

**YHDISTETTY SATELLIITTIPAIKANNIN JA INERTIAMITTAUSYKSIKÖ
MAASTOHIIHTOSUKSIEN LUISTO-OMINAISUUKSIEN MITTAUKSESSA JA
NIIDEN VAIKUTUS KILPAILUSUORITUKSEN OSA-ALUEISIIN**

Ossi Hakulinen

Biomekaniikan pro gradu tutkielma

Liikuntatieteellinen tiedekunta

Jyväskylän yliopisto

Syksy 2023

TIIVISTELMÄ

Hakulinen, O. 2023. Yhdistetty satelliittipaikannin ja inertiamittausyksikkö maastohiihtosuksen luisto-ominaisuuksien mittaauksessa ja niiden vaikutus kilpailusuorituksen osa-alueisiin. Liikuntateknologia, Liikuntatieteellinen tiedekunta, Jyväskylän yliopisto. Biomekaniikan opintosuunta, pro gradu -tutkielma, 57 s.

Tämän tutkimuksen tarkoituksena on tutkia yhdistetyn satelliittipaikannusta ja inertiamittausta (GNSS-IMU) käyttävän sensorin hyödynnettävyyttä maastohiihtosuksen luisto-ominaisuuksien mittaamisessa. Menetelmää verrataan sekä lineaaribometrillä että testimäessä kellolla mitattuihin tuloksiin. Tarkoituksena on validoida GNSS-IMU -sensorin käytettävyyttä perinteisiin menetelmiin verrattuna. Lisäksi tutkitaan luisto-ominaisuuksien vaikutusta hiihtosuorituksen osa-alueisiin. Tämän tarkoituksena on auttaa ymmärtämään laajemmin sitä, millainen vaikutus suksen valinnalla on erilaisista maastonkohdista koostuvalla latulenkillä. Suksen luisto-ominaisuuksien mittausta kilpailunomaisissa olosuhteissa on työlästä ja aikaa vievää. Lajille tyypillisissä olosuhteissa ei käytännössä pystytä testaamaan pelkkää suksea, vaan testaus tapahtuu hiihtäjä-suksi -yhdistelmien välillä.

Tutkimukseen osallistui 25 hiihtäjää kahden päivän aikana. Koehenkilöt hiihtivät suoritukset osana harjoituskilpailua, jonka aikana kerättiin tietoja useampaan alan tutkimukseen. Tässä tutkimuksessa käytetyt mittaukset tehtiin valokennoin aikaa mitaten alamäessä, GNSS-IMU -sensorein edellä mainitussa mäessä ja harjoituskilpailussa. Lisäksi käytetyt sukset mitattiin lineaaribometrillä. Mittaustuloksia analysoitiin kvantitatiivisin menetelmin tarkoituksena löytää korrelaatioita eri tulosten välillä. Keskeisimmät vertailtavat tiedot olivat GNSS-IMU -sensorein mitattu maksiminopeus, testimäen kellotettu laskuaika ja suksien kitkakertoimet.

Tutkimuksella oli kolme keskeistä tulosta. Ensimmäiseksi, laboratorio-olosuhteissa lineaaribometrillä pelkille suksille tehdyt mittaukset eivät toistu kenttäolosuhteissa hiihtäjä-suksi -yhdistelmillä tehdyissä mittauksissa. Toisin sanoen sukset, jotka on todettu kitkakertoimeltaan hyväksi, eivät automaattisesti ole nopeat hiihtäjästä riippumatta. Toiseksi, kun suksitestialamäessä saman laskun aikana mitataan laskuaikaa valokennoin ja maksiminopeutta GNSS-IMU -sensorein ovat tulokset hyvin vastaavia keskenään ($r = 0,9267$ ***). GNSS-IMU sensorilla mitattu maksiminopeus soveltuu siis hyvin suksien luisto-ominaisuuksien testaamiseen lajille tyypillisissä olosuhteissa. Kolmanneksi, suksitestimäen tulokset siirtyvät vain osin kilpaladun suorituksiin. Hiihtäjä-suksi -yhdistelmät, jotka laskivat nopeita laskuaikoja kilpailun ulkopuolisessa testimäessä, laskivat myös nopeita aikoja kilpaladun suurimmassa alamäessä ($r = 0,7256$ ***). Toisaalta muissa alamäissä, ylämäissä eikä tasamaaosuuksilla vastaavaa yhteyttä löytynyt.

Tutkimuksen tulokset tukevat aikaisempia löydöksiä siitä, että kyseinen lineaaribometri soveltuu yksittäisten suksien mittaamiseen. Suksiparien väliset erot kitkakertoimissa ovat kertaluokkaa tuhannesosia, mitkä ovat pieniä verrattuna muihin olosuhteista ja hiihtäjästä riippuviin tekijöihin. GNSS-IMU -sensorein mitattu maksiminopeus on hyvä ja yksinkertainen työkalu hiihtäjä-suksi -yhdistelmien luisto-ominaisuuksien mittaamiseen.

Avainsanat: maastohiihto, sukset, luisto-ominaisuudet, satelliittipaikannus, inertiamittausyksikkö

ABSTRACT

Hakulinen, O. 2023. The Use of a Combined Satellite Positioning and Inertial Measurement Device for Measuring the Glide Properties of Cross-Country Skis and the Impact of those on Subsections of Competition Course. Sport Technology, The Faculty of Sport and Health Sciences, University of Jyväskylä. Specialization in Biomechanics, Master's Thesis, 57 pp.

The purpose of this research is to test the applicability of satellite positioning with a combined inertial measurement unit (GNSS-IMU) for measuring the glide properties of cross-country skis. The method is compared to results from a linear tribometer and traditional timed test glides in a downhill ski track. The aim is to validate the results from the GNSS-IMU sensor against the traditional methods. In addition, the impact of the measured glide properties on different parts of a cross-country ski competition course is studied. The aim is to understand how the ski selection could impact the performance throughout different parts of the track. In general, the ski testing procedures are time consuming and laborious. In practice skis alone cannot be studied in competition-like conditions, but instead the measurements are done on skier-and-ski combinations.

A total of 25 skiers took part in the research measurements for 2 days. Before, during and after a practice-competition various data was collected and measurements taken for the purpose of several studies within one major research project. This specific study utilized timed runs in a ski testing downhill, GNSS-IMU collected data from the competition course and linear tribometer measurements from the cold laboratory. The data was analyzed using quantitative methods with the aim of finding correlations between some data sets. The focus was on the maximum speed from the GNSS-IMU device, timed downhill runs and the coefficients of friction.

The results can be summarized in three main points. Firstly, the measurements done with the linear tribometer in a cold-climate laboratory cannot be transferred to skier-and-ski combinations in typical cross-country skiing conditions. In other words, a pair of skis with a small measured coefficient of friction are not necessarily fast for every skier. Secondly, when the same test runs in a dedicated ski test downhill were both timed with a traditional photodetection device and measured with the GNSS-IMU device, both techniques gave similar results ($r = 0,9267$ ***). The GNSS-IMU measured maximum speed was a good measurement for ranking the skier-and-ski combinations in terms of glide properties. Lastly, the results from the dedicated ski testing downhill are only partly transferrable to the actual cross-country skiing competition on a loop course. The skier-and-ski combinations which timed fast times for the test runs were also fast on the longest downhill section of the competition track ($r = 0,7256$ ***). In the other parts of the course no link between fast ski test runs could be found.

The results support previous findings regarding the specific linear tribometer used. The differences in glide friction coefficients between the different ski pairs were in the magnitude of thousandths, which seem to be extremely small compared to other variables related to the skiers and the environment. The GNSS-IMU measured maximum speed of a skier proved to be a good and simple metric when comparing the glide properties of different skiers on their skis.

Key words: cross-country skiing, skis, glide properties of skis, satellite positioning, inertial measurement unit

KÄYTETYT LYHENTEET

dGNSS	Differentiaalikorjattu satelliittipaikannusjärjestelmä
DP	Double Poling, tasatyöntö
FIS	Fédération Internationale de Ski, Kansainvälinen hiihtoliitto
GLONASS	Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema, Global Navigation Satellite System, Neuvostoliiton ja Venäjän kehittämä satelliittipaikannusjärjestelmä
GNSS	Global Navigation Satellite System, maailmanlaajuinen satelliittipaikannusjärjestelmä
IMU	inertial measurement unit, inertiamittausyksikkö
UH	Uphill, ylämäki
UHMWPE	Ultra-high-molecular-weight polyethylene, ultrasuurimolekyylinen polyeteeni

SISÄLTÖ

1	JOHDANTO	1
2	SUKSEN LUISTO-OMINAISUUKSIIN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT	3
2.1	Hiihtäjään vaikuttavat voimat.....	3
2.2	Suksen ja lumen välinen vuorovaikutus	5
2.2.1	Lumi	5
2.2.2	Muut sääolosuhteet.....	6
2.2.3	Suksi	7
3	LUISTO-OMINAISUUKSIEN MITTAUSMENETELMÄT	8
3.1	Kenttätetit	8
3.2	Laboratoriotetit	11
3.2.1	Tribologia	11
3.2.2	Suksen rakenteen tutkiminen	13
4	HIIHTÄJÄN ETENEMISEN MALLINTAMINEN JA KEHITTYNEEMMÄT MITTAUSMENETELMÄT	14
4.1	Inertiamittausyksiköt mittausmenetelmänä.....	14
4.2	GNSS mittausmenetelmänä	15
4.3	Mallinnus ja simulaatiot.....	16
5	TUTKIMUKSEN TARKOITUS	18
6	TUTKIMUSKYSMYKSET	19
7	TUTKIMUSMENETELMÄT	20
7.1	Koehenkilöt ja sukset	20
7.2	Olosuhteet ja ladut	20
7.3	Mittauslaitteet	23
7.5	Tilastollinen analyysi.....	25
8	ANALYYSI JA TULOKSET	26
8.1	Laskuajat testimässä	26
8.2	Suksenliikutuslaite	26
8.3	Kilpaladun alamäki.....	27
8.4	Ajankäyttö eri maastonkohdissa.....	28
8.5.1	<i>Tutkimuskysymys 1: Mikä on laboratorio-olosuhteissa tehdyn tribologiamittauksen ja kenttäolosuhteissa tehdyn laskutestin yhteys?</i>	30
8.5.2	<i>Tutkimuskysymys 2: Kuinka hyvin tribo- ja laskutestien tulokset selittävät kisasuorituksen elementtejä (lasku, vuorohiihto, kokonaisaika, yms.)</i>	35
8.5.3	<i>Tutkimuskysymys 3: Kuinka hyvin AdMos-sensorilla mitattavat tiedot hiihtokilpailusta soveltuvat sukseen luisto-ominaisuuksien mittaamiseen, verrattuna perinteisiin menetelmiin?</i> ...	40

8.6 Yhteenveto tuloksista	46
9 POHDINTA JA SOVELETTAVUUS	47
9.1 Lineaaritribometri ja kenttäolosuhteet	47
9.2 GNSS-IMU teknologiana hiihtonopeuksien mittauksessa	48
9.3 Suksien luiston mittaus ja hiihtokilpailu	49
9.4 Mahdollisia jatkotutkimusaiheita	50
10 JOHTOPÄÄTÖKSET	52
LÄHTEET	53

1 JOHDANTO

Nykymuotoisten maastohiihtosuksien kehityksen alkuna voidaan pitää 1960-lukua, jolloin muovipohjaiset sukset alkoivat syrjäyttämään aikaisemmin käytettyjä puupohjaisia suksia. Maastohiihtolajit ja välineet ovat sittemmin kehittyneet käsi kädessä. 1980-luvulla alan tieteellinen tutkimus nosti päätään, kun esimerkiksi Colbeck (1988) tutki lumen ja suksen välistä kitkaa ja vapaan hiihtotavan kilpailut tulivat kalenteriin omaksi lajikseen kansainvälisen hiihtoliiton (FIS) alaisissa kilpailuissa 1986. 2000-luvun viimeisimpiä suuntauksia ovat olleet perinteisen hiihtotavan kilpailujen vauhtien kasvaessa eri tekniikoiden, kuten suksijuoksun ja tasatyönnön yleistyminen. Nämä vaativat suksilta entistä monipuolisempia ominaisuuksia niin luiston kuin pidon osalta.

Maastohiihdossa perinteisen ja vapaan hiihtotavan suksien selkein ero on, että perinteisen sukselta vaaditaan pitoa eteenpäin vievän potkun aikaansaamiseksi, kun taas vapaalla hiihtotavalla vastaavia suksen suuntaisia pito-ominaisuuksia ei tarvita, koska vapaalla hiihtotavalla eteenpäin vievä voima saavutetaan suksen reunaa käyttäen (Ohtonen, O. & Mikkola, J. 2016, 494). Poikkeuksen tähän jaotteluun tuovat kokonaan ilman pitovoitelua hiihdettävät perinteisen hiihtotavan suoritukset. Tasatyöntötekniikka on yleistä maratonhiihdoissa, mutta sitä on nähty viime vuosina myös esimerkiksi sprinttihiihdossa (Ohtonen, O. & Mikkola, J. 2016, 491). Kaikille maastohiihtosuksille on kuitenkin tärkeää mahdollisimman hyvät luisto-ominaisuudet, jotta eteenpäin vievää liukua vastustaisi mahdollisimman pienet voimat.

Nykyaikainen maastohiihtosuksi on huomattavan kevyt; kilpasuksipari painaa noin 750 grammaa (FIS 2019). Rakenteeltaan se koostuu joko puu-, vaahto- tai kennoytimestä, joka on päällystetty muovilla. Myös pohjan liukupinta on muovia. (Carlsson ym. 2016) Suksi tulee valita niin että suksen jäykkyys sopii hiihtäjälle. Suksen jäykkyyden merkitys on erityisen suuri perinteisen hiihdossa, missä liian löysän suksen pitoalue lisää liukukitkaa heikentäen luistoa. Toisaalta liian jäykällä suksella hiihtäjä ei saa painettua pitoaluetta kiinni lumeen ja potkuvaiheen vaatima pito kärsii.

Street & Gregory (1994) tutkivat vuoden 1992 talviolympialaisten 50 km vapaan hiihtotavan kilpailua ja tulivat siihen lopputulokseen, että liukuvauhdilla radan nopealla osuudella ja

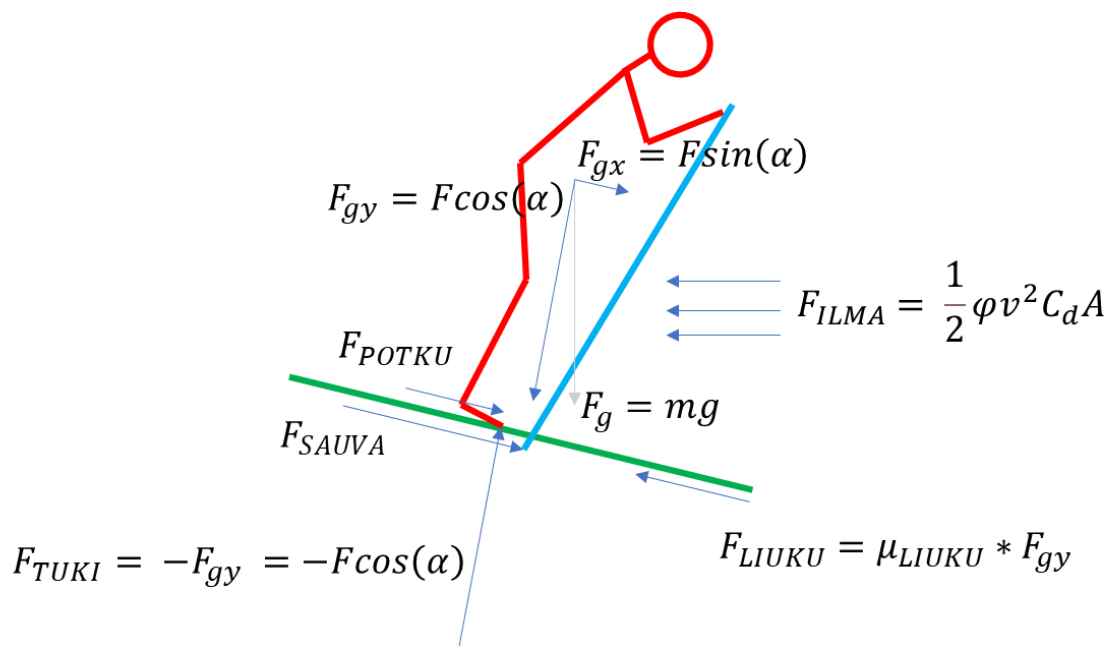
hyvällä loppusijoituksella oli vahva yhteys. Urheilijat ja maajoukkueet näkevätkin paljon vaivaa hyvien suksien löytämiseksi.

2 SUKSEN LUISTO-OMINAISUUKSIIN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT

Hiihtoon ja erityisesti luistoa mittaaviin kenttätesteihin vaikuttavat hiihtäjä, varusteet sekä lumi ja sääolosuhteet (Fauve ym. 2005). Tässä luvussa käsitellään näitä hiihdon luistotesteihin vaikuttavia tekijöitä. Luvussa 2.1 aloitetaan tarkastelemalla hiihtäjään vaikuttavia voimia. Luvussa 2.2 jatketaan tarkastelemalla sukseen ja lumen välistä vuorovaikutusta ja siihen liittyviä tekijöitä.

2.1 Hiihtäjään vaikuttavat voimat

Hiihtäjään vaikuttaa erilaisia etenemisen mahdollistavia ja sitä vastustavia voimia. Hiihtäjään ja hänen etenemiseensä vaikuttavat painovoima, lepokitka, liukukitka, ilmanvastus, ladun tukivoima sekä eteenpäin vievät voimat jaloista ja sauvoista. Kuva 1 alla tiivistää nämä voimat alamäkeen kulkevan maastohiihtäjän osalta:



KUVA 1. Vapaakappalekuva maastohiihtäjästä

Painovoiman ladun suuntainen komponentti (F_{gx}) vie hiihtäjää eteenpäin hiihdetessä alamäkeen ja toisaalta vastustaa liikettä hiihdetessä ylämäkeen. Painovoiman latuun nähden kohtisuoran komponentin (F_{gy}) vaikutuksesta muodostuu myös sukseen ja lumen välinen kitkavoima (F_{LIUKU} ja F_{POTKU}). Maan tukivoima on yhtä suuri mutta vastakkaisen suuntainen ($F_{TUKI} = -F_{gy}$). Lepokitka (μ_{POTKU}) mahdollistaa eteenpäin vievän potkun (F_{POTKU}) vaatiman

pidon. Liukukitka (μ_{LIUKU}) vastustaa suksen liukua (F_{LIUKU}) lumen pintaa pitkin. Kitkavoiman aiheuttavat hiihtäjän paino sekä lumen ja suksen välinen vuorovaikutus.

Kuten Breitschädel (2014) oli tehnyt, voidaan vapaassa liu'ussa olevan hiihtäjän kiihtyvyyttä kuvaava kaava johtaa seuraavalla tavalla. Ensin Newtonin toisen lain mukaisesti

$$F = m * a \quad (1)$$

missä F on voima, m massa ja a kiihtyvyys. Vapaassa liu'ussa olevaa hiihtäjää vie eteenpäin painovoiman alamäen suuntainen komponentti F_{gx} . Sauvoilla ei työnnetä eikä suksilla potkita lisää vauhtia. Liikettä vastustavat ilmanvastus F_{ILMA} ja ladun ja suksen välinen liukukitka F_{LIUKU} . Newtonin toisen lain mukaisesti saadaan tällöin:

$$F_{gx} - F_{ILMA} - F_{LIUKU} = m * a \quad (2)$$

Kitkakertoimen määritelmä saadaan ladun suuntaisen voiman ja kohtisuoran voiman suhteena. Tässä tapauksessa kitkakerroin μ_{LIUKU} on

$$\mu_{LIUKU} = \frac{F_{LIUKU}}{F_{gy}} \quad (3)$$

Yhdistämällä edelliset kaavat 2 ja 3, sekä ilmanvastus F_{ILMA} ja huomioimalla että F_{gx} ja F_{gy} , ja voidaan määrittellä hiihtäjään kohdistuvasta painovoimasta alamäen kulman α funktiona, saadaan hiihtäjän kokonaiskiihtyvyyttä kuvaava yhtälö:

$$a = g * \sin(\alpha) - \frac{1}{2m} \rho v^2 C_d A - \mu_{LIUKU} * g * \cos(\alpha) \quad (4)$$

Missä ρ on ilman tiheys, v hiihtäjän nopeus suhteessa ympäröivään ilmaan ja $C_d A$ ilmanvastuskertoimen ja poikkipinta-alan tulo. Jos oletetaan että ilman tiheys pysyy vakiona ja hiihtäjän massa on tiedossa, niin kiihtyvyyden muutosten selittäviksi muuttujiksi jäävät vain kitkakerroin ja ilmanvastus. Useissa testeissä ilmanvastus voidaan joko kokonaan eliminoida (suksitestit laboratorio-olosuhteissa), pitää vakiona (sama hiihtäjä samassa asennossa) tai

minimoida pitämällä nopeudet pieninä. Ilmanvastuksen absoluuttinen määrittäminen kenttäolosuhteissa on kuitenkin vaikeaa.

2.2 Suksen ja lumen välinen vuorovaikutus

Yksinkertaisuudessaan suksen pohja liukuu lumen pintaa vasten, mutta liukukitkan suuruuteen vaikuttaa useampi tekijä. Huomionarvoista on se, että suksen ja lumen pieni liukukitkakerroin selittyy suurelta osin suksen ja lumen välissä olevalla vesipatjalla, joka muodostuu kitkan aiheuttaman lämmön vaikutuksesta. Tämä voiteleva vesikerros edesauttaa suksen liukumista lumen yli pienentäen kosketuspintaa itse lumeen. (Bowden & Hughes 1939; Colbeck 1992) Suksen liukukitka muodostuu useista eri komponenteista. Näitä ovat kuivakitkakerroin μ_{KUIVA} , märkäkitkakerroin $\mu_{MÄRKÄ}$, kapillaari-ilmiön muodostama imu μ_{KAP} ja alustan muotoutuminen μ_{AURA} . (Glennie 1987; Colbeck 1992; Buhl ym. 2001) Kokonaisuudessaan liukukitkakerrointa voidaan kuvata seuraavalla kaavalla:

$$\mu_{LIUKU} = \mu_{KUIVA} + \mu_{MÄRKÄ} + \mu_{KAP} + \mu_{AURA} \quad (5)$$

Kuivakitkakerroin kuvaa suksen ja kiinteiden jääkiteiden välistä hankausta. Märkäkitkakerroin kuvaa lumen ja suksen välisen voitelevan vesikerroksen aiheuttamaa kitkaa. Oikeiden olosuhteiden vallitessa tämä vesikerros pienentää liukukitkaa huomattavasti. Kapillaari-ilmiö muodostaa suksea lumen pintaan imevää voimaa erityisesti märällä kelillä. Aorauskitka tarkoittaa yksinkertaisesti pintojen välissä olevan lian tai lumen muotoutumista tai auraamista suksen alla. Kitkakertoimien eri komponenttien keskinäiset suhteet vaihtelevat suuresti olosuhteista riippuen (Glennie 1987; Buhl ym. 2001). Lumen muotoutumiseen käytettävän voiman suuruus riippuu paljon lumen raakoosta ja kovuudesta. Pehmeä lumi muotoutuu enemmän suksen alla ja lisäksi kontaktin kokonaispinta-ala on suurempi (Fauve ym. 2005). Liukukitkan on todettu olevan pienimmillään vauhdin ollessa 5-10 m/s (Bowden & Taylor 1964; Kuroiwa 1977; Colbeck 1992). Liukukitkan aiheuttaman lämmön sulattama vesikerros on tällöin optimaalisimmillaan.

2.2.1 Lumi

Lumen lämpötilalla ja kosteudella on suuri vaikutus kitkakertoimeen. Lisäksi myös raekoko ja kovuus ovat tärkeitä tekijöitä. (Fauve ym. 2005)

Useiden tutkimusten perusteella liukuominaisuuksien kannalta optimaalisin lumen lämpötila on 0 ja -5 Celsius-asteen välillä. Tämä selittyy voitelevan vesikerroksen paksuudella; kylmemmällä säällä ei muodostu tarpeeksi voitelevaa vesikerrosta ja lämpötilan noustessa vesikerros muodostuu liian paksuksi. (Colbeck 1992; Buhl ym. 2001; Fauve ym. 2005; Bäurle ym. 2006; Nachbauer ym. 2016) Buhl ym. (2001) mukaan suksen polyeteenin ja lumen välinen kitkakerroin on parhaimmillaan noin 0,02 näissä optimaalisissa oloissa.

Kosteuden vaikutus liukuominaisuuksiin selittyy saman voitelevan vesikerroksen muodostumisen optimoivilla olosuhteilla. Lumen ollessa liian kuivaa ei voitelevaa kerrosta muodostu tarpeeksi herkästi ja vastaavasti liian kostean lumen päälle jää liian paksu kerros vettä. (Bowden 1953; Glenne 1987; Fauve ym. 2005)

Lumen rakenne ja kovuus vaikuttavat myös merkittävästi kitkakertoimeen. Yleisesti ottaen liukukitka pienenee raekoon kasvaessa (Colbeck 1992; Fauve ym. 2005). Tämä vaikutus johtuu ainakin osin siitä, että rakeiden ollessa suuria pienempi osa suksen pohjasta koskettaa lumeen. Tämä lumeen koskeva pinta-ala riippuu ainakin lumen kovuudesta, lämpötilasta ja reakoosta, joka on Fauven ym. (2005) mukaan erityisen merkittävä tuoreen lumen olosuhteissa. Luisto on parempaa myös kovalla lumella, jolloin lumen kasaan painamiseen kuluu vähemmän energiaa (Fauve ym. 2005).

Yleisesti ottaen maastohiihtosuksen liukukitkakerroin on pienimmillään noin -3 Celsius-asteen lämpötilassa, kovalla ja isorakeisella lumella. Tällöin vesikerros on optimaalisimmillaan ja vain pieni osa suksen pohjasta hankaa lumeen. Myöskään lumen auraamiseen tai muuhun muotoutumiseen ei kulu ylimääräistä energiaa.

2.2.2 Muut sääolosuhteet

Tuuli lisää merkittävästi hiihtäjän kokemaa ilmanvastusta. Koska tuulen nopeus ja maastohiihdon hiihtonopeudet ovat samaa kertaluokkaa, voi voimakas tuuli ja sen suunta vaikuttaa paljon hiihtäjän kokemaan ilmanvastukseen. Kuten kaavasta 4 voidaan nähdä, kasvaa ilmanvastus nopeuden neliönä, eli pienilläkin muutoksilla nopeudessa suhteessa ympäröivään ilmaan voi olla verrattain suuri merkitys ilmanvastukseen. Fauven ym. (2005) tutkimuksessa

yli 2000 laskun otos mahdollisti korjauskertoimen luomisen, jota hyödynnettiin äärimmäisissä tuuliolosuhteissa laskettujen suoritusten korjaamiseen.

Auringonpaiste ja pilvisuus vaikuttavat lumen pinnan olosuhteisiin ja sen muutoksiin. Auringonpaiste voi erityisesti lämmittää ja sulattaa latua. Intensiivisen auringon säteilyn seurauksena muodostuu kosteaa lunta ladun pintaan, jolloin luisto heikkenee (Fauve ym 2005). Lumisateen myötä ladun pinnalle muodostuu kerros pehmeää lunta, joka kasvattaa liukukitkakertoimen aurasuhteesta johtuvaa komponenttia μ_{AURA} .

2.2.3 Suksi

Nykyaikaisten maastohiihtosuksien pohjat valmistetaan yleensä UHMWPE-muovista (ultra-high-molecular-weight polyethylene), jonka liukuominaisuudet ja kulutuskestävyys on todettu ylivoimaisiksi moniin muihin materiaaleihin verrattuna. Lisäksi suksen pohjan muoviseokseen voidaan lisätä muita ominaisuuksia parantavia aineita. (Kuzmin 2010; Breitschädel 2014) Materiaalivalinta on valmistajan tekemä ja hiihtäjä pystyy harvoin siihen itse vaikuttamaan. Suksen pohjan hiontakuvilla voidaan vaikuttaa suksen toimivuuteen eri keliolosuhteissa. Hiontakuvio ja sen syvyys vaikuttavat erityisesti suksen ja lumeen väliin muodostuvan vesipatjan paksuuteen Kuzmin (2010). Toisin kuin itse materiaalia, suksen hiontaa on verrattain helppo muokata osaavan huoltajan toimesta.

Itse materiaalivalinnan ja hiontakuvion lisäksi käytettävien kelin mukaisten tuotteiden tarkoituksena on viimeistellä suksen pohja niin että se mikro- ja molekyylytasolla toimii mahdollisimman hyvin joutuessaan vuorovaikutukseen lumen kanssa. Luistovahan tarkoituksena on tehdä suksen pohjasta vettä hylkivä ja näin ollen parantaa luistoa vesipatjan päällä (Coupe & Spells 2009; Kuzmin 2010). Luistovoitelu on hiihtäjän itse tehtävissä.

3 LUISTO-OMINAISUUKSIEN MITTAUSMENETELMÄT

Koska maastohiihto on ulkona ja erityisesti talviolosuhteissa tapahtuva urheilumuoto, on olosuhteilla suuri vaikutus suoritukseen ja tuloksiin. Kuten Fauve ym. (2005) muotoili, erityisesti ulkona tapahtuviin kenttätesteihin vaikuttavat hiihtäjä, varusteet, lumi ja sääolosuhteet. Kun halutaan tutkia erityisesti suksia ja niiden luisto-ominaisuuksia, voidaan muita parametrejä pyrkiä sulkemaan pois.

Luisto-ominaisuuksien mittaamista voidaan tehdä ulkona tai sisällä. Ulkona tapahtuvat kokeet vaihtelevat kilpailujen tai kilpailunomaisten suoritusten tutkimisesta varta vasten tehtyihin koesuorituksiin. Sisäolosuhteissa tehtävät tutkimukset ovat usein enemmän tai vähemmän eristettyjä tutkimuksia, olosuhteiden ollessa kontrolloidumpia. Osa tutkimusmenetelmistä mittaa hiihtäjää ja suksea kokonaisuutena, kun taas toisissa menetelmissä tutkitaan vain suksen ja lumen vuorovaikutusta.

Tyypillisimmät tutkimusmenetelmät ovat joko hiihtäjän latua pitkin suorittaman laskun mittaaminen (Karlöf ym. 2007; Fauve ym. 2005) tai kitkan mittaaminen tribometrin avulla (Keinonen 1987; Lehtovaara 1989; Kolhemainen 2006; Linnamo ym. 2008; Hasler ym. 2016; Nachbauer 2016; Lemmettylä ym. 2021). Näiden kahden menetelmän välimuotona on myös käytetty lumella vedettäviä kelkkoja (Braghin ym. 2016; Hoell 2019). Lisäksi viime aikoina on tutkittu muiden kehittyneempien menetelmien kuten kiihtyvyyssantureiden käyttöä (Breitschädel ym. 2012).

3.1 Kenttätestit

Mittausmenetelmistä erilaiset kenttätestit muistuttavat varsinaisia kilpailusuorituksia. Tällöin mittaukset ja tutkimukset suoritetaan lajille tyypillisissä olosuhteissa suorittaen vaadittavia mittauksia ladun tai sen osan matkalla. Tutkittaessa luisto-ominaisuuksia tehdään kokeet usein alamäessä tai muissa vapaan liu'un mahdollistavissa olosuhteissa (Karlöf ym. 2007), jolloin hiihtäjän kokonaisyhtälö yksinkertaistuu kaavan 4 mukaiseksi karsien painovoimaa lukuun ottamatta pois kaikki eteenpäin vievät voimakomponentit.

Tyypillisimmät koeasetelmat kenttäolosuhteissa ovat erilaiset alamäkeen tehdyt matkan, ajan ja nopeuden mittaukset. Yksinkertaisimmillaan hiihtäjä tai hiihtäjät laskevat vakioitua mäkeä

joko yhdessä tai erikseen. Laskun aikana verrataan eri laskujen välisiä nopeuksia tai edettyä matkaa. Laskuja voidaan verrata esimerkiksi ottamalla aikaa, vertaamalla kahta samaan aikaan laskevaa hiihtäjää tai mittaamalla kuinka kauas lähtöpaikasta hiihtäjä lopulta pysähtyy. Alkuvauhti (v_0) täytyy vakioida. Myös muuttuvien olosuhteiden vaikutuksia voidaan pyrkiä minimoimaan suorittamalla useampi lasku ja vaihtelemalla järjestystä. Esimerkiksi tuuli tai toistuvien laskujen myötä muuttuva latu tekevät sen, että eri laskukerrat eivät välttämättä ole tapahtuneet toisiaan vastaavissa olosuhteissa. (Fauve ym. 2005)

Karlöf ym. (2007) laativat standardoidun protokollan luistotesteille. He määrittivät sopivaksi mittauspaikaksi alamäen, joka alkaa verrattain jyrkkänä ja tasaantuu loppua kohti. Tällöin hiihtäjä pääsee liikkeelle nopeasti, mutta vauhti ei kiihdy maastohiihdolle epätyypillisen nopeaksi. Olosuhteiden tulisi olla sellaiset, että latu pysyisi mahdollisimman muuttumattomana. Laskemalla mäki kaikilla testattavilla 6–8 suksiparilla ennen mittausten aloittamista, voidaan pyrkiä luomaan mahdollisimman stabiilit olosuhteet mittausten ajaksi. Karlöf ym. (2007) mukaan kullakin suksiparilla tulisi laskea 6 kertaa ja sopivan pituinen lasku kestää 10–15 sekuntia. Suksien keskinäistä järjestystä tulee kierrättää. (Karlöf ym. 2007)

Fauve ym. (2005) mittasivat kahden talven aikana yli 2000 laskusuoritusta 470 metriä pitkässä laskettelurinteeseen tehdyssä koemässä. Mäki oli jaettu useaan sektoriin, joiden välillä laskijan kuluttama aika mitattiin valokennoja käyttäen. Kyseisessä tutkimuksessa tutkimuskohteena oli sääolosuhteiden vaikutus luistoon. Huomionarvoista on, että tutkimuksessa käytettiin suuria nopeuksia ja laskettelusuksia. Kattava tutkimusaineisto tarjosi kuitenkin tietoa sääolosuhteiden vaikutuksista luisto-ominaisuuksiin, joita voi soveltaa myös maastohiihdossa. Näitä olosuhteiden vaikutuksia käsiteltiin luvussa 2.

Kenttätestien etuna on lajinomaisten olosuhteiden mukailu ja täten kaikkien luistoon todellisuudessa vaikuttavien tekijöiden läsnäolo. Olosuhteet saattavat kuitenkin muuttua paljon esimerkiksi 45 minuuttia kestävästä luistotestin aikana. Karlöf ym. (2007) tutkimuksessa pyrittiin olosuhteet valitsemalla, latua valmistelemalla ja laskujärjestystä kierrättämällä jakamaan mahdolliset olosuhteiden muutosten vaikutukset sattumanvaraisesti kaikille suksipareille. Fauve ym. (2005) tutkimuksessa oli toinen lähestymistapa, kun mittauksia suoritettiin hyvin suuri määrä, joiden aikana vallinneet olosuhteet kirjattiin ylös. Suorittamalla kokeet esimerkiksi sisällä, voidaan monia olosuhteiden aiheuttamia muutoksia pyrkiä eliminoimaan.

Maastohiihdolle tyypillisten puitteiden tuominen sisätiloihin on moneen muuhun lajiin verrattuna hankalampaa. Monissa maissa on kuitenkin hiihtoon tarkoitettuja hiihtoputkia tai -halleja. Tutkimuskäytössä hiihtoputken ehdottomana etuna ovat vakaat, jopa kontrolloitavissa olevat olosuhteet; lämpötila ja kosteus pysyvät vakiona eivätkä tuulensuunnan muutokset vaikuta hiihtäjään. Muutoin mittausasetelma voi olla hyvin samanlainen kuin ulkona. Käytännössä tilat saattavat vaikuttaa mittauspaikan valintaan tai pituuteen. Vaikka olosuhteet muutoin ovat vakiot, ladun kehittyminen toistuvan laskemisen johdosta tulee kuitenkin huomioida esimerkiksi kierrättämällä laskujärjestystä.

Breitschädel ym. (2012) suorittivat mittauksia hiihtoputkessa tutkiessaan inertiamittausyksiköiden käyttöä mittalaitteena. He suorittivat mittauksia kahdella eri mittauskerralla. Ensimmäisellä mittauskerralla käytetyllä mäen osuudella oli kaarre oikealle. Toisella mittauskerralla käytettiin lyhyempää, suoraa mäkeä. Toisen mittauskerran tulokset osoittautuivat luotettavammiksi.

Ajanoton sijaan laskunopeutta voidaan arvioida myös muilla menetelmillä. Swaren ym. (2014) totesivat esimerkiksi Doppler-tutkan hyväksi välineeksi tutkiessaan eri menetelmiä hiihtoputkessa. He totesivat nopeustutkan käyttökelpoiseksi mittalaitteeksi nopeuden ja sen muutosten mittaamiseen laskun aikana.

Kilpailuja edeltävissä suksitesteissä luistoa testataan usein siten että kaksi hiihtäjää lähtee samasta nopeudesta laskemaan rinnakkain. Tällöin itse hiihtäjä tai ulkopuolinen havainnoitsija voi varsin nopeasti havaita hiihtäjien välisen nopeuseron. Kääntöpuolena on, että sama hiihtäjä ei voi laskea kahta suksiparia samaan aikaan vaan tarvitaan toinen testilaskija. Erityisesti hiihtäjän painolle herkempien perinteisen suksien osalta tämä voi olla haaste.

Yleisesti kansainvälisissä kilpailuissa testaamiseen käytetään parilaskua, jossa koelasketaan noin 6-8 paria suksia turnauskaavion omaisesti. Testaaminen vaatii kaksi laskijaa. Laskijat tasaavat vauhdin alamäen alkaessa esimerkiksi laskemalla hetken käsi kädessä. Alamäen tai testimatkan päätteeksi laskijoiden välinen etäisyys kirjataan ennalta sovitussa kohdassa alamäessä. Näin saadaan kahden suksiparin välinen ero. Sama toistetaan, kunnes kaikilla pareilla on laskettu ensimmäiset laskut. Jokaisesta parista nopeampi suksipari etenee jatkoon ja sama toistuu turnauskaavion omaisesti, kunnes yksi voittajapari on selvillä. Kun jokaisella laskukerralla on kirjattu suksiparien välinen ero, saadaan kaikille suksille etäisyys suhteessa

voittajapariin laskemalla kaavion puun kunkin haaran kirjatut tulokset. Tämän laskutavan etuna on, että isolle määrälle suksia saadaan verrattain lyhyessä ajassa muodostettua paremmuusjärjestys. (Lemmettylä 2022)

Kaikille näille nopeutta tai matkaa mittaaville mittausmenetelmille on yhteistä se, että suksien välisten erojen löytäminen on menetelmien tarkkuuksien puitteissa varsin yksinkertaista. Suksiparin absoluuttisen kitkakertoimen määrittäminen näillä mittausmenetelmillä vaatisi kuitenkin lisää tietoa mäen profiilista ja hiihtäjistä, jotta nopeuden muutokset voitaisiin johtaa edelleen muutoksiin liike-energiassa.

3.2 Laboratoriotestit

Laboratorio-olosuhteissa voidaan kenttätesteistä poiketen sulkea mahdollisimman paljon muita tekijöitä pois ja keskittyä vain mitattavaksi päätettyyn asiaan. Suksen luisto-ominaisuuksia mitatessa on usein syytä keskittyä suksen ja lumen välisen kitkan mittaamiseen eliminoimalla hiihtäjä kokonaisuudesta ja kontrolloimalla lumen ominaisuuksia.

3.2.1 Tribologia

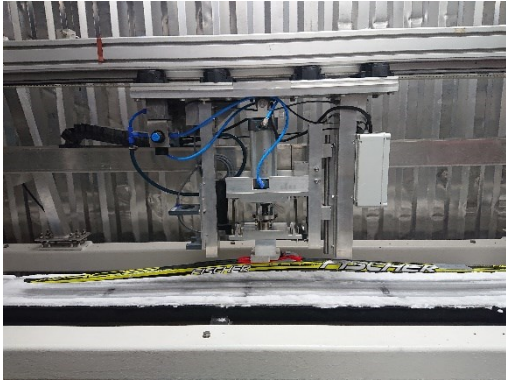
Tribologia on tieteenala, joka tutkii vuorovaikuttavien kappaleiden pintojen liikettä suhteessa toisiinsa. Tähän lukeutuvat muun muassa kitka ja kuluminen. (Persson 2000) Laitetta, jolla tutkitaan tribologiaa, kutsutaan tribometriksi. Perusperiaatteena on, että materiaalien pintoihin kohdistuvaa kohtisuoraa voimaa voidaan mitata ja usein säädellä. Lisäksi materiaalien liikuttamiseksi suhteessa toisiinsa vaadittavaa voimaa pystytään mittaamaan.

Rotaatitribometrissä (pin on disc tribometer) hankausliike tapahtuu pyörittämällä joko esinettä tai alustaa. Etuna on usein pieni koko ja äärettömän pitkä jatkuva liikerata.

Lineaaritribometrissä (linear tribometer) liike tapahtuu suoraan eteen- tai taaksepäin. Lineaaritribometrin etuna on lajinomainen suora liike ja se, että laitteessa voidaan mitata myös oikeita suksia. Lineaaritribometri vaatii kuitenkin huomattavasti enemmän tilaa kuin rotaatitribometri ja kappaleen liikkeen pituus on rajattu.

1980-luvulla ainakin Keinonen (1987) ja Lehtovaara (1989) ovat kehittäneet lumen tai jään ja suksen välisen kitkan mittaamiseen tarkoitettuja rotaatitribometrejä. Molemmat laitteet koostuivat pyöritettävästä levystä, joka voitiin pinnoittaa lumella tai jäällä. Lisäksi molemmissa laitteissa oli varsi, jolla mitattava materiaali painettiin pyörivään jäälevyyn. Varteen kohdistuvia voimia pystyttiin mittaamaan ja näin ollen määrittämään kitkakerroin materiaaleille. Keinosen tutkimuksessa keskityttiin itse laitteen kehittämiseen. Lehtovaara sen sijaan keskittyi mittaamaan eri muuttujien, kuten nopeuden, painon tai lämpötilan vaikutuksia. (Keinonen 1987; Lehtovaara 1989) Sittenkin ainakin Bäurle ym. (2006) ovat kehittäneet suuremman rotaatitribometrin, jolla he tutkivat erityisesti vesipatjan paksuutta eri olosuhteissa.

Lineaaritribometrejä on kehitetty ainakin Jyväskylän yliopistossa (Kolehmainen 2006; Linnamo ym. 2008; Lemmettylä ym. 2021) ja Innsbruckin yliopistossa (Hasler ym. 2016, Nachbauer ym. 2016). Molempien laitteiden peruseräite on varsin samanlainen; lämpötilasäädelyyn tilaan rakennettu laitteisto koostuu lumella tai jäällä päällystettävästä ladusta, jota pitkin testattavaa suksea voidaan liikuttaa edestakaisin. Suksea liikutetaan yläpuolella kulkevaa kiskoa pitkin sähkömoottoreita käyttäen. Suksea latuun painavaa voimaa ja suksen nopeutta voidaan säädellä. Molemmissa tapauksissa liike koostuu kiihdytys-, mittaus- ja hidastumisvaiheista. Sukseen kohdistettavia voimia mitataan voima-antureiden avulla ja näin ollen voidaan määrittää kitkakerroin kyseisen suksen ja lumen välille hyvin tarkasti määritellyissä ja kontrolloiduissa olosuhteissa. (Nachbauer ym. 2016; Lemmettylä ym. 2021). Innsbruckin yliopiston tribometrillä voidaan mitata yli 20 metrin matka (Nachbauer ym. 2016). Alla kuvissa 2 ja 3 esitetty Vuokatin tribometrin ollessa noin puolet lyhyempi (Lemmettylä ym. 2021). Toisaalta Vuokatin tribometri on tiedettävästi ainut laite, millä pystytään simuloimaan perinteisen hiihdon potkua ja näin ollen mittaamaan myös siinä vaadittua lepokitkaa (Lemmettylä ym. 2021).



KUVAT 2 ja 3. Jyväskylän yliopiston Vuokatissa sijaitseva lineaaritribometri. Suksea liikuttava laitteisto (vasemmalla) ja yleisnäkymä kylmäkontissa sijaitsevasta ladusta (oikealla). Hakulinen.

3.2.2 Suksen rakenteen tutkiminen

Osa tutkimuksista on keskittynyt nimenomaan suksen pohjan materiaalien tutkimiseen. Tällöin pyritään ymmärtämään, mikä vaikutus esimerkiksi suksen pohjan kuvioinnilla tai materiaalin valinnalla on suksen ja lumen väliseen vuorovaikutukseen. Näiden tutkimusten tulokset ovat harvemmin suoraan hiihtäjän sovellettavissa, mutta tarjoavat tietoa suksivalmistajille ja suksihuollolle.

Ducret ym. (2004) tutkivat UHMWPE-muovin liukuominaisuuksia eri olosuhteissa käyttäen tribometriä ja pinnan 3D-kuvantamista hankauksessa tapahtuvan vuorovaikutuksen ymmärtämiseksi. Pinnan tarkan kuvannuksen avulla oli mahdollista tutkia yksittäisten jääkiteiden hankausta suksen pohjaan ja todellista kosketuspinta-alaa. Haasteena on kuitenkin yhdistää näitä laboratorio-oloissa tutkittuja ominaisuuksia ladulla näkyvään suorituskykyyn. (Ducret ym. 2004)

4 HIIHTÄJÄN ETENEMISEN MALLINTAMINEN JA KEHITTYNEEMMÄT MITTAUSMENETELMÄT

Luvussa 2.1 esitettiin alamäkeen liukuvan hiihtäjän kiihtyvyyttä kuvaava kaava:

$$a = g * \sin(\alpha) - \frac{1}{2m} \rho v^2 C_D A - \mu_{LIUKU} * g * \cos(\alpha) \quad (4)$$

Jos suksen kokemia kiihtyvyyden muutoksia ja ladun kaltevuutta pystytään mittaamaan suorituksen aikana hiihtäjän massan ja ilmanvastuksen pysyessä vakiona, voidaan kiihtyvyyden muutosten perusteella määrittää muutoksen aiheuttaneen kitkavoiman suuruus ja täten myös kitkakertoimen suuruus.

Tätä tai vastaavia periaatteita voidaan hyödyntää mallinnettaessa hiihtäjää ja häneen vaikuttavien voimien keskinäisiä suhteita. Kuten luvussa 3.1 todettiin, pelkän laskunopeuden perusteella ei voida tietää esimerkiksi kitkakerrointa. Tuntemalla ladun profiili ja arvioimalla hiihtäjän kokema ilmanvastus ja kitkavoima, voidaan mallintaa laskeva hiihtäjä yhtenä kokonaisuutena.

4.1 Inertiamittausyksiköt mittausmenetelmänä

Hiihtäjän etenemisen mallintaminen vaatii käytännössä pelkkiä nopeusmittauksia monipuolisempia mittausmenetelmiä. Useita muuttujia kuten nopeutta, kaltevuutta ja nopeuden muutoksia on pystyttävä seuraamaan synkronoidusti mahdollisimman korkealla taajuudella. Näihin menetelmiin voidaan lukea ainakin erilaiset voima- ja kiihtyvyyssanturit sekä tarkat sijainnin määrittäminen menetelmät kuten GNSS (Global Navigation Satellite System).

Inertiamittausyksiköiden sisältämien kiihtyvyyssantureiden ja gyroskooppien käyttöä esimerkiksi hiihtotekniikan tunnistamiseksi on käytetty onnistuneesti monessa tutkimuksessa. (Myklebust ym. 2014; Fasel ym. 2015) Vastaavasti suksen suuntaisia kiihtyvyyden muutoksia pitäisi pystyä käyttämään kitkavoiman tai sen muutosten suuruuden määrittämiseksi. Näitä kiihtyvyyden muutoksiin perustuvia mittauksia on tutkittu useiden tutkijoiden toimesta hieman eri olosuhteissa. Esimerkiksi Breitschädel ym. (2012) ja Swaren ym. (2014) tutkivat inertiamittausyksiköiden (IMU) hyödynnettävyyttä. Ensin mainitussa silloin käytetty IMU-teknikka ei osoittautunut ajanottoa tarkemmaksi menetelmäksi arvioida suksen luistoa.

Jälkimmäisessä tutkimuksessa Doppler-tutka osoittautui käyttökelpoisemmaksi. Molemmissa tutkimuksissa huomattiin, että inertiamittausyksiköiden käyttöön liittyi epätarkkuuteen ja kalibrointiin liittyviä haasteita. (Breitschädel ym. 2012; Swaren ym. 2014)

4.2 GNSS mittausmenetelmä

Satelliittipaikannuksen käyttö on hyvin yleistä eri tasoisessa urheilusuoritusten mittaamisessa. Nykyään käytännössä kaikki urheilukellot ja -mittarit perustuvat satelliittipaikannukseen. Käytetty tekniikka on GNSS (Global Navigation Satellite System), mikä käyttää hyväkseen eri tahojen paikannussatelliitteja. Yleisimpiä ovat yhdysvaltalainen GPS (Global Positioning System), venäläinen GLONASS, eurooppalainen Galileo ja kiinalainen BeiDou. Eri järjestelmien olemassaolon ymmärtäminen on tämän tutkimuksen kannalta olennaista GNSS-laitteiden mahdollistaman mittaustarkkuuden ymmärtämiseksi. Erityisesti suhteellisen, mittauspisteiden välisen tarkkuuden parantamiseksi voidaan käyttää differentiaalikorjausta (dGNSS), jolloin hyödynnetään yksittäisten paikannussensoreiden lisäksi erillistä tukiasemaa, suhteessa mihin sensoreiden sijainnit voidaan määrittää vielä tarkemmin.

Satelliittipaikannukseen perustuvassa nopeuden mittaamisessa mitataan yksittäisten pisteiden välistä etäisyyttä ja näiden mittausten välistä aikaa. Vaikka monessa sovelluksessa esitetään jatkuvaa liikettä, koostuu satelliittipaikannus kuitenkin vain yksittäisistä erillisistä pisteistä. Tätä pisteiden väliä voidaan kuitenkin täydentää kiihtyvyysanturein ja gyroskoopein mitattavalla jatkuvalla liikkeellä. Jälkimmäinen menetelmä ei mahdollista absoluuttisen sijainnin mittaamista, mutta yhdistettynä GNSS-IMU mittalaite pystyy muodostamaan hyvinkin tarkan kuvan kappaleen sijainnista ja liikkeestä, kun tiedetään absoluuttinen sijainti (GNSS) ja näiden sijaintien välillä tapahtunut liike (IMU). (Jølstad ym. 2021)

Satelliittipaikannusjärjestelmä on aikaisemmin käytetty lähinnä hiihtokilpailujen ja hiihtotekniikan tutkimiseen. Andersson ym. (2010) käyttivät dGNSS-laitteistoa (Leica Geosystems AG, Heerbrugg, Switzerland) sprinttihiihtosuoritusten mittaamiseen ja tulivat siihen lopputulokseen, että satelliittipaikannusta hyödyntävän laitteiston avulla ja videokuvasta validoitujen tulosten perusteella ylämäen hiihtovauhti ja kovemmat maksiminopeudet selittivät kovempia sprinttihiihdon loppuaikoja.

Takeda ym. (2019) tutkivat hiihdon eri tekniikoiden tunnistamista GNSS-IMU -datasta validoimalla mittaustuloksia videokuvaan kanssa. He tulivat siihen johtopäätökseen, että heidän tutkimaansa GNSS-laitteistoa (AT-H-02, AOBA Technologia LLC) pystyi luotettavasti käyttämään mm. hiihtotekniikan, tekniikanvaihdosten ja hiihtonopeuden tunnistamiseen perinteisen hiihtotavan suorituksen aikana.

Vasta hiljattain julkaistussa tutkimuksessa Shang ym. (2022) käyttivät GNSS-IMU -sensoria ja siihen kehitettyä analyysiohjelmistoa (Archinisis GmbH, Düdingen, Switzerland) vapaan hiihtotavan sprinttikilpailun suoritusta selittävien osa-alueiden tunnistamiseen. Tulokset olivat hyvin vastaavia kuin Andersson ym. (2010) aikaisemmin dGNSS tekniikalla saamat tulokset: ylämäen hiihtovauhti ja sen lisäksi käytetyt G2 ja G3 tekniikat olivat yhteydessä nopeisiin loppuaikoihin.

On siis selvää, että eri valmistajien GNSS-laitteita on onnistuneesti käytetty hiihtotekniikoiden tunnistamiseen. Vaikka yllä mainitut tutkimukset keskittyivät hiihtotekniikoiden tunnistamiseen, mainitaan niissä myös hiihtonopeuden mittaaminen. Koska nykyisin yleisesti käytössä olevat ulkona tehtävät suksien luiston mittaamenetelmät perustuvat tavalla tai toisella saavutetun liukunopeuden mittaamiseen, pitäisi GNSS-mittalaitteistoja pystyä käyttämään tähän samaan nopeuden mittaamiseen, mikäli niiden tarkkuus todetaan tarpeeksi hyväksi. Pelkkään satelliittipaikannukseen perustuvassa laitteessa tuskin riittää tarkkuus, mutta IMU-sensori yhdistettynä vaadittavan tarkkuuden saavuttaminen voisi olla mahdollista.

Valmistajan (Advanced Sport Instruments, Lausanne, Switzerland) mukaan ASI AdMos -sensorin suhteellinen paikannustarkkuus on 30 senttimetriä ja nopeuden mittaustarkkuus 0,05 metriä sekunnissa. Tässä tutkimuksessa on käytetty kyseistä mittauslaitetta, jonka tietojen käytettävyyttä suksien luiston mittaamiseksi tutkitaan.

4.3 Mallinnus ja simulaatiot

Tutkiessaan inertiamittausyksikön tarkkuutta suksen luisto-ominaisuuksien mittaamisvälineenä Breitschädel ym. (2012) käyttivät mallia, jossa yhdistämällä rinteen kaltevuus, inertiamittausyksiköillä kerätty kiihtyvyydata sekä laskijan nopeus pystyttiin määrittämään kitkakertoimen kaavan 4 mukaisesti. Kun ilmanvastus pysyy vakiona, jää nopeuden pienten muutosten ainoaksi selittäväksi tekijöiksi lumen ja suksen välisen vuorovaikutuksen

aiheuttaman kitkavoiman pienet muutokset. Tämä kitkakertoimen määrittystapa ei kuitenkaan Breitschädel ym. (2012) tutkimuksessa osoittautunut heidän käytössään olleella tekniikalla valokennoilla mitattua laskuaikaa tarkemmaksi tavaksi määrittää kitkakerrointa.

Matemaattista mallinnusta voidaan käyttää myös toiseen suuntaan; simuloimaan hiihtäjän suorituksia, kun tarvittavat parametrit ovat tiedossa. Moxnes ym. (2014) kehittivät simulaatiomallin, jolla he onnistuivat simuloimaan yhden koehiihtäjän etenemistä maastossa hyvin tarkasti. Parhaimmillaan he onnistuivat simuloimaan koehenkilön hiihtoajan 2 sekunnin tarkkuudella, kun simulaatiota verrattiin 815 sekuntia kestäneeseen hiihtosuoritukseen.

Hiihtäjän kunto ja muut fysiologiset ominaisuudet vaikuttavat tuotettavissa olevaan tehoon. Moxnes ym. (2014) onnistuivat määrittämään yhden hiihtäjän eteenpäin vievän tehon (locomotive power) hiihtäjän nopeuden funktiona $P(v)$. Funktio ei kuitenkaan ollut sovellettavissa muihin hiihtäjiin. (Moxnes ym. 2014) Lisäksi ainakin Leino ym. (1983) ja Spring ym. (1988) ovat tutkineet hiihtäjän ilmanvastuksen suuruutta ja määritelleet viitearvoja pinta-alalle ja ilmanvastuskertoimelle. Ladun profiili ja hiihtäjään liittyvä paino ovat verrattain helppoja mitata.

Jotta esimerkiksi liukukitkan vaikutuksia voidaan simuloida, täytyy muidenkin parametrien olla mahdollisimman hyvin tiedossa. Moxnes ym. (2014) pystyivät arvioimaan, että kitkakertoimen pienentäminen 0,037:stä 0,030:aan lyhensi simuloitua hiihtoaikaa 5,9 %. (Moxnes ym. 2014) Parempaa ymmärrystä liukukitkasta eri olosuhteissa voidaan siis hyödyntää osana hiihtäjää kokonaisuutena mallintavia simulaatioita ja toisaalta liukukitkan vaikutusta kokonaisuuteen voidaan arvioida sitä paremmin mitä tarkempi käsitys muista parametreista on saatu.

5 TUTKIMUKSEN TARKOITUS

Tämän tutkimuksen tarkoituksena on tutkia IMU-GNSS -sensorin keräämän datan hyödynnettävyyttä suksien luisto-ominaisuuksien mittaamisessa. Kuten luvussa 3.1 todettiin, niin erilaiset koelaskut ovat tarkoitukseen erinomaisesti soveltuvia tulosten osalta, mutta hyvin työläitä. Jos kilpailu- tai muista suorituksista mitattu data olisi käyttökelpoista, voisi se vähentää varta vasten tehtävien suksitestien tarvetta.

Myös erityisesti luisto-ominaisuuksien vaikutusta hiihtosuorituksen eri osa-alueisiin tutkitaan. Tarkoituksena olisi pystyä tarjoamaan valmennuksellisia apuvälineitä päätöksentekoon eri kilpaladuille tehtävien suksien valintaan erityisesti perinteisen hiihdossa.

Kolmanneksi erityisesti tutkimuksen asetelma tarjoaa erinomaisen mahdollisuuden verrata samoja suksia lineaaribometrillä laboratoriossa, erillisessä suksitestissä ja hiihtokilpailussa. Tarkoituksena on joko vahvistaa tai kyseenalaistaa eri vaiheissa tehtävien mittausmenetelmien hyödynnettävyyttä ja sovellettavuutta hiihtokilpailun kenttäolosuhteisiin.

6 TUTKIMUSKYSMYKSET

Tutkimuksen tavoitteista on muodostettu seuraavat tutkimuskysymykset.

Tutkimuskysymys 1: Mikä on laboratorio-olosuhteissa tehdyn tribometrimittausten ja kenttäolosuhteissa tehdyn laskutestin yhteys?

Hypoteesi: Niillä suksilla, joiden kitkakerroin on laboratorio-olosuhteissa mitattu pieneksi, tullaan laskemaan nopeita laskuaikoja myös kenttäolosuhteissa tehtävässä liukutestissä.

Tutkimuskysymys 2: Kuinka hyvin tribometrimittausten ja laskutestien tulokset selittävät kisasuorituksen elementtejä?

Hypoteesi: Hyvin luistaviksi todetuilla suksilla saavutetaan nopeampia laskuaikoja alamäessä.

Tutkimuskysymys 3: Mikä on liu'un merkitys kokonaissuoritukseen eri maastonkohdissa?

Hypoteesi: Testissä hyvin luistaviksi todetut sukset ovat nopeita alamäkeen. Muissa maastonkohdissa ei merkittävää vaikutusta.

7 TUTKIMUSMENETELMÄT

Tässä tutkimuksessa suksien luistoa mitattiin kolmella eri tavalla: kilpailunomaisessa suorituksessa GNSS-anturein tallennetusta datasta (Advanced Sport Instruments, Sveitsi), ulkona ladulla laskemalla valokennomäkeen ja lisäksi sisällä laboratoriossa suksenliikutuslaitteessa. Tähän tutkimukseen käytetyt tiedot kerättiin osana laajempaa tutkimusprojektia.

7.1 Koehenkilöt ja sukset

Mittaukset suoritettiin neljän päivän aikana Vuokatissa. Tutkimuksen aikana perinteisen hiihtotavan suorituksia tehtiin 25 eri hiihtäjän toimesta yhteensä kahden päivän aikana ja vapaan hiihtotavan suorituksia 20 hiihtäjän toimesta yhteensä kahden päivän aikana. Tutkimuspäivinä hiihrettiin pääsääntöisesti kaksi suunnilleen samankokoista erää; yksi aamupäivällä ja toinen iltapäivällä. Suuri osa koehenkilöistä osallistui sekä perinteisen- että vapaan hiihtotavan suorituksiin. Kaikki hiihtäjät olivat kansainvälisen tai kansallisen tason maastohiihtäjiä, joista nuorin oli syntynyt vuonna 2003 ja vanhin 1991. Perinteisen hiihtotavan mittauksiin osallistuneiden hiihtäjien keskimääräinen paino oli 70,5 kg (min. 60,7 kg, maks. 82,8 kg) ja keskipituus 175 cm (min. 163cm ja maks. 192 cm). Pituudet ja painot mitattiin hiihtäjän saapuessa paikalle.

Tämän tutkimuksen näkökulmasta ei käsitellä yksittäisten hiihtäjien suorituksia, vaan mielenkiintoista on hiihtäjä-suksi -yhdistelmät, sillä kukin hiihtäjä hiihti vain yhdellä suksiparilla per hiihtotekniikka ja kutakin suksiparia testattiin suksenliikutuslaitteella. Perinteisen hiihtotavan päivinä hiihtäjät hiihtivät omilla suksillaan, joten joukossa oli monien eri valmistajien suksia. Vapaan hiihtotavan päivinä hiihtäjät hiihtivät tutkimusryhmän tarjoamilla suksilla (Fischer ja Madshus). Kaikkien suksien voitelusta ja huollosta vastasi Suomen hiihtomaajoukkueen huoltaja. Tässä tutkimuksessa keskitytään perinteisen hiihtotavan suksiin.

7.2 Olosuhteet ja ladut

Mittausten demo- ja valmistelupäivä oli 16.3.2021 jonka aikana mittausasetelma testattiin yhden hiihtäjän voimin. Varsinaiset mittaukset ja tietojen keruu suoritettiin 17.-20.3.2021, siten

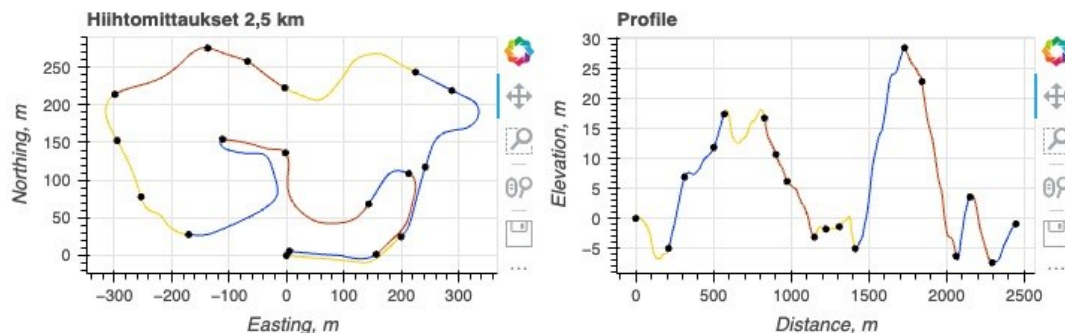
että kahtena ensimmäisenä päivänä hiihrettiin perinteisellä hiihtotavalla ja kahtena jälkimmäisellä vapaalla hiihtotavalla.

Sääolosuhteet olivat verrattain tasaiset kaikkina mittauspäivinä. Lämpötila pysyi pakkasen puolella kaikkina muina päivinä paitsi viimeisenä. Sää oli aurinkoinen tai puolipilvinen ja kirjoittajan arvion mukaan päivän sisäinen sää kehittyi hyvin samalla tavalla kaikkien mittauspäivien aikana: kylmintä oli aamuyöllä tai aamulla, päivän mittaan aurinko lämmitti säätä ja vasta illaksi viileni uudestaan.

TAULUKKO 1: Päiväkohtaiset lämpötilat. Koottu FMI, Sotkamo Kuolaniemi tietojen pohjalta.

	Päivä 1	Päivä 2	Päivä 3	Päivä 4
Edeltäneen yön alin (°C)	-6,9	-11,9	-15,0	-11,9
08:00 (°C)	-6,9	-11,6	-13,7	-6,4
Vuorokauden lämpimin (°C)	-0,8	-5,6	-5,0	+0,4
18:00 (°C)	-2,9	-6,5	-9,8	-0,6

Usean kierroksen keskiarvoistetun datan perusteella kilpalatu, jota hiihtäjät kiersivät, oli 2446 metriä pitkä. Perinteisen hiihtotavan kilpailut olivat 4 kierroksen pituisia ja vapaan hiihtotavan kilpailut 2 kierroksen pituisia väliaikalähtökilpailuja. Maasto oli vaihtelevaa ja nousumetrejä kertyi yhden kierroksen aikana 86 metriä. Kaikki ladut ajettiin joka aamu latuja normaalisti ylläpitävän tahon toimesta latukoneella.



KUVA 4. Latukartta ja -profiili

Yllä kuvassa 4 nähdään sekä latulenkki (vasen) että lenkin profiili (oikea). Reitti jaoteltiin osioihin maaston muodon ja muiden erityiskohtien perusteella. Tällaisia erityiskohtia oli esimerkiksi tutkimusryhmän määräämä alamäki, missä kaikkien tuli laskea staattisessa laskuasennossa ja toinen, hyvin tasainen osuus, missä tuli hiihtää tasatyöntäen. Näitä analyysiohjelmiston (Archinisis GmbH, Switzerland) arvioimia tekniikanvaihtoksia ja erityisesti kunkin osuuden hiihtonopeuksia käytetään hyväksi analysoitaessa GNSS-datan hyödynnettävyyttä.

Alamäki, jossa hiihtäjät laskivat valokennoihin (Spin Test OY, Viro) oli kilpaladun lähtö- ja maalialueen välittömässä läheisyydessä. Kuvassa 5 nähtävä alamäki oli yhteensä 68 metriä pitkä. Laskuun lähdettiin paikaltaan kohdasta 0 metriä. Välillä 0 – 21 metriä kaltevuus vaihteli -10 ja -12 asteen välillä. Ensimmäinen ja ajanoton aloittava valokenno oli 21 metrin kohdalla, missä jyrkkyys oli -9 astetta. Alamäki loiveni niin että toisen kennon kohdalla, 32 metrin päässä lähdöstä kaltevuus oli -3 astetta, jonka jälkeen latu tasaantui ja lähti muutaman asteen nousuun. Viimeinen, ajanoton lopettava valokenno oli 68 metrin päässä lähdöstä ja kaltevuus oli +2 astetta. Kaikkien hiihtäjien kesimääräinen toteutunut laskunopeus oli noin 7,5 m/s, mikä on maastohiihdolle tyypillinen nopeus.



KUVA 5. Valokennomäki ajanoton aloittavan portin kohdalta eteenpäin kuvattuna. Mäen kaltevuus oli tässä kohdassa -9 astetta.

7.3 Mittauslaitteet

Tämän tutkimuksen kannalta olennaisia mittauslaitteita ja tuloksia oli valokennoin mitattu aika laskussa, videokameroin (GoPro, USA) ja AdMos-anturein taltioitu hiihtosuoritus kilpaladulla sekä suksenliikutuslaitteella (Jyväskylän yliopisto, Suomi)(Lemmettylä ym. 2021) mitattu data suksien luistosta laboratorio-oloissa. Kuvassa 6 nähdään tutkimuksen kannalta keskeiset AdMos-sensorit, jotka asetettiin niskan kohdalle hiihtäjien käyttämän liivin taskuun. Tutkimuspäivien aikana suoritettiin myös muita mittauksia, muiden kuin tämän kyseisen tutkimuksen käyttöön.



KUVA 6. Tutkimuksessa käytettyjä AdMos-sensoreita.

Käytetyt valokennot muodostuivat kolmesta portista, jotka oli liitetty toisiinsa johdolla. Toimintaperiaate oli hyvin yksinkertainen: laite mittasi aikaa kussakin portissa tapahtuvan valonsäteen katkeamisen välillä. Valo-olosuhteet ja erityisesti suora auringonvalo häittäsivät ajoittain käyttöä, mutta tästä johtuneet mittaamatta jääneet laskut oli helppo huomata ja toistaa.

AdMos-sensorit asennettiin hiihtäjien niskaan tarkoitusta varten puettuun liiviin. Sensori oli paikallaan koko tutkimuksen ajan ja lopuksi tiedot siirrettiin tietokoneelle. Tällä laitteistolla ja analyysiohjelmistoilla saatiin reittikartat ja -profiilit, yksittäisten hiihtäjien suoritusten tiedot, mukaan lukien hiihtotekniikan vaihdokset ja hiihtonopeus kussakin ladun kohdassa.

Käytetty suksenliikutuslaite esiteltiin tarkemmin kappaleessa 3.2.1. Jokaista suksipakkaa ajettiin liikutuslaitteessa kiertävässä järjestyksessä (Sn=Suksiparin numero, A/B suksiparin sukset) S1A-S2A-S3A-S3B-S2B-S1B-S1B-S2B-S3B-S3A-S2A-S1A niin että jokaisella ajolla suksea ajettiin viisi kertaa. Kitkakertoimen keskiarvo on näiden keskiarvo. Perinteisen hiihtotavan suksia mitatessa käytettiin kunkin hiihtäjän omaa painoa. Hiihtäjät eivät itse osallistuneet näihin laboratoriomittauksiin.

7.4 Mitattu hiihtosuoritus

Mitattuja suorituksia hiihdettiin neljän päivän aikana pari erää päivässä, siten että sekä aamu-että iltapäivällä suorituksiin osallistui 6-8 hiihtäjää. Koehenkilöt suorittivat lämmittelyn ja henkilökohtaiset valmistelut omien tapojensa mukaisesti. Mittauksiin heidät valmisteltiin asettamalla videokamera ja AdMos-sensori paikalleen.

Kukin hiihtäjä lähti kilpailusuoritukseen aikaisemmin määrätyn aikataulun mukaisesti. Itse kilpailu eteni normaalin väliaikalähtöisen hiihtokilpailun tapaan ja useimpien hiihtäjien näkökulmasta kyseessä oli harjoituskilpailun omainen tilanne. Paikalla oli satunnaisia kannustajia ja joidenkin hiihtäjien valmentajia tai muita tukihenkilöitä.

Lähes välittömästi maaliintulon jälkeen hiihtäjät ohjattiin maalin läheisyydessä sijainneelle alamäelle, missä hiihtäjät laskivat kilpailuvarusteissaan alamäkeen, jossa heidän laskustaan otettiin aikaa. Heillä oli mukana edelleen myös AdMos-anturi. Hiihtäjät lähtivät paikaltaan ja toistivat laskun siten että kultakin saatiin neljä onnistunutta kellotusta. Mittalaitteistosta, hiihtäjän koosta suhteessa valokennoihin ja valo-olosuhteista johtuen tämä vaati käytännössä enintään kuusi laskukertaa yksittäisiltä hiihtäjiltä, koska joidenkin hiihtäjien kohdalla suorituksia jouduttiin uusimaan. Hiihtäjät laskivat näitä laskuja pitkälti siinä järjestyksessä, kun he saapuivat kilpaladulta, käytännössä hiihtäjien laskujärjestys muodostui osin limittäiseksi.

Sillä aikaa, kun koehenkilöt hiihtivät kilpailusuoritusta, niin valokennoalamäen latua laskettiin referenssihiihtäjän (75 kg, 181 cm) toimesta noin 20-30 kertaa erillisellä suksiparilla (Fischer), jotta latu pysyisi mahdollisimman tasalaatuisena varsinaisten mittausten aikana. Sama referenssihiihtäjä laski osin koehenkilöiden seassa referenssisuksella (Fischer), jotta eri erien välisiä tuloksia voitaisiin verrata keskenään normalisoimalla tulokset referenssihiihtäjän suorituksiin.

7.5 Tilastollinen analyysi

Luvuissa 7.3 ja 7.4 kuvatuin menetelmin saatuja aikoja vertailtiin keskenään, siten että kuhunkin kolmesta tutkimuskysymyksestä pyrittiin löytämään vastaus.

Kaikki mitatut suureet olivat jatkuvia muuttujia ja kun näitä vertailtiin pareittain, laskettiin korrelaatioita muuttujien välillä. Aineistojen normaalijakautuneisuus testattiin Saphiro-Wilk -testillä kun otoskoko oli alle 50, eli kaikissa tapauksissa missä käsiteltiin kunkin hiihtäjän tai suksen keskiarvoistettuja tuloksia. Vastaavasti Kolmogorov-Smirnov -testiä käytettiin kun otoskoko oli yli 50, eli käytännössä siinä tapauksessa missä laskusuorituksia käsiteltiin yksittäisten suoritusten tasolla, ei hiihtäjäkohtaisesti keskiarvoistettuna. α -tasoksi määritettiin 0,05, joten nollahypoteesi normaalijakautuneisuudesta voitiin jättää hylkäämättä, jos p-arvo on $>0,05$.

Normaalijakautuneille muuttujille käytettiin Pearsonin korrelaatiokerrointa. Riippuvuus oli sitä vahvempi mitä lähempänä korrelaatiokertoimen itseisarvo oli arvoa 1 (minimi 0). Valittiin voimakkaan riippuvuuden raja-arvoksi $|r| > 0,7$. Niille muuttujille, jotka eivät olleet normaalijakautuneita käytettiin Spearmanin korrelaatiokerrointa, jota tulkittiin samoin kuin Pearsonin korrelaatiokerrointa. P-arvon osalta käytettiin vakiintunutta tulkintaa: raja-arvona tilastolliselle merkittävyydelle käytettiin arvoa 0,05 (*). P-arvon ollessa alle 0,01 (**) ja 0,001 (***) huomioitiin myös nämä. Nollahypoteesina käytettiin hypoteesia, että muuttujien välillä ei ollut yhteyttä. Korkea korrelaatiokertoimen itseisarvo viittasi yhteyteen ja nollahypoteesi yhteyden puuttumisesta voitiin hylätä pienillä p-arvoilla.

8 ANALYYSI JA TULOKSET

Tässä osiossa käsitellään eri mittausmenetelmin kerättyjä tietoja suksien luistosta ja vertaillaan niitä keskenään käyttäen kvantitatiivisia menetelmiä.

8.1 Laskuajat testimässä

Laskuja tuli jokaiselle laskijalle lähtökohtaisesti neljä. Jokaisen erän yhteydessä laski sama referenssilaskija samalla suksiparilla. Kaikkien koehenkilöiden laskuajat suhteutettiin referenssilaskijan kyseisen erän laskuaikaan, jotta eri erissä eri päivinä hiihtäneitä hiihtäjiä voitaisiin verrata keskenään. Taulukko 2 seuraavassa alaluvussa 8.2 näyttää eri koehenkilöiden laskuaikoja suhteessa referenssilaskijan aikoihin.

8.2 Suksenliikutuslaite

Kaikki tutkimuksessa käytetyt suksiparit mitattiin Vuokatissa Jyväskylän yliopiston suksenliikutuslaitteella, siinä kunnossa, kun ne olivat hiihtosuoritusten jälkeen. Mittausjärjestys ja protokolla olivat samat kuin mitä kyseisen laitteen kanssa oli aikaisemmin totuttu käyttämään. Tämä esiteltiin tarkemmin yllä luvussa 5.3. Mittaustuloksena suksenliikutuslaitteesta saatiin kitkakerroin kullekin suksiparille. Myös edellä mainitut alamäkilaskuissa käytetyt referenssisukset mitattiin suksenliikutuslaitteella. Oheisessa taulukossa 2 on esitetty kunkin hiihtäjä-suksiparin keskimääräinen normalisoitu valokennoin mitattu laskuaika ja suksenliikutuslaitteella mitattu kitkakerroin.

TAULUKKO 2. Suksiparikohtaiset normalisoidut laskuajat ja kitkakertoimet

id	Keskimääräinen laskuaika normalisoituna referenssilaskijan muukaan	Liiketuslaitteella mitattu kitkakerroin
2-112	0,9896	0,0327
3-101	0,9914	0,0280
2-107	0,9933	0,0288
4-111	1,0011	0,0322
2-109	1,0023	0,0270
4-109	1,0049	0,0269
2-108	1,0063	0,0288
3-104	1,0071	0,0253
3-102	1,0072	0,0253
4-110	1,0075	0,0299
3-103	1,0080	0,0281
1-102	1,0099	0,0238
1-105	1,0136	0,0288
4-108	1,0160	0,0294
1-104	1,0167	0,0271
4-113	1,0187	0,0309
2-110	1,0200	0,0294
1-101	1,0208	0,0305
3-107	1,0252	0,0274
2-111	1,0257	0,0306
1-106	1,0264	0,0322
3-106	1,0268	0,0344
1-103	1,0301	0,0309
3-105	1,0317	0,0282
4-112	1,0411	0,0313

8.3 Kilpaladun alamäki

Suksien luistoa alamäessä vertailtiin maastoon merkityllä alamäkiosuudella, mikä oli jaettu kahteen osioon: alku-puoliväli ja puoliväli-loppu. Hiihtäjät ohjeistettiin laskemaan työntämättä vauhtia ja hiihtäjien alamäessä käyttämä tekniikka validoitiin jälkeenpäin videotallenteelta. Kultakin hiihtäjältä on alla olevaan taulukkoon 3 kirjattu heidän absoluuttinen mäessä viettämä aika ja suhdeluku siitä, kuinka suuren osan koko suorituksestaan he käyttivät kyseisessä alamäessä.

TAULUKKO 3. Kunkin hiihtäjän keskimääräinen kierrosaika (miehet hiihtivät 4 ja naiset 3 kierrosta), hiihtäjien kilpaladun alamäessä käyttämä keskimääräinen aika, hiihtäjien kilpaladun alamäessä käyttämä aika suhteutettuna suorituksen kokonaisuikaan

id	Keskimääräinen kierrosaika (s)	Keskimääräinen aika alamäessä (s)	Aika alamäessä / Kierrosaika
1-102	408,49	14,72	0,0360
1-104	474,71	16,08	0,0339
1-101	409,71	15,05	0,0367
1-106	468,97	18,47	0,0394
1-103	411,13	14,54	0,0354
1-105	464,02	15,75	0,0339
2-108	407,78	15,01	0,0368
2-107	435,11	14,89	0,0342
2-109	406,26	13,91	0,0342
2-110	475,75	16,93	0,0356
2-111	483,50	17,04	0,0352
2-112	468,84	16,28	0,0347
3-101	404,21	16,39	0,0405
3-102	421,24	16,06	0,0381
3-103	421,32	16,18	0,0384
3-104	468,99	19,89	0,0424
3-105	499,21	20,82	0,0417
3-106	471,94	19,60	0,0415
3-107	482,91	17,97	0,0372
4-108	419,63	16,74	0,0399
4-109	404,22	15,68	0,0388
4-110	412,11	15,97	0,0387
4-111	496,09	17,78	0,0358
4-112	485,21	20,21	0,0417
4-113	491,53	19,54	0,0398

8.4 Ajankäyttö eri maastonkohdissa

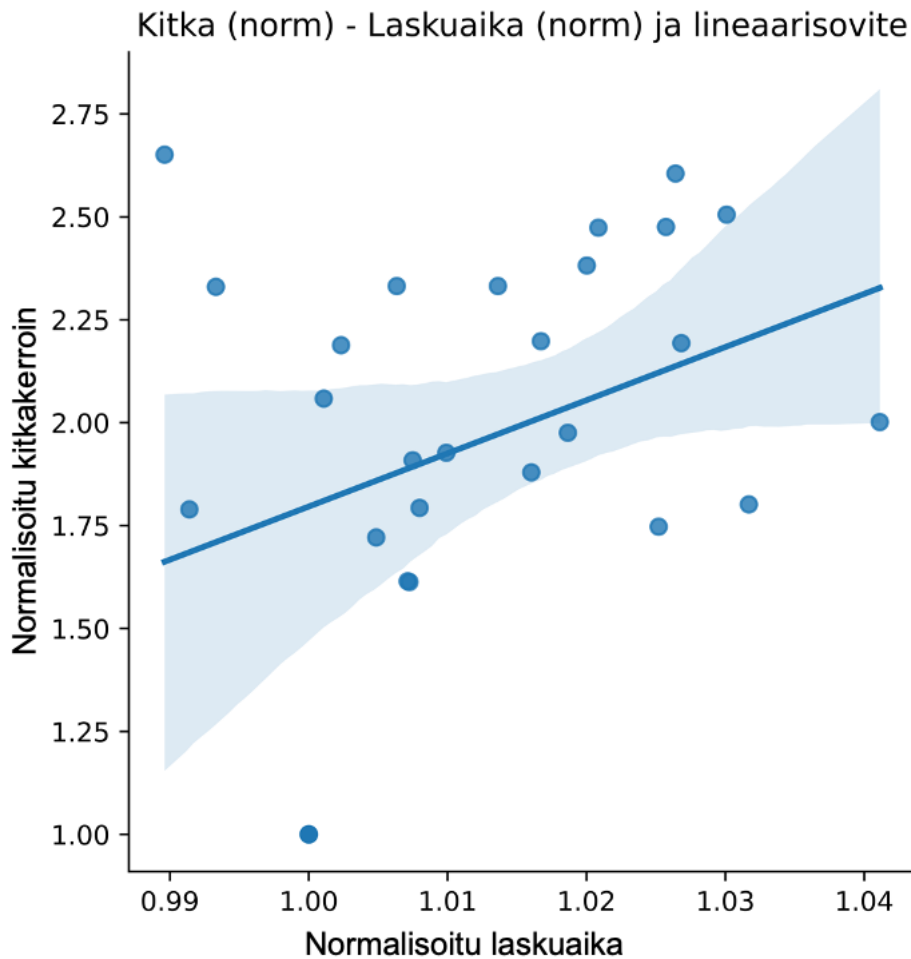
Hiihtäjien ajankäyttö ladun eri kohdissa tallentui AdMos-sensorin tietojen perusteella. Näistä huomioitiin kilpaladun alamäen lisäksi yksi maastoon merkitty tasatyöntöosuus (DP) ja kilpaladun suurin ylämäki (UH3). Aikaisemmin luvussa 7.2 latukarttaa ja -profiilia esitelleessä kuvassa 4 suurin ylämäki erottuu selvästi eniten nousumetrejä kerryttävänä sinisenä osuutena.

Tasatyöntöosuus (DP) on ylämäkeä edeltävästä kolmiosaisesta tasamaasto-osuudesta keskimäinen osuus. Lisäksi kunkin hiihtäjän kaikissa ylämäissä, alamäissä ja tasamaaosuuksilla käytetyt ajat summattiin yhteen. Nämä ajat suhteutettiin kunkin hiihtäjän kokonaisuikaan, jolloin saatiin suhdeluku sille, kuinka suuren osuuden kokonaisajastaan kukin hiihtäjä käytti eri osuuksilla. DP ja UH3 -osuudet sisältyivät tasamaaosuuksien ja vastaavasti ylämäkiosuuksien kokonaisuikaan.

TAULUKKO 4: Kunkin hiihtäjän eri maastonkohdissa käyttämän ajan osuus kokonaisajasta

id	Ylämäissä	Alamäissä	Tasamaalla	DP	UH3
1-102	0,5428	0,1989	0,2577	0,0288	0,2253
1-104	0,5622	0,1873	0,2448	0,0274	0,2373
1-101	0,5433	0,1964	0,2579	0,0277	0,2250
1-106	0,5578	0,1911	0,2493	0,0288	0,2293
1-103	0,5484	0,1941	0,2571	0,0290	0,2291
1-105	0,5594	0,1869	0,2513	0,0292	0,2353
2-108	0,5423	0,1968	0,2602	0,0298	0,2238
2-107	0,5566	0,1901	0,2544	0,0289	0,2323
2-109	0,5470	0,1936	0,2583	0,0307	0,2227
2-110	0,5521	0,1926	0,2542	0,0298	0,2337
2-111	0,5580	0,1887	0,2524	0,0290	0,2342
2-112	0,5513	0,1879	0,2580	0,0295	0,2286
3-101	0,5371	0,2057	0,2567	0,0285	0,2144
3-102	0,5473	0,1948	0,2575	0,0286	0,2256
3-103	0,5461	0,1993	0,2540	0,0288	0,2231
3-104	0,5629	0,1885	0,2472	0,0278	0,2281
3-105	0,5625	0,1856	0,2502	0,0287	0,2274
3-106	0,5534	0,1932	0,2526	0,0296	0,2160
3-107	0,5660	0,1859	0,2472	0,0281	0,2313
4-108	0,5340	0,2038	0,2616	0,0287	0,2141
4-109	0,5425	0,2030	0,2542	0,0284	0,2208
4-110	0,5371	0,2014	0,2611	0,0286	0,2142
4-111	0,5605	0,1857	0,2528	0,0288	0,2320
4-112	0,5602	0,1922	0,2463	0,0270	0,2332
4-113	0,5589	0,1900	0,2500	0,0293	0,2240

8.5.1 Tutkimuskysymys 1: Mikä on laboratorio-olosuhteissa tehdyn tribologiamittauksen ja kenttäolosuhteissa tehdyn laskutestin yhteys?



KUVA 7. Suksenliikutuslaitteella mitatut suksiparikohtaiset kitkakertoimet (pysty) ja kunkin hiihtäjän kyseisellä suksiparilla alamäkeen laskema aika. Molemmat normalisoitu referenssisuksen mukaan.

Tuloksia analysoidaan luvussa 7.5 esiteltujen tilastollisten menetelmien mukaisesti. Ensin testataan aineiston normaalijakautuneisuus. Koska otoskoko on 24 käytetään Saphiro-Wilk -testiä:

```
Tests of normality: Saphiro-Wilk
stats.shapiro(df["laskuaika-avg"])
ShapiroResult(statistic=0.9306377172470093, pvalue=0.08990681171417236)
```

```
stats.shapiro(df['laskuaika-norm'])
ShapiroResult(statistic=0.9781646132469177, pvalue=0.8464744687080383)

stats.shapiro(df['kitka-avg'])
ShapiroResult(statistic=0.9900630116462708, pvalue=0.9957407712936401)

stats.shapiro(df['kitka-norm'])
ShapiroResult(statistic=0.9471193552017212, pvalue=0.21572403609752655)
```

Koska kaikki p-arvot ovat $>0,05$ ei hylätä nollahypoteesia kunkin aineiston normaalijakautuneisuudesta, eli todetaan kaikkien olevan normaalijakautuneita. Normaalijakautuneille jatkuville muuttujille lasketaan Pearsonin korrelaatiot:

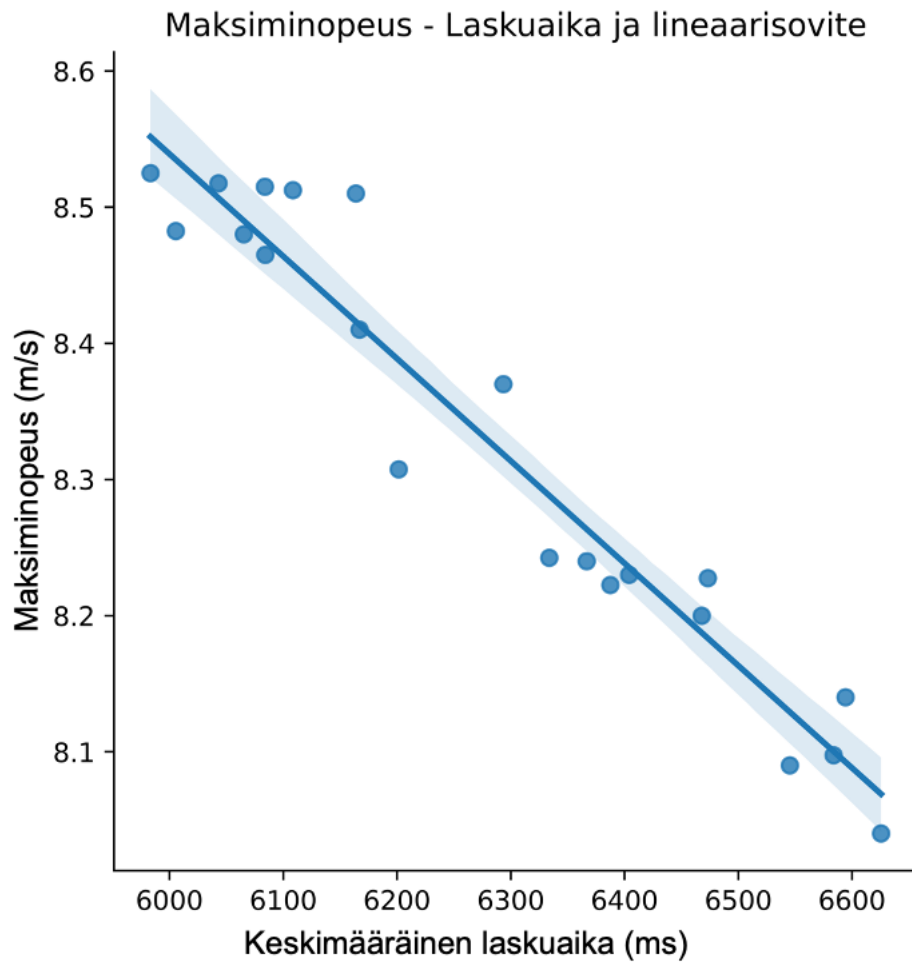
```
Pearson correlations:
stats.pearsonr(df['kitka-avg'], df['laskuaika-avg'])
PearsonRResult(statistic=0.012842942167601528, pvalue=0.9514153892073552)

stats.pearsonr(df['kitka-norm'], df['laskuaika-norm'])
PearsonRResult(statistic=0.10283283064662893, pvalue=0.624741863571886)
```

Sekä keskimääräisille muuttujille että normalisoiduille Pearsonin korrelaatiokertoimet jäävät pieniksi (0.0128 ja 0.1028), eli ei selvää korrelaatiota. Myös p-arvot jäävät suuriksi (0.9514 ja 0.6247). Nollahypoteesia ei voida hylätä ja todetaan että sisätiloissa suksiparille mitatun kitkakertoimen ja ulkona valokennoin mitatun laskuajan välillä ei ole yhteyttä.

Tulos: Kitkakertoimen ja laskuajan välillä ei ole tilastollisesti merkitsevää yhteyttä.

Yllä verrattiin tribometrin kitkakertoimia ja alamäkeen valokennoin kelloitettuina laskuaikoja. Verrataan seuraavaksi keskenään valokennoin kelloitettuina laskuaikoja ja AdMos-sensorein mitattuja maksiminopeuksia testimäestä kunkin laskun osalta. Maksiminopeus on sikäli hyvä mittari, että sen tulkitseminen mistä tahansa GNSS-datasta on verrattain yksinkertaista myös alamäkeä tai latua tarkemmin tuntematta. Tässä käsitellään absoluuttisia aikoja, eikä referenssilaskijan mukaan suhteutettuja aikoja, kunkin hiihtäjän valokennokellotuksessa ja AdMos-sensorilla mitatussa ajassa on kyse samasta suorituksesta.



KUVA 8. AdMos-senosrin mittaama maksiminopeus alamäen aikana (pysty) ja valokennoin mitattu laskuaika (vaaka). Kukin hiihtäjä on yksi datapiste, n. neljän suorituksen keskiarvo.

Ensin testataan aineiston normaalijakautuneisuus. Jälleen verrattain pienelle otokselle käytetään Saphiro-Wilk:n testiä:

```

Tests of normality: Saphiro-Wilk
stats.shapiro(df_tk1_2['laskuaika-avg'])
ShapiroResult(statistic=0.9282524585723877, pvalue=0.1269811987876892)

stats.shapiro(df_tk1_2['max-speed'])
ShapiroResult(statistic=0.8943732976913452, pvalue=0.02726058103144169)

```

Huomataan että hiihtäjäkohtaiset keskimääräiset laskuajat ovat normaalisti jakautuneet ($p > 0,05$), mutta maksiminopeuksien keskiarvot eivät ole normaalisti jakautuneita ($p < 0,05$). Lasketaan sekä Pearsonin että Spearmanin korrelaatiot:

Pearson correlations:

```
stats.pearsonr(df_tk1_2['laskuaika-avg'], df_tk1_2['max-speed'])
```

```
PearsonRResult(statistic=-0.965898199390605, pvalue=1.3202600375355683e-12)
```

Spearman correlations:

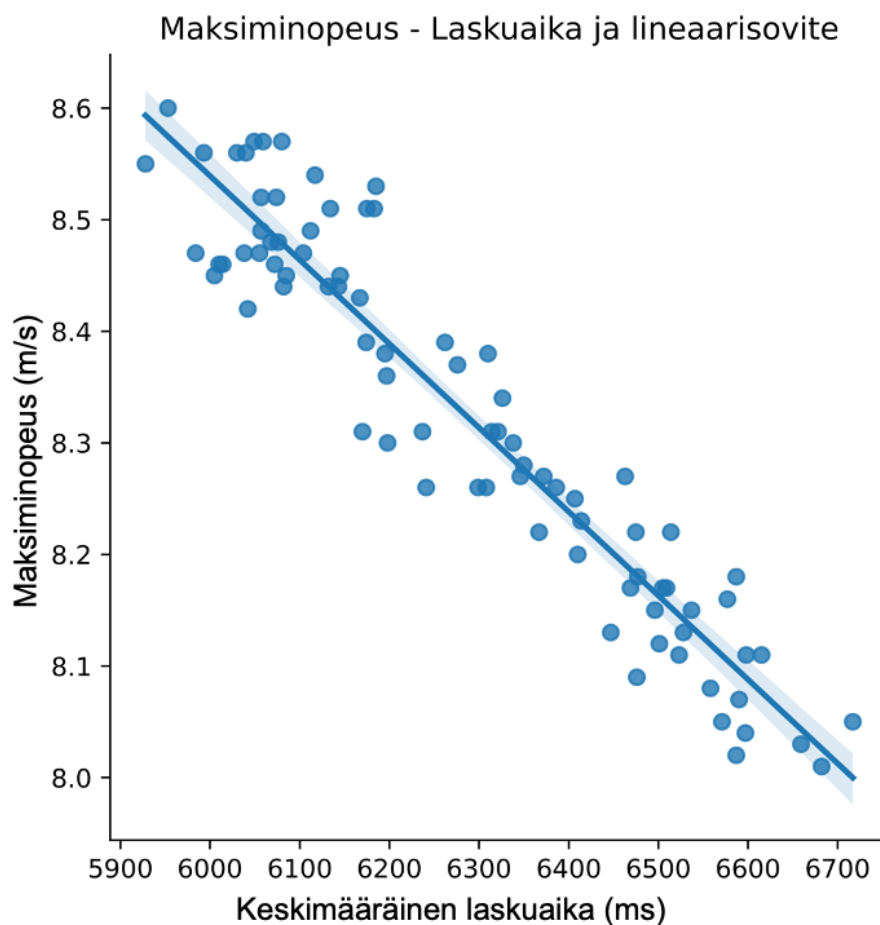
```
scipy.stats.spearmanr(df_tk1_2['laskuaika-avg'], df_tk1_2['max-speed'])
```

```
SignificanceResult(statistic=-0.9532467532467532, pvalue=2.5176424662475392e-11)
```

Molemmiin menetelmin laskettu korrelaatiokertoimen itseisarvo on korkea $\gg 0.7$ ja p-arvot selvästi $\ll 0,001$, joten todetaan selvä yhteys ja tilastollinen merkitsevyys.

Tulos: Selvä ja tilastollisesti merkitsevä (***) yhteys valokennoin mitatun laskuajan ja GNSS-maksiminopeuden välillä.

Sama kuvaaja aggregoimattomana suoritusasolla, eli jokaisen hiihtäjän jokainen suoritus (4 kpl) omana datapisteenä:



KUVA 9. AdMos-senosrin mittaama maksiminopeus alamäen aikana (pysty) ja valokennoin mitattu laskuaika (vaaka). Jokainen yksittäinen suoritus on yksi datapiste.

Yksittäisiä laskusuorituksia oli 84 (>50), joten käytetään normaalijakautuneisuustestinä Saphiro-Wilkin sijaan Kolmogorov-Smirnov -testiä:

```
stats.kstest(df['total'], stats.norm.cdf)
KstestResult(statistic=1.0, pvalue=0.0, statistic_location=5928, statistic_sign=-1)

stats.kstest(df['max-speed'], stats.norm.cdf)
KstestResult(statistic=0.9999999999999994, pvalue=0.0, statistic_location=8.01, statistic_sign=-1)
```

Tässä p-arvot jäävät pieniksi, eli hylätään testin nollahypoteesi normaalijakautuneisuudesta. Ei-normaalijakautuneille aineistoille käytetään Spearmanin korrelaatiotestiä:

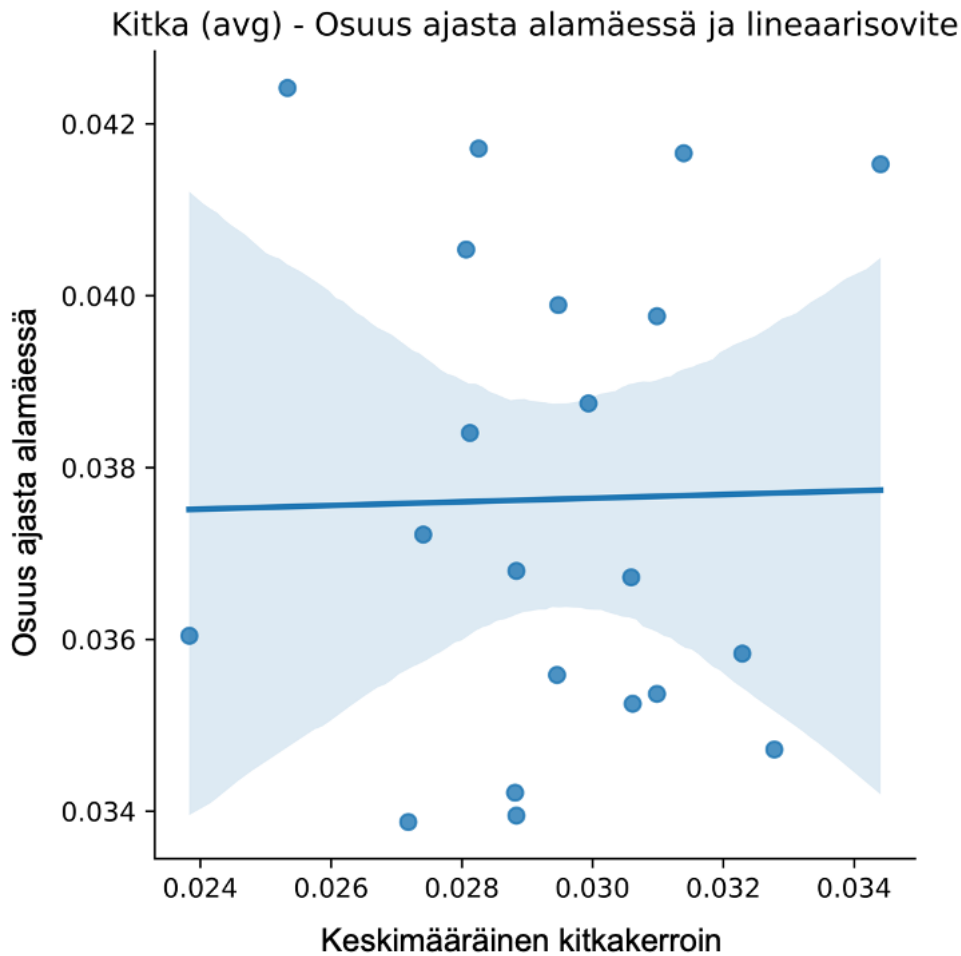
```
Spearman correlations:
scipy.stats.spearmanr(df['total'], df['max-speed'])
SignificanceResult(statistic=-0.9267338587298783, pvalue=1.3020727525000383e-36)
```

Spearmanin korrelaatiokertoimen itseisarvo on jälleen $\gg 0,7$ ja p-arvo jää selvästi alle 0,001. Selvä yhteys oletetusti suorituskohtaisesti mitattuna GNSS-maksiminopeuden ja valokennoin mitatun ajan perusteella.

Tulos: Selvä ja tilastollisesti merkitsevä (***) yhteys kelloitetun laskuajan ja GNSS-maksiminopeuden välillä myös suoritustasolla

8.5.2 Tutkimuskysymys 2: *Kuinka hyvin tribo- ja laskutestien tulokset selittävät kisasuorituksen elementtejä (lasku, vuorohiihto, kokonaisaika, yms.)*

Vastataksemme tutkimuskysymykseen 2 vertaamme testimäkeen kellotettua laskuaikaa, liikituslaitteesta saatua kitkakerrointa, kilpaladun alamäen laskuaikaa ja suhdelukua, joka on saatu suhteuttamalla kilpaladun aika hiihtäjän kokonaisaikaan.



KUVA 10. Kunkin suksiparin kitkakerroin (vaaka) ja osuus kokonaisajasta joka hiihtäjällä kului kilpaladun alamäessä (pysty).

Ensin testataan aineiston normaalijakautuneisuus. Jälleen verrattain pienelle otokselle käytetään Saphiro-Wilk:n testiä:

```
Tests of normality: Saphiro-Wilk
```

```
stats.shapiro(df["kitka-avg"])
```

```
ShapiroResult(statistic=0.9900630116462708, pvalue=0.9957407712936401)
```

```
stats.shapiro(df["ratio-in-skitest"])
```

```
ShapiroResult(statistic=0.937589168548584, pvalue=0.13019919395446777)
```

Koska molemmat p-arvot ovat $>0,05$ ei hylätä nollahypoteesia kummankaan aineiston normaalijakautuneisuudesta, eli todetaan molempien olevan normaalijakautuneita. Käytetään jälleen Pearsonin korrelaatiota normaalijakautuneille aineistoille:

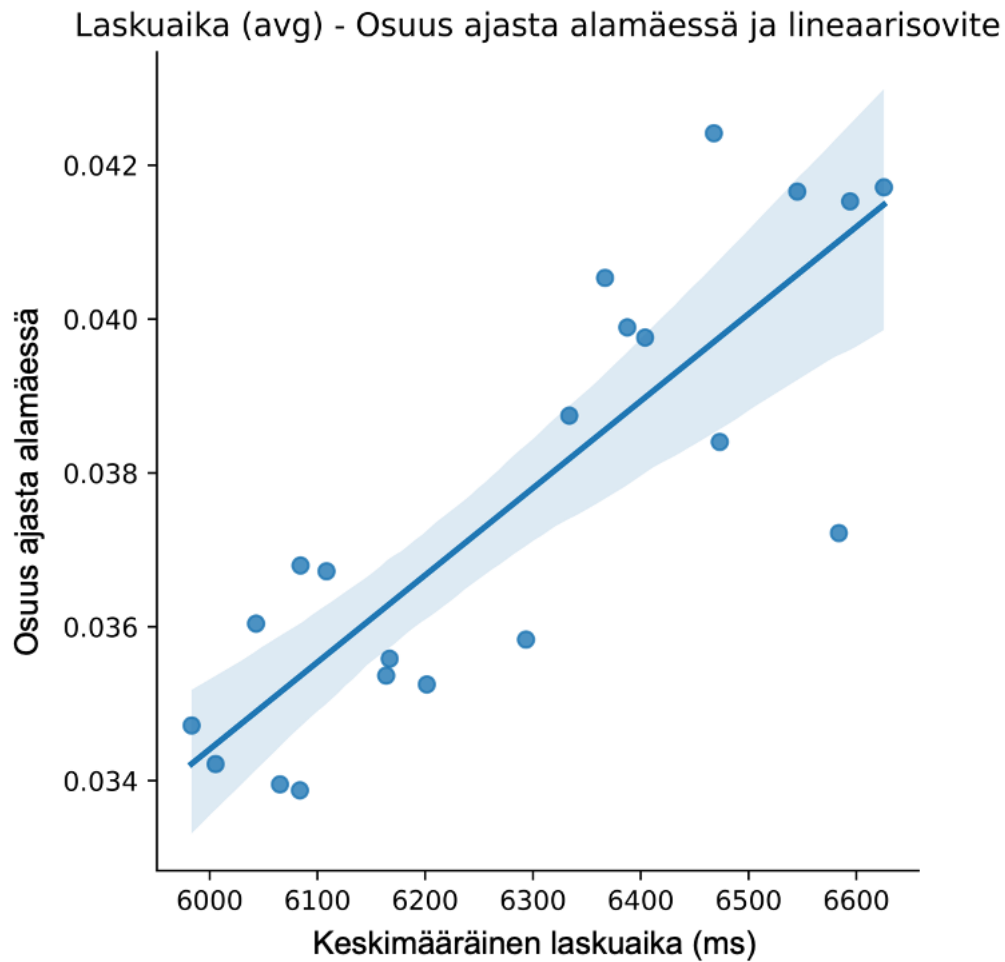
```
stats.pearsonr(df["kitka-avg"], df["ratio-in-skitest"])
```

```
PearsonRResult(statistic=0.06432910086428051, pvalue=0.759989215177496)
```

Testin perusteella korrelaatiokerroin on lähes olematon ja p-arvo on suuri, joten ei minkään laista yhteyttä.

Tulos: Ei yhteyttä kitkakertoimen ja kilpaladun alamäessä käytetyn suhteellisen ajan välillä

Verrataan seuraavaksi liikutuslaitteen kitkakertoimen sijaan kunkin hiihtäjän keskimääräistä valokennomäen laskuaikaa kilpaladun alamäessä käytettyyn suhteelliseen aikaan:



KUVA 11. Kunkin hiihtäjän testimäessä laskema aika (vaaka) ja osuus kilpailun kokonaisajasta joka hiihtäjällä kului kilpaladun alamäessä (pysty).

Ensin testataan aineiston normaalijakautuneisuus. Jälleen verrattain pienelle otokselle käytetään Saphiro-Wilk:n testiä:

```

Tests of normality: Saphiro-Wilk
stats.shapiro(df["laskuaika-avg"])
ShapiroResult(statistic=0.9306377172470093, pvalue=0.08990681171417236)

stats.shapiro(df["ratio-in-skitest"])
ShapiroResult(statistic=0.937589168548584, pvalue=0.13019919395446777)

```

Nollahypoteesiä normaalijakautuneisuudesta ei hylätä, koska $p > 0,05$. Normaalijakautuneille aineistoille käytetään Pearsonin korrelaatiotestiä:

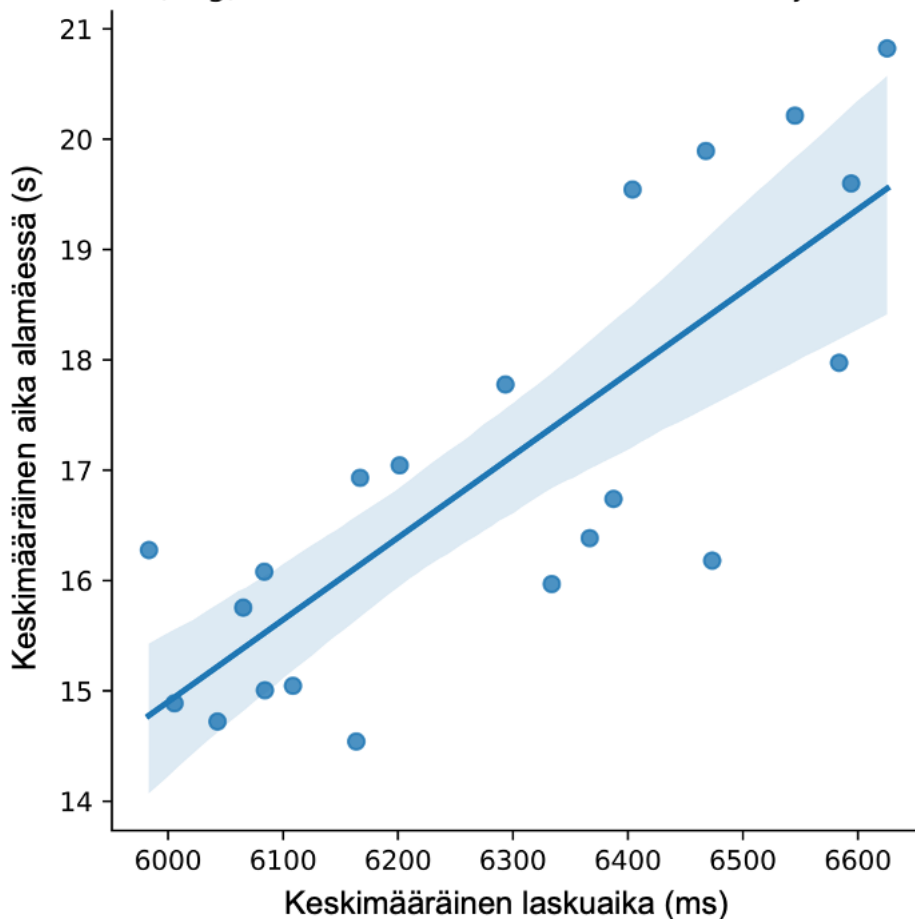
```
stats.pearsonr(df['laskuaika-avg'], df['ratio-in-skitest'])  
PearsonRResult(statistic=0.8088727271680575, pvalue=9.8879703416732e-07)
```

Korrelaatiokerroin on 0,8 ja p-arvo selvästi $\ll 0,001$, joten todetaan että vahva positiivinen yhteys löytyy.

Tulos: Valokennolla mitatun testimäen laskuajalla ja ajalla, jonka hiihtäjä käyttää kilpaladun alamäessä suhteessa kokonaisaikaan näyttää olevan positiivinen ja tilastollisesti merkittävä(***) yhteys.

Tarkastellaan vielä vastaavasti absoluuttista alamäessä käytettyä aikaa:

Laskuaika (avg) - Keskimääräinen aika alamäessä ja lineaarisovite



KUVA 12. Kunkin hiihtäjän testimäessä laskema aika (vaaka) ja keskimääräinen kilpaladun alamäessä käyttämä aika.

Ensin testataan aineiston normaalijakautuneisuus. Jälleen verrattain pienelle otokselle käytetään Saphiro-Wilk:n testiä:

```
Tests of normality: Saphiro-Wilk
stats.shapiro(df['laskuaika-avg'])
ShapiroResult(statistic=0.9306377172470093, pvalue=0.08990681171417236)

stats.shapiro(df['avg-skitest-per-lap'])
ShapiroResult(statistic=0.9312717318534851, pvalue=0.09299121797084808)
```

Nollahypoteesiä normaalijakautuneisuudesta ei hylätä, koska $p > 0,05$. Normaalijakautuneille aineistoille käytetään Pearsonin korrelaatiotestiä:

```
stats.pearsonr(df['laskuaika-avg'], df['avg-skitest-per-lap'])
PearsonRResult(statistic=0.7256390135773494, pvalue=4.043588718266074e-05)
```

Kerroin on juuri ja juuri $> 0,7$, eli jonkinlainen yhteys on, p-arvo jää selvästi alle 0,001.

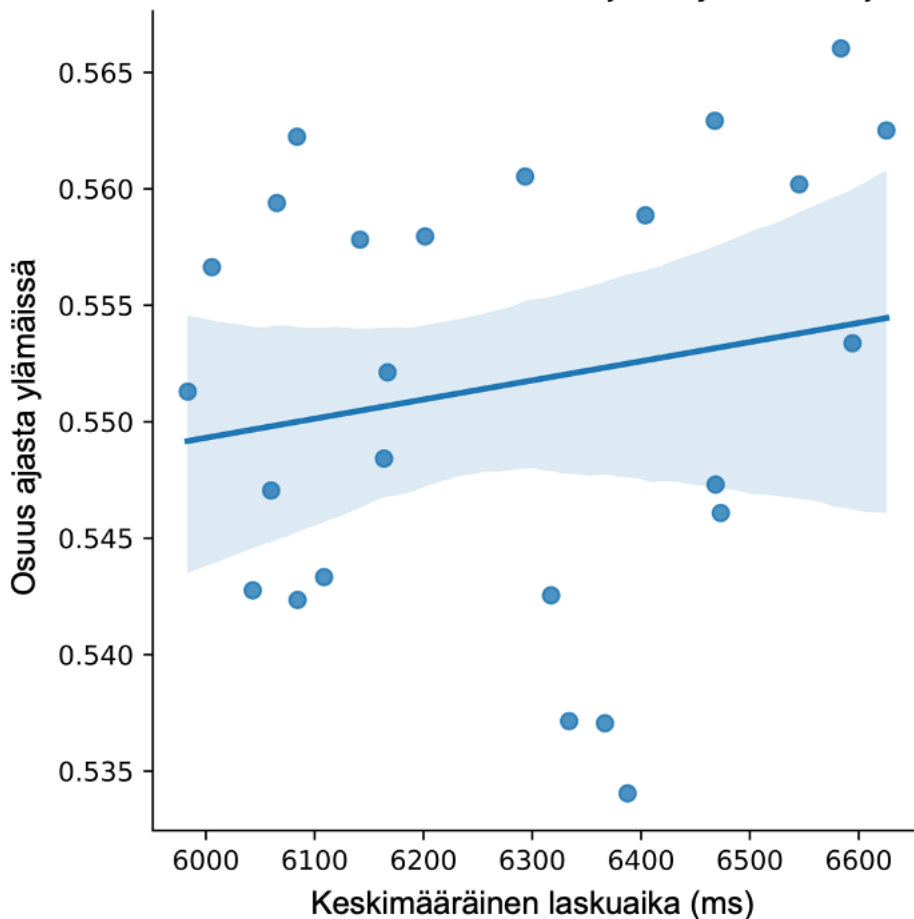
Tulos: Valokennolla mitatun testimäen laskuajalla ja hiihtäjän kilpaladun alamäessä käyttämän absoluuttisen ajan välillä selvä positiivinen ja tilastollisesti merkittävä (***) yhteys.

8.5.3 Tutkimuskysymys 3: *Kuinka hyvin AdMos-sensorilla mitattavat tiedot hiihtokilpailusta soveltuvat suksien luisto-ominaisuuksien mittaamiseen, verrattuna perinteisiin menetelmiin?*

Yllä tutkimuskysymystä 2 tarkasteltaessa huomattiin, että testimäen laskuajalla ja laskuajalla kilpaladun alamäessä on positiivinen yhteys. Tarkastellaan tämän lisäksi, onko vastaavaa yhteyttä havaittavissa tasatyöntöosuuden, ylämäkiosuuden, alamäissä käytetyn kokonaisajan, ylämäissä käytetyn kokonaisajan ja tasamaaosuuksilla käytetyn kokonaisajan kanssa.

Edellä jo todettiin testimäen keskimääräisten laskuaikojen olevan normaalijakautuneita, eli sen puolesta voidaan käyttää Pearsonin korrelaatiotestiä. Tarkastellaan ensin ylämäissä käytettyä kokonaisaika.

Laskuaika - Osuus suorituksen kokonaisajasta ylämäissä ja lineaarisovite



KUVA 13. Kunkin hiihtäjän testimäessä laskema aika (vaaka) ja osuus kilpailun kokonaisajasta, jonka kyseinen hiihtäjä käytti ylämäissä.

```
Tests of normality: Saphiro-Wilk
```

```
stats.shapiro(df['ratio-up-time'])
```

```
ShapiroResult(statistic=0.9453007578849792, pvalue=0.1960442066192627)
```

Nollahypoteesiä normaalijakautuneisuudesta ei hylätä, koska $p > 0,05$. Normaalijakautuneille aineistoille käytetään Pearsonin korrelaatiotestiä:

```
stats.pearsonr(df['laskuaika-avg'], df['ratio-up-time'])
```

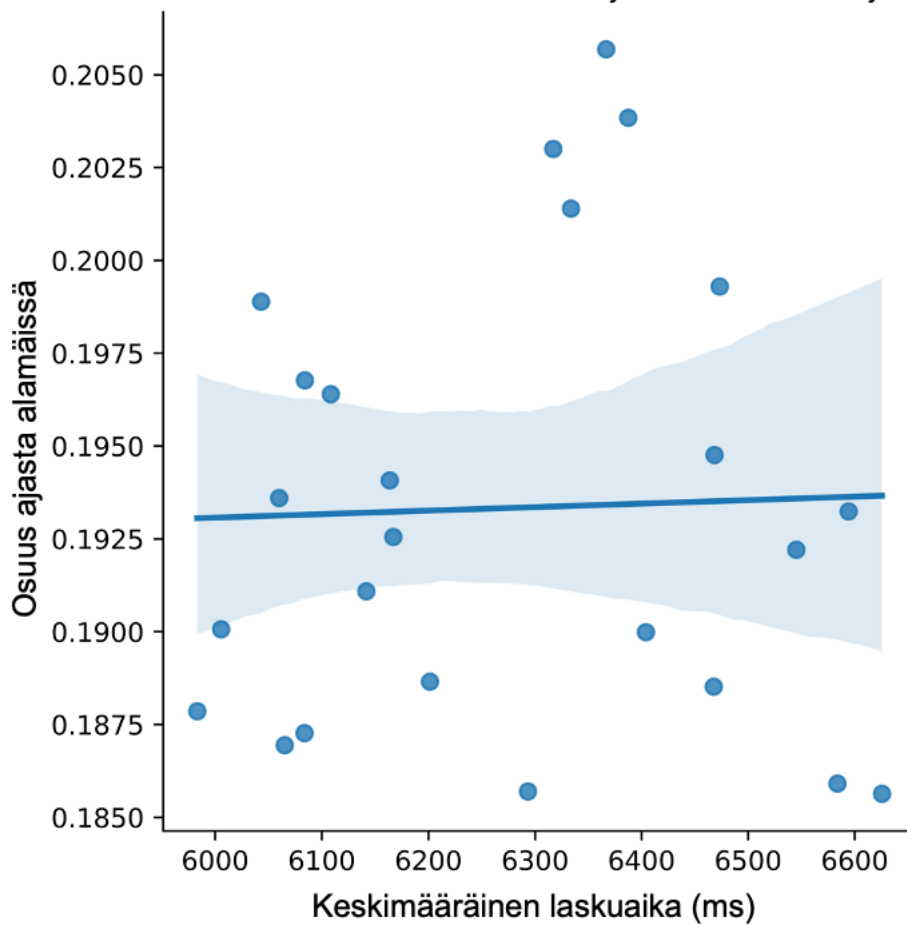
```
PearsonRResult(statistic=0.18083177382980362, pvalue=0.38702073527308006)
```

Korrelaatiokerroin ei ole suuri ja p-arvokin jää korkeaksi, joten ei ole minkäänlaista yhteyttä testimäen laskuajalla ja kilpasuorituksen ylämäkiosuuksilla.

Tulos: Valokennolla mitatun testimäen laskuajalla ja hiihtäjän kilpaladun ylämäissä käyttämällä kokonaisajalla ei ole yhteyttä

Jatketaan tarkastelemalla kokonaisaikana suhteutettua aikaa alamäissä:

Laskuaika - Osuus suorituksen kokonaisajasta alamäissä ja lineaarisovite



KUVA 14. Kunkin hiihtäjän testimäessä laskema aika (vaaka) ja osuus kilpailun kokonaisajasta, jonka kyseinen hiihtäjä käytti alamäissä.

```
Tests of normality: Saphiro-Wilk
stats.shapiro(df['ratio-down-time'])
ShapiroResult(statistic=0.9370810389518738, pvalue=0.12672162055969238)
```

Nollahypoteesiä normaalijakautuneisuudesta ei hylätä, koska $p > 0,05$. Normaalijakautuneille aineistoille käytetään Pearsonin korrelaatiotestiä:

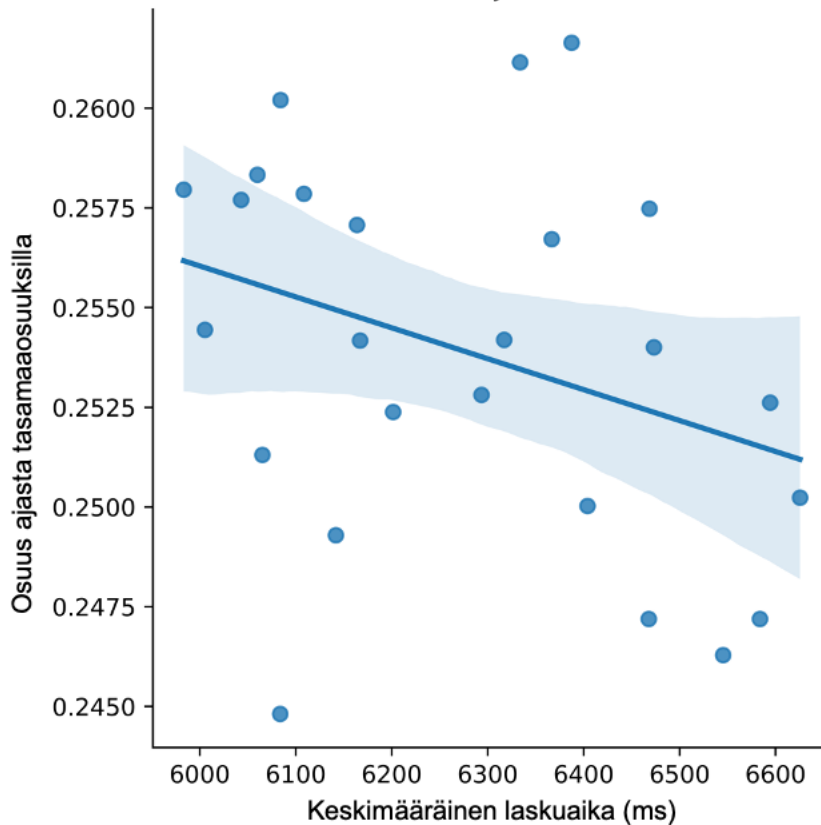
```
stats.pearsonr(df['laskuaika-avg'], df['ratio-down-time'])
PearsonRResult(statistic=0.03204892787366581, pvalue=0.8791243378085994)
```

Hyvin vastaava tilanne kuin ylämäkien osalta, eli ei yhteyttä testimäen ja kilpasuorituksen alamäissä käytetyn kokonaisajan välillä.

Tulos: Valokennolla mitatun testimäen laskuajalla ja hiihtäjän kilpaladun alamäissä käyttämällä kokonaisajalla ei ole yhteyttä.

Jatketaan tarkastelemalla tasamaaosuuksilla käytettyä osuutta kilpailusuorituksesta ja edelleen testimäen laskuaikaa:

Laskuaika - Osuus suorituksen kokonaisajasta tasamaaosuuksilla ja lineaarisovite



KUVA 15. Kunkin hiihtäjän testimäessä laskema aika (vaaka) ja osuus kilpailun kokonaisajasta, jonka kyseinen hiihtäjä käytti tasamaaosuuksilla.

```
Tests of normality: Saphiro-Wilk
stats.shapiro(df['ratio-mix-time'])
ShapiroResult(statistic=0.9650084376335144, pvalue=0.5228921175003052)
```

Nollahypoteesiä normaalijakautuneisuudesta ei hylätä, koska $p > 0,05$. Normaalijakautuneille aineistoille käytetään Pearsonin korrelaatiotestiä:

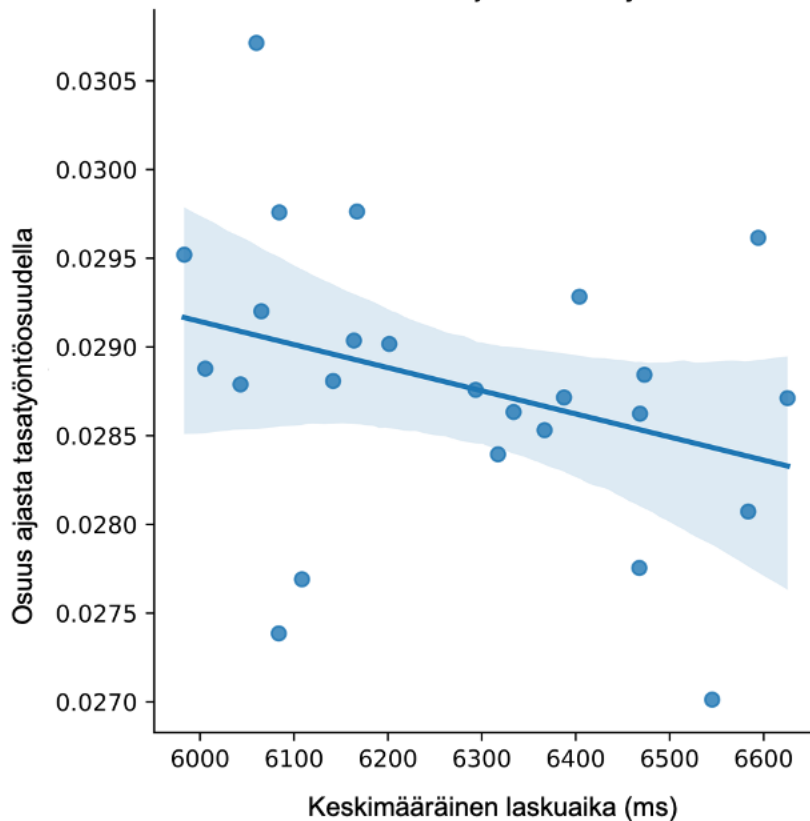
```
stats.pearsonr(df['laskuaika-avg'], df['ratio-mix-time'])
PearsonRResult(statistic=-0.3330495025651026, pvalue=0.10377431714960787)
```

Jonkinlainen korrelaatiokerroin $>0,3$, mutta samalla p-arvo jää edelleen korkeaksi, joten ei merkittävää yhteyttä tasamaasuusienkaan osalta.

Tulos: Valokennolla mitatun testimäen laskuajalla ja hiihtäjän kilpaladun tasamaasuuksilla käyttämällä kokonaisajalla ei ole yhteyttä

Eri maastonmuotojen kokonaisaikojen lisäksi tarkastellaan yksittäistä tasatyöntöosuutta:

Laskuaika - Osuus suorituksen kokonaisajasta tasatyöntöosuudella ja lineaarisovite



KUVA 16. Kunkin hiihtäjän testimäessä laskema aika (vaaka) ja osuus kilpailun kokonaisajasta, jonka kyseinen hiihtäjä käytti merkityllä tasatyöntöosuudella.

```
Tests of normality: Saphiro-Wilk
stats.shapiro(df['ratio-dp-time'])
ShapiroResult(statistic=0.9678516387939453, pvalue=0.5912094116210938)
```

Nollahypoteesiä normaalijakautuneisuudesta ei hylätä, koska $p > 0,05$. Normaalijakautuneille aineistoille käytetään Pearsonin korrelaatiotestiä:

```
stats.pearsonr(df["laskuaika-avg"], df["ratio-dp-time"])
```

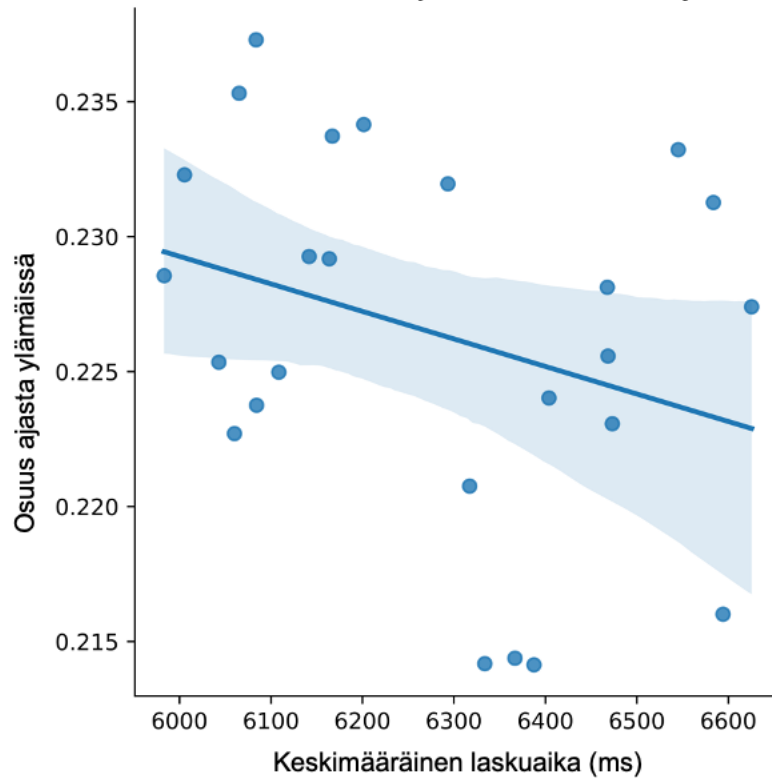
```
PearsonRResult(statistic=-0.3301801384868847, pvalue=0.10697050500046587)
```

Jonkinlainen korrelaatiokerroin $>0,3$, mutta p-arvo jää korkeaksi, joten ei merkittävää yhteyttä tasatyöntöosuudellakaan.

Tulos: Valokennolla mitatun testimäen laskuajalla ja hiihtäjän kilpaladun tasatyöntöosuudella käyttämällä ajalla ei ole yhteyttä

Jatketaan tarkastelemalla osuutta kokonaisajasta suurimmassa ylämäessä:

Laskuaika - Osuus suorituksen kokonaisajasta suurimmassa ylämäessä ja lineaarisovite



KUVA 17. Kunkin hiihtäjän testimäessä laskema aika (vaaka) ja osuus kilpailun kokonaisajasta, jonka kyseinen hiihtäjä käytti suurimmassa ylämäessä.

```
Tests of normality: Saphiro-Wilk
```

```
stats.shapiro(df["ratio-uh3-time"])
```

```
ShapiroResult(statistic=0.944524884223938, pvalue=0.18817879259586334)
```

Nollahypoteesiä normaalijakautuneisuudesta ei hylätä, koska $p > 0,05$. Normaalijakautuneille aineistoille käytetään Pearsonin korrelaatiotestiä:

```
stats.pearsonr(df['laskuaika-avg'], df['ratio-uh3-time'])  
PearsonRResult(statistic=-0.3077642094887305, pvalue=0.1344868943216528)
```

Melko vastaavat tulokset kuin tasatyöntöosuudella, joten ei edelleenkään yhteyttä testimäen laskuajan ja kilpailusuorituksen suurimman ylämäen osalta.

Tulos: Valokennolla mitatun testimäen laskuajalla ja hiihtäjän kilpaladun suurimmassa ylämäessä käyttämällä ajalla ei ole yhteyttä

Näistä kuudesta asiasta vain tutkimuskysymyksessä 2 jo todetulla alamäen laskuajalla on yhteys laskutestin aikojen kanssa. Muilla latuosuuksien ajoilla ei ole yhteyttä.

8.6 Yhteenveto tuloksista

Yhteenvetotalukot, joista käy ilmi ne tapaukset korrelaatiokertoimiseen, joissa havaittiin korrelaatiota ja ne tapaukset, joissa ei havaittu merkittävää yhteyttä:

Yhteenvetona todetaan, että IMU AdMos-sensorein mitatuilla tuloksilla on vahva yhteys keskenään ja testimäen valokennotulosten kanssa vertailtaessa:

- Testimäen laskuaika vs. GNSS-maksiminopeus samasta suorituksesta mitattuna suoritustasolla: Korrelaatiokerroin 0,9659 (***)
- Testimäen laskuaika vs. GNSS-maksiminopeus samasta suorituksesta mitattuna ja saman hiihtäjän suoritukset keskiarvoistettuna: Korrelaatiokerroin 0,9267 (***)
- Testimäen laskuaika vs. Osuus kilpailuajasta merkityssä alamäessä: Korrelaatiokerroin 0,8089 (***)
- Testimäen laskuaika vs. Absoluuttinen aika merkityssä alamäessä: Korrelaatiokerroin 0,7256 (***)

Laboratoriossa mitatulla suksiparikohtaisella kitkakertoimella ei ole mitään yhteyttä ulkona tehtyjen hiihtäjä-suksi -yhdistelmien mittaustuloksiin. Myöskään nopeat hiihtäjä-suksi -yhdistelmien laskuajat testimäessä eivät vaikuta kilpailun muihin osuuksiin selkeintä alamäkiosuutta lukuun ottamatta.

9 POHDINTA JA SOVELETTAVUUS

Kuten tutkielman luvussa 2.1 esiteltiin, hiihtäjän maastossa eteneminen on monen eri tekijän summa, suksen luisto-ominaisuudet on vain yksi hiihtäjän etenemiseen vaikuttavista tekijöistä. Hiihdon kaltaisessa ulkoilmalajissa olosuhteisiin ei pysty vaikuttamaan, mutta ne ovat jossain määrin ennakoitavissa. Perinteisen hiihtotavan hiihdossa suksen tulee luistaa ja toisaalta myös pitää, kun pitoa tarvitaan. Tässä tutkimuksessa keskityttiin luisto-ominaisuuksien tutkimiseen. Hyvä sukki sekä pitää että luistaa, mutta käytännössä näiden välillä joudutaan myös tasapainoilemaan: luistoa voidaan lisätä pidon kustannuksella ja päinvastoin. Tämä tutkimus pyrkii tarjoamaan tietoa nimenomaan luisto-ominaisuuksien mittaamisesta kenttäolosuhteissa ja niiden vaikutuksista kilpailusuoritukseen.

Tutkimuksen tulokset voidaan tiivistää kolmeen pääkohtaan:

- Laboratorio-olosuhteissa pelkille suksille tehdyt mittaukset eivät toistu kenttäolosuhteissa hiihtäjä-sukki -yhdistelmillä tehdyissä mittauksissa
- Kun suksitestialamäessä mitataan laskuaikaa valokennoin ja maksiminopeutta GNSS-IMU -sensorein on tulokset hyvin vastaavia keskenään. GNSS-IMU soveltuu siis tekniikkana suksien testaamiseen.
- Suksitestimäen tulokset siirtyvät vain osin kilpaladun suoritukseen: Nopeita laskuaikoja laskeneet hiihtäjä-sukki -yhdistelmät laskivat kovaa maastoon merkityn kilpaladun alamäen. Toisaalta muissa alamäissä, ylämäissä tai tasamaaosuuksilla ei vastaavaa yhteyttä löytynyt.

9.1 Lineaaritribometri ja kenttäolosuhteet

Vuokatissa sijaitsevaa lineaaritribometriä on onnistuneesti käytetty yksittäisten suksien liukukitkakertoimen mittaamiseen ja suksiparien muodostamiseen, joihin laitteen tarkkuus on todettu hyväksi (Lemmettylä ym. 2021). Perinteisen suksien kitkakertoimien erot ovat kertaluokassa kitkakertoimen tuhannesosia. Tässä tutkimuksessa suurin kitkakerroin oli 0,0344, pienin 0,0238 ja puolet testatuista suksipareista mahtuivat 0,0288-0,0310 välille. Käytännössä suksien muodostamat erot ovat pieniä muttei merkityksettä.

Ei ole syytä epäillä etteikö hiihtäjän aina kannattaisi valita luistavammaksi todettu sukki (kun luistoa halutaan), mutta hiihtäjien väliset erot ovat suksien eroja suurempia. Tässä

tutkimuksessa kullakin suksiparilla kuitenkin hiihti eri hiihtäjä. Maastossa etenevään hiihtäjä-suksi -yhdistelmän etenemiseen vaikuttaa moni muukin asia kuin ainoastaan suksen kitkakerroin, kuten on kuvattu tämän tutkielman luvussa 2. Koska tässä tutkimuksessa suksille tehdyt laboratoriomittaukset eivät siirtyneet hiihtäjä-suksi -yhdistelmiä mitatessa saatuihin tuloksiin, voidaan päätellä että suksen liukukitkakertoimen merkitys yksinään on liian pieni kokonaisuuden näkökulmasta. Hiihtäjien taidot sekä ominaisuudet ja olosuhteista johtuvat tekijät vaikuttanevat enemmän.

Kuten aikaisemmissa tutkimuksissa on todettu (Linnamo ym. 2008, Lemmettylä ym. 2021) soveltuu Jyväskylän yliopiston lineaaribometri tietyin rajoittein suksien ja suksiparien mittaamiseen ja vertailuun, mutta tuloksia ei voi suoraan siirtää hiihdon lajinomaisiin olosuhteisiin ja eri hiihtäjiltä ei voi olettaa lineaaribometrin suksille antamien mukaisia tuloksia.

9.2 GNSS-IMU teknologiana hiihtonopeuksien mittauksessa

Hiihtokilpailusta erillisen suksitestausalamaen osalta tässä tutkimuksessa päädyttiin mittaamaan hiihtäjän maksiminopeutta siinä alamäessä, missä hiihtäjien laskuaika mitattiin valokennoin. Maksiminopeus valikoitui erityisesti siksi, että sen mittaaminen missä tahansa mäessä tai missä tahansa olosuhteissa, esimerkiksi kilpailuista kerätystä datasta on hyvin suoraviivaista, vaikkei alamäkeä olisi maastoon erikseen merkattu tai vaikka latu olisi analysoijalle kokonaan vieras. Maksiminopeutta olivat tutkineet myös Street ja Gregory (1994) vuoden 1992 talviolympialaisten 50 kilometrin kilpailussa ja tulleet siihen lopputulokseen, että nopeasti liukuneet hiihtäjät pärjäsivät hyvin kilpailussa.

Tässä tutkimuksessa GNSS-IMU sensorein mitattu maksiminopeus vastasi hyvin (korrelaatiokerroin 0,9659 ***) valokennoin mitattua aikaa. Ennestään valokennoin mitattua laskuaikaa ja erityisesti hiihtäjien kahdestaan laskemaa suksitestiä pidetään hyvänä mittaustapana (Lemmettylä, 2022). Tämän tutkimuksen perusteella verrattain raskasta mittaustapaa ei pitäisi tarvita asentaa, vaan GNSS-IMU -sensori näyttäisi soveltuvan tähän tarkoitukseen. Tämän tutkimuksen rajoitteena todettakoon kuitenkin, että kaikki laskut olivat eri hiihtäjien laskemia, jolloin eroista muodostui todennäköisesti suurempia kuin mitä yhden ja saman hiihtäjän eri suksipareilla laskemista suorituksista olisi muodostunut. Tämän

tutkimuksen perusteella ei ole vielä arvioitavissa, riittäisikö GNSS-IMU -sensorin tarkkuus pelkästään eri suksien luistoerojen mittaamiseen saman hiihtäjän laskiessa kaikki laskut.

Tiivistettynä: GNSS-IMU -sensorilla pystytään mittaamaan eri hiihtäjä-suksi -yhdistelmien alamäenlaskukykyä, mutta ei välttämättä ottamaan kantaa eri suksien aiheuttamiin eroihin kyseisessä laskukyvystä.

9.3 Suksien luiston mittaus ja hiihtokilpailu

Tämän tutkimuksen ehdottomia vahvuuksia oli asetelma, jossa päästiin tutkimaan suksia lineaaritribometrillä, kontrolloidussa testialamäessä ja hiihtokilpailun aikana. Kuten luvussa 9.1 todettiin ei lineaaritribometrin tulokset siirry suoraan hiihtäjälle kenttäolosuhteisiin. Ei ole syytä olettaa, että tämä olisi johtunut käytettyjen mittaustekniikoiden (lineaaritribometri, valokennot, GNSS-IMU) epätarkkuudesta tai soveltumattomuudesta, vaan yksinkertaisesti eri olosuhteista ja ennen kaikkea siitä, että mitattiin kahta eri asiaa (sukset vs hiihtäjä-suksi -yhdistelmä). Tutkimuksessa mitattiin olosuhteiden vuoksi maastossa nimenomaan hiihtäjä-suksi -yhdistelmiä, mutta mikäli sama hiihtäjä olisi hiihtänyt kaikki suoritukset eri suksilla voitaisiin oletettavasti vertailla vain suksien välisiä eroja. Tällöin olisi saatettu löytää eroja nimenomaan suksien välillä. Käytännössä olisi kuitenkin mahdotonta hiihtää tässä tutkimuksessa hiihdetty suoritusmäärä yhden ja saman hiihtäjän voimin, ilman että suoritusten tasalaatuisuus olisi kärsinyt. Kilpailusta erillinen suksitesti hiihdettiin kuitenkin samojen hiihtäjien toimesta samoilla suksipareilla ja vastaavissa olosuhteissa kuin itse kilpailu.

Kilpailun maastoon merkitty ja laskuksi ohjeistettu osuus oli ainut, jossa toistui samat tulokset kuin kilpailun ulkopuolella mitatussa suksitestialamäessä. Tälle lienee syynä se, että nämä olivat olosuhteiltaan hyvin saman kaltaiset: teknisesti helppoja alamäkiä, mitkä laskettiin hyvää latua pitkin ja lisäksi kertaluokassa samaan ilmansuuntaan. Kilpaladun aikainen alamäki oli myös verrattain pitkä, mikä osin saattoi tasoittaa hiihtäjien alkuvauhdeissa mahdollisesti olleita eroja. Koska tutkimukseen osallistuneet hiihtäjät olivat hyvin eri tasoisia ei tässä koettu mielekkääksi tutkia eri hiihtäjien kokonaistuloksia, mutta edellä mainitun Street ja Gregory (1994) tutkimuksen perusteella voisi olettaa, että nopeasti alamäen laskeneet hiihtäjät pärjäisivät kilpailun kokonaistuloksissa hyvin, eli ne hiihtäjät, jotka laskivat nopeita aikoja kilpailun ulkopuolisessa suksitestissä, pärjäisivät hyvin myös kilpailussa.

Suksien luisto tai hiihtäjä-suksi -yhdistelmän yllä kuvattu alamäenlaskukyky eivät kuitenkaan yksin selitä hiihtosuorituksen tuloksia. Tämä käy ilmi tämänkin tutkimuksen tuloksista, kun suksitestimäen tulokset eivät näkyneet oikeastaan millään tavalla pisintä alamäkeä lukuun ottamatta muilla kilpailun osuuksilla. Kilpaladun toinen merkittävä alamäki oli hyvin jyrkkä ja tekninen, joten hiihtäjien taito-ominaisuudet vaikuttivat todennäköisesti luisto-ominaisuuksia enemmän. Esimerkiksi juuri laskun teknisyys ja taito-ominaisuuksien vaikutus voivat selittää sitä miksi suksitestimäen tulokset eivät selittäneet kaikkien alamäkiosuuksien yhteenlaskettuja aikoja. On myös melko selvää, että suksen luisto yksinään ei auta ylämäessä, eikä hiihtäjän suhteellinen aika myöskään yksinkertaisesti matemaattisesti voi kaikilla osuuksilla parantua. On siis melko selvää, miksi suksitestimäen tulokset toistuivat juuri maastoon merkityssä alamäessä. Alamäkiosuuksien lisäksi nopeasti liukuvilta hiihtäjä-suksi -yhdistelmiltä ehkä odotettiin nopeita aikoja kilpaladun tasatyöntöosuudella, mutta näin ei selvästi tapahtunut.

Saadut tulokset ovat melko lailla linjassa tutkielman alkuosioissa esitettyjen teorioiden kanssa. Hiihtäjän vaikuttaa käytännössä häneen potkuin ja sauvantyönöin eteenpäin tuottama voima, painovoiman ladunsuuntainen komponentti, ilmanvastus ja suksien kitka. Koehenkilöinä olleet kilpahiihtäjät olivat melko eri taseisia vaikkakin kansallisen ja kansainvälisen tason kilpahiihtäjiä kaikki. Hiihtäjän eteenpäin tuottamaan voimaan vaikuttanee lähinnä hiihtotekniikka ja fyysinen kapasiteetti, ilmanvastukseen osin tekniikka, mutta ainakin hiihtäjän koko. Yllä todettiin myös suksien liukukitkakertoimien erojen olevan joitain tuhannesosia. Näistä lähtökohdista tutkimuksesta saatujen tuloksien pitäisi olla odotusten mukaisia, eli että hiihtäjien muodostamat erot ovat suurempia kuin mitä suksien muodostamat erot ja näin ollen hiihtäjä-suksi -yhdistelmän mittaaminen on usein mielekkäämpää ja tulokset siirtyvät suuremmin hiihtosuoritukseen.

9.4 Mahdollisia jatkotutkimusaiheita

Jotta yksinään suksien vaikutusta kilpailusuoritukseen päästäisiin tutkimaan mahdollisimman hyvin, pitäisi saman hiihtäjän hiihtää vakaisissa olosuhteissa eri suksipareilla. Ottaen huomioon liukukitkakertoimien pienet erot, muuttuvat olosuhteet ja koehenkilön inhimillisyyden, olisi tämä kuitenkin melko vaikea toteuttaa hyvin. Jotain vastauksia voitaisiin kuitenkin saada, mihin tässä tutkimuksessa ei tutkimusasetelman takia yksinkertaisesti voida ottaa kantaa. Voisi myös kyseenalaistaa, kuinka tärkeää yksittäisten liukukitkakerrointuhannesosien metsästys

nykytiedoilla on, vai olisiko suurempia hyötyjä saavutettavissa panostamalla mahdollisiin muihin osa-alueisiin.

Hiihtäjän etenemistä vastustavista komponenteista ilmanvastus on ainakin useisiin muihin lajeihin verrattuna melko tutkimaton osa-alue hiihdossa. Esimerkiksi maantie- ja ratapyöräilyssä lajit, välineet ja tekniikka ovat kehittyneet paljon ilmanvastuksen minimoimiseksi. (Lukes, Chin, Haake. 2005) Maastohiihdon nopeudet ovat hitaampia kuin kilpapyöräilyssä, mutta kertaluokka on silti parhaimmillaan joitain kymmeniä kilometrejä tunnissa. Onkin mielenkiintoista miksi hiihdossa ei juurikaan ole kiinnitetty huomiota ilmanvastuksen minimointiin. Osin tämä johtunee siitä, että moneen suuntaan liikkuva hiihtäjä raajoineen on monimutkaisempi kokonaisuus kuin kilpapyöräilijä tai kilpa-auto. Hiihtäjän kokoon on vaikeampi vaikuttaa, mutta hiihtoasennon ja välineiden vaikutusta ilmanvastukseen voisi varmasti tutkia nykyistä enemmän, erityisesti kun huomioi kuinka paljon tutkimus tällä hetkellä keskittyy löytämään joitain tuhannesosia suksien kitkakertoimista. Pyöräilyssä esimerkiksi eri vaatamateriaalien vaikutusta on tutkittu (Jiang ym. 2022)) ja nämä löydökset voisivat osin olla siirrettävissä myös hiihtoon.

10 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tutkimuskysymystä 1 tutkittaessa päädyttiin tulokseen, ettei suksiparille laboratoriossa mitattu kitkakerroin siirry suoraan ulos hiihtäjä-suksi -yhdistelmän tuloksiin. Tämän tutkimuksen perusteella ulko-olosuhteissa muut tekijät kuin yksin suksen kitkakerroin vaikuttavat enemmän hiihtäjä-suksi -yhdistelmän laskunopeuteen.

Toisena osana tutkimuskysymystä 1 verrattiin AdMos-sensorin mittaamaa maksiminopeutta valokennoin kelloitettuun laskuaikaan. Molemmissa mittauksissa oli kyse samasta suorituksesta. Tätä mitattiin sekä hiihtäjätasolle keskiarvoistettuna että suorituskohtaisesti. GNSS-maksiminopeuden ja ajanoton välillä oli selkeä positiivinen yhteys vahvalla tilastollisella merkitsevyydellä ($|r| > 0,9$, $p < < 0,001$). Johtopäätöksenä voidaan esittää, että mittausmenetelmänä AdMos-sensorit (tai vastaavat GNSS-IMU -laitteet) soveltuvat suksitestien mittaamiseen, sillä ne antoivat samoja tuloksia kuin perinteisin valokennoin tehdyt mittaukset, kun verrattiin samoista suorituksista tehtyjä mittauksia.

Tutkimuskysymystä 2 päädyttiin tulokseen, ettei suksiparille laboratoriossa mitattu kitkakerroin siirry suoraan ulos hiihtäjä-suksi -yhdistelmän tuloksiin myöskään kilpaladulle. Tämä oli pääteltävissä jo edellä tehdystä johtopäätöksestä.

Toisaalta valokennoin mitatut nopeat ajat tarkoittivat nopeita laskuaikoja myös kilpailusuorituksessa. Mielenkiintoista on se, että verrattaessa kilpaladun alamäen absoluuttista aikaa valokennoin mitattuun testimäen laskuaikaan oli korrelaatio hieman heikompa ($|r|=0,7256$, $p < < 0,001$) kuin silloin kun kilpaladun alamäessä käytetty aika suhteutettiin hiihtäjän kokonaisaikaan ($|r|=0,8089$, $p < < 0,001$). Tämä viittaa siihen, että nopeasti liukuvat hiihtäjä-suksi -yhdistelmät ovat nopeita nimenomaan alamäessä eron hiihtäjien välillä pienentyessä muissa maastonkohdissa.

Tutkimuskysymystä 3 tutkittaessa huomattiin, että yllä mainittu erojen pieneneminen on niin pientä, että valokennoihin lasketut nopeat ajat eivät tuntuneet johtavan erityisen nopeisiin tai hitaisiin aikoihin ylämäessä tai tasatyöntöosuudella, eikä myöskään ylä-, alamäkien tai tasamaaosuuksien kokonaisaikoihin.

LÄHTEET

- Andersson, E., Supej, M., Sandbakk, Ø., Sperlich, B., Stöggl, T. & Holmberg, H.-C. 2010. Analysis of sprint cross-country skiing using a differential global navigation satellite system. *European Journal of Applied Physiology*, October 2010, 110:585–595.
- Braghin, F., Belloni, E., Melzi, S., Sabbioni, E. 2016. Friction between ski and snow. In *The engineering approach to winter sports*, pp. 33-51. Springer, New York.
- Bäurle, L., Szabo, D., Fauve, M., Rhyner, H., & Spencer, N.D. 2006. Sliding friction of polyethylene on ice: tribometer measurements. *Tribology Letters*, 24(1), pp. 77-84.
- Bowden, F.P. & Hughes, T.P. 1939. The mechanism of sliding on ice and snow. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*. 172(949), pp. 280-98.
- Bowden, F.P. 1953. Friction on snow and ice. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, 217(1131), pp. 462-478.
- Bowden, F.P. & Taylor, D. 1964, *The Friction and Lubrication of Solids Part 2*, Clarendon Press, Oxford, UK.
- Breitschädel, F., Berre, V., Andersen, R. & Stjernstrøm, E. 2012. A comparison between timed and IMU captured Nordic ski glide tests. *Procedia engineering*, 34, pp.397-402.
- Breitschädel, F. 2014. Technical aspects to improve performance in cross-country skiing. Norwegian University of Science and Technology. Doctoral theses at NTNU, 2014.
- Buhl, D., Fauve, M. & Rhyner, H. 2001. The kinetic friction of polyethylen on snow: the influence of the snow temperature and the load. *Cold Regions Science and Technology*, 33(2-3), pp. 133-140.
- Carlsson, P., Ainegren, M., Tinnsten, M., Sundström, D., Esping, B., Koptioug, A., & Bäckström, M. (2016). Cross-country ski. *The engineering approach to winter sports*, 107-151.

- Colbeck, S.C. 1988. The kinetic friction of snow. U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Hanover, New Hampshire, U.S.A. *Journal of Glaciology*, 34(116), pp. 78-86.
- Colbeck, S. 1992. The friction of snow skis. In *Proceedings of the 1992 international snow science workshop, Breckenridge, Colorado*.
- Coupe, R.C. & Spells, S.J., 2009. Towards a methodology for comparing the effectiveness of different alpine ski waxes. *Sports Engineering*, 12(2), pp. 55-62.
- Ducreta, S., Zahouania, H., Midola, A., Lanterib, P. & Mathiaa, T.G. 2005. Friction and abrasive wear of UHMWPE sliding on ice. *Wear*, 258(1-4), pp. 26-31.
- Fasel, B., Favre, J., Chardonens, J., Gremion, G. & Aminian, K. 2015. An inertial sensor-based system for spatio-temporal analysis in classic cross-country skiing diagonal technique. *Journal of biomechanics*, 48(12), pp. 3199-3205.
- Fauve, M., Buhl, D., Rhyner, H. U., Schneebeli, M., & Ammann, W. 2005. Influence of snow and weather characteristics on the gliding properties of skis. Science and Skiing III, s. 401-410. Congress Proceedings, 3rd International Congress on Skiing and Science, Aspen, Colorado, USA.
- FIS. 2019. Specifications for Competition Equipment Cross-Country, Ski Jumping, Nordic Combined, Snowboard, Freestyle, Freeski . Edition 2019/2020 (October 2019). Viitattu 6.4.2021. https://assets.fis-ski.com/image/upload/v1572429756/fis-prod/assets/Specifications_for_CC_JP_NC_SB_FS_FK_Competiton_Equipment_2020.pdf
- Glenne, B. 1987. Sliding Friction and Boundary Lubrication of Snow. *Journal of Tribology* 109, pp. 614-617.
- Hasler, M., Schindelwig, K., Mayr, B., Knoflach, C., Rohm, S., van Putten, J. & Nachbauer, W., 2016. A novel ski–snow tribometer and its precision. *Tribology Letters*, 63(3), pp. 1-9.
- Hoell, F. 2019. Measuring ski gliding properties Development of a measurement system for ski gliding friction. Thesis for the degree of Master by Research in Mechanical Engineering - Sports Technology. Mittuniversitetet, Östersund.

- Jiang, W., Qiu, J., Ma, G., Weng, D., Zhang, J., & Liu, L. (2022). An experimental investigation and flow field analysis on cycling clothing fabrics with grooved surface. *Journal of Industrial Textiles*, 52, 15280837221142034.
- Jølstad, P.A.H., Reid, R.C., Gjevestad, J.G.O. & Gilgien, M. Validity of the AdMos, Advanced Sport Instruments, GNSS Sensor for Use in Alpine Skiing. *Remote Sens.* 2022, 14, 22. <https://doi.org/10.3390/rs14010022>
- Karlöf, L., Smevold, T., Tretterud, O.B. & Zupan, M. 2007. *Swix test protocol for testing of glide products*. Swix Tech Note 3. 3-2007.
- Keinonen, J., 1978. An experimental device for measuring friction between ski and snow. Finnish Academy of Technical Sciences.
- Kolehmainen, V. 2006. Perinteisen hiihtotavan simulointi suksen liikutuslaitteessa, sekä luistoon ja pito-ominaisuuksiin vaikuttavat tekijät. Pro gradu –tutkielma. Jyväskylän yliopisto.
- Kuroiwa, D. 1977. The kinetic friction on snow and ice. *Journal of Glaciology*, 19(81), pp. 141-152.
- Kuzmin, L. 2010. Interfacial kinetic ski friction. Department of Engineering and Sustainable Development, Mid Sweden University, Östersund. Mid Sweden University Doctoral Thesis 88.
- Lehtovaara, A. 1989. Kinetic friction between ski and snow. *Acta Polytechnica Scandinavica. Mechanical Engineering Series*.
- Leino, M.A., Spring, E. and Suominen, H. 1983. Methods for the simultaneous determination of air resistance to a skier and the coefficient of friction of his skis on the snow. *Wear*, 86(1), pp .101-104.
- Lemmettylä, T., Heikkinen, T. Ohtonen, O., Kiljunen, T. & Linnamo, V. 2005. Ski Tester Development for Cross-Country Ski Testing. Abstract Book of the 8th International Congress on Science and Skiing, p. 52. Congress Proceedings, 8th International Congress on Skiing and Science, Vuokatti, Finland.

- Lemmettylä, T., Heikkinen, T., Ohtonen, O., Lindinger, S., & Linnamo, V. 2021. The development and precision of a custom-made skitester. *Frontiers in Mechanical Engineering*, 7, 661947.
- Lemmettylä, T. 2022. Keskustelu.
- Linnamo, V. Kolehmainen, V. Vähäsöyrinki, P. Komi, P. 2008 Simulation of classical skiing using a new ski tester. Neuromuscular Research Center, University of Jyväskylä.
- Lukes, R. A., Chin, S. B., & Haake, S. J. 2005. The understanding and development of cycling aerodynamics. *Sports engineering*, 8, 59-74.
- Moxnes, J.F., Sandbakk, Ø. & Hausken, K. 2013. A simulation of cross-country skiing on varying terrain by using a mathematical power balance model. *Open access journal of sports medicine*, 4, p. 127.
- Myklebust, H., Losnegard, T. & Hallén, J. 2014. Differences in V1 and V2 ski skating techniques described by accelerometers. *Scandinavian journal of medicine & science in sports*, 24(6), pp. 882-893.
- Nachbauer, W., Kaps, P., Hasler, M., & Mössner, M. 2016. Friction between ski and snow. In *The engineering approach to winter sports*, pp. 17-32. Springer, New York.
- Ohtonen, O. & Mikkola, J. 2016. Maastohiihdon lajiansalyysi ja valmennuksen ohjelmointi. Kokoomateoksessa Mero, A., Nummela, A., Kalaja, S., Häkkinen, K. 2016. Huippu-urheiluvallennus. 1. painos. Lahti: VK-Kustannus, 491-519.
- Persson, B.N. 2013. *Sliding friction: physical principles and applications*. Springer Science & Business Media.
- Shang, L., Sandbakk, Ø., Shi, R., Chen, X. & Talsnes, R.K. 2022. Analysis of a Skating Time-Trial Competition and Associated Performance-Determinants in Cross-Country Skiers. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 2022, 19, 11580. <https://doi.org/10.3390/ijerph191811580>
- Street, G.M. & Gregory, R.W. 1994. Relationship between glide speed and Olympic cross-country ski performance. *Journal of applied biomechanics*, 10(4), pp. 393-399.

Spring, E., Savolainen, S., Erkkilä, J., Hämäläinen, T. and Pihkala, P. 1988. Drag area of a cross-country skier. *Journal of Applied Biomechanics*, 4(2), pp. 103-113.

Swarén, M., Karlöf, L., Holmberg, H.C. & Eriksson, A. 2014. Validation of test setup to evaluate glide performance in skis. *Sports Technology*, 7(1-2), pp. 89-97.

Takeda, M., Miyamoto, N., Endo, T., Ohtonen, O., Lindinger, S., Linnamo, V., & Stöggl, T. 2019. Cross-Country Skiing Analysis and Ski Technique Detection by High-Precision Kinematic Global Navigation Satellite System. *Sensors* 2019, 19, 4947.

<https://doi.org/10.3390/s19224947>