



**CHALMERS**

# Mätsystem och analys för att bedöma åkteknik för längdskidåkare

Jakten på den perfekta diagonaltekniken

Kandidatarbete inom Elektroteknik

Simon Bruijn, Lucas Gustafsson, Elliot Husmark, Hanna Larsson,  
Gustav Nilsson, Linnea Sjödin

**INSTITUTIONEN FÖR ELEKTROTEKNIK**

---

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA  
Göteborg 2025  
[www.chalmers.se](http://www.chalmers.se)



# Mätsystem och analys för att bedöma åktechniker för längdskidåkare

Jakten på den perfekta diagonaltekniken

## Författare

Namn	CID
Simon Bruijn	nicolaas
Lucas Gustafsson	lucases
Elliot Husmark	husmarke
Hanna Larsson	hlarsson
Gustav Nilsson	gustanil
Linnea Sjödin	sjodinli

Handledare  
Jonas Fredrikson

Examinator  
Jonas Sjöberg

## Kandidatarbete

Inlämningsdatum: 13 maj 2025



**CHALMERS**  
UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Mätssystem och analys för att bedöma åkteknik för längdskidåkare  
Jakten på den perfekta diagonaltekniken

Simon Bruijn  
Lucas Gustafsson  
Elliot Husmark  
Hanna Larsson  
Gustav Nilsson  
Linnea Sjödin

Handledare: Jonas Fredriksson, System- och reglerteknik, Elektroteknik  
Examinator: Jonas Sjöberg, System- och reglerteknik, Elektroteknik Kandidatarbete 2025  
Institutionen för Elektroteknik  
Avdelningen för System- och reglerteknik  
Chalmers Tekniska Högskola  
SE-412 96 Göteborg  
Telefon +46 31 772 1000

Skriven i L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X  
Göteborg 2025

## **Abstract**

The thesis presents the development and evaluation of a prototype for measuring and assessing skiing technique in cross-country skiing. The aim was to explore how technological tools can support skiers in independently improving and developing their technique. The goal was to create a prototype that can collect data about the skier's technique and use this information to assess the quality of the technique and provide feedback. The prototype was built using three types of sensors: strain gauges, accelerometers, and a Time-of-Flight sensor. The strain gauges measured the pressure applied to the feet, the accelerometers recorded the movements of one ski and the upper body, and the Time-of-Flight sensor recorded the movements and passage of the legs. Tests were conducted on roller skis on a treadmill with various experienced cross-country skiers. The results showed that the prototype could distinguish differences between experienced and novice skiers based on the measured data describing their movement patterns. The original goal of a fully autonomous prototype was not fully achieved, but the project has made an important step forward in developing technological tools that can support skiers in their independent technical development.

This report is written in Swedish.

## Sammanfattning

Kandidatarbetet presenterar utvecklingen och utvärderingen av en prototyp för att mäta och bedöma åkteknik i längdskidåkning. Syftet var att undersöka hur tekniska hjälpmedel kan stödja skidåkare i att självständigt förbättra och utveckla sin teknik. Målet var att skapa en prototyp som kan samla in data om åkarens teknik och använda denna information för att bedöma teknikens kvalitet och ge feedback. Prototypen byggdes med hjälp av tre typer av sensorer, töjningsgivare, accelerometrar och en Time of Flight sensor. Töjningsgivarna mätte trycket som appliceras på fötterna, accelerometrarna registrerade rörelser i en skida och överkroppen, och Time of Flight sensorn registrerade benens rörelser och passage. Försök genomfördes på rullskidor på ett rullband med längdskidåkare med olika erfarenhet. Resultaten visade att prototypen kunde urskilja skillnader mellan erfarna och oerfarna skidåkare baserat på mätdata som beskrev deras rörelsemönster. Det ursprungliga målet om en helt självständig prototyp uppnåddes inte fullt ut, men projektet har gjort ett viktigt framsteg i utvecklingen av tekniska hjälpmedel som kan stödja skidåkare i deras självständiga teknikutveckling.

## **Förord**

Vi vill rikta ett varmt tack till alla som deltog i arbetets datainsamling. Tack vare er fick vi mätvärden från såväl elitåkare till personer som aldrig stått på ett par rullskidor innan.

Ett särskilt tack riktas även till Lars Nelson och Krister Åkärbjär för deras värdefulla insikter.

Slutligen vill vi tacka vår handledare Jonas Fredriksson, vars breda kunskap och stora entusiasm varit avgörande för projektet.

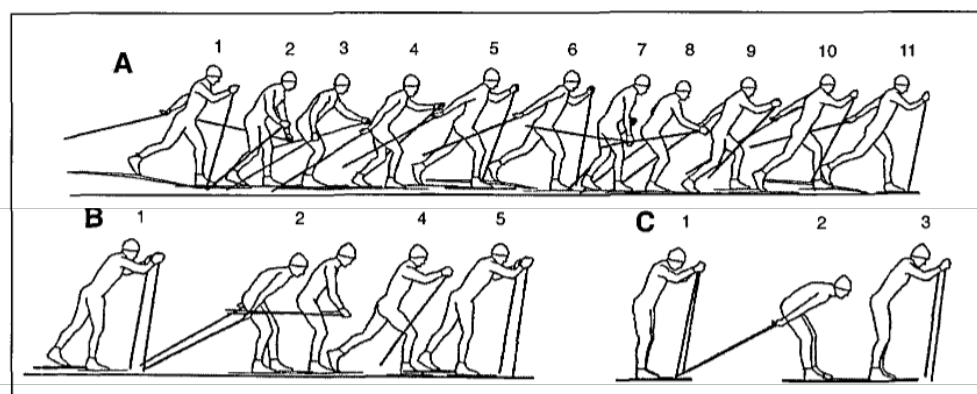
# Innehållsförteckning

<b>1</b>	<b>Inledning</b>	<b>1</b>
1.1	Diagonalåkning . . . . .	2
1.2	Teknikträning inom längdskidåkning idag . . . . .	2
1.3	Syfte och mål . . . . .	3
1.4	Delmål . . . . .	3
1.5	Avgränsningar . . . . .	4
<b>2</b>	<b>Tekniska faktorer och prestandamått</b>	<b>6</b>
2.1	Tekniska faktorer . . . . .	6
2.1.1	Maxtryck . . . . .	6
2.1.2	Överkroppsrörelse . . . . .	7
2.1.3	Tryckfördelning . . . . .	7
2.1.4	Antifasrelation . . . . .	8
2.1.5	Cykelfrekvens och cykellängd . . . . .	8
2.2	Variabilitet som prestandamått . . . . .	8
<b>3</b>	<b>Mätsystem</b>	<b>10</b>
3.1	Marknadsundersökning av liknande produkter . . . . .	10
3.2	Urval av tekniska faktorer . . . . .	11
3.3	Framställning av mätsystem . . . . .	11
<b>4</b>	<b>Experiment</b>	<b>15</b>
4.1	Kalibrering av töjningsgivare . . . . .	15
4.2	Insamling av data . . . . .	16
4.3	Repetierbarhet hos mätsystemet . . . . .	19
4.4	Skidans rörelse . . . . .	21
<b>5</b>	<b>Bearbetning av insamlad data</b>	<b>22</b>
5.1	Tidsskillnad för maxtryck och fötternas passerande . . . . .	22
5.2	Överkroppens rörelse . . . . .	22
5.3	Frekvensbaserad bearbetning . . . . .	23

<b>6 Resultat</b>	<b>25</b>
6.1 Tidsskillnad mellan maxtryck och passering av fötter . . . . .	25
6.2 Rörelse i överkroppen . . . . .	27
6.3 Variabilitet av frekvens . . . . .	27
6.4 Cykellängd . . . . .	31
<b>7 Diskussion och vidareutveckling</b>	<b>32</b>
7.1 Utvärdering av mätsystemet . . . . .	32
7.2 Diskussion av data . . . . .	32
7.3 Diskussion av resultat . . . . .	33
7.3.1 Tidsskillnader mellan maxtryck och fotpassage . . . . .	33
7.3.2 Frekvensanalys som mått på rörelsevariabilitet . . . . .	34
7.3.3 Skillnader i cykellängder . . . . .	34
7.4 Möjliga utvecklingsområden . . . . .	35
<b>8 Etiska aspekter</b>	<b>36</b>
<b>9 Slutsatser</b>	<b>37</b>
<b>Referenser</b>	<b>38</b>
<b>A Bilagor</b>	<b>42</b>
A.1 Intervjufrågor . . . . .	42
A.2 Utdrag av data . . . . .	43
A.3 Bilder på mätsystemet . . . . .	46

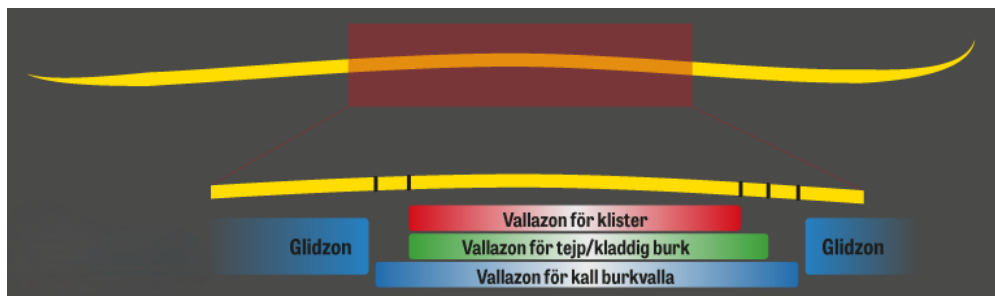
# 1 Inledning

Längdskidåkning är en mycket populär sport i Norden men utövas även internationellt. Vissa åker längdskidor för att få motion och komma ut i naturen, medan andra vill träna och utveckla sin skidåkning. Oavsett syftet med skidåkningen är det intressant att träna sin teknik då längdskidor är en komplex sport som kräver god teknik för att kunna prestera [1]. Att förbättra tekniken är viktigt för att maximera användandet av skidåkarens fysiska kapacitet [2]. Detta leder till en mer effektiv arbetsekonomi, vilket innebär att mindre energi krävs för att utföra samma arbete [3]. Detta leder i sin tur till att skidåkaren kan åka snabbare oavsett distans eller orka längre sträckor med bibehållen prestation.



**Figur 1:** Rörelsecykler för olika växlar inom den klassiska längdtekniken. A) Diagonalåkning, B) Stakning med frånskjut, C) Stakning. Numren ovanför figurerna tillhör en fas i de olika rörelsecyklerna [4]. Omarbetad med tillstånd.

I längdskidor finns det två stilar, klassisk stil och fristil [5]. I den fria stilen väljer åkaren själv vilken teknik den vill använda, men oftast utnyttjas tekniken skejt. Inom klassisk stil finns det fem växlar, vilket är olika tekniker som används beroende på terräng och tempo [6]. Växel ett är saxning som används i branta uppførsbackar. Där vinklar åkaren ut skidorna och går eller springer upp, samtidigt som armarna rör sig diagonalt med benen. Växel två är diagonalåkning, vilket är den vanligaste tekniken i uppførsbackar och liknar löpning, se figur 1A. Tredje växeln är stakning med frånskjut som används i svagt lutande uppførsbackar där åkaren skjuter ifrån med ett ben i taget och stakar med parallella armar, se figur 1B. Saxning, diagonalåkning och stakning med frånskjut utnyttjar fästvalla som är fördelad under skidans upphöjda del, även kallat spann, se figur 2. För att fästvallen ska komma i kontakt med snön behöver åkaren trycka ner spannet och kan därigenom få fäste. Den fjärde växeln är stakning där endast parallella armar används för att trycka ifrån, se figur 1C. Den sista växeln är fartställningen där åkaren hukar sig och placerar armbågarna mot knäna i nedførsbackar.



**Figur 2:** Bild av en längdskida i profil där det röda området är längdskidans spann. Valla för olika väder appliceras enligt anvisningens zoner [7]. Omarbetad med tillstånd.

## 1.1 Diagonalåkning

Diagonalåkning är särskilt svår att lära ut och utföra rätt jämfört med de andra teknikerna [8]. Vid diagonalåkning rör sig armarna och benen diagonalt, där ena benet trycker ifrån samtidigt som den kontralaterala armen. Anledningen till att tekniken anses vara komplicerad är för att den kräver att åkaren tar hänsyn till många olika moment samtidigt. Både armar och ben utför tekniska rörelser samtidigt vilket kräver god koordination för att få ett effektivt samspel. Åkaren ska sträva efter att sätta ner staven i höjd med bindningen på den glidande skidan med armen i 90 graders vinkel, se figur 1A fas 1 och 6. När staven sätts i marken sker en tyngdöverföring från det ben som bär kroppsvikten, det vill säga frånskjutsskidan, till det andra benet som då blir den nya frånskjutsskidan. Krister Åkärbjär, specialidrottstränare vid Mora skidgymnasium, säger i en personlig intervju 2025 att detta är ett av de viktigaste momenten i diagonalåkningen. Han menar att åkaren helst vill lägga hela vikten på en skida i taget för att få mest tryck och därmed mest fäste. Åkärbjär berättar även att åkaren ska uppnå maxtryck på skidan när pjäxorna passerar varandra, se figur 1A fas 3 och 8. Då är kroppsvikten samlad över foten vilket gör att tyngdkraften som utövas på skidan är maximal. Tyngden kan skidåkaren utnyttja och behöver således använda en mindre muskelkraft för att trycka ner skidan och få fäste. Detta effektiviserar energikonsumtionen, eftersom det ger möjligheten till att lägga mer kraft på att trycka sig framåt istället för nedåt. Krister Åkärbjärs beskrivning stämmer överens med vad skidtränare Christer Norström lyfter fram i en artikel om diagonalåkningsteknik, att hela vikten bör föras över på ena skidan för att få ordentligt fäste med minimal muskelansträngning[9].

## 1.2 Teknikträning inom längdskidåkning idag

Inom längdskidåkning på högre nivåer, såsom skidgymnasium eller landslag, menar Krister Åkärbjär att teknikträning oftast genomförs tillsammans med en tränare. Han berättar att tränaren filmar skidåkaren och analyserar tekniken i detalj för att sedan återkoppla vad som kan förbättras och hur skidåkaren ska göra det. Problemet med denna typ av teknikträning är bristen på kvantitativa mått på de tekniska färdigheter som tränas, samt att den kräver någon som filmar och analyserar. Åkärbjär berättar även att det inte finns dokumenterat eller kvantifierat vilken åkteknik som är optimal utan att man försöker se på de bästa åkarna och efterlikna deras teknik vid teknikträning.

Att ha en tränare som kan filma och analysera teknik har de flesta skidåkare inte tillgång till. Därför finns det ett behov av att skapa ett hjälpmedel som en enskild skidåkare kan använda för att analysera sin teknik och enkelt få respons när tekniken förbättras eller försämras. Det finns också ett behov av att ge mer detaljerad information om tekniken vid teknikträning för skidåkare på högre nivå. Denna information kan exempelvis omfatta tiden det tar att genomföra olika delar av en rörelsecykel, storleken på den kraft som utövas eller accelerationen hos en viss del av kroppen.

### 1.3 Syfte och mål

Syftet med kandidatarbetet är att undersöka hur tekniska hjälpmedel kan stödja skidåkare i att självständigt förbättra och utveckla sin teknik.

Målet med projektet är att utveckla en prototyp som kan ge längdskidåkaren återkoppling på tekniken. Prototypen ska kunna samla in data som beskriver längdskidåkarens teknik och utifrån denna bedöma teknikens kvalitet.

### 1.4 Delmål

Projektet kan brytas ned i följande delmål för att uppnå det huvudsakliga syftet och målet.

Det första delmålet är att identifiera mätbara tekniska faktorer inom längdskidåkningsteknik i syfte att göra tekniknivån kvantifierbar. En teknisk faktor kan i detta arbete definieras som ett identifierbart inslag i en skidåkares rörelsemönster som har en tydlig påverkan på teknikens effektivitet och därigenom åkarens arbetsekonomi, kraftöverföring och prestation. Utöver det krävs en kartläggning av de identifierade faktorerna med avsikt att sortera bort de som är irrelevanta och orealistiska.

Ett centralt moment i arbetet är utvecklingen av ett mätsystem som möjliggör datainsamling från längdskidåkare. Den insamlade data används för att kvantifiera tekniska faktorer som tidigare identifierats som betydelsefulla och mätbara. Mätsystemet bör vara anpassningsbar till flera utövare och vara konstruerat så att det inte stör eller utgör en fara för utövaren. För att säkerställa tillförlitliga resultat krävs dessutom att systemets repeterbarhet verifieras genom upprepade mätningar och tester.

För att samla in data behöver det genomföras tester där olika försökspersoner åker skidor för att samla in data. De olika testpersonerna innehar fördelaktigheten olika erfarenhet inom längdskidåkning, från att aldrig ha stått på ett par skidor till att ha tävlat på hög nivå inom längdskidåkning.

Antal testpersoner och tester som genomförs bör till antalet vara så stort som är praktiskt möjligt för att säkerställa en bred och tillförlitlig databas. Data som samlas in behöver vara av tillräckligt hög kvalitet så att det är möjligt att utvinna kvantitativa mått på de tekniska faktorer som mätsystemet är konstruerat för att samla in.

För att möjliggöra återkoppling till utövaren behöver systemet kunna klassificera längdskidåkarens tekniska prestation. Målet är att framställa eller välja en metod som tolkar och

värderar resultat. För att kunna genomföra detta behöver varje teknisk faktor kunna presenteras individuellt. På så sätt kan utövaren få en ökad förståelse i hur den presterar i varje teknisk faktor.

## 1.5 Avgränsningar

På grund av begränsade resurser i form av tid och budget kandidatarbetet avgränsats till följande:

- **Diagonalåkning**

Inom den klassiska stilen har projektet avgränsats till diagonalåkning. Diagonalåkning är en av de mest dynamiska växlarna inom den klassiska stilen och därav är det mest intressanta ur ett teknikperspektiv. Utöver det finns det färre studier som har gjorts på diagonalåkning jämfört med andra längdskidåkningstekniker som stakning.

- **Indikatorer för bra teknik**

Det finns många faktorer som kan främja eller hämma god teknik. Istället för att beakta allt begränsas projektet till ett fåtal mått som är möjliga att mäta med hjälp av ett mätsystem.

- **Experiment med rullskidor på rullband**

Av praktiska skäl kommer alla projektets experiment och datainsamling begränsas till rullskidor på rullband. Detta har flera fördelar för projektet som bland annat högre repeterbarhet på experiment på grund av mer uniforma förhållanden för datainsamling och färre utomstående variabler som kan påverka data [10]. De utomstående variablerna som försvårar experiment utomhus är framförallt förändringar i väder och snö vilket leder till varierande friktionskoefficienter. Rullbandet har också fördelen att kunna ha en konstant inställd hastighet och lutning. Uniforma väderförhållande är en viktig anledning till att flertalet tidigare undersökningar inom längdskidåkning har genomförts inomhus på rullband [11]. Nackdelen med detta är att det inte är en fullständig analogi för skidåkning på snö, i och med att skidans grepp på underlaget som faktor inte finns på rullskidor. Rullskidornas hjul kan ha en statisk friktion flera gånger större än på snö och därför kan idealtekniken mellan rullskidor och skidor på snö skilja sig något åt. Men trots att denna faktor saknas på rullskidor så är tekniken jämförbar med tekniken på snö, enligt Krister Åkärby, tidigare nämnd i kapitel 1.1.

En tidigare studie som utvärderar tillförlitligheten för tester inom längdskidåkning har genomförts på rullband och visat att dessa tester är standardiserade och tillförlitliga [12]. En annan studie som gjorts har utvärderat överföringen i åkteknik mellan skidåkning på snö samt rullskidåkning inom diagonalåkning [13]. Åktekniken på rullskidor visade sig där vara lik åktekniken som används inom traditionell skidåkning i stor utsträckning. Däremot finns det några skillnader i framförallt rörelser i höfter, knä och underben vid isättning och frånskjut att beakta vid överföring av teknik mellan rullskidor och skidåkning på snö.

- **Endast ha sensorer på kroppen och pjäxor**

Projektet avgränsas till att mätsystemet enbart ska bestå av sensorer som kan fästas på åkarens kropp och pjäxor. Systemet ska vara enkelt att montera och bära utan att påverka åkarens rörelsefrihet alltför mycket. Avgränsningen valdes i enlighet med syftet eftersom sensorer som går att ha på kroppen är smidigare vid åkning och enklare att installera. Eftersom användningen av externa sensorer eller kameror begränsar möjligheten till kontinuerlig mätning och kräver specifika datainsamlingsmiljöer, motverkar de syftet om att kunna genomföra datainsamling självständigt utan extern hjälp.

## 2 Tekniska faktorer och prestandamått

Som tidigare nämnts i kapitel 1.1 är diagonalåkning en tekniskt komplex rörelseform som ställer höga krav på koordination och timing för att utföras korrekt. I syfte att analysera teknikens nyckelkomponenter identifierades centrala faktorer som påverkar diagonalåkning, baserat på både empiriska intervjuer och en systematisk litteraturnomgång.

Två personer med omfattande erfarenhet av längdskidåkning intervjuades för att bidra med expertperspektiv. Den ena var Krister Åkärbjär, tränare vid ett skidgymnasium, som tidigare omnämns i kapitel 1.1. Den andra var Lars Nelson, tidigare medlem i svenska längdskidlandslaget och olympisk guldmedaljör i längdskidor. Deras expertis bidrog väsentligt till identifieringen och tolkningen av tekniska faktorer kopplade till diagonalåkning. En fullständig redovisning av intervjufrågorna återfinns i Bilaga A.

För att stärka analysens vetenskapliga grund genomfördes även en litteraturstudie i databaser som Scopus och PubMed. Syftet var att identifiera tidigare forskning som behandlar tekniska aspekter av diagonalåkning. Utöver detta inkluderades även litteratur inom närliggande områden, såsom gång och löpning, i syfte att ge en bredare förståelse för kroppens rörelsemönster.

### 2.1 Tekniska faktorer

Genom kombinationen av intervjuer och litteraturnomgång kunde ett antal centrala faktorer identifieras som påverkar en skidåkares diagonalteknik och därigenom förmågan att effektivt utnyttja sin fysiska kapacitet. Dessa faktorer beskrivs och analyseras i kommande kapitel.

#### 2.1.1 Maxtryck

En av de viktigaste faktorerna inom diagonaltekniken är kroppens position vid det maximala trycket på skidan. Krister Åkärbjär beskriver att det optimala rörelsemönstret är att *maxtrycket på skidan sker precis när fötterna passerar vandra och är parallella*. Han förklarar att ett annat sätt att maximera trycket på skidan är att ha en rak arm i stavens nedersta läge under frånskjutet, vilket leder till en större pendelrörelse och därmed genererar mer kraft. Detta styrks också av Lars Nelson, som tillägger att vid ett frånskjut bör så stor andel som möjligt av trycket mot marken vara genom frånskjutsskidan, vilket betyder att trycket på den andra skidan bör vara så nära noll som det går. Detta är avgörande för att få maximalt fäste mot underlaget med den skidan man skjuter ifrån med, vilket ofta utgör en svårighet för motionärer.

### 2.1.2 Överkropps rörelse

Åkerbjär beskriver att en *minimal vertikal rörelse hos överkroppen* är att föredra, då rörelse i vertikalled inte bidrar till framåt drivande kraft. En sådan rörelse betraktas därför som ineffektiv och leder till onödig energiförlust för skidåkaren. Därutöver menar Nelson att överkroppen ska bli mer upprätt i förhållande till det horisontella planet ju brantare lutningen blir. Syftet med förändringen av position är att ge åkaren mer fäste i uppførsbacken genom att kroppens tyngdpunkt blir mer centrerad över foten på frånskjutsskidan.

### 2.1.3 Tryckfördelning

Ett vanligt misstag, enligt Åkerbjär, är att fotens tryck på skidan hamnar för mycket på insidan i frånskjutsfasen och ger därmed en vinkel på skidan. Vinkeln ger skidans fästzon en mindre kontaktyta med snön, vilket resulterar i försämrat fäste. Att ha foten i en position som gör att *skidan står plant mot marken* ger alltså bättre fäste utan att kräva större muskelkraft. Han förklarar också att trycket på skidan bör överföras genom framfoten snarare än hela foten, eftersom detta ökar trycket ned mot snön.

Vid en studie gjord på elva elitskidåkande män undersöktes kraftfördelningen i foten under olika faser av diagonalskidåkning [11]. I studien delades foten in i fyra sektioner:

- Framfot: Främre 50 % av foten.
- Bakfot: Bakre 50 % av foten.
- Insida: Inre 50 % av foten.
- Utsida: Yttre 50 % av foten.

Under glidfasen visade resultaten att cirka 75 % av kraftimpulsen var koncentrerad till bakfoten och resterande 25 % till framfoten, oberoende av hastighet. Tidigare studier har däremot visat en fördelning på 63 % respektive 27 % istället, men dessa mätningar genomfördes i brantare lutning och på rullskidor istället för snö. Under själva frånskjutet, samt tiden strax innan frånskjutet, fördelades kraften istället 90 % på framfoten och 10 % på bakfoten.

### 2.1.4 Antifasrelation

Vid längdskidåkning så utförs olika växlar med olika tajming mellan armar och ben, detta kan kallas antingen fas- eller antifasrelation [14]. I diagonalåkning utförs rörelsen mellan armar och ben i en antifasrelation, det betyder att höger arm jobbar parallellt med vänster ben och vice versa. Enligt Lars Nelson *bör staven sättas i snön strax före frånskjutet med benet, och frånskjutet från både arm och ben bör avslutas samtidigt* för att uppnå korrekt tajming. Målet är att bibehålla en perfekt antifasrelation mellan armar och ben, vilket är avgörande för optimal prestation. Många motionärer har dock svårt att upprätthålla denna samordning och tenderar att tappa den korrekta tajmingen. I vissa fall kan avvikelsen bli så stor att åkaren övergår till en fasrelation, där armar och ben rör sig i takt i ett mönster som liknar passgång.

### 2.1.5 Cykelfrekvens och cykellängd

Hastigheten inom diagonalskidåkning kan påverkas av flertalet kinematiska aspekter [11]. En del som påverkar hastigheten är cykelfrekvensen, alltså hur ofta en cykel utförs. En cykel i längdskidåkning kan definieras som perioden från att en stav sätts i snön tills nästa gång samma stav sätts ner i snön igen. Även cykellängd, alltså längden åkaren förflyttar sig under en cykel, påverkar hastigheten. Vid snabbare skidåkning, exempelvis sprint, skiftar förhållandena i åkningen jämfört vid distansåkning. Det syns tydligt hur cykelfrekvensen ökar, cykellängden blir kortare och frånskjutskrafterna ökar. Relationen mellan cykellängd, cykelfrekvens och hastighet ( $v$ ) kan beskrivas som

$$v = \text{cykellängd} \cdot \text{cykelfrekvens}. \quad (1)$$

Inom fristilslängdåkning har det visats att högre rankade åkare generellt åker med längre cykellängder jämfört med lägre rankade åkare [1]. Vidare beskrivs att åkare tenderar att ha en personlig, naturlig cykelfrekvens som oftast är den mest energieffektiva för individen. Att åka med en högre cykelfrekvens än den naturliga har i studier visat sig leda en ökad energiförbrukning. Vilken specifik cykelfrekvens en skidåkare håller är oberoende av åkarens nivå [15]. En minskning i hastighet beror oftast på en minskning av cykellängden i första hand. Skidåkare skulle kunna förbättra sin prestation genom att öva på att upprätthålla en lång cykellängd utan att förändra cykelfrekvensen [16][15].

## 2.2 Variabilitet som prestandamått

I den genomgångna litteraturen framkommer det att variabilitet i rörelsemönster har en betydande roll inom gång och löpning. Variabilitet i rörelsemönster inom idrott syftar på de skillnader som uppstår mellan upprepade utföranden av samma rörelse, trots att uppgiften är densamma [17]. Inom löpning tenderar erfarna löpare att uppvisa mindre variation i vertikala rörelser av överkroppen samt i stegfrekvens jämfört med mindre erfarna löpare. Dessa parametrar är viktiga för en jämn och därmed energisnål löpning.

Även inom längdskidåkning är energisnål rörelseeffektivitet viktigt. Däremot behöver åkaren ofta anpassa sina rörelser och val av växel beroende på exempelvis lutning, snö

och valla. Varje vald växel och frekvens bör dock genomföras med så liten variation som möjligt för att främja en energisnål åkning.

Tidigare har variationer i rörelsemönstret vid gång, både mellan individer och över tid, analyserats för att studera olikheter i rörelsebetende [18]. Variabilitet kan även användas för att jämföra skillnader mellan personers rörelsemönster. I detta arbete undersöks om sådan variabilitet även kan användas för att särskilja mellan en erfaren och en oerfaren skidåkare, baserat på antagandet att en mer erfaren åkare bör uppvisa ett mer konsekvent rörelsemönster.

För att upptäcka och kvantifiera dessa förändringar kan olika sensorer som exempelvis accelerometrar och gyroskop användas. Dessa sensorer har i tidigare studier använts för att utvinna information om rörelsebetende genom att registrera signaler [18]. Från dessa signaler har olika parametrar extraherats i både tid, frekvens samt tid-frekvensdomänen för att ge en översiktlig bild av rörelsemönstrets variation och förändring över tid. Exempelvis tenderar friska individer att uppvisa ett mer centrerat frekvensspektrum med mindre variationer, vilket kan indikera på en stabilare gång och ett jämnare rörelsemönster. Energin i signalerna är då i större utsträckning koncentrerad kring vissa dominerande frekvenser vilket speglar en regelbunden och kontrollerad rörelse.

Sammantaget kan dessa tidigare studier indikera på att ett stabilt och kontrollerat rörelsemönster, med begränsad variation, är fördelaktigt för en energisnål längdskidåkning. För att undersöka detta närmare kan analys av rörelsevariabilitet vara ett relevant verktyg.

## 3 Mätssystem

För att kunna mäta och analysera de tekniska faktorer som identifierades i kapitel 2 krävs ett tillförlitligt och precist mätsystem som kan leverera kvalitativa mätdata. Nästkommande kapitel behandlar de överväganden, metoder och utmaningar som varit avgörande i utformningen av det slutgiltiga mätsystemet.

### 3.1 Marknadsundersökning av liknande produkter

I nuläget finns det flera verktyg för att mäta skidåknings teknik, med Skisens, CARV, Wememove, Archinisis och Pedar Mobile System som några av de mest framstående [19] [20] [21] [22]. Det saknas i dagsläget produkter som är specifikt utvecklade för längdskidåkning och som möjliggör datainsamling direkt från pjäxorna. Det finns således ännu inget kommersiellt tillgängligt system som appliceras på en längdskidåkarens pjäxor och som möjliggör kvantitativ mätning av åkarens diagonalteknik.

Enligt produktbeskrivningen av Skisens är deras verktyg ”ett smart skidhandtag som mäter effekt och åkteknik vid skidåkning” där ”handtag mäter den framdrivande kraften genom data från kraft- och rörelsegivare som är integrerade i handtaget” [19]. I deras app ges feedback på åkarens kapacitet, träningsintensitet samt åkteknik, i form av stavkraft och vinkel över tid. Appen ger även coaching baserat på den insamlade informationen från stavarna. Skisens mäter dock endast data från stavarna, och inte från resten av kroppen.

CARV 2 är ett verktyg som utvärderar och betygsätter slalomteknik [20]. Genom ett gyroskop och en accelerometer som placeras på åkarens båda pjäxor bestäms deras position och vinkel gentemot varandra. Utifrån uppmätt data analyseras åkarens prestation med hjälp av artificiell intelligens. Ett urval av det CARV 2 analyserar är balansen i svängar, hur parallella skidorna är, formen på svängarna samt vilken vinkel som skidornas kant har mot backen. Under varje åk utvärderas samtliga mätpunkter, och återkoppling till åkaren sker i realtid antingen visuellt eller auditivt genom en mobilapplikation.

Wememove är ett träningshjälpmedel som inte längre säljs. Produkten var en app och ett pulsbälte med rörelsesensorer runt bröstet [21]. Mjukvaran analyserade hur åkaren rörde sig och omvandlade informationen till träningstips och insikter i realtid. Appen kunde visa fakta om åkarens attack, staknings-frekvens, båltryck och stabilitet. Målgruppen för produkten var inte begränsad till elitidrottare, utan omfattade i första hand motionsutövare.

Archinisis säljer mjukvara anpassad för att bedöma atletens teknik i en rad olika sporter, exempelvis friidrott, rodd och längdskidor [22]. I Archinisis system fästs den rekommenderade sensorn på övre delen av åkarens rygg för att möjliggöra feedback. Sensorn registrerar bland annat position, hastighet och omgivningens lufttryck. Informationen från sensorn skickas till Archinisis server som analyserar och bearbetar datan. Utöver det kan även videomaterial skickas in och bearbetas. Sedan kan bland annat skidåkningseffekt, hastighetsjämförelser, kadens och sträcka per cykel visas i Archinisis webbapplikationen.

Pedar Mobile System är en sula med 99 sensorer som kan mäta tryckfördelningen under foten [23]. Detta system har flera användningsområden inom framförallt biomekanik och idrott. Exempelvis har ett Pedar Mobile System använts vid en tidigare studie inom diagonalåkning för att mäta hur åkaren belastade skidan [11].

### 3.2 Urval av tekniska faktorer

Marknadsanalysen identifierade ett antal kommersiellt tillgängliga mätsystem med liknande funktionalitet, inom de ramar som definierats för detta arbete. Dessa system uppfyller även ett centralt kriterium enligt kapitel 1.5, då arbetet är avgränsat till sensorer som kan placeras direkt på skidåkaren eller pjäxorna. Baserat på analysen framstår accelerometrar och gyroskop som några av de mest mångsidiga sensorerna för rörelseregistrering och används därför frekvent inom rörelseanalys. En Inertial Measurement Unit (IMU) kombinerar dessa två sensorer, ett gyroskop och en accelerometer, vilket möjliggör mätning av både kroppens acceleration och dess orientering i förhållande till underlaget [24].

Utöver systemen där IMUer användes, identifierades även ett system där trycksensorer användes. En trycksensor består av flera töjningssensorer och fungerar genom att ett aktivt material förändrar sin elektriska resistans vid mekanisk påverkan, alltså töjning och kompression [25].

Utöver marknadsanalysen finns det etablerade avståndsmätare som också är i enlighet med projektets krav. En Time of Flight sensor (ToF-sensor) mäter avståndet till objekt inom ett visst område. Detta sker genom att sensorn sänder ut en signal av antingen ljud eller ljus för att sedan mäta tiden det tar för den att reflektera tillbaka [26][27].

Genom att utgå från de tekniska faktorerna som presenterades i kapitel 2.1 konstateras det att IMUer ger möjligheten till att mäta *rörelser av överkroppen och pjäxor*, samtidigt som det inbyggda gyroskopet kan även avgöra *skidans lutning mot underlaget*. Ytterligare kan töjningsgivare kombineras med en avståndsmätare för att undersöka när *maxtryck sker i förhållande till när benen passerar varandra*. Genom att placera flera töjningsgivare i samma pjäxa ges även möjligheten till att mäta hur *trycket är fördelat i pjäxan*. Sammantaget möjliggör användningen av flera olika mätinstrument en mångsidig representation av bland annat *cykelfrekvens, cykellängd och tryckfördelning* vilket i sin tur gör det möjligt att identifiera *variabilitet i rörelsemönstret* enligt beskrivningen i kapitel 2.2.

### 3.3 Framställning av mätsystem

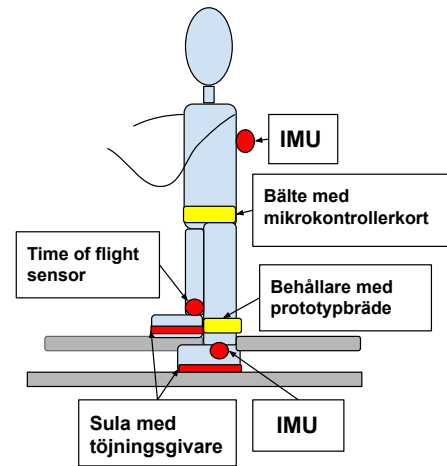
För att kunna samla in data från skidåkare designades ett mätsystem som utrustades med de sensorerna som i kapitel 3.2 ansågs som passande för att mäta de utvalda tekniska faktorerna. En visualisering av hur mätsystemet placerades på en människa finns att se i figur 3b.

Inledningsvis installerades sex töjningssensorer av modellen FlexiForce A301, med syftet att mäta tryckfördelningen under fötterna samt identifiera när maxtryck uppstår [28]. Sensorerna valdes främst för att de kunde placeras inuti pjäxan och för att de hade en svarstid på under  $5 \mu\text{s}$  [28]. De fördelades under sulorna med en sensor under hälen, en

under den främre insidan och en under den främre utsidan av foten. Töjningsgivarnas placering kan ses i figur 3a.



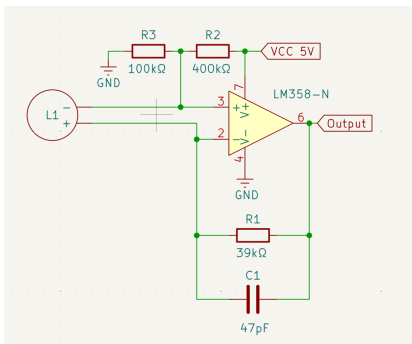
(a) Töjningsgivarnas placering under sulan.



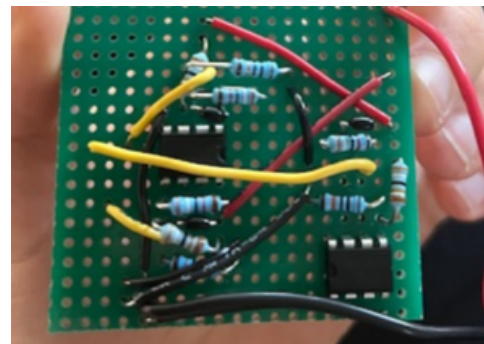
(b) Mätssystemets helhet placerat på en människa.

**Figur 3:** Bilderna illustrerar mätssystemets delar.

Ett rekommenderat kopplingsschema, se figur 4a, användes för att förstärka signalen samt för att ge ett linjärt samband mellan den applicerad kraft och den utgående spänning [29]. Kopplingsschemat löddes på två prototypbräden, se figur 4b, där varje töjningsgivare har sin egen förstärkning. De operationsförstärkare som användes i kopplingsschemat var LM358-N [30].



(a) Krettschema för förstärkning av töjningsgivare[31].



(b) Prototypbräde med tre töjningsgivare kopplade enligt figur 4a.

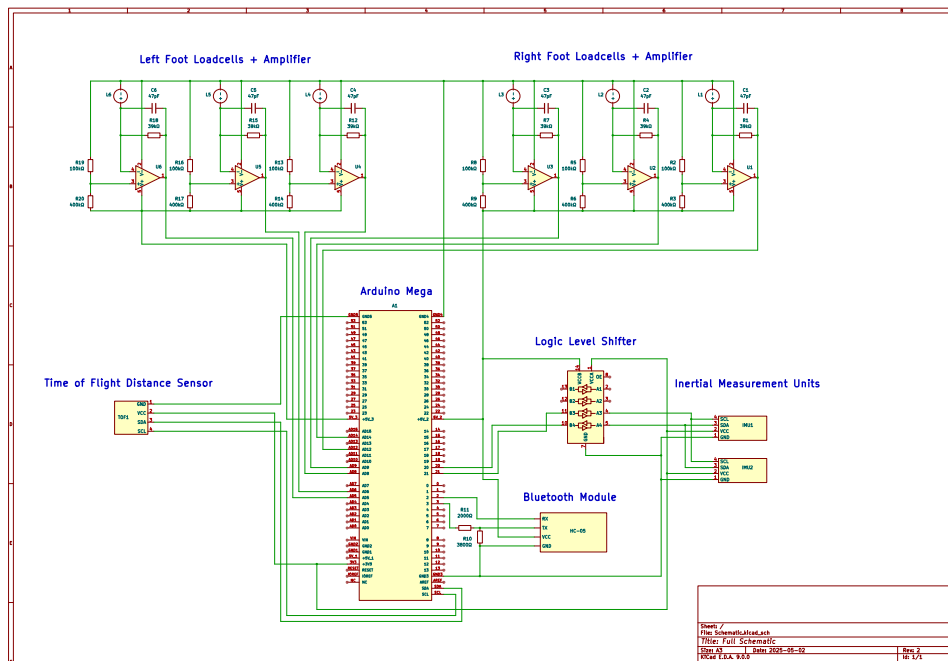
**Figur 4:** Bilder som visar prototypbrädets konstruktion.

Från prototypbräderna drogs kopplingar till ett mikrokontrollerkort, som i prototypen utgjordes av en Arduino Mega 2560. Fördelen med just detta mikrokontrollerkort är främst det stora antalet portar, vilket möjliggör användning av flera sensorer samtidigt

[32]. Strömförsörjningen till mikrokontrollerkortet skedde via en USB-kabel ansluten till en portabel laddare.

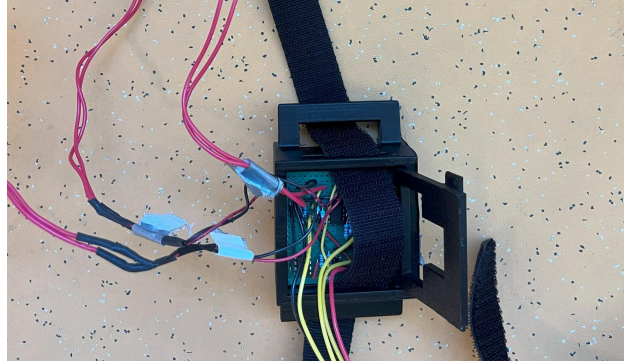
Mikrokontrollerkortet utrustades även med en bluetooth-modul av modellen HC-06, vilket möjliggjorde trådlös kommunikation mellan mikrokontrollerkortet och en mobil eller dator. Bluetooth modulens kommunikations kanaler, RX (recieve) och TX (transmit), kopplades till de analoga pinnarna 2-3. För undvika skada på chippet användes en spänningsdelare på TX-linjen för att sänka spänningen från 5 V till cirka 3,5 V. I koden användes biblioteket *SoftwareSerial* för att skicka data via dessa analoga pinnar [33].

För att kunna mäta acceleration både på en fot och i överkroppen installerades två IMU-sensorer av modellen Grove - IMU 9DOF (ICM20600 + AK09918) [34]. Sensorerna kommunicerar med mikrokontrollerkortet via I2C-protokollet. För att möjliggöra samtidig användning av båda sensorerna ändrades adressen på en av dem från standardadressen 0x69 till 0x68. Enligt tillverkaren kräver kommunikationen en maximal spänning på 3,45 V [34]. Mätningar från mikrokontrollerkortets I2C pinnar, se pin 20 och 21 i figur 5, visade dock en spänning på 5 V. Därför installerades en nivåomvandlare för att sänka spänningen från 5 V till 3,3 V innan den når sensorerna.



Figur 5: Kretsschema över samtliga delar av prototypen.

För att mäta när fötterna befann sig intill varandra användes en ToF-avståndssensor baserad på VL53L0X från Seeed Studio [35]. Sensorn anslöts till mikrokontrollerkortets klock- och data pin, se figur 5, där den kontinuerligt kunde avläsa avståndet. Ytterligare bilder på mätsystemets alla delar återfinns i bilaga A.3.



**Figur 6:** Bild på hölje för prototypbrädet.

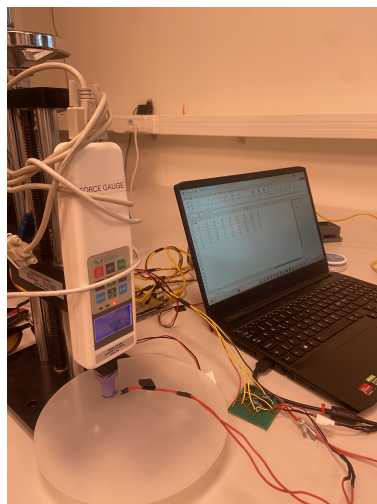
I syfte att effektivt kunna använda sensorerna utan att begränsa åkarens rörlighet skapades totalt fyra höljen med hjälp av CAD-programmet CATIA V5. Det första höljet, som ursprungligen designades för att rymma mikrocontrollerkortet, bedömdes slutligen som överflödigt då det ansågs som mer praktiskt och användarvänligt att placera mikrocontrollerkortet i en befintlig midjeväska. De två efterföljande höljena designades för att rymma prototypbrädena, vilka fungerar som utgångspunkter för töjningsgivarna på respektive fot. Designen baserades på prototypbrädenas individuella mått med ett tillägg på 1,5 mm för att kompensera för toleranser vid additiv tillverkning. Höljena utformades dessutom så att ett kardborreband kunde dras över dem och samtidigt hålla prototypbrädet säkert på plats, se figur 6. Avslutningsvis utformas höljen för montering av IMUer och ToF-sensorn. Sensorerna fästes på höljena med hjälp av de befintliga skruvhålen i respektive komponent.

## 4 Experiment

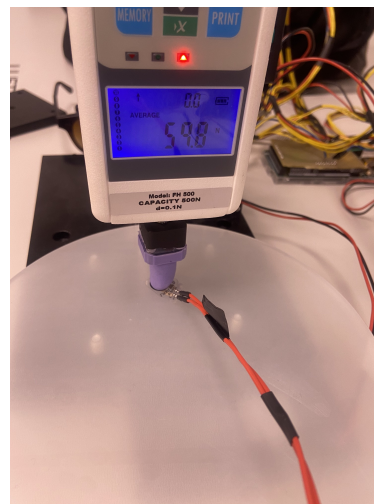
Följande kapitel redogör hur samtliga experiment i detta arbete genomfördes. Experimenten utfördes i syfte att både utvärdera mätsystemet och samla in data med hjälp av olika testpersoner.

### 4.1 Kalibrering av töjningsgivare

Töjningsgivarna var initialt okalibrerade och visade olika ut signaler vid applicering av samma tryck, vilket bidrog till osäkerhet i mätresultaten. För att undersöka sambandet mellan applicerad kraft och givarnas utsignal användes en kraftmätare, se figur 7a och 7b. Samtliga givare mättes vid tillämpning av följande krafter: 5, 10, 15, 20, 25 och 30 N. En silikonadapter placerades mellan kraftmätaren och givarna för att säkerställa en jämn tryckfördelning över givarnas yta.



(a) Kraftmätare på töjningsgivare.



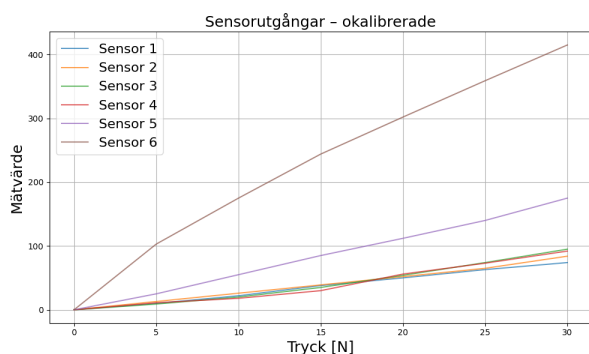
(b) Kraftmätare på töjningsgivare - närbild.

Figur 7: Kraftmätare på töjningsgivare.

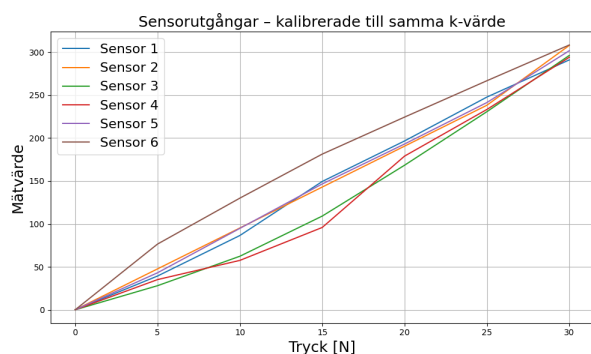
Mätresultaten sammanställs i tabell 1 och visualiseras i figur 8 (a). Figuren visar att sambandet mellan kraft och utsignal var i huvudsak linjärt för samtliga givare, men med varierande lutningar, vilket tydliggör behovet av individuell kalibrering.

Tabell 1: Mätvärden på töjningsgivare vid varierande mängd kraft (N).

	nr. 1	nr. 2	nr. 3	nr. 4	nr. 5	nr. 6
5 N	10	13	9	11	25	103
10 N	22	26	20	18	55	175
15 N	38	39	35	30	85	244
20 N	50	52	54	56	112	302
25 N	63	65	74	73	140	359
30 N	74	84	95	92	175	415



(a) Före kalibrering.



(b) Efter kalibrering.

Figur 8: Töjningsgivarnas värden före och efter kalibrering.

För att varje töjningsgivare skulle kunna ge ett mer jämförbart värde vid en given kraft, genomfördes en individuell kalibrering. Denna kalibrering bestod i att räkna ut den omvända relationen till kraften enligt

$$F = \frac{y - m}{k}, \quad (2)$$

där  $y$  representerar sensorns utsignal,  $m$  skärningen med  $y$ -axeln och  $k$  lutningen. Genom denna omräkning kunde varje sensor konverteras till ett gemensamt kraftvärde, vilket tydligt framgår av det justerade resultatet i figur 8b.

## 4.2 Insamling av data

Datainsamling innebär att en individ åker längdskidor med det utvecklade mätsystemet monterat på kroppen. I miljön där datainsamlingen sker finns flera parametrar som kan påverka åkarens teknik och därmed även resultatet av mätningarna.

Som tidigare nämnt i kapitel 1 används olika växlar beroende på terräng och tempo. Växeln diagonalåkning är då den huvudsakliga växeln att använda i uppförsbackar [36]. Vidare använder elitåkande män huvudsakligen växeln diagonalåkning vid 12 % lutning och en hastighet på 6,5 km/h då pulsen är lägre och den upplevda ansträngningen mindre.

Det beror på att hastigheten är lägre och benen kan användas på ett mer effektivt sätt. Vid en lutning på 5 % och en hastighet på 12,5 km/h använder elitåkande män växeln stakning istället för diagonalåkning, eftersom hastigheten är för hög för att benens skär ska hinna ge tillräcklig skjuts och benen blir därmed ineffektiva. Krister Åkärbjär, tidigare nämnd i kapitel 1.1, beskriver även att 5 graders lutning (motsvarande 8,7 %) är en vanlig lutning att genomföra tester inom diagonalåkning på eftersom det möjliggör tekniskt korrekt åkning utan att bli alltför fysiskt ansträngande.

I kapitel 1.5 beskrivs att tester inom längdskidåkning ofta genomförs på rullband, eftersom detta möjliggör en förutbestämd och konstant hastighet. I en tidigare studie inom diagonalåkning, där erfarna skidåkare deltog, användes en hastighet på 9 km/h [37].

För datainsamlingen rekryterades försökspersoner, vilka indelades i två huvudsakliga grupper: en med erfarna längdskidåkare och en med oerfarna. De erfarna deltagarna hade omfattande tidigare erfarenhet av längdskidåkning, vilket innebar att de uppvisade god teknisk färdighet och omedelbart kunde förflytta sig obehindrat på skidor utan behov av introduktion eller pauser. Den oerfarna gruppen bestod av individer med ingen eller begränsad tidigare erfarenhet av längdskidåkning, där eventuella tidigare tillfällen ofta låg flera år tillbaka i tiden. Den oerfarna gruppen var ofta i behov av assistans med utrustningen och en instruktion kring hur åkningen skulle utföras.

Rekrytering av deltagare genomfördes genom ett urval där individer i projektgruppens närhet tillfrågades om frivilligt deltagande. Vid rekryteringstillfället ombads de potentiella deltagarna att redogöra sin tidigare erfarenhet inom längdskidor, i syfte att säkerställa att de uppfyllde kriterierna för att tillhöra antingen den erfarna eller den oerfarna testgruppen. Målet med rekryteringen var att respektive testgrupp skulle vara lika stor för att ha lika andelar data att analysera. Antalet deltagare i respektive testgrupp framgår i tabell 2.

**Tabell 2:** Antal deltagare i respektive testgrupp baserat på erfarenhetsnivå inom längdskidåkning.

Testgrupp	Antal
Erfarna längdskidåkare	7
Oerfarna längdskidåkare	6

Vid testet fick testpersonerna låna utrustning för att alla testpersoner skulle ha samma förutsättningar. Stavarna som användes var av märket Skisens. Stavlängden valdes till 83 % av testpersonens kroppslängd enligt [38]. Eftersom stavarna endast fanns tillgängliga i intervaller om 5 cm och avrundades längden till närmaste 5 cm. Rullskidorna var Swenor Alutech med rullmotstånd 3.

Efter att testpersonen hade tagit på sig utrustningen och mätsystemet instruerades denne att stå med jämnt fördelad vikt på båda fötterna samt med en jämn fördelning av trycket över hela fotsulan. Under denna position genomfördes kalibreringen av töjningsgivarna. När kalibreringen var slutförd och sensorerna nollställda kunde testet inledas.

För att möjliggöra tillförlitlig datainsamling med tillräcklig tidsupplösning registrerade mätsystemet data kontinuerligt under testets gång med en samplingsfrekvens på 20-25 Hz. I en tidigare version användes en Bluetooth-modul för trådlös dataöverföring, se avsnitt 3.3, men denna lösning begränsade samplingsfrekvensen till cirka 6,7-7 Hz. Den låga frekvensen berodde på att överföringshastigheten i Bluetooth-modulen inte kunde justeras, vilket påverkade systemets prestanda negativt. För att möjliggöra en högre mätfrekvens, med fler datainsamlingspunkter och därmed mer informativ data, valdes därför trådbunden dataöverföring i de genomförda mätningarna.

Deltagarna inledde med cirka tre minuters uppvärmning i form av diagonalåkning på rullbandet med syfte att vänja sig med diagonalteknik i testmiljön. Uppvärmningen genomfördes med valfri hastighet och lutning utifrån vad testpersonen upplevde som bekvämt. Därefter genomfördes varje datainsamling i 5 minuter. Då åkte varje testperson på rullbandet med en lutning på 7%. Hastigheten under testet varierade från person till person. Målet var att samtliga tester skulle genomföras vid en hastighet av 7 km/h. Lutningen och hastigheten valdes för att efterlikna tidigare tester beskrivna i kapitlet. Dock begränsades vissa deltagare av sina fysiska förutsättningar, vilket medförde att testerna för dessa individer utfördes vid en lägre hastighet. I dessa fall anpassades hastigheten individuellt och valdes så hög som möjligt utifrån deltagarens kapacitet. De individuella parametrarna för varje deltagare på rullbandet under testet redovisas nedanför i tabell 3. Under testet instruerades personerna att åka diagonalåkning så bra de kunde utifrån sina förutsättningar.

**Tabell 3:** Hastighet och lutning vid testgenomförandet för respektive deltagare.

Testperson	Testgrupp	Lutning [%]	Hastighet [km/h]
Person 1	Erfaren	7	7
Person 2	Erfaren	7	7
Person 3	Oerfaren	7	6
Person 4	Oerfaren	7	3
Person 5	Oerfaren	7	6
Person 6	Oerfaren	7	5
Person 7	Erfaren	7	7
Person 8	Oerfaren	7	5
Person 9	Erfaren	7	6
Person 10	Erfaren	7	6
Person 11	Erfaren	7	7
Person 12	Erfaren	7	7
Person 13	Oerfaren	7	6

### 4.3 Repeterbarhet hos mätsystemet

Vid utvärdering av mätsystemet noterades variation i mätdata trots kalibrerade töjningsgivarna mellan olika testtillfällen, trots identiska testförhållanden. För att analysera både omfattningen och karaktären av dessa avvikelser genomfördes specifika isolerade tester av töjningsgivarna.

Först undersöktes repeterbarheten hos töjningsgivarnas mätvärden genom ett test där tre töjningsgivare tejpades fast på respektive sula, som därefter fixerades mot golvet. Syftet med testet var att efterlikna sensorplaceringen i pjäxorna. Sensorerna nollställas i ostressat tillstånd utan att någon vikt applicerad. Därefter ställde sig en försöksperson på sulorna under cirka tio sekunder, medan mätvärden från samtliga töjningsgivare registrerades. När personen steg av sulorna nollställdes samtliga sensorer igen och efter det upprepades proceduren. Försökspersonen ombads att placera fötterna så likt föregående position som möjligt inför varje försök. Testet genomfördes totalt fem gånger.

Ytterligare ett test genomfördes på likartat sätt. Skillnaden var att sensorerna endast nollställdes en gång före samtliga försök. Utöver det ställde sig testindividen på sulorna med den gjorda kalibreringen i 10 sekunder för att sedan kliva av. Återigen upprepades testet 5 gånger.

Från testerna kunde nedanstående värden från respektive töjningsgivare avläsas, värdena från vänster och höger fot summerades även och resultaten kan ses i tabell 4. Tabellerna visar varierande värden för samtliga individuella töjningsgivare samt summeringen vid alla olika försök. Tabellerna visar också att alla sensorerna gav någon form av utslag vid varje försök.

**Tabell 4:** Maxvärden från samtliga töjningsgivare (T1-T3) samt summering med och utan nollställning mellan varje försök

(a) Töjningsgivarna nollställdes mellan varje försök.

<b>Vänster fot</b>				
<b>Försök</b>	T1	T2	T3	Summa
1	1	19	153	173
2	13	26	162	201
3	13	26	211	250
4	9	13	197	219
5	19	30	199	248

<b>Höger fot</b>				
<b>Försök</b>	T1	T2	T3	Summa
1	8	36	36	80
2	15	60	24	99
3	13	69	30	112
4	8	31	54	93
5	14	71	42	127

(b) Endast en nollställning före samtliga försök.

<b>Vänster fot</b>				
<b>Försök</b>	T1	T2	T3	Summa
1	16	79	9	104
2	12	85	21	118
3	14	29	13	56
4	14	51	17	82
5	13	39	7	60

<b>Höger fot</b>				
<b>Försök</b>	T1	T2	T3	Summa
1	15	16	205	236
2	8	28	155	191
3	5	12	200	217
4	7	32	265	304
5	4	15	257	276

Ett kompletterande test utfördes i syfte att utvärdera repeterbarheten hos individuella töjningsgivare. I detta test applicerades en kraft om 5 N upprepade gånger på samma töjningsgivare med hjälp av en kraftmätare. För att säkerställa att resultatet inte påverkades av eventuella defekter i en enskild givare genomfördes testet på två olika töjningsgivare.

**Tabell 5:** Test av repeterbarhet för två in individuella töjningsgivare genom applicering av en upprepad 5 N kraft.

<b>Upprepning</b>	<b>Kraft (N)</b>	<b>Töjningsgivare 1</b>	<b>Töjningsgivare 2</b>
1	5	53	46
2	5	42	53
3	5	54	58
4	5	62	44
5	5	58	48

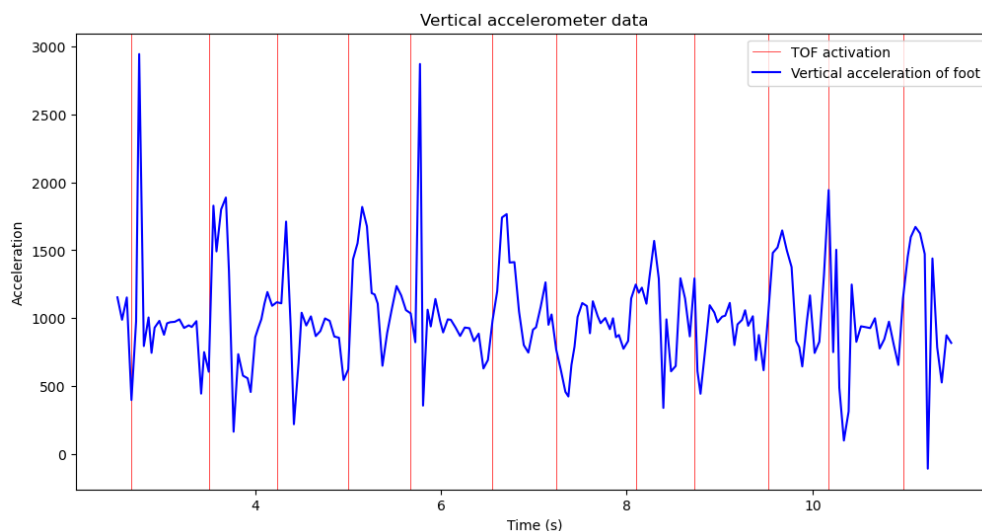
Ur tabell 5 framgick en tydlig variation i utsignalen storlek, trots att töjningsgivarna utsattes för samma kraft vid varje upprepning. De två genomförda testerna visar på en låg repeterbarhet, i den meningen att ett visst tryck inte konsekvent genererade samma utsignal vid upprepade mätningar. Detta tyder på att töjningsgivarna inte är lämpliga för att kvantitativt mäta tryckets storlek eller för att jämföra tryckets storlek mellan olika

rörelsecykler. Det innebar även att utsignalens storlek inte bör jämföras mellan olika töjningsgivare.

Trots dessa begränsningar gjordes bedömningen att givarna fortfarande kunde användas kvalitativt för att avgöra om ett tryck applicerades eller inte, samt för att identifiera relativa förändringar i tryck inom en enskild rörelsecykel, då givarna genererade högre utsignaler vid ökat tryck.

## 4.4 Skidans rörelse

För att analysera skidans rörelse och beteendemönster placerades en IMU vid testpersonernas ankel. Den insamlade data omfattade bland annat den vertikala accelerationen, vilken analyserades i obearbetat tillstånd som ett första steg.



**Figur 9:** Vertikal acceleration registrerad vid ankeln, med markeringar för aktivering av TOF-sensor.

Ett exempel på den vertikala accelerationen under en godtyckligt vald tidsperiod presenteras i figur 9. Vid genomgången av denna och övrig obearbetad data kunde ingen tydlig cyklisk trend identifieras. Att identifiera sådana mönster är av central betydelse, då diagonaltekniken kännetecknas av en regelbunden och återkommande rörelsestruktur. Den vertikala accelerationen analyserades med syftet att avgöra om det var möjligt att identifiera tidpunkten då skidan träffade underlaget. Slutsatsen var att datakvaliteten inte var tillräcklig för att möjliggöra en vidare bearbetning i detta avseende, och därmed kunde inte några tillförlitliga resultat relaterade till markkontakt extraheras.

## 5 Bearbetning av insamlad data

Efter genomförda tester krävdes en bearbetning av den obehandlade data för att möjliggöra analys och extraktion av de relevanta mätvärden kopplade till de utvalda tekniska faktorerna. För att åstadkomma detta utvecklades olika metoder och algoritmer som anpassades för att kvantifiera de betydelsefulla måtten.

### 5.1 Tidsskillnad för maxtryck och fötternas passerande

För att kunna analysera när maxtrycket inträffar i förhållande till när fötterna passerar varandra beräknades tidsskillnaden,  $\Delta t$ , mellan dessa två händelser för varje rörelsecykel enligt

$$\Delta t = t_{\text{maxtryck}} - t_{\text{passage}}. \quad (3)$$

För att identifiera tidpunkterna för maxtryck respektive fotpassage i den insamlade data gjordes två antaganden. Den första var att maxtryck sker när summan av utsignalerna från töjningsgivarna på en fot var som högst. Det andra antagandet var att fötterna passerar varandra när det uppmätta avståndet från ToF-sensorn är som minst. För att kunna extrahera tidsskillnaderna mellan maxtrycket och fotpassagen tillämpades följande algoritm i Python:

1. Medelvärdet av rörelsecyklens tidslängd uppskattades genom att beräkna det genomsnittliga tidsintervallet mellan efterföljande fotpassager.
2. Ett tröskelvärde estimerades för att definiera hur högt det uppmätta trycket behöver vara för att klassas som ett giltigt maxtryck.
3. För båda fötterna identifierades tidpunkter där maxtryck sker. Tidpunkterna parades sedan samman med närmsta tidpunkt för passeringen av fötterna. För att undvika felaktiga parindelningar behövde maxtrycket vara högre än tröskelvärdet och tidsskillnaden från föregående maxtryck vara större än medelvärdet av rörelsecyklens längd subtraherad med en felmarginal.
4. För varje fotpassage, där passeringen har kopplats samman med flera maxtryck, väljs det maxtryck som inträffade närmast fotpassagen.
5. Beräkna tidsskillnaden mellan de återstående paren enligt ekvation 3.

### 5.2 Överkroppens rörelse

Analysen för IMUn i på överkroppen gjordes genom att först vektorisera accelerationen och sedan hitta både medellängden och *root mean square* (RMS) av vektorn över hela tiden som data samlades in från försökspersonen. RMS ges av formeln  $\sqrt{\frac{1}{n}(x_1^2 + x_2^2 + \dots)}$  för en mängd

av  $n$  värden [39]. Vilka av accelerometeraxlarna som vektorn baserades på varierade, och framgår i resultatet. Överkroppens IMU data samlades in från försökspersonerna 1-4, 6, 9, 11-13, se tabell 3. Anledningen till att testpersonerna 5, 7, 8 och 10 uteslöts varierade, men berodde främst på att deras tester genererade en mindre mängd data samt att IMU:n gick sönder vid ett försök.

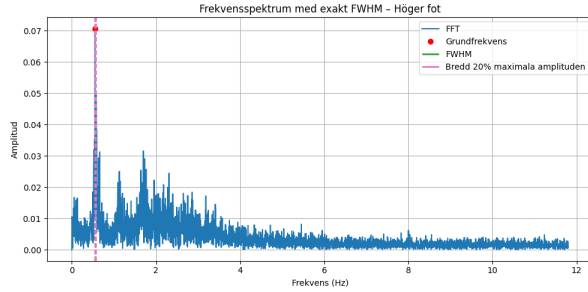
### 5.3 Frekvensbaserad bearbetning

Analys i frekvensdomänen möjliggjorde extraktion av flera mått med syftet att kvantifiera variabiliteten i respektive skidåkares rörelsemönster. På grund av misstag och bristande kommunikation vid datainsamlingen innehöll vissa testpersoners filer ett otillräckligt antal datapunkter (färre än 2000). Därtill saknade vissa filer sparade tidstämplat, vilket ledde till att några av dessa filer uteslöts från den här delen av analysen.

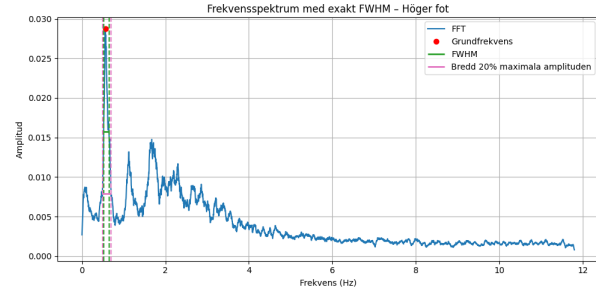
Från varje testpersons insamlade mätdata användes det antal datapunkter som den minsta filen innehöll, vilket var 5483 stycken. Vidare beräknades även den exakta samplingsfrekvensen för vardera fil med hjälp av differensen av tiden mellan första och sista mätpunkt, enligt kod från [33]. Värdena från samtliga sensorer som var fästa på respektive fot summerades till två olika signaler, en för höger fot och en för vänster fot. För att möjliggöra analys av cykliska mönster i rörelsen transformerades dessa signaler från tidsdomänen till frekvensdomänen. Det gjordes med hjälp av Discrete Fourier Transform (DFT), implementerad via *fft* kommandot från SciPy-biblioteket i Python. Frekvensen vid 0 Hz togs även bort då den inte var relevant för analysen.

För att identifiera grundfrekvensen bestämdes den frekvens som hade den största amplituden i frekvensspektrumet med hjälp av kommandot *find\_peaks* från SciPy. Grundfrekvensen relateras till hur ofta höger respektive vänster fot uppnår sitt maximala tryck och eftersom diagonalåkning är en cyklisk rörelse motsvarar den frekvensen åkarens grundläggande cykelfrekvens.

Vidare beräknades även frekvensbredden vid grundfrekvensen där amplituden nådde upp till halva sitt maximala värde, mer känt som *Full Width at Half Maximum* (FWHM). Detta gjordes för att få en uppfattning hur fokuserad signalen var kring grundfrekvensen. FWHM är ett mått som används bland annat för att bestämma den spektrala bredden i förhållande till den maximala amplituden [40]. För att förbättra uppskattningen av toppbredden tillämpades ett glidande medelvärdesfilter på frekvensspektrumet innan beräkning av FWHM. Det genomfördes med hjälp av kommandot *convolve* med fönsterstorlek 20 från Python biblioteket Numpy. Signalen i frekvensspektrumet hade annars varit brusig och svår att avläsa likt figur 10a. Olika fönsterstorlekar testades men 20 valdes då spektrumet jämnades ut tillräckligt mycket för att identifiera en stabil topp utan att förändra signalens form alltför mycket. Senare användes kommandot *peak-widths* från SciPy applicerat på grundfrekvensen för att få fram FWHM och figur 10b illustrerar ett exempel med gröna linjer som markerar FWHM vid toppen där grundfrekvensen, markerat med en röd prick, infaller.



(a) Utan glidande medelvärde.



(b) Med glidande medelvärde.

**Figur 10:** Fouriertransformerad signal av 5483 datapunkter med och utan glidande medelvärde.

Det genomfördes även beräkningar av frekvensbredden vid grundfrekvensen där amplituden nådde upp till 20 % av sitt maximala amplitud (20 %) för att möjliggöra ytterligare en mätning av bredden av grundfrekvensen. Dessa beräkningar genomfördes på ett nästintill identiskt sätt som FWHM men med *peak-widths* kommando för 20 % istället för 50 %, vilket också är utmärkt med rosa sträck i figur 10b.

För att få ut mer information om frekvensvariation beräknades även åkarnas bandbredd, vilket är ett karaktärsdrag som kan användas för att analysera frekvensinnehållet av biomedicinska signaler [41]. Det är ett mått på hur mycket varje frekvenskomponent avviker från det spektrala centret i genomsnitt. En högre bandbredd innebär att energin är mer utspridd i frekvensspektrumet.

Det spektrala centret, definierad i [42], beräknades enligt

$$f_{\text{centroid}} = \frac{f_s}{2(M-1)} \cdot \frac{\sum_{m=0}^{M-1} X_p[m] \cdot m}{\sum_{m=0}^{M-1} X_p[m]}$$

där  $f_s$  är samplingsfrekvensen,  $X_p[m]$  den fouriertransformerade signalen och  $M$  är antal punkter i signalen. Vidare beräknades bandbredden som kvadratroten av den spektrala variansen enligt [41] och [43],

$$\text{Spektral varians} = \sum_{m=0}^{M-1} (f(m) - f_{\text{centroid}})^2 \cdot p(m)$$

där  $f(m)$  är frekvensvärdet vid  $m$  och  $p(m)$  är den normaliserade energin. Ett frekvensintervall valdes för att analysera den spektrala variansen runt grundfrekvensen utan att övertonernas påverkan skulle inkluderas. Det gjordes genom att använda ett bandpassfilter av typen Butterworth via funktionen *butter* från *SciPy* med en undre brytfrekvens definierad som *grundfrekvens*-0,25 Hz och en övre brytfrekvens definierad som *grundfrekvens*+0,25 Hz. Det frekvensfönstret valdes för att analysera hur utspridd energin var runt respektive testpersons grundfrekvens.

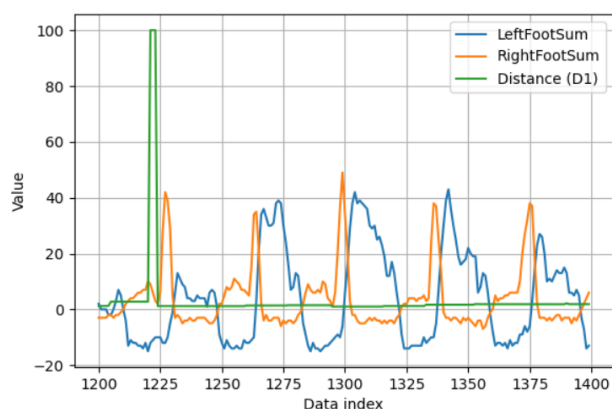
## 6 Resultat

Utifrån insamlad och bearbetad data presenteras i följande kapitel de resultat som erhållits för respektive teknisk faktor.

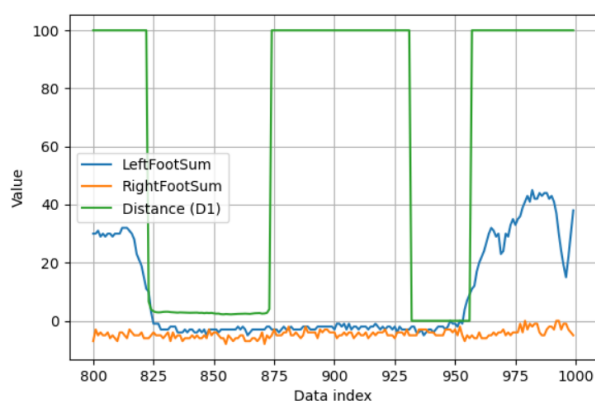
### 6.1 Tidsskillnad mellan maxtryck och passering av fötter

Efter att tidsskillnaderna mellan maxtryck och fötternas passering extraherats ur data konstaterades det att flera testpersoners data saknade antingen korrekta avståndsmätningar eller tryckmätningar.

Ur dessa data gick det inte att extrahera några rimliga tidsskillnader mellan maxtryck och fötternas passering. Detta på grund av att avståndsmätningen nästintill konstant visade ett lågt värde istället för att visa dalar när fötterna passerade varandra se exempel i figur 11a. Det berodde också på att tryckmätningarna visade endast eller till stor del brus se exempel i figur 11b.



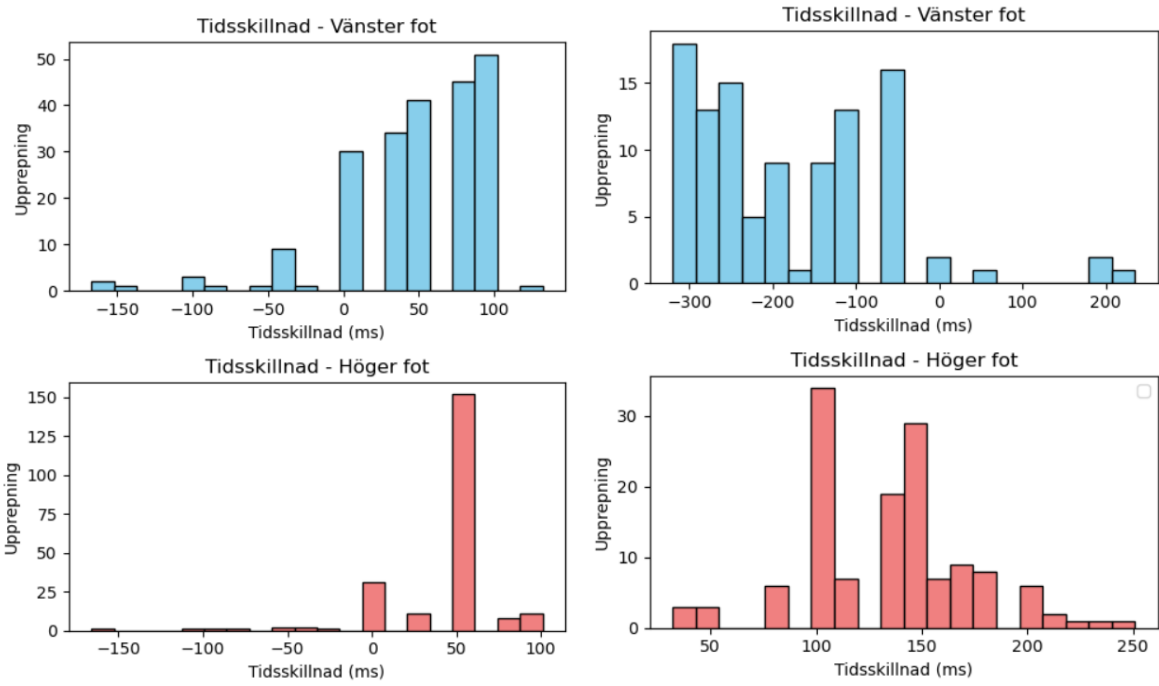
(a) Felaktig avståndsmätning. Avståndet, som i bilden representeras av den gröna grafen, visar ett i stort del konstant värde kring 0 cm.



(b) Felaktig tryckmätning. Trycket i höger fot (orange graf) visar endast brus. Trycket i vänster fot (blå graf) visar viss aktivitet men även perioder av brus.

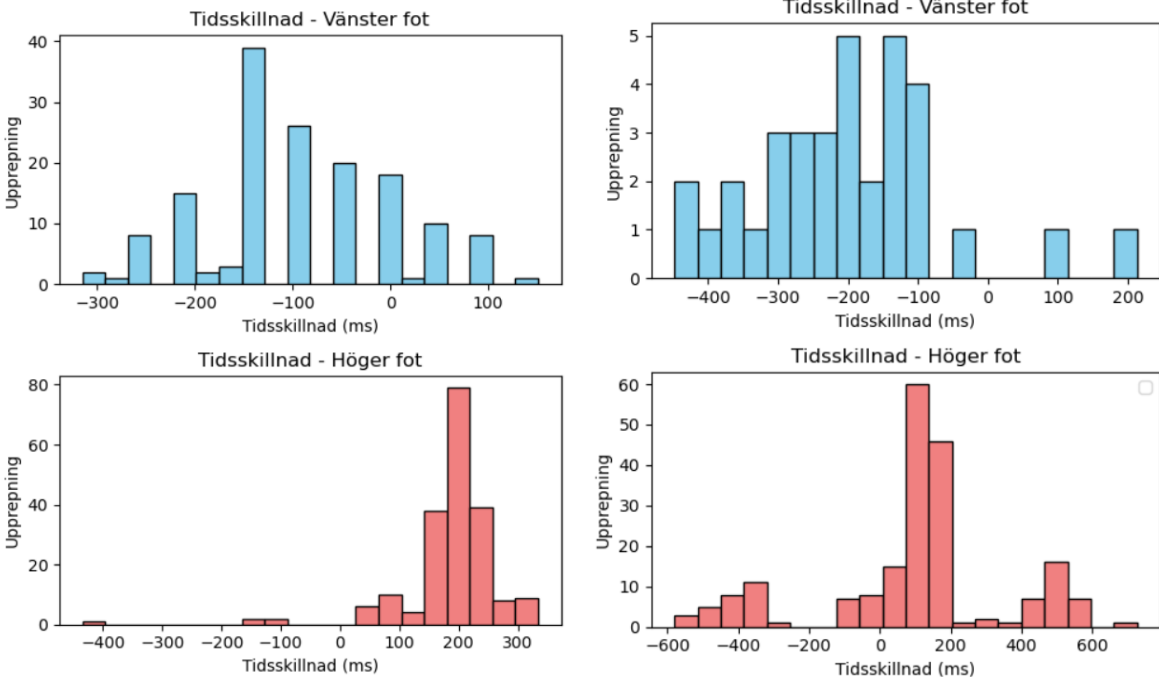
**Figur 11:** Utdrag av 200 datapunkter med olika typer av felaktiga mätningar

Av de 13 testpersonerna hade endast fyra personer, två erfarna och två oerfarna, data som till stor andel hade korrekta mätningar. Spridningen av tidsskillnaden mellan maxtryck och passeringen av fötterna under testen visualiseras genom histogram, där de blåa histogrammen visar tidsskillnaden för vänster fot och de röda visar tidsskillnaden för höger fot, se figur 12. Enligt ekvation 3 i kapitel 5.1 betyder en positiv tidsskillnad att maxtrycket sker efter att fötterna passerar varandra och en negativ tidsskillnad att maxtrycket sker innan fötterna passerar varandra. Utdrag av datasekvenser från testpersonerna histogrammen baseras på återfinns i bilaga A.2.



(a) Testperson 11 (erfaren)

(b) Testperson 2 (erfaren)



(c) Testperson 6 (oerfaren).

(d) Testperson 13 (oerfaren).

Figur 12: Spridning av tidsskillnad i ms mellan maxtryck och fötternas passering för olika testpersoner där (a) och (b) är erfarna medan (c) och (d) är oerfarna.

## 6.2 Rörelse i överkroppen

Av accelerometern på överkroppen så syns det i tabell 6 att erfarna åkare rörde sig mindre upp och ner (x-riktning) men däremot rörde det sig mer sida till sida (y-riktning) och fram och bak (z-riktning).

**Tabell 6:** Medelvärde och root mean square (RMS) av överkroppens acceleration i olika riktningar på erfarna och oerfarna åkare.

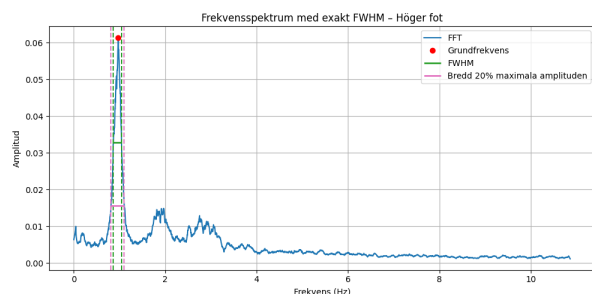
Medelvärde			
Grupp	x	y	z
Erfarna åkare	877,4	260,0	309,2
Oerfarna åkare	949,7	218,5	178,0

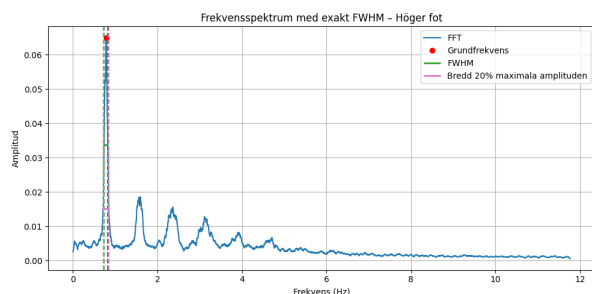
RMS			
Grupp	x	y	z
Erfarna åkare	908,1	343,8	301,7
Oerfarna åkare	965,4	218,1	252,2

## 6.3 Variabilitet av frekvens

Vid analys i frekvensdomänen kunde FWHM samt 20 %-bredden vid grundfrekvensens extraheras på ett jämförbart och tillförlitligt sätt för åtta av testpersonerna (fyra erfarna och fyra oerfarna åkare). Ett exempel på frekvensspektrumet från en oerfaren åkare, där både FWHM och 20 %-bredden markerats tillsammans med grundfrekvensen, visas i figur 13a. I figur 13b visas motsvarande frekvensspektrum för en erfaren åkare där en tydligt smalare topp kring grundfrekvensen kan observeras.



(a) Frekvensspektrum från sekvens av oerfaren åkare (Testperson 3).



(b) Frekvensspektrum från sekvens av erfaren åkare (Testperson 11).

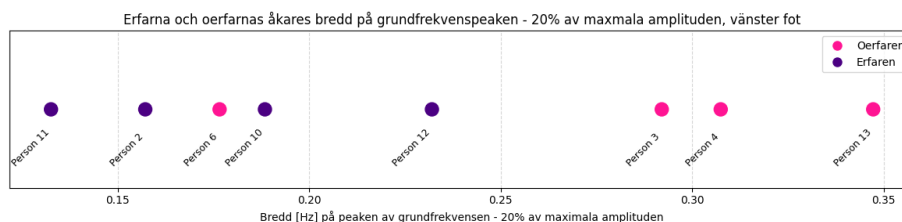
**Figur 13:** Jämförelse av frekvensspektra mellan oerfaren (a) och erfaren (b) åkare med grundfrekvensen, FWHM samt 20 %-bredden utmärkt.

De åtta testpersonernas mätningar som inkluderades i denna del av analysen uppvisade skillnad i samplingsfrekvens vilket redovisas i tabell 7. Tabellen redogör också samtliga personers grundfrekvens för höger respektive vänster fot, vilket för samtliga deltagare var identisk.

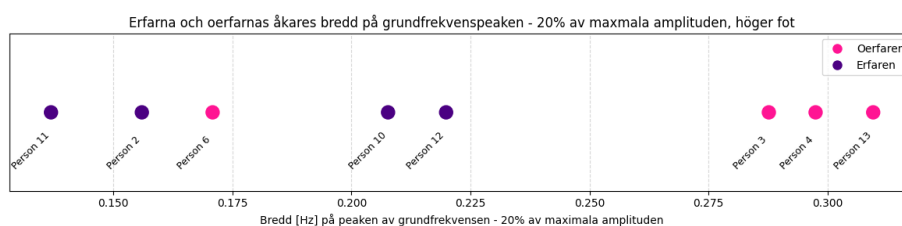
Tabell 7: Grundfrekvens för höger och vänster fot samt samplingsfrekvens från mätningen.

Testperson	samlingsfrekvens [Hz]	Grundfrekvens Höger [Hz]	Vänster [Hz]
Person 2, erfaren	21,07	0,68	0,68
Person 3, oerfaren	21,74	0,97	0,97
Person 4, oerfaren	21,75	0,75	0,75
Person 6, oerfaren	20,95	0,69	0,69
Person 10, erfaren	23,61	0,56	0,56
Person 11, erfaren	23,54	0,79	0,79
Person 12, erfaren	24,37	0,75	0,75
Person 13, oerfaren	25,05	0,80	0,80

Testpersonerna uppvisade olika värden på 20 %-bredden av grundfrekvensen, vilket redogörs i figur 14. Bredden för deltagarna varierar från cirka 0,14 Hz upp till 0,33 Hz. Där syns även att tre av de fyra oerfarna åkarna uppvisade bredare värden än samtliga erfarna åkare vid analyser av signaler från både vänster och höger fot.



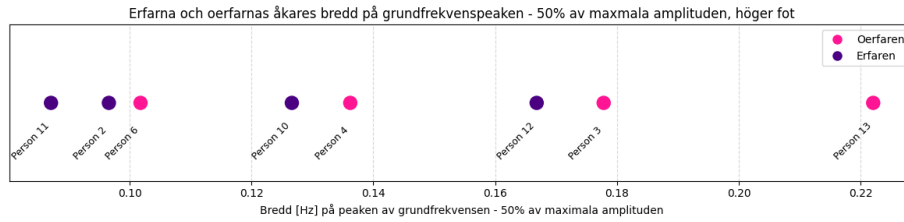
(a) Vänster fot.



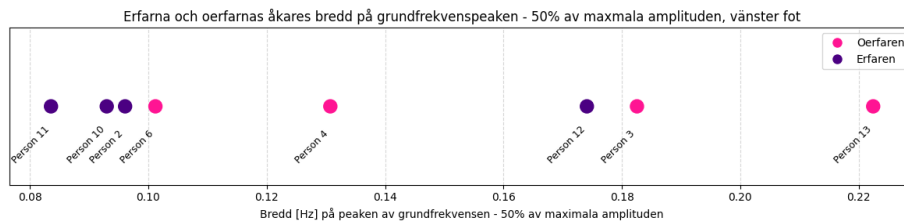
(b) Höger fot.

Figur 14: 20%-bredden [Hz] på grundfrekvensen för respektive fötter där erfarna och oerfarna åkare kan urskiljas.

När bredden mättes vid halva amplituden av grundfrekvensen (FWHM) kunde värdena för höger respektive vänster fot avläsas enligt figur 15. Skillnaderna mellan samtliga åkare var mindre jämfört med skillnaden vid 20 % av amplituden och värdena sträckte sig nu från cirka 0,09 Hz till 0,22 Hz. Skillnaderna mellan de erfarna och oerfarna åkarna var nu något mindre, av de fyra högsta värdena tillhörde tre av dessa en oerfaren åkare för både vänster och höger fot.



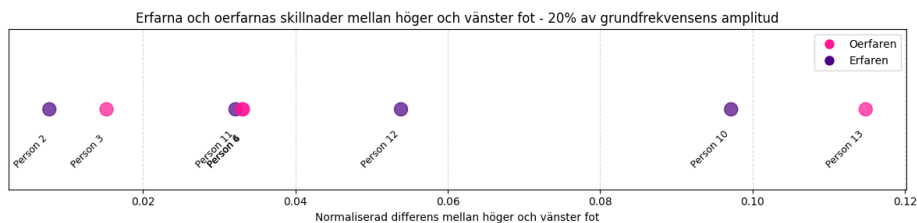
(a) Vänster fot.



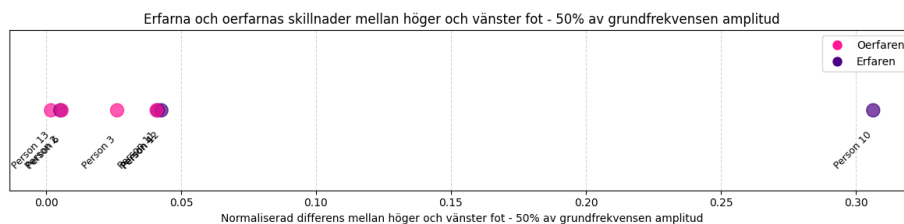
(b) Höger fot.

**Figur 15:** FWHM för grundfrekvensen för respektive fötter där erfarna och oerfarna åkare kan urskiljas.

Vid jämförelser av signalernas beteende från höger respektive vänster fot beräknades en differens mellan höger och vänster fot för varje uppmätta bredd som även var normaliserad mot respektive bredd av grundfrekvensen. Värdena för respektive person för både 20%-bredden och FWHM av grundfrekvensen kan ses i figur 16. Ingen större skillnad uppvisas beroende på erfaren eller oerfaren åkare.



(a) 20 %-bredden.



(b) FWHM (50 % av halva amplituden).

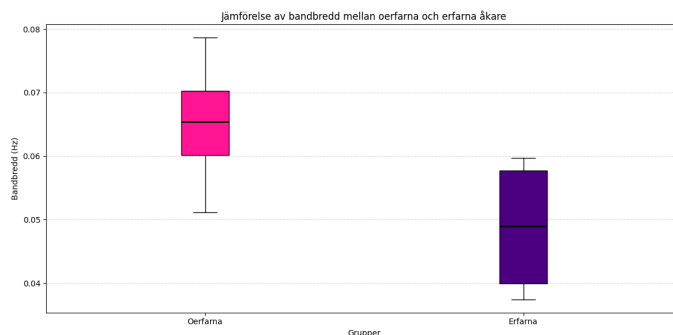
**Figur 16:** Differensen mellan vänster och höger fot vid uppmätta bredder i frekvensspektrumet kring grundfrekvensen, normaliserad mot varje åkares respektive bredder.

I tabell 8 syns en sammanställning över medelvärdet ( $\bar{x}$ ), det minsta värdet (Min) och det största värdet (Max) för båda gruppernas resultat. Där representerar rubrikerna 20%-bredd, FWHM och Grundfrekvens ett genomsnitt av vänster och höger fot. Diff höger/vänster representerar skillnaden mellan vänster och höger fot där ett genomsnitt av resultat från 20 % samt FWHM har tagits.

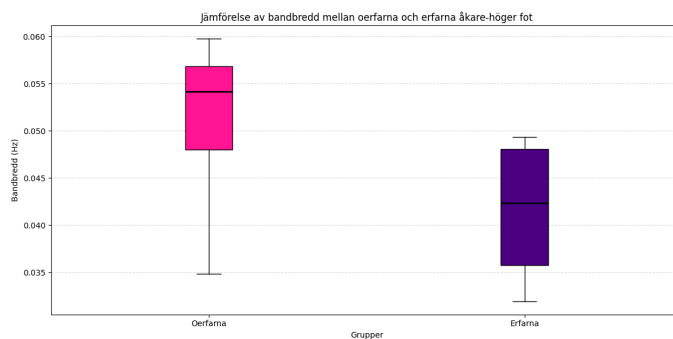
**Tabell 8:** Sammanställning av bredd vid 20 % av amplituden, FWHM, grundfrekvens och differens mellan höger och vänster fot för båda testgrupperna.

Grupp	20%-bredd [Hz]			FWHM [Hz]			Grundfrekvens [Hz]			Diff höger/vänster		
	$\bar{x}$	Min	Max	$\bar{x}$	Min	Max	$\bar{x}$	Min	Max	$\bar{x}$	Min	Max
Oerfaren	0,274	0,174	0,328	0,159	0,101	0,222	0,801	0,688	0,971	0,034	0,019	0,058
Erfaren	0,179	0,135	0,226	0,115	0,085	0,170	0,692	0,560	0,785	0,073	0,007	0,202

I figur 17a och 17b visualiseras testpersonernas bandbredd inom frekvensfönstret grundfrekvens  $\pm 0,25$  Hz med hjälp av boxdiagram. Diagrammen visar medianvärde, minsta och största värde markerade med svarta streck. Ett separat boxdiagram presenteras för signalerna från vänster respektive höger fot. Denna visualisering möjliggör jämförelse av bandbreddens variation mellan de två testgrupperna. Där kan det observeras att de oerfarna åkarna uppvisade högre min, max och median värden på bandbredden jämfört med de erfarna.



(a) Vänster fot.



(b) Höger fot.

**Figur 17:** Boxdiagram som visar bandbredden [Hz] för de oerfarna och erfarna åkarna inom frekvensintervallet *grundfrekvens*  $\pm 0,25$  Hz.

## 6.4 Cykellängd

Utifrån testpersonernas individuella hastigheter ( $v$ ) beskrivna i kapitel 4.2 samt de beräknade grundfrekvenserna i kapitel 6.3 kan åkarnas cykellängd beräknas enligt

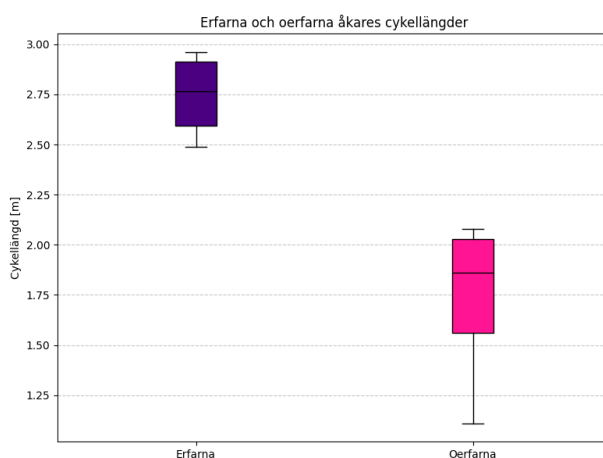
$$\text{cykellängd} = \frac{v}{\text{cykelfrekvens}}. \quad (4)$$

Grundfrekvensen motsvarar den dominerade cykelfrekvensen för åkaren. I tabell 9 är åkarnas cykelfrekvenser, cykellängder och hastigheter sammanställda. Hastigheterna är omvandlade från km/h till m/s.

**Tabell 9:** Relationen mellan hastighet, cykelfrekvens och cykellängd för åkarna.

Testperson	Hastighet [m/s]	Cykelfrekvens [Hz]	Cykellängd [m]
Person 2, erfaren	1,97	0,68	2,90
Person 3, oerfaren	1,66	0,97	1,71
Person 4, oerfaren	0,83	0,75	1,10
Person 6, oerfaren	1,39	0,69	2,01
Person 10, erfaren	1,66	0,56	2,96
Person 11, erfaren	1,97	0,79	2,49
Person 12, erfaren	1,97	0,75	2,63
Person 13, oerfaren	1,66	0,80	2,08

I figur 18 syns den oerfarna respektive erfarna gruppens median samt maximala och minsta värde för cykellängderna. Samtliga erfarna åkare innehar längre cykellängder jämfört med de oerfarna.



**Figur 18:** Boxdiagram med median, minsta och maximala värdet för cykellängderna utmärkta med svarta sträck för varje testgrupp.

## 7 Diskussion och vidareutveckling

Detta kapitel syftar till att analysera och tolka resultaten utifrån arbetets syfte, mål och delmål. Vidare diskuteras även potentiell vidareutveckling av arbetet.

### 7.1 Utvärdering av mätsystemet

Från kapitel 4.3 framgår det tydligt att töjningsgivarna är känsliga för hur de belastas. Detta beror förmodligen på att de är konstruerade på ett sådant sätt som gör de väldigt känsliga för hur tryck appliceras. Denna variation medförde svårigheter att använda töjningsgivarnas absoluta värden, vilket i sin tur försvårade kvantifieringen av vissa tekniska faktorer. Exempelvis var det svårt att bedöma tryckets fördelning i pjäxan, då givarna uppvisade för stor variation mellan försöken. Trots detta kunde givarna fortfarande användas för att avläsa varje sensors relativa toppar och när de utsattes för tryck och inte.

En annan viktig aspekt att ha i åtanke är placeringen av samtliga sensorer. Trots försök till konsekvent montering uppstår små skillnader i placering mellan olika mätningar och testpersoner. Detta påverkar reproducerbarheten och därmed mätresultaten.

Töjningsgivare, IMUs och ToF-sensorn är känsliga för brus och mätfel. Även efter filtrering kan små fel i mätvärden kvarstå och påverka noggrannheten hos data. Brusig data försämrar modellens förmåga att identifiera mönster och samband vilket kan leda till felaktiga analyser. Till slut kan längdskidåkaren, på grund av störningarna i mätdata, få felaktig utvärdering av sin åkteknik. För att minska denna påverkan kan framtida arbeten införa mer avancerade filtreringsmetoder och använda sensorer av högre kvalitet.

Inga tillförlitliga resultat kunde extraheras i avseende när och hur skidan träffar underlaget. En möjlig orsak till detta är placeringen av IMUn. Trots att dess syfte var att generera data relaterad till skidans rörelsemönster, monterades sensorn på pjäxan, i höjd med ankeln. Denna placering visade sig vara olämplig, dels på grund av att sensorn förflyttades något under åkningen, dels för att den inte kunde registrera skidans rörelse med tillräcklig noggrannhet. En bättre lösning vore att placera IMUn direkt på skidan, vilket sannolikt skulle möjliggöra en mer precis mätning av dess kontakt med underlaget och generera mer tillförlitliga data.

### 7.2 Diskussion av data

En betydande begränsning i arbetets datainsamling är storleken på testgruppen. Ett större antal deltagare samt fler kompletta datafiler hade kunnat bidra till ökad tillförlitlighet i resultaten. Testpersonerna som deltog hade varierande erfarenhet av längdskidåkning, vilket möjliggjorde en indelning i grupperna erfarna och oerfarna åkare. Det är dock viktigt att notera att det även inom dessa grupper fanns skillnader i både erfarenhet och teknisk färdighet. Bedömningen inkluderade även en viss grad av subjektivitet, och i framtida arbeten skulle standardiserade och objektiva kriterier för bedömning av åkteknik vara fördelaktiga. En mer nyanserad gruppindelning, exempelvis med fem nivåer av teknisk färdighet i stället för två, hade kunnat möjliggöra en finare analys av åkteknik

och gjort det lättare att identifiera även mindre framsteg. Detta är särskilt relevant om systemet i framtiden ska användas för individuell återkoppling och teknikförbättring, där även små utvecklingssteg bör kunna mätas och visualiseras.

Eftersom deltagarna inte åkte i samma hastighet kan deras rörelsemönster och kraftutveckling ha påverkats. Standardiserade tester i flera olika hastigheter för samtliga deltagare hade kunnat öka resultatens tillförlitlighet. Vidare togs ingen hänsyn till variationer i kroppstyp mellan testpersonerna. Optimal teknik kan variera beroende på faktorer som kroppslängd, vikt och kroppsbyggnad, vilket innebär att en rörelse som är effektiv för en individ inte nödvändigtvis är det för en annan.

## 7.3 Diskussion av resultat

I följande delkapitel diskuteras resultaten med fokus på de tekniska faktorer som har extraherats från insamlad data.

### 7.3.1 Tidsskillnader mellan maxtryck och fotpassage

Från de resulterande histogrammen i kapitel 6.1 kan det för testperson 11 avläsas att majoriteten av maxtrycken sker inom 100 ms efter att fötterna passerar varandra som framgår i figur 12a. Denna korta tidsskillnad är förenlig med tidigare beskrivningar av ett optimalt rörelsemönster, där maxtrycket bör ske samtidigt som fotpassagen se kapitel 2.1.1. Histogrammen för den andra erfarna åkaren uppvisar en liknande fördelning för höger fot, där majoriteten av maxtrycken registreras inom 200 ms efter att fötterna passerat varandra se figur 12b. För vänster fot däremot, uppvisar histogrammet en större variation i tidsskillnader, med en majoritet av maxtryck som sker innan fötterna passerat varandra. Det skiljer sig därmed markant mellan tidsskillnaderna för höger och vänster ben.

Vid granskning av individuella datasekvenser, se exempel i figur 20 i bilaga A.2, framgår det att tryckkurvan för vänster ben ofta saknar en tydligt avgränsad topp och i stället uppvisar en dubbeltopp. Det här skulle kunna förklara den observerade spridningen i tidsskillnader. Den algoritm som användes för att para ihop maxtryck med tidpunkten för fotpassage baseras på ett tröskelvärde för tryckets topphöjd, samt tidsavståndet till föregående detekterade topp. I de fall där båda topparna i en dubbeltopp överskrider tröskelvärdet och tidsintervallet sedan föregående topp är tillräckligt långt, väljs den topp som ligger närmast fotpassagen. Något som kan leda till att fotpassagen i vissa fall paras ihop med den första toppen och i andra fall med andra toppen, som i sin tur kan skapa en större spridning i tidsskillnaderna.

Histogrammen från de oerfarna testpersonerna visar också en stor spridning, framförallt i tidsskillnaden för det vänstra benet, se figur 21 och 22. På liknande sätt som den erfarna testpersonen 2 uppvisar båda testpersonerna en majoritet av negativa tidsskillnader för den vänstra foten, medan tidsskillnaderna för höger fot tenderar att vara positiva. Detta kan tyda på att testpersonerna uppvisar asymmetriska rörelsemönster beroende på vilket ben de primärt skjuter ifrån med. Det är dock viktigt att betona att det begränsade data-materialet innebär att dessa observationer även kan bero på mätosäkerheter i hårdvaran

eller på felaktiga parindelningar mellan trycktoppar och fotpassager i den algoritm som beräknar tidsskillnaden. För att kunna dra mer tillförlitliga slutsatser krävs därför ytterligare datainsamling för att bättre förstå och verifiera det observerade mönstret.

### 7.3.2 Frekvensanalys som mått på rörelsevariabilitet

I kapitel 2 beskrivs att ett mer samlat frekvensspektrum kan indikera på ett stabilare och mer kontrollerat rörelsemönster vilket är mer energieffektivt. Utifrån resultaten i kapitel 6.4 uppvisade de erfarna åkarna i större utsträckning ett mer samlat frekvensspektrum, enligt både FWHM och 20 %-bredden. Det beror troligen på att de åker mer kontinuerligt jämfört med de oerfarna åkarna. De erfarna åkarna hade även ett lägre medianvärde på bandbredden i det valda frekvensfönstret, se figur 17a och 17b, vilket också tyder på att en större andel av signalens energi är koncentrerad kring grundfrekvensen. Testgruppen var dock relativt liten vilket gör det svårt dra helt säkra slutsatser. Ytterligare osäkerhet tillkommer i mätsystemet och varierande samplingsfrekvenser för deltagarna. Skillnaderna mellan grupperna vad gäller differensen mellan höger och vänster fot var små, och resultaten påverkades sannolikt av några få utstickande värden, vilket försvårar tolkningen.

Sammantaget visar resultaten att spridningen i frekvensspektrumet från töjningsgivarnas signaler potentiellt kan användas som ett mått på rörelsemönstrets variabilitet hos åkare. En begränsning med denna typ av mått är dock att de är svåra att tillämpa i traditionell skidåkning, där yttre faktorer som varierande lutning och snötyp gör att variation i rörelsemönster ibland är fördelaktig. Det är också viktigt att poängtera att frekvensspridningen inte säger något huruvida rörelserna genomförs korrekt. Exempelvis kan en skidåkare ha en pendelrörelse med armen som genererar mindre kraft jämfört med en optimal pendelrörelse men fortfarande åka kontinuerligt och med lite variationer.

### 7.3.3 Skillnader i cykellängder

Enligt kapitel 2.1.5 tenderar erfarna åkare att uppvisa en längre cykellängd och detta bekräftas också enligt resultat i kapitel 6.4 där samtliga erfarna åkare uppvisade längre cykellängd jämfört med de oerfarna. Även om cykelfrekvens och cykellängd är individuella parametrar för alla skidåkare så är det ändå möjligt att se skillnader mellan grupperna. Då en ökning av cykellängd med bibehållen naturlig cykelfrekvens skulle kunna förbättra prestationsnivån är mätning av cykellängd ett relevant mått för skidåkare för att utvärdera sin teknik.

## 7.4 Möjliga utvecklingsområden

Arbetet har genomförts inom en begränsad tidsram och en begränsad budget, vilket medfört att vissa av delmålen som formulerats i kapitel 1.4 inte har kunnat uppnås. Dessa utgör dock en grund för framtida vidareutveckling av det framtagna systemet.

För att höja kvaliteten på bedömningen och återkopplingen av längdskidåkningsteknik kan fler sensorer integreras i mätsystemet. I detta projekt har ingen data samlats in från stavarna, vilket begränsar teknikanalysen. Genom att exempelvis integrera trycksensorer och IMUer i stavarna, liksom Skisens, kan systemet samla in mer rörelsedata och därmed möjliggöra en mer nyanserad och korrekt återkoppling till åkaren. Utöver att mäta mekaniska parametrar som kraft, rörelse och position, finns även potential att implementera sensorer som registrerar fysiologisk data, såsom puls. Genom att integrera denna typ av data får systemet en bättre förståelse för åkarens fysiska tillstånd under aktiviteten. Det kan ge insikt i hur olika tekniker påverkar kroppens belastning och möjliggöra mer individualiserad och nyanserad återkoppling. Detta kan vara särskilt värdefullt vid analys av trötthet och anpassning av teknik efter åkarens fysiska kapacitet.

Den huvudsakliga delen som inte har implementerats är möjligheten att klassificera åkarens teknik och ge direkt återkoppling. För att uppnå detta mål krävs en vidareutveckling av systemet. Ett nödvändigt steg på vägen mot automatiserad återkoppling är att kunna identifiera skillnader i data mellan erfarna och oerfarna skidåkare, vilket delvis har uppnåtts i kapitel 6. Här visade flera av de analyserade måtten på tydliga skillnader mellan grupperna. Ett möjligt nästa steg skulle kunna vara att använda dessa skillnader för att klassificera åkarens tekniska nivå och ge feedback på de områden som behöver förbättras för att uppnå en högre prestation i diagonalteknik.

En sista aspekt som skulle kunna förbättra systemets förmåga att bedöma åkteknik är införandet av ett mått på åkarens effektivitet. Med effektivitet avses förhållandet mellan den kraft som används för att driva åkaren framåt och den totala insats av kraft som åkaren genererar. Effektivitet är en central aspekt inom teknikträning, eftersom målet är att maximera hastighet och distans med minimal energiförbrukning. Genom att mäta och förbättra effektiviteten kan åkaren optimera sin prestation och använda sin energi på bästa sätt. I teorin hade detta kunnat göras genom att jämföra kraften som åkaren utövar med kraften som går åt att komma framåt. Den nedlagda kraften kan uppskattas genom att summera alla krafter från bland annat stavarnas, pjäxornas och kroppsdelarnas rörelser. Den framåtriktade kraften kan uppskattas utifrån åkarens acceleration. Förhållandet mellan dessa värden kan ge mått på effektiviteten.

## 8 Etiska aspekter

I en potentiell framtid där en fullbordad produkt framställts medförs vissa etiska aspekter. Exempelvis finns det en risk att mätsystemet ger en felaktig utvärdering av åktekniken. Om den genererade analysen inte överensstämmer med individens faktiska rörelsemönster eller behov, finns en risk att användaren anpassar sin teknik på ett sätt som inte är optimalt. En felaktig anpassning av teknik kan i värsta fall leda till en ökad skaderisk till följd av oergonomiska rörelseutföranden.

En annan etisk aspekt med detta arbete är tillgången till tekniken. En specialanpassad pjäxa utrustad med sensorer kommer sannolikt att bli dyrare än en vanlig pjäxa. Det innebär att en framtida produkt baserad på detta arbete främst skulle vara tillgänglig för individer med ekonomiska resurser. Detta leder till en ökad sannolikhet för att endast dessa personer får möjlighet att utveckla sin åkteknik med hjälp av tekniken och det bidrar då till en ökad ojämlikhet inom idrotten.

## 9 Slutsatser

Syftet med kandidatarbetet var att undersöka hur tekniska hjälpmedel kan stödja skidåkare i att självständigt förbättra och utveckla sin teknik. Den utvecklade prototypen visade att det var möjligt att särskilja erfarna från oerfarna längdskidåkare baserat på mätdata som beskriver rörelsemönster. Särskilt rörelser i överkroppen, cykellängder och variabiliteten i frekvensen var parametrar som tydligt skilde de två grupperna åt. Andra mätvärden, såsom tidsskillnaden mellan maximalt tryck och fötternas passerande, gav mer osäkra resultat, vilket visade på behovet av ytterligare utveckling. Vissa parametrar, som skidans lutning mot underlaget och tryckfördelningen i pjäxan, kunde inte analyseras på grund av tekniska begränsningar i mätsystemet.

Trots dessa begränsningar identifierade studien flera lovande variabler som kan användas i vidare utveckling. Resultaten visar att det är möjligt att, med rätt tekniska lösningar, skapa ett system som kan ge användbar feedback baserat på åkarens tekniska nivå. Även om det ursprungliga målet om en helt självständig prototyp som ger återkoppling på skidåkarens teknik inte helt uppnåddes, markerar projektet ett viktigt steg i utvecklingen av tekniska hjälpmedel för att stödja skidåkare. Att kunna urskilja skillnader i teknik och skicklighet mellan erfarna och oerfarna åkare är en nödvändig förutsättning för att kunna skapa verktyg som möjliggör självständig teknikutveckling.

## Referenser

- [1] C. Zoppirolli, K. Hébert-Losier, H.-C. Holmberg och B. Pellegrini, "Biomechanical determinants of cross-country skiing performance: A systematic review," *Journal of Sports Sciences*, årg. 38, nr 18, s. 2127–2148, 16 sept. 2020, Publisher: Routledge \_eprint: <https://doi.org/10.1080/02640414.2020.1775375>, issn: 0264-0414. doi: 10.1080/02640414.2020.1775375. URL: <https://doi.org/10.1080/02640414.2020.1775375> (hämtad 2025-03-07).
- [2] *Tekniker för längdskidor*. URL: [https://www.langdskidor.se/skidteknik/?fbclid=IwZXh0bgNhZWQCMTEAAR0qrf3467fiDkAMXkCJ3ozunH0tOMpvQpfsfI9-30EMcaNJWpU1D\\_kgSTY\\_aem\\_HjP0gD-w91FtF59dtgovVg](https://www.langdskidor.se/skidteknik/?fbclid=IwZXh0bgNhZWQCMTEAAR0qrf3467fiDkAMXkCJ3ozunH0tOMpvQpfsfI9-30EMcaNJWpU1D_kgSTY_aem_HjP0gD-w91FtF59dtgovVg) (hämtad 2025-02-04).
- [3] M. Ainegren, P. Carlsson, M. Tinnsten och M. S. Laaksonen, "Skiing economy and efficiency in recreational and elite cross-country skiers," *The Journal of Strength & Conditioning Research*, årg. 27, nr 5, s. 1239, maj 2013, issn: 1064-8011. doi: 10.1519/JSC.0b013e31824f206c. URL: [https://journals.lww.com/nsca-jscr/fulltext/2013/05000/skiing\\_economy\\_and\\_efficiency\\_in\\_recreational\\_and.10.aspx](https://journals.lww.com/nsca-jscr/fulltext/2013/05000/skiing_economy_and_efficiency_in_recreational_and.10.aspx) (hämtad 2025-02-07).
- [4] J. Nilsson, P. Tveit och O. Eikrehagen, "Cross-Country Skiing: Effects of speed on temporal patterns in classical style and freestyle cross-country skiing," *Sports Biomechanics*, årg. 3, nr 1, s. 85–108, 2004, Publisher: Routledge, issn: 1476-3141. doi: 10.1080/14763140408522832. URL: <https://doi.org/10.1080/14763140408522832> (hämtad 2025-02-11).
- [5] *Svenska skidförbundets tävlingsregler, längdskidåkning*, 1 nov. 2024. URL: <https://www.skidor.com/download/18.215aee8e1938cf5d61b28729/1733352450950/T%C3%A4vlingsregler%201%C3%A4ngd%C3%A5kning%202025.pdf> (hämtad 2025-02-04).
- [6] M. Takeda, N. Miyamoto, T. Endo m. fl., "Cross-Country Skiing Analysis and Ski Technique Detection by High-Precision Kinematic Global Navigation Satellite System," *Sensors*, årg. 19, nr 22, s. 4947, jan. 2019, Number: 22 Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute, issn: 1424-8220. doi: 10.3390/s19224947. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/19/22/4947> (hämtad 2025-03-06).
- [7] "Köpguide - Längdskidor, Skateskidor längd." (), URL: <https://polder.se/kopguider/kopguide-langdskidor> (hämtad 2025-02-14).
- [8] *Lär dig grunderna i tekniken och den klassiska åkningens fem växlar*. sv-SE. URL: <https://www.vasaloppet.se/lopp/skidlopp/tjejvasan/trana/teknik/> (hämtad 2025-02-07).
- [9] *Diagonalåkning och rullskidor*, sv-SE, Section: Digital teknik, aug. 2016. URL: <https://www.vasaloppet.se/bloggar/christernorstrom/diagonalakning-och-rullskidor/> (hämtad 2025-04-22).
- [10] P. Carlsson, M. Ainegren, M. Tinnsten m. fl., "Cross-Country Ski," en, i *The Engineering Approach to Winter Sports*, F. Braghin, F. Cheli, S. Maldifassi, S. Melzi och E. Sabbioni, utg., New York, NY: Springer, 2016, s. 107–151, isbn: 978-1-4939-3020-3. doi: 10.1007/978-1-4939-3020-3\_5. URL: [https://doi.org/10.1007/978-1-4939-3020-3\\_5](https://doi.org/10.1007/978-1-4939-3020-3_5) (hämtad 2025-03-05).

- [11] E. Andersson, B. Pellegrini, Ø. Sandbakk, T. Stöggl och H.-C. Holmberg, "The effects of skiing velocity on mechanical aspects of diagonal cross-country skiing," *Sports Biomechanics*, årg. 13, nr 3, s. 267–284, 2014. doi: 10.1080/14763141.2014.921236. URL: <https://doi.org/10.1080/14763141.2014.921236>.
- [12] T. Stöggl, S. Lindinger och E. Müller, "Reliability and Validity of Test Concepts for the Cross-Country Skiing Sprint," en, *Medicine & Science in Sports & Exercise*, årg. 38, nr 3, s. 586–591, mars 2006, issn: 0195-9131. doi: 10.1249/01.mss.0000190789.46685.22. URL: <https://journals.lww.com/00005768-200603000-00026> (hämtad 2025-03-05).
- [13] M. Ma, S. Zhao, T. Long, Q. Song, H.-C. Holmberg och H. Liu, "Comparative Analysis of the Diagonal Stride Technique during Roller Skiing and On-Snow Skiing in Youth Cross-Country Skiers," en, *Sensors*, årg. 24, nr 5, s. 1412, febr. 2024, issn: 1424-8220. doi: 10.3390/s24051412. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/24/5/1412> (hämtad 2025-03-05).
- [14] F. Cignetti, F. Schena, P. G. Zanone och A. Rouard, "Dynamics of coordination in cross-country skiing," *Human Movement Science*, årg. 28, nr 2, s. 204–217, 1 april 2009, issn: 0167-9457. doi: 10.1016/j.humov.2008.11.002. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167945709000153> (hämtad 2025-04-08).
- [15] B. Bilodeau, K. W. Rundell, B. Roy och M. R. Boulay, "Kinematics of cross-country ski racing," en-US, *Medicine & Science in Sports & Exercise*, årg. 28, nr 1, s. 128, jan. 1996, issn: 0195-9131. URL: [https://journals.lww.com/acsm-msse/fulltext/1996/01000/kinematics\\_of\\_cross\\_country\\_ski\\_racing.24.aspx](https://journals.lww.com/acsm-msse/fulltext/1996/01000/kinematics_of_cross_country_ski_racing.24.aspx) (hämtad 2025-05-09).
- [16] T. Stöggl, B. Pellegrini och H.-C. Holmberg, "Pacing and predictors of performance during cross-country skiing races: A systematic review," *Journal of Sport and Health Science*, årg. 7, nr 4, s. 381–393, 2018. doi: 10.1016/j.jshs.2018.09.005.
- [17] C. Fadillioglu, F. Möhler, M. Reuter och T. Stein, "Changes in Key Biomechanical Parameters According to the Expertise Level in Runners at Different Running Speeds," *Bioengineering*, årg. 9, nr 11, s. 616, 2022. doi: 10.3390/bioengineering9110616. (hämtad 2025-04-15).
- [18] E. Sejdić, K. A. Lowry, J. Bellanca, M. S. Redfern och J. S. Brach, "A Comprehensive Assessment of Gait Accelerometry Signals in Time, Frequency and Time-Frequency Domains," *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, årg. 22, nr 3, s. 603–612, maj 2014, issn: 1558-0210. doi: 10.1109/TNSRE.2013.2265887. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6525404> (hämtad 2025-04-16).
- [19] *PRODUKTEN — SKISENS*, sv-SE. URL: <https://skisens.se/produkten/> (hämtad 2025-03-06).
- [20] "Carv - your digital ski coach. Learn how to ski with better technique.," Carv. (), URL: <https://getcarv.com/> (hämtad 2025-03-06).
- [21] E. Wickström, *WeMeMove-test*, sv-SE, juli 2016. URL: <https://erikwickstrom.se/2016/07/28/wememove-test/> (hämtad 2025-03-06).
- [22] *Archinisis - Cross-Country Skiing Performance Analysis*, en. URL: [https://www.archinisis.ch/sports/cross-country\\_skiing.html](https://www.archinisis.ch/sports/cross-country_skiing.html) (hämtad 2025-03-11).

- [23] *Footwear pressure distribution measurement- pedar*, en-US. URL: <https://nove1.de/products/pedar/> (hämtad 2025-03-11).
- [24] B. Fang, F. Sun, H. Liu och C. Liu, "3D human gesture capturing and recognition by the IMMU-based data glove," *Neurocomputing*, Hierarchical Extreme Learning Machines, årg. 277, s. 198–207, 14 febr. 2018, issn: 0925-2312. doi: 10.1016/j.neucom.2017.02.101. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925231217314054> (hämtad 2025-05-08).
- [25] "Strain gauges," <https://www.dwyeromega.com/en-us/>. (), URL: <https://www.dwyeromega.com/en-us/resources/strain-gages> (hämtad 2025-05-07).
- [26] S. Jain och K. Singh, "Signal Noise Reduction Algorithm for Object Localization and Tracking Using a 2-Dimensional Ultrasonic Sensor Array," i *2024 8th International Conference on Computational System and Information Technology for Sustainable Solutions (CSITSS)*, ISSN: 2767-1097, nov. 2024, s. 1–6. doi: 10.1109/CSITSS64042.2024.10816775. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10816775/> (hämtad 2025-05-08).
- [27] R. Horaud, M. Hansard, G. Evangelidis och C. Ménier, "An overview of depth cameras and range scanners based on time-of-flight technologies," *Machine Vision and Applications*, årg. 27, nr 7, s. 1005–1020, 2016. doi: 10.1007/s00138-016-0784-4.
- [28] Tekscan, Inc., *FlexiForce™ A301 Sensor Datasheet*, <https://www.tekscan.com/resources/datasheets-guides/flexiforce-a301-datasheet>, Accessed: 2025-04-22.
- [29] *Best Practices in Electrical Integration of the FlexiForce™ Sensor*. URL: [https://lp.tekscan.com/hubfs/FLX/FLX-Best-Practice-Electrical-Integration\\_2.0.pdf?hsCtaAttrib=175779939955&fbclid=IwY2xjawKBb251eHRuA2F1bQIxMABicmlkETBweGt0Wk160FVSZjVZU2VWAR7-ZE7SIP5L1oAk\\_JoLBQzzLUDBW1dIzKN5GWA2PdJX3VqkCcROZEM2NFEebw\\_aem\\_11JfPqSlmI1Brn64atdZ8w](https://lp.tekscan.com/hubfs/FLX/FLX-Best-Practice-Electrical-Integration_2.0.pdf?hsCtaAttrib=175779939955&fbclid=IwY2xjawKBb251eHRuA2F1bQIxMABicmlkETBweGt0Wk160FVSZjVZU2VWAR7-ZE7SIP5L1oAk_JoLBQzzLUDBW1dIzKN5GWA2PdJX3VqkCcROZEM2NFEebw_aem_11JfPqSlmI1Brn64atdZ8w) (hämtad 2025-05-02).
- [30] *LMx58-N Low-Power, Dual-Operational Amplifiers*. URL: [https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm158-n.pdf?HQS=dis-dk-null-digikeymode-dsf-pf-null-wwe&ts=1746100169758&ref\\_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fgeneral%252Fdocs%252Fsuppproductinfo.tsp%253FdistId%253D10%2526gotoUr1%253Dhttps%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Flit%252Fgpn%252Flm158-n](https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm158-n.pdf?HQS=dis-dk-null-digikeymode-dsf-pf-null-wwe&ts=1746100169758&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fgeneral%252Fdocs%252Fsuppproductinfo.tsp%253FdistId%253D10%2526gotoUr1%253Dhttps%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Flit%252Fgpn%252Flm158-n) (hämtad 2025-05-02).
- [31] Tekscan. "FlexiForce A301 Datasheet." (), URL: <https://www.tekscan.com/resources/datasheets-guides/flexiforce-a301-datasheet> (hämtad 2025-05-13).
- [32] Arduino, *Arduino Mega 2560 Rev3*, Accessed: 2025-04-23, 2024. URL: <https://store.arduino.cc/en-se/products/arduino-mega-2560-rev3>.
- [33] "General · Husmarke/Kandidat-Cross-Country-Technique," GitHub. (), URL: <https://github.com/Husmarke/Kandidat-Cross-Country-Technique> (hämtad 2025-05-09).
- [34] Grove - IMU 9DOF(lcm20600+AK09918). URL: [https://mm.digikey.com/Volume0/opasdata/d220001/medias/docus/693/Grove\\_IMU\\_9DOF\\_Icm20600\\_plus\\_AK09918\\_Web.pdf](https://mm.digikey.com/Volume0/opasdata/d220001/medias/docus/693/Grove_IMU_9DOF_Icm20600_plus_AK09918_Web.pdf) (hämtad 2025-05-02).
- [35] Grove - Time of Flight Distance Sensor VL53L0X. URL: <https://www.farnell.com/datasheets/3759079.pdf> (hämtad 2025-05-13).

- [36] C. Dahl, Ø. Sandbakk, J. Danielsen och G. Ettema, "The Role of Power Fluctuations in the Preference of Diagonal vs. Double Poling Sub-Technique at Different Incline-Speed Combinations in Elite Cross-Country Skiers," English, *Frontiers in Physiology*, årg. 8, febr. 2017, Publisher: Frontiers, issn: 1664-042X. doi: 10.3389/fphys.2017.00094. URL: <https://www.frontiersin.org/journals/physiology/articles/10.3389/fphys.2017.00094/full> (hämtad 2025-03-24).
- [37] B. Pellegrini, L. Bortolan och F. Schena, "Poling force analysis in diagonal stride at different grades in cross country skiers," en, *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, årg. 21, nr 4, s. 589–597, 2011, issn: 1600-0838. doi: 10.1111/j.1600-0838.2009.01071.x. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1600-0838.2009.01071.x> (hämtad 2025-05-02).
- [38] Fédération Internationale de Ski et de Snowboard. "Cross-country documents." (), URL: <https://www.fis-ski.com/cross-country/documents> (hämtad 2025-05-07).
- [39] J. Daintith (editor), *A Dictionary of Physics*, 6. utg. Oxford University Press, 2009, ISBN: 978-0-19-923399-1.
- [40] M. H. Weik, "full-width at half-maximum," en, i *Computer Science and Communications Dictionary*, M. H. Weik, utg., Boston, MA: Springer US, 2001, s. 661–661, ISBN: 978-1-4020-0613-5. doi: 10.1007/1-4020-0613-6\_7770. URL: [https://doi.org/10.1007/1-4020-0613-6\\_7770](https://doi.org/10.1007/1-4020-0613-6_7770) (hämtad 2025-04-22).
- [41] E. Sejdić, C. M. Steele och T. Chau, "The effects of head movement on dual-axis cervical accelerometry signals," *BMC Research Notes*, årg. 3, nr 1, s. 269, okt. 2010, issn: 1756-0500. doi: 10.1186/1756-0500-3-269. URL: <https://doi.org/10.1186/1756-0500-3-269> (hämtad 2025-04-22).
- [42] *Spectral centroid* — OpenAE. URL: <https://openae.io/standards/features/latest/spectral-centroid/> (hämtad 2025-05-11).
- [43] *Spectral variance* — OpenAE. URL: <https://openae.io/standards/features/latest/spectral-variance/> (hämtad 2025-05-11).

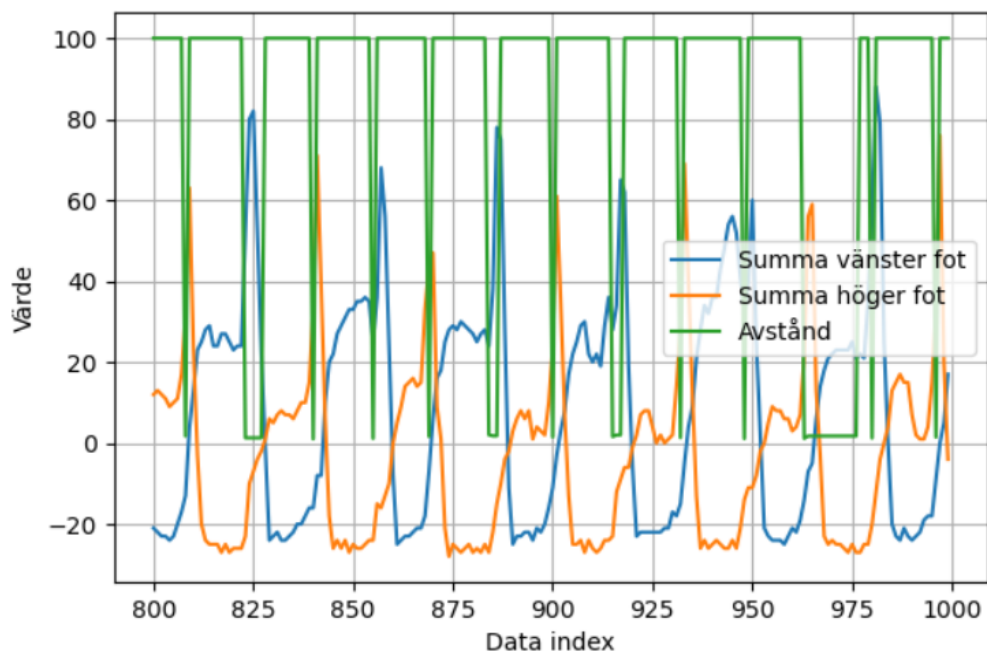
# A Bilagor

## A.1 Intervjufrågor

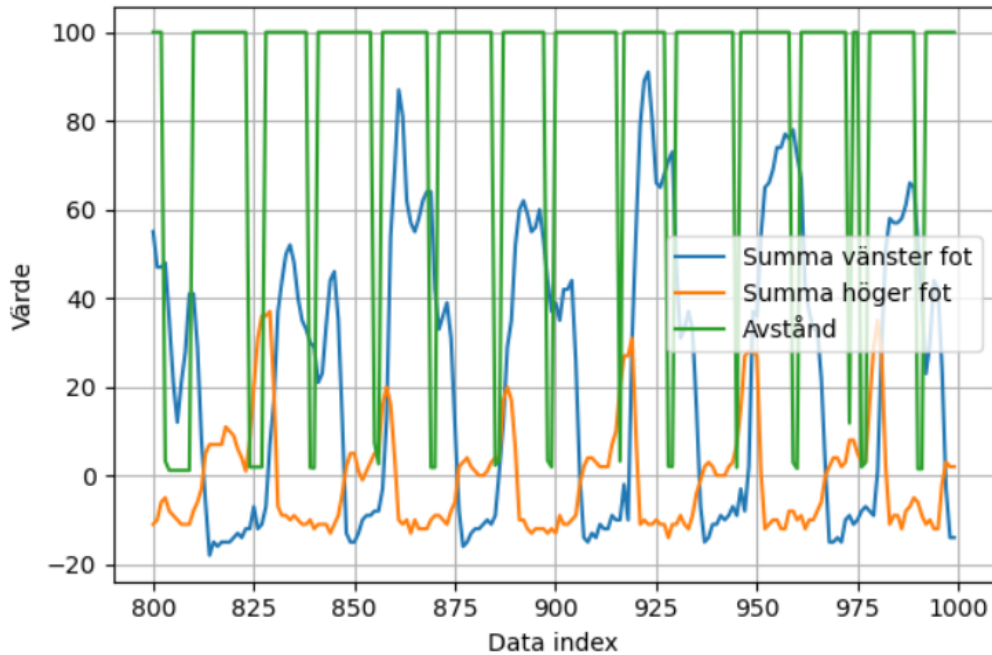
- Presentera oss själva.
- Får vi spela in?
- Presentera vårt projekt och varför vi behöver intervju
- Vad har du för erfarenheter inom längdskidåkning? Vad arbetar du med?
- Vilka tekniska nycklar är viktigast för diagonalteknik?
- Finns det någon teknisk "nyckel" som många ofta har problem med i klassisk skidåkning?
- Vad skiljer en riktigt duktig teknisk åkare från en helt okej?
- Har du någon person som du anser har en "perfekt" teknik i diagonal?
- Hur analyseras en åkares teknik idag? Vilka verktyg används? Jobbar man med siffror/kamera vid teknikträning eller kör man på känsla?
- Tror du att tillgång till exakta siffror inom teknikträning skulle hjälpa utvecklingen för skidåkare? (Om ja), hur?
- Finns det någon parameter ni gärna haft ett kvantitativt mått på om ni tänker helt fritt och att allt är möjligt? (jämförelse med exempelvis kadens/ markkontakt inom löpning)
- Presentera våra nuvarande idéer och få kritik.

## A.2 Utdrag av data

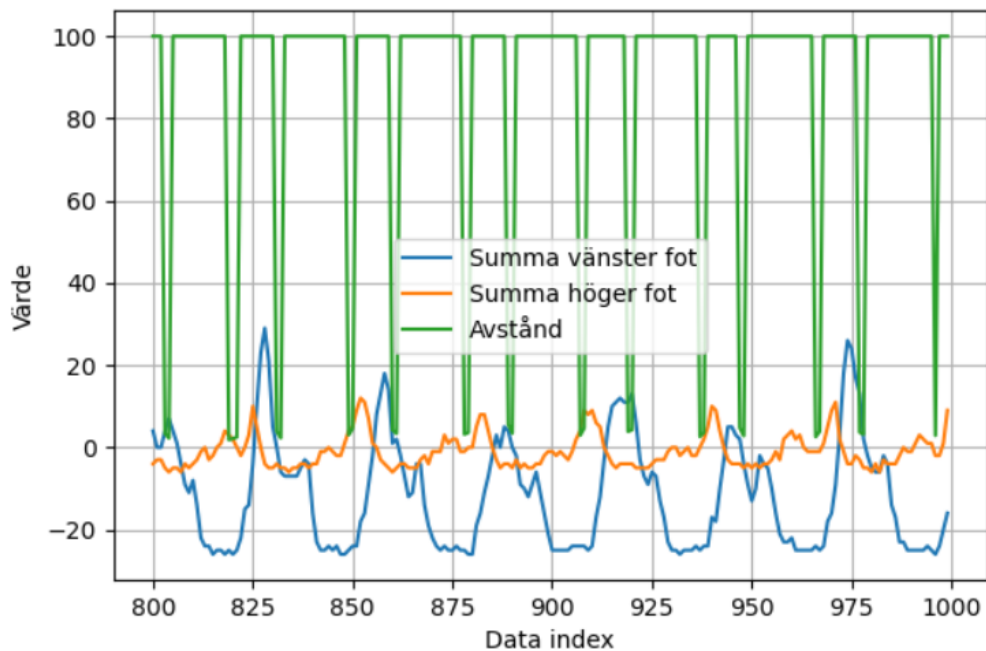
Utdrag från fyra testpersoners datainsamling där mätvärden från fötternas töjningsgivare och avståndsmätare visualiseras.



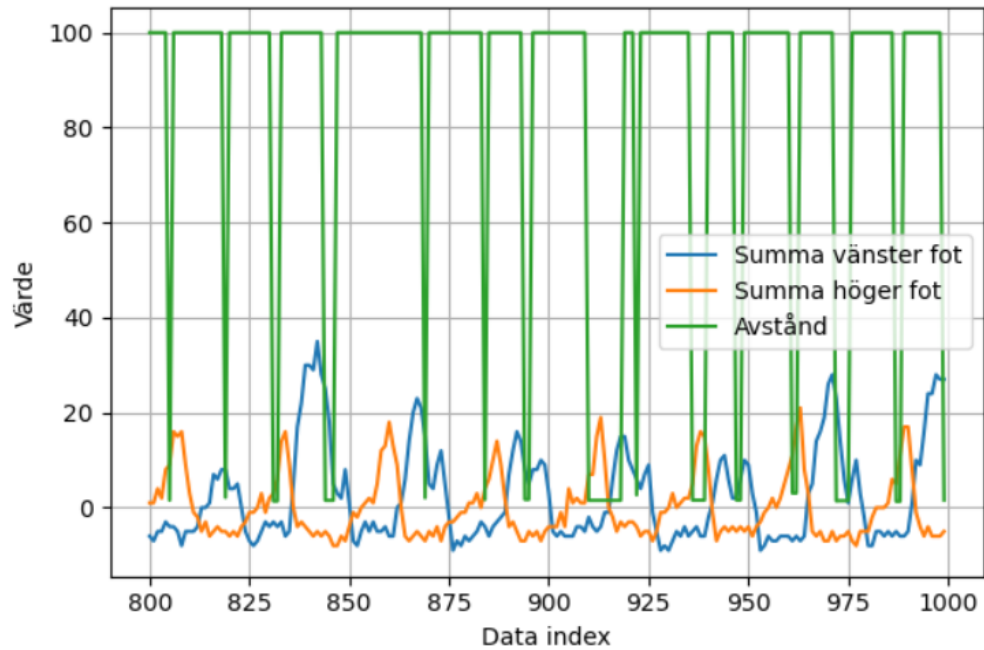
**Figur 19:** Utdrag av 200 datapunkter för den testperson 11. I figuren representerar den gröna grafen avståndsmätningar, den orangea grafen summan av alla tryckmätningar på högra foten och den blåa grafen summan av alla tryckmätningar på den vänstra foten.



**Figur 20:** Utdrag av 200 datapunkter för den testperson 2. I figuren representerar den gröna grafen avståndsmätningar, den orangea grafen summan av alla tryckmätningar på högra foten och den blåa grafen summan av alla tryckmätningar på den vänstra foten.



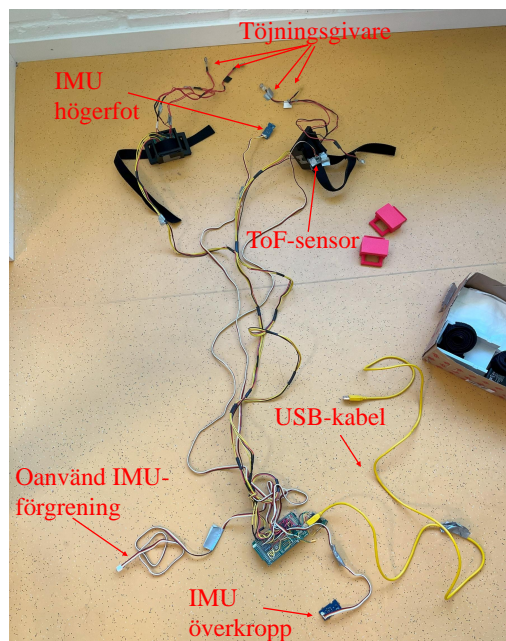
**Figur 21:** Utdrag av 200 datapunkter för den testperson 6. I figuren representerar den gröna grafen avståndsmätningar, den orangea grafen summan av alla tryckmätningar på högra foten och den blåa grafen summan av alla tryckmätningar på den vänstra foten.



**Figur 22:** Utdrag av 200 datapunkter för den testperson 13. I figuren representerar den gröna grafen avståndsmätningar, den orangea grafen summan av alla tryckmätningar på högra foten och den blåa grafen summan av alla tryckmätningar på den vänstra foten.

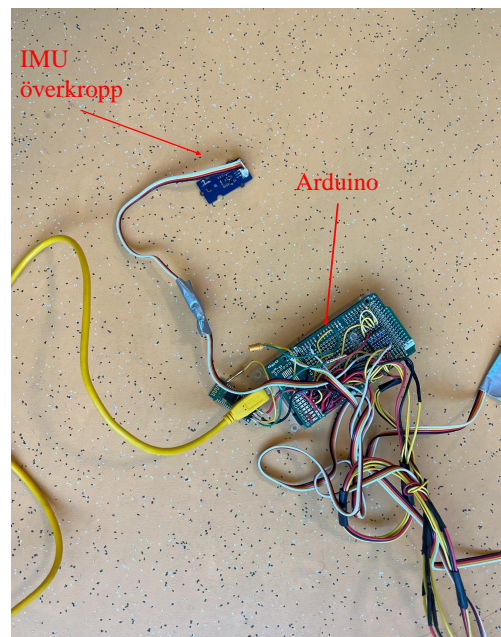
### A.3 Bilder på mätsystemet

Följande bilaga innehåller fler bilder på mätsystemet. Följande bilaga innehåller bilder på mätsystemet.

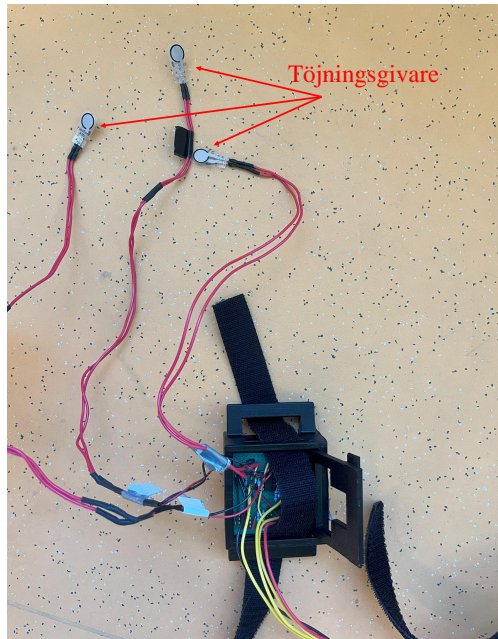


**Figur 23:** Mätsystemets helhet

Bilder på mätsystemet med samtliga delar utmärkta



**Figur 24:** Bild på IMU och mikrokontroller (Arduino)



**Figur 25:** Bild på tre stycken töjningsgivare som användes