

MIESTEN MOUKARINHEITON KINEMATIikka

Koko kehon liikeanalyysi

Otto E. Kilpi

Biomekaniikan pro gradu -tutkielma

Liikuntatieteellinen tiedekunta

Jyväskylän yliopisto

Kesä 2020

Työn ohjaajat: Janne Avela, Tomi Vänttinen

TIIVISTELMÄ

Kilpi, Otto. 2020. Miesten moukarinheiton kinematiikka: koko kehon liikeanalyysi. Liikuntatieteellinen tiedekunta, Jyväskylän yliopisto, biomekaniikan pro gradu -tutkielma, 77 s., 5 liitettä.

Johdanto. Moukarin irrottua heittäjän kädestä, sen lentorata on ilmanvastukseen liittyviä tekijöitä lukuun ottamatta vastaava, kuin muillakin heittokappaleilla. Heittopituuteen vaikuttavat moukarin lähtönopeus, lähtökorkeus ja lähtökulma. Näistä lähtönopeudella on ylivoimaisesti suurin vaikutus lopputulokseen. Moukarinheiton biomekaanisten muuttujien yksityiskohtainen tarkastelu on lajin eteenpäinviemisen kannalta ensiarvoisen tärkeää. Tässä tutkimuksessa pyritään selvittämään koko kehon liikeanalyysin avulla heittopituuden kannalta suotuisia teknisiä malleja. Samalla tutustutaan aiempiin moukarinheittoa käsitteleviin tutkimuksiin.

Tutkimusmenetelmät. Analysoidut heitot ($n=7$) kuvattiin kahdella Panasonic GH-5-videokameralla (180 kuvaa/s) kansainvälisessä Paavo Nurmi Games -kilpailussa Turussa kesäkuussa 2017 ja kansallisissa Kalevan Kisoissa (suomenmestaruuskilpailut) Seinäjoella heinäkuussa 2017. Viidessä suorituksessa käytettiin neljän pyörähdyksen heittotekniikkaa ja loput kaksi tehtiin kolmella ja viidellä pyörähdyksellä, kummallakin yksi heitto. Koko kehon liikeanalyysi (18 pistettä + moukarin kuula) tehtiin APAS 3D -liikeanalyysiohjelmistolla 60 kuvaa/s. Analyyseissä pyrittiin löytämään yhtäläisyyksiä ja eroavaisuuksia neljän pyörähdyksen heitoista, vertailtiin kahta lähes yhtä pitkää heittoa, kahta saman heittäjän erimittaista heittoa sekä kolmen, neljän ja viiden pyörähdyksen heittoa keskenään.

Tulokset. Pisin analysoiduista heitoista oli vuoden 2017 maailmantilaston kolmanneksi pisin heitto (82,40 m). Heittopituudet korreloivat erittäin vahvasti moukarin lähtönopeuden kanssa ($r=0,98$; $n=7$; $p<0,001$), jonka vaakakomponentti kehittyi pääosin kahden ensimmäisen pyörähdyksen aikana ja pystykomponentti koko vauhdinoton ajan. Tukivaiheiden nopeuden lisääntymisen kanssa vahvimmin korreloivat lantio-hartia-kulman muutos ($r=-0,843$; $n=56$; $p<0,001$), heittäjän massakeskipisteen korkeuden muutos ($r=0,759$; $n=56$; $p<0,001$), tukijalan polvikulman muutos ($r=0,942$; $n=56$; $p<0,001$) sekä loppuvedon pituus asteina ($r=0,938$; $n=7$; $p<0,001$).

Pohdinta. Tämän tutkimuksen tulokset toistivat usean analysoidun muuttujan osalta aiempien tutkimusten löydöksiä. Toisaalta esiteltiin myös useita muuttujia, joille ei juuri ollut olemassa aiempia vertailuarvoja. Löydettyjen uusien korrelaatioiden pohjalta olisi tärkeää tehdä lisätutkimusta, jotta niitä voitaisiin tarkastella suuremmassa heittomäärässä. Usean muuttujan osalta vahvistui käsitys siitä, että moukarinheitonkaltaisessa äärimmäisen monimutkaisessa suorituksessa samankaltaiseen lopputulokseen voidaan päätyä hyvinkin erityyppisillä suoritustekniikoilla. Saman urheilijan erimittaisissa heitoissa erot olivat pieniä, mutta yksittäisen urheilijan kohdalla pienet erot saattavat ratkaista suorituksen onnistumisen. Pyörähdysten määrä vaikutti suoritukseen siten, että viidellä pyörähdyksellä pyörähdyskohtaiset vaihtelut eri pyörähdysten välillä olivat huomattavan pieniä, kun taas kolmen pyörähdyksen heitossa vaihtelua yksittäisten pyörähdysten välillä oli enemmän. Aineisto kerättiin kilpailusuorituksista, jolloin liikeanalyysi jouduttiin tekemään manuaalisesti, mikä rajoitti raskautensa vuoksi analysoitujen heittojen lukumäärää. Analysoitujen heittojen vähäisen määrän vuoksi on tämän tutkimuksen tulosten yleistettävyyteen suhtauduttava varauksella. Tuloksista voidaan kuitenkin tehdä oletuksia, joiden vahvistaminen vaatii suuremmalla aineistolla tehtäviä jatkotutkimuksia.

Asiasanat: moukarinheitto, biomekaniikka, kinematiikka, liikeanalyysi

ABSTRACT

Kilpi, Otto. 2020. Kinematics of men's hammer throw: full body movement analysis. Faculty of Sport and Health Sciences, University of Jyväskylä, Master's thesis in biomechanics, 77 pp., 5 appendices.

Introduction. After the hammer has been released, its trajectory is similar to any projectile except for the factors related to air resistance. Throwing distance is affected by speed, height and angle of release, where the release speed has the greatest effect. Studying biomechanical aspects is crucial for development of hammer throw. The aim of this study was to examine which technical models are propitious for longer throwing distances.

Methods. Analyzed throws ($n=7$) were recorded with two Panasonic GH-5 video cameras (180 fps) at the international Paavo Nurmi Games in Turku (June 2017) and national Kalevan Kisat (the Finnish Championships) in Seinäjoki (July 2017). Five throws were performed with four turns and one with three and five each. Full body motion analysis (18 points + hammer head) was made at 60 fps with APAS 3D motion analysis software. In analyzes, four different comparisons were made: four-turn-throws, two throws with almost the same throw distance, two throws from the same thrower and throws from separate throwers with different number of turns (3-5) were compared with each other.

Results. The longest of the seven throws analyzed was at the third place in year 2017 world rankings (82,40 m). Throw distance correlated strongly with release speed ($r = 0,98$; $n=7$; $p<0,001$), of which horizontal component developed mainly during the first two turns while vertical component increased throughout the whole turn phase. The strongest correlations with hammer speed increase were found for the changes in body rotation ($r=-0,843$; $n=56$; $p<0,001$), thrower center of mass height ($r=0,759$; $n=56$; $p<0,001$) and knee angle of the support leg ($r=0,942$; $n=56$; $p<0,001$). Delivery phase length in degrees also correlated strongly with hammer speed increase ($r=0,938$; $n=7$; $p<0,001$).

Discussion. The results of this study replicated many findings from previous studies. A great deal of new correlations which would need more research were also founded. Assumption was fortified, that in complicated event like hammer throw, same results can be achieved by various techniques. Differences between two throws performed by the same thrower were small but they can still adjudicate if the throw succeeds or not. Number of turns in a throw affected variation between isolated turns. The number of analyzed throws was small because this study was based on throws executed in the real competitions requiring time consuming manual motion analysis afterwards. Due to small sample size, the generalizations based on the results of this study needs to be treated with caution. Therefore more research is needed in order to confirm the hypotheses emerged from the present results.

Keywords: hammer throw, biomechanics, kinematics, motion analysis

KÄYTETYT LYHENTEET JA MERKINNÄT

CoM	heittäjän massakeskipiste
delivery	loppuveto (viimeisen kahdentuen vaiheen alusta irrotukseen)
ds	kahden tuen vaihe
hp	korkein kohta
lp	matalin kohta
release	irrotus
sd	keskihajonta (myös \pm)
ss	yhden tuen vaihe
\bar{x}	keskiarvo

SISÄLLYS

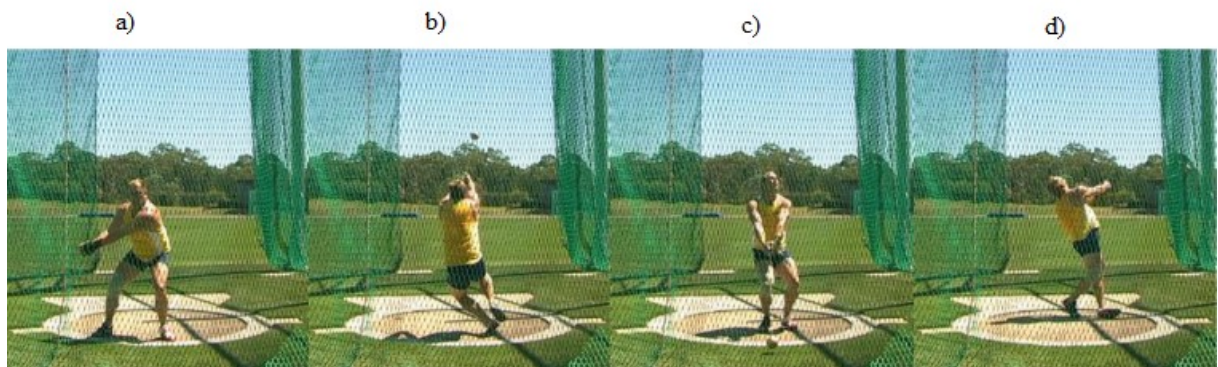
TIIVISTELMÄ

1	JOHDANTO	1
2	HEITON VAIHEET JA VÄLINEISTÖ	3
3	MOUKARINHEITON BIOMEKAANISET MUUTTUJAT	7
3.1	Heittäjän dynamiikka.....	7
3.2	Heittovälineen dynamiikka.....	10
4	MOUKARINHEITON LIIKEANALYYSI.....	15
5	TUTKIMUKSEN TAVOITE JA TUTKIMUSKYSYMYKSET	17
6	TUTKIMUSMENETELMÄT	18
6.1	Koehenkilöt	18
6.2	Analysoidut suoritukset	18
6.3	Videokuvaus ja liikeanalyysi.....	19
6.4	Analysoidut muuttujat	22
6.5	Tilastolliset analyysit.....	23
7	TULOKSET	24
7.1	Moukarin nopeuden kehitys	25
7.2	Moukarin kulkema matka.....	28
7.3	Moukarin korkein ja matalin kohta	30
7.4	Tukivaiheiden kestot	32
7.5	Vartalon kierto ja laahauskulma	37
7.6	Heittäjän massakeskipisteen liike.....	42
7.7	Polvi- ja lonkkakulmat	50
8	POHDINTA	53
8.1	Kokonaiskuva ja tutkimuskysymys 1	53
8.2	Tutkimuskysymys 2.....	62

8.3	Tutkimuskysymys 3.....	65
8.4	Tutkimuskysymys 4.....	68
8.5	Virhelähteet ja limitaatiot.....	71
8.6	Yhteenveto.....	71
LÄHTEET		75
LIITTEET		

1 JOHDANTO

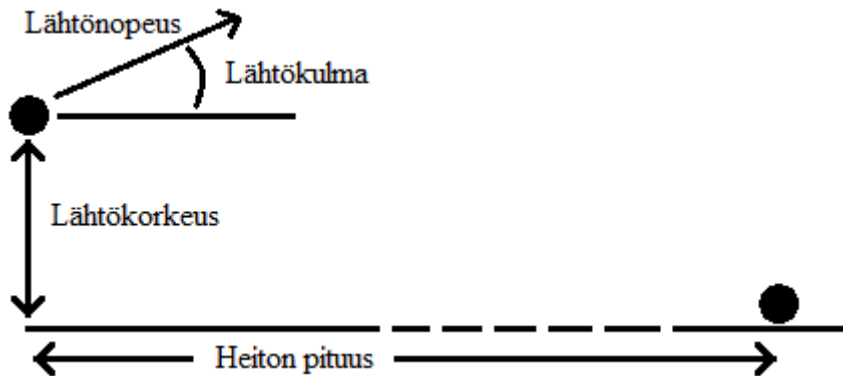
Moukarinheitto on kuulantyönnön sekä keihään- ja kiekonheiton ohella yksi neljästä yleisurheiluun kuuluvasta heittolajista. Muiden heittolajien tavoin, moukarinheitossakin on tarkoituksena lajin sääntöjä noudattaen heittää väline mahdollisimman pitkän matkan päähän heittopaikasta. (Tancred & Carter 1980). Heitto alkaa yleensä kahdella alkupyörityksellä, joilla annetaan moukarille riittävä alkunopeus ja saatetaan se oikealle pyörimisradalle. Alkupyörityksiä seuraa siirtyminen vauhtipyörähdysiin. Jokainen vauhtipyörähdys koostuu kahden tuen vaiheesta, jolloin molemmat jalat ovat maassa, sekä yhden tuen vaiheesta, jolloin heittäjä pyörähtää ympäri yhden jalan varassa. Vauhtipyörähdysia tehdään yleensä kolme tai neljä, harvemmin viisi, minkä jälkeen loppuvedolla saatetaan moukari lentoradalleen (kuva 1). (Judge 2000b; Rinta-aho 2002, 47 - 48.)



KUVA 1. Moukarinheiton tärkeimmät vaiheet: a) siirtyminen alkupyörityksistä vauhtipyörähdysiin, b) yhden tuen vaihe, c) kahden tuen vaihe ja d) loppuveto ja irrotus (Brice 2014).

Moukarin irrottua heittäjän kädestä, sen lentoradan pituuteen vaikuttavat samat tekijät kuin muillakin heittokappaleilla. Ilmassa ollessaan siihen vaikuttavat ilmanvastus ja painovoima eli gravitaatio. (Dapena & Teves 1982.) Ilmanvastuksen on tutkimusten mukaan todettu lyhentävän heittopituutta 2–6 % (Hubbard 1989; De Mestre 1990; Dapena ym. 2003). Moukarinheittäjä ei kuitenkaan voi vaikuttaa gravitaatioon, eikä juuri ilmanvastukseenkaan, joten lajin biomekaaninen tarkastelu tulisi kohdentaa muihin heittopituuteen vaikuttaviin muuttujiin (Brice 2014). Hubbardin (1989) mukaan moukarin lentorata on parabolinen, jos ilmanvastus

jätetään huomiotta. Näin ollen heittopituuteen vaikuttavat tekijät ovat moukarin lähtönopeus, lähtökorkeus ja lähtökulma (kuva 2). Näistä lähtönopeudella on ylivoimaisesti suurin vaikutus lopputulokseen. (Otto 1991; Morriss & Bartlett 1995; Rinta-aho 2002, 22; Dapena ym. 2003.) Moukarinheiton valmistuksessa pyritään heittotekniikan yksityiskohtien muokkauksilla vaikuttamaan edellä mainittuihin tekijöihin. Käytännössä lähtönopeus yritetään maksimoida, kun taas lähtökulmalle optimaalinen arvo on noin 44 astetta (Otto 1991; Hubbard 2000).



KUVA 2. Heiton pituuteen vaikuttavat tekijät.

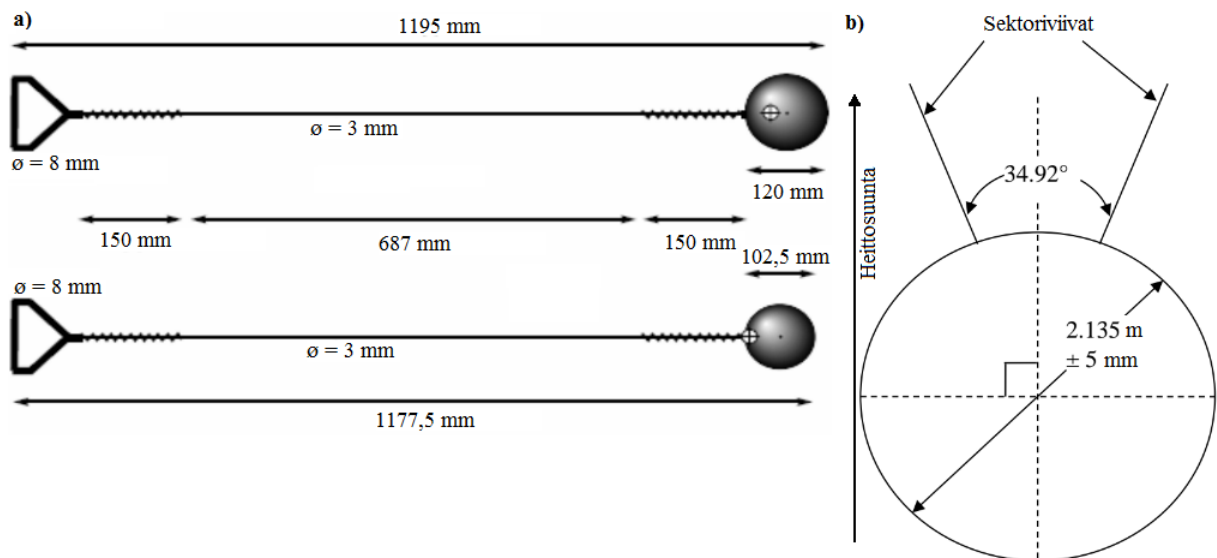
Sekä heittoväline, että -tekniikka ovat kehittyneet ajan saatossa vaikuttaen molemmat osaltaan heittopituuksien kehitykseen. Ensimmäisessä raportoidussa tekniikassa heittäjä seisoi toinen kylki heittosuuntaan ja moukaria kiihdytettiin heiluttamalla sitä puolelta toiselle. 1800-luvun puolessa välissä otettiin käyttöön pään yli tehtävät pyöritykset. Nykyään käytetyllä tekniikalla, jossa heittäjä pyörii heittoringissä toisen jalan kantapään, jalkaterän ulkosyrjän ja päkiän kautta ympäri, heitettiin dokumentoidusti ensimmäisen kerran vuonna 1954. (Tancred & Carter 1980.) Pisin koskaan heitetty heitto on neuvostoliittolaisen Yuriy Sedykhin vuonna 1986 kolmella pyörähdyksellä heittämä maailmanennätys 86,74 m. Naisten vuonna 2016 neljällä pyörähdyksellä heitetty maailmanennätys 82,98 m on puolalaisen Anita Wlodarczykin nimissä. (World Athletics 2020.)

Moukarinheiton biomekaanisten muuttujien yksityiskohtainen tarkastelu on lajin eteenpäinviemisen kannalta ensiarvoisen tärkeää. Tässä tutkimuksessa pyritään selvittämään koko kehon liikeanalyysin avulla heittopituuden kannalta suotuisia teknisiä malleja. Samalla tutustutaan aiempiin moukarinheittoa käsitteleviin tutkimuksiin.

2 HEITON VAIHEET JA VÄLINEISTÖ

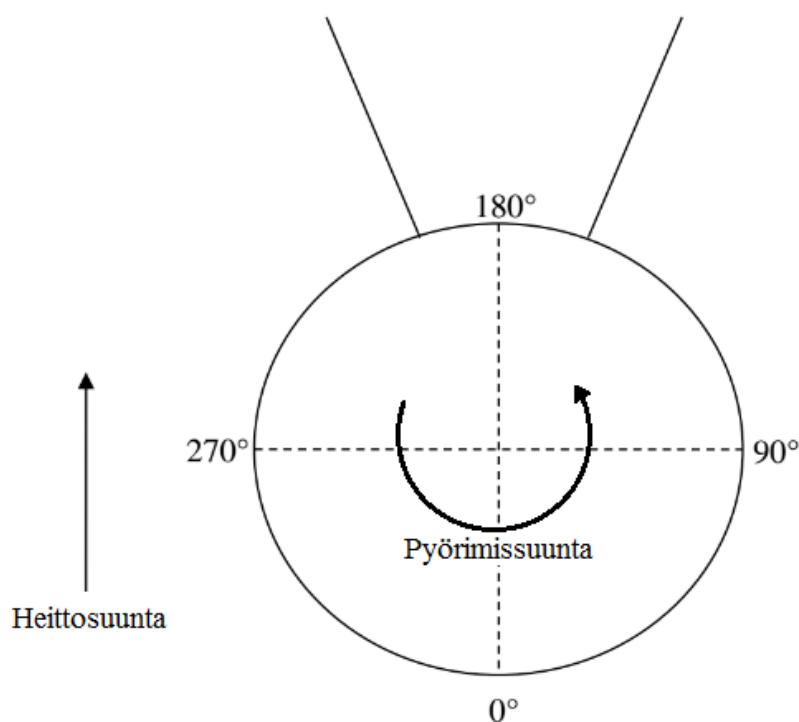
Nykyään välineenä käytettävä moukari koostuu kolmesta osasta; kahvasta, teräsvarresta ja metallipäästä eli kuulasta. Kahva on kolmionmallinen ja se kiinnitetään suorasta teräslangasta tehtyyn varteen silmukalla. Varren toiseen päähän on kiinnitetty metallista valmistettu kuula. Naiset ja miehet käyttävät mitoiltaan hieman toisistaan poikkeavia välineitä. Naisten moukarin kokonaispituus kahvan sisäpinnasta kuulan ulkoreunaan on 1160 - 1195 mm, vähimmäispaino 4,00 kg ja kuulan halkaisijan on oltava 95 - 110 mm. Vastaavat mitat miesten moukarille ovat 1175 - 1215 mm, 7,26 kg ja 110 - 130 mm (kuva 3a). (Rinta-aho 2002, 14; Dapena ym. 2003; World Athletics 2019.)

Moukaria heitetään halkaisijaltaan 2,135 m (± 5 mm) olevasta, yleensä betonista valetusta kehästä. Heittokehää ympäröi heittohäkki, jolla varmistetaan katsojien, kilpailijoiden ja toimitsijoiden turvallisuus. Moukaria heitetään 34,92 asteen sektoriin, jonka ulkopuolelle pudonneet heitot katsotaan hylätyiksi (kuva 3b). Heitto tuomitaan hylätyksi myös, jos heittäjä astuu ulos heittokehästä heiton aikana tai sen etupuoliskolle heiton jälkeen. (Tancred & Carter 1980; Rinta-aho 2002, 10 - 12, 15.)



KUVA 3. a) Miesten (ylhällä) ja naisten moukarien mitat keskimäärin (Dapena ym. 2003). b) Moukarinheittokehän mitat ja heittosektori (mukaeltu Tancred & Carter 1980).

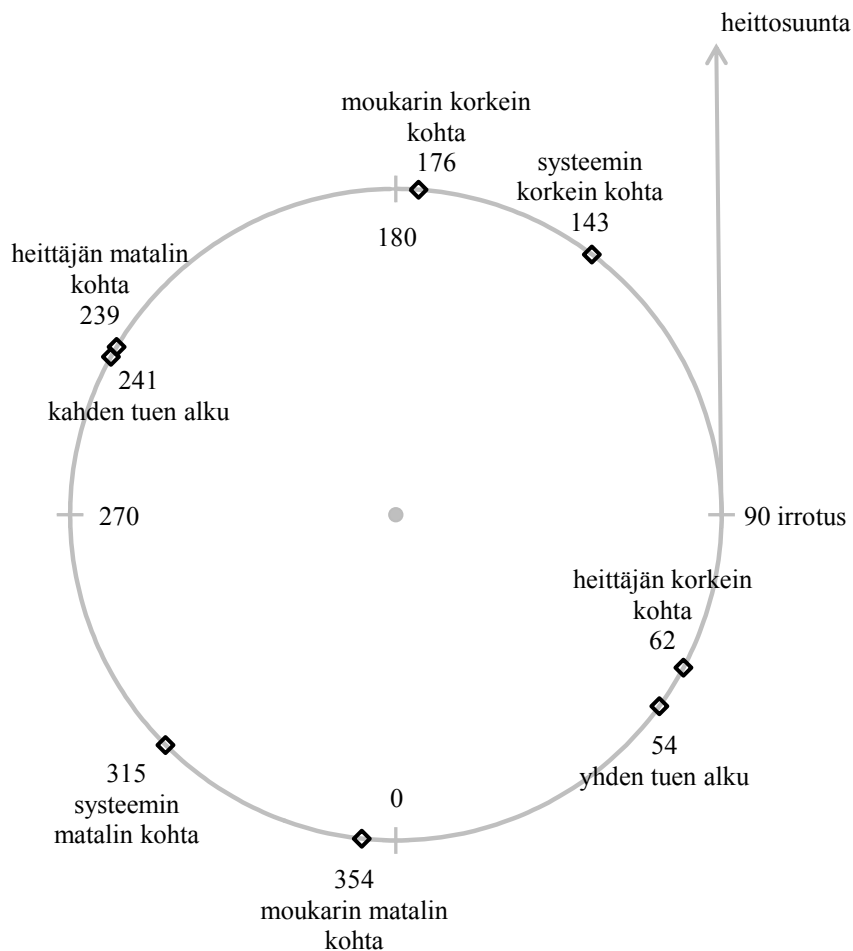
Alkupyöriytykset. Moukarinheittosuorituksen alussa heittäjä seisoo kehässä selkä heittosuuntaan päin. Vauhdinotto käynnistyy alkupyöriytyksillä, joissa moukaria pyöritetään pään yli pyöreätä rataa. Alkupyöriytysten tavoitteena on antaa moukarille riittävä alkunopeus ja saattaa se oikealle pyörimisradalle. Vaakanopeuden osuus kokonaisnopeudesta korostuu alkupyöriytysten aikana. On suositeltu, että moukarin alin kohta tulisi vastapäivään pyörivällä heittäjällä tässä vaiheessa olla oikean jalan edessä. (Simonyi 1980; Rinta-aho 2002, 47.) Alkupyöriytyksistä siirrytään vauhtipyörähdyksiin ja Judgen (2000a) mukaan tämä siirtymävaihe on heiton onnistumisen kannalta hyvin ratkaiseva. Tässä vaiheessa heittäjä laskee painopistettään ja kierrättää moukarin atsimuuttiastemallin 270 asteesta 90 asteeseen (kuva 4) pitäen molemmat jalat maassa (Judge 2000a).



KUVA 4. Heiton etenemisen kuvaamiseen käytettävä atsimuuttiastemalli vastapäivään pyörivälle heittäjälle (mukaeltu Judge 2000a).

Vauhtipyörähdykset. Vauhtipyörähdykset jaetaan kahteen osaan: kahden ja yhden tuen vaiheeseen. Kahden tuen vaiheessa heittäjän molemmat jalat ovat alustalla ja tällöin moukarin vauhtia voidaan kiihdyttää purkamalla vartalon kiertojäännitys. (Rinta-aho 2002, 47.) Morleyn (2003) mukaan lantio- ja hartialinjan välissä ei juuri saisi olla kiertoa moukarin saavuttaessa

alimman kohtansa. Kahden tuen vaihe alkaa moukarin ollessa heittäjän alkuasennosta katsotuna takana oikealla ylhäällä (yleensä 180–270°) ja se loppuu moukarin kiertyttyä noin 90 asteeseen. Kahden tuen vaiheen lopussa sekä vartalo, että jalat ovat kääntyneet vasemmalle pyörimissuuntaan moukarin mukana. Yhden tuen vaihe alkaa, kun oikea jalka irtoaa alustasta ja heittäjä pyörähtää vasemman jalan varassa ympäri tuoden oikean jalkansa nopeasti takaisin maahan. Yhden tuen vaiheen aikana heittäjän lantio kiertyy nopeammin kuin hartialinja aiheuttaen vartaloon kiertojännityksen. Vauhtipyörähdyksiä tehdään yleensä kolme tai neljä, harvemmin viisi, minkä jälkeen aloitetaan loppuveto. (Otto 1991; Morriss & Bartlett 1995; Judge 2000b; Rinta-aho 2002, 47.) Yhden vauhtipyörähdyksen eri vaiheiden ajoittuminen suhteessa moukarin sijaintiin on esitettyinä kuvassa 5.



KUVA 5. Yhden vauhtipyörähdyksen eri vaiheet suhteessa moukarin sijaintiin (mukaeltu Dapena 1986).

Loppuveto. Loppuveto alkaa, kun molemmat jalat ovat viimeisen pyörähdysen jälkeen maassa. Sen tarkoituksena on antaa moukarille maksimaalinen lähtönopeus ja oikea lähtökulma. Sitä kiihdytetään keskivartalon voimakkaalla kierrolla sekä polvien, lantion, selän ja olkapäiden ojennuksella ja irrotus tapahtuu moukarin ollessa noin hartian korkeudella. (Otto 1991; Judge 2000b; Rinta-aho 2002, 48.) Osassa moukarinheittotutkimuksista ensimmäinen vauhtipyörähdys katsotaan alkavaksi ensimmäisestä yhden tuen vaiheesta ja päättyvän sitä seuraavan kahden tuen vaiheen loppuun. Tällöin viimeinen pyörähdys koostuu viimeisestä yhden tuen vaiheesta ja loppuvedosta. Tutkimustuloksia tarkastellessa kannattaa kiinnittää huomiota siihen, mistä vauhtipyörähdykset katsotaan alkaviksi.

3 MOUKARINHEITON BIOMEKAANISET MUUTTUJAT

Dynamiikka koostuu kinetiikasta ja kinematiikasta. Kinematiikka tutkii yleisesti liikettä välittämättä sen syistä, kun taas kinetiikka keskittyy systeemiin vaikuttaviin voimiin sekä voimien ja liikkeen välisiin suhteisiin. Moukarinheitossa voidaan yhtäältä keskittyä heittäjän ja toisaalta heittovälineen dynamiikkaan. Taulukoissa 1 ja 2 on esimerkinomaisesti esitelty moukarinheitosuorituksesta analysoitavien biomekaanisten muuttujien arvoja Yuriy Sedykhin maailmanennätysheitosta (86,74 m).

TAULUKKO 1. Heittovälineen biomekaanisia muuttujia irrotushetkellä Yuriy Sedykhin maailmanennätysheitossa (Otto 1991).

nopeus	(m/s)	30,7
vaakanopeus	(m/s)	23,6
pystynopeus	(m/s)	19,7
kulma	(°)	39,9
korkeus	(m)	1,66

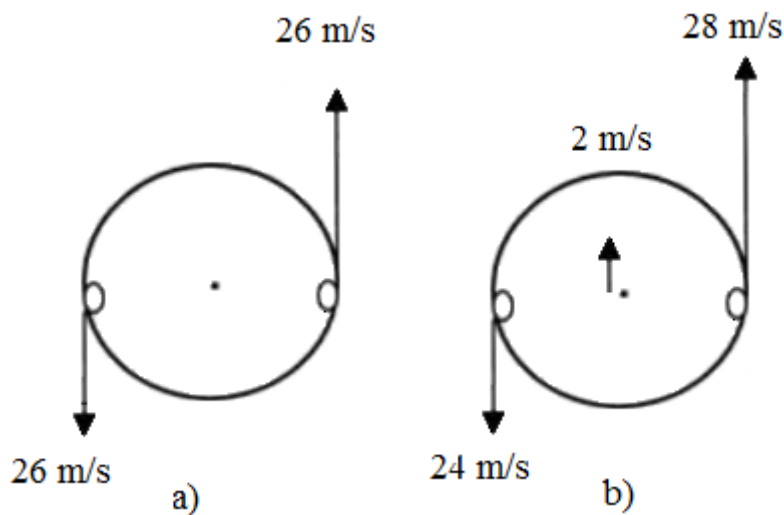
TAULUKKO 2. Tukivaiheiden kestot Yuriy Sedykhin maailmanennätysheitossa (mukaeltu Otto 1991).

	ss1	ds1	ss2	ds2	ss3	delivery
tukivaihe (s)	0,24	0,26	0,21	0,22	0,21	0,27

3.1 Heittäjän dynamiikka

Heittäjän liikkeistä analysoidaan yleensä koko suorituksen kesto, yksittäisten vauhtipyörähdysten kesto ja vauhtipyörähdysten vaiheiden, yhden ja kahden tuen vaiheen kestot. Myös muita moukarinheiton muuttujia tarkastellaan usein suhteessa edellä mainittuihin vaiheisiin. Esimerkiksi moukarin nopeuden kiihdyttäminen näyttäisi tapahtuvan pääosin kahden tuen vaiheen aikana. (Murofushi ym. 2007; Isele & Nixdorf 2010; Brice ym. 2011; Judge ym.

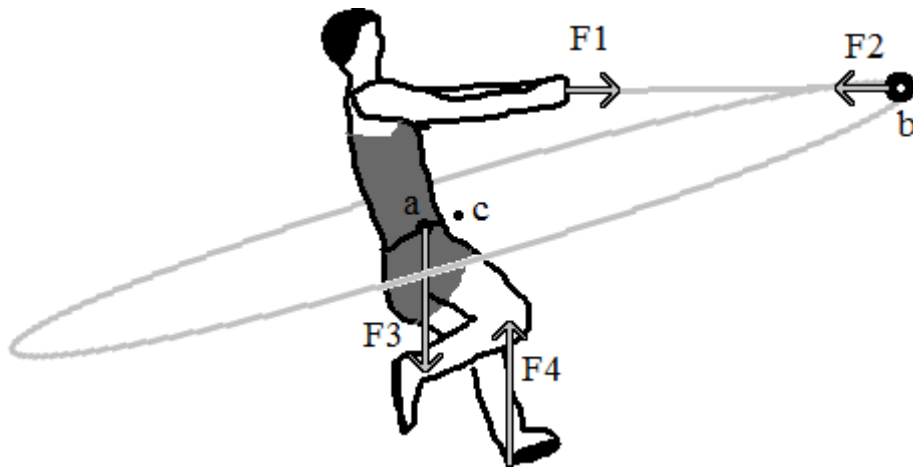
2016.) Tästä syystä valmennuksessa on pyritty kahden tuen vaiheen pidentämiseen ja yhden tuen vaiheen lyhentämiseen tuomalla oikea jalka nopeammin maahan ja toisaalta viivyttämällä sen maastairtoamista (Maheras 2009; Rojas-Ruiz & Gutiérrez-Dávila 2009). Dapena havaitsi kuitenkin jo 1989 tutkimuksessaan, ettei kahden tuen vaiheen ja moukarin kiihtymisen välillä ole suoraa yhteyttä. Maheras (2009) selittää pyörähdystensisäisten nopeuden vaihtelujen johtuvan ainakin osittain gravitaatiosta ja heittäjä-moukari -systeemin horisontaalisesta siirtymisestä. Gravitaatio aiheuttaa vertikaalinopeuden hidastumista moukarin ollessa nousevalla liikeradalla ja kiihtymistä laskevalla radalla. Heittäjä-moukari -systeemin horisontaali-nopeus taas vaikuttaa moukarin horisontaalinopeuteen joko vähentävästi tai lisäävästi riippuen siitä, ovatko nopeudet vastakkais- vai samansuuntaiset (kuva 6). (Maheras 2009.)



KUVA 6. Heittäjä-moukari -systeemin horisontaalinopeuden vaikutus moukarin horisontaalinopeuteen. Moukari kiertää a) paikallaan olevan rotaatiokeskipisteen ympäri, b) 2 m/s nopeudella liikkuvan rotaatiokeskipisteen ympäri (Maheras 2009).

Rinta-ahon (2002, 27) mukaan heittäjän tulee pudottaa painopistettään moukarin saavuttaessa korkeimman kohtansa. Vastaavasti jaloilla ojennetaan hieman moukarin ollessa alimmassa kohdassaan. Tällä on tarkoitus vaikuttaa heittäjä-moukari-systeemin tasapainoon. (Rinta-aho 2002, 27.) Myös Murofushi ym. (2007) totesi tutkimuksessaan massakeskipisteen nousevan ja laskevan pyörähdysten eri vaiheissa. Lisäksi he totesivat heittäjän vasemman ja oikean jalan tuottamien reaktiivoimien olevan pääasiassa pystysuuntaisia ja vaihtelevan myös pyörähdysten eri vaiheissa. Polvi- ja lantiokulmia vauhtipyörähdysten eri vaiheissa on kuitenkin tutkittu

suhteellisen vähän ja varsinkin tieteelliset julkaisut aiheesta puuttuvat. Maherasin (2009) mukaan heittäjä-moukari -systeemin pyörivä liike aiheuttaa teoriassa sen, ettei vaakasuuntaisia reaktivoimia maakontaktissa synny, sillä heittäjä ja moukari kohdistavat toisiinsa yhtä suuret, mutta vastakkaisuuntaiset voimat, jotka pitävät heittäjän ja moukarin omilla kiertoradoillaan ja siten dynaamisessa tasapainossa (kuva 7) (Maheras 2009). Käytännötutkimuksissa näitä vaakasuuntaisia reaktivoimia on kuitenkin havaittu (Murofushi ym. 2007).



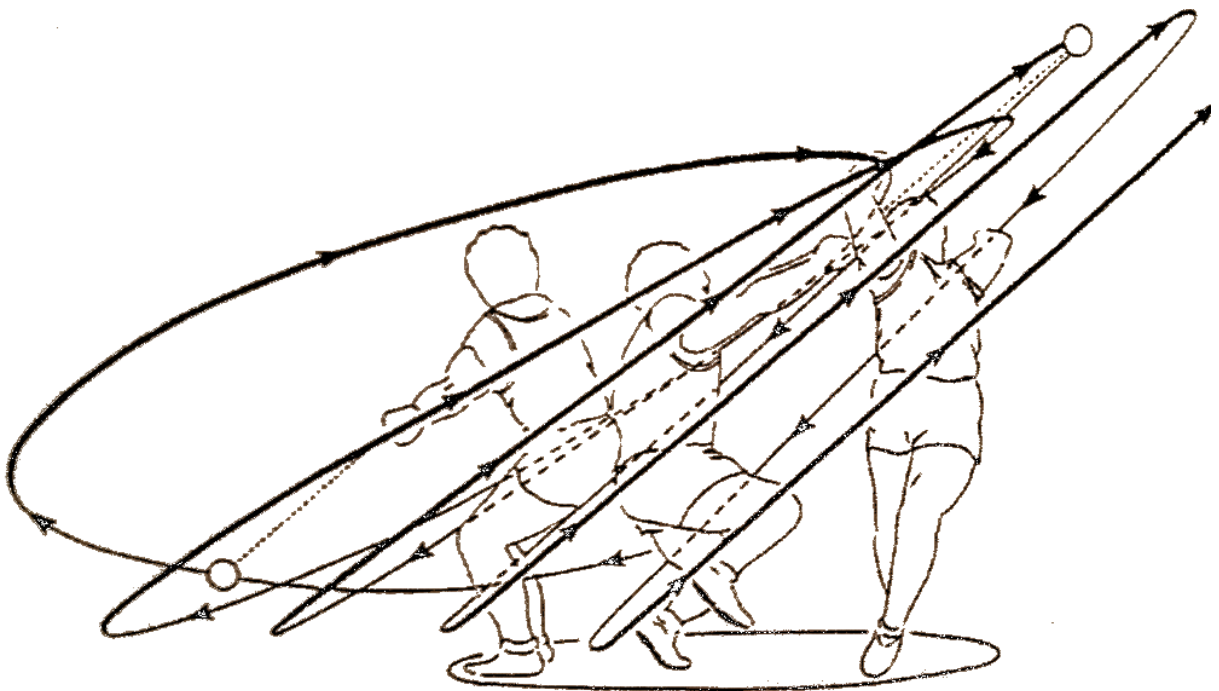
KUVA 7. Heittäjä-moukari-systeemissä vaikuttavat voimat (F_1 = moukarin vetovoima, F_2 = heittäjän vetovoima, F_3 = painovoima, F_4 = maan tukivoima) sekä massakeskipisteet (a = heittäjän, b = moukarin, c = heittäjä-moukari -systeemin) (mukailtu Maheras 2009.)

Yhden tuen vaiheen aikana heittäjän lantion ja hartia-akselin välille muodostuu kulma ja syntynyt vartalon kiristys puretaan kahden tuen vaiheessa, jolloin moukarin vauhti kiihtyy (Otto 1991; Rinta-aho 2002, 28). Morleyn (2003) mukaan kulman tulisi olla suunnilleen nolla astetta moukarin saavuttaessaan alimman kohtansa. Bricen ym. (2014) mukaan moukarin hidastuminen yhden tuen vaiheen aikana on sitä vähäisempää, mitä pienemmäksi lantion ja hartia-akselin välinen kulma saadaan edellisen kahden tuen vaiheen aikana supistettua.

Loppuvedossa tapahtuu moukarin lopullinen kiihdyttäminen. Rinta-ahon (2002) mukaan loppuvedossa tuotetaan 10 - 15 prosenttia moukarin lähtönopeudesta. Yuri Sedykhin maailmanennätysheitossa moukarin maksiminopeus oli viimeisellä pyörähdyksellä 26,9 m/s ja lähtönopeus 30,7 m/s eli loppuvedossa vauhti kasvoi 14,1 prosenttia. (Rinta-aho 2002, 24.)

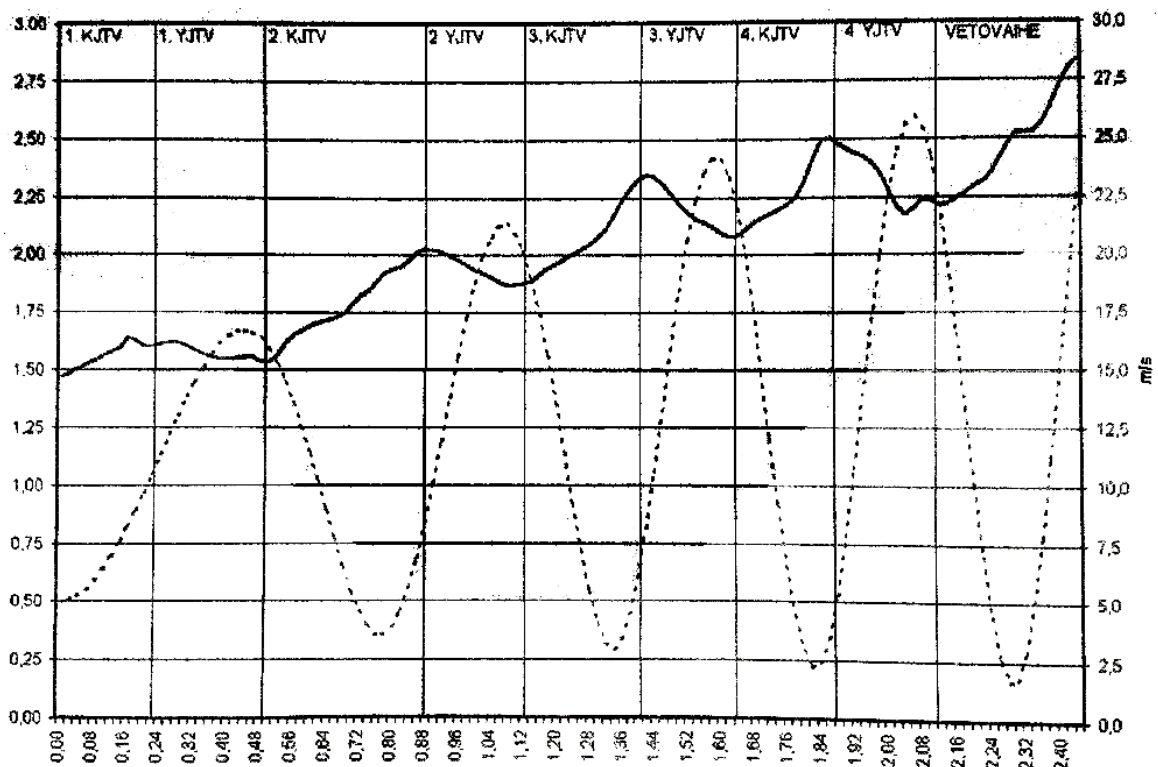
3.2 Heittovälineen dynamiikka

Heittäjän säätelystä muuttujista tärkeimpinä heiton pituuteen vaikuttavat moukarin lähtönopeus, -kulma ja -korkeus (Otto 1991; Morriss & Bartlett 1995; Dapena ym. 2003). Näiden muuttujien tarkastelu liikeanalyysin avulla on suhteellisen helppoa ja niistä tiedetäänkin jo melko paljon. Lichtenbergin ja Willisin (1978) mukaan heittopituus kasvaa, jos lähtönopeus ja/tai lähtökorkeus kasvavat. Lähtönopeuden tulisikin olla mahdollisimman suuri, kun taas lähtökulmalle on tiettyä nopeutta ja korkeutta vastaava optimiarvo, jolla heittopituus maksimoidaan (Hubbard 2000). Otton (1991) mukaan optimaalinen lähtökulma on lähellä 44 astetta. Nykyään siis tiedetään hyvin se, millaiselle lentoradalle moukari tulee lähettää, mutta edelleen on osittain epäselvää, millainen sen liikerata tulisi olla vauhdinoton aikana. Rinta-ahon (2002) mukaan moukarin radan alimman pisteen tulisi vastapäivään pyörivällä heittäjällä olla alkupyöritysten aikana etuoikealla. Vauhtipyörähdysten aikana alin piste siirtyy asteittain vasemmalle päin ja samalla moukarin kulkema rata muuttuu koko ajan pystymmäksi (kuva 8). (Rinta-aho 2002, 59, 63, 81.) Näin moukarille aikaansaadaan riittävän jyrkkä lähtökulma.



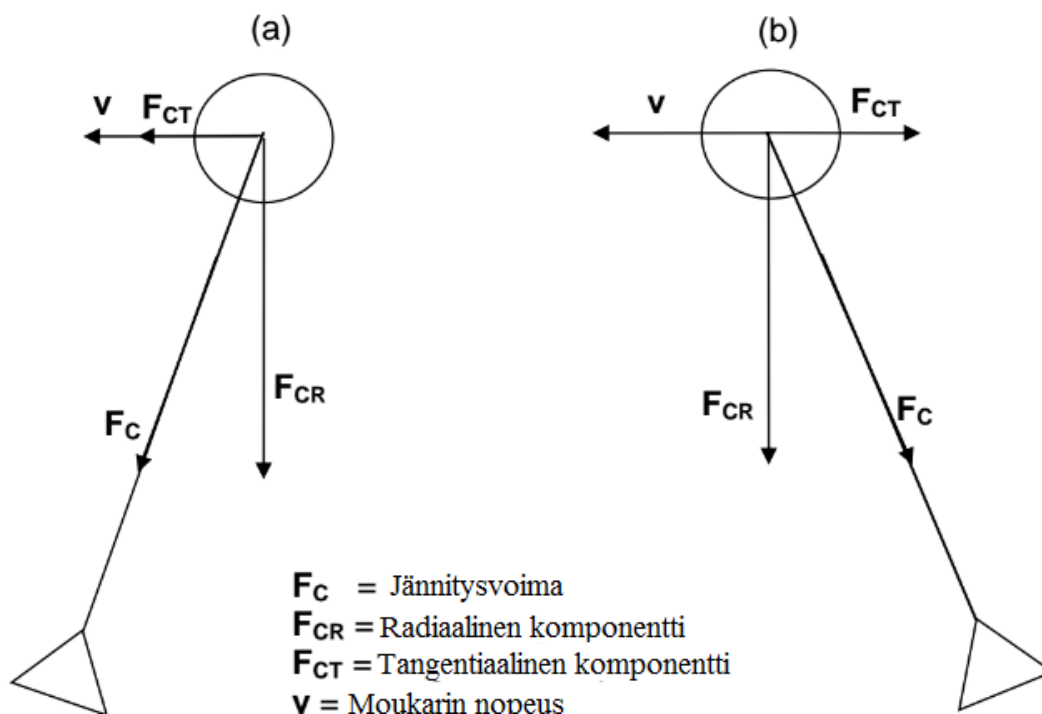
KUVA 8. Moukarin rata muuttuu pystymmäksi heiton edetessä (Rinta-aho 2002, 64).

Moukarin lineaarinopeus koostuu sekä vaaka-, että pystynopeudesta. Maherasin (2009) mukaan alkupyöritysten aikana annetaan moukarille sen vaakanopeus, jota ei juurikaan voida enää heiton edetessä kasvattaa. Myös Dapena (1989) totesi, ettei vaakanopeuden kiihdyttäminen ole mahdollista kuin hitaassa pyörimisliikkeessä. Tehokkainta kiihdyttäminen on kahden tuen vaiheen aikana, joten vauhdinoton alkuvaiheessa, ensimmäisten pyörähdysten aikana, sen pitkittäminen voi olla hyvä tapa lisätä vaakanopeutta. Myöhemmässä vaiheessa kahden tuen vaiheen pitkittäminen saattaa hidastaa heittäjä-moukari -systemin pyörimistä ja siten heikentää tulosta. (Rojaz-Ruiz & Gutiérrez-Dávila 2009.) Dapenan (1989) ja Murofushin ym. (2007) mukaan suurin osa vauhtipyörähdystenaikaisesta moukarin lineaarinopeuden lisääntymisestä on kuitenkin pystynopeutta. Moukarin nopeus lisääntyy pyörähdys pyörähdykseltä, mutta nopeuden lisääntyminen ei ole tasaista, vaan jokainen vauhtipyörähdys sisältää kiihtymis- ja hidastumisvaiheen (kuva 9) (Murofushi ym. 2007; Isele & Nixdorf 2010; Brice 2014). Moukarin hidastuminen johtuu osittain maan vetovoimasta, sillä hidastumista tapahtuu yhden tuen vaiheen aikana, kun moukari lähestyy korkeinta kohtaansa (Brice ym. 2011).



KUVA 9. Moukarin nopeus (yhtenäinen viiva) ja korkeus (katkoviiva) pyörähdysten aikana (Rinta-aho 2002, 30). (KTJV = kahden tuen vaihe, YJTV = yhden tuen vaihe)

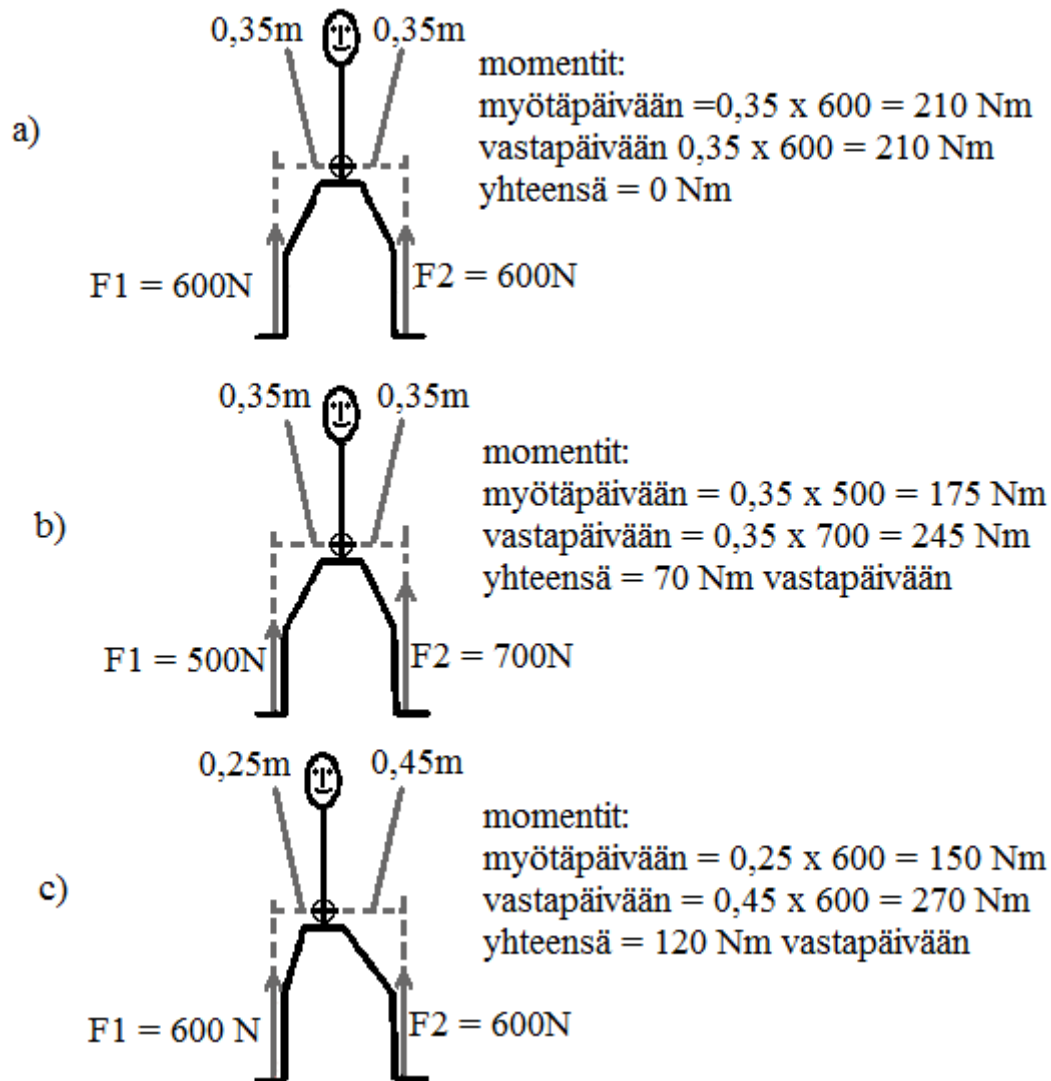
Suurin hidastumisen aiheuttaja on kuitenkin jännitysvoiman tangentiaalinen komponentti (kuva 10) (Brice ym. 2011). Dapenan (1984) mukaan jännitysvoiman tangentiaalinen komponentti vaikuttaa joko samaan tai vastakkaiseen suuntaan moukarin nopeuden kanssa. Mikäli vaikutussuunta on sama, moukaripään vauhti kiihtyy ja mikäli vaikutussuunta on vastakkainen, vauhti hidastuu (Dapena 1984). Jännitysvoiman mittaaminen varsinkin kilpailuolosuhteissa on haastavaa, joten käytännössä usein tarkastellaan niin sanottua laahauskulmaa, eli moukarin varren ja hartialinjan välistä kulmaa. Sen avulla voidaan arvioida, vaikuttaako jännitysvoiman tangentiaalinen komponentti moukarin nopeuteen nähden samaan vai vastakkaiseen suuntaan.



KUVA 10. Jännitysvoiman radiaalinen ja tangentiaalinen komponentti (Brice 2014). Jännitysvoiman tangentiaalinen komponentti vaikuttaa moukarin nopeuteen nähden a) samaan suuntaan, b) vastakkaiseen suuntaan.

Pystynopeuden tuottaminen ei ilmeisesti ole yhteydessä vain kahden tai yhden tuen vaiheeseen, vaan sen tuottaminen on mahdollista molempien aikana (Maheras 2009). Dapenan (1989 & 2008) mukaan pystynopeuden lisäämiseksi vaadittu vertikaalimomentti tuotetaan kahden tuen vaiheen aikana ensin työntämällä vasemmalla jalalla voimakkaasti ylöspäin ja sitten siirtämällä heittäjä-moukari -systemin massakeskipistettä oikealle (kuva 11). Tällöin moukarin

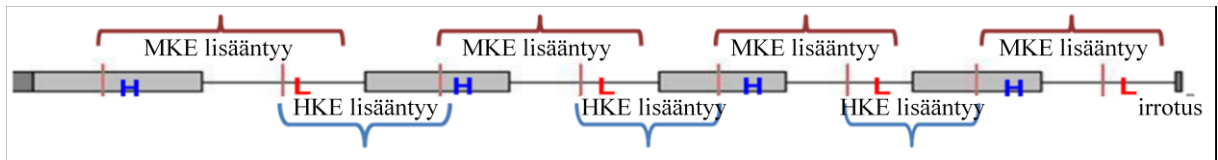
myötäpäivään ja jalkojen vastapäivään tuottamat momentit kumoavat toisensa, moukarin nopeus kiihtyy ja heittäjä säilyttää tasapainonsa. Heittäjä on pääasiassa yhden tuen varassa moukarin ollessa nousevalla radalla. Tällöin momentti syntyy niin sanotusti itsestään, sillä heittäjän tukipiste ei ole suoraan massakeskipisteen alla. (Maheras 2009.)



KUVA 11. Heittäjän tuottama vertikaalimomentti suhteessa jalkojen voimantuottoon ja massakeskipisteen paikkaan. a) massakeskipiste keskellä, $F1 = F2$; b) massakeskipiste keskellä, $F1 < F2$; c) massakeskipiste oikealla, $F1 = F2$. (Maheras 2009.)

Sakr (2012) tarkasteli työssään heittäjä–heittoväline-kompleksin liike-energioita moukarinheittossa ja totesi, että kokonaisliike-energia lisääntyy jokaisella vauhtipyörähdyksellä vain lyhy-

en ajan moukarin alimmasta kohdasta kahden tuen vaiheen loppuun (kuva 12). Muulloin kompleksin kokonaisliike-energia siirtyy heittäjän ja moukarin välillä niiden vauhdin kiihtyessä ja hidastuessa pyörähdyksen eri vaiheissa. Tämä lyhyt pyörähdyksen vaihe, jolloin heittäjän molemmat jalat ovat maassa ja moukari on nousevalla radalla, saattaa siten olla vauhdin kiihdyttämisen kannalta erityisen tärkeä. (Sakr 2012.)



KUVA 12. Moukarin pään (MKE) ja heittäjän (HKE) liike-energian lisääntyminen vauhtipyörähdyksen aikana (Sakr 2012). Harmaa palkki kuvastaa yhden tuen vaihetta, L moukarin matalinta ja H korkeinta kohtaa.

Myös heittäjän asento ja massakeskipisteen korkeus vaikuttavat lineaarinopeuden kehittymiseen. Suorituksen alkuasennon tulisi olla matala, jolloin moukarin kiertosäde on mahdollisimman pitkä ja kulmanopeus on sen vuoksi hitaampi. Tällöin työskentelevillä lihaksilla on pidempi voimantuottoaika, mikä taas mahdollistaa suuremman voimantuoton. Heiton edetessä moukarin lineaarinopeus kasvaa, jolloin heittäjän on tasapainossa pysyäkseen nojattava taaksepäin. Tällöin heittäjä-moukari -systemin inertia vähenee ja kulmanopeus kiihtyy, sillä moukarin kiertosäde lyhenee. Myös loppuvedossa heittäjä voi kiihdyttää moukarin lineaarinopeutta sädettä pienentämällä. (Dapena & Feltner 1989; Dapena & McDonald 1989; Maronksi 1991; Hill 1922.)

4 MOUKARINHEITON LIIKEANALYYSI

Videon avulla tehtävä liikeanalyysi on useimmiten käytetty tutkimusmetodi suuressa osassa urheilulajeja. Urheilussa sitä käytetään urheilijan suorituksen parantamiseksi ja loukkaantumisriskien tunnistamiseksi seuraamalla esimerkiksi raajojen liikkeitä ja muutoksia nivelkulmissa. Liikeanalyysin avulla voidaan myös seurata urheilijan käsittelemän välineen sijaintia ja liikenopeutta. (Blazevich 2007, 37; Chèze 2014, 13, 35.) Moukarinheiton biomekaniikan tutkimusmenetelmät vaihtelevat tutkimusympäristön, käytössä olevien laitteiden ja tutkittavan asian tai ilmiön mukaan. Liikeanalyysiä voidaan tehdä kahdessa (2D) tai kolmessa (3D) ulottuvuudessa, mutta 2D-analyysissä virheiden mahdollisuus on suurempi ja tulosten vaihtelua esiintyy enemmän (Allard ym. 1995). Tulosten tarkkuuden vuoksi moukarinheiton tutkimuksissa käytetään pääasiassa 3D-analyysiä.

Laitteisto. 3D-liikeanalyysiä varten tarvitaan vähintään kaksi videokameraa, jotka tulee aikasykronoida toimimaan yhdessä ja kameroiden kuvaama alue tulee kalibroida kuvaamalla 3D-objekti, jonka mitat tunnetaan, kyseisellä alueella (Allard ym. 1995). Kahta kameraa käytettäessä niiden kuvaussuuntien tulisi olla noin 90 asteen kulmassa toisiinsa nähden siten, että toinen kamera on heittöhäkin takana ja toinen sivulla (Isele & Nixdorf 2010). Kuvanopeus moukarinheiton 3D- kilpailuanalyseissa on usein suhteellisen alhainen, sillä analyysi tehdään manuaalisesti ja se on suorituksen pituuden vuoksi työläs. Heittäjän liike on myös pääosin melko hidas, vaikka moukari saavuttaakin suuria nopeuksia.

Muiden muassa vuosien 1999 (Sevilla) ja 2009 (Berliini) maailmanmestaruuskilpailuiden moukarinheittokilpailut kuvattiin kahdella 50 Hz kuvataajuudella toimivalla kameralla (Gutiérrez ym. 2002; Isele & Nixdorf 2010), samoin kuin Rojas-Ruizin ja Gutiérrez-Davilan (2009) analysoimat kilpailut. Mercadante ym. (2007) käyttivät Brasilianmestaruuskilpailuiden kuvaamiseen kolmea 60 Hz videokameraa, jotka oli sijoitettu jopa 70 metrin päähän heittopaikasta ja ne kuvasivat suorituksia heittöhäkin aukon kautta. Vastaava laitteisto oli käytössä myös Konzin ym. (2006) kilpailuanalyseissa. Judge ym. (2016) käyttivät kahta 60 Hertzin kuvataajuudella kuvaavaa videokameraa kilpailuanalyseissään. Useissa kilpailujen ulkopuolella tehdyissä moukarinheittotutkimuksissa käytetään high-speed- tai infrapunakameroita. Esimerkiksi Murofushi ym. (2007) käyttivät tutkimuksessaan kolmea 250 Hz videokameraa.

Usein kilpailuolosuhteet kuitenkin määrittävät sen, millaista kuvauskalustoa suoritusten taltiointiin voidaan käyttää. Esimerkiksi infrapunakameroiden käyttö on kilpailuissa käytännössä mahdotonta, sillä ne vaativat erillisten heijastavien markkereiden kiinnittämistä heittäjien iholle tai vaatteisiin.

Kalibrointi. Kameroiden kalibrointiin käytetään yleensä erillistä kalibrointikehikkoa, jossa on markkereita tunnettujen välimatkojen päässä toisistaan. Kehikkoa voidaan siirtää kameroiden näkökentän alueella, jotta koko suoritusalue saadaan kalibroitua. (Isele & Nixdorf 2010; Sakr 2012.) Konz ym (2006) ja Mercadante ym. 2007 hyödynsivät kalibroinnissa takymetriä, jonka mittaustarkkuus on hyvä (virhe alle 1 cm). Konz ym. (2006) määrittivät takymetrillä neljän 2,43 metriä pitkän tangon sijainnit ja käyttivät niitä ja videokuvaa suoritusalueen kalibroimisessa. Kameran linssin vääristymän kompensoimiseksi tulisi käyttää DLT-metodia (direct linear transformation) (Abdel-Aziz & Karara 1971). Kamerat eivät saa liikkua kalibroinnin ja suoritusten välissä, mikä voi muodostua ongelmaksi varsinkin kilpailuolosuhteissa (Konz ym. 2006). Moukarinheittoa tutkittaessa on tärkeää, että kalibroitava alue on tarpeeksi suuri. Sakr (2012) kalibroi tutkimustaan varten 3,5 x 3 x 2 metrin alueen.

5 TUTKIMUKSEN TAVOITE JA TUTKIMUSKYSYMYKSET

Moukarin lähtönopeus ja -kulma ratkaisevat suurelta osin heiton pituuden. Se, mitkä tekijät heittäjän vauhdinotossa ovat merkityksellisiä moukarin lähtöarvojen kannalta, on osittain epäselvää. Lisäksi heittotekniikan optimoimisessa haasteita saattaa aiheuttaa muun muassa heittäjien toisistaan poikkeavat ominaisuudet ja vartalon mittasuhteet. Ei siis ole selvää, kuinka suuria pituuseroja pienet tekniset vaihtelut saattavat aiheuttaa ja ovatko jotkin tekniikan yksityiskohdat merkityksellisempiä kuin toiset.

Tässä tutkimuksessa on tavoitteena analysoida kansallisen ja kansainvälisen tason moukarinheittäjien heittotekniikkaa kahdessa Suomessa vuonna 2017 käydyssä kilpailussa kerätyn videomateriaalin avulla. Tavoitteena on myös kerätä heittäjien koko kehon liikeanalyysin avulla vertailudataa tulevia tutkimuksia ja kilpailuanalyysijä varten. Lisäksi pyrkimyksenä on löytää vastauksia neljään tutkimuskysymykseen:

Tutkimuskysymys 1: Millaisia teknisiä yhtäläisyyksiä ja eroavaisuuksia on löydettävissä yksittäisten neljällä vauhtipyörähdyksellä suoritettujen heittojen tekniikoista ja miten ne vaikuttavat moukarin loppunopeuteen?

Tutkimuskysymys 2: Miten suuria eroja on löydettävissä kahden eri heittäjän heittämistä, likimain yhtä pitkistä heitoista?

Tutkimuskysymys 3: Mitkä tekijät selittävät suuria, yli neljän metrin eroja heittopituuksissa, kun vertaillaan noin 70 metrin mittaisia, saman heittäjän kahden erillisen kilpailun parhaita suorituksia.

Tutkimuskysymys 4: Millaisia eroja on heitoissa, jotka suoritetaan eri määrällä vauhtipyörähdyksiä (kolmella, neljällä tai viidellä)?

6 TUTKIMUSMENETELMÄT

6.1 Koehenkilöt

Tutkimuksessa koehenkilöinä oli kuusi kansainvälisen tason miesmoukarinheittäjää, joista kolme oli suomalaisia. Heittäjien ennätysten keskiarvo oli $77,95 \pm 4,07$ m. Kaikilta tutkimuksessa mukana olleilta urheilijoilta saatiin suostumus videoiden käyttämiseen ja nimen julkaisemiseen tutkimuksessa.

6.2 Analysoidut suoritukset

Tässä tutkimuksessa data analysoitiin 3D-liikeanalyysimenetelmää käyttäen. Heittosuoritukset kuvattiin kansainvälisessä Paavo Nurmi Games -kilpailussa (PNG) Turussa kesäkuussa 2017 sekä kansallisissa Kalevan Kisoissa (KK) Seinäjoella heinäkuussa 2017. Tutkimuksessa analysoitiin viisi heittosuoritusta Paavo Nurmi Games -kilpailusta ja kaksi Kalevan Kisoista. Kaikki heittäjät olivat kansainvälisen tason miesurheilijoita ja heittivät 7,26 kg painoista moukaria. Kilpailuissa noudatettiin Kansainvälisen yleisurheiluliiton (IAAF) kilpailusääntöjä (IAAF 2015).

Heittäjät tekivät ennen kilpailuja omatoimiset alkuverryttelyt ja heittivät keskimäärin 2-3 harjoitusheittoa. Heittäjien kaikki kilpailusuoritukset videokuvattiin ja suorituksista valittiin 3D-analyysiä varten jokaisen urheilijan pisin kilpailussa mitattu heitto. Poikkeuksena yksi heitto, joka valittiin vertailukohdaksi toisen heittäjän lähes yhdenmittaiselle heitolle. Yhdeltä heittäjältä analysoitiin vertailun vuoksi Paavo Nurmi Games -kilpailuheiton lisäksi toinen heitto Kalevan Kisoista, koska haluttiin verrata saman heittäjän kahta toisistaan tuloksellisesti selvästi poikkeavaa heittoa. Kilpailuissa heitot mitattiin IAAF:n kilpailusääntöjen mukaisesti heittoringin etureunasta, ja heittojen pituuden mittaamiseen käytettiin optista mittalaitetta.

Heittäjistä yksi käytti kolmen ja yksi viiden pyörähdyksen tekniikkaa. Loput neljä heittivät neljällä vauhtipyörähdyksellä. Yksi heittäjistä pyöri myötäpäivään ja loput vastapäivään. Tu-

lokset esitetään kuitenkin niin, että pyörimissuunta on kaikilla heittäjillä vastapäivään, jotta tulokset ovat suoran vertailtavissa keskenään.

Suoritusten vertailu. Tutkimuskysymyksiä ajatellen tuloksista muodostetaan vertailua varten heittopareja tai useamman heiton ryhmiä seuraavasti:

Kysymys 1: Neljän vauhtipyörähdyksen heittoa (heitot 1, 2, 3, 4 ja 5) vertaillaan keskenään siten, että painotetaan suomalaisten (heitot 2, 4 ja 5) vertailua puolalaisen Pawel Fajdekin 82,40 metriä kantaneen heiton (heitto 1) tekniikkaan.

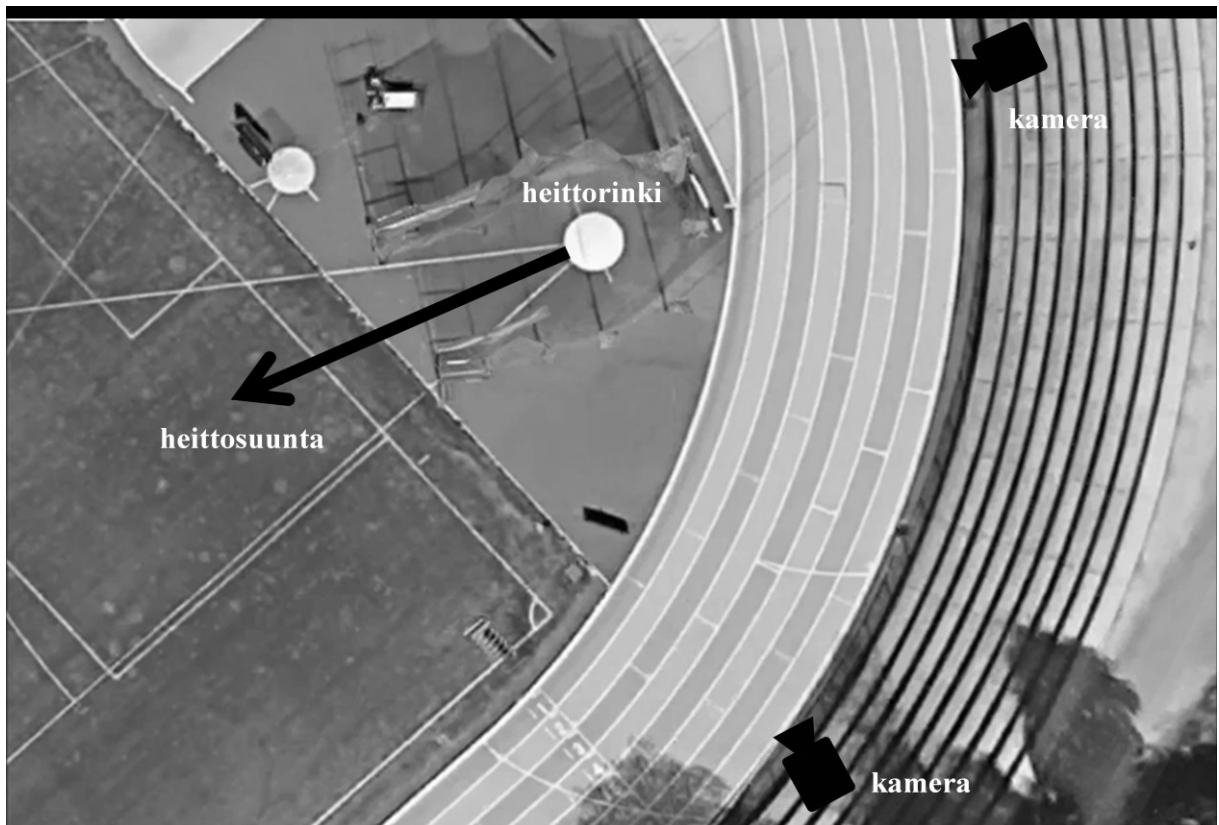
Kysymys 2: David Söderbergin 74,89 metriä kantanutta heittoa (heitto 2) vertaillaan Ashraf Amjad Al-Saifin 74,85 metrin heittoon (heitto 3).

Kysymys 3: Henri Liipolan Kalevan kisoissa heittämää 72,71 metrin heittoa (heitto 4) vertaillaan hänen Paavo Nurmi Games -kilpailussa heittämänsä 68,12 metrin heittoon (heitto 5).

Kysymys 4: Kolmella (heitto 6) ja viidellä (heitto 7) pyörähdyksellä suoritettuja heittoa vertaillaan neljän pyörähdyksen heittoihin (heitot 1, 2, 3, 4 ja 5).

6.3 Videokuvaus ja liikeanalyysi

Videokuvaus. Kuvaamiseen käytettiin kahta Panasonic DC-GH5 -videokameraa siten, että toinen kamera oli heittopaikan takana ja toinen heittoringin vasemmalla puolella, noin 90 asteen kulmassa heittosuuntaan nähden (kuva 13). Kameroiden ja heittäjän välissä oli kilpailuolosuhteista johtuen turvaverkko, mutta se ei juurikaan haitannut suoritusten analysoimista. Sen sijaan Paavo Nurmi Games -kilpailussa sivukameran ja heittäjän välissä oli toimitsija, joka peitti moukarin kuulun hetkellisesti ensimmäisen kahden tuen vaiheen aikana.



KUVA 13. Kameroiden asettelu Paavo Nurmi Games -kilpailussa

Kuvataajuus. Suoritukset kuvattiin 180 kuvaa/s kuvataajuudella ja resoluution tarkkuus oli 1920 x 1080 pikseliä. Kuvatut videot aikasynkronoitiin 180 kuvaa/s kuvataajuudella heittäjän ensimmäisen vauhtipyörähdyksen jälkeisen kahden tuen vaiheen alkuhetken avulla. Analyysi tehtiin taajuudella 60 kuvaa/s digitoimalla joka kolmas kuva niin, että irrotushetki osui tarkalleen yhdeksi digitoitavista kuvista.

Kalibrointi. Videoiden kalibroimista varten pystytettiin neljä pituudeltaan säädettävää pylväs-tä, joiden avulla saatiin luotua kahdeksasta pisteestä muodostunut kalibrointikehikko (kuva 14). Kalibrointipisteiden todellisten sijaintien määrittämiseen käytettiin takymetriä. Kalibrointi suoritettiin sekä ennen kilpailuja että heti niiden jälkeen. Näin saatiin varmistettua, etteivät kamerat olleet liikahtaneet kilpailun aikana. Koordinaatisto määritettiin siten, että x-akseli osoitti heittosuuntaan, keskelle heittosektoria, y-akseli oli pystysuoraan ylöspäin ja z-akseli horisontaalisesti kohtisuorassa x-akselin kanssa osoittaen vasemmalta oikealle. Origo määri-

tettiin kalibrointikehikon pisteeseen, joka oli heittosuuntaan nähden vasemmassa takakulmassa alhaalla.



KUVA 14. Kalibrointikehikko Paavo Nurmi Games –kilpailussa (pisteet 1–8). Heittosuunta kuvassa oikealta vasemmalle. Koordinaatiston origo määritettiin kalibrointipisteeseen 1.

Digitointi ja filteröinti. Suoritusten digitointiin ja liikeanalyysin tekemiseen käytettiin Ariel Performance Analysis System (APAS 1.0) -ohjelmistoa. Digitoidut pisteet (18 + 1) olivat keskivarpaiden kärjet (tuberositas phalangis distalis pedis III), ylemmät nilkkanivelet (art. talocruralis), polvinivelet (art. genus), lonkkanivelet (art. coxae), olkanivelet (art. humeri), kyynärnivelet (art. cubiti), ylemmät rannenivelet (art. radiocarpalis), keskisormen tyvinivelet (art. metacarpophalangealis III), päälaki (vertex cranii), pään keskikohta leuan korkeudella (pystysuoraan pälaen alapuolella) sekä moukarin kuula (kuva 15). Nivelet digitoitiin keskelle nivelrakoa. Liikeanalyysin perusteella saatu raakadata filteröitiin APAS-ohjelmiston digital filterillä leikkaustaajuusarvolla 6.



KUVA 15. Digitoidut pisteet (18 + moukari).

6.4 Analysoidut muuttujat

Suorituksista analysoitiin sekä moukariin, että heittäjään liittyviä muuttujia. Analysoidut muuttujat ja analyysitavat olivat seuraavat:

- heiton pituus: mitattiin kilpailujärjestäjän toimesta
- lähtönopeus, -kulma ja -korkeus: määritettiin APAS ohjelmistolla irrotushetkeltä
- teoreettinen pituus: laskettiin irrotushetken parametreista kaavalla

$$d = \frac{v^2}{2g} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{2gy_0}{v^2 \sin^2 \theta}} \right) \sin 2\theta$$

missä d on heiton teoreettinen pituus, v on lähtönopeus, g on putoamiskiihtyvyys (käytetty likiarvo: $9,81 \text{ m/s}^2$), θ on lähtökulma ja y_0 on lähtökorkeus

- pyörähdysten sekä yhden ja kahden tuen vaiheiden kestot määritettiin videolta silmä-
määräisesti (pyörähdys sisälsi yhden tuen vaiheen ja sitä seuranneen kahden tuen vai-
heen)
- moukarin sijaintia suhteessa heittäjään kuvaavat atsimuuttiarvot määritettiin kuvan 4
mukaisesti
- moukarin pysty- vaaka- ja resultanttinopeus määritettiin jokaisen vauhtipyörähdysten
alkuhetkellä ja niistä laskettiin pyörähdyskohtaiset nopeudenlisäykset
- moukarin kulkema matka määritettiin jokaisen tukivaiheen osalta
- jokaisen pyörähdysten osalta määritettiin moukarin korkein ja matalin kohta
- lantiolinja määritettiin digitoitujen lonkkanivelpisteiden ja hartialinja olkanivelpistei-
den kautta kulkeväksi suoraksi
- vartalon kiertoa varten määritettiin lantion ja hartioiden välinen kulma horisontaali-
tasossa
- laahauskulmaksi määritettiin hartialinjan ja hartia-moukarilinjan välinen kulma ho-
risontaalitasossa
- heittäjän massakeskipisteen liikettä tarkasteltiin sekä horisontaalitasossa että pystyak-
selilla
- nivelkulmat määritettiin molempien jalkojen polvi- ja lonkkanivelten osalta

6.5 Tilastolliset analyysit

Aineiston tilastollinen analyysi tehtiin Excel Office 2007 -ohjelmalla. Analyysissä käytettiin keskiarvoja, keskihajontoja sekä Pearsonin korrelaatioita. Tilastollisen merkitsevyyden rajoiksi asetettiin seuraavat: tilastollisesti merkitsevä $p < 0,05$; tilastollisesti hyvin merkitsevä $p < 0,01$; tilastollisesti erittäin merkitsevä $p < 0,001$.

7 TULOKSET

Kuvatuista heittosuorituksista valittiin tarkempaan analyysiin yhteensä seitsemän heittoa kuudelta eri heittäjältä. Heittoa numero neljä lukuun ottamatta jokainen valittu heitto oli kyseisen heittäjän kilpailun pisin heitto. Heittäjä numero 3 (Al-Saifi) heitti kilpailussa yhden hieman pidemmän heiton (75,14 m), mutta toiseksi pisin heitto valittiin vertailukohdaksi heittäjän numero 2 (Söderbergin) lähes samanmittaiselle heitolle. Valitut heittäjät, heittopituudet, vauhtipyörähdysten määrät, vauhtipyörähdysten suunnat sekä vauhtipyörähdysten kesto ensimmäisen yhden tuen vaiheen alusta irrotukseen näkyvät taulukossa 3. Neljällä vauhtipyörähdyksellä heittäneiden heittäjien pyörähdykset kestivät keskimäärin 2,15 s, kolmella 1,70 s ja viidellä 2,68 s. Pawel Fajdekin heittämä 82,40 m oli kauden 2017 maailmanlistan kolmanneksi paras tulos, tosin kaikki kymmenen parasta heittoa kyseisellä listalla olivat Fajdekin nimissä.

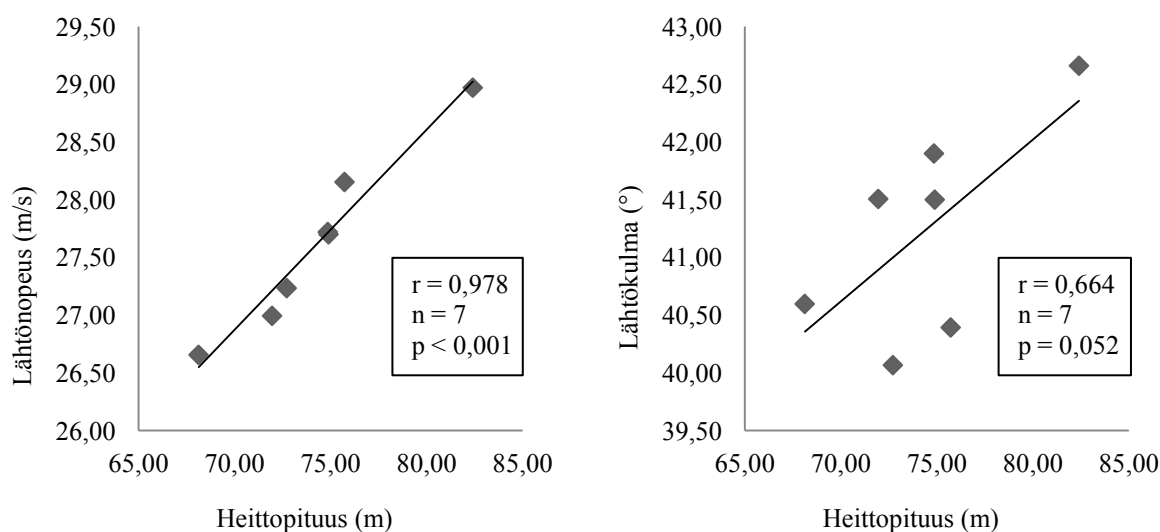
TAULUKKO 3. Tarkempaan analyysiin valitut heittäjät ja heitot. (PNG = Paavo Nurmi Games, KK = Kalevan kisat, vp = vastapäivään, mp = myötäpäivään)

#	kilpailu	heittäjä	pituus (m)	pyörimissuunta	pyörähdyksiä (kpl)	kesto (s)
1	PNG	Pawel Fajdek	82,40	vp	4	2,13
2	PNG	David Söderberg	74,89	vp	4	2,10
3	PNG	Ashraf Amjad Al-Saifi	74,85	vp	4	2,23
4	KK	Henri Liipola	72,71	mp	4	2,12
5	PNG	Henri Liipola	68,12	mp	4	2,17
6	KK	Aleksi Jaakkola	71,95	vp	3	1,70
7	PNG	Marco Lingua	75,72	vp	5	2,68

Taulukossa 4 on esiteltynä moukarin kuulan lähtökorkeus, -nopeus ja -kulma sekä niiden avulla laskettu teoreettinen heittopituus, joka ei ota huomioon ilmanvastuksen vaikutuksia. Lisäksi taulukkoon on laskettu teoreettisten ja todellisten heittopituuksien väliset erotukset metreinä ja prosentteina. Heittopituuden korrelaatio lähtönopeuteen oli tilastollisesti erittäin merkitsevä ($r = 0,978$; $n = 7$; $p < 0,001$) ja lähestyi tilastollista merkitsevyyttä lähtökulman kanssa ($r = 0,664$; $n = 7$; $p = 0,052$) (kuva 16). Lähtökorkeuden ja heittopituuden välillä ei ollut merkitsevää yhteyttä ($r = -0,414$; $n = 7$; $p = 0,178$).

TAULUKKO 4. Moukarin kuulan parametrit irrotushetkellä

#	pituus (m)	nopeus (m/s)	kulma (astetta)	korkeus (m)	teor. pituus (m)	ero (m)	ero (%)
1	82,40	28,97	42,66	1,52	86,81	4,41	5,08
2	74,89	27,70	41,50	1,23	78,93	4,04	5,12
3	74,85	27,72	41,90	1,54	79,47	4,62	5,81
4	72,71	27,23	40,07	1,56	76,21	3,50	4,60
5	68,12	26,66	40,60	1,68	73,40	5,28	7,19
6	71,95	26,99	41,51	1,84	75,65	3,70	4,89
7	75,72	28,15	40,39	1,49	81,39	5,67	6,96
\bar{x}	74,38	27,63	41,23	1,55	78,84	4,46	5,66
sd	4,37	0,77	0,92	0,19	4,42	0,80	1,03

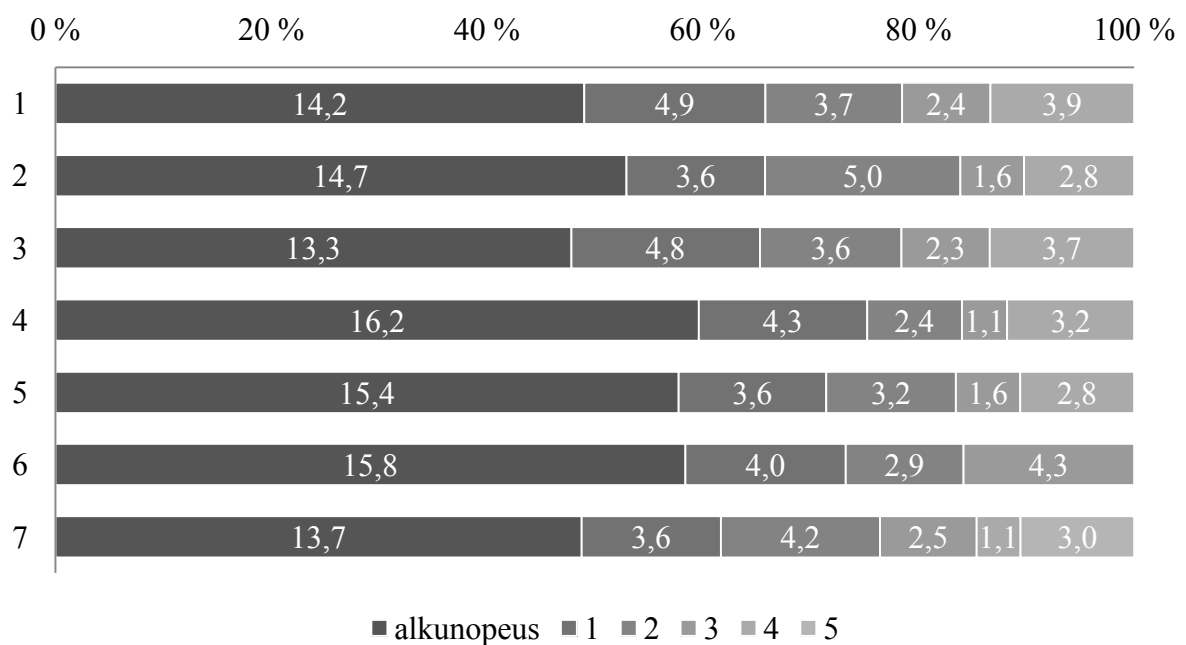


KUVA 16. Lähtönopeuden ja lähtökulman korrelaatio heittopituuteen.

7.1 Moukarin nopeuden kehitys

Suurin moukarin kuulan liikenopeus ensimmäisen yhden tuen vaiheen alkaessa oli viidenneksi pisimmässä heitossa numero 4 (16,2 m/s). Tässä heitossa liikenopeus lisääntyi kuitenkin vähiten vauhtipyörähdysten aikana (11,0 m/s), jolloin loppunopeus oli 27,0 m/s. Suurimman loppunopeuden (29,0 m/s) saavuttaneen heiton numero 1 alkunopeus oli 14,2 m/s, eli hieman

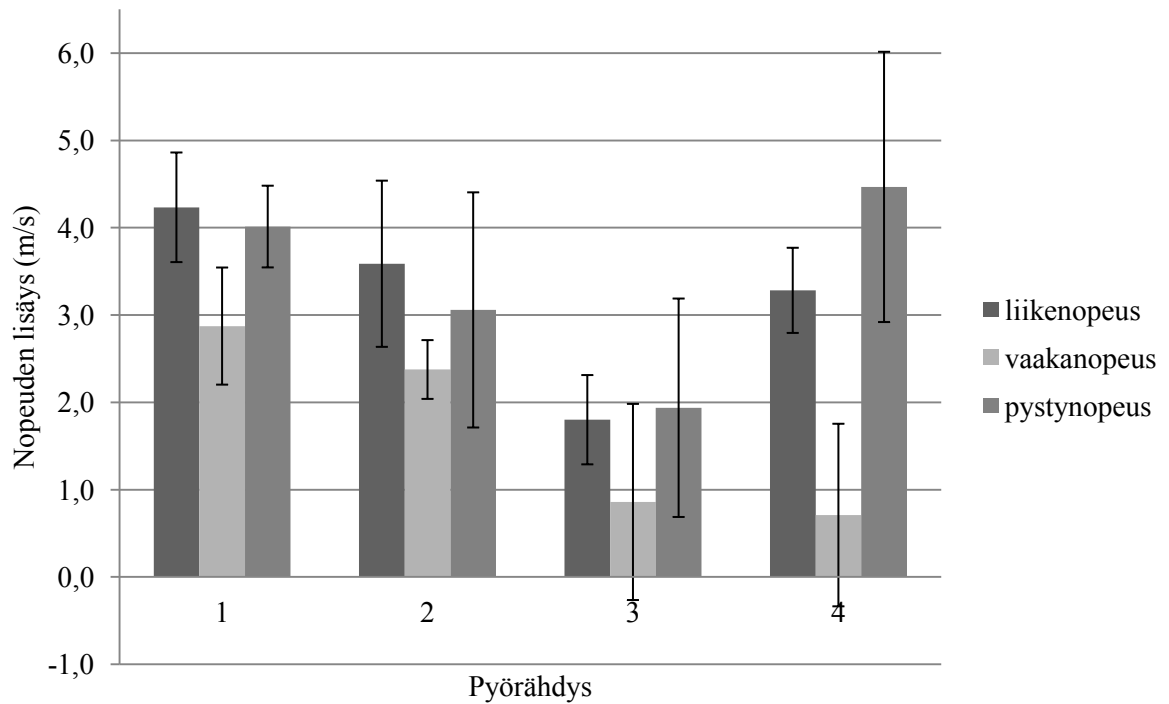
heittojen keskiarvon (14,8 m/s) alapuolella, mutta nopeus lisääntyi vauhtipyörähdysten aikana eniten (14,8 m/s) (kuva 17). Keskiarvillisesti moukarin nopeus lisääntyi eniten ensimmäisellä pyörähdyksellä ja sen jälkeen nopeudenlisäys pieneni pyörähdys pyörähdykseltä, kunnes neljännellä pyörähdyksellä se jälleen kasvoi. Sama pätee nopeuden pystykomponenttiin. Myös vaakanopeus lisääntyi eniten ensimmäisellä pyörähdyksellä, jonka jälkeen lisäys asteittain pieneni neljäs pyörähdys mukaan lukien (kuva 18). Heittojen alkunopeudet, loppunopeudet ja pyörähdyskohtaiset vauhdinlisäykset sekä niiden vaaka- ja pystykomponentit ovat esitettyinä taulukossa 5. Huomioitavaa on, että heitossa numero 6 on kolme pyörähdystä ja heitossa numero 7 viisi pyörähdystä. Muissa heitoissa vauhtipyörähdysiä on neljä.



KUVA 17. Moukarin nopeus ensimmäisen yhden tuen vaiheen alussa (alkunopeus) sekä nopeuden kehitys vauhtipyörähdysten (1, 2, 3, 4 ja 5) aikana [m/s]

TAULUKKO 5. Moukarin kuulan vaaka- ja pystynopeudet sekä niiden resultantti (liikenopeus) alkupyöritysten lopussa (alkunopeus) ja irtoamishetkellä (loppunopeus) sekä nopeuden lisääntyminen vauhtipyörähdysten aikana [m/s] (\bar{x} ja sd laskettu vain vauhtipyörähdyksellä heittäjät)

#	pituus		alkunopeus	nopeudenlisäys					loppunopeus
				1	2	3	4	5	
1	82,40m	liikenopeus	14,2	4,9	3,7	2,4	3,9	29,0	
		vaakanopeus	13,4	3,6	2,4	2,2	-0,3	21,3	
		pystynopeus	4,8	3,8	3,2	1,0	6,9	19,6	
2	74,89m	liikenopeus	14,7	3,6	5,0	1,6	2,8	27,7	
		vaakanopeus	14,0	2,5	2,9	1,8	-0,3	20,7	
		pystynopeus	4,5	3,4	5,1	0,2	5,2	18,4	
3	74,85m	liikenopeus	13,3	4,8	3,6	2,3	3,7	27,7	
		vaakanopeus	12,2	3,5	2,3	0,7	1,9	20,6	
		pystynopeus	5,1	3,8	3,3	2,9	3,4	18,5	
4	72,71m	liikenopeus	16,2	4,3	2,4	1,1	3,2	27,2	
		vaakanopeus	15,3	2,6	1,9	-0,5	1,5	20,8	
		pystynopeus	5,6	4,5	1,5	2,8	3,2	17,5	
5	68,12m	liikenopeus	15,4	3,6	3,2	1,6	2,8	26,7	
		vaakanopeus	14,8	2,1	2,4	0,2	0,7	20,2	
		pystynopeus	4,1	4,5	2,3	2,7	3,7	17,3	
6	71,95m	liikenopeus	15,8	4,0	2,9	4,3		27,0	
		vaakanopeus	14,7	2,8	4,1	-1,4		20,2	
		pystynopeus	5,7	3,5	-2,2	10,9		17,9	
7	75,72m	liikenopeus	13,7	3,6	4,2	2,5	1,1	3,0	28,2
		vaakanopeus	12,2	3,1	2,8	1,4	0,4	1,6	21,4
		pystynopeus	6,3	2,0	3,5	2,3	1,4	2,8	18,2
\bar{x}^*		liikenopeus	14,8	4,2	3,6	1,8	3,3	27,7	
		vaakanopeus	13,9	2,9	2,4	0,9	0,7	20,8	
		pystynopeus	4,8	4,0	3,1	1,9	4,5	18,3	
sd*		liikenopeus	1,1	0,6	1,0	0,5	0,5	0,9	
		vaakanopeus	1,2	0,7	0,3	1,1	1,0	0,4	
		pystynopeus	0,6	0,5	1,3	1,3	1,5	0,9	



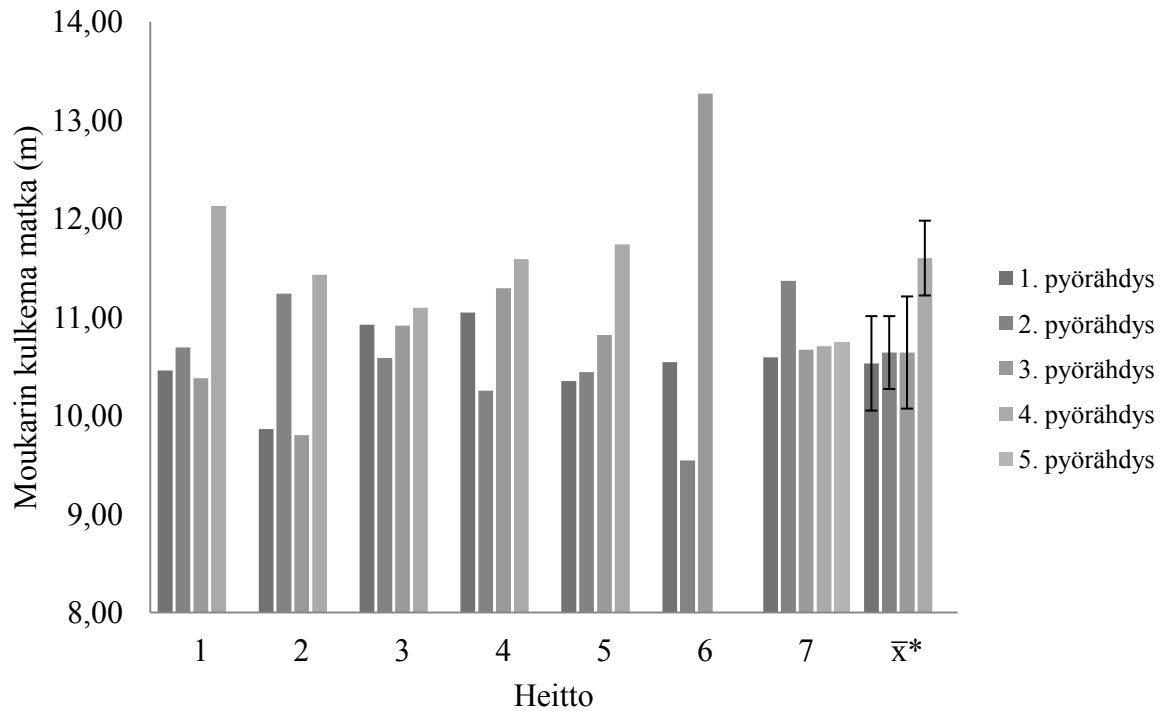
KUVA 18. Moukarin liikenopeuden sekä vaaka- ja pystynopeuden lisäykset vauhtipyörähdysten aikana (laskettu vain neljällä vauhtipyörähdyksellä heittäjät).

7.2 Moukarin kulkema matka

Moukarin kulkema matka neljän pyörähdyksen heittäjillä oli keskimäärin $43,41 \pm 0,68$ m. Kolmen pyörähdyksen heittäjällä vastaava matka oli 33,36 m ja viiden 54,08 m. Moukarin kulkemat matkat heittojen eri vaiheissa näkyvät taulukossa 6 ja graafisesti kuvassa 19.

TAULUKKO 6. Moukarin kulkema matka pyörähdysten ja eri tukivaiheiden aikana [m] (* \bar{x} ja sd laskettu vain neljällä vauhtipyörähdyksellä heittäjät)

#	pituus		ss1	ds1	ss2	ds2	ss3	ds3	ss4	ds4	ss5	delivery	Σ
1	82,40m	pyörähdys	10,46		10,69		10,38		12,13				
		tukivaihe	4,04	6,42	5,07	5,62	5,55	4,83	5,65			6,48	43,66
2	74,89m	pyörähdys	9,86		11,24		9,80		11,43				
		tukivaihe	4,44	5,42	5,05	6,19	4,75	5,05	5,50			5,93	42,33
3	74,85m	pyörähdys	10,92		10,59		10,91		11,09				
		tukivaihe	4,84	6,08	5,15	5,44	4,91	6,00	4,57			6,52	43,52
4	72,71m	pyörähdys	11,05		10,25		11,29		11,59				
		tukivaihe	4,79	6,26	5,25	5,00	5,52	5,78	5,37			6,22	44,18
5	68,12m	pyörähdys	10,35		10,44		10,82		11,74				
		tukivaihe	4,83	5,52	5,31	5,13	5,24	5,58	5,21			6,53	43,35
6	71,95m	pyörähdys	10,54		9,54		13,27						
		tukivaihe	4,49	6,05	4,68	4,86	5,31					7,96	33,36
7	75,72m	pyörähdys	10,59		11,37		10,67		10,70		10,75		
		tukivaihe	4,47	6,12	5,38	5,99	4,94	5,73	5,39	5,31	5,16	5,59	54,08
\bar{x}^*		pyörähdys	10,53		10,64		10,64		11,60				
		tukivaihe	4,59	5,94	5,17	5,47	5,19	5,45	5,26			6,34	43,41
sd*		pyörähdys	0,48		0,37		0,57		0,38				
		tukivaihe	0,35	0,44	0,11	0,47	0,36	0,49	0,42			0,26	0,68



KUVA 19. Moukarin kulkema matka eri vauhtipyörähdysten aikana (\bar{x} ja sd laskettu vain neljällä vauhtipyörähdyksellä heittäjät)

7.3 Moukarin korkein ja matalin kohta

Neljän vauhtipyörähdysten heittojen keskiarvoja tarkastellessa, moukan korkein kohta nousee pyörähdys pyörähdykseltä ja matalin kohta laskee vastaavasti vauhdinoton edetessä. Heitoissa 4, 5 ja 7 moukarin matalin kohta nousee hieman (heitot 4 ja 7) tai pysyy samana (heitto 5) loppuvetoa edeltävästä kahden tuen vaiheesta loppuvetoon (taulukko 7). Vauhtipyörähdysten aikaiset moukarin korkeimmat ja matalimmat kohdat eri tukivaiheissa näkyvät atsimuuttivoina taulukossa 8 ja ne on esitetty graafisesti liitteessä 1.

TAULUKKO 7. Moukarin kuulan korkeimmat (hp) ja matalimmat (lp) kohdat vauhtipyörähdyksen tukivaiheiden aikana [m] (\bar{x} ja sd laskettu vain neljällä vauhtipyörähdyksellä heittäjät)

#	pituus		ss1	ds1	ss2	ds2	ss3	ds3	ss4	ds4	ss5	delivery	release
1	82,40m	hp	1,87		2,17		2,42		2,52				1,52
		lp		0,33		0,22		0,19				0,08	
2	74,89m	hp	1,83		2,06		2,30		2,47				1,23
		lp		0,41		0,22		0,13				0,10	
3	74,85m	hp	1,77		2,10		2,26		2,32				1,54
		lp		0,30		0,22		0,10				0,07	
4	72,71m	hp	1,82		2,20		2,31		2,41				1,56
		lp		0,29		0,28		0,18				0,20	
5	68,12m	hp	1,74		2,04		2,19		2,35				1,68
		lp		0,34		0,26		0,17				0,17	
6	71,95m	hp	1,97		2,27		2,47						1,84
		lp		0,35		0,33						0,14	
7	75,72m	hp	1,83		1,97		2,08		2,16		2,23		1,49
		lp		0,16		0,15		0,10		0,06		0,07	
\bar{x}^*		hp	1,81		2,11		2,30		2,41				1,51
		lp		0,33		0,24		0,15				0,12	
sd*		hp	0,05		0,07		0,09		0,08				0,17
		lp		0,05		0,03		0,03				0,06	

TAULUKKO 8. Moukarin korkeimpien ja matalimpien kohtien atsimuuttiarvot vauhtipyörähdyksen tukivaiheiden aikana [°] (\bar{x} ja sd laskettu vain neljällä vauhtipyörähdyksellä heittäjät)

#	pituus		ss1	ds1	ss2	ds2	ss3	ds3	ss4	ds4	ss5	delivery	release
1	82,40m	hp	101		155		180		190				133
		lp		312		320		345				325	
2	74,89m	hp	124		178		193		194				138
		lp		347		9		16				43	
3	74,85m	hp	143		162		181		184				138
		lp		311		328		334				317	
4	72,71m	hp	117		146		179		181				125
		lp		328		344		346				354	
5	68,12m	hp	91		129		158		163				115
		lp		319		342		351				10	
6	71,95m	hp	156		183		180						122
		lp		353		347						348	
7	75,72m	hp	115		148		168		178		180		130
		lp		326		325		331		335		336	
\bar{x}^*		hp	115		154		178		183				130
		lp		323		341		350				354	
sd*		hp	20		18		13		12				10
		lp		15		19		15				35	

7.4 Tukivaiheiden kestot

Neljällä pyörähdyksellä heittäneiden eri vauhtipyörähdyksen kestojen keskiarvot olivat seuraavat: 1. pyörähdys: $0,66 \pm 0,04$ s, 2. pyörähdys: $0,54 \pm 0,02$ s, 3. pyörähdys: $0,48 \pm 0,03$ s ja 4. pyörähdys: $0,48 \pm 0,01$ s. Pyörähdyskohtaisen kahden tuen vaiheen osuuden ja vaakanopeuden lisääntymisen väliltä ei löydetty korrelaatiota, sen sijaan pyörähdysten kahden tuen

vaiheen osuuden ja pystynopeuden lisääntymisen välillä oli tilastollisesti hyvin merkitsevä korrelaatio ($r = 0,511$; $n = 21$; $p = 0,009$). Taulukossa 9 on esitettyä heittäjien vauhtipyörähdysten tukivaiheiden kestot sekä yhden ja kahden tuen vaiheiden yhteiskestot. Taulukossa 10 näkyvät vauhtipyörähdysten eri vaiheiden alkuhetkien atsimuuttiarvot. Liitteessä 1 tukivaiheiden alkuhetket on esitetty graafisesti atsimuuttiasteikolla.

TAULUKKO 9. Vauhtipyörähdysten tukivaiheiden kestot, sekä yhden ja kahden tuen vaiheiden yhteiskestot [s] (* \bar{x} ja sd laskettu vain neljällä vauhtipyörähdyksellä heittäjät)

#	pituus	ss1	ds1	ss2	ds2	ss3	ds3	ss4	ds4	ss5	delivery	Σ ss	Σ ds
1	82,40m	0,28	0,38	0,27	0,27	0,25	0,20	0,23			0,25	1,03	1,10
2	74,89m	0,30	0,33	0,27	0,30	0,22	0,22	0,23			0,23	1,02	1,08
3	74,85m	0,35	0,37	0,28	0,27	0,23	0,27	0,20			0,27	1,07	1,17
4	72,71m	0,30	0,33	0,27	0,23	0,25	0,25	0,23			0,25	1,05	1,07
5	68,12m	0,32	0,32	0,28	0,25	0,25	0,25	0,23			0,27	1,08	1,08
6	71,95m	0,30	0,33	0,25	0,23	0,25					0,33	0,80	0,90
7	75,72m	0,33	0,38	0,30	0,30	0,23	0,25	0,23	0,22	0,22	0,22	1,32	1,37
\bar{x}^*		0,31	0,35	0,27	0,26	0,24	0,24	0,23			0,25	1,05	1,10
sd*		0,03	0,03	0,01	0,03	0,02	0,03	0,02			0,01	0,03	0,04

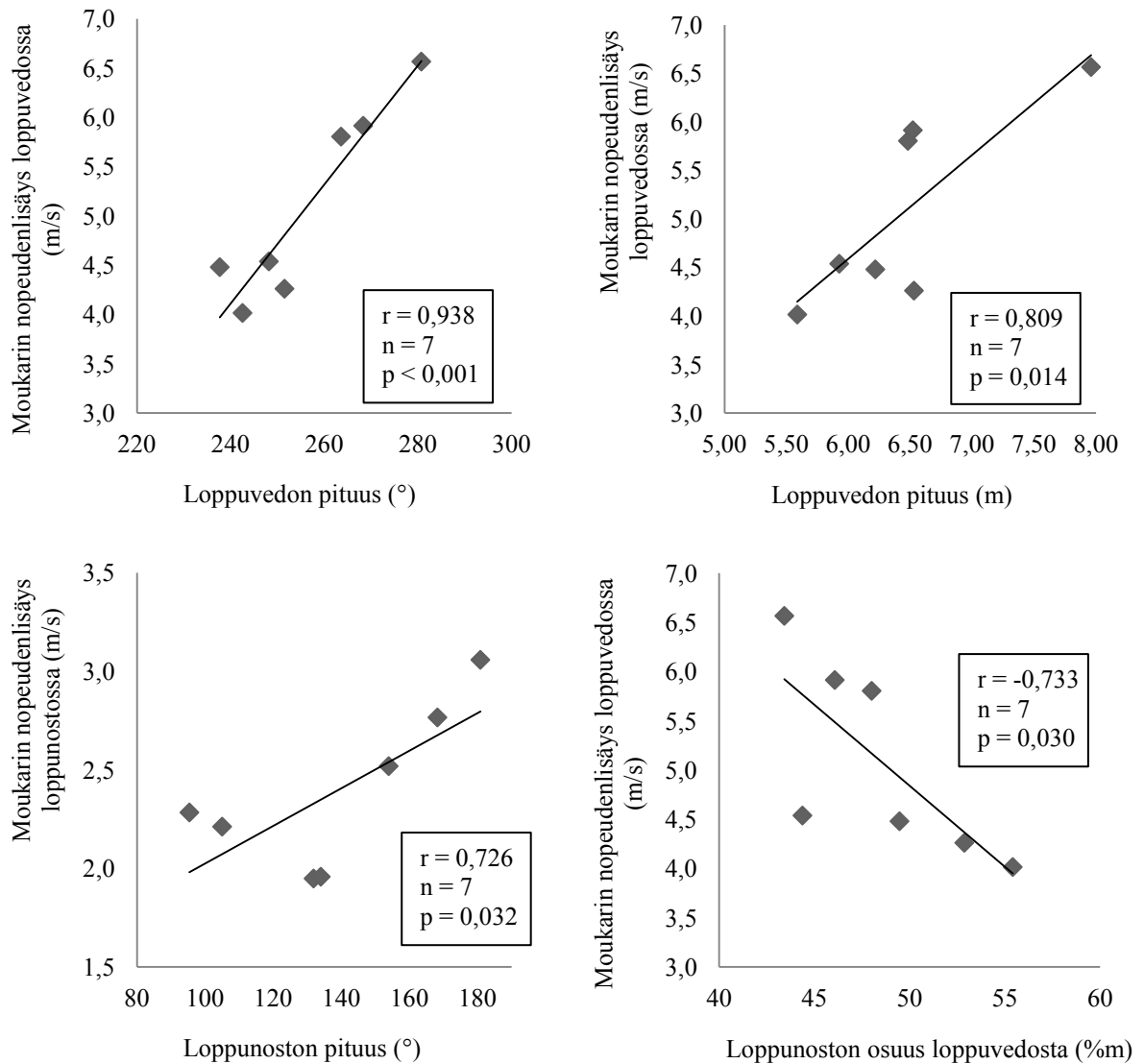
TAULUKKO 10. Vauhtipyörähdysten eri tukivaiheiden alkuhetkien atsimuuttiarvot [°] (* \bar{x} ja sd laskettu vain neljällä vauhtipyörähdyksellä heittäjät)

#	pituus	ss1	ds1	ss2	ds2	ss3	ds3	ss4	ds4	ss5	delivery	release
1	82,40m	13	188	11	219	33	233	60			230	133
2	74,89m	47	247	45	245	87	253	94			249	138
3	74,85m	13	218	29	236	49	230	98			229	138
4	72,71m	35	236	46	252	45	242	84			248	125
5	68,12m	39	240	38	243	49	223	74			223	115
6	71,95m	56	244	62	228	40					201	122
7	75,72m	20	196	20	233	52	241	78	253	109	247	130
\bar{x}^*		29	226	34	239	53	236	82			236	130
sd*		16	24	14	12	20	12	16			12	10

Loppuveto (delivery) katsottiin alkavaksi viimeisen kahden tuen vaiheen alusta ja loppuvan irrotushetkeen. Loppunosto määritettiin viimeisestä moukarin matalimmasta kohdasta irrotukseen. Tällöin moukari liikkui vertikaalisuunnassa ylöspäin. Keskiarvallisesti loppunosto oli noin puolet loppuvedosta kaikkien tutkittujen muuttujien osalta (kesto 47 %, pituus asteina 54 % ja metreinä 49 %). Lisäksi nopeuden lisääntyminen loppunoston aikana oli 48 % koko loppuvedosta. Loppuvedon ja -nostonaikaiset muuttujat sekä loppunoston osuudet loppuvedosta näkyvät taulukossa 11. Loppuvedon pituuden havaittiin sekä asteina että metreinä mitattuna korreloivan loppuvedonaikaisen nopeudenlisäyksen kanssa. Loppunoston pituus asteina korreloi loppunostonaikaisen nopeudenlisäyksen kanssa ja loppunoston osuudella loppuvedosta (%m) oli käänteinen korrelaatio loppunostonaikaiseen nopeudenlisäykseen (kuva 20).

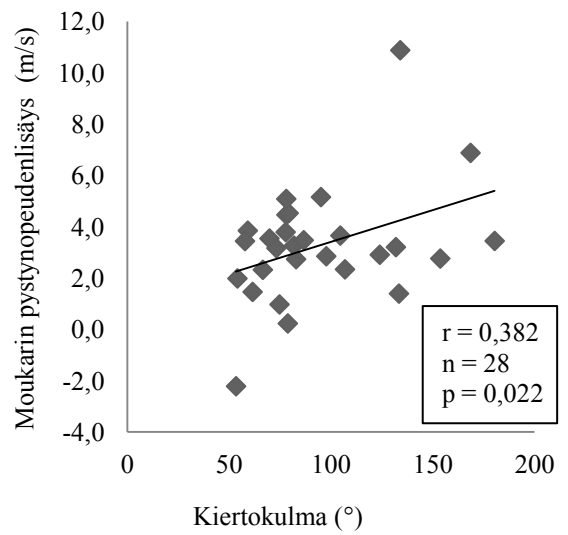
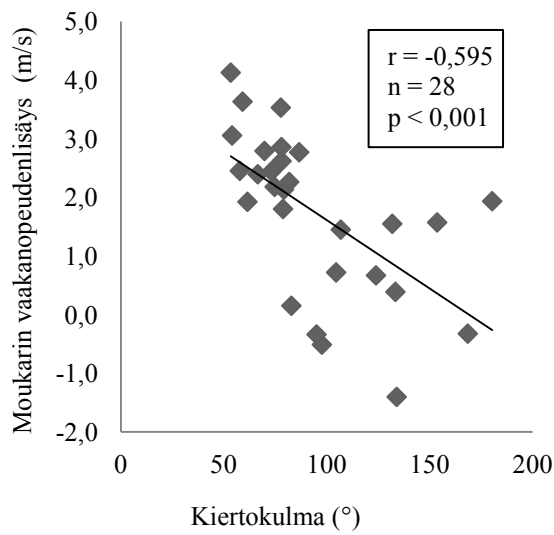
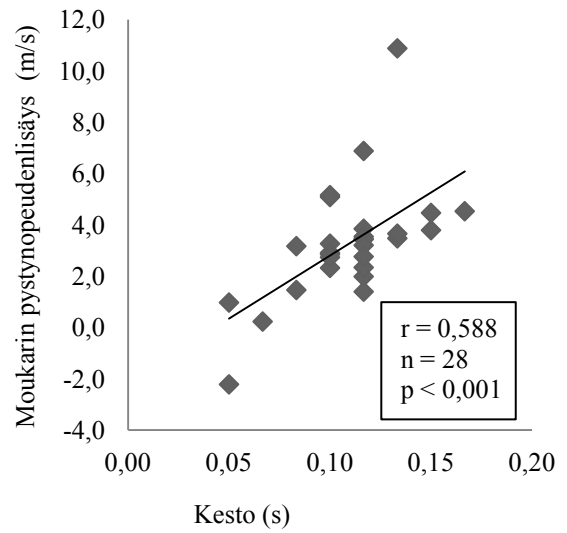
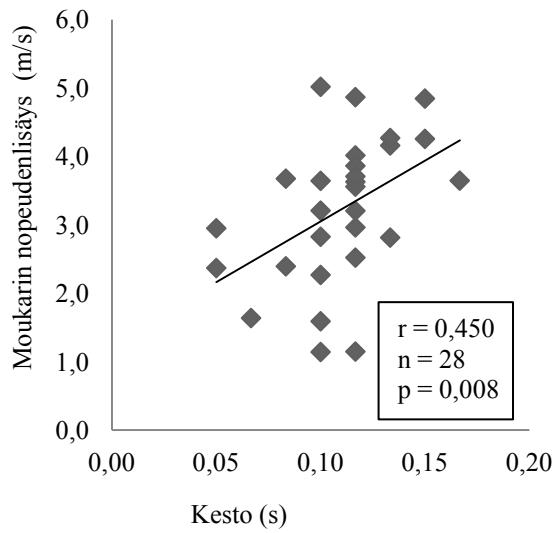
TAULUKKO 11. Loppuvedon ja loppunoston kesto, pituus asteina ja metreinä, niiden aikainen nopeudenlisäys sekä loppunoston osuudet loppuvedosta

#	pituus (m)	loppuveto				loppunosto				loppunosto / loppuveto			
		(s)	(°)	(m)	(m/s)	(s)	(°)	(m)	(m/s)	(%s)	(%°)	(%m)	(%m/s)
1	82,40	0,33	264	6,48	5,8	0,12	168	3,11	2,8	35	64	48	48
2	74,89	0,27	248	5,93	4,5	0,10	95	2,63	2,3	38	38	44	50
3	74,85	0,23	268	6,52	5,9	0,12	181	3,00	3,1	50	67	46	52
4	72,71	0,27	238	6,22	4,5	0,12	132	3,08	1,9	44	55	49	44
5	68,12	0,25	252	6,53	4,3	0,13	105	3,45	2,2	53	42	53	52
6	71,95	0,22	281	7,96	6,6	0,13	134	3,46	2,0	62	48	43	30
7	75,72	0,25	243	5,59	4,0	0,12	154	3,10	2,5	47	63	55	63
\bar{x}		0,26	256	6,46	5,1	0,12	138	3,12	2,4	47	54	49	48
sd		0,04	15,4	0,75	1,0	0,01	31,5	0,28	0,4	9	12	4	10



KUVA 20. Loppuvedon ja loppunoston muuttujien korrelaatiot nopeudenlisäyksen kanssa

Vauhtipyörähdystenaikaisten moukarin nostovaiheiden katsottiin alkavan moukarin matalimmasta kohdasta ja päättyvän seuraavan yhden tuen vaiheen alkuun. Nostovaiheiden kestot sekunteina ja kiertokulmat asteina näkyvät taulukossa 12. Nostovaiheen kesto korreloi moukarin resultantti- ja pystynopeuden lisääntymisen kanssa. Nostovaiheen kiertokulma korreloi moukarin vaaka- ja pystynopeudenlisäyksen kanssa (kuva 21).



KUVA 21. Vauhtipyörähdysten- sekä loppunostonaikaisten moukarin nostovaiheiden kestojen [s] ja kiertokulmien [°] korrelaatio moukarin nopeuden lisääntymiseen

TAULUKKO 12. Vauhtipyörähdystenaikaisten moukarin nostovaiheiden sekä loppunostojen kestot [s] ja kiertokulmat [°] (* \bar{x} ja sd laskettu vain neljällä vauhtipyörähdyksellä heittäjät)

#	pituus	kesto (s)					kiertokulma (°)				
		1	2	3	4	loppunosto	1	2	3	4	loppunosto
1	82,40 m	0,12	0,08	0,05		0,12	59	73	75		169
3	74,89 m	0,12	0,10	0,07		0,10	58	78	79		95
4	74,85 m	0,15	0,10	0,10		0,12	78	82	124		180
5	72,71 m	0,15	0,08	0,10		0,12	78	61	98		132
7	68,12 m	0,17	0,10	0,10		0,13	79	67	83		105
6	71,95 m	0,12	0,05			0,13	70	53			134
2	75,72 m	0,12	0,13	0,12	0,12	0,12	54	87	107	133	154
\bar{x}^*		0,14	0,09	0,08		0,12	70	72	92		136
sd*		0,02	0,01	0,02		0,01	11	8	20		38

7.5 Vartalon kierto ja laahauskulma

Analysoiduissa heitoissa vartalon kierto horisontaalitasossa (hartia-lantio-kulma) lisääntyi yhden tuen vaiheessa ja kiertoa ”purettiin” kahden tuen vaiheen aikana. Taulukossa 13 näkyvät heittäjien hartia–lantio-kulmat vauhtipyörähdysten eri vaiheiden alussa.

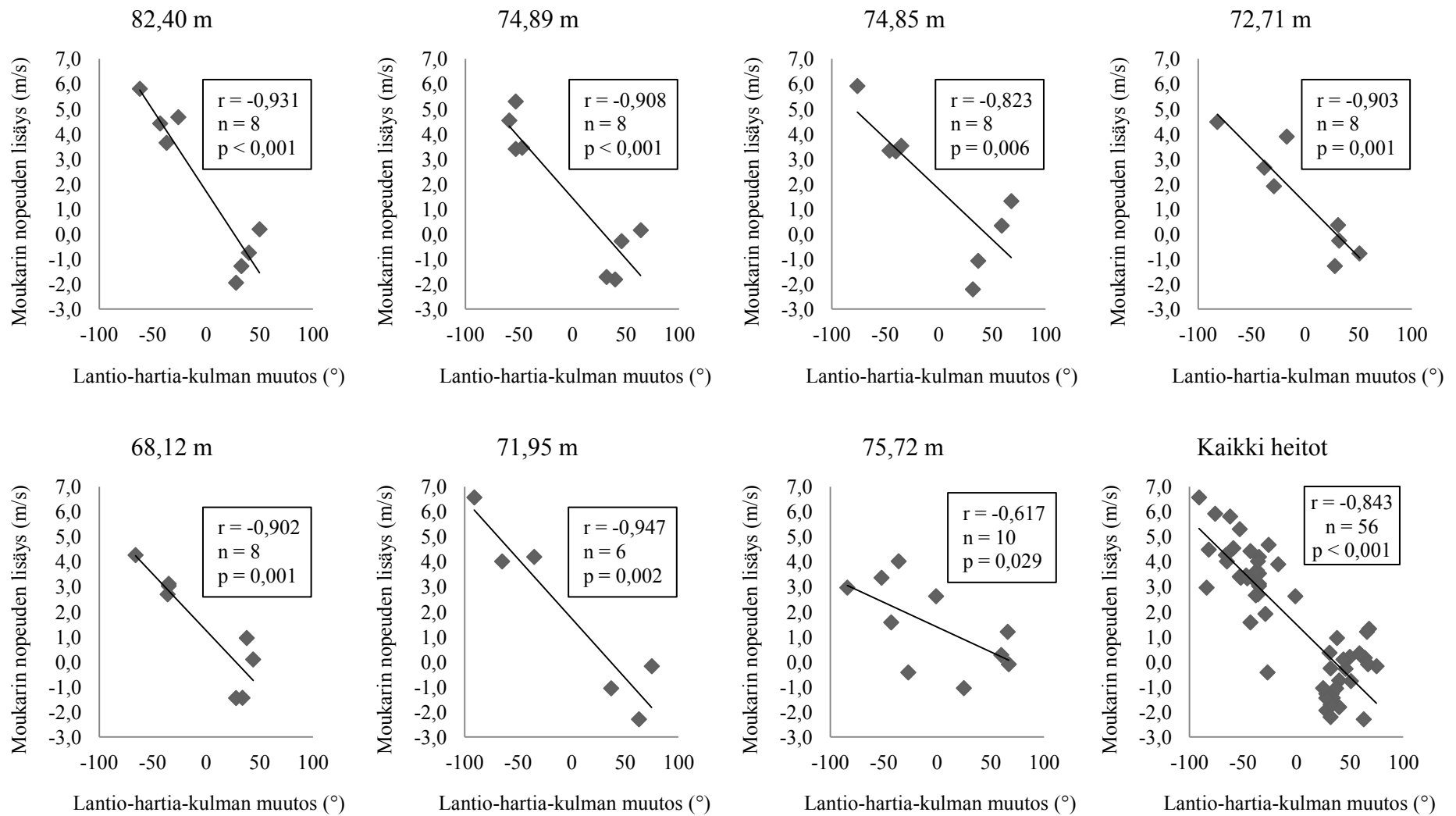
TAULUKKO 13. Lantio-hartia-kulma tukivaiheiden alussa [°] (0° = lantio ja hartiat samassa linjassa, > 0° = lantio hartioita edellä, < 0° = hartiat lantion edellä; * \bar{x} ja sd laskettu vain neljällä vauhtipyörähdyksellä heittäjät)

#	pituus	ss1	ds1	ss2	ds2	ss3	ds3	ss4	ds4	ss5	delivery	release
1	82,40m	3	53	27	67	24	57	20			48	-14
2	74,89m	8	72	19	65	12	52	5			37	-22
3	74,85m	-21	47	12	71	31	68	22			54	-22
4	72,71m	-2	29	12	44	6	57	28			56	-26
5	68,12m	8	46	10	54	19	53	18			46	-20
6	71,95m	-3	72	37	74	9					72	-19
7	75,72m	10	70	18	84	0	67	66	39	-4	21	-15
\bar{x}^*		-0,8	49,4	16,0	60,2	18,4	57,4	18,6			48,2	-20,8
sd*		12,0	15,5	7,0	11,0	9,8	6,3	8,5			7,5	4,4

Taulukossa 14 on lantio-hartia-kulman muutokset eri tukivaiheiden aikana sekä kahden tuen vaiheiden yhteenlasketut vartalon kierron vähenemiset (Σ purku). Viiden pyörähdyksen heitossa lantio-hartia-kulman ja moukarin nopeuden muutosten välinen käänteinen korrelaatio oli hieman muita heittoja heikompi ($r = -0,617$; $n = 10$; $p = 0,029$). Kaikkia heittoja tarkastellessa käänteinen korrelaatio on erittäin merkitsevä ($r = -0,843$; $n = 56$; $p < 0,001$) (kuva 22).

TAULUKKO 14. Lantio-hartia-kulman muutos eri tukivaiheiden aikana sekä kahden tuen vaiheiden yhteenlasketut vartalon kierron vähenemiset (Σ purku) [$^{\circ}$] (\bar{x} ja sd laskettu vain neljällä vauhtipyörähdyksellä heittäjät)

#	pituus	ss1	ds1	ss2	ds2	ss3	ds3	ss4	ds4	ss5	delivery	Σ purku
1	82,40m	50	-26	40	-43	33	-37			28	-62	-168
2	74,89m	64	-53	46	-53	40	-47			32	-59	-212
3	74,85m	68	-35	59	-40	37	-46			32	-76	-197
4	72,71m	31	-17	32	-38	51	-29			28	-82	-166
5	68,12m	38	-36	44	-35	34	-35			28	-66	-172
6	71,95m	75	-35	37	-65					63	-91	-191
7	75,72m	60	-52	66	-84	67	-1	-27	-43	25	-36	-216
\bar{x}^*		50,2	-33,4	44,2	-41,8	39,0	-38,8			15,0	-69,0	-183,0
sd*		16,0	13,4	9,9	6,9	7,2	7,6			33,6	9,7	20,4



KUVA 22. Lantio-hartia-kulman ja moukarin nopeuden muutosten välinen korrelaatio eri tukivaiheiden aikana.

Koko vauhdinottoa keskimääräisesti tarkasteltaessa hartialinjan ja hartia-moukari -linjan välinen kulma horisontaalitasossa (laahauskulma) oli pienin 1. ja 6. heitoissa (89 ja 86 astetta). Suurin tukivaiheiden alkujen keskiarvoistettu laahauskulma oli 2. heitossa (104 astetta), jossa ensimmäistä yhden tuen vaihetta lukuun ottamatta kulma ei ole alle sadan yhdenkään tukivaiheen alussa. Kaikkien heittojen vauhtipyörähdysten eri vaiheiden laahauskulmat eri tukivaiheiden alussa näkyvät taulukossa 15.

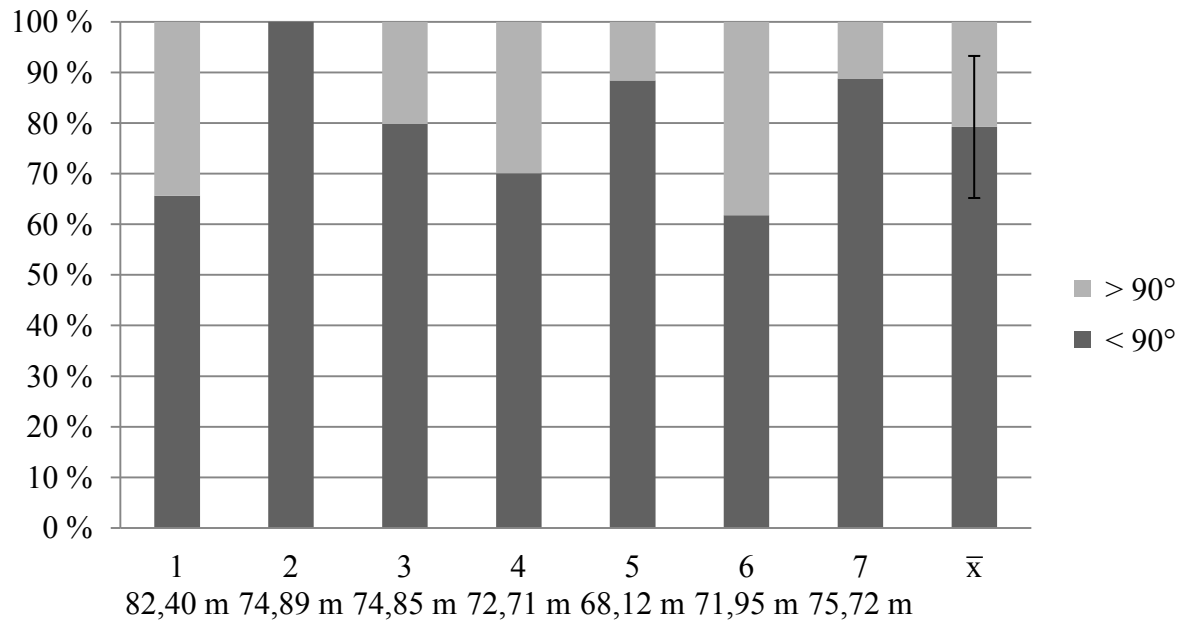
TAULUKKO 15. Laahauskulmat eri tukivaiheiden alussa [°] (90° = moukari suoraan hartialinjan edessä, > 90° = moukari hartioiden jäljessä, < 90° = moukari hartioiden edellä; \bar{x} ja sd laskettu vain neljällä vauhtipyörähdyksellä heittäjät)

#	pituus	ss1	ds1	ss2	ds2	ss3	ds3	ss4	ds4	ss5	delivery	release	\bar{x}
1	82,40m	89	100	87	87	86	96	81			90	86	89,3
2	74,89m	98	101	100	102	107	106	106			111	108	104,3
3	74,85m	86	100	96	112	91	105	99			96	83	96,4
4	72,71m	89	103	86	107	87	101	86			102	83	94,0
5	68,12m	85	108	92	110	91	107	91			111	63	95,4
6	71,95m	79	103	81	94	90					83	70	86,0
7	75,72m	92	105	92	99	114	99	115	100	107	111	82	101,5
\bar{x}^*		89,6	102,5	92,2	103,6	92,6	102,9	92,8			102,1	84,7	
sd^*		5,1	3,3	5,6	10,1	8,3	4,2	9,8			9,5	16,0	

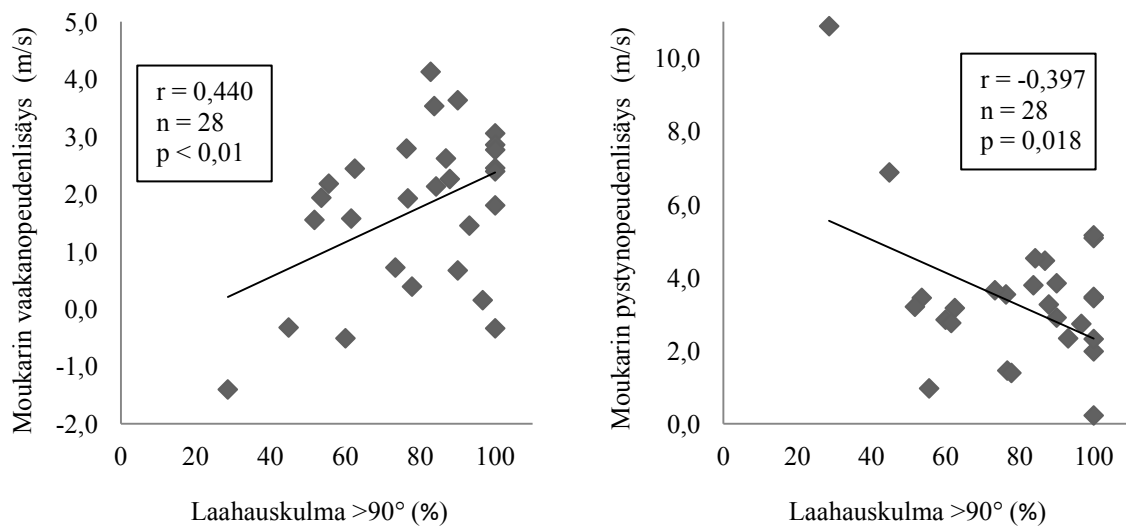
Heitossa numero 2 laahauskulma ei laskenut vauhdinoton aikana alkupyöritysten jälkeen kertaakaan alle 90 asteen. Jokaisessa heitossa pyörähdyskohtainen yli 90 asteen laahauskulman osuus oli pienin viimeisessä vauhtipyörähdyksessä. Yli 90 asteen laahauskulman osuus tukivaiheista ja pyörähdyksistä on esitettyinä taulukossa 16 ja laahauskulman suuruus alkupyöritysten jälkeisen vauhdinoton aikana kuvassa 23. Pyörähdyskohtainen yli 90 asteen laahauskulman osuus korreloi moukarin vaakanopeuden lisääntymisen kanssa. Lisäksi sillä oli käänteinen korrelaatio moukarin pystynopeuden kanssa (kuva 24).

TAULUKKO 16. Yli 90 asteen laahauskulman osuus pyörähdysten ja eri tukivaiheiden aikana [%] (* \bar{x} ja sd laskettu vain neljällä vauhtipyörähdyksellä heittäjät)

#	pituus		ss1	ds1	ss2	ds2	ss3	ds3	ss4	ds4	ss5	delivery
1	84,20m	pyörähdys	90		63		56		45			
		tukivaihe	88	91	56	69	40	75	29			60
2	74,89m	pyörähdys	100		100		100		100			
		tukivaihe	100	100	100	100	100	100	100			100
3	74,85m	pyörähdys	84		88		90		54			
		tukivaihe	67	100	76	100	79	100	50			56
4	72,71m	pyörähdys	87		77		60		52			
		tukivaihe	78	95	56	100	40	80	36			67
5	68,12m	pyörähdys	84		100		97		73			
		tukivaihe	68	100	100	100	100	93	71			75
6	71,95m	pyörähdys	76		83		29					
		tukivaihe	56	95	67	100	7					45
7	75,72m	pyörähdys	100		100		93		78			62
		tukivaihe	100	100	100	100	100	87	57	100	77	46
\bar{x}^*		pyörähdys	89		85		80		65			
		tukivaihe	80	97	78	94	72	90	57			72
sd*		pyörähdys	7		16		21		22			
		tukivaihe	14	4	22	14	30	12	29			17



KUVA 23. Laahauskulman suuruus vauhtipyörähdysten aikana.



KUVA 24. Tukivaiheenaikaisen yli 90 asteen laahauskulman ja moukarin nopeuden lisääntymisen välinen korrelaatio.

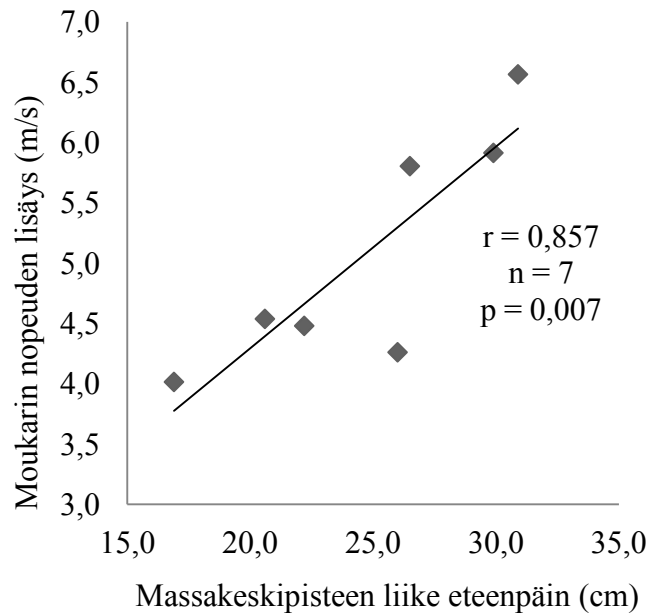
7.6 Heittäjän massakeskipisteen liike

Heittäjien massakeskipiste liikkui vauhtipyörähdysten aikana kohti heittosuuntaa keskiarvoisesti $147,1 \pm 12,5$ cm. Loppuviedon aikana suurin etenemä oli kolmella pyörähdyksellä heittä-

neellä (30,9 cm) ja pienin viidellä vauhtipyörähdyksellä heittäneellä heittäjällä (16,9 cm). Neljällä pyörähdyksellä heittäneiden loppuvedon etenemä oli keskiarvoltaan $25,0 \pm 3,7$ cm. Heittäjän massakeskipisteen liike eteenpäin korreloi vahvasti moukarin nopeuden lisääntymisen kanssa loppuvedossa ($r = 0,857$; $n = 7$; $p = 0,007$) (kuva 25). Heittäjien massakeskipisteiden liike heittosuuntaan vauhtipyörähdysten aikana näkyy taulukossa 17.

TAULUKKO 17. Heittäjän massakeskipisteen liike heittosuuntaan [cm] (* \bar{x} ja sd laskettu vain neljällä vauhtipyörähdyksellä heittäjät)

#	pituus		ss1	ds1	ss2	ds2	ss3	ds3	ss4	ds4	ss5	delivery	yht.
1	82,40m	pyörähdys	24,3		40,4		45,4		43,1				
		tukivaihe	-5,2	29,5	8,7	31,7	15,9	29,5	16,6			26,5	153,2
2	74,89m	pyörähdys	29,0		44,8		47,9		43,0				
		tukivaihe	-2,8	31,8	11,1	33,7	19,2	28,7	22,4			20,6	164,7
3	74,85m	pyörähdys	18,2		37,5		46,6		44,7				
		tukivaihe	-10,6	28,8	2,9	34,6	11,3	35,3	14,8			29,9	147,0
4	72,71m	pyörähdys	25,2		31,8		39,8		39,1				
		tukivaihe	-1,0	26,2	5,6	26,2	12,6	27,2	16,9			22,2	135,9
5	68,12m	pyörähdys	19,4		35,2		43,1		37,1				
		tukivaihe	-4,5	23,9	4,8	30,4	13,8	29,3	11,1			26,0	134,8
6	71,95m	pyörähdys	42,5		50,8		44,5						
		tukivaihe	10,7	31,8	16,4	34,4	13,6					30,9	137,8
7	75,72m	pyörähdys	15,7		28,4		40,4		38,8		36,3		
		tukivaihe	-6,8	22,5	1,4	27,0	12,0	28,4	17,9	20,9	19,4	16,9	159,6
		\bar{x}^*	23,2		37,9		44,6		41,4				
		tukivaihe	-4,8	28,0	6,6	31,3	14,6	30,0	16,4			25,0	147,1
		sd^*	4,4		5,0		3,2		3,2				
		tukivaihe	3,6	3,1	3,3	3,3	3,1	3,1	4,1			3,7	12,5



KUVA 25. Heittäjän massakeskipisteen etenemisen korrelaatio moukarin nopeuden lisääntymiseen loppuviedon aikana.

Heittäjää numero 3 lukuun ottamatta kaikkien heittäjien massakeskipiste liikkui vauhtipyörähdysten aikana oikealle keskiarvon ollessa $28,5 \pm 28,4$ cm. Loppuviedon aikana kuitenkin kaikkien heittäjien massakeskipiste liikkui hieman vasemmalle, keskiarvillisesti $16,7 \pm 6,5$ cm. Heittäjän massakeskipisteen liike vasemmalle ei kuitenkaan korreloinut moukarin nopeuden lisääntymisen kanssa loppuviedossa ($r = -0,090$; $n = 7$; $p = 0,424$). Taulukossa 18 on esitettyä heittäjien massakeskipisteen liike sivusuunnassa siten, että liike oikealle näkyy positiivisena ja vasemmalle negatiivisena. Myötäpäivään pyörivän heittäjän liikesuunta on muutettu vastaamaan vastapäivään pyörivää heittäjää.

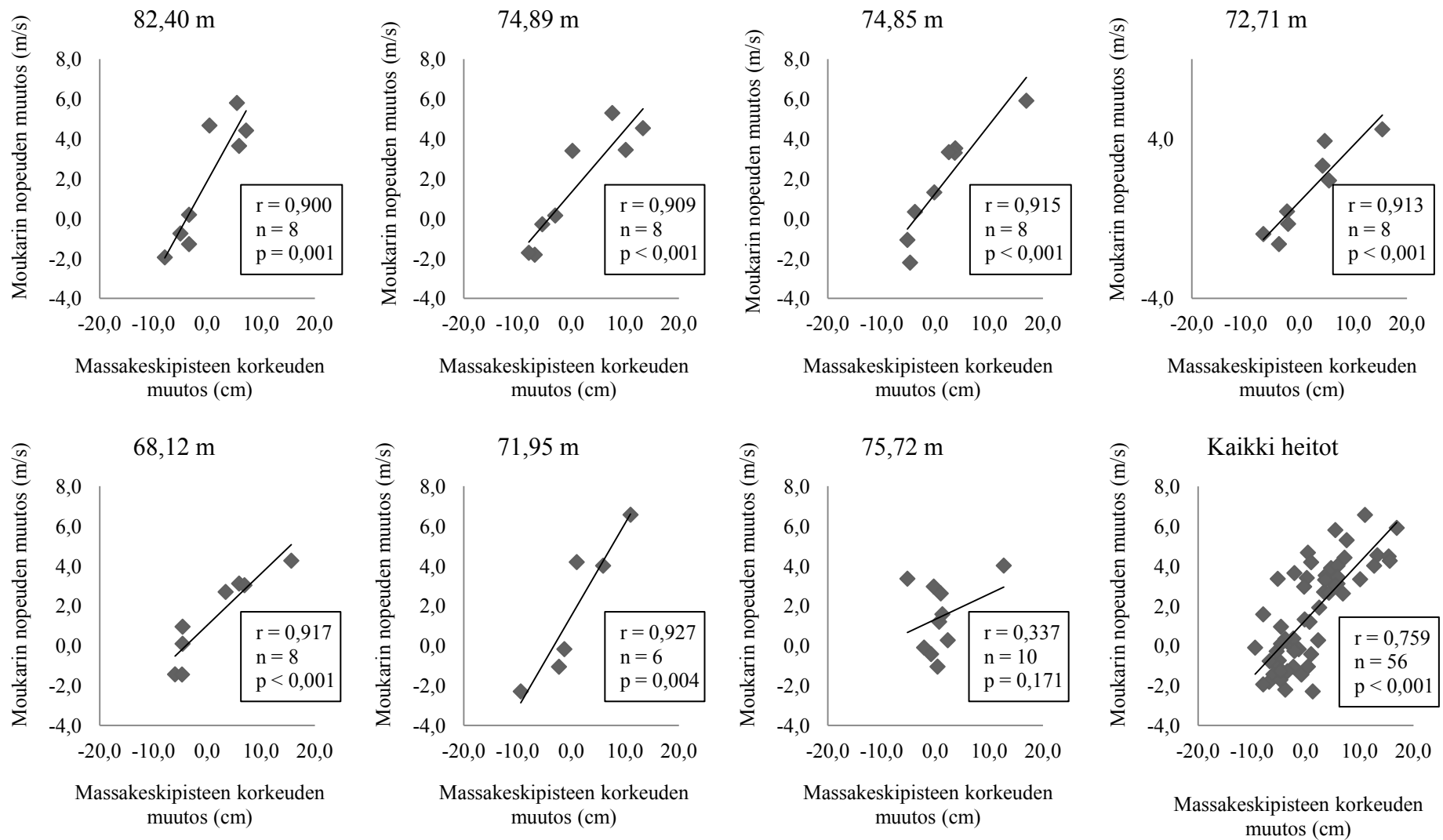
TAULUKKO 18. Heittäjän massakeskipisteen liike sivusuunnassa [cm] (positiivinen = oikealle, negatiivinen = vasemmalle, **myötöpäivään pyörivän heittäjän liikesuunta muutettu vastaamaan vastapäivään pyöriviä, \bar{x} ja sd laskettu vain neljällä vauhtipyörähdyksellä heittäjät)

#	pituus		ss1	ds1	ss2	ds2	ss3	ds3	ss4	ds4	ss5	delivery	yht.
1	82,40m	pyörähdys			12,8	11,8	11,9		-0,2				
		tukivaihe	9,1	3,7	11,8	0,0	17,1	-5,2	14,9			-15,1	36,3
2	74,89m	pyörähdys			12,5	-3,7	-6,5		-7,8				
		tukivaihe	22,3	-9,8	14,1	-17,8	12,5	-19,0	12,3			-20,1	-5,5
3	74,85m	pyörähdys			15,8	4,5	2,1		-4,8				
		tukivaihe	20,4	-4,6	16,7	-12,2	15,4	-13,3	19,5			-24,3	17,6
4	72,71m**	pyörähdys			16,1	10,8	-1,6		-2,5				
		tukivaihe	23,2	-7,1	22,4	-11,6	12,1	-13,7	14,7			-17,2	22,8
5	68,12m**	pyörähdys			20,1	19,0	19,0		13,4				
		tukivaihe	23,7	-3,6	22,7	-3,7	22,8	-3,8	20,3			-6,9	71,5
6	71,95m	pyörähdys			12,2	14,0	-3,5						
		tukivaihe	19,5	-7,3	16,8	-2,8	5,0					-8,5	22,7
7	75,72m	pyörähdys			5,0	-1,4	2,1		4,4	0,2			
		tukivaihe	10,6	-5,6	9,3	-10,7	15,4	-13,3	20,6	-16,2	19,0	-18,8	10,3
		\bar{x} *			18,5	14,0	11,1		9,3				
		tukivaihe	19,7	-4,3	17,5	-9,1	16,0	-11,0	16,3			-16,7	28,5
		sd*			5,5	10,9	10,8		12,6				
		tukivaihe	6,1	5,1	4,9	7,1	4,3	6,4	3,4			6,5	28,4

Kaikilla heittäjillä massakeskipiste nousi loppuvedon aikana (keskiarvo $12,9 \pm 3,8$ cm). Heittäjän massakeskipisteen nousu ei kuitenkaan korreloinut moukarin nopeuden lisääntymisen kanssa loppuvedossa ($r = -0,376$; $n = 7$; $p = 0,203$). Yksittäisillä heittäjillä eri tukivaiheidenaikainen massakeskipisteen korkeuden muutos kuitenkin korreloi tilastollisesti erittäin merkittävällä tasolla moukarin nopeuden muutoksen kanssa (kuva 26). Ainoastaan viiden pyörähdysten heitossa (heitto numero 7) korrelaatiota ei löytynyt. Heittäjien massakeskipisteen korkeuden muutokset vauhtipyörähdysten aikana näkyvät taulukossa 19. Massakeskipisteen korkeuteen vaikuttaa asentomuutosten lisäksi heittäjän pituus.

TAULUKKO 19. Heittäjän massakeskipisteen korkeuden muutokset eri tukivaiheiden aikana [cm] (\bar{x} ja sd laskettu vain neljällä vauhtipyörähdyksellä heittäjät)

#	pituus	ss1	ds1	ss2	ds2	ss3	ds3	ss4	ds4	ss5	delivery
1	82,40	-3,4	0,4	-5,0	7,2	-3,4	5,9	-7,9			5,5
2	74,89	-3,0	0,2	-5,4	7,6	-6,8	10,1	-7,9			13,3
3	74,85	-0,2	3,7	-3,8	3,6	-5,2	2,5	-4,7			16,9
4	72,71	-2,3	4,7	-2,1	4,3	-6,7	5,5	-3,8			15,4
5	68,12	-4,6	3,4	-4,6	5,9	-6,0	6,9	-4,7			15,6
6	71,95	-1,3	1,0	-2,3	5,9	-9,4					11,0
7	75,72	2,3	-5,2	0,7	-0,3	-2,1	1,0	-0,8	1,3	0,4	12,7
\bar{x}^*		-2,7	2,5	-4,2	5,7	-5,6	6,2	-5,8			13,3
sd*		1,6	2,0	1,3	1,8	1,4	2,7	2,0			4,6



KUVA 26. Eri tukivaiheiden aikaisten heittäjän massakeskipisteen korkeuden muutosten ja moukarin nopeuden muutosten välinen korrelaatio.

Heittäjän massakeskipisteen korkein ja matalin kohta ei aina osunut yhden pyörähdysten (ss + ds) ajalle, sillä ne ajoittuvat usein hyvin lähelle tukivaiheiden vaihtumishetkeä. Korkein ja matalin kohta määritettiin tukivaiheiden vaihtumisesta välittämättä hetkeen, jolloin heittäjän massakeskipisteen vertikaaliliikesuunta muuttuu. Pyörähdyskohtaiset korkeimmat ja matalimmat kohdat on esitetty atsimuuttiarvoina taulukossa 20 ja senttimetreinä taulukossa 21. Liitteessä 1 korkeimmat ja matalimmat kohdat on esitetty graafisesti atsimuuttiasteikolla.

TAULUKKO 20. Heittäjän massakeskipisteen korkeimpien (hp) ja matalimpien (lp) kohtien atsimuuttiarvot vauhtipyörähdysten (1, 2, 3, 4 ja 5) aikana sekä irrotushetkellä [°] (* \bar{x} ja sd laskettu vain neljällä vauhtipyörähdyksellä heittäjät)

#	pituus		1	2	3	4	5	release
1	82,40m	hp	66	47	73	39		133
		lp	273	251	233	230		
2	74,89m	hp	124	62	63	80		138
		lp	308	282	243	240		
3	74,85m	hp	129	81	77	26		138
		lp	259	266	238	204		
4	72,71m	hp	104	86	68	84		125
		lp	286	289	270	265		
5	68,12m	hp	124	92	78	74		115
		lp	295	285	258	246		
6	71,95m	hp	143	123	68			122
		lp	291	255	228			
7	75,72m	hp	85	99	74	36	51	130
		lp	303	305	259	178	156	
\bar{x}^*		hp	110	73	72	60		130
		lp	284	275	248	237		
sd*		hp	26	19	6	26		10
		lp	19	16	15	22		

TAULUKKO 21. Heittäjän massakeskipisteen korkeus [cm] (\bar{x} ja sd laskettu vain neljällä vauhtipyörähdyksellä heittäjät)

#	pituus		ss1	ds1	ss2	ds2	ss3	ds3	ss4	ds4	ss5	delivery	release
1	82,40m	t ₀	97,1	93,7	94,1	89,1	96,3	92,9	98,8			90,9	96,4
		min	93,7	85,8	89,1	87,1	92,9	92,9	90,9			90,9	
		max	99,4	94,1	95,7	96,3	96,7	99,0	98,8			96,4	
2	74,89m	t ₀	95,4	92,4	92,6	87,2	94,8	88,0	98,1			90,2	103,5
		min	92,4	86,9	87,2	85,5	88,0	88,0	89,8			90,2	
		max	98,3	92,6	93,0	94,9	94,8	98,2	98,1			103,5	
3	74,85m	t ₀	88,2	88,0	91,7	87,9	91,5	86,3	88,8			84,1	101,0
		min	88,0	85,7	87,9	86,2	86,3	86,2	83,6			84,1	
		max	93,0	91,7	92,0	91,5	91,9	89,8	88,8			101,0	
4	72,71m	t ₀	97,2	94,9	99,6	97,5	101,8	95,1	100,6			96,8	112,2
		min	94,9	89,9	97,5	95,1	95,1	93,6	96,8			96,4	
		max	100,9	99,6	101,5	101,8	102,3	100,6	100,6			112,2	
5	68,12m	t ₀	95,4	90,8	94,2	89,6	95,5	89,5	96,4			91,7	107,3
		min	90,8	86,5	89,6	87,2	89,5	88,5	91,7			91,1	
		max	98,3	94,2	96,6	95,5	96,5	96,4	96,4			107,3	
6	71,95m	t ₀	103,4	102,1	103,1	100,8	106,7					97,3	108,3
		min	102,1	97,3	100,8	99,8	97,3					95,8	
		max	108,9	103,1	106,6	106,7	107,2					108,3	
7	75,72m	t ₀	85,1	87,4	82,2	82,9	82,6	80,5	81,5	80,7	82,0	82,4	95,1
		min	85,1	78,2	82,2	80,5	80,5	80,1	79,7	80,7	80,6	82,4	
		max	89,8	87,4	86,0	82,9	83,0	81,7	81,5	82,6	82,4	95,1	
\bar{x}^*		t ₀	94,7	92,0	94,4	90,3	96,0	90,4	96,5			90,7	104,1
		min	92,0	87,0	90,3	88,2	90,4	89,8	90,6			90,5	
		max	98,0	94,4	95,8	96,0	96,4	96,8	96,5			104,1	
sd*		t ₀	3,7	2,7	3,1	4,2	3,7	3,6	4,6			4,5	6,0
		min	2,7	1,7	4,2	3,9	3,6	3,2	4,7			4,4	
		max	3,0	3,1	3,7	3,7	3,8	4,2	4,6			6,0	

7.7 Polvi- ja lonkkakulmat

Vastapäivään pyörivillä heittäjillä tukijalka on vasen ja kiertävä jalka eli niin sanottu vapaa jalka on oikea. Myötapäivään pyörivällä päinvastoin. Seuraavissa taulukoissa 22 ,23 ,24 ja 25 näkyvät heittäjien polvi- ja lonkkakulmien muutokset tukivaiheiden aikana. Polvi- ja lonkkakulmat tukivaiheiden alussa sekä tukivaiheiden minimi- ja maksimiarvot on esitetty liitteissä 2, 3, 4 ja 5.

TAULUKKO 22. Tukijalan polvikulman muutokset tukivaiheiden aikana [°] (* \bar{x} ja sd laskettu vain neljällä vauhtipyörähdyksellä heittäjät)

#	pituus	ss1	ds1	ss2	ds2	ss3	ds3	ss4	ds4	ss5	delivery
1	82,40	-46	49	-59	56	-47	58	-58			53
2	74,89	-33	40	-57	73	-77	79	-60			69
3	74,85	-33	57	-56	47	-51	42	-46			80
4	72,71	-30	43	-36	42	-52	46	-43			77
5	68,12	-27	37	-40	40	-45	54	-56			73
6	71,95	-50	35	-44	58	-75					87
7	75,72	-31	17	-35	48	-49	33	-26	23	-17	65
\bar{x}^*		-34	45	-50	52	-54	56	-53			70
sd*		7	8	11	13	13	14	8			11

TAULUKKO 23. Vapaan jalan polvikulman muutokset tukivaiheiden aikana [°] (* \bar{x} ja sd laskettu vain neljällä vauhtipyörähdyksellä heittäjät)

#	pituus	ss1	ds1	ss2	ds2	ss3	ds3	ss4	ds4	ss5	delivery
1	82,40	31	-31	15	-11	12	-8	4			16
2	74,89	48	-43	23	-14	10	-6	11			35
3	74,85	33	-31	21	-16	8	-16	7			59
4	72,71	26	-26	21	-10	8	-17	24			37
5	68,12	25	-28	22	-14	15	-22	14			47
6	71,95	31	-25	21	-12	10					5
7	75,72	69	-75	53	-53	24	-30	29	-30	35	18
\bar{x}^*		33	-32	20	-13	11	-14	12			39
sd*		9	7	3	3	3	7	8			16

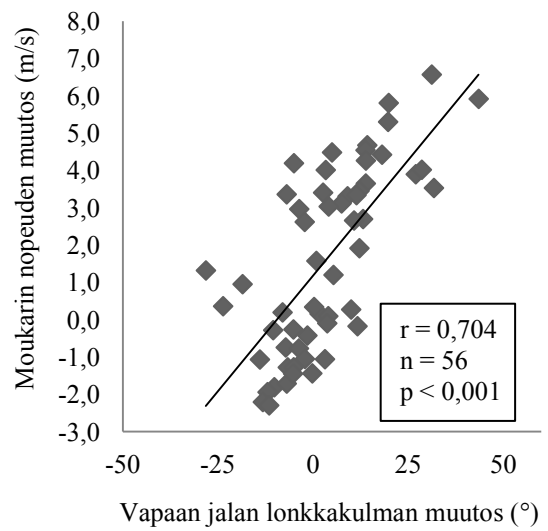
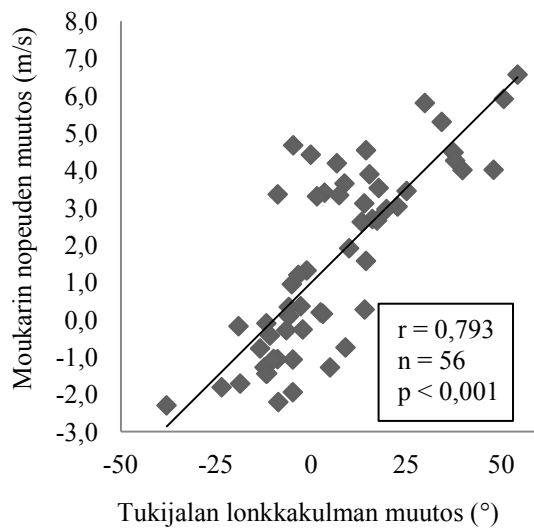
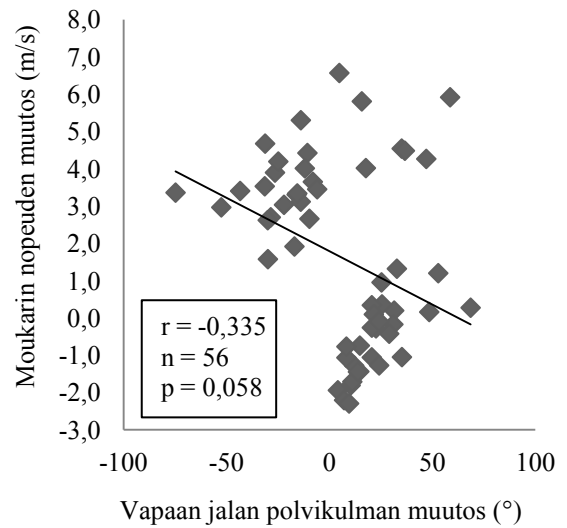
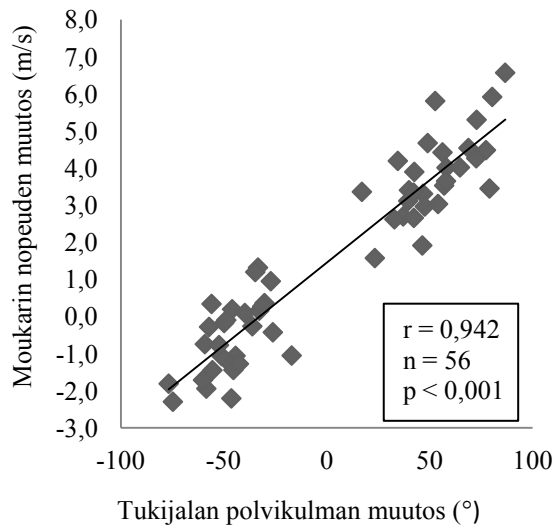
TAULUKKO 24. Tukijalan lonkkakulman muutokset tukivaiheiden aikana [°] (\bar{x} ja sd laskettu vain neljällä vauhtipyörähdyksellä heittäjät)

#	pituus	ss1	ds1	ss2	ds2	ss3	ds3	ss4	ds4	ss5	delivery
1	82,40	3	-5	9	0	5	9	-5			30
2	74,89	3	4	-7	34	-23	25	-19			14
3	74,85	-1	18	-6	2	-5	7	-9			51
4	72,71	-3	15	-2	17	-13	10	-12			37
5	68,12	-5	16	-6	14	-12	23	-12			38
6	71,95	-19	7	-9	40	-38					54
7	75,72	14	-9	-3	20	-12	13	-11	14	-10	48
\bar{x}^*		-1	10	-2	13	-10	15	-11			34
sd*		3	10	7	14	11	8	5			13

TAULUKKO 25. Vapaan jalan lonkkakulman muutokset tukivaiheiden aikana [°] (\bar{x} ja sd laskettu vain neljällä vauhtipyörähdyksellä heittäjät)

#	pituus	ss1	ds1	ss2	ds2	ss3	ds3	ss4	ds4	ss5	delivery
1	82,40	-8	14	-7	18	-7	14	-12			20
2	74,89	2	3	-10	20	-10	12	-7			14
3	74,85	-28	32	0	9	-14	11	-13			44
4	72,71	-24	27	-5	11	-4	12	-5			5
5	68,12	-19	13	4	7	0	4	-5			14
6	71,95	12	-5	3	3	-12					31
7	75,72	10	-7	5	-4	4	-2	-1	1	-2	29
\bar{x}^*		-15	18	-4	13	-7	11	-8			19
sd*		12	12	6	6	5	4	4			15

Polvi- ja lonkkakulmien muutokset korreloivat nopeuden muutosten kanssa tilastollisesti erittäin merkittävällä tasolla, lukuun ottamatta vapaan jalan polvikulman muutosta. Sen ja nopeuden muutoksen välillä oli käänteinen korrelaatio, joka lähestyi tilastollista merkitsevyyttä (kuva 27).



KUVA 27. Eri tukivaiheiden aikaisten nivelkulmamuu­to­sten ja moukarin nopeuden muutosten välinen korrelaatio.

8 POHDINTA

Tässä tutkimuksessa analysoitiin kansallisen ja kansainvälisen tason moukarinheittäjien heitotekniikkaa kahdessa Suomessa vuonna 2017 käydyssä kilpailussa kerätyn videomateriaalin avulla. Samalla kerättiin vertailudataa tulevia tutkimuksia ja kilpailuanalyysijä varten. Tuloksissa esitellään useita muuttujia, joille ei juuri ole olemassa aiempia vertailuarvoja. Aineisto kerättiin kilpailusuorituksista, jolloin liikeanalyysi jouduttiin tekemään manuaalisesti, mikä rajoitti raskautensa vuoksi analysoitavien heittojen lukumäärää. Analysoitujen heittojen vähäisen määrän vuoksi on tämän tutkimuksen tulosten yleistettävyyteen suhtauduttava varauksella. Tuloksista voidaan kuitenkin tehdä oletuksia, joiden vahvistaminen vaatii suuremmalla aineistolla tehtäviä jatkotutkimuksia.

Miesten moukarinheitossa yleisin käytetty vauhtipyörähdysten määrä on neljä. Myös suuressa osassa aiemmista tutkimuksista on analysoitu nimenomaan neljän pyörähdyksen tekniikkaa. Tutkimuksen pisin analysoitu heitto, Pawel Fajdekin heittämä 82,40 m, on kansainvälisellä tasolla todella kova tulos ja oli vuoden 2017 maailmantilastojen kolmanneksi pisin heitto. Näin ollen se muodosti hyvän vertailukohdan muiden heittäjien suorituksille. Analysoiduista heitoista kaksi oli heittopituudeltaan 4 cm päässä toisistaan. Näitä kahta heittoa vertailemalla voitiin havainnollistaa sitä, miten paljon saman lopputuloksen tuottavat suoritukset voivat teknisesti erota toisistaan. Yhdeltä heittäjältä analysoitiin paras heitto kahdesta eri kilpailusta, jotta saatiin parempi kuva siitä, johtuvatko suuret erot saman heittäjän heittojen välillä suoritusteknisistä vaihteluista vai kenties esimerkiksi niin sanotun urheilijan vireen päivittäisistä vaihteluista. Analysoiduista heitoista kaksi erosi muista vauhtipyörähdysten määrän osalta. Näiden heittojen analyysillä pyrittiin löytämään teknisiä erityispiirteitä, jotka mahdollisesti erottivat ne neljällä pyörähdyksellä suoritetuista heitoista. Edellä mainituista lähtökohdista tehtiin neljä tutkimuskysymystä.

8.1 Kokonaiskuva ja tutkimuskysymys 1

Millaisia teknisiä yhtäläisyyksiä ja eroavaisuuksia on löydettävissä yksittäisten neljällä vauhtipyörähdyksellä suoritettujen heittojen tekniikoista ja miten ne vaikuttavat moukarin loppunopeuteen? Neljän vauhtipyörähdysten heittoja (heitot 1, 2, 3, 4 ja 5) vertailtiin keskenään

siten, että painotettiin suomalaisten (heitot 2, 4 ja 5) vertailua puolalaisen Pawel Fajdekin 82,40 metriä kantaneen heiton (heitto 1) tekniikkaan. Lisäksi käsitellään yleisiä havaintoja, jotka eivät suoranaisesti liity vain tiettyyn tutkimuskysymykseen.

Moukarin lähtöarvot. Analysoitujen heittojen pituudet korreloivat vahvasti ($r = 0,978$; $n = 7$; $p < 0,001$) lähtönopeuden kanssa. Vastaava korrelaatio on todettu myös aiemmissa tutkimuksissa (Lichtenberg & Willis 1978; Hubbard 2000). Lähtökulman ja heittopituuden välinen korrelaatio lähestyi tilastollista merkitsevyyttä ($r = 0,664$; $n = 7$; $p = 0,052$), mutta lähtökorkeus ja heittopituus eivät noudattaneet vastaavaa säännönmukaisuutta, vaan lähtökorkeus vaihteli heiton pituudesta riippumatta. Otton (1991) mukaan optimaalinen lähtökulma olisi noin 44 astetta. Analysoituissa heitoissa lähtökulmat olivat välillä 40,1–42,7 astetta. Pisimmässä heitossa lähtökulma oli kuitenkin suurin. Yleisesti ottaen lähtökulmaan vaikuttavat heittäjän kokonaispituus ja hänen käsivarsiansa pituus. Teoriassa pitkä heittäjä, jonka kädet ovat lyhyet, pystyy tuomaan loppuvedossa moukarin lähemmäs jalkojaan ilman sen osumista maahan ja näin ollen nousukulma voi olla jyrkempi. Käytännössä lähtökulmaan vaikuttaa kuitenkin myös heittäjän tekninen taitavuus.

Lähtöarvojen perusteella laskettujen teoreettisten heittopituuksien ja todellisten mitattujen pituuksien perusteella voidaan arvioida, että Kalevan Kisoissa tuuliolosuhteet ovat saattaneet olla paremmat. Prosentuaaliset erot teoreettisten ja mitattujen tulosten välillä olivat keskimäärin hieman suuremmat Paavo Nurmi Games -kilpailun heitoissa (6,0 % ja 4,7 %). Aikaisempien tutkimusten mukaan ilmanvastuksen vaikutus olisi 2–6 %, mikä on linjassa tämän tutkimuksen tulosten kanssa (Hubbard 1989; De Mestre 1990; Dapena ym. 2003).

Moukarin nopeuden kehitys. Dapenan (1989) ja Maherasin (2009) mukaan suurin osa moukarin vaakanopeudesta tuotetaan vauhdinoton alkuvaiheessa. Suurin osa vauhtipyörähdysten aikaisesta lineaarinopeudenlisäyksestä on kuitenkin pystynopeutta (Dapena 1989; Murofushi ym. 2007). Otton (1991) mainitseman 44 asteen optimaalisen lähtökulman aikaansaamiseksi tulisi esimerkiksi heiton 1 (82,40 m) moukarin vaakanopeuden olla noin 4 % suurempi kuin pystynopeuden. Tämä tarkoittaa sitä, että lähtönopeuden ollessa 29,0 m/s, tulisi vaakanopeutta olla 20,9 m/s (71,9 % suhteessa lähtönopeuteen) ja pystynopeutta 20,1 m/s (69,5 %). Analysoidussa heitossa vaakanopeus oli 21,3 m/s ja pystynopeus 19,6 m/s, jolloin lähtökulmaksi tuli 42,7 astetta.

Suurin moukarin kuulun liikenopeus ensimmäisen yhden tuen vaiheen alkaessa oli heitossa numero 4 (16,2 m/s). Tässä heitossa liikenopeus lisääntyi kuitenkin vähiten vauhtipyörähdysten aikana (11,0 m/s), jolloin loppunopeus oli 27,0 m/s. Suurimman loppunopeuden (29,0 m/s) saavuttaneen heiton 1 alkunopeus oli 14,2 m/s, eli hieman heittojen keskiarvon (14,8 m/s) alapuolella, mutta nopeus lisääntyi vauhtipyörähdysten aikana eniten (14,8 m/s). Kaikkien suomalaisten heittäjien moukarin nopeus ensimmäisen yhden tuen vaiheen alkaessa oli suurempi kuin Fajdekin ja näin ollen nopeus kiihtyi heillä pyörähdysten aikana Fajdekia vähemmän.

Ulkomaalaisten heittäjien suorituksissa numero 1, 3 ja 7 vaakanopeus lisääntyi ensimmäisen pyörähdysten aikana yli 3 m/s, kun taas kaikilla suomalaisilla lisääntyminen jäi sen alle. Neljän pyörähdysten heittoja tarkastellessa havaittiin, että keskiarvallisesti sekä vaaka-, pysty-, että resultanttinopeuden lisääntyminen väheni kierros kierrokselta toiseksi viimeiseen kierrokseen asti. Viimeisellä pyörähdyksellä vaakanopeudenlisäys edelleen pieneni, mutta vahvan loppuviedon ansiosta sekä pysty-, että resultanttinopeus lisääntyivät selvästi. Kahden ensimmäisen pyörähdysten aikana vaakanopeuden osuus kokonaisnopeudenlisäyksestä oli huomattavasti suurempi kuin kolmannen tai neljännen pyörähdysten aikana. Tämä oli hyvin linjassa Dapenan (1989), Maherasin (2009) ja Murofushin ym. (2007) havaintojen kanssa. Todennäköinen syy vaakanopeuden lisäämisen haastavuudelle kahden ensimmäisen pyörähdysten jälkeen on se, että pyörimisnopeuden lisääntyessä voimantuottoaika lyhenee. Varsinkin kahden tuen vaiheen pituuden uskotaan olevan erittäin merkityksellinen vaakanopeudenlisäyksen kannalta (Rojaz-Ruiz & Gutiérrez-Dávila 2009). Lisäksi vaakanopeutta lisätään pääasiassa purkamalla vartalon kiertojännitystä, jolloin työskentelevät lihakset ovat voimantuottoominaisuuksiltaan huomattavasti heikommat kuin pystynopeuteen muun muassa vaikuttavat lantiota ja polvia ojentavat lihakset.

Heitoissa 1 ja 2 pystynopeuden lisääntyminen viimeisen pyörähdysten aikana oli keskiarvoa suurempi (6,9 m/s ja 5,2 m/s), mutta vaakanopeus samalla hidastui hieman. Lisäksi näissä heitoissa pystynopeudenlisäys kolmannen pyörähdysten aikana oli keskiarvoa pienempi. On siis mahdollista, että näissä suorituksissa heittäjät pyrkivät saattamaan moukari lentoradalleen jyrkemmässä kulmassa keskittymällä pystynopeudenlisäykseen viimeisellä pyörähdyksellä, erityisesti loppuviedon aikana, jolloin edeltävällä pyörähdyksellä lisäys jäi pienemmäksi. Toisaalta suuri lisäys pystynopeudessa on tapahtunut osittain vaakanopeuden kustannuksella.

Muissa neljän pyörähdysten heitoissa (heitot 3, 4 ja 5) pystynopeus lisääntyi melko tasaisesti koko vauhdinoton ajan, eikä viimeisellä pyörähdyksellä tullut huomattavan suurta lisäystä. Vaakanopeuden lisääntyminen taas väheni pyörähdys pyörähdykseltä ja oli kolmannella pyörähdyksellä keskiarvon alapuolella, mutta varsinkin heitoissa 3 ja 4 viimeisellä pyörähdyksellä lisäystä tuli hieman enemmän (1,9 m/s ja 1,5 m/s). Syy tähän on epäselvä, mutta yksi selittävä tekijä on mahdollisesti heittäjän vahvempi nojaaminen heittosuuntaan. Tällöin loppuveikon voimantuotto suuntautuisi hieman enemmän vaakatasoon ja pystynopeuden osuus jäisi pienemmäksi.

Moukarin kulkema matka. Moukarin kulkema matka määräytyy pääasiassa sen mukaan, miten kaukana moukarin kuula on pisteestä, jonka ympäri heittäjä-heittoväline-systeemi pyörii. Vauhdinoton alussa moukarin kiertosäteen tulisi olla mahdollisimman suuri, jolloin kulmanopeus pysyy hitaampana ja työskentelevien lihasten voimantuottoaika saadaan kasvatettua. Moukarin lineaarinopeuden lisääntyessä heittäjä joutuu nojaamaan voimakkaammin taaksepäin kumotakseen moukarin jännitysvoiman, jolloin moukarin kiertosäde pienenee. (Dapena & Feltner 1989; Dapena & McDonald 1989; Maronski 1991; Hill 1922.)

Kaikkien analysoitujen heittojen moukarin kulkema matka heiton aikana oli yllättävän samanmittainen keskiarvon ollessa 43,41 m ja keskihajonnan 0,68 m. Voisi olettaa, että keskenään erimittaiset heittäjät kierrättäisivät moukaria erimallista kehää pitkin. Neljän pyörähdysten heitoissa moukarin kulkeman pisimmän ja lyhimmän matkan ero oli 1,85 m, mikä on kuitenkin huomattava. Keskiarvoja tarkastellessa viimeisen vauhtipyörähdysenaikainen moukarin kulkema matka erottui selvästi muita pyörähdyksiä pidempänä siitä huolimatta, että moukarin nopeus oli silloin suurempi ja heittäjän oli nojattava enemmän taaksepäin moukarin sädettä pienentäen. Tämä selittyy kuitenkin osittain sillä, että viimeinen pyörähdys loppuu irrotushetkeen, joka yleisesti sijoittui myöhemmäksi kuin sitä edeltäneet yhden tukivaiheen alkuketket. Näin ollen vetovaiheen pituus kasvaa. Neljän vauhtipyörähdysten heitoista huomattavin viimeisen pyörähdysenaikainen moukarin kulkeman matkan kasvu oli pisimmässä heitossa (heitto 1).

Moukarin korkein ja matalin kohta. Vauhtipyörähdyksissä pyörähdyskohtainen moukarin korkein kohta saavutetaan yhden tuen vaiheen aikana ja matalin kohta taas kahden tuen vaiheessa. Rinta-ahon (2002, 63) mukaan moukarin alimman kohdan tulisi vastapäivään pyöri-

vällä heittäjällä siirtyä asteittain vasemmalle vauhdinoton edetessä. Jokaisella heittäjällä näin pääsääntöisesti kävikin, mutta myös joitakin eroavaisuuksia löytyi.

Vauhdinoton edetessä moukarin korkein kohta nousi ja matalin kohta laski, poikkeuksena kahdella heittäjällä (heitot 4, 5 ja 7), joilla moukarin matalin kohta pysyi samana tai nousi aavistuksen verran toiseksi viimeisestä pyörähdyksestä viimeiseen siirryttäessä. Moukarin korkeimman kohdan nousu ja matalimman lasku kuvaavat moukarin radan muuttumista pystymmäksi vauhdinoton edetessä. Huomionarvoista on, että mahdollisimman jyrkän lähtökulman aikaansaamiseksi loppuvetovaiheen matalimman kohdan tulee olla niin alhaalla kuin mahdollista. Moukarin kuulan halkaisijan ollessa sääntöjen mukaisesti 110–130 mm, heitoissa 1, 3 ja 7 moukarin osuminen maahan viimeisen pyörähdyksen aikana oli vain muutamasta senttimetrinä kiinni, sillä moukarin kuulan keskipiste kävi alimmillaan 7 cm korkeudessa.

Ulkomaalaisten heittäjien heitoissa 1 ja 3 sekä heiton matalin että korkein kohta siirtyivät vauhdinoton edetessä pyörimissuunnan mukaisesti vasemmalle. Heitossa 1 loppuvetonaikainen moukarin alin kohta oli kuitenkin 20 astetta edellisen pyörähdyksen alinta kohtaa aiemmin. Vastaavanlainen tilanne oli 3. heitossa, missä loppuvetodon alin kohta oli 17 astetta edellisen kierroksen alinta kohtaa aiemmin. Neljällä pyörähdyksellä heittäneillä suomalaisilla loppuvetodon alin kohta oli edelliseen pyörähdykseen nähden myöhäisempi. Erityisen suuri ero 1. heittoon oli toisessa heitossa, jossa loppuvetodon alin kohta oli 27 astetta myöhäisempi kuin edellisen pyörähdyksen alin kohta. Lisäksi 2. heitossa moukarin korkein ja matalin kohta oli kaikissa vauhtipyörähdyksissä hieman muita heittäjiä myöhäisempi. Tämä voisi teoriassa johtua siitä, että heitto suuntautuisi x-akseliin nähden vasemmalle. Irrotus sijoittui kuitenkin atsimuuttiaasteikolla hyvin samanaikaiseksi muiden heittäjien kanssa, joten tämä vaikuttaa epätodennäköiseltä.

Tukivaiheiden kestot. Vauhtipyörähdyksen tukivaiheiden kestoja vertaillen tulee huomioida, että mitä kovemmalla vauhdilla heittäjä liikkuu, sitä nopeammin hän suorittaa yksittäisen pyörähdyksen ja siten myös eri tukivaiheiden kestot lyhenevät. Rojaz-Ruizin ja Gutiérrez-Dávilan (2009) mukaan kahden tuen vaiheen pitkittäminen heiton alkuvaiheessa voi olla hyvä tapa tehostaa moukarin vaakanopeuden lisääntymistä. Pisimmässä heitossa numero 1 ensimmäinen ja toinen kahden tuen vaihe olivatkin neljän pyörähdyksen heittojen keskiarvoihin verrattuna kestoltaan pidempiä ja kolmas oli selvästi keskiarvoa lyhyempi. Jokaisen suomalaisheittäjän

ensimmäinen kahden tuen vaihe taas oli huomattavasti (13–16 prosenttia) lyhyempi 1. heittoon verrattuna. Suomalaisheittäjien aikaansaama moukarin vaakanopeudenlisäys ensimmäisen pyörähdyksen aikana oli myös huomattavasti pienempi 1. heittoon verrattuna. Tukivaiheiden kestoja tarkastellessa on kuitenkin muistettava, että liikeanalyysin kuvataajuudesta johtuen virhemarginaali oli $\pm 16,7$ ms.

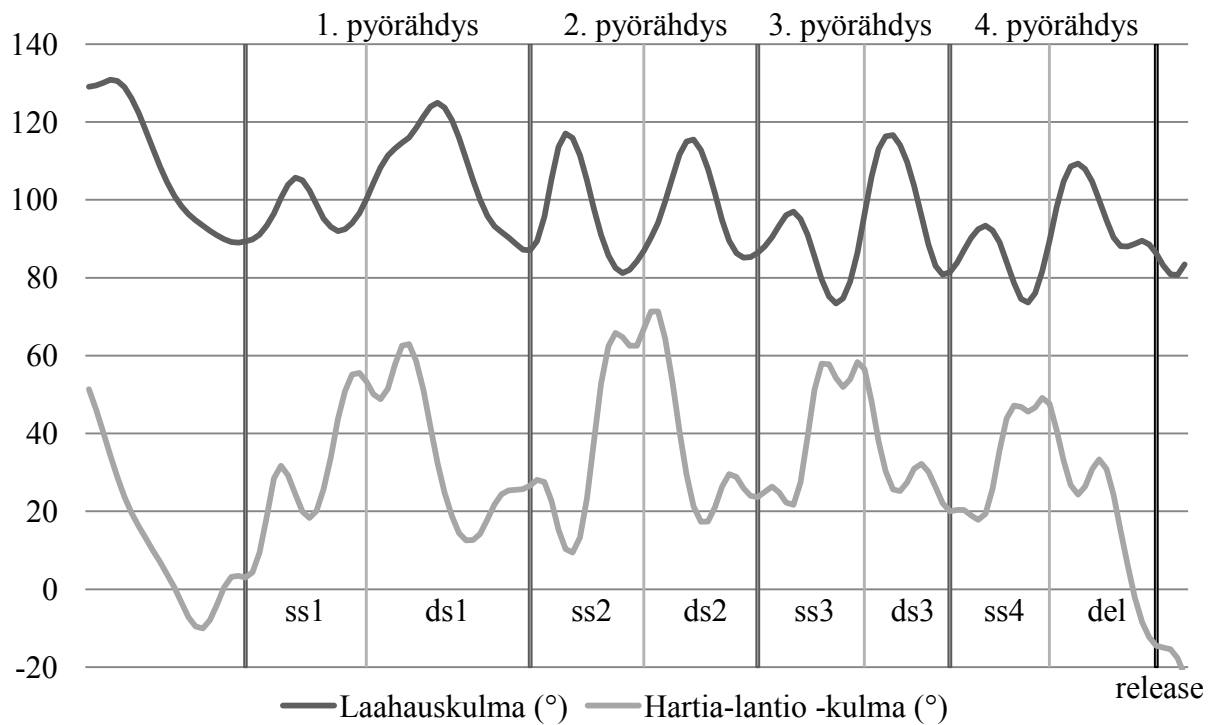
Sakrin (2012) mukaan heittäjä pystyy lisäämään heittäjä-heittoväline-kompleksin kokonaisliike-energiaa jokaisella vauhtipyörähdyksellä vain lyhyen ajan moukarin alimmasta kohdasta kahden tuen vaiheen loppuun. Tämä johtuu siitä, että vauhtipyörähdyksen muissa vaiheissa kompleksin kokonaisliike-energia pääasiassa vain siirtyy heittäjältä moukarille tai päinvastoin. (Sakr 2012.) Tämä lyhyt pyörähdyksen vaihe, jolloin heittäjän molemmat jalat ovat maassa ja moukari on nousevalla radalla (nostovaihe), saattaa siten olla vauhdin kiihdyttämisen kannalta erityisen tärkeä. Tästä ei kuitenkaan ole vielä kovinkaan paljon tietoa, eikä tämän tutkimuksen tuloksille löytynyt vertailuarvoja. Tässä tutkimuksessa nostovaiheen kesto korreloi tilastollisesti merkitsevällä tasolla sekä moukarin kokonaisnopeuden ($r = 0,450$; $n = 28$; $p = 0,008$) että pystynopeuden ($r = 0,588$; $n = 28$; $p < 0,001$) lisääntymisen kanssa. Löydöksen mukaan nostovaiheen kesto korreloi siis ainakin moukarin liike-energian kasvun kanssa. Heittäjän liike-energian muutoksia ei kuitenkaan seurattu, joten moukari-heittäjä-kompleksin kokonaisliike-energian muutoksista ei kannata vetää liian pitkälle meneviä johtopäätelmiä.

Tulososiossa esitetystä loppunostosta ei kirjallisuushaussa löydetty aiempia tutkimustuloksia, mutta se haluttiin määritellä, jotta tästä tutkimuksesta saadut arvot olisivat tulevien tutkimusten käytettävissä. Siitä, onko loppuvedon ja loppunoston muuttujilla vaikutusta moukarin nopeudenlisäykseen loppuvedossa, saatiin positiivisia tuloksia loppuvedon pituuden (asteina ja metreinä) sekä loppunoston pituuden (asteina) osalta. Vahvimmin loppuvedonaikaisen nopeudenlisäyksen kanssa korreloi loppuvedon pituus asteina ($r = 0,938$; $n = 7$; $p < 0,001$). Tämä voidaan tulkita niin, että viimeisen pyörähdyksen kahden tuen vaihetta saattaisi olla hyödyllistä pidentää pyrkimällä viimeisen yhden tuen aikana tuomaan kiertävä jalka maahan mahdollisimman nopeasti.

Vartalon kierto ja laahauskulma. Otton (1991) ja Rinta-ahon (2002, 28) mukaan heittäjän hartia-lantio-kulma kasvaa yhden tuen vaiheen aikana ja kulmaa puretaan kahden tuen aikana, jolloin moukarin vauhti kiihtyy. Näin ollen voitaisiin siis olettaa, että mitä enemmän yhden

tuen aikaista kiertoa ja sitä seuraavaa kierron purkua saadaan vauhdinoton aikana toteutettua, sitä suurempi on loppunopeus. Tukivaiheiden aikaisen lantio-hartia-kulman muutoksen ja moukarin nopeuden lisäyksen väliltä löydettiin erittäin merkitsevä tilastollinen korrelaatio ($r = -0,843$; $n = 56$; $p < 0,001$). Tämä tarkoittaa, että kun vartalon kierto lisääntyi yhden tuen vaiheen aikana, moukarin nopeus kasvoi vain vähän tai jopa hidastui. Kahden tuen aikana moukarin nopeus taas kiihtyi sitä enemmän, mitä enemmän vartalon kiertoa purettiin. Yksittäisten heittäjien välillä oli pieniä eroja siinä, kuinka vahvasti lantio-hartia-kulman muutos ja moukarin nopeudenlisäys korreloivat keskenään. Tämä saattaa viitata eräänlaiseen heittäjäkohtaiseen hyötysuhteeseen tai toisaalta kertoa siitä, onko vartalon kierron purku ollut aktiivisesti moukaria kiihdyttävää vai passiivista ylävartalon kiertymistä moukarin mukana.

Laahauskulman ja moukarin nopeuden lisääntymisen väliltä löydettiin korrelaatiot siten, että tukivaiheenaikainen yli 90 asteen laahauskulma korreloi positiivisesti vaakanopeuden lisääntymisen kanssa ($r = 0,440$; $n = 28$; $p < 0,01$) ja negatiivisesti pystynopeuden lisääntymisen kanssa ($r = -0,397$; $n = 28$; $p = 0,018$). Laahauskulmia tarkastellessa huomionarvoista on se, että esimerkiksi pisimmässä heitossa (1. heitto) tukivaiheiden alkuhetkien laahauskulman keskiarvo oli 89,3 astetta, mutta noin 2/3 vauhtipyörähdysten ajasta laahauskulma oli yli 90 astetta. Kuten kuvasta 28 nähdään, oli laahauskulman huippuarvo jokaisen kahden tuen vaiheen aikana lähellä 120 astetta. Sekä hartia-lantio-kulma, että laahauskulma vaihtelivat suuresti eri tukivaiheiden aikana ja esimerkiksi laahauskulman kahden tuen vaiheiden huippuarvot saavutettiin kaikissa heitoissa pääsääntöisesti vasta hieman ennen kyseisen tukivaiheen puoliväliä. Tämä johtui todennäköisesti siitä, että kahden tuen vaiheen alettua heittäjä pyrkii pienentämään hartia-lantio-kulmaa kiihdyttämällä hartioiden kiertoa pyörimissuuntaan keskivartalolihasensa avulla. Tällöin moukari taas pyörii hartioihin nähden hitaammin ja laahauskulma kasvaa ennen kuin se alkaa pienentyä moukarin pyörimisnopeuden kiihtyessä ja hartioiden pyörimisen hidastuessa. Tämän vuoksi taulukossa 13 näkyvät hartioiden ja lantion väliset kulmat sekä taulukossa 15 esitetyt laahauskulmat eivät välttämättä kerro koko totuutta vauhtipyörähdystenaikaisista tapahtumista näissä muuttujissa.



KUVA 28. Heiton 1 laahauskulma ja hartia-lantio -kulma vauhtipyörähdysten aikana [°]

Heittäjän massakeskipisteen liike. Moukarinheittoringin läpimitta on 213 cm ja sen sisällä on suoritettava haluttu määrä vauhtipyörähdyksiä (useimmiten neljä). Moukarin horisontaalinopeuteen vaikuttaa kehänopeuden lisäksi myös heittäjä-moukari -systemin horisontaalinopeus (Maheras 2009). Näin ollen voidaan olettaa, että mitä suurempi on heittäjän massakeskipisteen nopeus heittosuuntaan pyörähdysten lopussa, sitä suurempi lisäys moukarin horisontaalinopeuteen saadaan. Sivuttaissuuntaisesta horisontaalisiin siirtymästä taas voidaan olettaa olevan haittaa, sillä heittosuunnasta poikkeava heittäjä-heittoväline-systemin nopeus ei lisää moukarin nopeutta heittosuuntaan. Tässä tutkimuksessa ei kuitenkaan otettu huomioon sitä, lähtikö moukari lentämään irrotushetken jälkeen suoraan x-akselin suuntaisesti. Lisäksi on huomioitava se, ettei heittäjän massakeskipisteen liike kerro kovinkaan paljon koko systemin liikesuunnista, sillä kuten moukari, myös heittäjä pyörii yhteisen etenevän keskipisteen ympäri.

Heittäjän massakeskipisteen etenemä x-akselin suuntaan loppuviedon aikana korreloi tilastollisesti hyvin merkittäväällä tasolla moukarin nopeuden lisääntymisen kanssa ($r = 0,857$; $n = 7$; $p = 0,007$). Loppuviedonaikainen siirtymä oli kaikissa neljän pyörähdysten heitoissa lähes yhtä suuri, eikä mainittavaa poikkeavuutta ollut myöskään aiempien tukivaiheiden aikaisissa mas-

sakeskipisteen siirtymissä. Sivuttaissuunnassa tarkasteltuna heittoa numero 2 lukuun ottamatta kaikissa heitoissa heittäjän massakeskipiste liikkui heittosuuntaan nähden oikealle vauhtipyörähdysten aikana. Tämä ei kuitenkaan välttämättä tarkoita, että liike-energiaa menisi hukkaan, sillä kuten todettua, moukarin tarkkaa lähtösuuntaa ei määritetty. Loppuveidon aikana heittäjän massakeskipiste liikkui vasemmalle kaikissa heitoissa. Moukaria vasten nojattessaan heittäjä saa hieman lyhennettyä moukarin kiertosädetä, jolloin sen lineaarinopeus kiihtyy.

Massakeskipisteen korkeuteen vaikuttaa suuresti heittäjän pituus, joten vertailu heittäjien välillä ei liene kovinkaan mielekästä. Sen sijaan vertailua kannattanee kohdistaa massakeskipisteen korkeusprofiiliin eli muutoksiin vauhtipyörähdysten aikana. Heittoa 7 lukuun ottamatta heittäjän massakeskipisteen korkeimmat ja matalimmat kohdat osuivat todella tarkasti tukivaiheiden muutoshetkiin. Tämä tarkoittaa sitä, että heti kun heittäjän molemmat jalat ovat maassa, hän alkaa työntää itseään ylemmäs. Toisaalta, kun taas toinen jalka irtoaa maasta, heittäjä alkaa pudottaa massakeskipistettään, jotta saisi kumottua moukarin ylöspäin vetävän jännitysvoiman. Tukivaiheenaikainen massakeskipisteen korkeuden muutos korreloi erittäin merkitsevällä tasolla moukarin nopeuden muutoksen kanssa ($r = 0,759$; $n = 56$; $p < 0,001$). Mielenkiintoisena yksityiskohtana mainittakoon pisimmän heiton (heitto 1) loppuvetovaihe, jossa heittäjän massakeskipisteen korkeus nousi vain 5,5 cm, kun kaikilla muilla heittäjillä nousua oli reilusti yli 10 cm. Tämä johtui todennäköisesti hieman erisuuntaisesta voimantuotosta siten, että heittäjä nojasi vahvemmin moukaria vasten kiihdyttäen siten sen lineaarinopeutta.

Polvi- ja lonkkakulmat. Heittäjien nivelkulmien muutoksista vauhtipyörähdysten aikana ei kirjallisuushaussa löydetty julkaistuja tutkimuksia. Niinpä vertailua aiempiin tutkimuksiin ei näiden muuttujien osalta voitu tehdä. Näiden muuttujien talteenoton päätarkoituksena oli luoda vertailupohjaa tuleville tutkimuksille ja siten edistää ymmärrystä heittäjän asennon ja nivelkulmien vaikutuksista suorituksen tasapainoisuuteen ja heittopituuteen. Vaikka loppuveidossa molemmat jalat ovat maassa, tarkoitetaan tukijalla edelleen pyörähdystenaikaista tukijalkaa ja vapaalla jalalla pyörähdyksissä maasta irtoavaa jalkaa.

Jokaisessa heitossa polvikulmat muuttuivat vauhtipyörähdysten aikana siten, että tukijalan polvikulma pieneni yhden tuen aikana ja kasvoi kahden tuen aikana. Vapaan jalan polvikulma käyttäytyi kaikissa heitoissa päinvastaisesti. Tämä kuvastaa heittäjän painon siirtymistä jalalta

toiselle kuvan 11 mukaisesti. Lonkkakulman osalta pyörähdystenaikaiset muutokset eivät olleet aivan yhtä selkeät. Neljän pyörähdysten heittojen keskiarvojen mukaan lonkkakulmat kuitenkin pienenivät hieman yhden tuen aikana ja kasvoivat kahden tuen aikana. Tämä selittää osaltaan myös heittäjän massakeskipisteen korkeuden vaihteluita. Tukijalan polvi- ja lonkkakulman sekä vapaan jalan lonkkakulman muutokset korreloivat erittäin merkittäväällä tasolla moukarin nopeuden muutosten kanssa. Vapaan jalan polvikulman muutoksen ja moukarin nopeuden muutoksen välinen käänteinen korrelaatio oli heikompi lähestyksen tilastollista merkityvyyttä. Vapaan jalan polvikulmaa lukuun ottamatta voidaan siis sanoa, että mitä suurempi polvi- ja lonkkakulmien ojentuminen tukivaiheen aikana on, sitä enemmän moukarin nopeus lisääntyy.

Yksittäisinä huomioina tuloksista nousi esille se, miten pienet polvikulmat pisimmän heiton heittäneellä Fajdekilla (heitto 1) oli irrotushetkellä. Tukijalka ojentui hänellä loppuviedossa 53 astetta, vapaa jalka vain 16 astetta ja massakeskipiste nousi selvästi muita heittäjiä vähemmän. Näin ollen voitaneen päätellä vartalon nojanneen melko vahvasti moukaria vasten. Neljän pyörähdysten heittojen keskiarvot edellä mainituille polvinivelen ojentumisille olivat 70 ja 39 astetta.

8.2 Tutkimuskysymys 2

Miten suuria eroja on löydettävissä kahden eri heittäjän heittämistä, likimain yhtä pitkistä heitoista? David Söderbergin 74,89 metriä kantanutta heittoa (heitto 2) vertailtiin Ashraf Amjad Al-Saifin 74,85 metrin heittoon (heitto 3).

Moukarin lähtöarvot. Lähes samanmittaisten heittojen 2 ja 3 vertailussa irrotushetken muuttujat olivat keskenään hyvin samankaltaiset. Lähtönopeudessa eroa oli vain 0,02 m/s ja lähtökulmassa 0,4 astetta. Lähtöarvojen laskennallisen, eli ilmanvastuksen vaikutukset sivuuttavan lentoradan mukaan heitto 3 olisi 54 cm pidempi kuin heitto 2. Tämä johtuu hieman suuremmasta lähtökorkeudesta ja -kulmasta. Se, minkä vuoksi heitto 2 oli lopulta 4 cm pidempi, johtui siis todennäköisesti suotuisemmista tuuliolosuhteista heiton aikana, mahdollisista aerodynaamisista eroista heittovälineissä ja menetelmällisistä tekijöistä liittyen liikeanalyysin tarkkuuteen.

Moukarin nopeuden kehitys. Heitoissa 2 ja 3 yhtä suuret, mutta lievästi vaaka- ja pystysuuntaan erisuuruiset loppunopeudet saavutettiin toisistaan poikkeavilla tavoilla. Heitossa 2 vaakanopeuden lisääntyminen oli melko tasaista kahden ensimmäisen pyörähdyksen ajan, minkä jälkeen se pieneni niin, että viimeisen pyörähdyksen aikana vaakanopeus hidastui 0,3 m/s. Kolmannessa heitossa vaakanopeuden lisääntyminen taas pieneni melko tasaisesti kolmen ensimmäisen pyörähdyksen ajan, mutta viimeisellä pyörähdyksellä lisäystä tuli taas reilummin (1,9 m/s). Pystynopeuden osalta 3. heitossa nopeudenlisäys oli suhteellisen tasaista jokaisella vauhtipyörähdyksellä, kun taas 2. heitossa suurta viimeisen pyörähdyksen lisäystä edelsi pyörähdys, jonka aikana pystynopeus ei lisääntynyt juuri ollenkaan. Sama loppunopeus voidaan siis saavuttaa ainakin kahdella toisistaan poikkeavalla moukarin kiihdytysstrategialla. Yksittäisen heittäjän ominaisuudet saattavat siten määrittää sen, kumpi tapa on tälle toimivampi.

Moukarin kulkema matka. Moukarin kulkemat matkat vaihtelivat toisessa heitossa melko paljon vauhtipyörähdysten välillä, kun taas kolmannessa heitossa matkat olivat pituudeltaan varsin tasaiset. Varsinkin 2. heiton kolmas vauhtipyörähdys oli moukarin kulkeman matkan osalta selvästi (1,42 m) lyhyempi kuin sen toinen pyörähdys. Heitossa 3 tällaista epätasaisuutta ei havaittu. Koko vauhdinotonaikainen yhteenlaskettu moukarin kulkema matka oli 3. heitossa 1,19 m pidempi kuin heitossa numero 2 ja varsinkin ero loppuviedon pituudessa 3. heiton hyväksi oli huomattava (0,59 m). Moukarin kulkemaan matkaan tulee suhtautua varauksella ensimmäisen kahden tuen vaiheen osalta, sillä jokaisessa heitossa moukari oli tässä vaiheessa hetken toisen videokameran näkymättömissä, mikä vaikuttaa analyysin tarkkuuteen.

Moukarin korkein ja matalin kohta. Moukarin korkein ja matalin kohta kehittyivät vauhdinoton aikana korkeuksiensa osalta heitoissa 2 ja 3 hyvin samankaltaisesti. Korkeimpien ja matalimpien kohtien sijoittumisessa atsimuuttiasteikolle oli kuitenkin selviä eroavaisuuksia. Vaikka heittojen pyörähdyskohtaiset korkeimmat kohdat sijoittuivat atsimuuttiasteikolla melko lähekkäin (19–10 astetta) ja lähenivät toisiaan kierros kierrokselta, matalimpien kohtien ajoittumiset erkanivat toisistaan 2. heiton matalimman kohdan siirtyessä atsimuuttiasteikolla myöhemmäksi. Loppuvetovaiheen matalimpien kohtien ajoittumisen ero oli jopa 86 astetta.

Tukivaiheiden kestot. Keskenään lähes samanmittaisten heittojen vertailussa (heitot 2 ja 3) heiton 3 kaikki tukivaiheet olivat kestoiltaan hieman pidemmät lukuun ottamatta toista kah-

den ja viimeistä yhden tuen vaihetta. Näin ollen heiton 3 kokonaiskesto oli 0,13 sekuntia pidempi, mistä kahden tuen vaiheiden osuus oli 0,09 sekuntia. Moukarin loppunopeuden kannalta ratkaisevassa osassa saattoi kuitenkin olla loppuveto ja siitä varsinkin loppunostovaihe. Kuten moukarin matalimpia kohtia tarkastellessa huomattiin, 2. heiton loppuvedonaikainen moukarin matalin kohta oli huomattavasti 3. heittoa myöhäisempi ja tästä syystä nostovaihe oli 2. heitossa kaikkien muuttujien osalta lyhyempi kuin 3. heitossa (0,02 s, 86° ja 0,37 m). Loppunoston aikana moukarin nopeus kiihtyi 2. heitossa 2,3 m/s ja 3. heitossa 3,1 m/s. Mielenkiintoisena yksityiskohtana mainittakoon se, ettei 2. heiton tukivaiheiden alkuhetkien atsi-muuttiarvoissa ollut havaittavissa yhtä suurta siirtymää pyörimissuuntaan, kuin pyörähdyskohtaisissa moukarin alimmissa kohdissa.

Vartalon kierto ja laahauskulma. Heitossa 2 vartalon kierron purku pysyi lähes samana jokaisen kahden tuen vaiheen aikana, kun se 3. heitossa lisääntyi ensimmäisestä pyörähdyksestä viimeiseen. Toisaalta taas lantio-hartia-kulman muutos korreloi hieman paremmin moukarin nopeudenlisäyksen kanssa heitossa 2. Tämä saattaa tarkoittaa, että heittäjä osasi hyödyntää vartalonsa kierron purkamista moukarin kiihdyttämiseksi hieman paremmin. Laahauskulman osalta 2. heitto on mielenkiintoinen, sillä siinä laahauskulma ei laskenut pyörähdysten alettua hetkeksikään alle 90 asteen. Teoriassa tämä tarkoittaa sitä, ettei heittäjä kohdistanut vauhdinoton aikana horisontaalitasossa jarruttavia voimia moukarin kuulaan. Kolmannessa heitossa laahauskulma oli yli 90 asteen noin 80 % ajasta.

Heittäjän massakeskipisteen liike. Samanmittaisia heittoja 2 ja 3 vertailtaessa huomattiin, että heitossa 3 heittäjän massakeskipisteen siirtymä heittosuuntaan oli alussa pienempi kuin heitossa 2, mutta varsinkin loppuvedossa heiton 3 siirtymä oli huomattavasti (45 %) suurempi. Heiton 2 kokonaissiirtymä oli kuitenkin 17,7 cm suurempi ja tämä ero syntyi kahden ensimmäisen pyörähdysten aikana. Heittäjän massakeskipisteen sivuttaissiirtymän tarkastelussa ei löydetty merkittäviä eroja heittojen 2 ja 3 väliltä. Ainoana havaittavana erona oli se, että heiton 2 vauhtipyörähdykset suuntautuivat lievästi vasemmalle, kun 3. pyörähdyksessä suunta oli hieman oikealle.

Kolmannessa heitossa kahden tuenaikainen heittäjän massakeskipisteen nousu pysyi likimain samansuuruisena (2,5–3,7 cm) kolmen ensimmäisen pyörähdysten ajan ja nousi loppuvedon

aikana 16,9 cm. Toisessa heitossa massakeskipisteen kahden tuenaikainen nousu lisääntyi pyörähdys pyörähdykseltä, mutta oli loppuvedossa vain 13,3 cm. Molemmissa heitoissa pyörähdyskohtaiset massakeskipisteen matalimmat kohdat osuivat melko tarkasti kahden tuen vaiheiden alkuun ja korkeimmat kohdat yhden tuen vaiheiden alkuun.

Polvi- ja lonkkakulmat. Vauhtipyörähdysten aikana ei heitoissa 2 ja 3 ollut merkityksellisiä eroavaisuuksia polvi- tai lonkkakulmissa. Heiton 3 loppuvedossa kuitenkin sekä polvi-, että lonkkakulmat ojentuivat huomattavasti 2. heittoa enemmän. Tämä loppuojennus saattaa olla yksi syy siihen, että heitossa 3 moukarin nopeus lisääntyi 1,4 m/s 2. heittoa enemmän.

Analysoitujen heittojen pituus oli lähes sama, vaikka suoritukset erosivat usean muuttujan suhteen toisistaan. Suurin yksittäinen ero heittojen 2 ja 3 välillä oli se, että heitossa 3 loppuvedon rooli moukarin lähtönopeuden ja lähtökulman saavuttamisessa oli suurempi. Heittäjän yksilölliset ominaisuudet tulisi ottaa huomioon, kun mietitään tälle optimaalisinta suoritustekniikkaa.

8.3 Tutkimuskysymys 3

Mitkä tekijät selittävät suuria, yli neljän metrin eroja heittopituuksissa, kun vertaillaan noin 70 metrin mittaisia, saman heittäjän kahden erillisen kilpailun parhaita suorituksia. Henri Liipolan Kalevan kisoissa heittämää 72,71 metrin heittoa (heitto 4) vertailtiin hänen Paavo Nurmi Games -kilpailussa heittämänsä 68,12 metrin heittoon (heitto 5).

Moukarin lähtöarvot. Lyhyemmässä heitossa (heitto 5) lähtökulma ja -korkeus olivat hieman pidempää heittoa (heitto 4) suuremmat. Pidemmän heiton lähtönopeus oli kuitenkin 0,5 m/s suurempi kuin lyhyemmän ja tästä johtuen myös heittopituus oli pidempi. Lähes kolmasosan pituuserosta selittävät tuuliolosuhteet ja heittovälineen aerodynamiikka, sillä lyhyemmän heiton ero todellisen ja teoreettisen pituuden välillä oli 7,19 % ja pidemmän vain 4,60 %.

Moukarin nopeuden kehitys. Heittojen 4 ja 5 välinen ero loppunopeudessa oli 0,5 m/s ja sekä vaaka- että pystynopeus olivat suuremmat pidemmässä heitossa (heitto 4). Myös alkunopeus oli siinä suurempi. Erot eivät ole suuria, mutta ne vaikuttavat kuitenkin ratkaisevasti lopputu-

lokseen aiheuttaen osaltaan yli neljän metrin eron heittopituudessa. Vauhtipyörähdysten aikana nopeudenlisäykset olivat kutakuinkin samankaltaiset, joskin pidemmän heiton kolmannen vauhtipyörähdysten aikana vaakanopeus laski 0,5 m/s, kun se 5. heitossa lisääntyi 0,2 m/s.

Moukarin kulkema matka. Pidemmässä heitossa (heitto 4) moukarin kulkema matka oli sekä ensimmäisen että kolmannen pyörähdysten osalta pidempi kuin lyhyemmässä (heitto 5). Vaikka ensimmäisen pyörähdysten arvossa analyysin virhemahdollisuus oli muita pyörähdysten suurempi, saattaa tämä myös viitata heittäjän pyrkimykseen aikaansaada laajempi moukarin kaari vauhdinoton alkuvaiheessa ja siten mahdollistaa pidempi voimantuottoaika. Pidemmässä heitossa ei ollut nähtävissä suurta moukarin kulkeman matkan kasvua kahden viimeisen pyörähdysten aikana, kun taas lyhyemmässä heitossa viimeisellä pyörähdyksellä matkaa kertyi 0,92 m enemmän kuin kolmannella pyörähdyksellä.

Moukarin korkein ja matalin kohta. Saman heittäjän heittämät heitot 4 ja 5 olivat moukarin korkeimpien ja matalimpien kohtien osalta pääosin hyvin samankaltaiset. Pidemmässä heitossa (heitto 4) moukarin korkein kohta oli kuitenkin jokaisessa pyörähdyksessä hieman (6–16 cm) lyhyempää heittoa ylempänä. Tämä on mielenkiintoista, sillä pidemmässä heitossa moukarin lähtökulma oli kuitenkin hieman lyhyempää heittoa loivempi. Ajoituksellisesti pyörähdyskohtaiset moukarin korkeimmat kohdat pysyivät heitoissa suurin piirtein samalla etäisyydellä toisistaan atsimuuttiaasteikolla tarkasteltuna. Lyhyemmässä heitossa moukarin matalimmat kohdat kuitenkin siirtyivät pidempää heittoa enemmän kohti pyörähdysvauhdinoton edetessä. Asteina mitattuna moukari oli siis pidemmässä heitossa lyhyempää heittoa kauemmin nousevalla radalla, mikä saattoi mahdollistaa suuremman moukariheittäjäsystemin liike-energian lisäyksen.

Tukivaiheiden kestot. Heittojen 4 ja 5 tukivaiheiden kestot olivat hyvin lähellä toisiaan, kuitenkin niin, että pidemmässä heitossa (heitto 4) vauhtipyörähdysten kokonaiskesto oli 0,04 sekuntia lyhyempi. Tämä oli oletettavissa, sillä tässä heitossa myös moukarin loppunopeus oli hieman suurempi. Heitoista 4 ja 5 ei löytynyt merkittäviä eroja myöskään muiden tukivaiheiden kestoihin liittyvien muuttujien osalta.

Vartalon kierto ja laahauskulma. Vartalon kierron muutokset eri tukivaiheiden aikana eivät suuresti poikenneet toisistaan 4. ja 5. heitoissa. Lisäksi oli mielenkiintoista, että lantio-hartia-kulman muutos ja moukarin nopeuden lisäys korreloivat näissä heitoissa lähes identtisesti. Siitä herää kysymys, oliko näiden muuttujien korrelaation vahvuus jossain määrin heittäjäkohtainen, vai oliko kyseessä pelkkä sattuma. Laahauskulman osalta heitot poikkesivat toisistaan jonkin verran, sillä pidemmän heiton vauhtipyörähdyksissä laahauskulma oli yli 90 astetta noin 70 % ajasta, kun lyhyemmässä heitossa 90 astetta ylittyi noin 88 % ajasta.

Heittäjän massakeskipisteen liike. Heittäjän massakeskipisteen kokonaissiirtymä ja siirtymä loppuviedon aikana heittosuuntaan olivat heitoissa 4 ja 5 suuruudeltaan lähellä toisiaan. Sivuttaissuuntaisessa tarkastelussa heittojen välillä oli lähes 50 cm ero siten, että lyhyemmän heiton vauhtipyörähdykset suuntautuivat enemmän oikealle. Tämä ei kuitenkaan suoraan tarkoita, että vauhdinotossa menetettäisiin heittopituutta, sillä todellista heittosuuntaa ei mitattu.

Koska heitot 4 ja 5 olivat saman heittäjän heittämiä, oli heittäjän massakeskipisteen korkeuden vertailu myös sellaisenaan mahdollista. Vertailussa huomattiin, että pidemmän heiton pyörähdyksissä massakeskipiste liikkui koko ajan muutaman sentin korkeammalla kuin lyhyemmän heiton vauhdinotossa. Myös massakeskipisteen korkeuden muutokset erosivat kahden ensimmäisen pyörähdyksen aikana hieman toisistaan siten, että lyhyemmässä heitossa yhden tuen aikana massakeskipiste laski muutaman sentin pidempää heittoa enemmän.

Polvi- ja lonkkakulmat. Heittojen 4 ja 5 polvi- ja lonkkakulmat eivät merkittävästi eronneet toisistaan lukuun ottamatta vapaan jalan lonkkakulmaa. Lyhyemmässä heitossa vapaan jalan lonkkakulman muutokset tukivaiheiden aikana olivat jonkin verran pienempiä kuin pidemmässä heitossa. Lisäksi vapaan jalan lonkkakulma pieneni lyhyemmässä heitossa ainoastaan ensimmäisen ja viimeisen yhden tuen vaiheen aikana.

Suurimmat erot saman heittäjän erimittaisten heittojen 4 ja 5 välillä olivat vauhdinoton suunnassa sekä mahdollisissa tuuliolosuhteissa. Muiden muuttujien osalta erot olivat pääosin pieniä. Yksittäisen urheilijan suorituksia tarkastellessa voivat kuitenkin pienetkin erot suoritus-tekniikassa olla lopputuloksen kannalta merkittäviä.

8.4 Tutkimuskysymys 4

Millaisia eroja on heitoissa, jotka suoritetaan eri määrällä vauhtipyörähdyksiä (kolmella, neljällä tai viidellä)? Kolmella (heitto 6) ja viidellä (heitto 7) pyörähdyksellä suoritettuja heittoja vertailtiin neljän pyörähdyksen heittoihin (heitot 1, 2, 3, 4 ja 5).

Moukarin nopeuden kehitys. Kolmen pyörähdyksen heitossa (heitto 6) moukarin kiihdytysaika oli luonnollisesti huomattavasti vähemmän, kuin neljällä tai varsinkin viidellä pyörähdyksellä heitettäessä. Nopean kiihdyttämisen vaatimukset tekivät suorituksen sisäisestä dynamiikasta epätasaisemman. Tästä syystä varsinkin toisen pyörähdyksen vaakanopeudenlisäys ja viimeisen pyörähdyksen pystynopeudenlisäys olivat todella suuret muihin heittoihin verrattuna. Toisen pyörähdyksen vaakanopeudenlisäys tapahtui osittain pystynopeuden kustannuksella ja toisaalta viimeisen pyörähdyksen 10,9 m/s pystynopeudenlisäys aiheutti 1,4 m/s menetyksen vaakanopeudessa. Viiden pyörähdyksen suorituksessa (heitto 7) moukarin kiihdyttäminen oli huomattavasti tasaisempaa, eikä yksittäisiä suuria nopeudenlisäyspiikkejä syntynyt. Toisaalta taas kierroskohtaiset nopeudenlisäykset olivat keskimäärin pienempiä, kuten oli myös lähtönopeus vauhtipyörähdysten alkaessa.

Moukarin kulkema matka. Kolmella vauhtipyörähdyksellä suoritettussa heitossa pyörähdyskohtaiset moukarin kulkemat matkat vaihtelivat suuresti. Varsinkin viimeisellä pyörähdyksellä matkaa kertyi huomattavasti muita pyörähdyksiä enemmän, johtuen todella pitkästä loppuviedosta. Loppuviedon pituus oli 7,96 m, kun se neljän pyörähdyksen heitoissa oli keskimäärin $6,34 \pm 0,26$ m. Moukarin kulkeman matkan osalta loppuviedon osuus siis korostui kolmella pyörähdyksellä heitettäessä. Viiden vauhtipyörähdyksen heitossa (heitto 7) moukarin kulkema matka pysyi lähes samansuuruisena ensimmäisestä pyörähdyksestä viimeiseen. Ainoastaan toisen pyörähdyksen aikana moukari kiersi hieman pidemmän matkan. Loppuveto oli muita heittoja lyhyempi (5,59 m).

Moukarin korkein ja matalin kohta. Kolmen pyörähdyksen heitossa (heitto 6) moukarin alin kohta ei siirtynyt pyörimissuuntaan vauhdinoton edetessä, vaan pysyi lähes muuttumattomana. Myös moukarin korkein kohta pysyi kahdella viimeisellä pyörähdyksellä samassa kohdassa atsimuuttiasteikolla tarkastellessa. Moukarin korkein kohta nousi jokaisella pyörähdyksellä

huomattavasti enemmän kuin muissa heitoissa keskimäärin (30 ja 20 cm). Ainoastaan pisimmässä heitossa (heitto 1) nähtiin 30 cm muutos kahden peräkkäisen pyörähdysten moukarin korkeimmissa kohdissa. Tämä johtuu todennäköisesti siitä, että lyhyen vauhdinoton aikana kierroskohtaisten muutosten on oltava suurempia, jotta päästään toivottuun lopputulokseen. Viiden pyörähdysten heitossa (heitto 7) moukarin korkein kohta nousi ja matalin kohta laski jokaisella vauhtipyörähdyksellä, mutta kierroskohtaiset muutokset olivat pienempiä kuin kolmen ja neljän pyörähdysten heitoissa. Atsimuuttiasteikolla moukarin korkein kohta siirtyi vauhdinoton edetessä jatkuvasti hieman kohti pyörimissuuntaa. Moukarin matalin kohta ei juuri siirtynyt.

Tukivaiheiden kestot. Viiden pyörähdysten heitossa (heitto 7) ensimmäiset kaksi pyörähdystä olivat rytmiltään rauhallisempia ja loput kolme heittäjä suoritti kiihtyvällä rytmillä. Tukivaiheiden alut siirtyivät atsimuuttiasteikolla tasaisesti pyörimissuuntaan vauhdinoton edetessä. Loppuvedonaikainen moukarin nopeudenlisäys oli kaikista heitoista pienin, todennäköisesti suurimmasta loppuvedon alkunopeudesta ja viiden pyörähdysten tasapainolle asettamista haasteista johtuen. Kolmen pyörähdysten heitossa (heitto 6) loppuvedon osuus moukarin nopeudenlisäyksestä oli suuri, mutta loppunoston aikana nopeus lisääntyi kuitenkin keskiarvoa vähemmän. Loppuvedon pituus oli metreinä että asteina mitattuna keskiarvoa pidempi, mutta ajallisesti lyhyempi.

Vartalon kierto ja laahauskulma. Lantio-hartia-kulman muutoksen ja moukarin nopeuden lisääntymisen välillä oli kolmen pyörähdysten heitossa (heitto 6) samanlainen vahva korrelaatio kuin neljän pyörähdysten heitoissa. Viiden pyörähdysten heitossa (heitto 7) tämä korrelaatio oli huomattavasti heikompi ($r = -0,617$; $n = 10$; $p = 0,029$). Tämä johtui siitä, että 7. heitossa toisen vauhtipyörähdysten jälkeen lantio-hartia-kulman muutokset eivät enää noudattaneet samaa kaavaa, kuin heittojen keskiarvoista olisi voinut päätellä. Kierto ei enää välttämättä lisääntynyt yhden tuen aikana, eikä sitä myöskään purettu kahden tuen vaiheen aikana. Myös loppuvedonaikainen vartalon kierron väheneminen jää huomattavasti muita heittoja pienemmäksi. Yli 90 asteen laahauskulman osuus vauhtipyörähdyksistä oli pienin 6. heitossa (62 %). Heitossa 7 osuus on 89 % ja laahauskulma pysyi yli 90 asteen yhtäjaksoisesti vauhtipyörähdysten alusta kolmannen yhden tuen vaiheen loppuun asti.

Heittäjän massakeskipisteen liike. Viiden pyörähdyksen heitossa (heitto 7) sekä yksittäisten pyörähdysten- että loppuvedonaikainen massakeskipisteen liike heittosuuntaan oli muita heittoa pienempi. Yksinkertainen selitys tälle on se, että tilaa yksittäistä pyörähdystä kohti oli vähemmän. Samalla periaatteella voidaan perustella se, että kolmen pyörähdysten heitossa (heitto 6) oli sekä suurin yksittäisen pyörähdysten siirtymä, että suurin siirtymä loppuvedossa. Heittäjän massakeskipisteen tarkastelussa huomattiin myös, että viiden pyörähdysten heitossa tapahtui selvästi neljän pyörähdysten heittojen keskiarvoa enemmän sivuttaissuuntaista heiluntaa yksittäisten pyörähdysten aikana ja sivuttaissuuntainen liike lisääntyi vauhtipyörähdysten edetessä. Kolmen pyörähdysten heitossa tilanne oli päinvastainen, sillä sivuttaisliikettä tapahtui huomattavan vähän ja sen määrä myös väheni pyörähdys pyörähdykseltä. Todennäköisesti vähäisempi mahdollisuus x-akselinsuuntaiseen liikkumiseen johtaa suurempaan sivuttaisliikkeeseen ja päinvastoin.

Viiden pyörähdysten heitossa (heitto 7) massakeskipisteen korkeuden muutokset eivät korreloineet moukarin nopeudenmuutosten kanssa ($r = 0,337$; $n = 10$; $p = 0,171$), mikä poikkesi muista heitoista. Massakeskipisteen korkeimmat ja matalimmat kohdat eivät myöskään ajoittuneet niin yhtäaikaaisesti tukivaiheiden muutoshetkiin kuin muissa heitoissa. Tässä heitossa massakeskipisteen korkeus pysyi muutenkin huomattavan tasaisena koko vauhdinoton ajan. Kolmen pyörähdysten heitossa heittäjän massakeskipisteen korkeus käyttäytyi samantapaisesti kuin neljän pyörähdysten heitoissa, eli pystysuuntainen liike lisääntyi pyörähdysten edetessä.

Polvi- ja lonkkakulmat. Kolmen ja viiden pyörähdysten heittojen polvikulmien muutokset olivat pääasiassa vastaavat kuin neljän pyörähdysten heitoissa. Viiden pyörähdysten heitossa kuitenkin tukijalan polvikulman muutokset olivat hieman pienempiä kuin neljän pyörähdysten heittojen keskiarvot. Vapaan jalan polvikulmamutokset taas olivat hieman keskiarvoa suuremmat. Lonkkakulmien osalta eroja neljän pyörähdysten heittoihin oli, mutta ne olivat pääasiassa pieniä: vapaan jalan lonkkakulmat kasvoivat yhden tuen aikana ja pienenevät kahden tuen aikana molemmissa heitoissa suunnilleen heiton puoliväliin asti. Lisäksi viiden pyörähdysten heiton ensimmäisessä pyörähdyksessä tukijalan lonkkakulma ojentui ja koukistui neljän pyörähdysten heittoihin nähden päinvastaisessa rytmissä.

8.5 Virhelähteet ja limitaatiot

Virhelähteinä tässä tutkimuksessa oli kilpailuolosuhteiden aiheuttamat kompromissit kameroiden määrässä ja sijoittelussa sekä edellisistä johtuvat mahdolliset virheet tehdyissä 3D-liikeanalyysissä. Aineisto kerättiin kilpailusuorituksista, jolloin liikeanalyysi jouduttiin tekemään manuaalisesti. Tämä rajoitti raskautensa vuoksi analysoitujen heittojen lukumäärää sekä analyysissä käytettyä kuvataajuutta. Kuvataajuuden 60 kuvaa/sekunti mahdollistama ajallinen tarkkuus on $\pm 16,7$ ms, mikä oli esimerkiksi tukivaiheiden kestojen osalta prosentuaalisesti melko suuri. Pääasiallisesti kuvataajuus oli kuitenkin riittävä, sillä moukarin radassa tai heittäjän liikkeissä ei juuri tapahtunut äkillisiä suunnanmuutoksia ja heittäjän osalta liike oli suhteellisen hidasta.

Kilpailuolosuhteista johtuen heittopaikan sivulla sijainneen kameran ja heittopaikan välissä oli koko Paavo Nurmi Games -kilpailun ajan tuomari, joka peitti vauhdinoton aikana hetkellisesti näkyvyyden moukariin. Tämä näköeste peitti vain osan ensimmäisestä kahden tuen vaiheesta, mutta tämä tulee kuitenkin pitää mielessä esimerkiksi tarkastellessa moukarin kulkemaa matkaa kyseisen tukivaiheen aikana. Kokonaisuudessaan tämän tutkimuksen tuloksia voidaan pitää varsin luotettavina.

Yksi niin moukarinheiton kuin monen muunkin urheilulajin tutkimuksen keskustelunaiheista on vastakkainasettelu kilpailuissa ja niin sanotuissa laboratorio-olosuhteissa tehtyjen tutkimusten välillä. Toisaalta kilpailuolosuhteissa urheilijat pystyvät usein parempiin suorituksiin ja lisäksi olosuhteet ovat muutenkin aidommat kuin laboratoriossa. Toisaalta taas kilpailumittauksissa mahdolliset menetelmät ovat rajalliset ja mittaaminen on tehtävä kilpailua häiritsemättä, usein kilpailujärjestäjien ehdoilla. Edellä mainituista syistä johtuen tarvitaan sekä uusia tutkimusmenetelmiä, joilla pystytään tarkastelemaan monipuolisesti erilaisia biomekaanisia muuttujia, että kilpailumittauksia, joissa suoritusolosuhteet ovat aidot.

8.6 Yhteenveto

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli analysoida kansallisen ja kansainvälisen tason moukarinheittäjien heittotekniikkaa kahdessa kotimaisessa kilpailussa kerätyn videomateriaalin avulla

sekä kerätä heittäjien koko kehon liikeanalyysin avulla vertailudataa tulevia tutkimuksia ja kilpailuanalyysijä varten. Näissä tavoitteissa onnistuttiin melko hyvin. Analysoitujen heittojen vähäisen määrän vuoksi on tämän tutkimuksen tulosten yleistettävyyteen suhtauduttava varauksella. Tuloksista voidaan kuitenkin tehdä oletuksia, joiden vahvistaminen vaatii suuremmalla aineistolla tehtäviä jatkotutkimuksia.

Tämän tutkimuksen tulokset toistivat usean analysoidun muuttujan osalta aiempien tutkimusten löydöksiä. Moukarin lähtöparametrien korrelaatiot heittopituuksiin eivät olleet lähtökulman ja -korkeuden osalta niin vahvat kuin odotettiin, mutta todennäköisesti suuremmilla heittomäärillä korrelaatiot vahvistuisivat. Kuten muun muassa Dapena (1989) on aiemmin todennut, suurin osa moukarin nopeudesta oli vaakanopeutta vauhtipyörähdyksiin lähdetessä, mutta vauhtipyörähdystenaikainen nopeudenlisäys koostui pääasiassa pystynopeudesta. Loppuviedon merkitys osoittautui moukarin loppunopeuden ja lähtökulman osalta suureksi ja tuloksista erottuikin kaksi mahdollista mallia, jotka erosivat toisistaan moukarin nopeuden kehityksen osalta kahden viimeisen pyörähdyksen aikana. Toisessa mallissa pystynopeutta kasvatetaan melko tasaisesti koko vauhdinoton ajan. Toisessa taas pystynopeuden lisääntyminen toiseksi viimeisellä pyörähdyksellä pienenee, mitä seuraa huomattavasti suurempi pystynopeuden lisäys viimeisen pyörähdyksen aikana.

Tutkimuksessa löydettiin useita muuttujia, jotka korreloivat vahvasti moukarin nopeuden lisääntymisen kanssa. Sakrin (2012) esittelemä ajatus kierroskohtaisen kahden tuen aikaisen nostovaiheen tärkeydestä sai vahvistusta, sillä nostovaihe korreloi varsinkin pystynopeuden kehityksen kanssa erittäin merkitsevällä tasolla. Lantio-hartia-kulman ja nopeuden muutosten väliltä löytyi myös vahva korrelaatio, jonka suuruus on yhteydessä heittäjäkohtaiseen yksilölliseen heittotekniikkaan. Loppuviedon muuttujista nopeuden lisääntymisen kanssa korreloi parhaiten loppuviedon pituus asteina sekä heittäjän massakeskipisteen liike heittosuuntaan. Massakeskipisteen korkeuden, tukijalan polvi- ja lonkkakulman sekä vapaan jalan lonkkakulman muutokset korreloivat myös erittäin merkitsevällä tasolla moukarin nopeuden muutosten kanssa. Näiden löydettyjen korrelaatioiden pohjalta tarvitaan kuitenkin lisätutkimusta, jotta niiden luotettavuutta päästään tarkastelemaan suuremmassa heittomäärässä.

Neljän vauhtipyörähdyksen heitoista suomalaisilla heittäjillä huomattiin, että loppuviedon aikainen moukarin matalin kohta oli myöhäisempi kuin edellisellä kierroksella, mikä poikkesi

ulkomaalaisten heittäjien heittämistä neljän pyörähdyksen suorituksista. Sen selvittämiseksi, liittyykö havainto enemmän valmennukselliseen linjaukseen vai sattumaan, tarvitaan lisää tutkimusta.

Lähes samanmittaisten heittojen vertailun tulos oli odotettu, sillä yleisesti tiedetään, että kaksi ominaisuuksiltaan toisistaan poikkeavaa urheilijaa voi päätyä samaan lopputulokseen hyvin erilaisilla suorituksilla. Suuressa osassa tutkituista muuttujista oli eroavaisuuksia siitä huolimatta, että lopputulos oli lähes sama. Vaikka moukarin nopeudet irrotushetkellä olivat miltei identtiset, nopeudenkehitykset vauhtipyörähdyksen aikana poikkesivat toisistaan. Usean muuttujan osalta vahvistui käsitys siitä, että moukarinheitonkaltaisessa äärimmäisen monimutkaisessa suorituksessa samankaltaiseen lopputulokseen voidaan päätyä hyvinkin erityyppisillä suoritustekniikoilla. Lisäksi on hyvin todennäköistä, että antropometrialtaan ja fyysiseltä suorituskyvyltään toisistaan poikkeavien heittäjien optimaalinen heittotekniikka on suurelta osin yksilöllinen. Tämä oletus toisaalta lisää lajin mielenkiintoisuutta, sillä hyvin erityyppiset urheilijat voivat onnistuessaan pystyä todella pitkiin heittoihin.

Samana heittäjän erimittaisten heittojen tarkastelussa suurimmat erot löytyivät vauhdinoton suuntautumisesta sekä mahdollisista tuuliolosuhteista. Moukarin lähtöarvojen perusteella laskeutujan teoreettisten heittopituuksien mukaan lähes kolmasosa heittojen pituuserosta selittyisi ilmanvastukseen liittyvillä tekijöillä. Poikkeama vauhdinoton suunnassa taas oli havaittavissa heittäjän massakeskipistettä tarkastelemalla. Se ei välttämättä suoraan aiheuttanut menetyksiä heittopituudessa, mutta oli todennäköisesti merkki epätasapainoisemmista pyörähdyksistä, mikä saattoi estää moukarin tehokkaan kiihdyttämisen. Suurimmassa osassa analysoiduista muuttujista erot heittojen välillä olivat pieniä. Pienet erot saattavat kuitenkin yksittäisen urheilijan kohdalla ratkaista suorituksen onnistumisen. Suoritusteknisten ja suorituspaikkaan liittyvien muuttujien lisäksi tulokseen voi vaikuttaa myös muun muassa urheilijan vireystila. Olisi mielenkiintoista nähdä laajempaa yksittäisen urheilijan suoritusanalysointia, jolla voitaisiin mahdollisesti havainnollistaa päiväkohtaisia muutoksia heittäjän tekniikassa ja vireystilassa.

Pyörähdyksen määrä vaikutti suoritukseen siten, että kolmen pyörähdyksen heitossa vaihtelua yksittäisten pyörähdysten välillä oli enemmän, kun taas viiden pyörähdyksen heiton pyörähdyskohtaiset vaihtelut olivat huomattavan pieniä. Tuloksista voitaneen päätellä, että mitä

enemmän pyörähdyksiä, sitä tasaisempi suorituksen on oltava, jotta tasapaino säilyy ja heitto saadaan suoritettua hallitusti loppuun. Epäselväksi jää, onko moukarin kiihdyttäminen tehokkaampaa kolmella, neljällä vai viidellä vauhtipyörähdyksellä. Todennäköisesti optimaalinen pyörähdysmääräkin on heittäjäkohtainen. Nopea kiihdyttäjä saattaisi hyötyä siitä, ettei kolmen pyörähdyksen tekniikka ole tasapainon ja rytmin kannalta aivan yhtä haastava kuin neljän pyörähdyksen tekniikka. Hitaammalle kiihdyttäjälle taas voi muodostua ongelmaksi se, ettei hän ehdi vielä neljänkään pyörähdyksen aikana saavuttaa maksiminopeuttaan, jolloin teknisesti haastavampi viiden pyörähdyksen tekniikka voi olla lopputuloksen kannalta suotuisampi. Suurin osa heittäjistä käyttää neljää vauhtipyörähdystä, mikä saattaa olla heille paras kompromissi teknisen haastavuuden ja moukarin kiihdyttämisen kannalta.

Moukarinheiton tutkimuksessa on päästy siihen tilanteeseen, että nykyään tiedetään jo hyvin millaiseen lähtökulmaan ja -nopeuteen moukari on saatettava heittopituuden maksimoimiseksi. Lisäksi tutkijat ovat pääosin yhtä mieltä heittovälineeseen vaikuttavista voimista. Tällä hetkellä tutkimuksen alla ovatkin enenevässä määrin heittäjän liikkeet ja niiden aikaansaamat voimat. Jonkin verran keskustelua on käyty muun muassa heittäjän massakeskipisteen korkeuden sekä lantion ja hartia-linjan välisen kulman vaihtelusta heiton vauhdinoton aikana. Lisäksi kiinnostusta on myös muun muassa heittäjän jalkojen reaktivoimien tutkimiseen. Selvää on se, että moukarinheitonkaltaisen teknisesti haastavan lajin parissa lisätutkimusta tarvitaan, jotta saadaan luotua parempi ymmärrys lopputulokseen vaikuttavista tekijöistä ja niiden välisistä yhteyksistä. Toivottavaa olisikin, että tässä tutkimuksessa esiin nousseisiin hypoteeseihin ja syy-seuraussuhteisiin paneuduttaisiin tarkemmin tulevaisuuden tutkimuksissa.

LÄHTEET

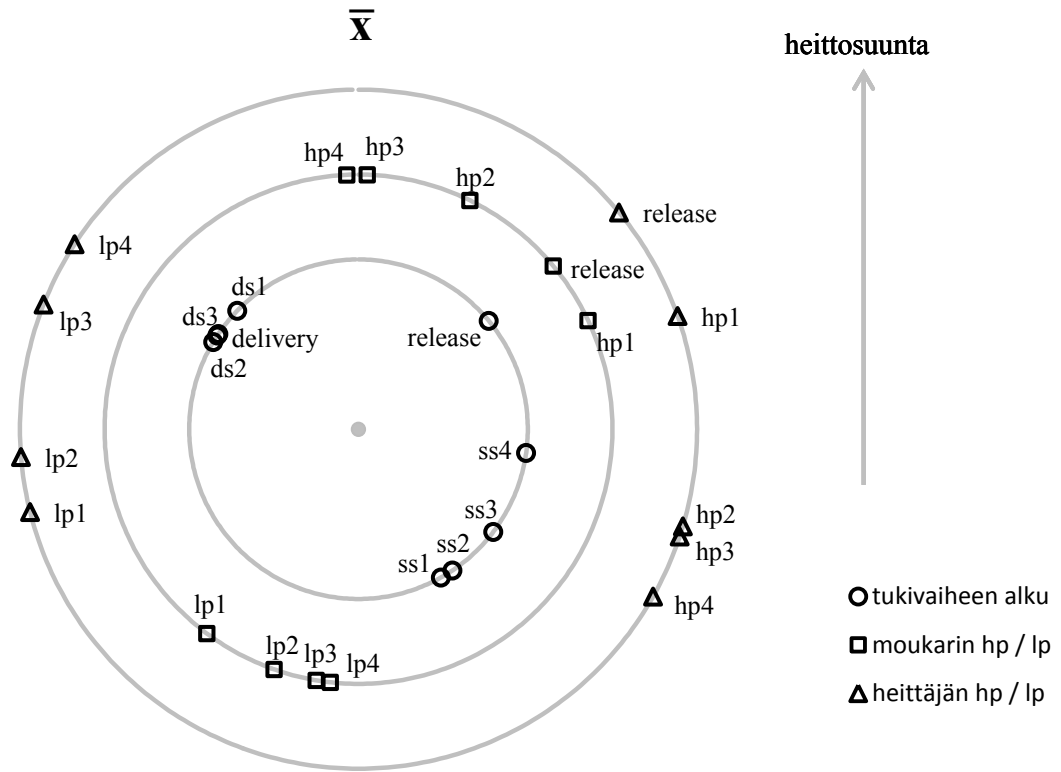
- Abdel-Aziz Y. I. & Karara H. M. 1971. Direct Linear Transformation from Comparator Coordinates into Object Space Coordinates. American Society of Photogrammetry Symposium on Close-Range Photogrammetry, Falls Church, Virginia, U.S.A., 1-18.
- Allard, P., Stokes, I. & Blanchi, J-P. 1995. Three-Dimensional Analysis of Human Movement. Human Kinetics, USA
- Blazevich, A. 2007. Sport Biomechanics: the basics: optimising human performance. A. & C. Black, Lontoo.
- Brice, S. M. 2014. Biomechanical analysis of hammer throwing: assesment of speed development. James Cook University
- Brice S. M., Ness K. F. & Rosemond D. 2011. An analysis of the relationship between the linear hammer speed and the thrower applied forces during the hammer throw for male and female throwers. Sports Biomech 10, 174 - 184.
- Brice, S. M., Ness, K. F., Everingham, Y. L., & Rosemond, D. 2014. Thorax-pelvis separation angle and speed development in the hammer throw. 9th Australasian Biomechanics Conference, Wollongong, NSW, Australia.
- Chèze, Laurence. 2014. Kinematic analysis of human movement. ISTE, Lontoo & John Wiley & sons, Hoboken
- Dapena, J. & Teves, M. A. 1982. Influence of the diameter of the hammer head on the distance of a hammer throw. Research Quarterly for Exercise and Sport, 53 (1), 78 - 81.
- Dapena, J. 1984. The pattern of hammer speed during hammer throw and influences of gravity on its fluctuations. Journal of Biomechanics 17 (8), 553-559.
- Dapena, J. 1986. A kinematic study of centre of mass motions in the hammer throw. Journal of Biomechanics 19 (2), 147–158.
- Dapena, J. 1989. Some biomechanical aspects of hammer throwing. Athletics Coach 23 (3), 12–19.
- Dapena, J. & Feltner, M. E. (1989). Influence of the direction of the cable force and of the radius of the hammer path on speed fluctuations during hammer throwing. Journal of Biomechanics 22 (6-7), 565–575.

- Dapena, J. & McDonald, C. (1989). A three-dimensional analysis of angular momentum in the hammer throw. *Medicine & Science in Sports & Exercise* 21 (2), 206–220.
- Dapena, J., Gutierrez-Davila, M., Soto, V. M. & Rojas, F. J. 2003. Prediction of distance in hammer throwing. *Journal of Sports Sciences* 21, 21–28.
- De Mestre, N. 1990. *The Mathematics of Projectiles in Sport*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Gutierrez, M., Soto, V. M. & Rojas, F. J. 2002. A biomechanical analysis of the individual techniques of the hammer throw finalists in the Seville Athletics World Championship 1999. *IAAF Handbook*, 17 (2), 15 - 26.
- Hill, A. V. 1922. The maximum work and mechanical efficiency of human muscles, and their most economical speed. *Journal of Physiology* 56 (1–2), 19–41.
- Hubbard, M. 1989. The throwing events in track and field. Teoksessa C. L. Vaughan (toim.) *Biomechanics of Sport*, CRC Press Inc., Boca Raton, Florida, 23.
- Hubbard, M. 2000. The flight of sports projectiles. Teoksessa V. M. Zatsiorsky (toim.) *Biomechanics in sport: performance enhancement and injury prevention*, Blackwell Science Ltd., Oxford, 4, 381-400.
- IAAF. 2015. IAAF Competition Rules 2016 - 2017, in force from 1 November 2015. Viitattu 15.4.2017. <https://www.iaaf.org/about-iaaf/documents/technical#collapsemanuals-guidelines>.
- Isele, R. & Nixdorf, E. 2010. Biomechanical Analysis of the Hammer Throw at the 2009 IAAF World Championships in Athletics. *New Studies in Athletics* 25 (3), 37 - 60.
- Judge, L. 2000a. A Technique Analysis of the Hammer Throw for Men & Women: Part 1. *Coach & Athletic Director* 69 (7), 36 - 39.
- Judge, L. 2000b. A Technique Analysis of the Hammer Throw for Men & Women: Part 2. *Coach & Athletic Director* 69 (8), 46 - 51.
- Judge, L. W., Judge, M., Bellar, D. M., Hunter, I., Hoover, D. L. & Broome, R. 2016. The integration of sport science and coaching: A case study of an American junior record holder in the hammer throw. *International Journal of Sports Science & Coaching* 11 (3), 422 - 435.
- Konz, S. M. & Hunter, I. 2006. Technique Comparison of Male and Female Hammer Throwers. 33rd International Conference on Biomechanics in Sports, Poitiers, France.
- Lichtenberg, D. B. & Wills, J. G. 1978. Maximizing the range of the shot put. *American Journal of Physics* 46 (5), 546-549.

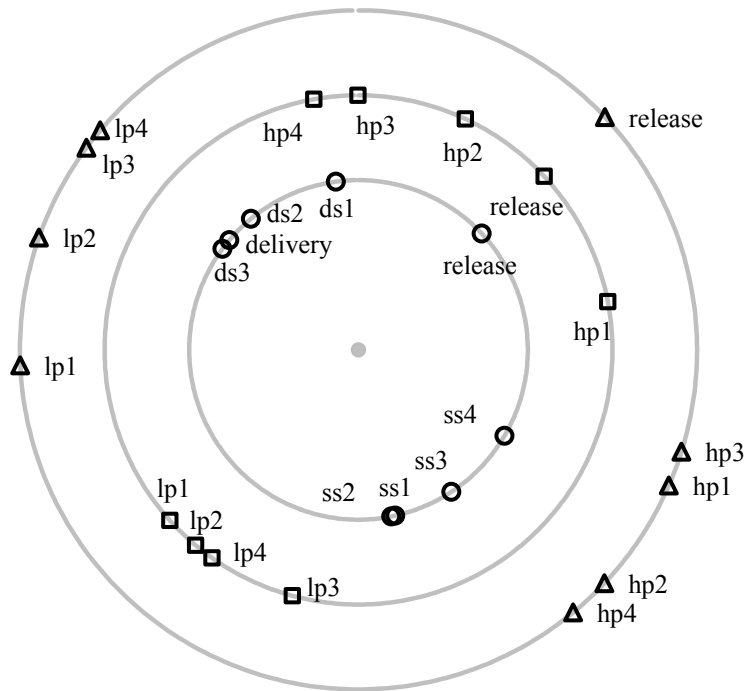
- Maheras, A. V. 2009. Reassessing velocity generation in hammer throwing. *New Studies in Athletics* 24 (4), 71–80.
- Maronski, R. (1991). Optimal distance from the implement to the axis of rotation in hammer and discus throw. *Journal of Biomechanics* 24, 999–1005.
- Mercadante, L. A., Menezes, R. P., Martini, T. P., Trabanco, J. L. A. & de Barros, R. M. L. 2007. 3D Kinematical Analysis of the Hammer Throw in Competitions. XXV ISBS Symposium, Ouro Preto, Brasilia.
- Morley, M. 2003. Hammer throwing - the delivery part 1. *The Coach* 18 syskuu/lokakuu, 28 - 32.
- Morriss, C. J. & Bartlett, R. M. 1995. Biomechanical analysis of the men's hammer throw. Teoksessa R. M. Bartlett (toim.) *Biomechanical analysis of the 1995 national championships*. British Athletic Federation: Alsager 1, 1 - 22.
- Murofushi, K., Sakurai, S., Umegaki, K. & Takamatsu, J. 2007. Hammer acceleration due to thrower and hammer movement patterns. *Sports Biomechanics* 6 (3), 301 - 314.
- Otto, R. M. 1991. A kinematic analysis of Yuriy Sedikh's world record hammer throw. *Modern Athlete and Coach* 29 (4), 3 - 8.
- Rinta-aho, A. 2002. *Moukarinheitto*. Suomen Urheiluliiton julkaisu. Helsinki.
- Rojas-Ruiz, F. J. & Gutiérrez-Dávila, M. 2009. The relation between angular displacement of the hammer in the double support phase and its velocity in the hammer throw. *Journal of Human Sport & Exercise* 4 (3), 254 - 261.
- Sakr, M. 2012. *Women's Hammer Throw : Measurement Information System And Kinetic Energy of Body Segments and Hammer Head*. Konstanzin yliopisto, Sport 796.
- Simonyi, G. 1980. Notes on the technique of hammer throwing. *Track & Field Quarterly review* 80 (1), 29-30.
- Tancred, P. & Carter, C. A. 1980. *Athletic Throwing*. Faber and Faber Limited, Lontoo.
- World Athletics. 2019. *Competition and Technical Rules 2020 edition*, in force from 1 November 2019.
- World Athletics. 2020. *World Athletics World records*. Viitattu 7.7.2020. <https://www.worldathletics.org/records/by-category/world-records>.

LIITTEET

LIITE 1. Heittojen tukivaiheiden alut sekä moukarin kuulan ja heittäjän massakeskipisteen korkeimmat (hp) ja matalimmat (lp) kohdat atsimuuttiasteikolla esitettyinä.



82,40 m

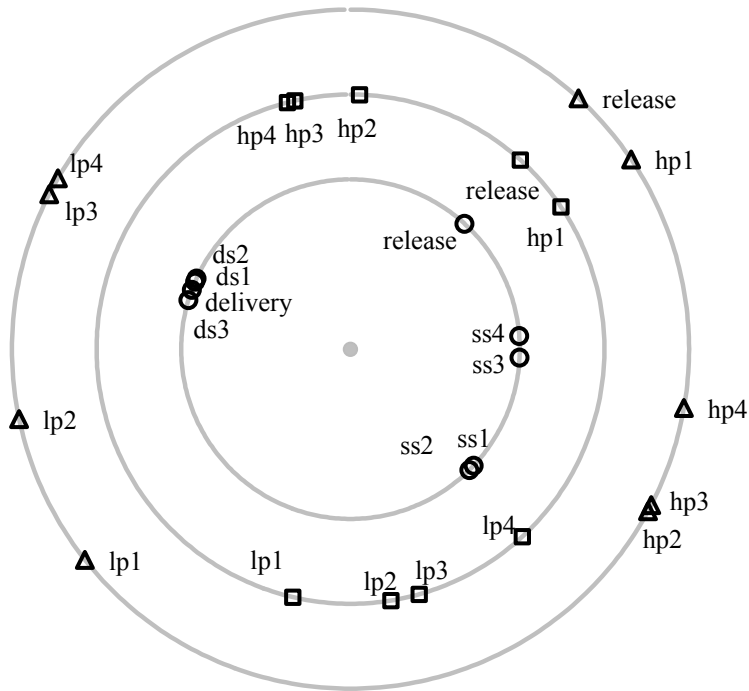


heittosuunta



- tukivaiheen alku
- moukarin hp / lp
- △ heittäjän hp / lp

74,89 m

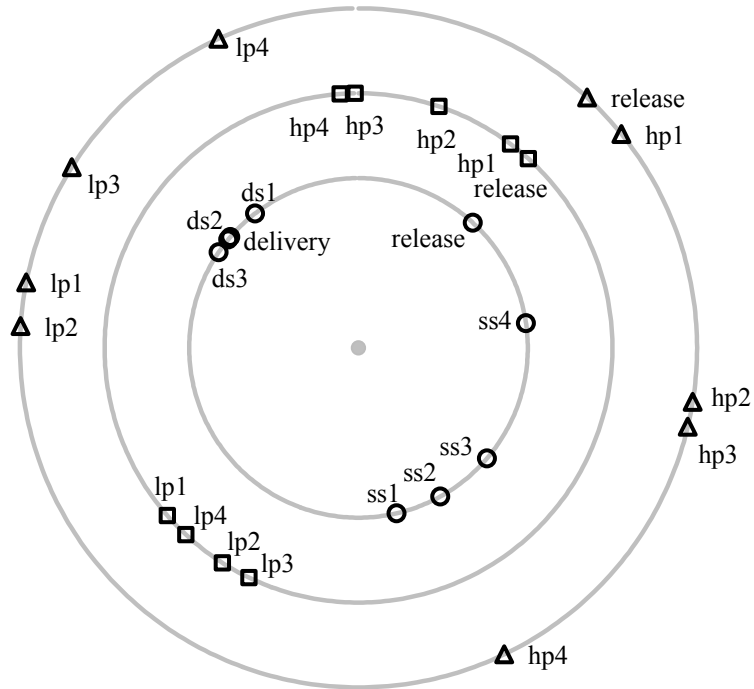


heittosuunta



- tukivaiheen alku
- moukarin hp / lp
- △ heittäjän hp / lp

74,85 m

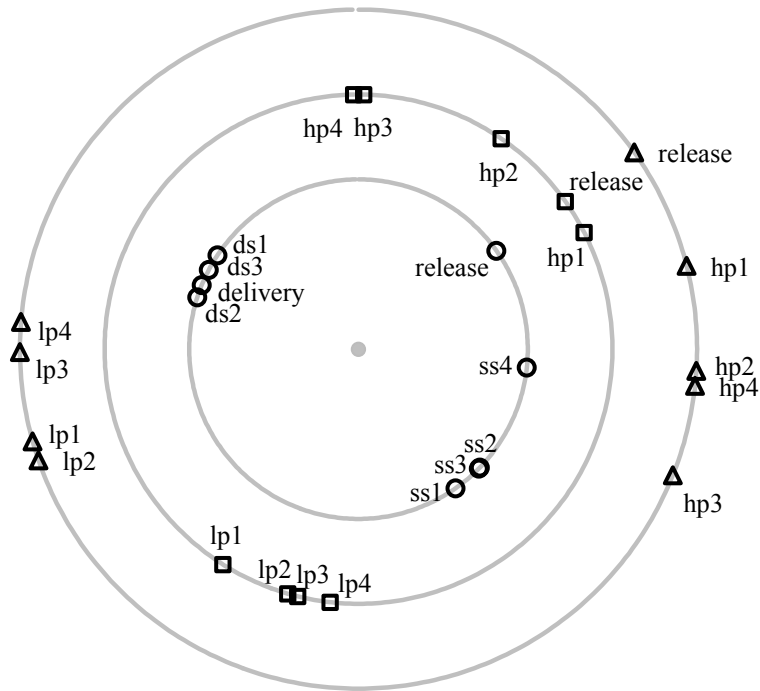


heittosuunta



- tukivaiheen alku
- moukarin hp / lp
- △ heittäjän hp / lp

72,71 m

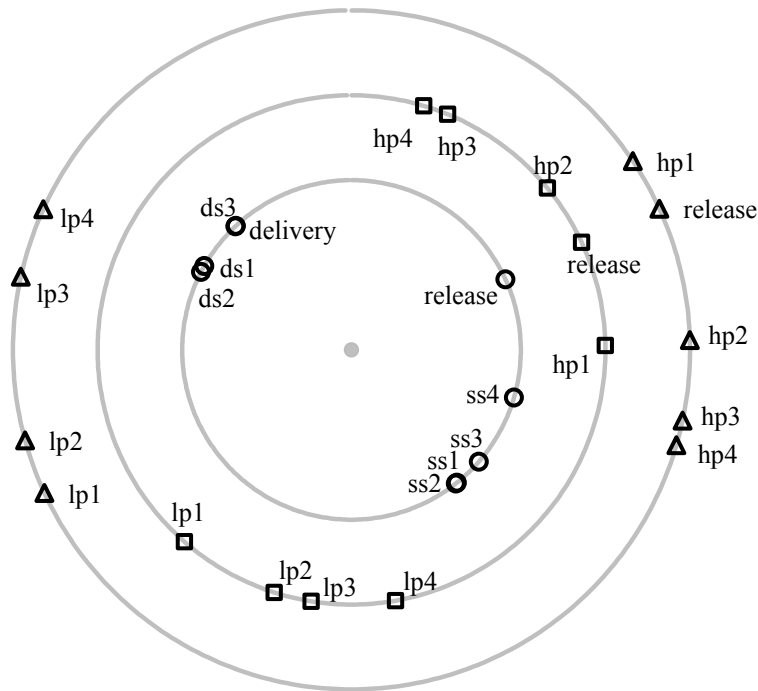


heittosuunta



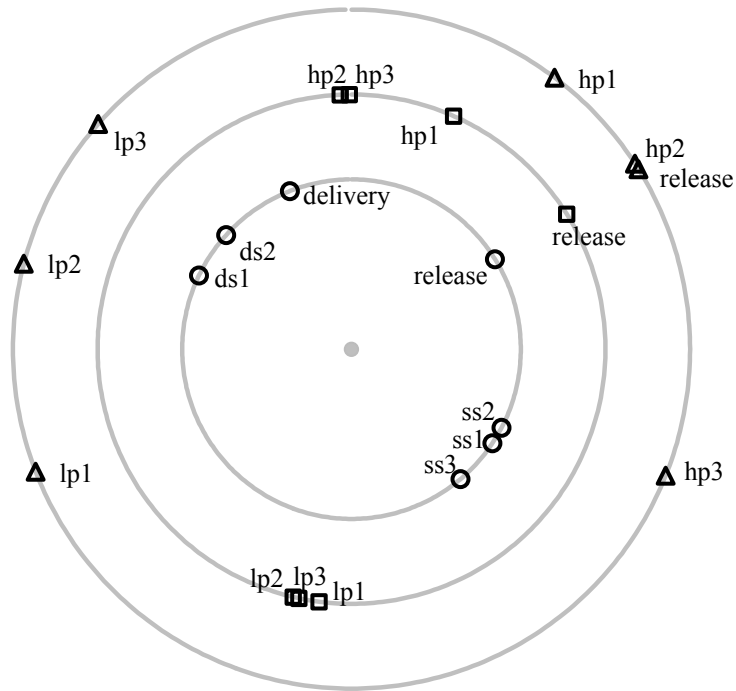
- tukivaiheen alku
- moukarin hp / lp
- △ heittäjän hp / lp

68,12 m



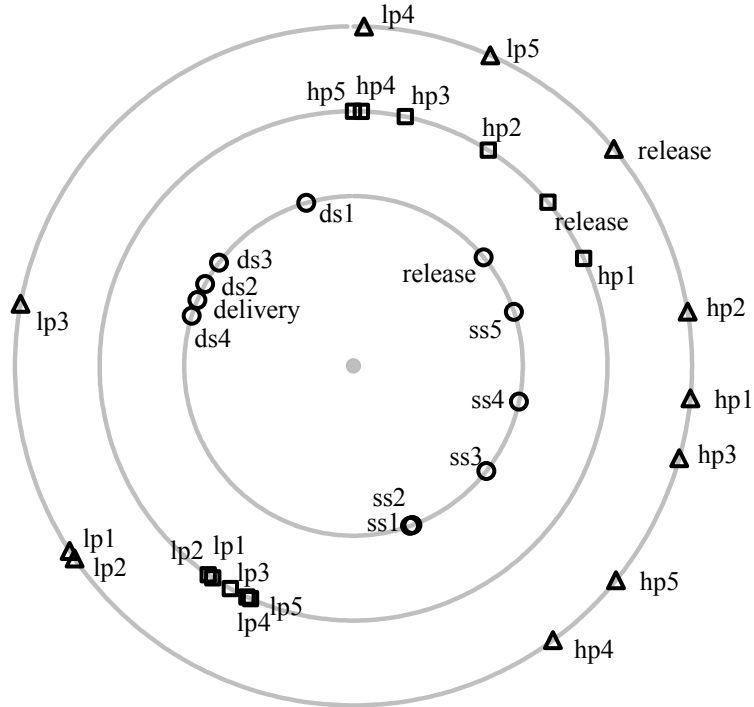
- tukivaiheen alku
- moukarin hp / lp
- △ heittäjän hp / lp

71,95 m



- tukivaiheen alku
- moukarin hp / lp
- △ heittäjän hp / lp

75,72 m



heittosuunta



- tukivaiheen alku
- moukarin hp / lp
- △ heittäjän hp / lp

LIITE 2. Tukijalan polvikulmat [°] tukivaiheiden alussa (t₀) sekä tukivaiheiden minimi- ja maksimiarvot (* \bar{x} ja sd laskettu vain neljällä vauhtipyörähdyksellä heittäjät)

#	pituus	ss1	ds1	ss2	ds2	ss3	ds3	ss4	ds4	ss5	delivery	release	
1	82,40m	t ₀	143	97	146	87	143	96	154		95	148	
		min	97	83	87	85	95	96	95		95		
		max	143	146	146	143	145	154	154		148		
2	74,89m	t ₀	137	104	144	87	160	83	162		102	171	
		min	104	99	87	86	83	83	92		102		
		max	140	144	150	163	160	162	162		171		
3	74,85m	t ₀	127	94	151	95	142	91	133		86	167	
		min	94	93	94	95	90	91	83		86		
		max	128	151	153	142	142	137	133		167		
4	72,71m	t ₀	122	92	135	99	141	89	135		92	170	
		min	92	92	99	99	89	89	92		92		
		max	123	135	135	141	141	136	135		170		
5	68,12m	t ₀	124	97	134	94	134	88	142		87	160	
		min	97	97	94	94	88	88	86		87		
		max	125	134	134	134	134	144	142		160		
6	71,95m	t ₀	161	111	146	101	159				85	171	
		min	109	109	101	101	85				83		
		max	161	146	146	159	168				171		
7	75,72m	t ₀	136	105	122	87	135	86	119	93	116	99	164
		min	105	93	87	87	86	86	85	93	88	99	
		max	138	122	129	135	135	123	119	124	116	164	
\bar{x}^*		t ₀	130,6	96,7	141,9	92,3	143,8	89,4	145,3		92,7	163,0	
		min	96,7	92,6	92,2	91,6	89,0	89,3	89,7		92,7		
		max	131,9	142,0	143,5	144,4	144,2	146,6	145,3		163,1		
sd*		t ₀	8,8	4,7	7,3	5,2	9,8	4,6	12,6		6,6	9,5	
		min	4,7	5,9	5,2	6,0	4,2	4,6	4,6		6,6		
		max	9,2	7,2	8,6	11,0	9,7	11,3	12,6		9,5		

LIITE 3. Vapaan jalan polvikulmat [°] tukivaiheiden alussa (t₀) sekä tukivaiheiden minimi- ja maksimiarvot (* \bar{x} ja sd laskettu vain neljällä vauhtipyörähdyksellä heittäjät)

#	pituus		ss1	ds1	ss2	ds2	ss3	ds3	ss4	ds4	ss5	delivery	release
1	82,40m	t ₀	86	117	86	101	90	102	94			98	114
		min	81	86	82	90	72	94	66			98	
		max	117	117	101	105	102	112	98			114	
2	74,89m	t ₀	79	128	84	107	93	103	97			109	144
		min	71	84	78	93	66	97	59			109	
		max	128	128	107	107	103	116	109			144	
3	74,85m	t ₀	83	116	85	105	89	98	82			89	148
		min	53	85	56	89	44	82	51			89	
		max	116	117	105	108	98	105	89			148	
4	72,71m	t ₀	83	108	82	102	93	101	84			108	145
		min	56	82	60	93	53	84	51			108	
		max	108	112	102	108	101	110	108			145	
5	68,12m	t ₀	91	116	87	109	95	110	88			101	148
		min	73	87	68	95	58	88	56			101	
		max	116	121	109	111	110	114	101			148	
6	71,95m	t ₀	92	123	98	119	107					116	121
		min	86	98	91	107	92					107	
		max	123	123	119	123	116					121	
7	75,72m	t ₀	87	155	81	133	81	105	75	104	74	109	127
		min	71	81	76	81	73	75	74	74	74	109	
		max	155	156	133	133	105	109	104	105	109	127	
\bar{x}^*	t ₀	84,4	117,1	84,9	104,9	92,1	102,7	89,0				101,0	139,6
	min	66,6	84,9	68,8	92,1	58,8	89,0	56,7				101,0	
	max	117,1	119,1	104,9	107,8	102,7	111,3	101,0				139,6	
sd*	t ₀	4,2	7,0	2,2	3,4	2,3	4,5	6,6				8,0	14,6
	min	11,9	2,2	11,2	2,3	11,0	6,6	6,2				8,0	
	max	7,0	5,8	3,4	2,3	4,5	4,0	8,0				14,6	

LIITE 4. Tukijalan lonkkakulmat [°] tukivaiheiden alussa (t₀) sekä tukivaiheiden minimi- ja maksimiarvot (* \bar{x} ja sd laskettu vain neljällä vauhtipyörähdyksellä heittäjät)

#	pituus	ss1	ds1	ss2	ds2	ss3	ds3	ss4	ds4	ss5	delivery	release
1	t ₀	126	128	124	133	133	138	147			142	172
	min	124	108	124	122	133	130	142			132	
	max	135	128	147	133	144	147	149			172	
2	t ₀	125	128	132	125	160	136	161			143	157
	min	125	107	125	116	136	128	140			143	
	max	144	132	153	160	160	161	166			175	
3	t ₀	116	114	132	126	128	123	131			122	173
	min	114	104	125	118	123	116	121			122	
	max	129	132	134	130	130	131	132			173	
4	t ₀	110	108	123	121	138	125	135			122	160
	min	108	99	120	117	125	120	122			119	
	max	132	123	131	138	138	135	136			175	
5	t ₀	110	105	121	116	130	118	141			129	167
	min	105	96	116	108	118	109	129			123	
	max	129	121	126	130	132	141	141			178	
6	t ₀	136	117	124	115	155					117	171
	min	114	105	115	110	117					106	
	max	138	124	132	155	160					174	
7	t ₀	108	122	113	110	129	118	131	120	135	125	173
	min	108	101	110	105	118	111	120	119	123	124	
	max	128	122	133	129	133	131	131	138	135	173	
\bar{x}^*	t ₀	117,5	116,8	126,4	124,2	137,6	128,0	142,8			131,6	165,7
	min	115,3	102,9	122,0	116,1	127,0	120,7	130,9			127,7	
	max	133,7	127,5	138,4	138,1	141,1	142,9	144,7			174,5	
sd*	t ₀	7,8	11,2	5,2	6,5	13,0	8,7	12,1			10,2	6,9
	min	9,3	5,2	4,3	5,3	7,4	8,4	9,7			9,7	
	max	6,2	5,0	11,5	12,6	12,1	12,0	13,6			2,5	

LIITE 5. Vapaan jalan lonkkakulmat [°] tukivaiheiden alussa (t₀) sekä tukivaiheiden minimi- ja maksimiarvot (* \bar{x} ja sd laskettu vain neljällä vauhtipyörähdyksellä heittäjät)

#	pituus		ss1	ds1	ss2	ds2	ss3	ds3	ss4	ds4	ss5	delivery	release
1	82,40m	t ₀	129	120	135	128	146	139	153			141	161
		min	111	120	121	128	123	139	126			141	
		max	129	140	135	149	146	159	153			161	
2	74,89m	t ₀	139	141	144	133	153	143	155			148	162
		min	132	115	125	126	118	141	117			146	
		max	141	144	144	153	153	155	155			165	
3	74,85m	t ₀	134	106	137	138	147	133	144			131	174
		min	105	106	119	132	114	132	124			131	
		max	134	138	138	151	147	149	144			174	
4	72,71m	t ₀	128	104	131	126	137	133	145			140	145
		min	102	104	112	126	107	132	105			140	
		max	128	131	133	137	144	145	148			150	
5	68,12m	t ₀	134	116	129	133	140	140	144			139	153
		min	111	109	120	127	120	130	121			139	
		max	134	129	133	140	145	144	146			153	
6	71,95m	t ₀	132	144	139	142	145					134	165
		min	132	126	131	138	125					134	
		max	148	144	147	148	145					165	
7	75,72m	t ₀	124	134	127	132	128	132	130	128	129	127	156
		min	110	109	115	116	124	126	126	127	126	127	
		max	134	140	132	133	135	136	137	137	132	156	
\bar{x}^*		t ₀	117,5	116,8	126,4	124,2	137,6	128,0	142,8			131,6	165,7
		min	115,3	102,9	122,0	116,1	127,0	120,7	130,9			127,7	
		max	133,7	127,5	138,4	138,1	141,1	142,9	144,7			174,5	
sd*		t ₀	7,8	11,2	5,2	6,5	13,0	8,7	12,1			10,2	6,9
		min	9,3	5,2	4,3	5,3	7,4	8,4	9,7			9,7	
		max	6,2	5,0	11,5	12,6	12,1	12,0	13,6			2,5	