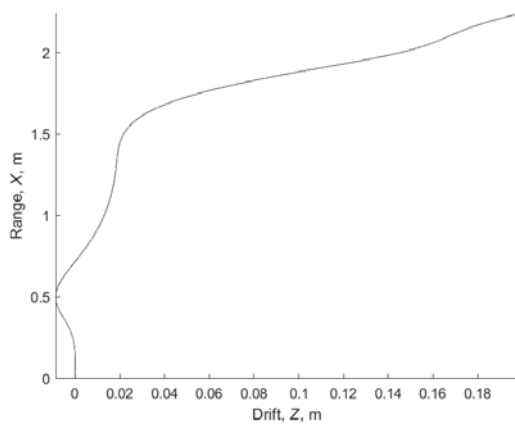


Figur A.13: Pitch för bollarna vid 30°slag

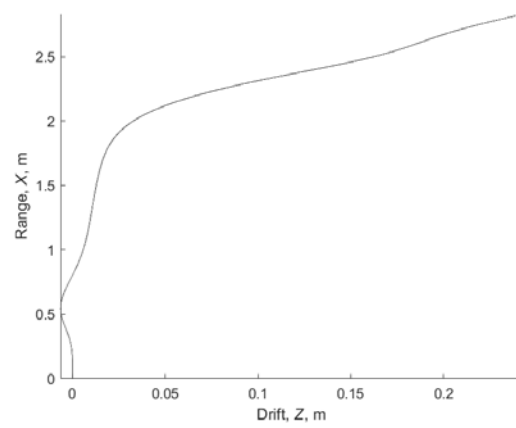


Figur A.14: Pitch för bollarna vid 60°slag

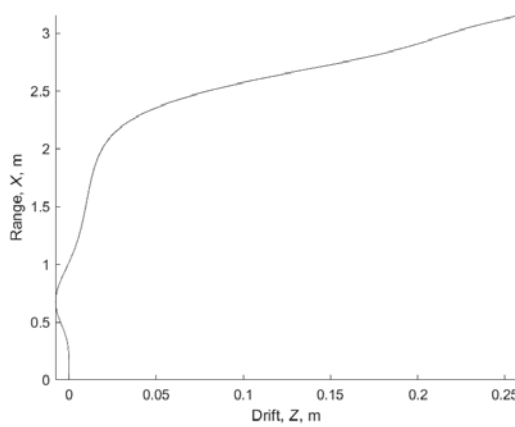
A.5 6-DOF grafer drift



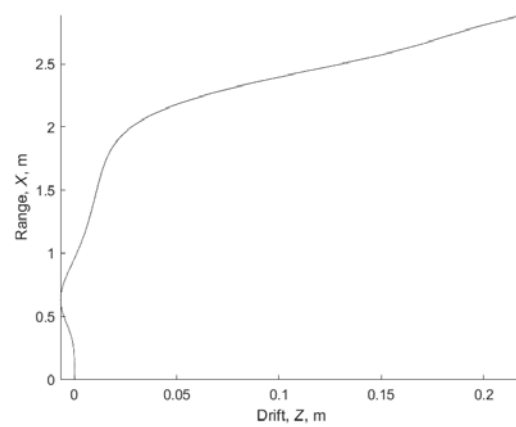
(a) Fjäder



(b) Plast

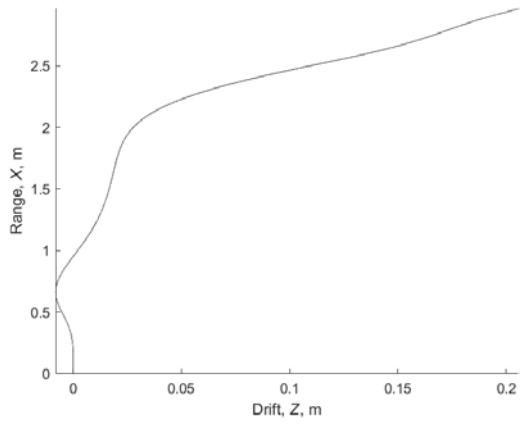


(c) Syntet 5.1

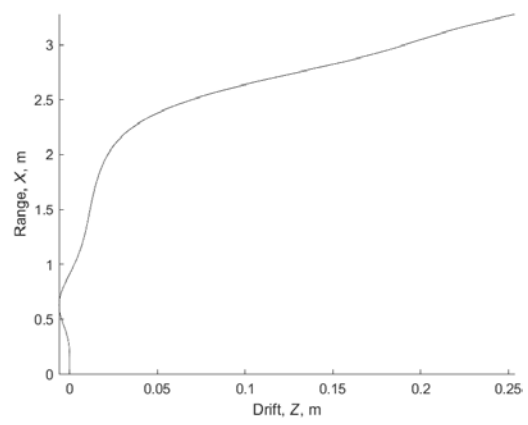


(d) Syntet 5.3

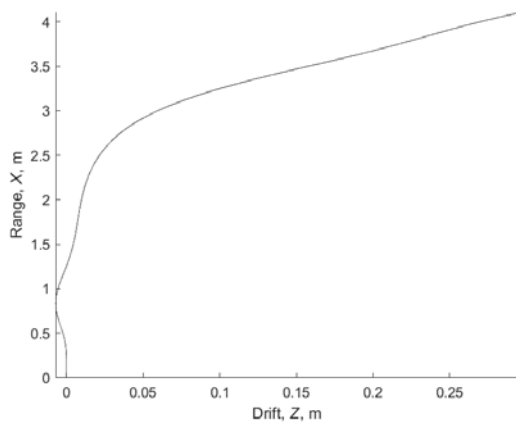
Figur A.15: Sidoavvikelse för alla bollar vid 15°slag



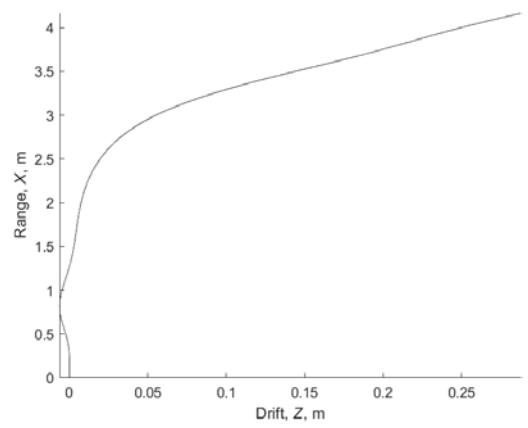
(a) Fjäder



(b) Plast

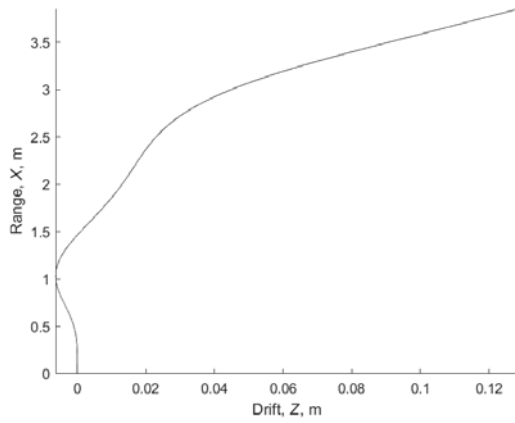


(c) Syntet 5.1

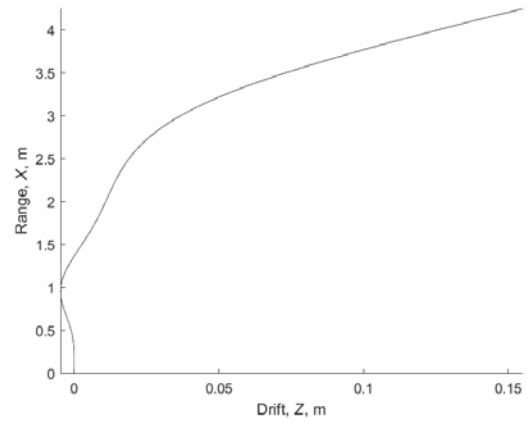


(d) Syntet 5.3

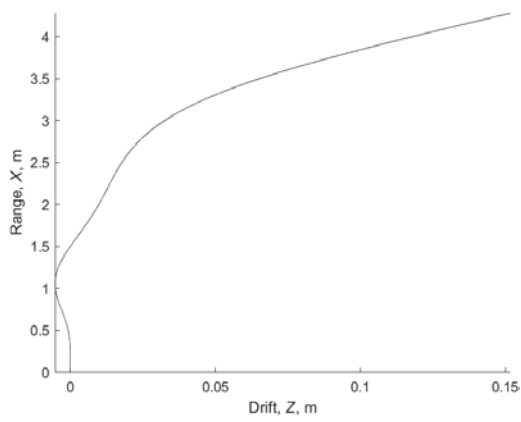
Figur A.16: Sidoavvikelse för alla bollar vid 30°slag



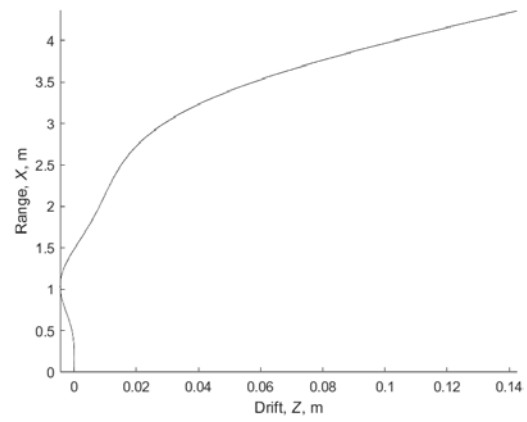
(a) Fjäder



(b) Plast



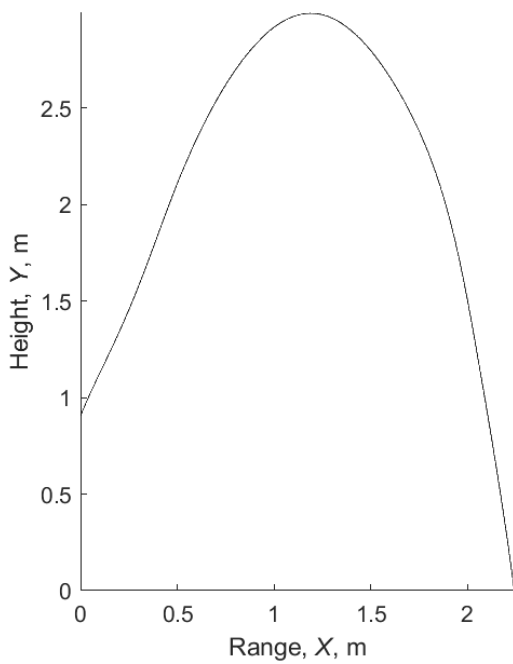
(c) Syntet 5.1



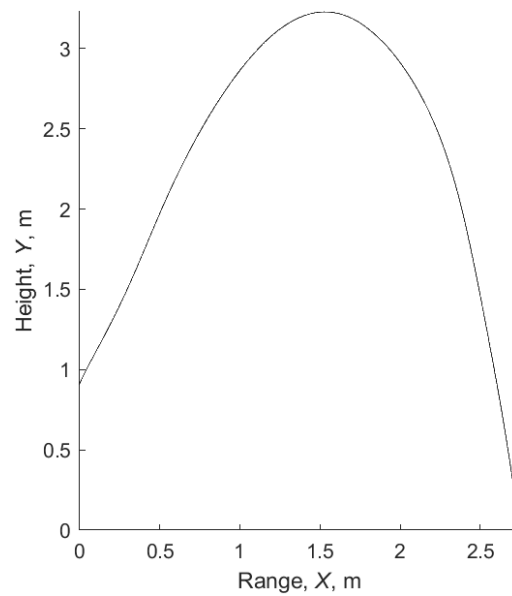
(d) Syntet 5.3

Figur A.17: Sidoavvikelse för alla bollar vid 60°slag

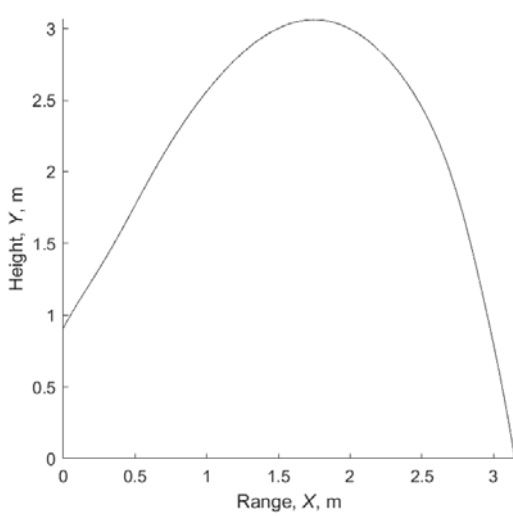
A.6 6-DOF grafer range/height



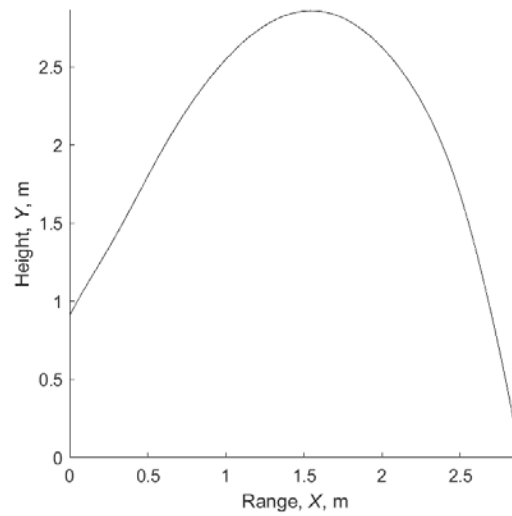
(a) Fjäder



(b) Plast

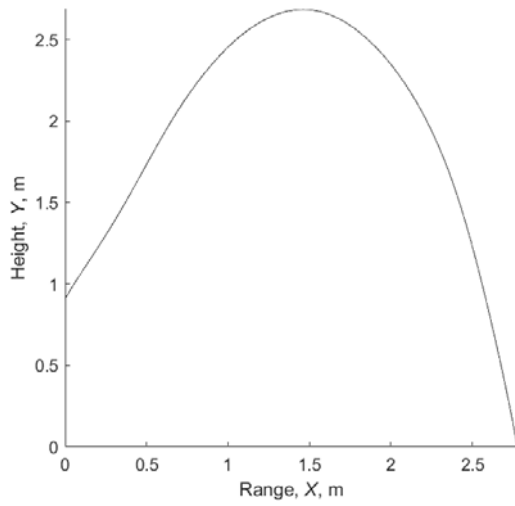


(c) Syntet 5.1

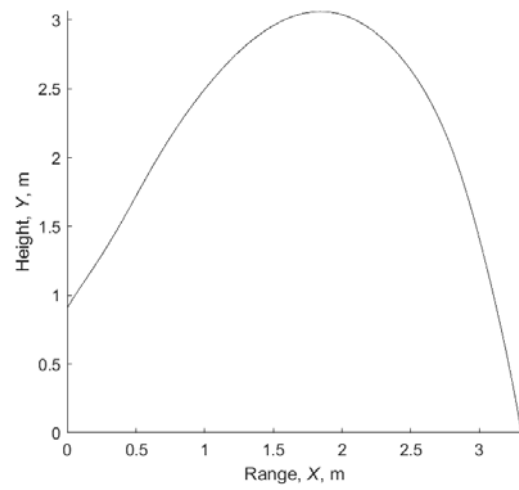


(d) Syntet 5.3

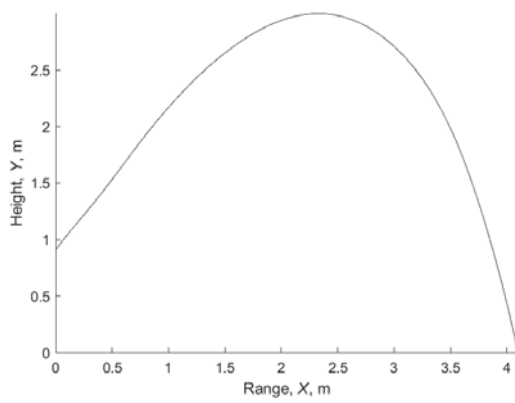
Figure A.18: Range for all balls at 15° swing



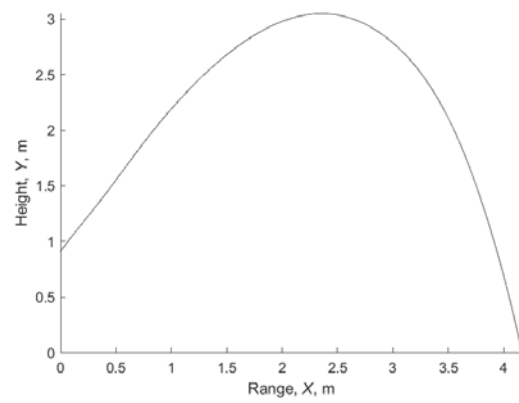
(a) Fjäder



(b) Plast

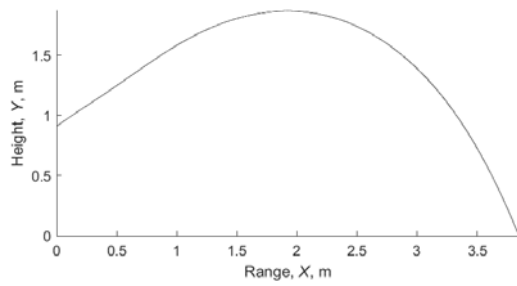


(c) Syntet 5.1

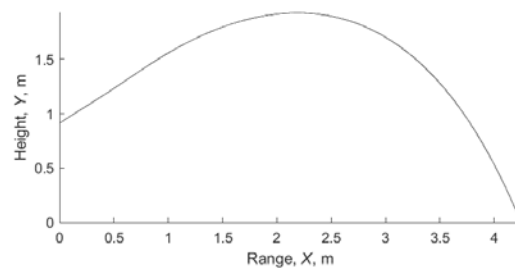


(d) Syntet 5.3

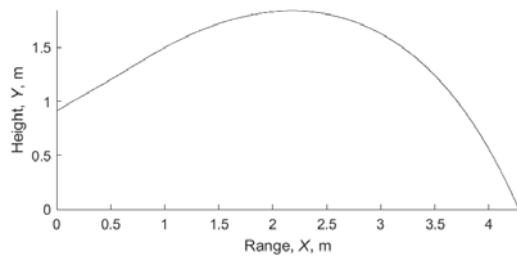
Figur A.19: Range för alla bollar vid 30°slag



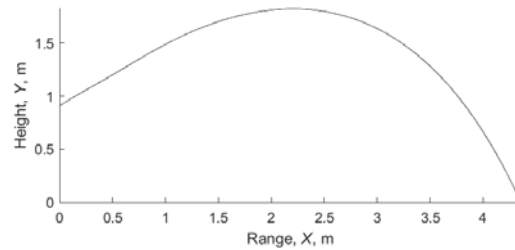
(a) Fjäder



(b) Plast



(c) Syntet 5.1



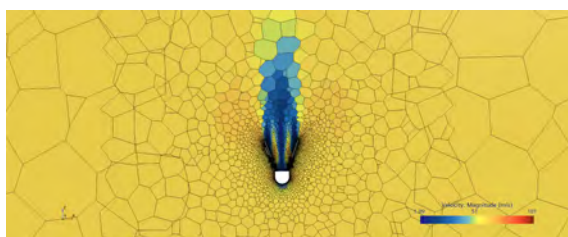
(d) Syntet 5.3

Figur A.20: Range för alla bollar vid 60°slag

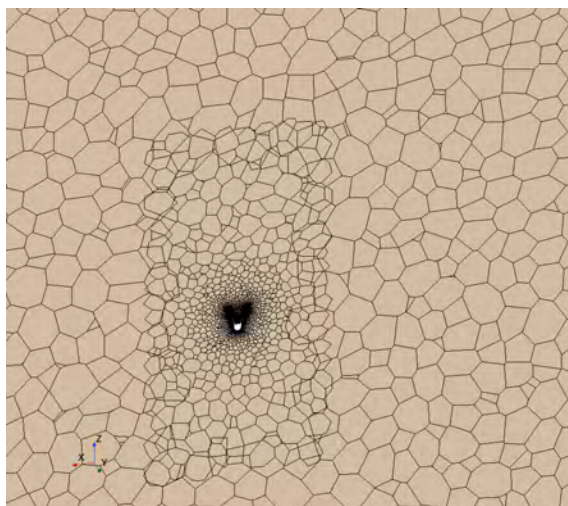
B

Appendix 2

B.1 Förslag på vidare forskning (CFD)



Figur B.1: Simulering för syntetboll 5.3 där hastighetsfältet över bollen visas. Från dessa simuleringar kan aerodynamiska koefficienter som exempelvis C_D erhållas.



Figur B.2: Mesh-scenen för syntetboll 5.3. Den rektangulära formen kring bollen rör sig över bollen, vilket simulerar bollens tänkta rörelse genom luften.

DEPARTMENT OF SOME SUBJECT OR TECHNOLOGY
CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY
Gothenburg, Sweden
www.chalmers.se



CHALMERS