

**REAKTIOVOIMIEN, TUKIJALAN KINEMATIIKAN SEKÄ TULONOPEUDEN
YHTEYS HEITTOSUORITUSKYKYYN MIES- JA NAISKEIHÄÄNHEITTÄJILLÄ**

Gia Reinholm

Valmennus- ja testausopin pro gradu -tutkielma

Liikuntatieteellinen tiedekunta

Jyväskylän yliopisto

Kevät 2024

TIIVISTELMÄ

Reinholm, G. 2024. Reaktiivoimien, tukijalan kinematiikan sekä tulonopeuden yhteys heittosuorituskykyyn mies- ja naiskeihäänheittäjillä. Liikuntatieteellinen tiedekunta, Jyväskylän yliopisto, valmennus- ja testausopin pro gradu -tutkielma, 62 s.

Keihäänheittosuoritus on monivaiheinen liikeketju, jossa heittäjä muuntaa juoksuvauhtinsa nopeuden alavartalosta ylävartalon kautta heittokäteen. Irrotushetkellä nopeus välitetään lopulta keihään lähtönopeudeksi. Tukijalalle törmäminen jarruttaa heittäjän etenemisliikettä, jolloin kontaktin aikana tuotetaan suuria reaktiivoimia. Keihäänheittosuorituskykyyn ja heiton pituuteen vaikuttavat heittäjän nopeus, keihään lähtönopeus ja lentoasento, tukijalan jarrutustyön tehokkuus, heittokäden tekniikka sekä heittäjän asento heittohetkellä. Sen sijaan tuotettujen reaktiivoimien merkitystä heittosuorituskykyille ei vielä täysin ymmärretä. Pro gradu -tutkielman tarkoituksena oli selvittää, onko reaktiivoimilla, tukijalan kinematiikalla tai heittäjän tulonopeudella yhteyttä heittosuorituskykyyn mies- ja naiskeihäänheittäjillä.

Tutkimukseen osallistui 11 mies- (ikä 24 ± 3 v, pituus 184 ± 8 cm, paino 96 ± 12 kg, ennätys 76.76 ± 5.43 m) ja 13 naiskeihäänheittäjää (ikä 25 ± 6 v, pituus 171 ± 5 cm, paino 80 ± 11 kg, ennätys 55.79 ± 5.85 m), jotka heittivät kuusi maksimaalista kilpailusuoritusta mukailevaa heittoa sisätiloissa heittopressuun. Heitoista mitattiin reaktiivoimia voimalevyillä, ja reaktiivoimista analysoitiin vertikaalinen sekä horisontaalinen huippuvoima, impulssi ja voimantuotto-nopeus. Heittovideoista analysoitiin heittoparametrit, kinemaattiset muuttujat sekä tulonopeus 3D-liikeanalyysin avulla. Heittoparametrien avulla heitoille laskettiin teoreettinen pituus.

Miesheittäjillä horisontaalinen kehonpainoon suhteutettu huippuvoima oli yhteydessä teoreettiseen heittopituuteen ($r = -0.636$, $p = 0.035$), keihään lähtönopeuteen ($r = -0.609$, $p = 0.047$) sekä vetomatkaan ($r = -0.624$, $p = 0.040$). Askelpituuteen olivat yhteydessä absoluuttinen vertikaalinen ($r = 0.674$, $p = 0.023$) ja horisontaalinen huippuvoima ($r = -0.840$, $p = 0.001$) sekä kehonpainoon suhteutettu horisontaalinen huippuvoima ($r = -0.818$, $p = 0.002$). Naisheittäjillä reaktiivoimat eivät suoraan olleet yhteydessä heittosuorituskykyyn, mutta irrotuskorkeuteen olivat yhteydessä vertikaalinen ($r = 0.721$, $p = 0.005$) sekä horisontaalinen ($r = -0.607$, $p = 0.028$) huippuvoima. Keihään lähtönopeuteen olivat yhteydessä askelpituus ($r = -0.560$, $p = 0.046$) sekä ristiaskelhypyn aikainen nilkkakorkeus ($r = 0.582$, $p = 0.037$). Tulonopeus ei ollut yhteydessä heittosuorituskykyyn kummallakaan sukupuolella.

Sekä mies- että naiskeihäänheittäjille horisontaalisesti suuntautuva jarrutustyö vaikuttaisi olevan vertikaalista törmäämistä merkityksellisempää. Miesheittäjien tulisi korostaa vaakasuuntaista jarrutustyötä heiton pituuden, keihään lähtönopeuden sekä vetopituuden optimoimiseksi sekä mahdollisesti hillitä vertikaalista törmäämistä keihään asennon hallitsemiseksi. Askelpituutta pidentämällä jarrutustyötä voidaan tehostaa, ja tulonopeuden kasvaessa jarrutustyön vaatimus lisääntyy. Naisheittäjillä huippuvoimat saattavat selittää heittosuorituskykyä epäsuorasti, ja heittäjien on kyettävä tuottamaan tarpeeksi voimaa korkean lantion asennon sekä irrotuskorkeuden mahdollistamiseksi. Jarrutustyötä voidaan tehostaa astumalla tukijalan askel kanta-päävoittoisesti. Optimaalisen keihään lähtönopeuden saavuttamiseksi tukijalan askelpituutta ei tule ylikorostaa.

Asiasanat: biomekaniikka, heittoparametrit, liikeanalyysi, voimalevymittaus, yleisurheilu

ABSTRACT

Reinholm, G. 2024. Relationship between ground reaction forces, front leg kinematics, approach velocity and throwing performance in male and female javelin throwers. Faculty of Sport and Health Sciences, University of Jyväskylä, Master's thesis, 62 pp.

Javelin throw involves a sequence of complex movements where the aim is to transfer momentum gained during approach run from the lower body to the upper body. Eventually the flow of kinetic energy is converted into javelin release velocity. At final foot strike the thrower decelerates this forward momentum, and during front foot contact high ground reaction forces are produced. Thrower's approach velocity, javelin release speed and position during flight, braking action of the front leg, technical aspects of the throwing arm and posture of the thrower affect the throwing performance. However, the significance of ground reaction forces for the javelin throwing performance is not well-understood. The purpose of the study was to investigate whether ground reaction forces, front leg kinematics and approach velocity are associated with throwing performance in male and female javelin throwers.

11 male (age 24 ± 3 years, height 184 ± 8 cm, body mass 96 ± 12 kg, personal record 76.76 ± 5.43 m) and 13 female (age 25 ± 6 years, height 171 ± 5 cm, body mass 80 ± 11 kg, personal record 55.79 ± 5.85 m) javelin throwers were instructed to perform six maximal javelin throw attempts indoors. Ground reaction forces were measured with force platforms, and horizontal and vertical peak force, impulse and loading rate were analyzed. 3D motion analysis was performed to determine release parameters, kinematic variables and approach velocity. Theoretical throwing distance was calculated based on throwing parameters.

For male throwers horizontal normalized peak force was associated with theoretical throwing distance ($r = -0.636$, $p = 0.035$), javelin release velocity ($r = -0.609$, $p = 0.047$) and pull distance ($r = -0.624$, $p = 0.040$). Delivery step length was associated with vertical ($r = 0.674$, $p = 0.023$) and horizontal peak force ($r = -0.840$, $p = 0.001$) and normalized horizontal peak force ($r = -0.818$, $p = 0.002$). For female throwers ground reaction forces did not correlate with throwing performance directly, but release height was associated with vertical ($r = 0.721$, $p = 0.005$) and horizontal ($r = -0.607$, $p = 0.028$) peak forces. Javelin release speed was associated with delivery step length ($r = -0.560$, $p = 0.046$) and ankle height at back foot contact ($r = 0.582$, $p = 0.037$). Approach velocity was not associated with throwing performance.

For both genders horizontal braking might be more significant for throwing performance compared to vertical direction. Male throwers may need to increase horizontal braking to optimize throwing distance, javelin release velocity and pull distance while regulating vertical impact to control javelin position. Braking action can be emphasized with longer delivery step length and with greater approach velocity the demand for braking action increases. For female, peak forces might explain throwing performance indirectly. Female throwers should be able to produce enough force to support high pelvis posture and release height. Heel-dominant front foot technique might enhance braking action. To reach the optimal javelin release speed, delivery step length should not be overemphasized.

Key words: biomechanics, throwing parameters, motion analysis, force plate measurement, athletics

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

1	JOHDANTO	1
2	KEIHÄÄNHEITTOSUORITUKSEN VAIHEET	2
2.1	Vauhdinjuoksu	2
2.2	Ristiaskeljuoksu	3
2.3	Vetovaihe	4
2.3.1	Tukijalan kontakti	5
2.3.2	Heittokäsi	6
2.4	Lentovaihe	8
3	HEITTOPARAMETRIT	10
3.1	Lähtönopeus	11
3.2	Lähtökulma	13
3.3	Ryntökulma	14
3.4	Sivuttaisryntökulma	15
3.5	Irrotuskorkeus	16
4	REAKTIOVOIMAT HEITTOSUORITUKSESSA	17
4.1	Reaktivoimat keihäänheitossa	17
4.2	Reaktivoimat, kinematiikka ja heittosuorituskyky muissa yliolanheitoissa	19
4.2.1	Takajalan kontakti	22
4.2.2	Tukijalan kontakti	23
5	TUTKIMUSKYSYMYKSET JA HYPOTEESIT	27
6	TUTKIMUSMENETELMÄT	29
6.1	Tutkittavat	29
6.2	Keihäänheittotestit	30
6.3	Reaktivoimat	31

6.4	Liikeanalyysi.....	34
6.4.1	Heittoparametrit.....	35
6.4.2	Kinemaattiset muuttajat ja tulo nopeus.....	37
6.5	Tilastollinen analyysi.....	38
7	TULOKSET.....	39
7.1	Heittoparametrit, kinemaattiset muuttajat ja tulo nopeus.....	39
7.2	Tuki- ja takajalan reaktivoimat	40
7.3	Reaktivoimien yhteys heittosuorituskykyyn.....	41
7.4	Reaktivoimien yhteys kinemaattisiin muuttajiin	44
7.5	Kinemaattisten muuttajien yhteys heittosuorituskykyyn	45
7.6	Tulonopeuksien yhteys heittosuorituskykyyn ja reaktivoimiin	46
8	POHDINTA.....	47
8.1	Reaktivoimat	47
8.2	Kinemaattiset muuttajat.....	49
8.3	Tulo nopeus.....	51
8.4	Tutkimuksen vahvuudet ja heikkoudet.....	52
8.5	Johtopäätökset	54
8.6	Käytännön sovellukset.....	55
	LÄHTEET	56

1 JOHDANTO

Keihäänheitossa merkittävin tekijä heiton pituuden kannalta on keihään lähtönopeus (Bartlett & Best 1988; Morriss & Bartlett 1996). Saavuttaakseen mahdollisimman suuria keihään lähtönopeuksia ja siten myös pitkiä heittoja tulee heittäjän pystyä muuntamaan tehokkaasti juoksu-
vauhdin aikana saavutettu kehon massakeskipisteen nopeus keihään lähtönopeudeksi. Heittohetkellä heittäjä pysäyttää etenemisvauhtinsa jarruttamalla tukijalkaansa vasten. Tämä mahdollistaa saavutetun nopeuden johtamisen monimutkaisena liikeketjuna ensin alavartalosta ylävartaloon ja lopulta heittokäden kautta keihääseen. (Morriss & Bartlett 1996) Heittokäden voimantuoton lisäksi alavartalon voimantuotto, tukijalan jarrutustyö ja heittäjän tulonopeus sekä asento heittohetkellä ovatkin merkittäviä tekijöitä heittosuorituskyvyn kannalta. Lähtönopeuden ohella lentovaiheen aikainen keihään asento vaikuttaa heittosuoritukseen, jolloin lajissa korostuvat lisäksi välineen hallinta ja keihään saattaminen suotuisaan asentoon heittohetkellä.

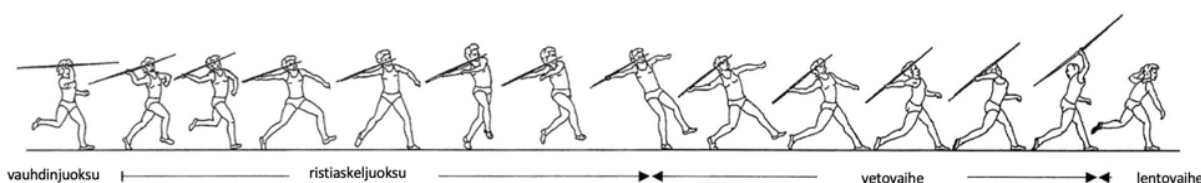
Tukijalan jarruttava sekä asentoa kannatteleva voimantuotto synnyttää törmäyshetkellä alustaan suuria reaktiovoimia. Heittäjien tiedetäänkin pystyvän tuottamaan tukijalan kontaktin hetkellä reaktiovoimia, jotka ylittävät moninkertaisesti heittäjän kehonpainon (Hurriion ym. 2002; Korjus 1988). Keihäänheiton osalta reaktiovoimien sekä heittosuorituskyvyn välistä yhteyttä on kuitenkin tutkittu vasta hyvin vähän, joten ei ole täysin selvää, miten reaktiovoimat mahdollisesti selittävät heittosuorituskykyä.

Sen sijaan tukijalan merkitystä heittosuorituskyvyn kannalta ymmärretään paremmin, sillä heittäjän on pystyttävä tuottamaan tukijalallaan tarpeeksi jarruttavaa lihastyötä heittohetkellä (Morriss & Bartlett 1996). Jarruttavaa työtä vaikuttaisivat tehostavan erityisesti pitkä tukijalan askel sekä suorana pysyvä polvikulma. On kuitenkin epäselvää, miten tukijalan käyttö törmäyshetkellä vaikuttaa heitoista mitattuihin reaktiovoimiin keihäänheittosuorituksessa. Lisäksi heittäjän nopeuden tiedetään olevan yhteydessä parempaan heittosuorituskykyyn (Bartlett ym. 1996a; Krzyszkowski & Kipp 2021; Murakami ym. 2017), mutta tulonopeuden yhteyttä reaktiovoimiin ei ole selvitetty.

Tämän pro gradu -tutkielman tarkoituksena on selvittää reaktiovoimien yhteyttä heittosuorituskykyyn mies- ja naiskeihäänheittäjillä. Lisäksi tutkielman tavoitteena on tarkastella tukijalan kinematiikan yhteyttä heittosuorituskykyyn ja reaktiovoimiin sekä tulonopeuden yhteyttä heittosuorituskykyyn sekä reaktiovoimiin.

2 KEIHÄÄNHEITTOSUORITUKSEN VAIHEET

Keihäänheitossa tavoitteena on heittää keihästä mahdollisimman pitkälle heittoviivan takaa (World Athletics 2021). Miehet heittävät kilpailussa 800 grammaa painavalla ja 2,6–2,7 metriä pitkällä keihäällä naisten välineen ollessa 600 grammaa painava ja 2,2–2,3 metriä pitkä (World Athletics 2022). Keihäänheittosuoritus on monivaiheinen liikeketju ja se voidaan jakaa neljään eri vaiheeseen (kuva 1), jotka ovat vauhdinjuoksu, ristiaskeljuoksu, vetovaihe sekä lentovaihe.



KUVA 1. Keihäänheittosuorituksen vaiheet (mukailtu IAAF 2000).

2.1 Vauhdinjuoksu

Heiton pituutta voidaan kasvattaa lisäämällä suoritukseen heittovaihetta edeltävä vauhdinjuoksuvaihe (Menzel 1986; Morriss & Bartlett 1996), sillä keihäällä on oltava riittävä alkunopeus ennen kuin vetovaiheessa keihään nopeutta vielä kiihdytetään (Morriss & Bartlett 1996). Alkuvauhti koostuu keskimäärin 8–12 juoksuaskeleesta (Ogiolda 1993). Vauhdinjuoksun aikana heittäjän kannattaa pyrkiä saavuttamaan mahdollisimman suuri juoksunopeus, mutta samalla heittäjän tulee myös varmistaa, että hän pystyy vielä hallitsemaan heittotekniikkansa ja heittovälineensä. Heittäjän on lisäksi varmistettava, että hän pystyy pysäyttämään itsensä ennen heittoviivaa (Bartlett ym. 1996a) välttääkseen yliastumisen ja heiton hylkäämisen.

Vauhdinjuoksun aikaisen juoksunopeuden on havaittu olevan suurempi kansainvälisen tason heittäjillä verrattuna seuratasen heittäjiin (Bartlett ym. 1996a). Vauhdinjuoksun aikana kansainvälisen tason miesheittäjillä massakeskipisteen nopeuden on havaittu olevan 5,2–7,3 m/s (Menzel 1986; Morriss & Bartlett 1996) ja naisheittäjillä 5,2–6,5 m/s (Menzel 1986). Heittäjän vauhdinjuoksun aikaisen nopeuden on myös havaittu olevan vahvasti yhteydessä vetovaiheen aikaiseen juoksunopeuteen (Murakami ym. 2017).

2.2 Ristiaskeljuoksu

Ristiaskeljuoksun aikana heittäjä pyrkii säilyttämään vauhdinjuoksun aikana saavuttamansa nopeuden. Samalla heittäjä valmistautuu heittoasennon saavuttamiseen. Sekä olkapää- että lantio- linja käännetään tässä vaiheessa pitkästi heittosuuntaan nähden. Oikeakätinen heittäjä kääntää vasemman kylkensä heittosuuntaan vasenkätisen heittäjän tehdessä päinvastoin. (Morriss & Bartlett 1996; Morris ym. 1997), ja tyypillisesti tämä vaihe alkaa heittäjän viidenneksi viimeisen askeleen aikana (Menzel 1986). Ristiaskeljuoksun aikana heittäjä ojentaa samalla kyynär- nivelensä suoraksi pitäen keihään vaakatasossa alustaan nähden (Morriss & Bartlett 1996). Asento mahdollistaa pidemmän käden vetomatkan sekä -ajan (Morriss & Bartlett 1996; Morris ym. 1997).

Ristiaskeljuoksun viimeinen askel eroaa muista juoksuaskelista, sillä se tehdään ristiaskelhyppynä. Ristiaskelhyppy tulisi tehdä matalana, ja tämän askeleen tulisi olla pidempi kuin edeltävät ristiaskeleet (Menzel 1986). Ristiaskelhyppyn aikana heittäjän etenemisnopeus kiihtyy vauhdin- juoksun aikana saavutetusta alkunopeudesta ja samalla se toimii jatkumona juoksuvaudin sekä vetovaiheen välille (Pavlovic ym. 2020). Ristiaskelhyppyn aikana kansainvälisen tason miesheit- täjillä keihään nopeuden on havaittu olevan noin 8 m/s (Morriss & Bartlett 1996).

Erityisesti vetovaiheen alun aikaisen heittäjän nopeuden on havaittu olevan yhteydessä heiton pituuteen (Krzyszowski & Kipp 2021; Tauchi ym. 2009). Best ym. (1993) havaitsivat, että ristiaskelhyppyn aloittavan jalan kontaktiajan pituus korreloi negatiivisesti keihään lähtönopeu- den kanssa. Naisheitäjillä tämän kontaktiajan havaittiin olevan miesheitäjiin verrattuna pi- dempi, mikä tutkijoiden mukaan selittää sitä, että miehet pystyvät saavuttamaan suurempia kei- hään lähtönopeuksia, hyödyntämään paremmin jalkojen voimantuottoa ja kiihdyttämään juok- suvahtiaan ristiaskelten aikana. (Best ym. 1993) Sama yhteys on havaittu MM-kilpailuiden heittäjiltä. Lyhyempi kontaktiaika estää vauhdin liiallisen hidastumisen askelkontaktin aikana. (Morris ym. 1997)

2.3 Vetovaihe

Vetovaihe alkaa ristiaskelhypyn jälkeen takajalan ensimmäisestä maakontaktista ja loppuu keihään irtoamiseen heittäjän kädestä. Oikeakätisellä heittäjällä tämä tarkoittaa oikean ja vasenkätisellä heittäjällä vastaavasti vasemman jalan viimeistä kontaktia. Tämän jälkeen seuraa vielä tukijalan kontakti, joka on oikeakätisellä heittäjällä vasemman jalan ja vasenkätisellä heittäjällä oikean jalan viimeinen kontakti. (Morriss & Bartlett 1996) Takajalan aktiivinen lihastyö aloittaa valmistautumisen irrotukseen, ja tavoitteena on päästä optimaaliseen heittoasentoon ja niin sanotusti keihään alle (Ogiolda 1993). Vaiheen aikana heittäjä muuntaa juoksuvauhdin aikana saavuttamansa horisontaalisen juoksunopeuden sekä horisontaaliseksi että vertikaaliseksi keihään lähtönopeudeksi (Morriss & Bartlett 1996; Whiting ym. 1991). Vetovaihe tukijalan kontaktin ja irrotushetken välillä kestää keskimäärin vain noin 120–140 millisekuntia (Mero ym. 1994; Morriss & Bartlett 1996). Veto tulisi suorittaa keihään pitkittäisakselin suuntaisesti, sillä poikittain tuotettu voima lisää keihään värähtelyä (Hubbard & Bergman 1989; Hubbard & Laporte 1997).

Kahden viimeisen askelkontaktin aikana heittäjän on pystyttävä tuottamaan keihäälle mahdollisimman suuri lähtönopeus, ja heittosuorituksen onnistumisen kannalta erityisesti tukijalan kontaktivaihe on merkityksellinen (Morriss & Bartlett 1996). Nopeus johdetaan liikeketjuna alavartalosta ensin ylävartaloon ja ylävartalon kautta lopulta heittokäteeseen ja keihääseen (Morriss & Bartlett 1996; Whiting ym. 1991). Komin ja Meron (1985) mukaan heiton viimeisen 50 millisekunnin aikana miesheittäjät pystyvät lisäämään keihään nopeutta jopa 55,1 % ja naisheittäjät 49,9 %. Kansainvälisen tason heittäjät saavuttavat suurempia lähtönopeuksia sekä kykenevät kiihdyttämään keihään liikettä nopeammin vetovaiheen aikana (Campos ym. 2002) sekä välittämään tämän saavutetun nopeuden tehokkaammin keihääseen (Bartlett ym. 1996a). Heittäjän massakeskipisteen nopeuden on havaittu olevan tukijalan kontaktin aikana noin 6 m/s (Morris ym. 1997), ja suuremman tukijalan kontaktin hetkeltä mitatun tulonopeuden on havaittu olevan yhteydessä pidempään heiton pituuteen (Murakami ym. 2006). Keihäs on tukijalan kontaktin aikana jo kiihtyvässä liikkeessä, ja olympiaurheilijoilla keihään nopeudeksi on mitattu $8,47 \pm 1,31$ m/s miesheittäjillä ja $8,16 \pm 0,92$ m/s naisheittäjillä (Komi & Mero 1985).

Vetovaiheesta voidaan määrittää heiton vetopituus sekä -aika. Vetopituudella tarkoitetaan keihään kulkemaa matkaa tukijalan kontaktin alusta keihään irtoamiseen, kun taas vetoaika on aika, joka kuluu tukijalan kontaktista irrotushetkeen. Miesheittäjillä vetoajan on havaittu olevan

pidempi verrattuna naisheittäjiin. (Liu ym. 2014) Vertailtaessa vuoden 2005 MM-kilpailuiden finalistien sekä japanilaisten keihäänheittäjien kilpailuheittoja pidemmän vetomatkan havaittiin olevan yhteydessä pidempiin heittopituuksiin. Samalla kuitenkin pidempi vetoaika korreloi negatiivisesti heiton pituuden kanssa. (Murakami ym. 2006) Myös Korjuksen (1988) havainnon mukaan pidempi vetomatka oli yhteydessä suurempaan lähtönopeuteen suomalaisilla keihäänheittäjillä, mutta vetoajan ja lähtönopeuden välillä ei havaittu yhteyttä.

2.3.1 Tukijalan kontakti

Tukijalan tehokas käyttö on heiton pituuden kannalta hyvin ratkaiseva tekijä, ja tukijalan ojenustyötä tekevien lihasten tuleekin kestää suuria voimia pystyäkseen jarruttamaan heittäjän juoksuvauhtia (Morriss & Bartlett 1996). Liian lyhyen viimeisen askeleen havaitaan yleensä johtavan siihen, ettei juoksuvauhtia saada jarrutettua tarpeeksi, jolloin heittäjä joutuu astumaan tukijalkansa yli. Tällöin juoksuvauhdin hyödyntäminen heittoon ei ole ollut optimaalista. (Menzel 1986) Tukijalan askeleen on havaittu olevan miesheittäjillä pidempi johtuen sukupuolten välisestä pituuserosta (Mero ym. 1994). Pidemmän viimeisen askeleen on miesheittäjillä havaittu korreloivan vetovaiheen aikaisen keihään nopeuden kanssa (Murakami ym. 2017). Huipputasoin heittäjillä askelpituus ei kuitenkaan vaikuttaisi vaihtelevan eri mittaisten heittojen välillä (Yo ym. 2020). Miesheittäjillä askelpituuden ei ole havaittu olevan suoraan yhteydessä heiton pituuteen (Saratlija ym. 2013; Tauchi ym. 2009), mutta parempien heittäjien on havaittu saavuttaneen pidempiä askelpituuksia (Krzyszowski & Kipp 2021; Whiting ym. 1991). Naisheittäjillä askelpituuden ei ole havaittu selittävän heittosuorituskykyä (Krzyszowski & Kipp 2021; Vassilios & Iraklis 2013).

Sekä mies- että naisheittäjillä suuremman irrotushetken aikaisen tukijalan polvikulman on havaittu korreloivan paremman heittosuorituskyvyn kanssa (Komi & Mero 1985; Krzyszowski & Kipp 2021; Menzel 1986; Murakami ym. 2006). Myös tukijalan ulomman reisilihaksen EMG-aktiivisuuden on havaittu olevan yhteydessä keihään lähtönopeuteen (Korjus 1988). Tukijalan jarruttavan työn suuruus on todellisuudessa riippuvainen tukijalan polvikulman suuruudesta sekä siitä, kuinka suoraan heittäjän massakeskipisteen etupuolelle tukijalalla astutaan. Tyypillisesti lonkan loitonuus ohjaa kuitenkin tukijalkaa sivuttaissuunnassa pois päin heittokädestä. (Morris ym. 1997) Pieni polven koukistuminen tukijalan kontaktin hetkellä saattaa jopa lisätä tukijalan voimantuottoa, mikäli polvea pystytään tämän jälkeen ojentamaan tehokkaasti

ennen irrotusta (Komi & Mero 1985; Krzyszkowski & Kipp 2021; Mero ym. 1994; Murakami ym. 2017; Saratlija ym. 2013). Tukijalan kontaktin alussa tukijalan polvea koukistetaan aluksi muutaman asteen verran, jonka jälkeen polvea ojennetaan maksimaalisesti. Tällöin tukijalan voimantuotossa saadaan hyödynnettyä optimaalisesti lihaksen venymis-lyhenemissykliä. Samalla heittäjän massakeskipiste nousee noin 56–63 millisekunnin kohdalla tukijalan kontaktin alusta. (Mero ym. 1994) Venymis-lyhenemissyklin hyödyntäminen on tehokkaampaa korkeamman tason heittäjillä harjoitustaustasta sekä paremmista voimantuotto-ominaisuuksista johtuen (Bartlett ym. 1996a), ja kansainvälisen tason heittäjät pystyvätkin pitämään tukijalan polvikulman suurempana verrattuna kansallisen tason heittäjiin (Murakami ym. 2017).

Tukijalka tulisi iskeä maahan mahdollisimman nopeasti edeltävän askeleen jälkeen (Morris ym. 1997; Pavlovic ym. 2020; Whiting ym. 1991), sillä viimeiseen askeleeseen kuluneen ajan on havaittu olevan käänteisesti yhteydessä vetovaiheen aikaiseen keihään nopeuteen (Murakami ym. 2017) sekä keihään lähtönopeuteen (Korjus 1988). Tukijalkaa vasten törmäämällä heittäjä mahdollistaa ylävartalolle tukevamman asennon, josta heittäjä lopulta pystyy siirtämään alavartalollaan tuottamansa voiman ja nopeuden ylävartalon kautta lopulta keihääseen (Morris ym. 1997; Morriss & Bartlett 1996).

Takajalan kontaktin aikana kansainvälisen tason heittäjillä asennon on havaittu pysyvän vielä suljettuna. Lantiolinjan on havaittu olevan tällöin 146 asteen kulmassa heittosuuntaan kohden, kun taas hartialinjan asennon on havaittu olevan noin 181 asteen kulmassa heittosuuntaan kohden. Heittäjä ei siis ole aloittanut kääntämään itseään heittosuuntaan vielä tässä vaiheessa. Tukijalan kontaktin aikana lantiolinja on kääntynyt jo 151 asteeseen heittosuuntaan kohden. Hartialinjassa on havaittu olevan enemmän vaihtelua urheilijoiden välillä yksilöllisestä käden vetoliikkeen ajoittamisesta johtuen. (Morris ym. 1997) Parhaimmissa heitoissa heittäjän lantio pysyy myös korkeammalla verrattuna saman heittäjän lyhyempiin heittoihin (Yo ym. 2020).

2.3.2 Heittokäsi

Heittäjän tulee pyrkiä pitämään heittokätensä, erityisesti kyynärpänsä, mahdollisimman ojennettuna ennen tukijalan kontaktia pidemmän vetopituuden mahdollistamiseksi (Morris ym. 1997). Heittokäden kyynärpäähän hallinta näyttäisikin olevan yksi erottava tekijä eri tasoisten

heittäjien välillä, sillä korkeamman tason heittäjillä kyynärpäähän ojennuskulma pysyy suurempana ja vetopituus pidempänä tukijalan kontaktin aikana (Bartlett ym. 1996a; Campos ym. 2002). Suurempana pysyvän kyynärpäähän on havaittu korreloivan suuremman keihään lähtönopeuden sekä heiton pituuden kanssa (Yo ym. 2020). Optimaalinen kyynärpäähän ojennuskulma olisi 180° , mutta tyypillisesti tukijalan kontaktin aikana käden vetoliike on jo aloitettu, ja ojennuskulma on huipputasoon heittäjilläkin enää noin $130\text{--}150^\circ$ (Morris ym. 1997). Osalla heittäjistä kyynärpää on jopa hieman korostetun koukistunut ennen tukijalan kontaktia, mutta nämä heittäjät kuitenkin ojentavat välittömästi kyynärpäätänsä takaisin suoremaksi askelkontaktin aikana. Tällöin heittäjä saa hyödynnettyä heittokädessä lihasten venymis-lyhenemissyklin voimantuottoa, kun konsentrista heittokäden vetovaihetta edeltää eksentrisen lihastyö. (Thotawaththa & Chandana 2021)

Vetovaihe on kiihtyvää liikettä ja sen aikana proksimaaliset kehon osat saavuttavat lineaarisen huippunopeutensa ennen distaalisempia osia (Bartlett ym. 1996a; Liu ym. 2010; Liu ym. 2014; Menzel 1986; Morris ym. 1997; Morriss & Bartlett 1996; Whiting ym. 1991). Ylävartalon osalta distaaliset osat saavuttavat lopulta suurimpia nopeuksia (Bartlett ym. 1996a; Mero ym. 1994). Heittoliikkeessä on kuitenkin tärkeää osata myös jarruttaa eri kehon segmenttien liikettä oikea-aikaisesti (Menzel 1986). Jarruttaminen tehdään niin sanotusti alhaalta ylös, kun tukijalan liike aloittaa heittäjän pysäyttämisen, jatkuen vartalon pysäyttämiseen ja lopulta heittokäden liikkeen pysäyttämiseen (Pavlovic ym. 2020). Olkapään ja ranteen jarrutusajankohdan ajoittumisen kauas tukijalan kontaktin ajanhetkestä on havaittu olevan yhteydessä suurempaan keihään lähtönopeuteen (Korjus 1988).

Miesheittäjillä olkapään, kyynärpäähän, ranteen ja käden nopeuksien on havaittu olevan suurempia kuin naisheittäjillä, mutta liike on samalla tavalla distaalisesti kiihtyvää molemmilla sukupuolilla (Mero ym. 1994). Lisäksi kansainvälisen tason heittäjät pystyvät tuottamaan suurempia nivelten nopeuksia verrattuna seuratasoon heittäjiin (Bartlett ym. 1996a). Erityisesti heittokäden kyynärpäähän huippunopeuden on havaittu olevan yhteydessä suuriin keihään lähtönopeuksiin (Menzel 1986; Whiting ym. 1991), mutta Korjuksen (1988) mukaan kyynärpäähän ohella ranteen sekä sormien nopeuksilla oli yhteys suurempaan keihään lähtönopeuteen. Lisäksi suuremman kyynärpäähän kulman on havaittu olevan yhteydessä suurempaan ranteen saavuttamaan nopeuteen, kun taas ranteen nopeuden on havaittu olevan yhteydessä heittopituuteen (Yo ym. 2020). Kansainvälisen tason heittäjiltä kyynärpäähän nopeudeksi on mitattu keskimäärin 14,83 m/s, kun

taas espanjalaisilta kansallisen tason heittäjiltä nopeudeksi mitattiin samassa tutkimuksessa 12,71 m/s (Campos ym. 2002).

Ylävartalon voimantuotossa pyritään hyödyntämään olkapään, olkavarren sekä käsivarren lihasten venymis-lyhenemissykliä, kun ylävartaloa ja lantiota pyritään kiertämään heittosuuntaan tukijalan kontaktin aikana (Mero ym. 1994). Paremmat heittäjät saavuttavat suurempia heittokäden nopeuksia sekä keihään lähtönopeuksia johtamalla ylävartalon kiertoliikkeen tehokkaammin heittokäteen (Murakami ym. 2017). Erityisesti liike-energian johtaminen olkapäähän vaikuttaisi olevan yhteydessä suurempaan keihään lähtönopeuteen (Köhler & Witt 2023). Ylävartalon sekä heittokäden segmenttien liikkeet ja ajoitukset eroavat hieman sukupuolten välillä, mutta samaa sukupuolta verrattaessa eri tasoisten heittäjien välillä ei havaittu eroja (Liu ym. 2014). Yksittäisten ylävartalon lihasten tai lihasryhmien voimantuoton osuudesta ja sen yhteydestä keihään lähtönopeuteen ei sen sijaan tiedetä (Morriss & Bartlett 1996), mutta Korjuksen (1988) mukaan heittokäden hartialihaksesta sekä kolmipäisestä olkalihaksesta mitatun EMG-aktiivisuuden havaittiin olevan yhteydessä keihään lähtönopeuteen.

2.4 Lentovaihe

Keihään lentovaihe alkaa, kun keihäs irtoaa kokonaan heittäjän otteesta (Menzel 1986). Irrotuksen jälkeen ilmalennon aikana keihäaseen vaikuttavat vain aerodynaamiset voimat sekä gravitaatiovoima, joten heittäjä ei voi enää irrotuksen jälkeen vaikuttaa heiton pituuteen tai keihään lentorataan (Morriss & Bartlett 1996). Aerodynaamiset voimat ovat riippuvaisia keihään nopeudesta sekä sen asennosta ilmalennon aikana (Best & Bartlett 2009). Voimista ilmanvastus vaikuttaa horisontaalisesti keihään lentosuunnan vastaisesti, kun taas nostovoima vaikuttaa vertikaalisesti (Menzel 1986).

Muita keihään aerodynamiikkaan ja siten välillisesti heittopituuteen vaikuttavia tekijöitä ovat keihään värähtely, vallitsevan tuulen nopeus ja suunta, ilman tiheys sekä keihään eri ominaispiirteet kuten sen massa, hitausmomentti sekä muoto. Keihään värähtely lisää ilmanvastusta ja vähentää nostovoimaa lentovaiheen aikana, ja sen määrä on riippuvainen keihään jäykkyydestä, massasta sekä rungon muodosta. (Bartlett 2009) Keihään vakauden merkitys heiton onnistumisen kannalta korostuu erityisesti pitkissä heitoissa (Chowdhury ym. 2013). Sen sijaan keihään pyörimisellä oman pitkittäisakselinsa ympäri on vain minimaalinen vaikutus lentorataan

(Bartlett 2009; Hatton 2005). Eri keihäsmalleissa onkin eroja eri ominaisuuksien välillä, joten heittäjän on siksi kyettävä valitsemaan itselleen soveltuvin väline (Bartlett 2009).

Tuulen nopeus on heittosuorituksen kannalta merkittävä olosuhdetekijä, vaikka yleensä sitä ei kirjallisuudessa mitata tai huomioida. Tuuliolosuhde ei myöskään pysy vakiona heittosuorituksen aikana, ja lisäksi keihäs altistuu lentonsa aikana turbulenttiselle virtaukselle. (Bartlett 2009) Myötätuuleen heittäminen soveltuu paremmin nykyisille keihäsmalleille (Bartlett & Best 1988; Best & Bartlett 2009). Myötätuulella keihään nopeus suhteessa tuulen nopeuteen hidastuu, jolloin myös ryntökulma pienenee. Tällöin heittäjän on kannattavampaa pyrkiä heittämään korkeammalle suurella ryntö- ja lähtökulmalla. Vastaavasti vastatuuli kasvattaa ryntökulmaa, kun keihään nopeus kasvaa suhteessa tuulen nopeuteen. Vastatuuleen heitettäessä onkin kannattavampaa heittää hieman matalampia heittoja pienellä ryntökulmalla, sillä vastatuuli kasvattaa heiton aikana ryntökulmaa aiheuttaen nosteen keihäälle. (Bartlett & Best 1988) Myös tulonopeuden vähentäminen ja välineen hallintaan keskittyminen saattavat olla tällöin tärkeämpiä kuin myötätuuleen heitettäessä (Bartlett 2009). Sivutuuli painaa keihästä sivuttaissuunnassa synnyttäen Magnus-efektin (Bartlett & Best 1988), jolloin pitkittäisakselinsa ympäri pyörivä keihäs alkaa kaartua kierteen suuntaan (Best ym. 1993). Heittäjän on tällöin varmistettava, ettei keihäs pääse ilmalennon aikana painumaan ohi heittosektorista.

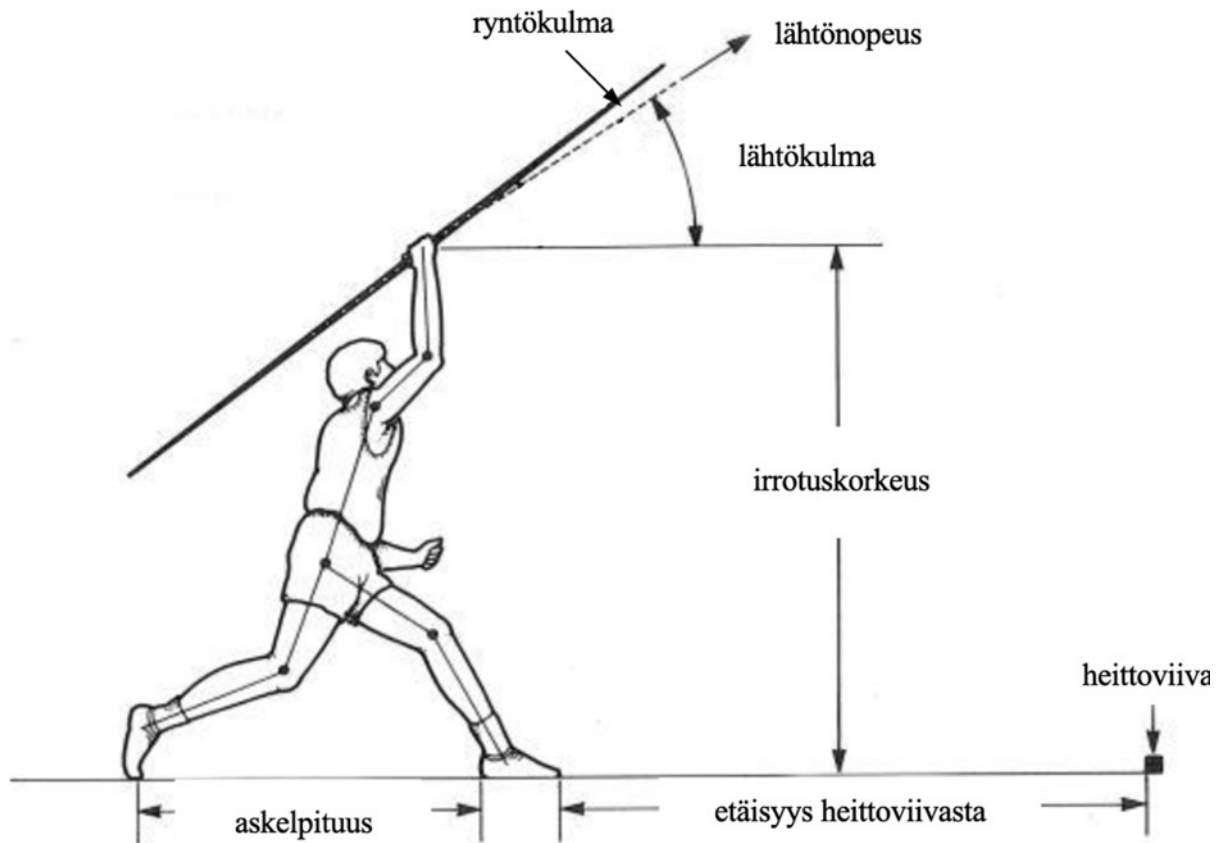
Heiton pituuden maksimoimiseksi heittäjän on kannattavaa yrittää heittää mahdollisimman läheltä heittoviivaa. Samalla heittäjän tulee kuitenkin varmistaa, että hän saa pysäytettyä itsensä ennen heittoviivaa välttääkseen heiton yliastumisen. Eteenpäin suuntautuvan liikkeen pysäyttämässä tukijalan jarruttavalla työllä onkin suuri merkitys. (Morris & Bartlett 1996) Heittäjän tulee jarruttaa juoksuvauhtiansa mahdollisimman nopeasti, jotta irrotuspaikan sekä heittoviivan välinen etäisyys jäisi mahdollisimman lyhyeksi. Edistyneemmät heittäjät tarvitsevat irrotuksen jälkeen vain yhden jarruttavan askeleen heiton perään pysäyttääkseen itsensä kokonaan ja pysyäkseen heittoviivan takana, kun taas alemman tason urheilijat tarvitsevat pääsääntöisesti useamman askeleen. (Menzel 1986) Komin ja Meron (1985) tutkimuksessa miesheittäjät heittivät keskimäärin $3,29 \pm 0,70$ metriä ja naiset $2,33 \pm 0,50$ metriä heittoviivan takaa. Siihen, kuinka kaukaa heittoviivan takaa heittäjän täytyy heittää, vaikuttavat heittäjän tulonopeus, tukijalan jarruttavan työn hyödyntäminen, alustan pinnoite sekä heittäjän yksilöllinen heittotekniikka (Gregor & Pink 1985).

3 HEITTOPARAMETRIT

Miesten keihäsmalli uusittiin vuonna 1986 siirtämällä keihään painopistettä neljä senttimetriä eteenpäin (Best ym. 1995; World Athletics 2021). Painopisteen muutos heikensi tarkoituksella keihään liito-ominaisuuksia (Borgström 2000), jonka vuoksi keihäs kaartaa alas nopeammin ja jyrkemmässä kulmassa (Best ym. 1995). Muutos aiheutti heittojen lyhenemisen tehden lajista turvallisemman stadionolosuhteisiin (Best ym. 1995; World Athletics 2021). Samalla keihäs laskeutuu useammin pystyyn, mikä helpottaa heittojen tarkempaa mittaamista lappeelleen laskeutuviin keihäisiin verrattuna (Borgström 2000). Muutoksilla pyrittiin samalla varmistamaan, etteivät olosuhteet tai toimitsijoiden mittausvirheet vaikuttaisi yhtä merkittävästi kilpailutuloksiin (Best ym. 1995). Naisten keihäsmalli uusittiin vastaavasti myöhemmin vuonna 1999 (World Athletics 2021). Naisten keihäsmalli on aerodynaamisilta ominaisuuksiltaan jopa epäedullisempi, sillä keihäällä on havaittu olevan suurempi ilmanvastuksen ja massan suhde, joka hidastaa keihään lentonopeutta enemmän miesten malliin verrattuna (Best & Bartlett 2009).

Keihäänheitossa irrotushetken tapahtumat määrittävät keihään lentoradan siinä määrin, kun heittäjä pystyy siihen itse vaikuttamaan (Hubbard & Alaways 1987). Keihään lentovaiheen aikana ainoastaan olosuhteet vaikuttavat heittosuoritukseen ja heiton pituuteen. Kuten muissakin heittolajeissa, lähtönopeus on heiton pituuteen eniten vaikuttava tekijä. (Morris & Bartlett 1996) Siksi heittosuorituksessa tavoitellaan lähtönopeuden maksimointia sekä muiden heittoon vaikuttavien tekijöiden optimointia (Ogiolda 1993), joten heittäjän tulee pyrkiä varmistamaan irrotushetkellä parhaat edellytykset heiton pituuden maksimoimiseksi (Best ym. 1995).

Irrotushetkellä heitosta voidaan määrittää heittoparametrit, joita voidaan käyttää heiton pituuden ohella suorituskykymittareina heittoja ja heittäjiä analysoitaessa. Kyseisiä parametrejä voidaan hyödyntää myös vertailukohtina, joiden pohjalta heittotekniikkaa voidaan mukauttaa haluttuun suuntaan (Best ym. 1995), sillä jokaisella heittäjällä voidaan ajatella olevan yksilölliset optimaaliset heittoparametrinsa, jotka maksimoivat heittopituuden (Best & Bartlett 2009). Heittoparametrit, pois lukien sivuttaisryntökulma, on esitetty kuvassa 2.



KUVA 2. Heittoparametrit (mukailtu Thotawaththa & Chandana 2021).

Heittoparametrejä voidaan hyödyntää myös heiton pituuden arvioinnissa. Lehmannin (2014) mukaan heiton pituus voidaan teoreettisesti määrittää kaavalla

$$D = \frac{v_0^2}{g} \cos \alpha_v \left[\sin \alpha_v + \sqrt{\sin^2 \alpha_v + \frac{2h_0 g}{v_0^2}} \right] \pm \Delta L,$$

jossa D on heiton pituus, v_0 lähtönopeus, α_v lähtökulma v_0 suunnassa, h_0 irrotuskorkeus, g putoamiskiihtyvyys ja ΔL aerodynaamisten voimien, ilmanvastuksen ja keihään ominaisuuksien aiheuttamat heittopituuteen vaikuttavat tekijät.

3.1 Lähtönopeus

Keihään lähtö- eli irrotusnopeus saadaan laskettua määrittämällä nopeusvektori keihään massakeskipisteelle (kuva 2) irrotushetkellä. Tarkimmin keihään nopeus saadaan määritettyä, kun nopeusvektoria verrataan suhteessa tuulen nopeuteen. Vallitseva tuuliolosuhde on käytännössä

kuitenkin hankala määrittää, joten lähtönopeus suhteutetaan tyypillisesti maanpintaan. (Best ym. 1993) Keihään lähtönopeuden voidaan ajatella olevan heittäjän massakeskipisteen nopeuden sekä keihääseen heittohetkellä tuotetun nopeuden summa (Best ym. 1993; Best & Bartlett 2009).

Keihäs on muihin heittovälineisiin verrattuna aerodynaaminen, jolloin lähtönopeuden merkitys korostuu suorituskykymittarina (Bartlett & Best 1988; Morriss & Bartlett 1996). Lähtönopeuden onkin havaittu olevan kiistattomasti selittävin tekijä heiton pituuden kannalta sekä miehettä naisheittäjillä (Bartlett ym. 1996a; Campos ym. 2002; Komi & Mero 1985; Korjus 1988; Krzyszkowski & Kipp 2021; Menzel 1986; Mero ym. 1994; Morris ym. 1997; Murakami ym. 2006; Murakami ym. 2017; Murakami ym. 2018; Saratlija ym. 2013; Tauchi ym. 2009; Thotawaththa & Chandana 2021; Vassilios & Iraklis 2013; Viitasalo ym. 2003; Whiting ym. 1991). Tästä johtuen heittäjän on kannattavaa pyrkiä maksimoimaan lähtönopeus suoritukseensa saavuttaakseen parhaimman mahdollisen kilpailutuloksen (Hubbard & Alaways 1987; Ogiolda 1993). Pelkkä lähtönopeuden vaihtelu voi vähentää heiton mittaa useilla metreillä, vaikka muissa heittoparametreissa ei havaittaisikaan eroja (Lehmann 2010). Lähtönopeuden kasvaessa yhdellä metrillä sekunnissa pitenee heitto laskennallisesti miesheittäjillä 5,64 metriä ja naisheittäjillä 4,72 metriä (Best & Bartlett 2009).

Huippumiesheittäjillä keihään lähtönopeuden havaitaan olevan keskimäärin 27–31 m/s (Whiting ym. 1991). Huipputasoin naisheittäjillä lähtönopeuden on havaittu olevan keskimäärin 21–23 m/s (Komi & Mero 1985; Mero ym. 1994; Viitasalo ym. 2003), mutta myös nopeuksia välillä 25–27 m/s on mitattu lajin parhailta (Lehmann 2010; Pavlovic ym. 2020). Komi ja Mero (1985) kuitenkin ehdottivat, että naisheittäjillä lähtönopeudet jäivät sen verran alhaisemmiksi miesheittäjiin verrattuna, että pelkän suuren lähtönopeuden lisäksi heittotekniikka sekä suotuisat tuuliolosuhteet voivat selittää heittojen pituutta erityisesti pisimpien heittojen osalta.

Komin ja Meron (1985) tutkimuksessa olympialaisissa kilpailleiden miesheittäjien osalta havaittiin vahva korrelaatio heiton pituuden sekä lähtönopeuden välillä. Vahva yhteys heiton pituuden sekä lähtönopeuden välillä on havaittu myös nuorten EM-tason heittäjillä (Saratlija ym. 2013). Miesheittäjiltä on mitattu suurempia lähtönopeuksia naisheittäjiin verrattuna, mikä pitkälti selittää eroa heittojen pituuksissa sukupuolten välillä (Morris ym. 1997). Sama ilmiö pätee myös, kun verrataan kansainvälisen tason heittäjiä seuratasoin heittäjiin sekä aloittelijoihin

(Bartlett ym. 1996a; Thotawaththa & Chandana 2021). Eri tasoilla heittäjillä erot lähtönopeuksissa havaitaan myös silloin, kun tarkastellaan erillisesti sekä vertikaalista että horisontaalista lähtönopeuden komponenttia (Campos ym. 2002). Vertikaalisen lähtönopeuden merkitys heittosuorituskyvyille korostuu erityisesti huippu-urheilijoita vertailtaessa, sillä Tauchin ym. (2009) mukaan vuoden 2007 MM-kilpailuissa paremmin sijoittuneiden urheilijoiden heitoissa vertikaalisen lähtönopeuden havaittiin olevan suurempi heikommin sijoittuneisiin urheilijoihin verrattuna.

Vetovaiheen kiihtyvä liike on merkityksellinen lähtönopeuden kannalta, sillä Morrissin ja Bartlettin (1996) mukaan jopa 70 % keihään lähtönopeudesta tuotetaan vetovaiheen viimeisen 100 millisekunnin aikana. On kuitenkin havaittu, että heittäjän vauhdinjuoksun aikainen nopeus on yhteydessä heiton lähtönopeuteen (Murakami ym. 2017), joten suurilla lähtönopeuksilla saavuttaakseen heittäjän on kyettävä synnyttämään riittävä alkunopeus keihäälle jo vauhdinjuoksun aikana sekä pystyttävä vielä kiihdyttämään heittovälineen liikettä vetovaiheen aikana. Suuria keihään lähtönopeuksia saavuttaakseen on heittäjän pystyttävä tuottamaan voimaa eri lihasryhmillä. (Morriss & Bartlett 1996)

Koska heittosuoritus on koko kehoa vaativa sekä useita lihasryhmiä ja niveliä hyödyntävä monimutkainen liikeketju, keihään lähtönopeus ja siten myös heittosuorituskyky on riippuvainen monen eri lihaksen ja lihasryhmän voimantuotosta. Lihasvoiman tuoton ohella heittäjän on pystyttävä hallitsemaan myös suoritustekniikkaa, sillä kineettistä energiaa tuotetaan segmentteittäin kehon distaalista osasta aloittaen. (Morriss & Bartlett 1996) Lisäksi vaikuttaisi siltä, että heittäjien välillä on hyvin paljon yksilöllisiä eroja siinä, miten he tuottavat suurilla keihään lähtönopeuksia (Morris ym. 1997), joten täysin aukottomasti ei voida määrittää, mikä yksittäinen tekijä heittosuorituksessa tai -tekniikassa selittäisi suurta lähtönopeutta (Mero ym. 1994).

3.2 Lähtökulma

Lähtö- eli irrotuskulmalla (kuva 2) tarkoitetaan keihään nopeusvektorin sekä horisontaalisen linjan välistä kulmaa irrotushetkellä. Kulma on positiivinen, sillä keihästä pyritään heittämään aina ylöspäin vaakatasosta. (Bartlett ym. 1996a) Miesheittäjillä keskimääräinen lähtökulma vaikuttaisi vaihtelevan eri tutkimusten ja heittäjien välillä jonkin verran noin 32° kulmasta (Best ym. 1993, Mero ym. 1994; Viitasalo ym. 2003) jopa 36–38° kulmiin (Morriss ym. 1997;

Whiting ym. 1991). Naisheittäjiltä lähtökulmiksi on mitattu eri tutkimuksissa 31° (Viitasalo ym. 2003), 34° (Mero ym. 1994) sekä 36° (Best ym. 1993).

Laskennallisesti keihään lähtönopeuden ollessa 23 m/s optimaalinen lähtökulma on $29,5^\circ$. Lähtönopeuden saavuttaessa 31 m/s optimaalinen lähtökulmakin kasvaa $31,0^\circ$ kulmaan. Tämän nopeuden jälkeen optimaalinen lähtökulma taas pienenee, ja lähtönopeudella 35 m/s optimaalinen lähtökulma on $30,7^\circ$. (Hubbard & Alaways 1987) Tuuliolosuhteet vaikuttavat kuitenkin merkittävästi siihen, millaiseen lähtökulmaan vallitsevassa olosuhteessa heittäjän kannattaa yrittää heittää (Bartlett & Best 1988).

Suurten lähtönopeuksien takia huipputasoinen miesheittäjillä pieni vaihtelu lähtökulmassa ei kuitenkaan vaikuta merkittävästi heiton pituuteen (Hubbard & Alaways 1987). Lehmann (2010) kuitenkin havaitsi, että MM-kilpailuissa paremmin sijoittuneita urheilijoita ei erotellut niinkään suurempi lähtönopeus, vaan suurempi lähtökulma. Heittäjillä, joilla lähtönopeudet jäivät alhaisemmiksi, optimikulmaan pyrkiminen heittosuorituksessa on heiton pituuden optimoimiseksi kannattavampaa (Hubbard & Alaways 1987). Lähtökulman on havaittu korreloivan negatiivisesti lähtönopeuden kanssa (Korjus 1988; Saratlija ym. 2013; Viitasalo ym. 2003), mutta lähtökulmalla ei ole tutkimuksissa ollut yhteyttä heiton pituuteen (Lehmann 2010; Murakami ym. 2017). Pisimmissä heitoissa heittäjien on kuitenkin havaittu saavuttaneen suurempia lähtökulmia kuin heittäjän muissa heitoissa keskimäärin (Lehmann 2010).

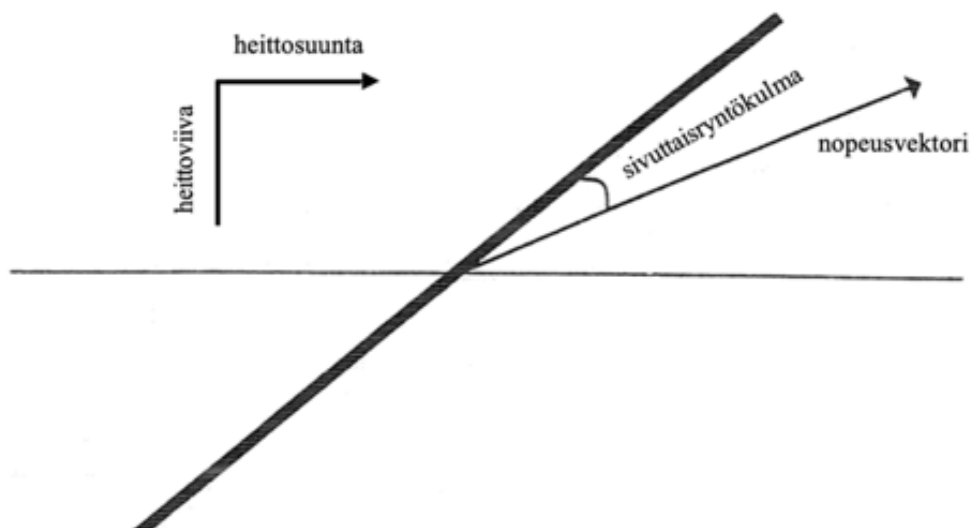
3.3 Ryntökulma

Ryntökulmalla (kuva 2) tarkoitetaan keihään nopeusvektorin sekä keihään pitkittäissuuntaisen akselin välistä kulmaa keihästä sivusuunnasta katsottuna (Best ym. 1993). Kulma on 0° , kun keihäs sekä nopeusvektori ovat samansuuntaiset, positiivinen, kun keihästä kierretään vastapäivään eli kun keihään kärkeä nostetaan, sekä negatiivinen, kun keihästä kierretään myötäpäivään eli kun kärkeä lasketaan (Bartlett ym. 1996a). Ryntökulma saattaa auttaa nostovoiman synnyttämisessä lentovaiheen aikana (Best ym. 1993), mutta uudet keihäsmallit on suunniteltu estämään liiallisen nosteen syntymistä ja keihään liiallista liitämistä (Borgström 2000; Hubbard & Alaways 1987). Pääasiassa liian suuri ryntökulma aiheuttaa ilmalennon aikana keihäessä ilmanvastuksen kasvamisen, mikä hidastaa keihään lentonopeutta (Bartlett ym. 1996a). Nollakulmasta poikkeava ryntökulma aiheuttaa lisäksi keihäaseen Magnus-efektin (Best ym. 1993).

Heiton maksimaalisen pituuden mahdollistamiseksi heittäjän on kannattavaa pyrkiä heittämään mahdollisimman pienellä ryntökulmalla (Menzel 1986), sillä suuremman ryntökulman on havaittu korreloivan negatiivisesti heiton pituuden kanssa (Murakami ym. 2017). Pisimmissä heitoissa mitataankin tyypillisesti pienimpiä ryntökulmia, sillä pienellä ryntökulmalla keihään lentonopeutta hidastava ilmanvastus on vähäisempää (Murakami ym. 2018). Ryntökulman ei kuitenkaan ole havaittu olevan yhteydessä keihään lähtönopeuteen (Korjus 1988). Lähtönopeuksilla 23–35 m/s optimaalinen ryntökulma kasvaa lineaarisesti 0° kulmasta $-2,5^\circ$ kulmaan. Tätä alhaisemmilla nopeuksilla yhteys ei ole enää lineaarinen ja alle 23 m/s olevilla lähtönopeuksilla optimaalinen ryntökulma on jopa -10° . (Hubbard & Alaways 1987) Ryntökulma ei tulisi poiketa lähtökulmasta enempää kuin 8° (Menzel 1986).

3.4 Sivuttaisryntökulma

Sivuttaisryntökulmalla (kuva 3) tarkoitetaan keihään nopeusvektorin sekä keihään pitkittäis-suuntaisen akselin välistä kulmaa keihästä horisontaalitasolla eli päältä päin katsottaessa (Best ym. 1993). Kulma on 0° , kun keihäs etenee yhtenäisesti nopeusvektorin suunnassa, positiivinen keihään kiertyessä vastapäivään ja negatiivinen keihään kiertyessä myötäpäivään (Bartlett ym. 1996a). Kuvassa 3 esitetty sivuttaisryntökulma on positiivinen.



KUVA 3. Sivuttaisryntökulma (mukailtu Bartlett ym. 1996a).

Sivuttaisryntökulma ei aiheuta keihäaseen nostovoimaa, mutta nollakulmasta poikkeava kulma kasvattaa ilmanvastusta. Suurempi ilmanvastus taas vähentää keihään lentonopeutta painaen sitä nopeammin alas. (Best ym. 1993) Myös nollasta poikkeava sivuttaisryntökulma saa aikaan Magnus-efektin ja keihään lentoradan kaartumisen (Bartlett ym. 1996a; Best ym. 1993). Sivuttaisryntökulman on havaittu olevan suurempi aloittelevilla heittäjillä, sillä heittovälineen hallinta on kehittyneempää korkeamman tason urheilijoilla (Bartlett ym. 1996a).

3.5 Irrotuskorkeus

Irrotuskorkeus (kuva 2) on keihään massakeskipisteen kohtisuora etäisyys maasta irrotushetkellä (Best ym. 1993). Heittäjä tyypillisesti nojaa ylävartalollaan lateraalisesti pois päin heittokädestä (Rich ym. 1984), joten irrotuskorkeus on riippuvainen sekä heittäjän kehon pituudesta, ylävartalon kallistuksen määrästä sekä polvikulman suuruudesta irrotushetkellä (Campos ym. 2004). Irrotuskorkeutta ei voi optimoida, sillä suurempi irrotuskorkeus on heiton pituuden kannalta aina parempi (Campos ym. 2004; Hubbard & Alaways 1987). Jos irrotuskorkeutta yritetään kuitenkin kasvattaa liikaa, on sillä lopulta negatiivisia vaikutuksia muihin heittoparametreihin sekä heiton pituuteen (Best & Bartlett 2009). Irrotuskorkeus korreloi heittäjän pituuden kanssa, jolloin pidemmät heittäjät pystyvät tekemään keihään irrotuksen korkeammalta. Irrotuskorkeus jää naisheittäjillä tyypillisesti alhaisemmaksi johtuen sukupuolten välisestä pituuserosta. (Rich ym. 1984)

Irrotuskorkeuden ei ole havaittu olevan suoraan yhteydessä heiton pituuteen (Murakami ym. 2006; Murakami ym. 2017; Tauchi ym. 2009; Yo ym. 2020). Thotawaththan ja Chandanan (2021) sekä Camposin ym. (2002) mukaan on kuitenkin havaittu, että kansainvälisen tason heittäjillä irrotuskorkeus on suurempi kuin kansallisen tason heittäjillä. Campos ym. (2002) perustelivat tätä sillä, että edistyneemmillä heittäjillä parempi heittotekniikka mahdollistaa asennon säilyttämisen korkeampana johtuen tehokkaammasta alavartalon hyödyntämisestä.

4 REAKTIOVOIMAT HEITTOSUORITUKSESSA

Reaktiivoiman F_y -komponentti kuvastaa voimaa anteroposteriorisessa eli horisontaalisessa suunnassa, mikä tarkoittaa voimantuottoa heittosuunnassa. Tukijalan kontaktin hetkellä se saa negatiivisia arvoja, sillä tukijalka jarruttaa kehon liikettä heittosuuntaan. F_x -komponentti kuvastaa voimaa mediolateraalisisessa eli poikittaissuunnassa heittosuuntaan nähden. Tässä suunnassa voimantuotto jää suhteessa vähäiseksi, sillä heiton aikana voimaa pyritään tuottamaan pääasiassa heittosuunnassa, mutta vartalon rotaatio saa aikaan voimantuottoa myös tällä akselilla. Vertikaalista voiman suuntaa kuvastaa F_z -komponentti ja sen osuus määräytyy kehonpainon kannatteluun vaadittavan voiman mukaan. Tukijalan kontaktin aikana heittäjään kohdistuva voima ylittää moninkertaisesti heittäjän kehonpainon. Kun kaikki kolme voiman komponenttia ja niiden suunnat summataan, saadaan resultanttivoima, joka osoittaa kokonaisvoimantuoton määrän sekä suunnan. (MacWilliams ym. 1998)

4.1 Reaktiivoimat keihäänheitossa

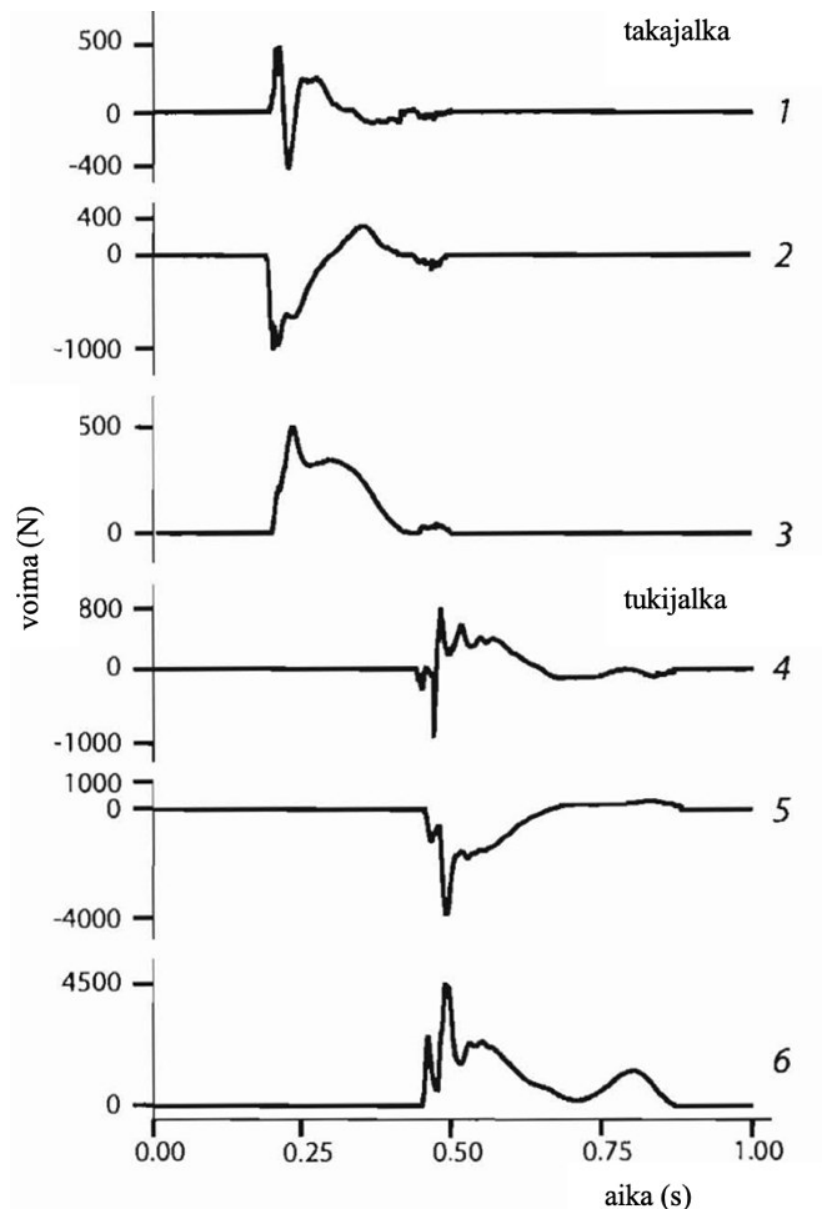
Heittosuorituksen aikana erityisesti tukijalkaan kohdistuvat suuret reaktiivoimat. Hurrionin ym. (2002) tutkimuksessa mieskeihäänheitäjät tuottivat kehonpainoon (KP) suhteutettuna 3,7–7,3 -kertaisen vertikaalisen huippuvoiman sekä 4,8–9,3 -kertaisen kokonaisvoiman tukijalan kontaktin aikana. Tukijalan reaktiivoimat ja eri komponentit on eritelty tarkemmin taulukkoon 1. (Hurrion ym. 2002)

TAULUKKO 1. Keskimääräiset tukijalan reaktiivoimat keihäänheittosuorituksessa (mukailtu Hurrion ym. 2002).

Voima	KP	N
Vertikaalinen törmäysvoima	2,53 ± 1,01	2246 ± 1081
Vertikaalinen huippuvoima	5,63 ± 1,31	4852 ± 1122
Jarrutusvoima	4,50 ± 0,96	3864 ± 734
Työntövoima	0,26 ± 0,09	229 ± 85
Mediaalinen voima	0,77 ± 0,36	677 ± 339
Lateraalinen voima	0,59 ± 0,18	515 ± 176
Kokonaisvoima	7,05 ± 1,57	6053 ± 1210

KP kehonpainoon suhteutettu arvo, N newton

Tukijalan kantapääiskun tuottama keskimääräinen törmäysvoimasta laskettu vertikaalinen voimantuotonopeus oli 192 ± 64 KP/s takajalan voimantuotonopeuden ollessa 115 ± 35 KP/s. Takajalkaan kohdistuva vertikaalinen huippuvoima sen sijaan jäi keskimäärin vain noin $2,31 \pm 0,41$ -kertaiseksi kehonpainosta absoluuttisen maksimivoiman ollessa 2002 ± 422 N. Takajalan maksimivoima oli tutkimuksessa 2032 ± 442 N eli $2,36 \pm 0,50$ -kertainen kehonpainoon suhteutettuna. (Hurrion ym. 2002) Kuvaan 4 on eritelty yhden heittäjän tuki- sekä takajalan voima-aikakäyrät kolmessa eri voimantuottosuunnassa.



KUVA 4. Reaktiivoimat keihäänheittosuorituksessa. Takajalan mediolateraalinen (1), horisontaalinen (2) ja vertikaalinen (3) sekä tukijalan mediolateraalinen (4), horisontaalinen (5) ja vertikaalinen (6) reaktiivoiman komponentti. (Mukaiilu Hurrion ym. 2002)

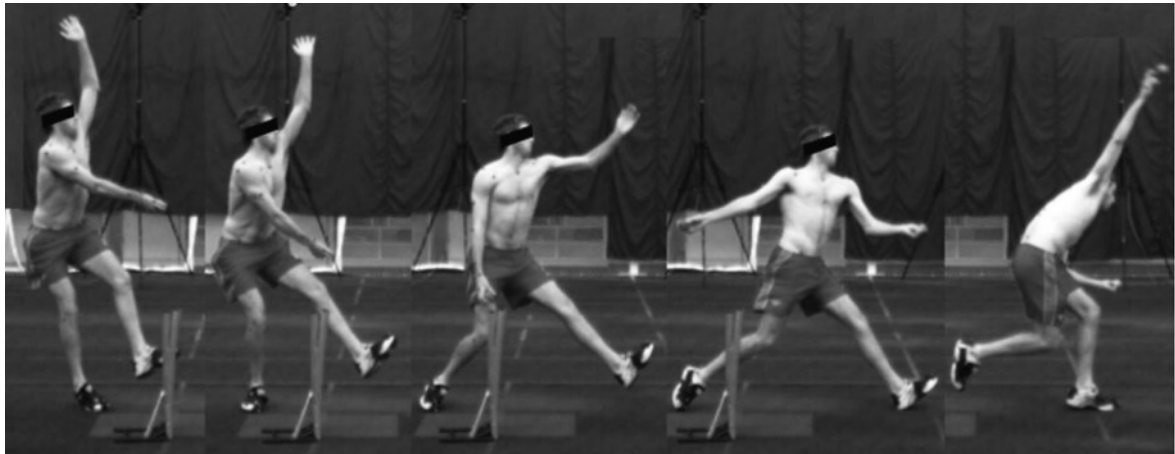
Bartlett ym. (1995) vertasivat aloittelijoiden sekä seuratason heittäjien jalkojen tuottamia voimia sekä painetta kenkään asetettavien pohjallisten avulla. Seuratason heittäjät tuottivat tukijalan kontaktin aikana suurempia voimia aloittelijoihin ($275 \pm 60,1$ %KP ja $195 \pm 50,7$ %KP) verrattuna. Sama ilmiö havaittiin myös takajalan osalta aloittelijoiden voiman ollessa keskimäärin $163 \pm 16,1$ %KP ja seuratason heittäjien tuottaman voiman ollessa $262 \pm 48,2$ %KP. Myös jalkapohjaan kohdistuva paine oli suurempi seuratason heittäjillä (397 ± 62 kPa ja 242 ± 38 kPa). Maksimaalinen jalkapohjaan kohdistuva paine tuotettiin kontaktin aikana aikaisemmin, ja painekeskipiste sijaitsi edempänä jalkapohjassa seuratason heittäjillä. Sen sijaan tukijalan kontaktiajoissa ei ollut eroja eri tasoisten heittäjien välillä. (Bartlett ym. 1995)

Korjuksen (1988) tutkimuksessa tukijalan vertikaalinen huippuvoima sekä maksimaalinen resultanttivoima olivat yhteydessä keihään lähtönopeuteen. Tukijalalla tuotettiin tutkimuksessa $5,86$ kN suuruinen maksimaalinen pystyvoima maksimaalisen resultanttivoiman ollessa $7,28$ kN. Tukijalan polven ojentumisen aiheuttama työntövoima sekä tukijalan vertikaalisen voiman nettoimpulssi olivat yhteydessä keihään lähtönopeuteen, mikä Korjuksen (1988) mukaan auttaa siirtämään suuremman voiman heittoalustasta keihään kiihdyttämiseen. Tämän perusteella Korjus (1988) ehdottikin, että törmäysvoima tulisi suunnata enemmän vertikaalisesti kuin horisontaalisesti. Kehonpainoon suhteutetulla vertikaalisella maksimivoimalla ei ollut vertikaalisen maksimivoiman absoluuttiseen arvoon verrattuna yhtä suurta yhteyttä keihään lähtönopeuteen. Suurempi heittäjän massa ja sen aiheuttama suurempi huippuvoiman absoluuttinen arvo vaikuttaisi kuvaavan pelkän suuren törmäysvoiman tärkeyttä, sillä absoluuttinen huippuvoima oli keihään lähtönopeuden kannalta merkittävämpi muuttuja. (Korjus 1988)

4.2 Reaktiovoimat, kinematiikka ja heittosuorituskyky muissa yliolanheitoissa

Keihäänheiton osalta reaktiovoimien sekä heittosuorituskyvyn välistä yhteyttä on tutkittu vielä hyvin vähän. Lisäksi rajallisen tutkimuskirjallisuuden takia erilaisten kinemaattisten muuttujien yhteydestä reaktiovoimiin ei juurikaan vielä tiedetä. Sen sijaan muissa yliolan heittolajeissa reaktiovoimien yhteyttä heittosuorituskykyyn on tutkittu jonkin verran. Krikin syöttötekniikka (kuva 5) on hyvin samankaltainen kuin keihäänheitossa, sillä heittäminen tapahtuu lähes samanlaisesta jalkojen sekä vartalon asennosta sekä samankaltaisesta juoksuvauhdista, vaikka syöttö tehdään kyynänpää suoristettuna. Myös baseballin syöttötekniikassa (kuva 6) heittokäden

liike sekä tukijalan toiminta ovat hyvin samankaltaisia keihäänheittoon verrattuna, mutta syöttöä ei edellä vauhdinjuoksuvaihe. Syöttämisessä hyödynnetään kuitenkin samankaltaista kiineettistä ketjua (Howenstein ym. 2020), jossa reaktiivoimat johdetaan alustasta kehon läpi segmenteittäin lopulta heittokäteen.



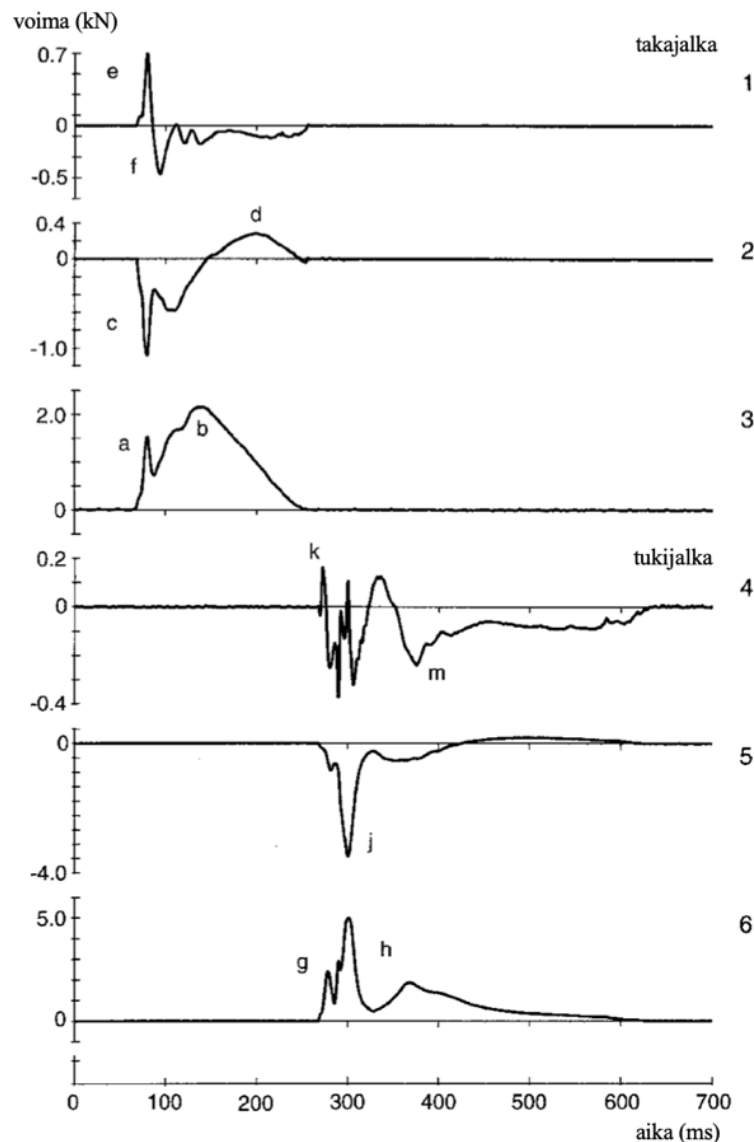
KUVA 5. Kriketin syöttö (Ranson ym. 2008).



KUVA 6. Baseballin syöttö (mukailtu Sakurai ym. 2023).

Myös kriketissä syöttönopeus on heittosuorituskyvyn kannalta merkittävin tekijä (Bartlett ym. 1996b). Syöttäjiltä on mitattu samankaltaisia vauhdinjuoksun nopeuksia kuin keihäänheittäjiltä (Bartlett ym. 1996b) ja syöttäjien nopeuden on havaittu olevan syöttöhetkellä $5,67 \pm 0,27$ m/s (Hurrion ym. 2000). Kriketissä vauhdinjuoksun nopeuden on havaittu olevan yhteydessä syöttönopeuteen (Bartlett ym. 1996b; Glazier ym. 2000; Kiely ym. 2021; Worthingtonin ym. 2013a). Syöttönopeutta saadaan pidettyä yllä jopa kahdeksan (Portus ym. 2000) tai jopa kahdentoista (Burnett ym. 1995) syöttövuoron ajan. Koska tuki- sekä takajalan askeleet ovat tekniikaltaan lähes yhteneviä keihäänheittoon verrattuna, havaitaan kriketissä samankaltaisia reaktiivoimia kuin keihäänheitossakin. Vertikaalinen huippuvoima on syöttöhetkellä noin 3,8–6,4 -kertainen syöttäjän kehonpainoon verrattuna horisontaalisen huippuvoiman ollessa

noin kaksinkertainen. (Bartlett ym. 1996b) Kuvassa 7 on esitetty reaktiovoimat yhdestä kriketin syöttösuorituksesta.



KUVA 7. Reaktiovoimat kriketin syötössä. Takajalan mediolateraalinen (1), horisontaalinen (2) ja vertikaalinen (3) sekä tukijalan mediolateraalinen (4), horisontaalinen (5) ja vertikaalinen (6) reaktiovoiman komponentti. (Mukailtu Hurrion ym. 2000)

Kriketissä (kuva 7) takajalan kontaktin alussa reaktiovoimissa havaitaan takajalan vertikaalinen törmäyspiikki (a) sekä siihen liittyvä jarrutusvoima (e) päkiäkontaktin aikana ennen koko jalkapohjan laskeutumista alustaan (f). Takajalan vertikaalista huippuvoimaa (b) seuraa välittömästi takajalan maksimaalinen horisontaalinen työntövoima (d). Tukijalan kontaktissa kantapää törmää alustaan ensimmäisenä (k) aiheuttaen vertikaalisen törmäysvoiman huipun (g). Tä-

män jälkeen seuraa vertikaalinen huippuvoima (h) samanaikaisesti horisontaalisen jarrutusvoiman kanssa (j). Tukijalan työntövoima vähenee sitä mukaan, kun syöttäjä nousee syötön loppuvaiheessa tukijalan varpaille (m). (Hurrion ym. 2000)

Hurrionin ym. (2000) tutkimuksessa kriketin syöttäjien takajalan vertikaalinen huippuvoima oli keskimäärin 1,95 kN, joka kehonpainoon suhteutettuna tarkoitti 2,37 -kertaista voimaa horisontaalisen huippuvoiman ollessa 0,77 kN tai 0,94 -kertainen. Vastaavasti tukijalan vertikaalinen voima saavutti 4,80 kN:n ja 5,75 -kertaisen arvon ja horisontaalinen huippuvoima 2,93 kN:n ja 3,54 -kertaisen arvon. Vertikaalinen huippuvoima saavutettiin keskimäärin takajalan osalta 53 ± 6 ja tukijalan osalta 26 ± 2 millisekunnin jälkeen kontaktin alusta. Tukijalan voimantuotonopeus oli keskimäärin $205 \pm 52,8$ kN/s takajalan voimantuotonopeuden jäädessä selvästi matalammaksi sen ollessa $41,7 \pm 7,10$ kN/s. (Hurrion ym. 2000) Baseballissa tukijalan keskimääräisen vertikaalisen komponentin on havaittu olevan $2,02 \pm 0,43$ -kertainen ja jarruttavan komponentin $2,45 \pm 0,20$ -kertainen kehonpainon verrattuna (Guido & Werner 2012).

4.2.1 Takajalan kontakti

Baseballissa kummallakin jalalla on omat tehtävänsä heittoliikkeessä. Takajalka vastaa liikenopeuden johtamisesta lantion ja ylävartalon kautta heittosuuntaan, kun taas tukijalka ja sen jarruttava työ vastaa kehon kiertoliikkeen synnyttämisestä ja sen johtamisesta ylävartalon kautta heittokäteen. (Howenstein ym. 2020) Takajalan aktiivisella työntöliikkeellä saattaa olla merkitystä syöttötekniikan ja heitonopeuden kannalta kriketissä (MacWilliams ym. 1998) ja baseballissa (Kageyama ym. 2015). Paremmat syöttäjät pystyvät johtamaan tehokkaammin maksimaalisen takajalan työntövoiman syöttösuuntaan suuntautuvaksi nopeudeksi (Kageyama ym. 2015).

MacWilliams ym. (1998) havaitsivat kriketin syöttäjiä tutkiessaan, että takajalan maksimaalinen työntävä horisontaalivoima oli yhteydessä ranteen nopeuteen. Howensteinin ym. (2020) tutkimuksessa baseballin syöttäjillä takajalan horisontaalinen huippuvoima oli yhteydessä mekaanisen energian johtumiseen lantioon sekä ylävartaloon, mikä tutkijoiden mielestä oli tärkeä tekijä syöttöliikkeen kiihtymisen kannalta. Kielyn ym. (2021) tutkimuksessa lyhyempi takajalan kontaktiaika sekä lyhyempi viimeisen askeleen kesto oli yhteydessä suurempaan syöttöno-

peuteen kriketin syöttäjillä. Kuitenkaan Nicholson ym. (2022) eivät havainneet takajalan voimantuotolla olevan merkitystä baseballin syöttösuoritukseen. Myöskään McNally ym. (2015) eivät havainneet yhteyttä takajalan reaktiovoimien ja ranteen nopeuden välillä. MacWilliams ym. (1998) totesivat, että baseballin osalta syöttötekniikassa on suuriakin eroja yksittäisten syöttäjien välillä, sillä osalla syöttäjistä syöttönopeuden kasvaessa reaktiovoimat vähenevät, kun taas osalla syöttönopeuden hidastuminen kasvattaa reaktiovoimia.

4.2.2 Tukijalan kontakti

Kingin ym. (2016) mukaan kriketin syöttäjillä syöttönopeus ei ollut yhteydessä tukijalan vertikaaliseen tai horisontaaliseen huippuvoimaan. Syöttäjät pystyivät kuitenkin tuottamaan kehonpainoon suhteutettuna $6,72 \pm 1,42$ -kertaisen vertikaalisen sekä $4,47 \pm 0,75$ -kertaisen horisontaalisen huippuvoiman pallon lähtönopeuden ollessa $34,94 \pm 1,67$ m/s. Tutkijat havaitsivat, että kaikista vahvin korrelaatio oli syöttönopeuden sekä horisontaalisen impulssin välillä sen selittäessä jopa 33 % syöttönopeuden vaihtelusta. Suurempaan syöttönopeuteen olivat yhteydessä myös alhaisempi voimantuottonopeus sekä vertikaalista että horisontaalista reaktiovoiman komponenttia tarkasteltaessa. (King ym. 2016) Sen sijaan McGrathin ym. (2022) tutkimuksessa syöttönopeuden ja -intensiteetin lisääminen lisäsi myös tuotettuja huippuvoimia sekä voimantuottoa vertikaalisessa ja horisontaalisessa suunnassa. McNally ym. (2015) taas havaitsivat, että tukijalan vertikaalinen, mediaalinen sekä jarruttava voiman komponentti sekä resultanttivoima olivat yhteydessä ranteen saavuttamaan huippunopeuteen baseballin syöttäjiä tutkittaessa samalla kun vertikaalinen voimantuotto selitti jopa 61 % ranteen nopeuden vaihtelusta.

Kingin ym. (2016) mukaan syöttäjän ei ole tarpeellista tuottaa reaktiovoimia mahdollisimman nopeasti, sillä pitkä tukijalan kontaktaika mahdollistaa pidemmän ajan jarruttavalle voimantuotolle, joka mahdollistaa siten suuremman impulssin tuottamisen. Suurimpiin syöttönopeuksiin kyenneet pelaajat eivät siis tuottaneet suurimpia huippuvoimia, mutta heidän syöttötekniikkansa sekä suurempi juoksunopeutensa mahdollisti juoksunopeuden tehokkaamman jarruttamisen sekä saavutetun nopeuden välittymisen alaraajoista heittokäteen ja syöttöön (King ym. 2016). Myös Guido ja Werner (2012) havaitsivat, että baseballin pelaajat, joilla vertikaalisen huippuvoiman tuottaminen kesti pidempään ja joilla jarrutusvoima oli suurempi, saavuttivat

suurempia syöttönopeuksia. Sen sijaan Kiely ym. (2021) havaitsivat päinvastaista, sillä tutkimuksessa suurempaa syöttönopeutta ennusti lyhyempi syötön ja sen eri vaiheiden kesto kuten myös nopeammin tuotettu horisontaalinen sekä vertikaalinen huippuvoima.

Howenstein ym. (2020) tutkivat baseballin syöttäjillä horisontaalisen reaktiovoiman komponenttia havaiten, että horisontaalinen impulssi ennusti paremmin mekaanisen energian johtumista kehossa verrattuna saavutettuun huippuvoimaan sekä taka- että tukijalan osalta. Tukijalan horisontaalinen huippuvoima selitti eniten mekaanisen energian johtumista ylävartalosta heitotäteen, kun taas horisontaalinen impulssi selitti energian johtumista lantioon. Tutkijoiden mukaan tämä mahdollistaa syöttäjän massakeskipisteen nopeuden hidastamisen sekä tukevan tukijalan asennon, jota vasten syöttäjä voi kiertää vartaloaan. (Howenstein ym. 2020)

Juoksunopeuden on havaittu olevan kriketinpelaajilla yhteydessä myös suurempiin vertikaaliin sekä horisontaalisiin huippuvoimiin (Worthington ym. 2013b). Elliott ym. (1988) havaitsivat, että syöttäjien tuottama resultanttivoiman huippu oli yhtä suuri sekä hitailla, että nopeilla syöttäjillä. Sen sijaan huippuvoima ajoittui hieman eri ajankohtaan hitaiden syöttäjien tuottaessa huippuresultanttivoimansa aikaisemmin syöttökäden ojennushetkellä, kun taas nopeammat syöttäjät tuottivat huippuvoiman tukijalan kontaktin ajalle. Paremmat syöttäjät pystyivät näin ollen kiertämään tehokkaammin ylävartalonsa tukijalan yli, mikä havaittiin suurempina syöttönopeuksina. (Elliott ym. 1988)

Portusin ym. (2004) mukaan kriketin syöttäjillä tukijalan polvikulman suuruus oli yhteydessä suurempaan vertikaaliseen sekä jarruttavaan törmäysvoimaan syöttöhetkellä. Jarruttavan horisontaalisen huippuvoiman havaittiin olevan keskimäärin $4,5 \pm 1,0$ -kertainen ja vertikaalisen huippuvoiman $7,3 \pm 1,8$ -kertainen syöttäjän kehonpainoon verrattuna. Ne syöttäjät, joilla polvikulma oli syöttöhetkellä suurin, pystyivät tuottamaan huippuvoimia nopeammin. Suuremmat sekä nopeammin tuotetut törmäysvoimat olivat siten yhteydessä suurempaan syöttönopeuteen. (Portus ym. 2004) Sen sijaan Worthington ym. (2013b) havaitsivat päinvastaista: suurempi polven koukistus oli yhteydessä nopeammin saavutettuun huippuvoimaan. Worthington ym. (2013b) pyrkivät lisäksi selvittämään, onko Portusin ym. (2004) tutkimuksessa hyödynnetyllä polvikulmaa tarkastelevalla syöttötekniikalla vaikutusta reaktiovoimiin. Syöttötekniikalla ei kuitenkaan havaittu olevan yhteyttä tuotettuihin tukijalan huippuvoimiin eikä huippuvoimien ajoittumiseen tukijalan kontaktin aikana (Worthington ym. 2013b). Myös Burden ja Bartlett

(1990) sekä Wormgoor ym. (2010) havaitsivat, että syöttäjän polvikulman pysyminen suurempana oli yhteydessä suurempaan syöttönopeuteen. Portusin ym. (2000) tutkimuksessa vastaavaa yhteyttä ei kuitenkaan havaittu.

Syöttötekniikalla, erityisesti tukijalan käytöllä, on kuitenkin merkitystä syöttönopeuteen (Portus ym. 2004; Wormgoor ym. 2010; Worthington ym. 2013a). Wormgoorin ym. (2010) sekä Worthingtonin ym. (2013a) mukaan pelkkä vähäisempi polven koukistuminen tukijalan kontaktin aikana oli yhteydessä suurempaan syöttönopeuteen kriketin pelaajilla. Portusin ym. (2004) tutkimuksessa havaittiin lisäksi, että syöttäjät, jotka pystyivät ojentamaan polveaan enemmän koko tukijalan kontaktin aikana, saavuttivat suurempia syöttönopeuksia. Vastaavasti niillä syöttäjillä, joilla tukijalan polvi koukistui syöttöhetkellä, jarrutusvoimat jäivät matalammiksi ja voimia tuotettiin hitaammin. Juoksunopeutta ei kyetty tällöin välittämään yhtä tehokkaasti pallon lähtönopeudeksi. (Portus ym. 2004) Myös baseballissa on havaittu sama ilmiö, sillä suurempia syöttönopeuksia saavuttaneet pelaajat pystyivät ojentamaan polveaan enemmän ja nopeammin, kun taas hitaammin syöttävillä pelaajilla polvi koukistui syötön aikana (Matsuo ym. 2001). Suorempi polvi pysäyttää lantion eteenpäin suuntautuvan liikkeen nopeammin ja tehokkaammin, jolloin ylävartalo voi kiertyä lantion yli (Matsuo ym. 2001; Worthington ym. 2013a). Syöttäjät pyrkivätkin tyypillisesti pitämään polvensa ojennettuna koko tukijalan kontaktin ajan, mutta reaktiovoimien vaikutusten kasvaessa suuriksi polvi pääsee koukistumaan (Worthington ym. 2013b). Juoksuvauhdin kasvattaminen lisää polven koukistumista, joten pelaajat joutuvat tasapainottelemaan nopeuden sekä syöttötekniikan välillä (Bartlett ym. 1996b).

Myös jalkaterän asennolla on havaittu olevan merkitystä heittosuorituskyvyn kannalta, sillä King ym. (2016) havaitsivat sekä horisontaalisen että vertikaalisen voimantuottonopeuden korreloivan jalkaterän kulman kanssa, jolloin kantapäätiskua korostava kriketin syöttötekniikka vähensi voimantuottonopeutta. Worthingtonin ym. (2013b) tutkimuksessa kriketinpelaajat saavuttivat kehonpainoon verrattuna keskimäärin $6,7 \pm 1,4$ -kertaisen vertikaalivoiman sekä $4,5 \pm 0,8$ -kertaisen jarruttavan voiman pallon syöttönopeuden ollessa $34,9 \pm 1,7$ m/s. Suurin selittävä tekijä vertikaaliselle voimantuotolle oli tutkijoiden mukaan syöttäjän jalkaterän kulma suhteessa horisontaalitasoon. Suurimpia vertikaalisia sekä horisontaalisia huippuvoimia tuottivat ne syöttäjät, joilla tukijalan kontaktin alussa tämä jalkaterän kulma oli pienin. Worthington ym. (2013b) selittivät havaintoa sillä, että jalkaterän kulman jäädessä pienemmäksi syöttäjä astuu tukijalkansa kontaktin tasaisemmin koko jalkapohjalla. Tällöin huippuvoima tuotetaan

nopeasti ja välittömästi kontaktin alussa. Suurella jalkateräkulmalla syöttäjät astuvat ensin kantapää edellä, jonka jälkeen koko jalkapohja lasketaan alustaan kokonaan. Voimantuotto jakautuu tällöin pidemmälle aikavälille ja huippuvoimat jäävät matalammiksi ja ne saavutetaan ajallisesti myöhemmin. (Worthington ym. 2013b) King ym. (2016) ehdottivat tutkimuksessaan noin 36 asteen kulmaa optimaaliseksi tukijalan kontaktille.

Jalkaterän kulman ohella Worthingtonin ym. (2013b) tutkimuksessa myös pienempi tukijalan ja vertikaalitason välinen kulma oli yhteydessä suurempaan vertikaaliseen huippuvoimaan. Baseballissa pidempi askelpituus lisäsi pelaajan tuottamaa jarruttavaa sekä vertikaalista voimaa, vaikka vertikaalisen huippuvoiman ei havaittu eroavan askelpituuksien välillä. Pidemmällä askeleella vertikaalinen huippuvoima tuotettiin myöhemmin, kun taas lyhyemmällä askelpituudella saman huippuvoiman tuottamiseen oli vähemmän aikaa. (Ramsey & Crotin 2019) Krikitin syöttäjillä pelaajan taitotasoon nähden liian nopea vauhdinjuoksu vaikuttaisi lyhentävän syöttäjän viimeistä askelta, jolloin nopeutta ei saada välitettyä palloon optimaalisesti (Elliott ym. 1986). Baseballissa syöttönopeuden ei havaittu kuitenkaan muuttuvan riippumatta siitä, syötettiinkö pidennetyllä tai lyhennetyllä askelpituudella (Ramsey & Crotin 2019), mutta lajissa syöttöä ei tehdä juoksuvauhdista.

Worthington ym. (2013b) havaitsivat kriketissä resultanttivoiman olevan tukijalan kontaktin alussa lähes tukijalan suuntainen, jolloin suuremmalla tukijalan kulmalla resultanttivoiman vertikaalinen komponentti jäi pienemmäksi samoin kuin vertikaalinen huippuvoima. Myös Kingin ym. (2016) mukaan tukijalan käytöllä on merkitystä voimantuoton ja syöttönopeuden kannalta. Suuremman horisontaalisen impulssin havaittiin olevan yhteydessä suurempaan tukijalan sekä vertikaalitason väliseen kulmaan. Tällöin syöttäjä pystyy tuottamaan suuremman horisontaalisen impulssin, vaikka huippuvoimat eivät välttämättä kasvaisikaan suuriksi. (King ym. 2016) Worthington ym. (2013b) ehdottivat, että pienemmällä tukijalan kulmalla tukijalka sekä vartalo olisivat suorassa linjassa keskenään synnyttäen suuremman reaktivoiman. Pidempi askelpituus vaikuttaisi mahdollistavan juoksuvauhdin aikana saavutetun nopeuden tehokkaan muuntamisen pallon lähtönopeudeksi (King ym. 2016). Krikitin pelaajilla syöttönopeutta kasvatti myös, jos syöttäjän nilkka oli takajalan kontaktin aikana korkeammalla alustaan nähden. Tällöin heittäjän painopiste oli korkeammalla sekä taaempana aiheuttaen ylävartalon kallistumisen taaksepäin, jolloin asento mahdollistaa vauhdinjuoksun tehokkaamman johtamisen syöttöön. (Wormgoor ym. 2010)

5 TUTKIMUSKYSYMYKSET JA HYPOTEESEIT

Tämän pro gradu -tutkielman tarkoituksena oli selvittää reaktiivoimien yhteyttä heittosuorituskykyyn mies- ja naiskeihäänheittäjillä. Lisäksi tutkielman tavoitteena oli tarkastella tukijalan kinematiikan yhteyttä heittosuorituskykyyn ja reaktiivoimiin sekä tulonopeuden yhteyttä heittosuorituskykyyn sekä reaktiivoimiin. Heittosuorituskykyä ja siihen vaikuttavia tekijöitä pyrittiin tarkastelemaan erikseen kummankin sukupuolen osalta.

Tutkimuskysymys 1: Onko keihäänheittosuorituksesta mitatuilla reaktiivoimilla yhteyttä heittosuorituskykyyn?

Hypoteesi: Kyllä. Keihäänheittäjillä tukijalan vertikaalisen huippuvoiman, maksimaalisen resultanttivoiman, tukijalan polven ojentumisen aiheuttaman työntövoiman sekä tukijalan vertikaalisen voiman nettoimpulssin on havaittu olevan yhteydessä keihään lähtönopeuteen (Korjus 1988). Edistyneemmät keihäänheittäjät pystyvät tuottamaan suurempia reaktiivoimia alustaan tukijalan kontaktin aikana (Bartlett ym. 1995). Kriketin syöttäjillä tukijalan suuremman horisontaalisen impulssin, pienemmän horisontaalisen ja vertikaalisen voimantuottonopeuden sekä suuremman ja nopeammin tuotetun jarrutusvoiman on havaittu olleen yhteydessä suurempaan pallon syöttönopeuteen (King ym. 2016; Portus ym. 2004) kun taas horisontaalinen tai vertikaalinen tukijalan huippuvoima ei vaikuttaisi selittävän parempaa heittosuorituskykyä (King ym. 2016).

Tutkimuskysymys 2: Onko tukijalan kinemaattisilla muuttujilla yhteyttä heittosuorituskykyyn?

Hypoteesi: Kyllä. Tukijalan jarruttavan työn suuruus on riippuvainen tukijalan polvikulman suuruudesta, sillä suurempi polvi pysäyttää eteenpäin suuntautuvan liikkeen nopeammin ja tehokkaammin (Matsuo ym. 2001; Morris ym. 1997; Portus ym. 2004; Worthington ym. 2013a). Sekä mies- että naiskeihäänheittäjillä suuremman irrotushetken aikaisen tukijalan polvikulman on havaittu korreloivan paremman heittosuorituskyvyn kanssa (Campos ym. 2002; Krzyszkowski & Kipp 2021; Murakami ym. 2017). Lisäksi pidemmällä tukijalan askeleella juoksuvauhti sekä tuotetut reaktiivoimat saadaan yliolanheitoissa välitettyä tehokkaammin heittovälineeseen (King ym. 2016; Krzyszkowski & Kipp 2021; Murakami ym. 2017), kun taas liian lyhyellä askeleella jarrutustyö jää liian vähäiseksi (Menzel 1986). Paremmilla heittäjillä

alavartalon hyödyntäminen on lisäksi tehokkaampaa, mikä mahdollistaa korkeamman heittotasennon säilyttämisen (Campos ym. 2002; Yo ym. 2020)

Tutkimuskysymys 3: Onko heittäjän tulonopeudella yhteyttä heittosuorituskykyyn?

Hypoteesi: Kyllä. Paremmat heittäjät pystyvät välittämään suuremman juoksuvauhdin nopeuden keihäaseen tehokkaammin (Bartlett ym. 1996a). Suuremman ristiaskelhypyn aikaisen sekä tukijalan kontaktin hetkeltä mitatun heittäjän nopeuden on havaittu olevan yhteydessä suurempaan keihään lähtönopeuteen (Korjus 1988; Murakami ym. 2017; Tauchi ym. 2009) sekä pidempään heittopituuteen (Krzyszowski & Kipp 2021; Murakami ym. 2006). Vauhdinjuoksun nopeuden on myös havaittu olevan yhteydessä pallon lähtönopeuteen kriketissä (King ym. 2016).

6 TUTKIMUSMENETELMÄT

Tutkielman aineisto on osa Suomalaisten keihäänheittäjien fyysinen toimintakyky ja suorituskyky sekä niiden yhteys heittosuoritukseen -tutkimusta. Tutkimusmittaukset toteutettiin Huippu-urheilun instituutin (KIHU) sekä Jyväskylän yliopiston liikuntatieteellisen tiedekunnan yhteistyönä Jyväskylässä helmi-maaliskuussa 2023.

6.1 Tutkittavat

Tutkimukseen kutsuttiin kaikki kautena 2022–2023 Suomen Urheiluliiton yleisen ja nuorten sarjan maajoukkuevalmennusryhmiin kuuluvat keihäänheittäjät sekä lisäksi muita Jyväskylän ja Kuortaneen valmennuskeskuksissa harjoittelevia kansallisen ja kansainvälisen tason keihäänheittäjiä. Tutkimukseen kutsuttiin 24 mies- ja 21 naisheittäjää. Tutkittaviksi sisällytettiin vain ne heittäjät, joilla terveydentila tai vamma ei rajoittanut heittämistä ja jotka pystyivät tutkimushetkellä heittämään maksimaalisesti. Tutkimukseen osallistui lopulta 11 mies- ja 13 naiskeihäänheittäjää. Miesheittäjistä neljä kuului yleisen sarjan ja kolme nuorten maajoukkueeryhmään ja naisheittäjistä neljä yleisen sarjan sekä kolme nuorten maajoukkueeryhmään. Kaikki heittäjät olivat oikeakätisiä. Tutkittavien perustiedot on koottu taulukkoon 2.

TAULUKKO 2. Tutkittavat.

	Miehet (n = 11)	Naiset (n = 13)
Ikä*	24 ± 3	25 ± 6
Pituus (cm)	184 ± 8	171 ± 5
Paino (kg)	96 ± 12	80 ± 11
Ennätys* (m)	76.76 ± 5.43 ¹	55.79 ± 5.85 ²

*World Athletics (2024), ¹ 800 g keihäs, ² 600 g keihäs.

Ennen tutkimukseen osallistumista ja suostumuslomakkeen allekirjoittamista tutkittavia tiedotettiin tutkimuksen kulusta sekä siihen liittyvistä mahdollisista riskeistä. Tutkimus noudatti Helsingin julistuksen periaatteita ja sillä oli Jyväskylän yliopiston ihmistieteiden eettisen toimikunnan lausunto (1635/13.00.04.00/2022).

6.2 Keihäänheittotestit

Keihäänheittotestit suoritettiin Jyväskylän Hipposhallissa. Suorituspaikkana toimi yleisurheilukäyttöön tarkoitettu sisäurheiluhalli, joten heittopaikka ja sen pinnoite ei eronnut merkittävästi harjoitus- tai kilpailuolosuhteista. Testien aloitus ajoittui kello 11.30–12.30 väliselle ajalle. Heittäjät käyttivät omia heittopiikkareitaan ja haluamaansa vaatetusta. Niveltekien sekä tukisiteiden ja -teippausten sekä erilaisten otteen pitoa parantavien aineiden käyttö oli sallittua. Ennen heittotestejä tutkittavat suorittivat omatoimisen kilpailurutiiniaan mukailevan verryttelyn, joka kesti heittäjästä riippuen tyypillisesti noin tunnin. Verryttelyn yhteydessä oli sallittua verryttellä myös heittäen keihäillä ja heittopalloilla. Verryttelyn jälkeen tutkittavat saivat suorittaa varsinaisella suorituspaikalla verryttelyheittoja sekä kohdistaa askelmerkkiänsä 15 minuutin ajan haluamallaan tavalla ja haluamansa määrän.

Verryttelyä lukuun ottamatta omien keihäiden käyttö ei ollut sallittu, vaan kaikki tutkittavat heittivät samoilla tutkimuskäyttöön varatuilla keihäillä. Keihäät tupetettiin päistä pressuun heittämistä varten, mikä toi välineisiin hieman lisäpainoa sekä vaikutusta välineen tasapainotukseen verrattuna kilpailusäännöissä hyväksytyyn välineeseen. Miesten keihäs painoi 843 grammaa ja naisten 653 grammaa. Liikkeenalyysin tarkkuuden parantamiseksi keihäs oli maalattu kauttaaltaan mustaksi ja keihään narukerän eteen, peräosaan sekä kärjen tyveen oli kiinnitetty heijastinteippiä digitoimimarkkereiksi. Heittopaikalle merkittiin valkoisella teipillä heittoviiva sekä sektorin kulmamerkintä vastaamaan heittopaikan ratamerkintöjä.

Lämmittelyn jälkeen tutkittavia ohjeistettiin suorittamaan kuusi maksimaalista kilpailusuoritusta mukailevaa keihäänheittosuoritusta heittopressuun. Tutkittavat saivat heittää itselleen ominaisella vauhdilla ja tekniikalla. Tutkittavien ei tarvinnut pysäyttää vauhtiaan heittoviivan taakse eli he saivat halutessaan ottaa pysäytysaskelia irrotuksen jälkeen. Heittojen välissä oli palautusta neljästä viiteen minuuttiin. Neljän minuutin kohdalla tutkittavalle annettiin käsky alkaa valmistautua heittoonsa, jonka jälkeen tutkittavalla oli minuutti aikaa tehdä heittosuoritus. Miesheittäjistä kaksi heitti viisi ja yksi seitsemän heittoa, ja naisheittäjistä yksi heitti kahdesti kaikkien muiden heittäessä kaikki kuusi suoritusta.

6.3 Reaktivoimat

Heitoista mitattiin reaktivoimia viidellä peräkkäin asennetulla ja alustaan upotetulla voimalevyllä sekä NetForce-ohjelmistolla (versio 2.50.00, Advanced Mechanical Technology, Inc., Watertown, Yhdysvallat). Neljä ensimmäistä levyä (BP6001200-4K, Advanced Mechanical Technology, Inc., Watertown MA, Yhdysvallat) olivat kooltaan $600 \times 1200 \times 102$ mm ja viimeinen levy (BP900900-4K, Advanced Mechanical Technology, Inc., Watertown, Yhdysvallat) $900 \times 900 \times 102$ mm. Kaikki voimalevyt oli päällystetty samalla pinnoitemateriaalilla kuin vauhdinottorata. Mittauksissa keräystaajuus oli 1000 Hz. Voimalevyissä x-akseli osoitti mediolateraalista, y-akseli horisontaalista ja z-akseli vertikaalista suuntaa.

Voimalevyjen mittauksen käynnistämiseen käytettiin heittoradalle ennen voimalevyjä sijoitettuja valokennoja, joiden signaalin heittäjä katkaisi hetkellisesti ollessaan valokennojen välissä. Kennojen signaalin katkeamista seuraava signaalin uudelleen jatkuminen syytti voimalevyihin yhdistetyn LED-valon ja käynnisti samalla voimalevymittauksen. LED-valo näkyi heitoista kuvatuissa videoissa ja valon syttymishetkeä käytettiin synkronoimaan voimalevymittaus etukameraan. Mittaus alkoi ennen kuin heittäjä osui ensimmäiselle voimalevyille, joten kunkin levyn mittausdatan ensimmäistä 0,5 sekunnin ajanjaksoa käytettiin määrittämään voiman nollassa kullekin voimalevyille erikseen kaikissa mitaussuunnissa.

Tutkittavia ohjeistettiin mukailemaan askelmerkkinsä niin, että tukijalka osuisi heiton aikana mahdollisimman keskelle jotakin viidestä käytetystä voimalevystä. Tutkittaville annettiin sanallinen palaute tukijalan osumapaikasta lämmittelyn aikana sekä jokaisen heiton jälkeen askelmerkin mukauttamiseksi. Tällä pyrittiin minimoimaan liiallinen heittämistä häiritsevä askelten kohdistaminen heiton aikana. Takajalan osumista voimalevyille suorituksen aikana ei veloitettu. Jalkojen paikkojen havainnoimisen helpottamiseksi voimalevyt oli rajattu valkoisilla teipeillä ja jälkikäteen kontaktin osumapaikan tarkastelussa hyödynnettiin neljästä eri kuvakulmasta kuvattuja videoita.

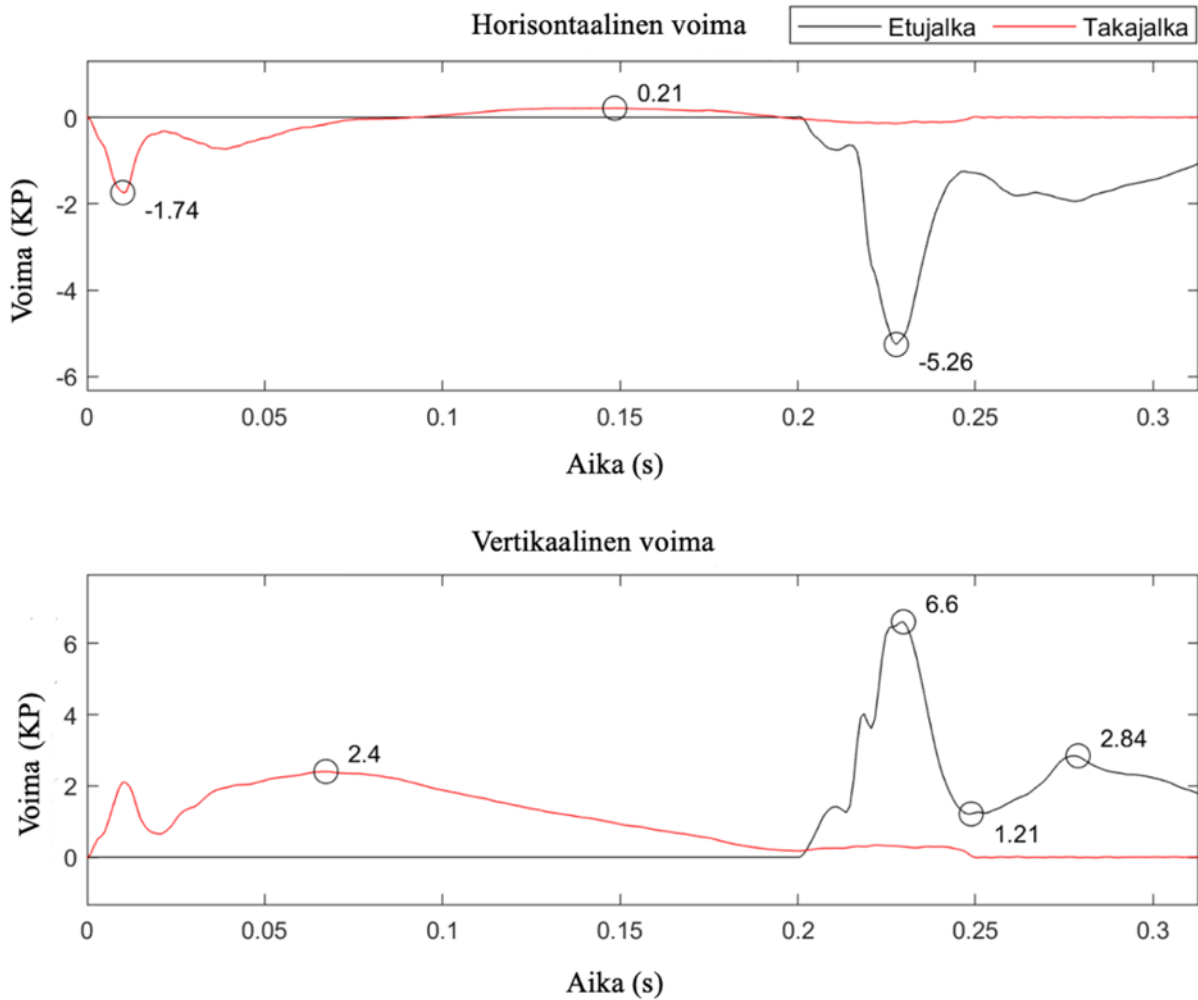
Tukijalan reaktivoimat kyettiin määrittämään suorituksista, joissa heittäjän askel oli osunut kokonaan yhden tai vaihtoehtoisesti kahden peräkkäisen voimalevyn päälle. Jos tukijalan kontakti jakautui kahdelle voimalevyille, laskettiin voimista summa näiden kahden voimalevyn mitausarvoista. Suorituksista hylättiin ne heitot, joissa tukijalka osui edes osittain voimalevyjen

ulkopuolelle pitkittäis- tai sivuttaissuunnassa, joissa molempien jalkojen havaittiin olevan heittohetykellä samalla voimalevyllä ja joissa takajalka raahautui ennen irrotushetkeä samalle voimalevyille tukijalan kanssa.

Lopullisesti analysoitavaksi valittiin jokaiselta heittäjältä yksi heitto, josta oli pystytty määrittämään tukijalan reaktivoimat edellä olevan kuvauksen mukaisesti. Jos heittäjältä löytyi useampi heitto, jossa voimalevymittaus oli tukijalan osalta onnistunut, valittiin näistä heitoista analysoitavaksi se suoritus, jossa heiton teoreettinen pituus oli pisin. Mikäli mahdollista, valituista heitoista pyrittiin analysoimaan myös takajalan kontakti. Takajalan osalta reaktivoimamuuttujien määrittäminen oli mahdollista, mikäli se osui kontaktivaiheessa kokonaan voimalevyn tai -levyjen sisälle sekä kokonaan eri voimalevyille tai -levyille kuin tukijalka. Jos näin ei tapahtunut, takajalan reaktivoimamuuttujia ei analysoitu kyseisestä heitosta. Takajalan reaktivoimat kyettiin lopulta määrittämään yhteensä yhdeksältä miesheittäjältä ja kahdeksalta naisheittäjältä.

Voimasignaalien analysoimiseen käytettiin MATLAB R2020b -ohjelmistoa (The MathWorks Inc., Natick, Yhdysvallat). Signaalit suodatettiin ennen analysointia neljännen asteen Butterworthin alipäästösuodattimella ja rajataajuudella 200 Hz. Kun tuki- ja takajalan osuipaikat voimalevyillä oli paikannettu, etsittiin vertikaalisesta reaktivoimasignaalista kynnys, jossa voima ylitti 200 N. Tätä kynnystä edeltävästä voimasignaalista etsittiin vielä se kohta, jolloin vertikaalisen voiman havaittiin olevan ensimmäisen kerran neljä kertaa suurempi kuin nollassa signaalin keskihajonta erottamaan pystyvoimantuoton alkaminen ja kontaktihetki signaalin normaalista vaihtelusta. (McGrath ym. 2022) Irrotushetki määritettiin heitosta kuvatuista videoista.

Tukijalan kontaktin ajalta määritettiin huippuvoima, impulssi ja voimantuotonopeus vertikaalisessa sekä horisontaalisessa suunnassa. Huippuvoimien osalta määritettiin lisäksi kyseisen voiman tuottamiseen kulunut aika tukijalan kontaktin alusta. Vertikaalisuunnassa huippuvoima ilmaisi suurinta positiivista voiman arvoa ja horisontaalisuunnassa pienintä negatiivista arvoa. Voimantuotonopeus laskettiin jakamalla tuotettu huippuvoima sen tuottamiseen kuluneella ajalla. Impulssi laskettiin voimasignaalin pinta-alana tukijalan kontaktin ja irrotuksen välillä. (McGrath ym. 2022) Takajalan osalta määritettiin vertikaalinen huippuvoima sekä erikseen työntävä eli positiivinen sekä jarruttava eli negatiivinen horisontaalinen huippuvoima. Kuvassa 8 on esitetty yksi esimerkki tuki- ja takajalan voima-aikakäyrästä.



KUVA 8. Kehonpainoon suhteutettu horisontaalinen ja vertikaalinen voima-aikakäyrä.

Analyysivaiheessa reaktivoimat suhteutettiin heittäjän kehon massa. Heittäjän massa mitattiin heittotestien yhteydessä samoilla voimalevyillä, ja mittaushetkellä heittäjällä tuli olla yllään sama vaatetus ja piikkarit kuin heittotestien aikana. Mittaushetkellä heittäjää pyydettiin seisoamaan liikkumatta yhdellä voimalevyllä seitsemän sekunnin ajan. Koko pystyvoimasignaali laskettiin liukuva 0,5 sekunnin keskihajontasignaali, josta tunnistettiin tämän jälkeen se 0,5 sekunnin jakso, jossa keskihajonta oli kaikkein pienintä eli vartalon huojunta vähäisintä. Massa laskettiin lopulta tämän valitun ajanjakson 0,5 sekunnin keskiarvona, ja määrittäessä käytettiin neljännen asteen Butterworthin alipäästösuodatinta rajataajuudella 40 Hz.

6.4 Liikeanalyysi

Heitot kuvattiin kahdella suurnopeuskameralla (LUMIX DC-GH5S, Panasonic Corporation, Kadoma, Japani) (240 Hz, suljinaika 1/1000 s, resoluutio 1920×1080 pikseliä). Molemmat kamerat sijoitettiin heittoradan oikealle puolelle. Toinen kameroista sijoitettiin etuviistoon noin 18 metrin päähän heittoradasta kuvaamaan heittäjää lähes kohtisuoraan sivusta. Toinen kamera sijoitettiin vauhdinottoradan alkupäähän noin 18 metrin päähän heittoviivasta kuvaamaan viistosti takaapäin heittosuuntaan. Kuvattujen videoiden synkronoimiseksi kuvattavalle alueelle sijoitettiin viiden LED-valaisimen sarja (Huippu-urheilun instituutti KIHU, Jyväskylä, Suomi), jonka jokainen yksittäinen valo oli ajastettu syttymään kahden sekunnin intervallilla yhden millisekunnin välein toisistaan ja pysymään syttyneenä yhden sekunnin ajan.

Heitoista määritettiin heittoparametrit sekä kinemaattiset muuttujat 3D-liikeanalyysin avulla. (SIMI Motion versio 9.2.1, Simi Reality Systems GmbH, Unterschleissheim, Saksa) Ennen jokaista mittausta heittopaikalla suoritettiin kalibrointi liikeanalyysiohjelmiston 3D-koordinaatiston määrittämiseksi. Irrotuspaikan ympärille rakennettiin kehikko neljällä kalibroititolpalla (kuva 9), joiden ylä- sekä alapäässä oli heijastava pinta osoittamassa kalibroitavaa pistettä. Kalibroitipisteiden paikat määritettiin takymetrillä (Nikon DTM-5, Nikon Corporation, Tokio, Japani), jolloin pisteiden avulla saatiin määritettyä 3D-koordinaatisto. Direct Linear Transformation -algoritmin (Abdel-Aziz & Karara 2015) avulla kuvatuista videoista määritettiin molempien kameroiden kuvien x- ja y-koordinaatistot vastaamaan luotua koordinaatistoa.



KUVA 9. Kalibroitikehikko.

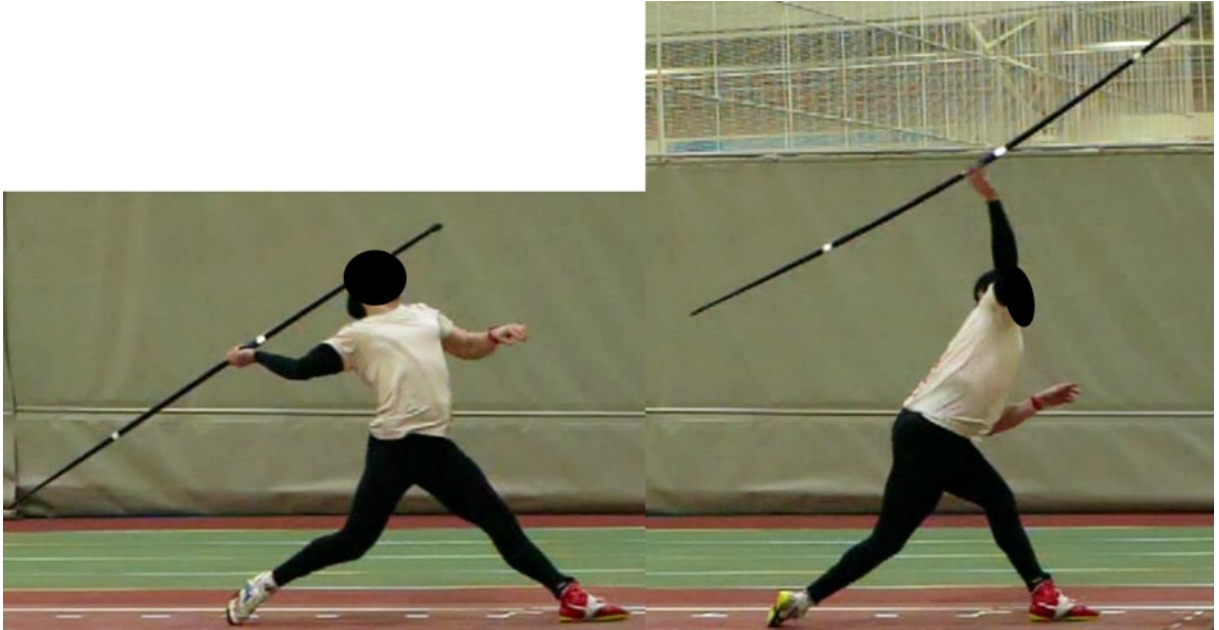
Heittäjästä digitointipisteiksi (kuva 10) määritettiin pää, vasen ja oikea olkanivel, vasen ja oikea kyynärnivel, vasen ja oikea ranne, vasen ja oikea käsi keskisormen tyven kohdalta, vasen ja oikea lonkkanivel, vasen ja oikea polvinivel, vasen ja oikea nilkka kehräsluiden korkeudelta sekä jalkaterän kärjet molemmista jaloista. Keihäässä digitointipisteinä toimivat keihään kärjen tyveen, peräosaan sekä narukerän etuosaan kiinnitetty heijastinmarkkerit. Liikeanalyysiohjel-
misto rekonstruoi näiden pisteiden pohjalta heittäjän koko vartalon sekä keihään. Ohjelmiston koordinaatistossa x-akseli osoitti horisontaalista eli heittosuunnan mukaista, y-akseli heitto-
suunnan poikittaista eli oikea-vasen suuntaista ja z-akseli vertikaalista akselia.



KUVA 10. Kehon digitointipisteet.

6.4.1 Heittoparametrit

Heittoparametrien analysointia varten irrotushetkeksi määritettiin videolta se hetki, jolloin keihäs oli irronnut heittäjän otteesta (kuva 11). Digitointi tehtiin kahdeksan kuvaa ennen irrotusta ja vähintään 16 kuvaa irrotuksen jälkeen hyödyntäen keihään heijastinmarkkereita. Vetoajan ja -matkan analysointia varten videolta määritettiin se hetki, jolloin heittäjän tukijalan jalkapohja oli ensimmäisen kerran laskeutunut kauttaaltaan alustaan (kuva 11). Digitointi tehtiin keihään narukerämarkkerille kahdeksan kuvaa ennen tätä kontaktia ja kahdeksan kuvaa kontaktin jälkeen.



KUVA 11. Tukijalan kontakti ja irrotus.

Keihään lähtönopeudeksi määritettiin narukerämarkkerin resultanttinopeus irrotushetkellä. Lähtökulmaksi määritettiin kulma, joka muodostui narukerämarkkerin nopeusvektorin sekä vaakatason välille irrotushetkellä. Lähtökulman sekä keihään pitkittäisakselin ja vaakatason välisen kulman erotus määrittä keihään ryntökulmaa. Kulma oli positiivinen silloin, kun keihään kärki kiertyi heiton aikana pystyyn suhteessa nopeusvektoriin ja negatiivinen kun kärki pääsi painumaan nopeusvektorin alapuolelle. Sivuttaisryntökulma saatiin määrittämällä kulma keihään pitkittäisakselin sekä narukerämarkkerin nopeusvektorin välillä tarkasteltaessa keihästä takaapäin. Kulma sai positiivisia arvoja, kun keihäs kiertyi myötäpäivään ja negatiivisia arvoja, kun keihäs kiersi vastapäivään. Irrotuskorkeus määritettiin narukerämarkkerin ja maanpinnan pystysuorana etäisyytenä irrotushetkellä. Tukijalan kontaktin sekä irrotuksen välinen aika ilmaisi vetoaikaa vetomatkan ollessa keihään kulkema matka tukijalan kontaktin ja irrotuksen välisenä aikana.

Heittoparametrien avulla heitoille määritettiin teoreettinen heiton pituus pistemäisen kappaleen heittoliikkeen kaavalla

$$D = v_0 \cos \alpha \frac{v_0 \sin \alpha + \sqrt{v_0^2 \sin^2 \alpha + 2gy_0}}{g}$$

jossa D on heiton pituus, v_0 lähtönopeus, α lähtökulma, y_0 irrotuskorkeus ja g putoamiskiihtyvyys $9,81 \text{ m/s}^2$. Laskentakaava ei huomioi keihään todellisen muodon tai ilmanvastuksen vaikutusta lentorataan ja heiton pituuteen. Teoreettisen heittopituuden sekä todellisen heittopituuden välillä on havaittu vallitsevan vahva korrelaatio ($r = 0.909\text{--}0.912$, $p < 0.001$) (Murakami ym. 2006; Murakami ym. 2018).

6.4.2 Kinemaattiset muuttujat ja tuloisuus

Liikkeenanalyysin avulla tarkasteltiin myös tukijalan kinemaattisia muuttujia ristiaskelhypyn lopussa, tukijalan kontaktin aikana sekä irrotushetken ajalta. Ristiaskelhypyn lopun osalta ajanhetkeksi määritettiin se hetki, jolloin heittäjän takajalan eli oikean jalan havaittiin ensimmäisen kerran olevan kontaktissa alustaan (kuva 12). Tukijalan kontaktiksi määritettiin se ajanhetki, jolloin heittäjän tukijalan eli vasemman jalan kantapäähän havaittiin ensimmäisen kerran olevan kontaktissa alustaan (kuva 12). Irrotushetkenä käytettiin samaa jo aiemmin heittoparametrien määrittämiseen käytettyä ajanhetkeä. Muuttujien määrittämistä varten digitointi tehtiin kymmenen kuvaa ennen määritettyä ajanhetkeä ja kymmenen kuvaa ajanhetken jälkeen.



KUVA 12. Ristiaskelhypyn loppu ja tukijalan kantapääkontakti.

Polvikulma määritettiin lonkan sekä nilkan digitointipisteiden välisenä vektorikulmana. Polvikulmaa tarkasteltiin sekä tukijalan kontaktin, että irrotuksen ajalta. Nilkkakulma määritettiin polven sekä jalkaterän kärjen digitointipisteiden välisenä vektorikulmana tukijalan kontaktihetkellä ja nilkkakorkeus nilkan digitointipisteen sekä alustan kohtisuorana etäisyytenä ristiaskelhypyn lopussa. Askelpituus osoitti takajalan jalkaterän kärjen sekä tukijalan jalkaterän kärjen välistä etäisyyttä, kun tukijalan jalkapohjan havaittiin olevan ensimmäisen kerran kokonaan kontaktissa alustaan. Lantion kiertokulma määritettiin lonkkien väliin muodostetun vektorin ja heittosuunnan välisenä kulmana horisontaalitasossa. Lantion kiertokulmaa tarkasteltiin ristiaskelhypyn lopussa, tukijalan kontaktin hetkellä sekä irrotushetkellä. Lantio-hartiakulmaerotuksen laskemista varten määritettiin ensin hartioiden kiertokulma hartioiden väliin muodostetun vektorin ja heittosuunnan välisenä kulmana horisontaalitasossa. Sekä lantion että hartioiden kiertokulma oli 90° kun heittäjän rintamasuunta osoitti heittosuuntaan, yli 90° , kun rintamasuunta kääntyi oikealle ja alle 90° , kun rintamasuunta kääntyi vasemmalle. Kiertokulmien välinen erotus määritteli lantio-hartiakulmaerotusta. Kulmien erotusta tarkasteltiin ristiaskelhypyn lopussa, tukijalan kontaktin aikana sekä irrotushetkellä. Tulonopeus määritettiin heittäjän masakeskipisteen horisontaalisena resultanttinopeutena ristiaskelhypyn lopussa, tukijalan kontaktin aikana sekä irrotushetken ajalta.

6.5 Tilastollinen analyysi

Tilastolliseen analysointiin käytettiin SPSS- (versio 29.0.1.0, International Business Machines Corporation, New York, Yhdysvallat) ja Microsoft Excel 2024 -ohjelmia (versio 16.81, Microsoft Corporation, Washington, Yhdysvallat). Muuttujien normaalijakautuneisuus testattiin Shapiro-Wilk -testillä. Analysointiin käytettiin Pearsonin korrelaatiokerrointa, jos muuttujat olivat normaalijakautuneita ja Spearmanin järjestyskorrelaatiokerrointa, jos muuttujat eivät olleet normaalijakautuneita. Korrelaatioissa käytettiin kaksisuuntaisen merkitsevyyden testausta. Miesheittäjien osalta kehonpainoon suhteutettu tukijalan horisontaalinen huippuvoima sekä tukijalan kontaktin aikainen polvikulma eivät olleet normaalisti jakautuneita. Naisheittäjiltä mitatuista muuttujista keihään lähtönopeus sekä irrotushetken aikainen tulonopeus eivät olleet normaalisti jakautuneita. Muuttujista raportoitiin keskiarvot, keskihajonnat sekä vaihteluvälit. Muuttujien välisiä yhteyksiä tarkasteltaessa tilastollisen merkitsevyyden rajana käytettiin p-arvoa 0.05 ja tuloksista raportoitiin vain tilastollisesti merkitsevät yhteydet.

7 TULOKSET

7.1 Heittoparametrit, kinemaattiset muuttujat ja tulonopeus

Taulukkoon 3 on koottu keskiarvot, keskihajonnat ja vaihteluvälit heittoparametreista. Miesheittäjillä teoreettinen heittopituus oli 58.22 ± 5.71 metriä (vaihteluväli 47.94 – 67.78 m) ja naisheittäjillä 40.90 ± 4.06 metriä (vaihteluväli 30.79 – 46.96 m).

TAULUKKO 3. Heittoparametrit.

	Miehet		Naiset	
	Keskiarvo ja keskihajonta	Vaihteluväli	Keskiarvo ja keskihajonta	Vaihteluväli
Lähtönopeus (m/s)	24.2 ± 1.2	22.4 – 25.9	19.8 ± 1.1	16.9 – 21.2
Lähtökulma (°)	34.0 ± 3.4	29.3 – 39.8	37.57 ± 1.37	32.5 – 43.0
Ryntökulma (°)	-0.5 ± 3.8	-5.8 – 5.6	-0.98 ± 3.7	-4.6 – 6.6
Sivuttaisryntökulma (°)	4.1 ± 5.2	-5.6 – 12.0	5.96 ± 6.02	-8.6 – 15.0
Irrotuskorkeus (m)	2.01 ± 0.07	1.90 – 2.10	1.89 ± 0.08	1.79 – 2.01
Vetoaika (ms)	116 ± 1	104 – 129	135 ± 10	117 – 146
Vetomatka (m)	1.71 ± 0.18	1.52 – 2.11	1.55 ± 0.10	1.38 – 1.70

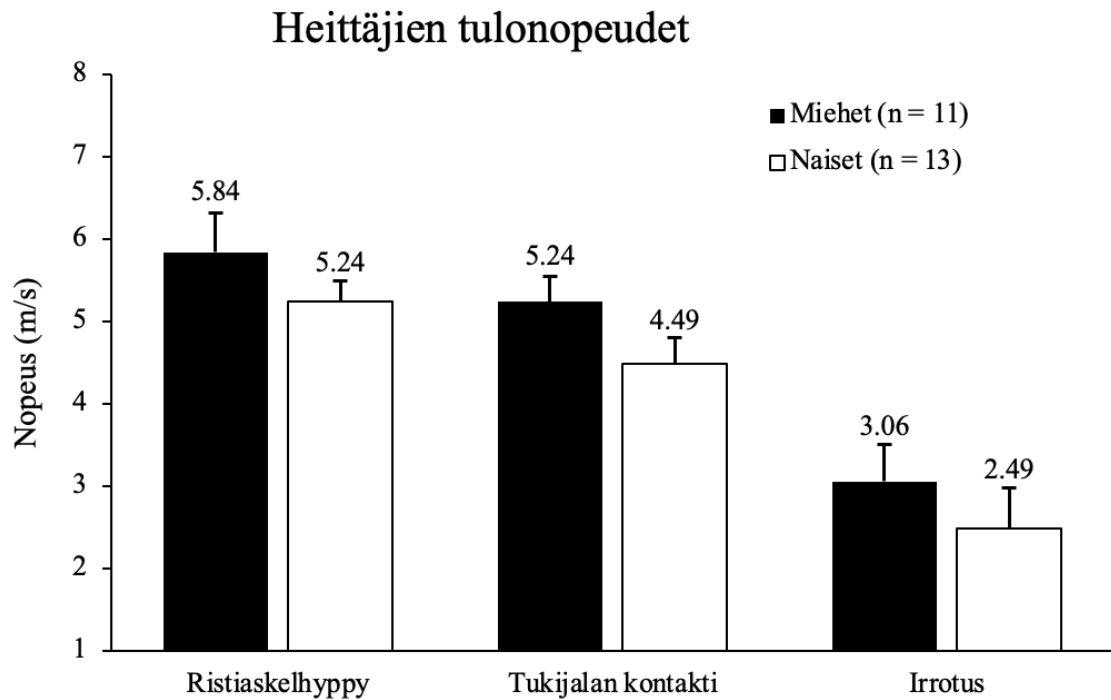
Taulukkoon 4 on koottu kinemaattisten muuttujien keskiarvot, keskihajonnat ja vaihteluvälit ristiaskelhyppyn lopusta, tukijalan kontaktin hetkeltä sekä irrotushetkeltä.

TAULUKKO 4. Kinemaattiset muuttujat.

	Miehet		Naiset	
	Keskiarvo ja keskihajonta	Vaihteluväli	Keskiarvo ja keskihajonta	Vaihteluväli
Polvikulma2 (°)	173 ± 4	169 – 181	171 ± 5	162 – 179
Polvikulma3 (°)	170 ± 10	158 – 187	176 ± 10	155 – 187
Askelpituus (m)	1.77 ± 0.14	1.59 – 2.10	1.56 ± 0.09	1.46 – 1.79
Nilkkakulma (°)	50 ± 2	46 – 53	49 ± 3	41 – 54
Nilkkakorkeus (cm)	27 ± 6	18 – 36	19 ± 0	13 – 25
Lantiokulma1 (°)	141 ± 11	125 – 159	144 ± 11	125 – 165
Lantiokulma2 (°)	115 ± 7	104 – 124	115 ± 14	83 – 140
Lantiokulma3 (°)	92 ± 7	77 – 103	81 ± 9	67 – 101
Lantiokorkeus (m)	1.27 ± 0.23	1 – 1.63	1.16 ± 0.19	0.86 – 1.62
Lantio-hartiakulmaerotus1	-12.3 ± 10.0	-27.5 – 4.7	-7.4 ± 14.4	-36.9 – 17.1
Lantio-hartiakulmaerotus2	-21.4 ± 7.3	-32.6 – -10.8	-21.8 ± 12.4	-42.1 – 8.9
Lantio-hartiakulmaerotus3	28.3 ± 10.7	10.2 – 41.9	16.5 ± 8.4	1.1 – 29.5

1 ristiaskelhyppy, 2 tukijalan kontakti, 3 irrotus.

Heittäjien tulonopeudet ristiaskelhypyn lopussa, tukijalan kontaktin sekä irrotuksen hetkeltä on esitetty kuvassa 13. Miesheittäjillä nopeus väheni ristiaskelhypyn lopun ja tukijalan kontaktin välillä keskimäärin 10.2 ± 3.8 % ja tukijalan kontaktin ja irrotushetken välillä keskimäärin 41.8 ± 6.3 %. Naisheittäjillä nopeus väheni ristiaskelhypyn ja tukijalan kontaktin välillä keskimäärin 14.2 ± 4.3 % sekä tukijalan kontaktin ja irrotushetken välillä keskimäärin 44.7 ± 10.0 %.



KUVA 13. Mies- ja naisheittäjien tulonopeudet ristiaskelhypyn lopussa, tukijalan kontaktin aikana ja irrotushetkellä.

7.2 Tuki- ja takajalan reaktivoimat

Taulukkoon 5 on koottu heittäjien tuottamat tukijalan reaktivoimat, impulssit ja voimantuotonopeudet. Tukijalan kontaktin aikana miesheittäjät tuottivat vertikaalisen huippuvoiman keskimäärin 30 ± 4 ms ja horisontaalisen huippuvoiman 28 ± 4 ms kohdalla kontaktin alusta. Naisheittäjillä vertikaalinen huippuvoima ajoittui 33 ± 5 ms ja horisontaalinen huippuvoima 31 ± 5 ms kohdalle.

TAULUKKO 5. Tukijalan reaktivoimat. Horisontaaliset voimat on ilmaistu vastaavan suuruisina positiivisina arvoina.

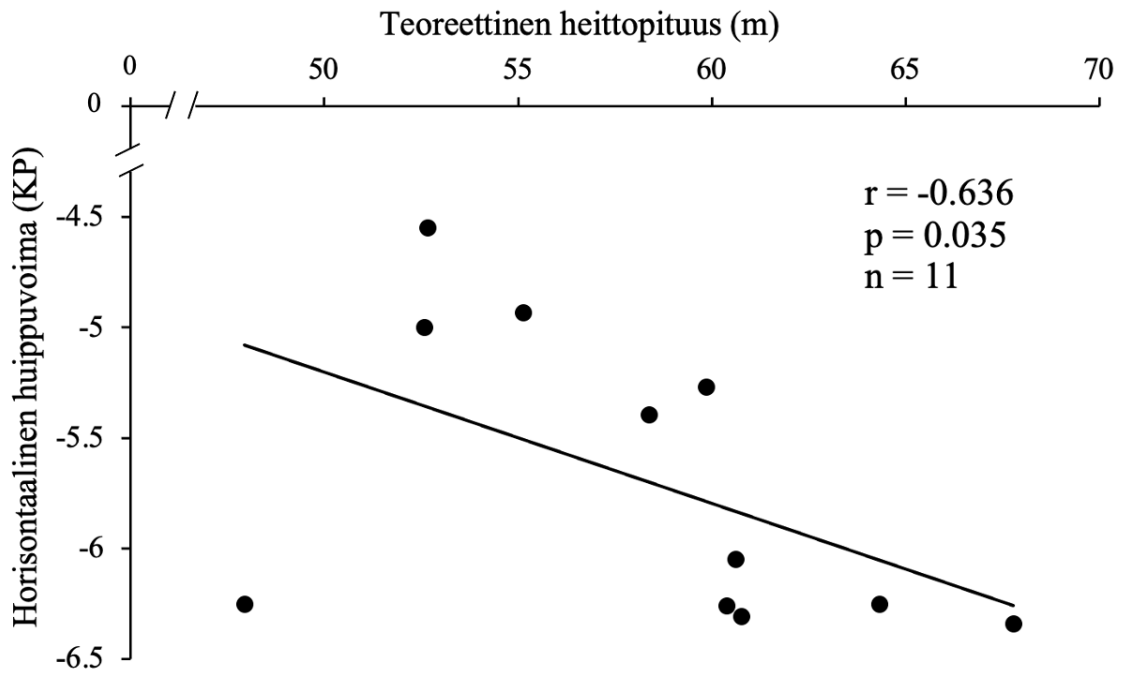
	Miehet		Naiset	
	Keskiarvo ja keskihajonta	Vaihteluväli	Keskiarvo ja keskihajonta	Vaihteluväli
Vertikaalinen huippuvoima (N)	7293 ± 1356	4970 – 8925	5342 ± 979	3725 – 6754
Vertikaalinen huippuvoima (KP)	7.67 ± 0.92	6.23 – 9.01	6.72 ± 0.74	5.77 – 7.90
Horisontaalinen huippuvoima (N)	5401 ± 965	3774 – 7052	4030 ± 729	2730 – 4978
Horisontaalinen huippuvoima (KP)	5.69 ± 0.67	4.55 – 6.33	5.10 ± 0.84	3.84 – 6.65
Vertikaalinen impulssi (KP × s)	0.345 ± 0.029	0.290 – 0.393	0.338 ± 0.020	0.296 – 0.372
Horisontaalinen impulssi (KP × s)	0.239 ± 0.023	0.206 – 0.276	0.239 ± 0.029	0.185 – 0.303
Vertikaalinen voimantuottonopeus (KP / s)	263 ± 58	178 – 392	209 ± 40	152 – 263
Horisontaalinen voimantuottonopeus (KP / s)	206 ± 40	150 – 298	165 ± 29	124 – 234

KP heittäjän kehonpainoon suhteutettu arvo

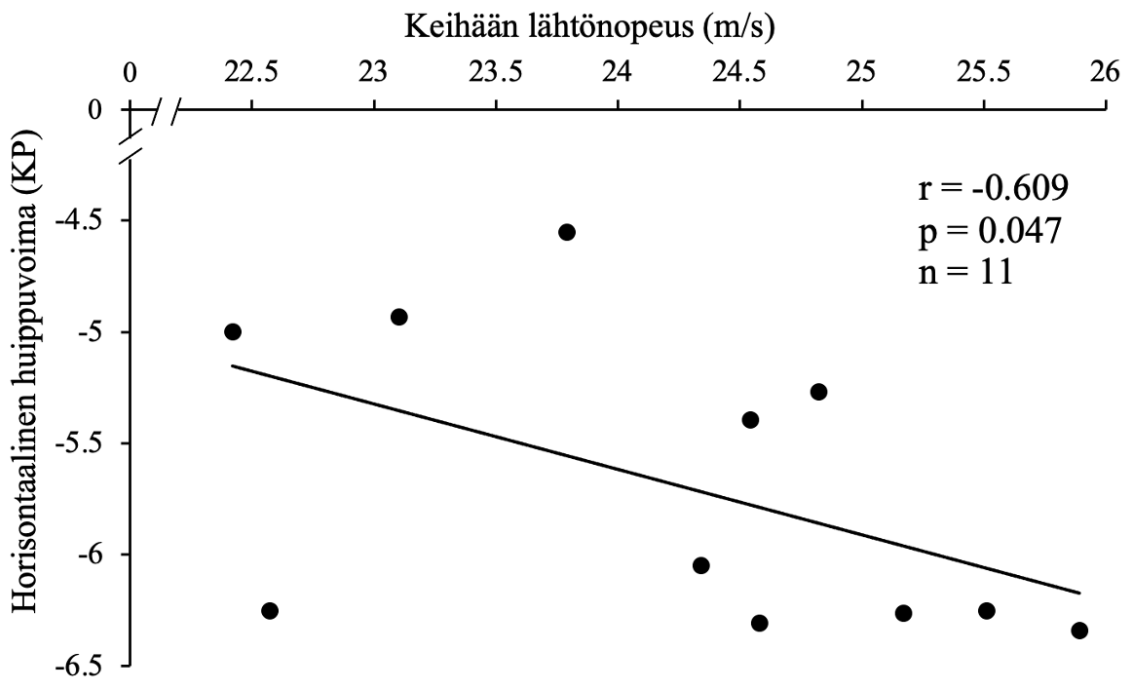
Takajalalla miesheittäjät ($n = 9$) tuottivat keskimäärin 2549 ± 508 N suuruisen tai kehonpainoon suhteutettuna 2.80 ± 0.72 -kertaisen vertikaalisen huippuvoiman, kun naisheittäjillä ($n = 8$) vastaavat arvot olivat 2024 ± 606 N ja 2.52 ± 0.68 . Työntävää horisontaalista voimaa miesheittäjät tuottivat 196 ± 91 N tai 0.21 ± 0.11 -kertaisen voiman naisheittäjien vastaavien arvojen ollessa 162 ± 55 N tai 0.21 ± 0.82 . Jarruttavaa horisontaalivoimaa miesheittäjät tuottivat 1227 ± 342 N tai kehonpainoon suhteutettuna 1.35 ± 0.44 -kertaisesti naisheittäjien saavuttaessa 923 ± 291 N suuruisen tai kehonpainoon suhteutettuna 1.14 ± 0.30 -kertaisen huippuvoiman.

7.3 Reaktivoimien yhteys heittosuorituskykyyn

Miesheittäjillä horisontaalinen kehonpainoon suhteutettu huippuvoima oli yhteydessä teoreettiseen heittopituuteen (kuva 14), keihään lähtönopeuteen (kuva 15) sekä vetomatkaan ($r = -0.624$, $p = 0.040$). Absoluuttinen horisontaalinen huippuvoima oli yhteydessä vetomatkaan ($r = -0.676$, $p = 0.022$). Absoluuttinen vertikaalinen huippuvoima oli yhteydessä lähtökulmaan ($r = -0.618$, $p = 0.043$), vetoaikaan ($r = 0.643$, $p = 0.033$) sekä vetomatkaan ($r = 0.771$, $p = 0.005$). Vertikaalinen kehonpainoon suhteutettu huippuvoima oli yhteydessä ryntökulmaan ($r = 0.787$, $p = 0.004$). Impulssit, voimantuottonopeudet tai huippuvoimien ajoitushetket eivät olleet yhteydessä teoreettiseen heittopituuteen tai heittoparametreihin.

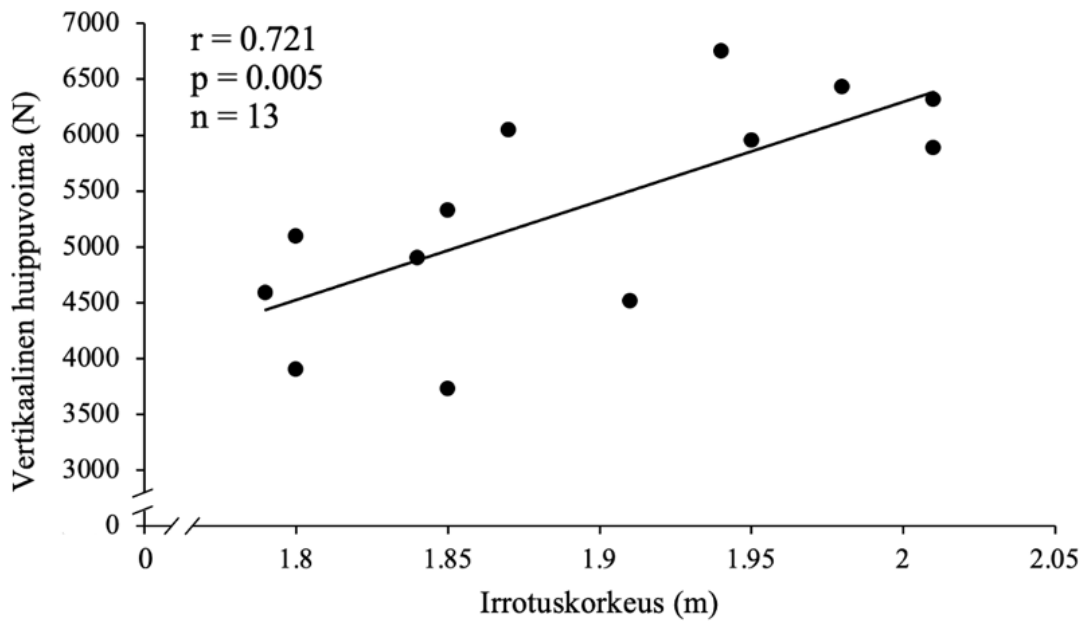


KUVA 14. Horisontaalisen kehonpainoon suhteutetun huippuvoiman yhteys teoreettiseen heittopituuteen miesheittäjillä.

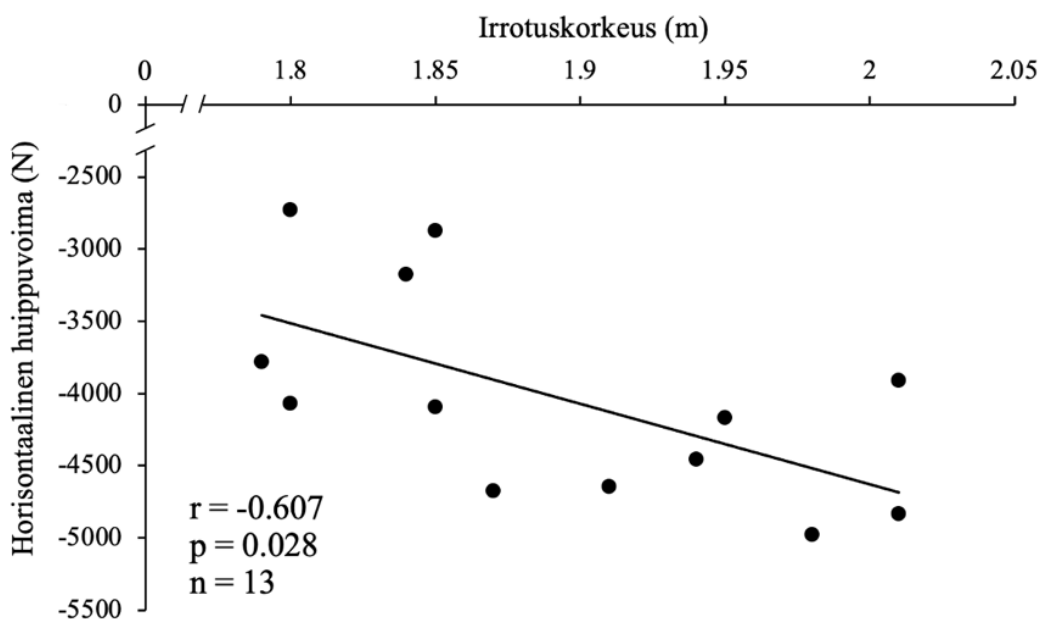


KUVA 15. Horisontaalisen kehonpainoon suhteutetun huippuvoiman yhteys keihään lähtönopeuteen miesheittäjillä.

Naisheittäjillä irrotuskorkeuteen olivat yhteydessä absoluuttinen vertikaalinen (kuva 16) sekä absoluuttinen horisontaalinen (kuva 17) huippuvoima. Lähtökulmaan olivat yhteydessä kehonpainoon suhteutettu horisontaalinen huippuvoima ($r = -0.582$, $p = 0.037$) sekä horisontaalinen voimantuottonopeus ($r = -0.647$, $p = 0.017$). Ryntökulmaan oli yhteydessä horisontaalinen impulssi ($r = 0.584$, $p = 0.036$). Teoreettinen heittopituus tai mikään heittoparametreista ei ollut yhteydessä vertikaaliseen kehonpainoon suhteutettuun huippuvoimaan, impulssiin tai voimantuottonopeuteen eikä huippuvoimien ajoitushetkeen.



KUVA 16. Vertikaalisen huippuvoiman yhteys irrotuskorkeuteen naisheittäjillä.



KUVA 17. Horisontaalisen huippuvoiman yhteys irrotuskorkeuteen naisheittäjillä.

7.4 Reaktivoimien yhteys kinemaattisiin muuttujiin

Taulukkoon 6 on koottu tilastollisesti merkitsevät korrelaatiot reaktivoimien ja kinemaattisten muuttujien välillä. Miesheittäjillä toistuivat askelpituuden sekä polvikulman yhteydet reaktivoimiin, kun taas naisilla reaktivoimiin olivat yhteydessä nilkan ja lantion asentoa ilmaisevat muuttujat. Mikään kinemaattisista muuttujista ei ollut yhteydessä horisontaaliseen voimantuotonopeuteen kummallakaan sukupuolella.

TAULUKKO 6. Reaktivoimien yhteys kinemaattisiin muuttujiin.

	Miehet	Naiset
Vertikaalinen huippuvoima (N)	Askelpituus $r = 0.674$, $p = 0.023$ Polvikulma2 $r = -0.782$, $p = 0.004$	Lantiokorkeus $r = 0.633$, $p = 0.020$
Vertikaalinen huippuvoima (KP)		Lantiokorkeus $r = 0.681$, $p = 0.010$
Horisontaalinen huippuvoima (N)	Askelpituus $r = -0.840$, $p = 0.001$ Polvikulma2 $r = 0.618$, $p = 0.043$	
Horisontaalinen huippuvoima (KP)	Askelpituus $r = -0.818$, $p = 0.002$	Nilkkakulma $r = 0.642$, $p = 0.018$
Vertikaalinen impulssi (KP \times s)	Polvikulma3 $r = 0.646$, $p = 0.032$ Lantio-hartiakulmaerotus2 $r = -0.756$, $p = 0.007$ Lantiokorkeus $r = 0.721$, $p = 0.012$	Lantio-hartiakulmaerotus3 $r = -0.597$, $p = 0.031$
Horisontaalinen impulssi (KP \times s)	Nilkkakulma $r = 0.686$, $p = 0.020$ Lantiokulma2 $r = 0.671$, $p = 0.024$	Nilkkakulma $r = 0.864$, $p < 0.001$
Vertikaalinen voimantuotonopeus (KP / s)	Polvikulma2 $r = -0.664$, $p = 0.026$	

KP heittäjän kehonpainoon suhteutettu voima, 2 tukijalan kontakti, 3 irrotus.

7.5 Kinemaattisten muuttujien yhteys heittosuorituskykyyn

Taulukkoon 7 on koottu tilastollisesti merkitsevät yhteydet kinemaattisten muuttujien ja heitto-parametrien välillä. Miesheittäjillä erityisesti askelpituus oli yhteydessä vetoaikaan ja -matkaan. Naisheittäjillä havainnoissa toistuivat lantion ja nilkan asentoa kuvaavat muuttujat. Mikään kinemaattisista muuttujista ei ollut yhteydessä teoreettiseen heittopituuteen tai irrotuskorkeuteen kummallakaan sukupuolella.

TAULUKKO 7. Kinemaattisten muuttujien yhteys heittoparametreihin.

	Miehet	Naiset
Lähtönopeus		Askelpituus $r = -0.560$, $p = 0.046$ Nilkkakorkeus $r = 0.582$, $p = 0.037$
Lähtökulma	Lantio-hartiakulmaerotus3 $r = -0.685$, $p = 0.020$	Lantiokulma2 $r = 0.585$, $p = 0.036$
Ryntökulma	Lantiokorkeus $r = 0.641$, $p = 0.034$	Nilkkakulma $r = 0.569$, $p = 0.043$
Sivuttaisryntökulma		Lantiokulma1 $r = -0.582$, $p = 0.037$ Lantiokorkeus $r = 0.605$, $p = 0.029$
Vetoaika	Askelpituus $r = 0.727$, $p = 0.011$	
Vetomatka	Askelpituus $r = 0.756$, $p = 0.007$	

1 ristiaskelhyppy, 2 tukijalan kontakti, 3 irrotus.

7.6 Tulonopeuksien yhteys heittosuorituskykyyn ja reaktivoimiin

Miesheittäjillä tulonopeus oli yhteydessä ryntökulmaan jokaisella kolmella tarkastellulla ajanhetkellä (ristiaskelhyppy $r = 0.684$, $p = 0.020$; tukijalan kontakti $r = 0.654$, $p = 0.029$; irrotus $r = 0.718$, $p = 0.013$). Naisheittäjillä vain irrotushetken aikainen tulonopeus oli yhteydessä sivuttaisryntökulmaan ($r = 0.643$, $p = 0.018$). Tulonopeus ei ollut yhteydessä heiton teoreettiseen pituuteen tai keihään lähtönopeuteen kummallakaan sukupuolella.

Miesheittäjillä ristiaskelhypyn aikainen tulonopeus oli yhteydessä kehonpainoon suhteutettuun horisontaaliseen huippuvoimaan ($r = -0.709$, $p = 0.015$) sekä kehonpainoon suhteutettuun vertikaaliseen huippuvoimaan ($r = 0.788$, $p = 0.004$). Tukijalan kontaktin aikainen tulonopeus oli yhteydessä kehonpainoon suhteutettuun horisontaaliseen huippuvoimaan ($r = -0.836$, $p = 0.001$), kehonpainoon suhteutettuun vertikaaliseen huippuvoimaan ($r = 0.772$, $p = 0.005$) sekä vertikaaliseen impulssiin ($r = 0.649$, $p = 0.031$). Irrotushetken aikainen tulonopeus oli yhteydessä kehonpainoon suhteutettuun vertikaaliseen huippuvoimaan ($r = 0.866$, $p < 0.001$) sekä vertikaaliseen ($r = 0.649$, $p = 0.031$) että horisontaaliseen ($r = -0.660$, $p = 0.027$) voimantuotto-nopeuteen. Naisheittäjillä vertikaalinen impulssi oli yhteydessä ristiaskelhypyn ($r = 0.727$, $p = 0.005$) sekä tukijalan kontaktin ($r = 0.566$, $p = 0.044$) aikaiseen tulonopeuteen. Irrotushetken aikainen tulonopeus ei ollut yhteydessä reaktivoimiin.

8 POHDINTA

Miesheittäjillä horisontaalinen kehonpainoon suhteutettu huippuvoima oli yhteydessä teoreettiseen heittopituuteen sekä keihään lähtönopeuteen, kun taas naisheittäjillä vastaavaa yhteyttä reaktivoimien sekä heittosuorituskyvyn välillä ei havaittu. Lisäksi kummallakin sukupuolella reaktivoimien havaittiin olevan yhteydessä muihin heiton onnistumista mahdollisesti selittäviin heittoparametreihin sekä tukijalan kinemaattisiin muuttujiin. Miesheittäjien osalta yhteys havaittiin erityisesti huippuvoimien sekä vetomatkan ja naisheittäjillä huippuvoimien sekä irrotuskorkeuden välillä. Tulonopeus ei ollut suoranaisesti yhteydessä heittosuorituskykyyn kummallakaan sukupuolella.

8.1 Reaktivoimat

Tämän tutkimuksen perusteella suurempia horisontaalisia huippuvoimia tuottaneet miesheittäjät kykenivät saavuttamaan suurempia keihään lähtönopeuksia ja siten myös pidempiä heittoja. Korjuksen (1988) tutkimuksessa vertikaalinen huippuvoima, erityisesti sen absoluuttinen arvo, oli yhteydessä keihään lähtönopeuteen, minkä perusteella vertikaalisen jarrutustyön perusteltiin olevan oleellisempaa heittosuorituskyvyn kannalta. Vastaavaa yhteyttä vertikaalisen voimantuoton sekä heittosuorituskyvyn välillä ei tässä tutkimuksessa kuitenkaan havaittu. Päinvastaisesti jarruttavan voimantuoton havaittiin olevan tärkeämpää ja vain suhteutetulla voimantuoton arvolla havaittiin olevan yhteyttä heittosuorituskykyyn. Huippuvoimien havaittiin olevan yhteydessä heittoparametreihin, kun taas impulssien, voimantuottonopeuksien tai huippuvoimien ajoitushetkien ei pääsääntöisesti havaittu olevan. Keihäänheittäjille huippuvoimien tuottaminen, erityisesti vaakasuunnassa, vaikuttaisi olevan heittosuorituskyvyn kannalta oleellisempaa muihin voimantuottomuuttujiin tai voimien ajoitushetkeen verrattuna.

Miesheittäjillä suuremmat huippuvoimat sekä vertikaalisessa että horisontaalisessa suunnassa olivat yhteydessä pidempään vetomatkaan. Suuremmat huippuvoimat saattavat siten selittää parempaa heittosuorituskykyä myös epäsuorasti, sillä suuremman vetomatkan on havaittu olevan yhteydessä heiton pituuteen (Murakami ym. 2006) ja keihään lähtönopeuteen (Korjus 1988). Kuitenkin vertikaalisella huippuvoimalla oli yhteys myös pidempään vetoaikaan, jonka on havaittu vaikuttavan negatiivisesti heittopituuteen (Murakami ym. 2006). Suurempia absoluuttisia voimia ja pidempiä vetomatkoja saattavat osittain selittää kuitenkin myös heittäjien

koko ja pituus, mutta myös suhteutetun horisontaalisen voiman havaittiin olevan yhteydessä vetomatkaan. Lisäksi kyseinen muuttuja oli yhteydessä vetomatkaan, muttei vetoaikaan, joten erityisesti horisontaalinen jarrutustyö vaikuttaisi olevan tärkeä vetomatkan optimoimiseksi.

Miesheittäjillä suurempien vertikaalisten voimantuottomuuttujien havaittiin olevan yhteydessä pienempään lähtökulmaan ja suurempaan ryntökulmaan. Tämän perusteella vähäisempi vertikaalinen voimantuotto saattaa selittää parempaa keihään asennon hallintaa ja optimaalisempaa lentoasentoa, sillä suuremman ryntökulman on havaittu vaikuttavan negatiivisesti heiton pituuteen (Murakami ym. 2017; Murakami ym. 2018). Korjuksen (1988) tutkimuksessa lähtökulman kasvattaminen vähensi keihään lähtönopeutta samalla, kun suurempi vertikaalinen törmäysvoima selitti suurempaa keihään lähtönopeutta. Vastaavaa yhteyttä vertikaalisen voimantuoton sekä keihään lähtönopeuden välillä ei tässä tutkimuksessa havaittu. Optimaaliseen keihään asentoon pyrkiminen vaikuttaisi olevan tärkeämpää niille heittäjille, joilla lähtönopeudet jäävät mataliksi, kun taas suurempia lähtönopeuksia saavuttavilla heittäjillä lähtökulman pieni vaihtelu ei välttämättä vaikuta heittotulokseen yhtä merkittävästi (Hubbard & Alaways 1987). Lehmannin (2010) mukaan kyky mukauttaa lähtökulmaa saattaa olla ratkaiseva tekijä kilpailun aikana. Tämän perusteella vertikaalista voimantuottoa hillitsemällä heittäjä voi mahdollisesti vaikuttaa keihään lähtöasentoon. Vastaavasti vertikaalista voimantuottoa kasvattamalla voidaan pienentää lähtökulmaa ja vaikuttaa sitä kautta mahdollisesti keihään lähtönopeuteen.

Naisheittäjillä suuremmat huippuvoimat olivat yhteydessä korkeampaan irrotuskorkeuteen, joten suuremmat tuotetut voimat mahdollistavat heittäjälle korkeamman heittoasennon. On kuitenkin epäselvää, mikä merkitys irrotuskorkeudella on heittosuorituskyvyn kannalta, sillä sen ei ole havaittu olevan yhteydessä suoraan heittopituuteen (Murakami ym. 2006; Murakami ym. 2017; Tauchi ym. 2009; Vassilios & Iraklis 2013; Yo ym. 2020), mutta irrotuskorkeuden on kuitenkin havaittu olevan suurempi korkeamman tason heittäjillä (Campos ym. 2002; Thotawaththa & Chandana 2021). Edistyneemmällä heittäjillä parempi heittotekniikka mahdollistaa alavartalon tehokkaamman hyödyntämisen ja siten korkeamman heittoasennon (Campos ym. 2002), jolloin saavutetaan myös optimaalisempi ja pystympi ylävartalon asento irrotushetkellä (Jung ym. 2012). Irrotuskorkeutta määrittää heittäjän pituus (Campos ym. 2002; Rich ym. 1984), joten irrotuskorkeuden ja absoluuttisten huippuvoimien välistä yhteyttä saattavat ainakin osittain selittää myös heittäjän pituus sekä suurempi kehon massa ja siten suuremmat tuotetut reaktiivoimat, sillä suhteutetuilla huippuvoimien arvoilla vastaavaa yhteyttä irrotuskorkeuteen ei havaittu.

Irrotuskorkeutta lukuun ottamatta vertikaalisella voimantuotolla ei tämän tutkimuksen perusteella ollut merkittävää roolia heittosuorituskyvyille naisheittäjillä. Sen sijaan kehonpainoon suhteutettu horisontaalinen huippuvoima sekä horisontaalinen voimantuottonopeus olivat yhteydessä lähtökulmaan. Lähtökulman rooli heittosuorituskyvyn kannalta on usein riippuvainen tuuliolosuhteista (Bartlett & Best 1988) sekä keihään lähtönopeudesta (Hubbard & Alaways 1987). Lähtökulman ja heiton pituuden välillä ei ole havaittu olevan yhteyttä (Murakami ym. 2006; Murakami ym. 2017; Vassilios & Iraklis 2013), mutta Viitasalo ym. (2003) havaitsivat negatiivisen korrelaation lähtökulman sekä lähtönopeuden välillä naisheittäjillä. Tämän perusteella horisontaalista jarruttamista mukauttamalla voidaan mahdollisesti vaikuttaa siihen, millaiseen lähtökulmaan keihäs halutaan ohjata. Lähtökulman mukauttaminen on tarpeellista erilaisissa tuuliolosuhteissa heitettäessä (Bartlett 2009), sillä optimaalisen keihään asennon merkitys heittosuorituskyvyille saattaa jopa korostua naisten keihäsmallilla heitettäessä (Best & Bartlett 2009).

Aikaisemmissa tutkimuksissa heittäjien on havaittu tuottaneen kehonpainoon suhteutettuna 5.63 ± 1.31 -kertaisen vertikaalisen ja 4.50 ± 0.96 -kertaisen horisontaalisen huippuvoiman (Hurrión ym. 2002) kun vertikaalisen huippuvoiman absoluuttisen arvon on aikaisemmin mitattu olevan 5855 N (Korjus 1988). Heittäjät kykenivät siis tuottamaan tässä tutkimuksessa suurempia huippuvoimia verrattuna aikaisempiin tutkimuksiin. Kriketissä suurempien (McGrath ym. 2022; Portus ym. 2004) ja nopeammin tuotettujen huippuvoimien (Portus ym. 2004), suuremman horisontaalisen impulssin sekä pienemmän voimantuottonopeuden (King ym. 2016) on havaittu selittävän pallon syöttönopeutta. King ym. (2016) kuitenkin korostivat, että suuret huippuvoimat eivät ole välttämättömiä suuren syöttönopeuden saavuttamiseksi. Tämän tutkimuksen perusteella keihäänheitossa ei havaita samanlaisia yhteyksiä reaktivoimien ja heittosuorituskyvyn välillä, sillä nimenomaan huippuvoimat näyttäisivät olevan yhteydessä heittosuorituskykyyn sekä suorasti että epäsuorasti.

8.2 Kinemaattiset muuttujat

Miesheittäjillä pidempi askelpituus oli yhteydessä vetomatkaan sekä suurempiin huippuvoimiin, joiden jo todettiin olleen yhteydessä vetomatkaan. Tämän perusteella askelpituutta kasvattamalla voidaan mahdollisesti lisätä vertikaalista sekä horisontaalista voimantuottoa, ja vaikuttaa siten välillisesti vetopituuteen. Yo ym. (2020) kuitenkin havaitsivat, että askelpituudessa

ei havaittu eroa, kun tarkasteltiin pidempää sekä lyhyeksi jäänyttä heittoa samalta heittäjältä. Askelpituuden ei ole myöskään havaittu olevan suoraan yhteydessä heiton pituuteen (Saratlija ym. 2013; Tauchi ym. 2009), mutta parempien heittäjien on havaittu saavuttaneen pidempiä askelpituuksia (Krzyszowski & Kipp 2021; Whiting ym. 1991). Askelpituus sekä vetomatka ovat kuitenkin riippuvaisia myös heittäjän pituudesta, mikä voi osaltaan selittää havaittuja yhteyksiä.

Vertikaaliseen huippuvoimaan oli yhteydessä myös pienempi tukijalan kontaktin aikainen polvikulma. Kontaktin alussa pieni polven koukistus saattaakin olla jopa hyödyllistä, mikäli polvea pystytään tämän jälkeen ojentamaan tehokkaasti ennen irrotusta (Komi & Mero 1985; Krzyszowski & Kipp 2021; Mero ym. 1994; Murakami ym. 2017; Saratlija ym. 2013). Suoremalla irrotushetken aikaisella polvikulmalla on havaittu olevan aiemmissa tutkimuksissa yhteys heittosuorituskykyyn (Komi & Mero 1985; Krzyszowski & Kipp 2021; Menzel 1986; Murakami ym. 2006), mutta vastaavaa yhteyttä ei tässä tutkimuksessa kuitenkaan havaittu. Suorempi irrotushetken aikainen polvikulma oli tässä tutkimuksessa yhteydessä suurempaan vertikaaliseen impulssiin, jolla ei kuitenkaan havaittu olevan yhteyttä heittosuorituskykyyn.

Toisaalta miesheittäjillä pienemmän irrotushetken aikaisen lantion ja hartian kulmien erotuksen havaittiin olevan yhteydessä suurempaan lähtökulmaan. Samalla korkeamman lantion asennon havaittiin olevan yhteydessä suurempaan ryntökulmaan. Lähtökulman kasvattamiseksi sekä lantion että hartioiden välinen linja tulisi siis olla yhteneväinen irrotushetkellä, kun taas ryntökulman hallitsemiseksi matalampi lantion asento vaikuttaisi olevan suotuisampi.

Naisheittäjillä suuremman keihään lähtönopeuden havaittiin olevan yhteydessä lyhyempään askelpituuteen sekä korkeampaan nilkan korkeuteen ristiaskelhypyn lopussa. Vartalon taakse kallistumisen on pohdittu olevan tärkeä tekijä naisheittäjille heittosuorituskyvyn kannalta (Krzyszowski & Kipp 2021; Lehmann 2010; Vassilios & Iraklis 2013) ja nilkan korkeus saattaa selittää tämän kallistuksen määrää (Wormgoor ym. 2010). Sen sijaan askelpituuden ei ole havaittu selittävän heittosuorituskykyä naisheittäjillä aikaisemmissa tutkimuksissa (Krzyszowski & Kipp 2021; Vassilios & Iraklis 2013), mutta tämän tutkimuksen perusteella tukijalan askeleen pituutta ei tule ainakaan ylikorostaa.

Korkeampi irrotuksen aikainen lantion asento oli yhteydessä suurempaa vertikaaliseen voimantuottoon, jonka taas todettiin olleen yhteydessä korkeampaan irrotuskorkeuteen. Korkeamman

lantion asennon irrotushetkellä on havaittu olevan yhteydessä heittopituuteen (Yo ym. 2020). Toisaalta korkeamman lantion asennon havaittiin myös korreloivan suuremman sivuttaisryntökulman kanssa. Vertikaalista voimaa tulee silti pystyä tuottamaan tarpeeksi, jotta heittäjä pystyy kannattelemaan tarpeeksi korkeaa lantion asentoa mahdollistaakseen korkean ja optimaalisen irrotuskorkeuden.

Koska pienemmän nilkkakulman havaittiin olevan yhteydessä pienempään ryntökulmaan sekä horisontaalisen voimantuoton kautta välillisesti myös lähtökulmaan, voidaan nilkan kulmaa pienentämällä lisätä horisontaalisesti jarruttavaa voimantuottoa ja siten vaikuttaa keihään asentoon. Havaintojen perusteella tukijalalle tulisi törmätä mahdollisimman kantapäällevoittoisesti. Lähtökulman havaittiin olevan yhteydessä myös suurempaan tukijalan kontaktin aikaiseen lantion kulmaan samalla kun sivuttaisryntökulma oli käänteisesti yhteydessä ristiaskelhypyn aikaisen lantiokulman kanssa. Tämä tarkoittaisi sitä, että lähtökulman kasvattamiseksi ja sivuttaisryntökulman hallitsemiseksi lantion asento tulisi pyrkiä pitämään vielä suljettuna näissä heiton vaiheissa.

8.3 Tulonopeus

Suurempi tulonopeus oli miesheittäjillä systemaattisesti yhteydessä suurempaan ryntökulmaan. Korkeamman tason heittäjät pystyvät saavuttamaan suurempia nopeuksia sekä silti myös hallitsemaan heittovälineen asennon paremmin (Bartlett ym. 1996a). Ryntökulman merkitys heitotosuorituskyvyille vähenee keihään lähtönopeutta kasvattamalla (Hubbard & Alaways 1987). Heittäjän nopeuden, erityisesti ristiaskelhypyn aikaisen nopeuden, on havaittu aiemmissä tutkimuksissa olleen yhteydessä keihään lähtönopeuteen sekä heiton pituuteen (Korjus 1988; Murakami ym. 2006; Murakami ym. 2017; Tauchi ym. 2009). Vastaavaa yhteyttä ei tässä tutkimuksessa havaittu, mutta tulonopeuden ja siten myös keihään lähtönopeuden kasvattaminen saattaa olla suotavampaa erityisesti heittäjille, jotka pystyvät saavuttamaan suuria keihään lähtönopeuksia. Etenemisnopeutta ei tulisi jarruttaa vielä ristiaskelhypyn aikana (Korjus 1988).

Erityisesti ristiaskelhypyn sekä tukijalan kontaktin aikaisten tulonopeuksien sekä huippuvoimien välillä havaittiin olevan yhteys. Nopeuden lisääntyessä sekä vertikaalisesti että horisontaalisesti suuntautuvaa jarrutustyötä tulee kyetä tehostamaan, ja heittäjän onkin mahdollisesti kyettävä tuottamaan suurempia huippuvoimia hidastaakseen etenemisnopeuttaan tarpeeksi.

Miesheittäjillä tukijalan kontaktin aikaisen nopeuden havaittiin olevan yhteydessä kehonpaineen suhteutettuun horisontaaliseen huippuvoimaan, jonka aiemmin todettiin olevan yhteydessä vetomatkaan ja askelpituuteen. Myös Murakami ym. (2017) havaitsivat, että vetovaiheen aikaisella heittäjän nopeudella oli yhteys askelpituuteen. Tämän perusteella tulonopeuden lisääminen saattaa vaatia askelpituuden pidentämistä sekä horisontaalisesti suuntautuvan jarrutustyön tehostamista. Tätä kautta heittäjän voi olla mahdollista vaikuttaa myös vetomatkaan. Havaintojen perusteella suurempi tulonopeus kuitenkin vaikeuttaa välineen hallintaa, joten optimaalinen heittosuoritus vaatii tasapainottelua heittäjän nopeuden sekä heittotekniikan välillä. Tulonopeuden kasvattaminen keihään asennon kustannuksella saattaa kuitenkin olla tärkeämpää heittopituuden maksimoimiseksi.

Naisheittäjillä tulonopeus ei selittänyt heittosuorituskykyä yhtä selkeästi, sillä vain irrotushetken aikainen nopeus oli yhteydessä sivuttaisryntökulmaan. Tämän perusteella naisheittäjillä riittävä nopeuden jarruttaminen ennen irrotusta vaikuttaisi olevan tärkeää keihään suotuisaan asentoon saattamiseksi, sillä liian suuri sivuttaisryntökulma lyhentää heiton pituutta (Best ym. 1993). Välillisiä yhteyksiä reaktiovoimiin ja heittosuorituskykyyn ei havaittu.

8.4 Tutkimuksen vahvuudet ja heikkoudet

Biomekaaniset analyysimenetelmät ovat yleisesti hyödynnettyjä ja ne mahdollistavat heittosuorituskyvyn sekä heittotekniikan objektiivisen tarkastelun (Morriss ym. 1997). Koska keihäänheitto on suoritustekniikan sekä välineen lentoradan suhteen kolmiulotteinen liikeketju (Rich ym. 1984), mahdollistaa kolmiulotteinen liikeanalyysi suorituksen yksityiskohtaisemman ja tarkemman analysoinnin verrattuna kaksiulotteiseen liikeanalyysiin (Komi & Mero 1985; Mero ym. 1994; Whiting ym. 1991) sekä useamman muuttujan tarkastelun (Best ym. 1993). Heiton laskennallisen pituuden ja keihään lähtönopeuden ohella tutkimukseen sisällytettiin useita heittosuorituskykyä välillisesti selittäviä heittoparametrejä sekä kinemaattisia muuttujia. Tutkimus lisäsi ymmärrystä siitä, miten tuotetut reaktiovoimat mahdollisesti selittävät heittosuorituskykyä suoraan sekä välillisesti, sillä aihetta ei ole vielä tutkittu laajemmin keihäänheittäjillä. Tutkimus tarkasteli, mitkä tekijät heittosuorituksessa ja -tekniikassa vaikuttavat heittosuorituskykyyn, jotta tietoa voidaan mahdollisesti hyödyntää myös valmennuksessa.

Tutkimuksen vahvuutena voidaan pitää tutkittavien kohtalaisen korkeaa tasoa, sillä tutkittavista suurin osa oli maajoukkue-tason urheilijoita ja siten myös kansainvälisen sekä kansallisen kärke-tason keihäänheittäjiä. Tämän perusteella voidaan todeta, että tutkittavien heittosuorituskyky ja heittotekniikan hallinta oli vähintäänkin riittävää, jotta heittosuorituskykyä ja siihen vaikut-tavia tekijöitä pystyttiin tutkimaan tarkoituksenmukaisesti. Lisäksi suoritukset edustivat kilpai-lunomaista heittosuorituskykyä, sillä tutkimukseen sisällytettiin vain ne heittäjät, jotka kykeni-vät heittämään maksimaalisesti. Naisheittäjiä ja naisheittäjien suorituskykyä on tutkittu kirjaj-lisuudessa vähemmän miesheittäjiin verrattuna. Sukupuolten välillä on sekä fyysisten ominai-suuksien ja suorituskyvyn että myös heittovälineen osalta eroja, minkä takia miesheittäjiä kä-sittelevää tutkimuskirjallisuutta ei välttämättä voida aina yhtenäisesti soveltaa naisheittäjien valmennuksessa. Sekä mies- että naisheittäjät oli sisällytetty tutkimukseen, minkä takia tutki-mus lisäsi osaltaan tietoa heittosuorituskyvylle tärkeistä tekijöistä erikseen kummankin suku-puolen näkökulmasta.

Heitoissa käytetyt keihäät oli tupetettu pressuun heittämistä varten, jolloin niiden paino, tasa-painotus tai mitat eivät vastanneet täysin kilpailustandardien mukaista keihästä, mikä on osal-taan saattanut vaikuttaa heittojen onnistumiseen ja heitoista mitattuihin heittoparametreihin. Pistemäisen kappaleen heittoliikkeen kaavan sekä heittopituuden välillä on havaittu vallitsevan vahva korrelaatio (Murakami ym. 2006; Murakami ym. 2018), mutta kaava ei silti huomioi keihään todellista muotoa eikä siten välineen lentoasennon vaikutusta heiton pituuteen. Pres-suun heittäminen saattaa rajoittaa ulkoisen palautteen hyödyntämistä suorituksesta, sillä heittäjä ei näe välineen koko lentorataa tai horisonttia tähtäyspisteen hakemiseksi. Heittäjät kuitenkin tyypillisesti hyödyntävät talviharjoittelussa heittopressuun heittämistä, joten tilanne ei ollut heille täysin uusi. Testaaminen toteutettiin lisäksi harjoituskaudella ja harjoitusolosuhteissa, jo-ten selvittämättä jää, miten hyvin tutkimuksen tulokset ovat verrattavissa heittosuorituskykyyn kilpailutilanteessa. Tutkimuksen perusteella voidaan kuitenkin todeta, kuinka suuria reaktio-voimia keihäänheittosuorituksen aikana tuotetaan ja mitkä tekijät mahdollisesti selittävät heit-tosuorituskykyä lajissa.

Analysoitavien heittojen valintaa rajoitti, että analysoitaviksi heitoiksi valittiin ne suoritukset, joissa heittäjän tukijalka osui kokonaan voimalevyille ennalta määritettyjen kriteerien mukai-sesti. Tällöin analyysivaiheessa ei välttämättä ole huomioitu muita mahdollisia paremmin on-nistuneita heitoja, joissa laskennallinen heiton pituus, lähtönopeus tai muut heittoparametrit

olisivat saattaneet olla parempia heittosuorituskykyä arvioitaessa. Jalkojen tähtääminen voimalevyille saattaa lisäksi rajoittaa suoritusta (Veltink et al. 2005), mikä on osaltaan voinut vaikuttaa heittotekniikkaan tai heiton onnistumiseen, mikäli ylimääräinen tähtääminen on häirinnyt heittäjää. Takajalan osumista voimalevyille ei kuitenkaan vaadittu, jotta ylimääräinen askeleiden kohdistaminen voitiin minimoida. Lisäksi useammalla heittosuorituksella, askelmerkin mukauttamisella sekä osumakohdasta annetulla palautteella pyrittiin parantamaan osumatarkkuutta jo lämmittelyheittojen aikana. On kuitenkin mahdollista, että yksittäiseltä heittäjältä on analysoitu jokin heittoteknisesti epäonnistunut heitto, mikäli kyseinen suoritus on ollut ainoa onnistunut reaktiovoimamittauskriteerien kannalta.

8.5 Johtopäätökset

Horisontaalinen huippuvoima oli yhteydessä teoreettiseen heittopituuteen sekä keihään lähtönopeuteen miesheittäjillä. Naisheittäjillä reaktiovoimien ei havaittu olevan yhteydessä heittosuorituskykyyn. Tutkimuksen perusteella reaktiovoimat saattavat selittää heittosuorituskykyä kuitenkin myös epäsuorasti. Keihään optimaalinen lentoasento ja siksi myös välineen hallinta on suorituskyvyn kannalta merkittävä tekijä, jolloin heittosuoritus vaatii tasapainottelua tuotettujen voimien, vauhdinjuoksun nopeuden, keihään lähtönopeuden sekä välineen asennon hallinnan välillä.

Miesheittäjillä horisontaalinen voimantuotto oli lisäksi yhteydessä vetomatkaan, kun taas vertikaalinen voimantuotto korreloi keihään asentokulmien kanssa. Askelpituus oli yhteydessä vetomatkaan sekä jarruttavaan voimantuottoon, kun taas lantion asennon havaittiin olevan yhteydessä keihään asentokulmiin. Tulonopeus ei ollut suoraan yhteydessä heittosuorituskykyyn, mutta se oli yhteydessä ryntökulmaan. Suurempi tulonopeus oli yhteydessä myös suurempiin huippuvoimiin. Havaintojen perusteella heittosuorituksessa tulisi korostaa horisontaalisesti suuntautuvaa jarrutustyötä sekä mahdollisesti hillitä vertikaalista törmäämistä keihään oikeaan asentoon saattamiseksi.

Naisheittäjillä huippuvoimat sekä lantion korkeampi asento olivat yhteydessä irrotuskorkeuteen. Vertikaalisella voimantuotolla ei tässä tutkimuksessa havaittu olevan irrotuskorkeutta lukuun ottamatta yhteyttä heittosuorituskykyyn. Sen sijaan horisontaalisen voimantuoton havait-

tiin korreloivan keihään lähtökulman kanssa, jolloin horisontaalisesti suuntautuvaa voimantuottoa tehostamalla voidaan mahdollisesti vaikuttaa keihään asentoon. Lisäksi pienemmän nilkan kulman havaittiin olevan yhteydessä horisontaaliseen voimantuottoon, joten tukijalan askel tulisi astua kantapäävoittoisesti jarrutustyön tehostamiseksi. Lyhyempi askelpituus sekä ristiaskelhypyn aikainen nilkan korkeus olivat yhteydessä keihään lähtönopeuteen. Tulonopeuden ei havaittu olevan yhteydessä heittosuorituskykyyn.

8.6 Käytännön sovellukset

Tämän tutkimuksen perusteella miesheittäjien kannattaa pyrkiä tehostamaan horisontaalisesti suuntautuvaa tukijalan jarrutustyötä saavuttaakseen pidempiä heittoja, suurempia keihään lähtönopeuksia sekä pidempiä vetopituuksia. Pystysuuntaista tukijalalle törmäämistä säätelemällä voidaan mahdollisesti mukauttaa keihään lähtökulmaa. Heittäjän vauhdinjuoksun nopeuden kasvaessa myös jarrutustyötä on kyettävä tekemään enemmän, ja jarrutustyötä voidaan tehostaa pidentämällä tukijalan askelta. Vauhdinjuoksun lisääminen saattaa kuitenkin vaikeuttaa keihään asennon hallintaa.

Naisheittäjillä riittävä voimantuotto tukijalan kontaktin aikana mahdollistaa korkeamman lantion asennon sekä korkeamman irrotuskorkeuden. Optimaalisen keihään lentoasennon saavuttamiseksi tukijalan horisontaalisesti suuntautuvaa jarrutustyötä tulisi tehostaa. Tukijalan askel tulisi astua kantapäävoittoisesti jarrutustyön tehostamiseksi, mutta askeleen pituutta ei tule ylikorostaa. Heittäjän nopeus itsessään ei määritä heittosuorituskykyä, mutta jarrutuksen on kuitenkin oltava riittävää ennen heittohetkeä keihään oikeaan asentoon saattamiseksi.

Sekä mies- että naiskeihäänheittäjillä alavartalon voimantuotto-ominaisuuksien tulee olla vähintäänkin riittävät, jotta tukijalan jarrutustyö on tarpeeksi tehokasta heittäjän pysäyttämiseksi. Voimantuoton ja jarrutustyön merkitys korostuu erityisesti silloin, kun vauhdinjuoksun nopeutta pyritään lisäämään. Riittävä voimantuotto mahdollistaa samalla myös optimaalisen heittoasennon saavuttamisen ja ylläpitämisen heittohetkellä, jolloin nopeuden sekä voiman johtaminen keihääseen on tehokkaampaa. Keihäänheittosuoritus vaatii tasapainottelua juoksunopeuden, tuotettujen voimien, heittotekniikan, heittäjän asennon sekä keihään asennon hallinnan välillä, joten valmennuksen näkökulmasta on kuitenkin hyvin yksilöllistä, millä tavoin heittosuorituskykyä voidaan kehittää.

LÄHTEET

- Abdel-Aziz, Y. I. & Karara, H. M. (2015). Direct linear transformation from comparator coordinates into object space coordinates in close-range photogrammetry. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 81 (2), 103–107. doi:10.14358/PERS.81.2.103.
- Bartlett, R. M. (2009). The aerodynamics of javelin flight – A re-evaluation. *5 International Symposium on Biomechanics in Sports* (1987), 71–87.
- Bartlett, R. M. & Best, R. J. (1988). The biomechanics of javelin throwing: A review. *Journal of Sports Sciences* 6 (1), 1–38. doi:10.1080/02640418808729791.
- Bartlett, R. M., Müller, E., Lindinger, S., Brunner, F. & Morriss, C. (1996a). Three-dimensional evaluation of the kinematic release parameters for javelin throwers of different skill levels. *Journal of Applied Biomechanics* 12 (1), 58–71. doi:10.1123/jab.12.1.58.
- Bartlett, R. M., Müller, E., Raschner, C., Lindinger, S. & Jordan, C. (1995). Pressure distributions on the plantar surface of the foot during the javelin throw. *Journal of Applied Biomechanics* 11 (2), 163–176. doi:10.1123/jab.11.2.163.
- Bartlett, R. M., Stockill, N. P., Elliott, B. C. & Burnett, A. F. (1996b). The biomechanics of fast bowling in men's cricket: A review. *Journal of Sports Sciences* 14 (5), 403–424. doi:10.1080/02640419608727727.
- Best, R. & Bartlett, R. (2009). Ladies' javelin: Aerodynamics, flight simulation and biomechanical considerations. *5 International Symposium on Biomechanics in Sports*, 88–102.
- Best, R. J., Bartlett, R. M. & Morriss, C. J. (1993). A three-dimensional analysis of javelin throwing technique. *Journal of Sports Sciences* 11 (4), 315–328. doi:10.1080/02640419308730001.
- Best, R. J., Bartlett, R. M. & Sawyer, R. A. (1995). Optimal javelin release. *Journal of Applied Biomechanics* 11 (4), 371–394. doi:10.1123/jab.11.4.371.
- Borgström, A. (2000). The development of the javelin. *IAAF New Studies in Athletics* 15 (3/4), 25–28.
- Burden, A. M. & Bartlett, R. M. (1990). A kinematic investigation of elite fast and fast medium cricket bowlers. *8 International Symposium on Biomechanics in Sports*, 41–46.
- Burnett, A. F., Elliott, B. C. & Marshall, R. N. (1995). The effect of a 12-over spell on fast bowling technique in cricket. *Journal of Sports Sciences* 13 (4), 329–341. doi:10.1080/02640419508732247.

- Campos, J., Brizuela, G. & Ramón, V. (2004). Three-dimensional kinematic analysis of elite javelin throwers at the 1999 IAAF World Championships in Athletics. *IAAF New Studies in Athletics* 9 (21), 47–57.
- Campos, J., Brizuela, G., Ramon, V. & Gamez, J. (2002). Analysis of kinematics parameters between Spanish and world class javelin throwers. *20 International Symposium on Biomechanics in Sports*, 107–110.
- Chowdhury, H., Alam, F., Muscara, A. & Mustary, I. (2013). An experimental study of new rule javelins. *Procedia Engineering* 60, 485–490. doi:10.1016/j.proeng.2013.07.076.
- Elliott, B. C., Foster, D. H. & Grey, S. (1986). Biomechanical and physical factors influencing fast bowling. *Australian Journal of Sport and Medicine in Sport* 18 (1), 16–21.
- Elliott, B. C., Grove, J. R. & Gibson, B. (1988). Timing of the lower limb drive and throwing limb movement in baseball pitching. *International Journal of Sport Biomechanics* 4 (1), 59–67. doi:10.1123/ijsb.4.1.59.
- Glazier, P. S., Paradisis, G. P. & Cooper, S. M. (2000). Anthropometric and kinematic influences on release speed in men's fast-medium bowling. *Journal of Sports Sciences* 18 (12), 1013–1021. doi:10.1080/026404100446810.
- Gregor, R. J. & Pink, M. (1985). Biomechanical analysis of a world record javelin throw: A case study. *International Journal of Sport Biomechanics* 1 (1), 73–77. doi:10.1123/ijsb.1.1.73.
- Guido, J. A. Jr. & Werner, S. L. (2012). Lower-extremity ground reaction forces in collegiate baseball pitchers. *Journal of Strength and Conditioning Research* 26 (7), 1782–1785. doi:10.1519/JSC.0b013e31824e1211.
- Hatton, L. (2005). Optimising the javelin throw in the presence of prevailing winds. Faculty of Computing, Information Systems and Mathematics, University of Kingston. 1–16.
- Howenstein, J., Kipp, K. & Sabick, M. (2020). Peak horizontal ground reaction forces and impulse correlate with segmental energy flow in youth baseball pitchers. *Journal of Biomechanics* 108, 109909. doi:10.1016/j.jbiomech.2020.109909.
- Hubbard, M. & Alaways, L. W. (1987). Optimum release conditions for the new rules javelin. *International Journal of Sport Biomechanics* 3 (3), 207–221. doi:10.1123/ijsb.3.3.207.
- Hubbard, M. & Bergman, C. D. (1989). Effect of vibrations on javelin lift and drag. *International Journal of Sport Biomechanics* 5 (1), 40–59. doi:10.1123/ijsb.5.1.40.
- Hubbard, M. & Laporte, S. (1997). Damping of javelin vibrations in flight. *Journal of Applied Biomechanics* 13 (3), 269–286. doi:10.1123/jab.13.3.269.

- Hurrion, P. D., Dyson, R. & Hale, T. (2000). Simultaneous measurement of back and front foot ground reaction forces during the same delivery stride of the fast-medium bowler. *Journal of Sports Sciences* 18 (12), 993–997. doi:10.1080/026404100446793.
- Hurrion, P., Dyson, R., Hale, T. & Janaway, L. (2002). Ground reaction forces occurring during the delivery stride of javelin throwing. *20 International Symposium on Biomechanics in Sports*. 111–114.
- IAAF (2000). Javelin technical model. IAAF CECS Level II event specific theory. Opetusmateriaali. Viitattu 7.2.2023. <https://chelmsfordathleticsclub.hitssports.com>.
- Jung, J., Kim, D. S., Kang, H., Chae, W., Lim, Y., Yoon, C. & Lee, H. (2012). Kinematic analysis of the women's javelin throw at the IAAF World Championship, Daegu 2011. *30 International Conference on Biomechanics in Sports*, 41–44.
- Kageyama, M., Sugiyama, T., Kanehisa, H. & Maeda, A. (2015). Difference between adolescent and collegiate baseball pitchers in the kinematics and kinetics of the lower limbs and trunk during pitching motion. *Journal of Sports Science & Medicine* 14 (2), 246–255.
- Kiely, N., Pickering Rodriguez, L., Watsford, M., Reddin, T., Hardy, S. & Duffield, R. (2021). The influence of technique and physical capacity on ball release speed in cricket fast-bowling. *Journal of Sports Sciences* 39 (20), 2361–2369. doi:10.1080/02640414.2021.1933349.
- King, M., Worthington, P. & Ranson, C. (2016). Does maximising ball speed in cricket fast bowling necessitate higher ground reaction forces? *Journal of Sports Sciences* 34 (8), 707–712. doi:10.1080/02640414.2015.1069375.
- Komi, P. V. & Mero, A. (1985). Biomechanical analysis of Olympic javelin throwers. *International Journal of Sport Biomechanics* 1 (2), 139–150. doi:10.1123/ijsb.1.2.139.
- Korjus, T. (1988). Keihäänheittäjän biomekaanisten muuttujien ja alustaan kohdistuvien voimien suhteista keihään lähtönopeuteen ja -kulmaan. Jyväskylän yliopisto. Liikuntabiologian laitos. Pro gradu -tutkielma. Viitattu 19.3.2024.
- Krzyszowski, J. & Kipp, K. (2021). Prediction of throwing distance in the men's and women's javelin final at the 2017 IAAF world championships. *Journal of Sports Sciences* 39 (9), 1055–1059. doi:10.1080/02640414.2020.1856462.
- Köhler, H.-P. & Witt, M. (2023). Energy flow in men's javelin throw and its relationship to joint load and performance. *PeerJ* 11, e1608111. doi:10.7717/peerj.16081.
- Lehmann, F. (13.11.2014). Biomechanics of javelin throwing. Esitelmä. 3rd World Javelin Conference, Kuortane.

- Lehmann, F. (2010). Biomechanical analysis of the javelin throw at the 2009 IAAF World Championships in athletics. *IAAF New Studies in Athletics* 25 (3/4), 61–77.
- Liu, H., Leigh, S. & Yu, B. (2010). Sequences of upper and lower extremity motions in javelin throwing. *Journal of Sports Sciences* 28 (13), 1459–1467. doi:10.1080/02640414.2010.514004.
- Liu, H., Leigh, S. & Yu, B. (2014). Comparison of sequence of trunk and arm motions between short and long official distance groups in javelin throwing. *Sports Biomechanics* 13 (1), 17–32. doi:10.1080/14763141.2013.865138.
- MacWilliams, B. A., Choi, T., Perezous, M. K., Chao, E. Y. & McFarland, E. G. (1998). Characteristic ground-reaction forces in baseball pitching. *The American Journal of Sports Medicine* 26 (1), 66–71. doi:10.1177/03635465980260014101.
- Matsuo, T., Escamilla, R. F., Fleisig, G. S., Barrentine, S. W. & Andrews, J. R. (2001). Comparison of kinematic and temporal parameters between different pitch velocity groups. *Journal of Applied Biomechanics* 17 (1), 1–13. doi:10.1123/jab.17.1.1.
- McGrath, J. W., Neville, J., Stewart, T., Lamb, M., Alway, P., King, M. & Cronin, J. (2022). The relationship between bowling intensity and ground reaction force in cricket pace bowlers. *Journal of Sports Sciences* 40 (14), 1602–1608. doi:10.1080/02640414.2022.2094561.
- McNally, M. P., Borstad, J. D., Oñate, J. A. & Chaudhari, A. M. (2015). Stride leg ground reaction forces predict throwing velocity in adult recreational baseball pitchers. *Journal of Strength and Conditioning Research* 29 (10), 2708–2715. doi:10.1519/JSC.0000000000000937.
- Menzel, H.-J. (1986). Biomechanics of javelin throwing. *New Studies in Athletics* 3, 85–98.
- Mero, A., Komi, P. V., Korjus, T., Navarro, E. & Gregor, R. J. (1994). Body segment contributions to javelin throwing during final thrust phases. *Journal of Applied Biomechanics* 10 (2), 166–177. doi:10.1123/jab.10.2.166.
- Morriss, C. J. & Bartlett, R. M. (1996). Biomechanical factors critical for performance in the men's javelin throw. *Sports Medicine* 21 (6), 438–446. doi:10.2165/00007256-199621060-00005.
- Morriss, C., Bartlett, R., Fowler, N. (1997). Biomechanical analysis of the men's javelin throw at the 1995 World Championships in athletics. *IAAF New Studies in Athletics* 12 (2/3), 31–41.

- Murakami, M., Ishikawa, M., Tanabe, S. & Ito, A. (2018). Relation between release parameters and throwing distance of the javelin throw. *International Society of Biomechanics in Sports* 36 (1), 574–577. doi: <https://commons.nmu.edu/isbs/vol36/iss1/128>.
- Murakami, M., Tanabe, S., Ishikawa, M. & Ito, A. (2017). The relationship between approach run kinematics and javelin throwing performance. *Asian Journal of Coaching Science* 1 (1), 1–14. doi:10.29426/ajcs.201712_1(1).0001.
- Murakami, M., Tanabe, S., Isolehto, J., Komi, P. V. & Ito, A. (2006). Biomechanical analysis of the javelin at the 2005 IAAF World Championships in Athletics. *New Studies in Athletics* 21 (2), 67–80.
- Nicholson, K. F., Hulburt, T. C., Kimura, B. M. & Aguinaldo, A. L. (2022). Relationship between ground reaction force and throwing arm kinetics in high school and collegiate pitchers. *The Journal of Sports Medicine and Physical Fitness* 62 (9), 1179–1183. doi:10.23736/S0022-4707.21.13150-0.
- Ogiolda, P. (1993). The javelin throw and the role of speed in throwing events. *IAAF New Studies in Athletics* 8 (3), 7–13.
- Pavlovic, R., Idrizovic, K., Savic, V., Vrcic, M., Radulovic, N. & Simeonov, A. (2020). The differences of kinematic parameters javelin throw between male and female finalists World Championship (Berlin, 2009-Daegu, 2011). *American Journal of Sports Science and Medicine* 8 (1), 8–15. doi:10.12691/ajssm-8-1-2.
- Portus, M. R., Mason, B. R., Elliott, B. C., Pfitzner, M. C. & Done, R. P. (2004). Technique factors related to ball release speed and trunk injuries in high performance cricket fast bowlers. *Sports Biomechanics* 3 (2), 263–284. doi:10.1080/14763140408522845.
- Portus, M. R., Sinclair, P. J., Burke, S. T., Moore, D. J. A. & Farhart, P. J. (2000). Cricket fast bowling performance and technique and the influence of selected physical factors during an 8-over spell. *Journal of Sports Sciences* 18 (12), 999–1011. doi:10.1080/026404100446801.
- Ramsey, D. K. & Crotin, R. L. (2019). Stride length: the impact on propulsion and bracing ground reaction force in overhand throwing. *Sports Biomechanics* 18 (5), 553–570. doi:10.1080/14763141.2018.1442872.
- Ranson, C., Burnett, A. F., King, M. A., Patel, N. & O'Sullivan, P. P. (2008). The relationship between bowling action classification and three-dimensional lower trunk motion in fast bowlers in cricket. *Journal of Sports Sciences* 26 (3), 267–276. doi:10.1080/02640410701501671.

- Rich, R. G., Gregor, R. J., Whiting, W. C. & McCoy, R. W. (1984). Kinematic analysis of elite javelin throwers. *Second International Symposium of Biomechanics in Sports*, 53–60.
- Sakurai, M., Szymanski, D. J., Qiao, M. & Crotin, R. L. (2023). Combined countermovement jump testing and motion analysis as the future of performance assessment for baseball pitchers: A narrative review. *Journal of Strength and Conditioning Research* 37 (6), 1327–1338. doi:10.1519/JSC.0000000000004261.
- Saratlija, P., Zagorac, N. & Babic, V. (2013). Influence of kinematic parameters on result efficiency in javelin throw. *Collegium antropologicum* 37 (2), 31–6.
- Tauchi, K., Murakami, M., Endo, T., Takesako, H. & Gomi, K. (2009). Biomechanical analysis of elite javelin throwing technique at the 2007 IAAF World Championships in Athletics. *Bulletin of Studies in Athletics of JAAF* 5, 143–149.
- Thotawaththa, P. C. & Chandana, A. W. S. (2021). Sagittal plane release parameters of the javelin throwing: A review. *IOSR Journal of Sports and Physical Education* 8 (6), 12–22. doi:10.9790/6737-08061222.
- Vassilios, P. & Iraklis, K. (2013). Kinematics of the delivery phase and release parameters of top female javelin throwers. *Kinesiologia Slovenica* 19 (1), 32–43.
- Veltink, P. H., Liedtke, C., Droog, E. & van der Kooij, H. (2005). Ambulatory measurement of ground reaction forces. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering* 13 (3), 423–427. doi:10.1109/TNSRE.2005.847359.
- Viitasalo, J., Mononen, H. & Norvapalo, K. (2003). Release parameters at the foul line and the official result in javelin throwing. *Sports biomechanics* 2 (1), 15–34. doi:10.1080/14763140308522805.
- Whiting, W. C., Gregor, R. J. & Halushka, M. (1991). Body segment and release parameter contributions to new-rules javelin throwing. *International Journal of Sport Biomechanics* 7 (2), 111–124. doi:10.1123/ijspb.7.2.111.
- World Athletics. (2021). Javelin throw. Verkkosivu. Viitattu 28.1.2023. <https://www.worldathletics.org/disciplines/throws/javelin-throw>.
- World Athletics. (2022). Book C2.1 Technical Rules. Yleisurheilun kansainväliset säännöt. Viitattu 28.1.2023. <https://www.worldathletics.org/about-iaaf/documents/book-of-rules>.
- World Athletics. (2024). Search for an athlete. Tilastopalvelu. Viitattu 27.3.2024. <https://worldathletics.org/athletes>.

- Wormgoor, S., Harden, L. & Mckinon, W. (2010). Anthropometric, biomechanical, and isokinetic strength predictors of ball release speed in high-performance cricket fast bowlers. *Journal of Sports Sciences* 28 (9), 957–965. doi:10.1080/02640411003774537.
- Worthington, P. J., King, M. A. & Ranson, C. A. (2013a). Relationships between fast bowling technique and ball release speed in cricket. *Journal of Applied Biomechanics* 29 (1), 78–84. doi:10.1123/jab.29.1.78.
- Worthington, P. J., King, M. A. & Ranson, C. A. (2013b). The influence of cricket fast bowlers' front leg technique on peak ground reaction forces. *Journal of Sports Sciences* 31 (4), 434–441. doi:10.1080/02640414.2012.736628.
- Yo, C. Yi-Chen, C. Tang-Yun, L. Wen-Hsing, C. & Jia-Hao, C. (2020). Kinematics differences between personal best and worst throws in actual javelin competition. *International Journal of Performance Analysis in Sport* 20 (1), 10–18. doi:10.1080/24748668.2019.1697580.