

REAKTIOVOIMANTUOTTO, NOPEUS JA TEKNIikka KOL- MILOIKASSA

Janne Alasalmi

Valmennus- ja testausoppi
Kandidaatintutkielma
VTEA006
Kevät 2011
Liikuntabiologian laitos
Jyväskylän yliopisto
Työn ohjaajat: Mikko Virmavirta
Antti Mero

TIIVISTELMÄ

Janne Alasalmi, 2011. Reaktiovoimantuotto, nopeus ja tekniikka kolmiloikassa. Valmennus- ja testausoppi. Kandidaatin tutkielma. Jyväskylän yliopisto, liikuntabiologian laitos. 46s.

Johdanto. Kolmiloikka on sekä fyysisesti että teknisesti erittäin vaativa ja herkkä laji, jossa tutkimus on tähän asti ollut vähäistä ja lähinnä liikeanalyysiin perustuvaa. Erityisesti huipputuloksiin vaadittavista reaktiovoimista ei ole juuri tietoa saatavilla. Tämän tutkimuksen tarkoituksena oli koota saatavilla oleva tutkimustieto lajista sekä pyrkiä määrittämään tärkeimpiä reaktiovoimamuuttujia uuden testipatteriston muodostamiseksi valmennuksen tueksi. Lisäksi tutkimuksen yhteydessä testattiin lasermittausjärjestelmän soveltuvuutta suorituksen aikaisten nopeuden muutosten mittaamisessa.

Menetelmät. Koehenkilöinä tutkimukseen osallistui yhteensä kolme kansallisen tason mieshyppääjää (ikä $20,7 \pm 0,23$ vuotta, ennätys $15,47 \pm 0,49$ m. Hyppääjät suorittivat ensimmäisellä mittauskerralla omatoimisen verryttelyn jälkeen vähintään kolme suoritusta lyhyellä (lentävä kuuden askeleen vauhti) ja pitkällä vauhdilla (lentävä 10-12 askeleen vauhti). Toisella kerralla tyydyttiin vain pitkän vauhdin käyttämiseen. Hypyt suoritettiin Hipposhallissa yhden erillisen kolmiloikkalankun alle asennetun $0,6 \text{ m} \times 1,0 \text{ m}$ kokoisen voimalevyn sekä sen jatkona olevan $7,2 \text{ m} \times 0,9 \text{ m}$ Tartan-päällysteisen voimalevyjonon päällä reaktiovoimien keräämiseksi 1000 Hz näyteenottotaajuudella. Lankun etäisyys hiekkakasan reunasta oli ensimmäisellä mittauskerralla teknisistä syistä $13,7 \text{ m}$ ja toisella $12,7 \text{ m}$. Radan pinnalle levitettiin paperi, jonka avulla voitiin mitata kahden viimeisen juoksuaskeleen ja hypyn eri vaiheiden osapituudet. Hyppääjien hetkellistä nopeutta vauhdinjuoksussa mitattiin LAVEG-lasermittausjärjestelmällä, jossa urheilijan selkään tähdätty lasersäde mittaa etäisyyttä 50 Hz näyteenottotaajuudella. Lisäksi käytössä oli perinteisempi valokennojärjestelmä lähestymisnopeuden (1-3 m ennen ponnistuskohtaa) mittaamiseksi. Hypyistä määritettiin lähestymisnopeudet, kahden viimeisen askeleen pituudet, loikkien vaihepituudet ja -suhteet, kontaktiajat, vaakanopeuden hidastuminen ponnistuskontaktien aikana ja reaktiovoimamuuttujat. Lisäksi hypyt kuvattiin hyppääjää alastuloon asti seuraten videokameralla ($200 \text{ kuvaa} \cdot \text{s}^{-1}$) hyppytekniikan kontrolloimiseksi.

Tulokset. Pitkävauhtisten hyppyjen pituus oli kevään mittauksissa $14,66 \pm 0,64 \text{ m}$. Kaikki hyppääjät toteuttivat tyypillisen lankulle tiivistyvän askelrytmin ja käyttivät ns. tasapainoista hyppytekniikkaa. Hyppääjän vaakanopeus hidastui $9,15 \pm 0,26 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ lähestymisnopeudesta kinkan, loikan ja hypyn tukivaiheiden aikana $0,74 \pm 0,04 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $0,81 \pm 0,28 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ja $0,96 \pm 0,18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Hyppääjän tuottamat reaktiovoimat olivat suurimmat loikan tukivaiheessa; maksimaalinen pystyvoima jarrutusvaiheessa yli 12 kertaa hyppääjän paino (BW) ja keskimääräinen jarrutusvoima $5,18 \pm 0,21 \text{ BW}$. Törmäysvoiman maksimiarvo loikassa ylitti mittausjärjestelmän maksimin 10 000 N. Lasermittausjärjestelmällä saadut nopeusarvot korreloivat voimakkaasti 3-1 m mittausmatkalla ennen lankua valokennoilla saatuihin arvoihin ($r = 0,81$; $p < .0001$) huolimatta kaikille koehenkilöille liian matalasta, eli mittausvirhettä aiheuttavasta, kennojen sijainnista. Kinkka- ($r = 0,64$; $p = 0,17$) ja hypyvaiheiden ($r = 0,69$; $p = 0,08$) pituuden sekä kokonaistuloksen välillä oli selvä trendi loikkavaiheen jäädessä merkityksettömämpään

osaan ($r = 0,42$; $p = 0,31$). Kinkan vaihepituus korreloi voimakkaasti lähestymisnopeuden ($r = 0,97$; $p < .01$), ponnistushetkellä jäljellä olevan vaakanopeuden ($r = 0,93$; $p < .001$) ja työntökulman ($r = -0,94$; $p < .01$) kanssa. Loikan vaihepituus taas korreloi voimakkaasti kontaktiajan ($r = 0,80$; $p < .05$), suhteellisen vaakanopeuden muutoksen ($r = 0,96$; $p < .05$), vaakavoiman minimiarvon ($r = -0,84$; $p < .01$) ja jarrutuskulman kanssa ($r = -0,88$; $p < .05$).

Pohdinta. Vähäinen koehenkilömäärä ja mittaustekniset ongelmat rajoittivat tilastollisesti merkitsevien tulosten löytymistä tässä tutkimuksessa. Tulokset vastasivat kuitenkin hyvin kirjallisuudessa aiemmin raportoituja. Vaakanopeuden hidastumisen minimointi näyttäisi olevan erityisen tärkeää kinkan vaihepituuden kannalta, ja tällä on luultavasti myös kumulatiivinen vaikutus sitä seuraaviin vaiheisiin. Loikan vaihepituuteen vaikutti positiivisesti tekniikka, jossa kontaktiaika ja jarrutusvoimat olivat suuret, mutta tällä voi olla negatiivinen vaikutus sitä seuraavan hyppyvaiheen pituuteen, eikä loikan vaihepituus näyttäisi olevan edes kovin ratkaiseva kokonaistuloksen kannalta homogeenisellä hypääjäjoukolla. Hypyn vaihepituuden kannalta tärkeintä näyttäisi olevan pysytysuuntainen voimantuotto.

Sovellutukset käytäntöön. Kirjallisuuden ja tämän tutkimuksen perusteella voisi esittää kolmiloikkaajien testipatteriin mukaan otettavaksi suoritukselle tärkeitä kontaktiaikoja (jarrutus- ja työntöaika) sekä reaktivoimamuuttujista pystyvoiman maksimiarvo (jarrutusvaiheessa) ja keskiarvo, maksimaalinen vaakavoima työntövaiheessa, keskimääräiset resultanttivoimat koko kontaktilta sekä jarrutus- ja työntövaiheista sekä niiden suunnat ja vaakavoiman impulssi kontaktin aikaisen vaakanopeuden hidastumisen määrittämiseksi. Myös vaihepituuksien ja -suhteiden seuranta on helppo toteuttaa samassa yhteydessä radalle levitettävän paperin avulla. Lähestymisnopeuden mittaaminen LAVEG-mittauslaitteistolla mahdollistaa nopeuden analysoinnin miltä tahansa hetkeltä tai etäisyysväliltä ennen ponnistuskohtaa, joten sen käyttäminen antaa enemmän tietoa suorituksesta kuin valokennomittaus.

Avainsanat: kolmiloikka, reaktivoima, nopeus, lasermittaus, tekniikka, vaihesuhde

SISÄLTÖ

TIIVISTELMÄ

1	JOHDANTO.....	4
2	KOLMILOIKAN LAJIANALYYSI.....	6
2.1	Kolmiloikan tekniikka.....	7
2.2	Kolmiloikan biomekaniikka.....	9
2.2.1	Painopisteen nopeuden muutokset ja ponnistuskulmat.....	12
2.2.2	Optimaalinen vaihesuhde.....	15
2.2.3	Reaktivoimat ja jalkapohjien kuormittuminen.....	16
2.2.4	Lihasktiivisuudet ja ponnistavan jalan jäykkyys.....	19
3	TUTKIMUSONGELMAT JA HYPOTEESIT.....	21
4	MENETELMÄT.....	22
4.1	Tutkimusasetelma.....	22
4.2	Mittaukset.....	23
4.3	Analyysit.....	25
4.4	Tilastolliset analyysit.....	27
5	TULOKSET.....	28
6	POHDINTA.....	34
7	KIITOKSET.....	38
8	LÄHTEET.....	39
	LIITE 1. Voimalevyjono.....	41
	LIITE 2. LAVEG-kuvaajat.....	42
	LIITE 3. Voimakuvaajat.....	43
	LIITE 4. Reaktivoimien absoluuttiset arvot.....	46

1 JOHDANTO

Vuonna 1995 tehtiin kolmiloikan lajihistoriaa, kun Iso-Britannian Jonathan Edwards loikki Göteborgin MM-kilpailujen finaalissa yhä voimassa olevan uuden maailmanennätyksen 18,16 m ja paransi sitä vielä seuraavalla hypyllä lukemiin 18,29 m. Tämä oli ensimmäinen kerta, kun kolmiloikassa ylitettiin 18 metrin raja sallituissa olosuhteissa, eikä sitä ole tämän jälkeen ylitetty kuin kolmesti. Kilpailun osallistujissa oli mukana monta Edwardsia nopeampaa ja voimakkaampirakenteista hyppääjää, mutta hänen kykynsä minimoida vaakanopeuden hidastuminen jokaisen ponnistuskontaktin aikana oli omassa luokassaan, ja tarjoaa viitteitä lajiharjoittelun tavoitteille tulevaisuudessa. (Thorsson ym. 1996.) Tieteellisissä tutkimuksissa käytetty menetelmä nopeusdatan hankkimiseksi on yleisesti liikeanalyysi, joka on suhteellisen raskas suorittaa, eikä näin tarjoa välitöntä palautetta urheilijalle. Lasermittausjärjestelmällä voisi olla mahdollista saada näytteitä hyppääjän vaakanopeudesta sekä vauhdinjuoksun että ponnistusvaiheiden ajalta yksinkertaisemmin kuin liikeanalyysillä, ja tarjota näin urheilija-valmentajapareille tehokas työkalu valmennustyöhön esimerkiksi leiritysten tai kilpailujen yhteyteen (Harrison ym. 2005).

Kolmiloikasta on tehty suhteellisen vähän tieteellisiä julkaisuja, ja niistäkin valtaosa keskittyy poikittaisluonteisesti kuvailemaan kilpailujen yhteydessä tehtyjen liikeanalyysien perusteella saatuja kinemaattisia muuttujia pienellä homogeenisellä hyppääjäjoukolla. (Brüggemann & Arampatzis 1999; Hay 1999; Koh & Hay 1990; Kyröläinen ym. 2008; Miller & Hay 1986.) Tämän tyyppisistä tutkimuksista saatava tieto antaa rajallisesti työkaluja käytännön valmennustyöhön eli yksilön hyppytekniikan tai ominaisuuksien optimointiin pyrittäessä kansalliselta tasolta kansainväliselle. Muutama tutkimus on antanut arvokasta tietoa kolmiloikkaajaan kohdistuvista reaktivoimista ja valaissut näin myös huippusuorituksiin tarvittavia fyysisiä ominaisuuksia (Fukashiro ym. 1981; Fukashiro & Miyashita 1983; Perttunen ym. 2000; Ramey & Williams 1985). Yksilölle optimaalista vaihesuhdetta on pyritty selvittämään simuloinneilla, mutta fyysisten ominaisuuksien vaikutusta tähän ei ole juurikaan selvitetty (Yu 1999; Yu & Hay 1996). Yksittäisen urheilijan suorituksista tehty pitkittäistutkimus voisi antaa enemmän viitteitä

optimaalisesta suoritustekniikasta tälle urheilijalle (Hay 1992).

Tämän tutkimuksen tarkoituksena on koota yhteen lajista julkaistu tutkimustieto, selvittää kolmiloikkasuorituksen kannalta keskeisiä reaktivoimamuuttujia sekä testata lasermittausjärjestelmän soveltuvuutta hyppääjän vaakanopeuden muutosten arviointiin. Tämän selvitystyön pohjalta voi olla mahdollista arvioida hypyn pituuteen vaikuttavia tekijöitä, yksilölle optimaalista tekniikkaa sekä hyödyntää testattuja menetelmiä ja tuloksia käytännön valmennukseen soveltuvan testauspatteriston kehitystyössä.

2 KOLMILOIKAN LAJIANALYYSI

Kolmiloikkasuoritus koostuu vauhdinjuoksusta sekä sitä seuraavista kolmesta vaiheesta: kinkasta, loikasta ja hypystä (engl. hop, step, jump). Kinkka suoritetaan lankulta ponnistaen alastulon tapahtuessa samalle jalalle. Loikan ponnistuksesta alastulo tapahtuu vastakkaiselle jalalle, jolta tapahtuva hyppy muistuttaa pituushyppyä kahden jalan alastulona hiekkakasaan. Mahdolliset variaatiot ovat siis oikea-oikea-vasen-alastulo ja vasen-vasen-oikea-alastulo. Käytännössä kinkka ja loikka suoritetaan submaksimaalisina ja vain hyppy maksimaalisena vaakanopeuden säilyttämiseksi riittävänä seuraaville vaiheille, ja jotta välttyttäisiin liian suurilta törmäysvoimilta alastuloissa. Hypätty kokonaismatka riippuu vauhdinjuoksun aikana saavutetusta vaakanopeudesta ja sen hallitsemisesta sekä säilyttämisestä hypyn eri vaiheiden läpi. (Dyson 1978, 192; Hay 1992 & 1993.) Esimerkki kokonaissuorituksesta vauhdinjuoksun viimeisen askeleen kontaktista hypyn alastuloon on esitetty alla (kuva 1).



KUVA 1. Tikku-ukkomalli ja painopisteen sijainti Willie Banksin vuoden 1985 maailmanennätyshypystä 17,97 m (Miller & Hay 1986).

Luokiteltaessa kolmiloikkasuorituksia eri tekniikoihin jaetaan hypätty kokonaismatka vaihepituuuksiin. Kinkan pituus mitataan horisontaalisena matkana hypääjän ponnistavan jalan varpaankärjen sijainnista kinkan kontaktissa saman jalan varpaankärjen sijaintiin loikan kontaktissa. Loikan pituus mitataan vastaavasti ponnistavan jalan varpaankärjestä loikan kontaktissa vastakkaisen jalan varpaankärkeen hypyn kontaktissa, mutta hypyn pituus poikkeuksellisesti ponnistavan jalan varpaankärjen ja alastulossa hiekkakasaan jätetyn lähimmän merkin (yleensä kantapäät) välisenä matkana. Yksittäisen ponnistusvaiheen matka taas voidaan jakaa kolmeen osapituuteen: ponnistusmatkaan (matka varpaan kärjestä painopisteeseen ponnistushetkellä), lentomatkkaan (painopisteen liikuma matka ilmalennon aikana) ja alastulomatkkaan (kinkan ja loikan osalta matka painopisteestä alastulojalan varpaankärkeen ja hypyn osalta alastulohetken matka painopis-

teestä merkkiin hiekassa). (Hay 1992.)

Virallista tulosta heikentävät lankun takaa lähteneen ponnistuksen, sivuttaissuunnassa liikutun matkan sekä huonon alastulon johdosta menetetty kokonaismatka, koska mitaus tapahtuu aina hiekkakasaan lähimmäs lankkua jääneestä jäljestä kohtisuorasti lankun linjalle. Virallisen tuloksen ja menetetyt matkan summa, ns. tehollinen tulos, on keskimäärin noin 20-30 cm pidempi kuin virallinen tulos, joten askelmerkkijuoksun tarkkuuskin voi ratkaista kilpailun lopullisen järjestyksen. (Brüggemann & Arampatzis 1997; Kyröläinen ym. 2008.)

2.1 Kolmiloikan tekniikka

Kolmiloikan vauhdinjuoksussa oleellisia asioita ovat suuren, mutta kontrolloitavissa olevan, vaakanopeuden saavuttaminen sekä lankulle kiihtyvä askelfrekvenssi. Tällöin painopiste pysyy mahdollisimman korkealla, ja kinkka voidaan suunnata sopivaan kulmaan. (von Gerich & Kyröläinen 1988.) Ponnistuksen pituuteenhan vaikuttaa myöhemmin esitettävän mallin mukaan myös painopisteen korkeus ja nopeus ponnistushetkellä (kuva 1).

Kolmiloikassa käytetyt tekniikat jaetaan nykyään kolmeen pääryhmään sen perusteella, mitä vaihetta hypyssä korostetaan. Jako tapahtuu siten kinkka- ja hyppypainotteiseen sekä tasapainoiseen tekniikkaan. Loikan on havaittu olevan aina lyhyin vaihe, eikä sen korostaminen näyttäisi parantavan tulosta. Kinkka- ja hyppypainotteisessa tekniikassa kyseisen vaiheen osuus hypyn kokonaispituudesta on vähintään 2 % suurempi kuin seuraavaksi pisimmän vaiheen. Tasapainoisessa tekniikassa pisimmän vaiheen pituus on alle 2 % pidempi kuin seuraavaksi pisimmän. (Hay 1992, 1993 & 1999.) Huippuhyppääjät näyttäisivät käyttävän parhaissa hypyissään nykyään lähinnä tasapainoista sekä kinkkapainotteista tekniikkaa, vaikka myös hyppypainotteisella tekniikalla on saavutettu yhtä hyviä tuloksia, ja sama hyppääjä saattaa jopa käyttää eri tekniikoita yhden kilpailun aikana. Naisten tekniikka eroaa miehistä yleensä lyhyempänä loikan osuutena. Taulukossa 1 on esitetty vuoden 1997, 2005 ja 2009 MM-kilpailujen hyppääjien käyttämät

keskimääräiset vaihesuhteet. Miesten osalta muutoksia ei ole juuri tapahtunut, mutta naisten loikkavaiheen osuus osoittaa kasvavaa trendiä. Keskiarvot peittävät kuitenkin alleen yksilöiden käyttämät erilaiset painotukset. Kinkkapainotteista tekniikkaa käyttäviltä on mitattu pidempiä kontaktiaikoja, joten heitä voidaan pitää ns. voimahyppääjinä, kun taas nopeushyppääjät luottavat enemmän tasapainoiseen tai hyppypainotteiseen tekniikkaan lyhyemmillä kontaktiajoilla. (Al-Kilani & Widule 1990; Brüggemann & Arampatzis 1997; Hay 1993 & 1999; Hommel 2009; Kyröläinen ym. 2008.)

TAULUKKO 1. Keskimääräiset vaihesuhteet (%) MM-kilpailujen finalisteilla (Brüggemann & Arampatzis 1997; Kyröläinen ym. 2008; Hommel 2009).

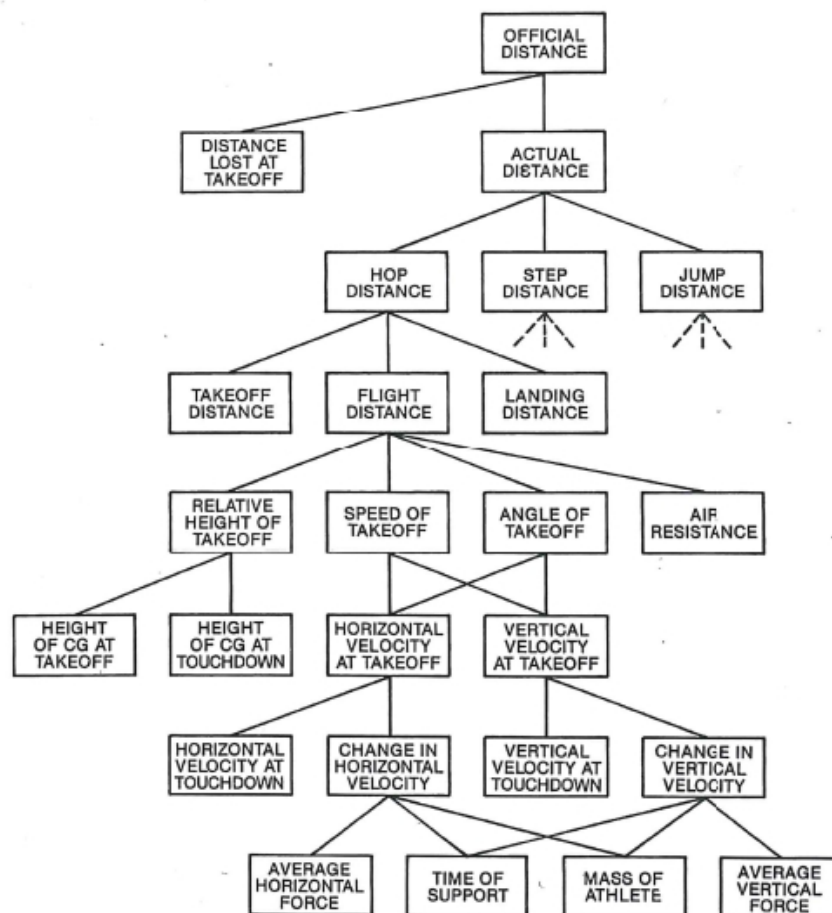
	Kinkka	Loikka	Hyppy
Naiset -97	36,6 ± 1,2	27,7 ± 1,7	35,7 ± 1,1
Naiset -05	36,2 ± 0,9	29,4 ± 1,2	34,5 ± 1,2
Naiset -09	36,6 ± 0,7	28,6 ± 1,1	34,5 ± 1,8
Miehet -97	36,1 ± 0,9	29,4 ± 1,2	34,5 ± 1,2
Miehet -05	36,2 ± 1,0	28,8 ± 1,4	35,0 ± 1,0
Miehet -09	36,5 ± 1,4	30,4 ± 1,4	33,1 ± 0,8

Valmennuksellisesti muita tärkeinä pidettyjä teknisiä osa-alueita ovat vapaan jalan sekä käsien liikkeiden ajoittaminen ponnistuksissa ja ennen ponnistusta tapahtuva ponnistavan jalan aktiivinen kuopaisuliike. Vapaan jalan sekä käsien eteen heilahtava liike alkaa jo ennen kuin hyppääjä laskeutuu edeltävästä lentovaiheesta kontaktiin ja jatkuu kiihtyvänä kontaktin alimpaan pisteeseen hidastuen taas ponnistuksen loppuun. Vapaan jalan sekä käsien näin aikaansaaman liikemäärän on arvioitu lisäävän ponnistuksen tehokkuutta lisäämällä tukijalan aktiivisten lihasten venytyksen määrää. Käytettyjä käsitekniikoita on useita erilaisia, mutta niiden vaikutusten erot hypyn pituuteen tai vaakanopeuden säilymiseen ovat kyseenalaisia. Yleensä tekniikat jaetaan kahteen pääryhmään: juoksunomaiseen vuorokäsityöskentelyyn sekä kaksoiskäsityöskentelyyn. Muitakin variaatioita on olemassa, ja lisäksi saman hypyn eri ponnistusvaiheissa voidaan käyttää eri käsitekniikoita. Jopa yksittäinen hyppääjä saattaa käyttää eri käsitekniikkayhdistelmää saman kilpailun eri hypyissään. Kaksoiskäsitekniikan oletetaan lisäävän ponnistuksen voimaa, kun taas vuorokäsityöskentely säilyttäneen paremmin vaakanopeutta, mutta kumpaankaan väitteeseen ei ole olemassa tieteellistä näyttöä. Ponnistavan jalan aktii-

visen kuopaisuliikkeen ennen alastuloa ei ole havaittu korreloivan hyppytuloksen kanssa, mutta ennen hyppyvaihetta sen on havaittu olevan vähäisempää kuin muissa vaiheissa, ja huippuhyppääjät näyttäisivät käyttävän sitä tehokkaammin hyväkseen. (Hay 1992; Koh & Hay 1990.)

2.2 Kolmiloikan biomekaniikka

Kuvassa 2 on esitetty teoreettinen malli niistä biomekaanisista tekijöistä, jotka vaikuttavat lopulliseen viralliseen hyppytulokseen. Jokainen tekijä määräytyy täysin niistä alapuolisista tekijöistä, joihin se on yhteydessä. Kuvasta on jätetty pois loikkaan ja hyppyyn vaikuttavat tekijät, koska ne ovat samat kuin kinkan alla kuvatut. (Hay 1992.)



KUVA 2. Kolmiloikkasuorituksen lopputulokseen johtava deterministinen malli (Hay 1992).

Kolmiloikkatutkimuksessa tärkeimpiä mitattavia muuttujia ovat nopeuden muutokset

sekä vaaka- että pystysuunnissa, askelpituudet ja -frekvenssit lankulle tultaessa, vartalon ja sen eri osien asennot eri vaiheissa, painopisteen kulkurata, ponnistusten kontaktiajat, eri vaiheiden pituudet ja vaihesuhde sekä reaktiivoimat (von Gerich & Kyröläinen 1988). Heterogeenisellä hyppääjäjoukolla lähestymisnopeus lankulle korreloi voimakkaasti hypyn pituuden kanssa, mutta huippuhyppääjien ryhmässä korrelaatio on heikko. Tämä tarkoittaa, että vaikka hyvään tulokseen pääsemiseen tarvitaan riittävän hyvä nopeustaso, riippuu lopullinen tulos ennen kaikkea nopeuden hallitsemis- ja säilyttämiskyvystä ponnistusvaiheiden läpi. (Brüggemann & Arampatzis 1997; Moura ym. 2005; Kyröläinen ym. 2008.)

Vauhdinjuoksu. Kolmiloikkaajien vaakanopeus ennen lankkua on keskimäärin noin $0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ pienempi kuin pituushyppääjien, mutta ponnistuksen jälkeen tilanne on päinvastainen. Viimeisten askelten pituuserot ovat kolmiloikassa vähemmän korostuneet kuin pituushypyssä, mutta yleensä kuitenkin viimeinen askel on lyhin. Vauhti kiihtyy huippuhyppääjillä vielä toiseksi viimeiseltä askeleelta viimeiselle. Toiseksi viimeisen ja viimeisen vauhtiaskelen pituudet olivat Ateenan 1997 MM-kilpailujen finalisteilla $2,27 \pm 0,21 \text{ m}$ ja $2,24 \pm 0,18 \text{ m}$ naisten osalta sekä miehillä $2,39 \pm 0,20 \text{ m}$ ja $2,23 \pm 0,20 \text{ m}$. Berliinissä 2009 mitattiin selvästi suurempia eroja kahden viimeisen askeleen askelpituuksissa. Naisilla ne olivat $2,30 \pm 0,16 \text{ m}$ ja $2,22 \pm 0,11 \text{ m}$ sekä miehillä $2,58 \pm 0,19 \text{ m}$ ja $2,41 \pm 0,13 \text{ m}$. Taulukkoon 2 on koottu eri tutkimuksista mitatut lähestymisnopeudet huippuhyppääjillä. (Brüggemann & Arampatzis 1997; Hay & Miller 1986; Hommel 2009; Kyröläinen ym. 2008.)

TAULUKKO 2. Keskimääräiset lähestymisnopeudet painopisteen vaakanopeutena ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) viimeisen vauhtiaskelen ponnistusvaiheessa eri tutkimuksissa (Brüggemann & Arampatzis 1997; Kyröläinen ym. 2008; Hommel 2009).

Tutkimus	Naiset ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	Miehet ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
Brüggemann & Arampatzis 1997 (n = 8)	$9,31 \pm 0,18$	$10,47 \pm 0,15$
Hay & Miller 1985 (n = 4)		$10,14 \pm 0,59$
Hommel 2009 (n = 8)	$9,08 \pm 0,18$	$10,14 \pm 0,21$
Kyröläinen ym. 2008 (n = 8)	$9,30 \pm 0,18$	$10,20 \pm 0,20$
Miller & Hay 1986 (n = 4)		$10,26 \pm 0,21$

Brasilian mestaruuskilpailujen yhteydessä toteutetussa tutkimuksessa lähestymisnopeuden ja hyppytuloksen korrelaatiota päästiin tarkastelemaan hieman heterogeenisemmällä joukolla hyppääjiä. Hyppytulokset vaihtelivat välillä 14,29-17,05 m (keskiarvo $15,83 \pm 0,52$ m) ja lähestymisnopeudet välillä $8,62-10,42 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (keskiarvo $9,66 \pm 0,41 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$). Korrelaatio lähestymisnopeuden ja hyppytuloksen välillä oli kuitenkin vain 0,58 ($p < 0,02$) verrattuna pituushypyn vastaavaan 0,72 ($p < 0,0001$). Lisäksi yksilöiden välillä havaittiin suurta vaihtelua lähestymisnopeuden hyödyntämiskyvyssä. Osalla hyppääjistä korrelaatio lähestymisnopeuden ja hyppytuloksen välillä oli jopa negatiivinen. (Moura ym. 2005.)

Kontakti- ja lentoajat. Kontaktiajat pitenevät kolmiloikkasuorituksessa viimeisen vauhtiaskeleen kontaktista aina hypyn kontaktiin, mutta lentoajat noudattavat kinkan, loikan ja hypyn osalta kaavaa keskipitkä-lyhyt-pitkä, viimeisen vauhtiaskeleen lentoajan ollessa vielä selvästi näitä lyhyempi (taulukko 3). (Dyson 1978, 194; Fukashiro 1981; Hommel 2009; Kyröläinen ym. 2008; Miller & Hay 1986; Perttunen ym. 2000.) Kinkan, loikan ja hypyn kontaktiajat jakautuvat vaakareaktiovoiman suunnan mukaan vielä jarrutus- ja työntövaiheisiin. Jarrutusvaiheiden kestoiksi kokonaiskontaktiajasta on mitattu noin 61 %, 55 % ja 64 % (Perttunen ym. 2000).

TAULUKKO 3. Mitattuja kontakti- ja lentoaikoja (s) kolmiloikan eri vaiheissa (Dyson 1978; Fukashiro 1981; Hommel 2009; Kyröläinen ym. 2008; Miller & Hay 1986; Perttunen ym. 2000).

Vaihe	Kontaktiaika (s)	Lentoaika (s)
2. viimeinen askel	0,10	0,14
Viimeinen askel	0,11 - 0,13	0,11 - 0,13
Kinkka	0,11 - 0,14	0,52 - 0,56
Loikka	0,14 - 0,17	0,42 - 0,46
Hyppy	0,14 - 0,19	0,64 - 0,71

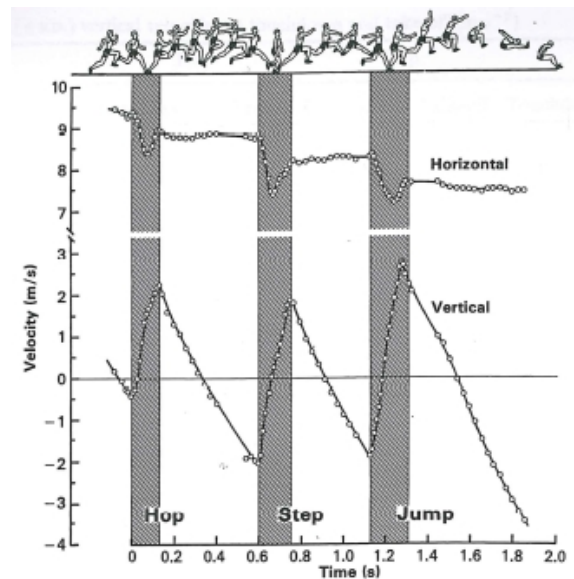
Nivelkulmat. Hyppääjien käyttämiä nivelkulmia ei ole juurikaan raportoitu, vaikka voidaankin olettaa, että lyhyen kontaktiajan ja suuren jalan jäykkyyden saavuttamiseksi polvi- ja lonkkakulmien koukistumisen minimointi on tarpeen erityisesti nopeushyppää-

jillä. (Brüggemann & Arampatzis 1997; Kyröläinen ym. 2008; Perttunen ym. 2000.) Berliinin MM-kisojen hyppääjiltä mitattiin kinkka- ja hyppykontaktien aikaisiksi minimipolvikulmiksi naisilla $139,0 \pm 4,4^\circ$ ja $131,8 \pm 3,7^\circ$ sekä miehillä hieman suuremmat polven koukistumiskulmat $131,6 \pm 7,4^\circ$ ja $126,6 \pm 4,7^\circ$ (Hommel 2009).

2.2.1 Painopisteen nopeuden muutokset ja ponnistuskulmat

Ideaalitilanteessa vaakanopeuden säilyttämiseksi hyppääjä tarvitsee matalan lähtökulman ja korkean alastulokulman, mutta koska nämä eivät ole käytännössä yhteensopivia, täytyy lähtö- ja alastulokulmien olla suunnilleen yhtä suuret, varsinkin kinkassa ja loikassa (Dyson 1978, 193). Eri tutkimuksissa on raportoitu hyppääjien keskimääräisiä alastulo- ja lähtökulmia, mutta niiden käyttöarvo jää vähäiseksi johtuen siitä, että tämä käsittely peittää yksilöiden välisten tekniikkaerojen vaikutukset. Kinkan alastulokulmaksi on mitattu noin -3 astetta, kun loikan ja hypyn alastulokulmat ovat noin -16 astetta. Eri vaiheiden lähtökulmat vaihtelevat miehillä välillä $12-18$, $11-16$ ja $18-26$ astetta. Naisilla loikan lähtökulma jää kuitenkin pienemmäksi $9-14$ asteeseen. (Hay 1992; Hommel 2009.)

Kuvassa 3 on esitetty hyppääjän painopisteen kokemat nopeuden muutokset ajan funktiona, ja siitä käy hyvin esille kuinka ponnistuskontaktien aikana tuotettu positiivinen pystynopeus on suoraan verrannollinen koettuun vaakanopeuden menetykseen. Periaatteessa sekä vaaka- että pystynopeuden kasvu lisäävät kappaleen lentämää matkaa, mutta kinkka- ja loikkavaiheiden aikana saavutettu pystynopeuden kasvu ei välttämättä lisää suorituksen kokonaispituutta, koska vastaava negatiivinen vaakanopeuden muutos vaikuttaa sekä meneillään olevan että sitä seuraavan vaiheen pituuteen. Tästä johtuen yksi kolmiloikkatekniikan keskeisistä ongelmista on selvittää yksilön optimaalinen työmäärän jakautuminen eri ponnistusvaiheiden välillä. (Fukashiro ym. 1981; Yu & Hay 1996.)



KUVA 3. Hyppääjän vaaka- ja pystynopeuden muutokset ajan funktiona 15,33 m kolmiloikkasuorituksessa (Fukashiro ym. 1981).

Yleensä vaakanopeus laskee vähiten kinkan kontaktissa, seuraavaksi eniten loikan kontaktissa ja eniten hypyn kontaktissa (Brüggemann & Arampatzis 1997; Fukashiro ym. 1981; Miller & Hay 1986). Jotkut hyppääjät kuitenkin kykenevät säilyttämään vaakanopeuden kinkan kontaktin aikana muuttumattomana, ja naishyppääjiltä on mitattu poikkeava nopeusmuutosten jakautuminen, jossa vaakanopeus pienenee vähiten loikan kontaktissa (Brüggemann & Arampatzis 1997; Miller & Hay 1986). Taulukossa 4 on esitetty hyppääjien vaakanopeuden muutokset jokaisessa ponnistuskontaktissa Ateenan 1997 MM-kilpailujen finalistien osalta. Ero nais- ja mieshyppääjien kokemassa vaakanopeuden muutoksessa on merkitsevä jokaisen kontaktin osalta ($p < 0,01$). Miesten kinkan, loikan ja hypyn työntövaiheen vaakanopeus oli $9,77 \pm 0,15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $8,61 \pm 0,27 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ja $7,02 \pm 0,33 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ sekä pystynopeus $2,40 \pm 0,16 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $1,95 \pm 0,22 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ja $2,79 \pm 0,26 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Vastaavasti naisilla vaakanopeudet olivat $8,40 \pm 0,23 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $7,58 \pm 0,27 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ja $6,46 \pm 0,29 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ sekä pystynopeudet $2,32 \pm 0,25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $1,52 \pm 0,27 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ja $2,53 \pm 0,13 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. (Brüggemann & Arampatzis 1997.) Alastulovaiheen pystynopeuksia on raportoitu huomattavasti vähemmän, vaikka niiden merkitys on suuri mm. hyppääjään kohdistuvien reaktiivoimien suuruuden kannalta. Kinkan kontaktin alastulon pystynopeudeksi on mitattu $-0,74 \pm 0,31 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, loikan $-2,76 \pm 0,19 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ja hypyn $-2,46 \pm 0,25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. (Hay & Miller 1985.)

TAULUKKO 4. Painopisteen vaakanopeuden muutokset ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) miesten ja naisten finaalisissa Ateenan 1997 MM-kilpailuissa. Pienimmät arvot lihavoitu (Brüggemann & Arampatzis 1997).

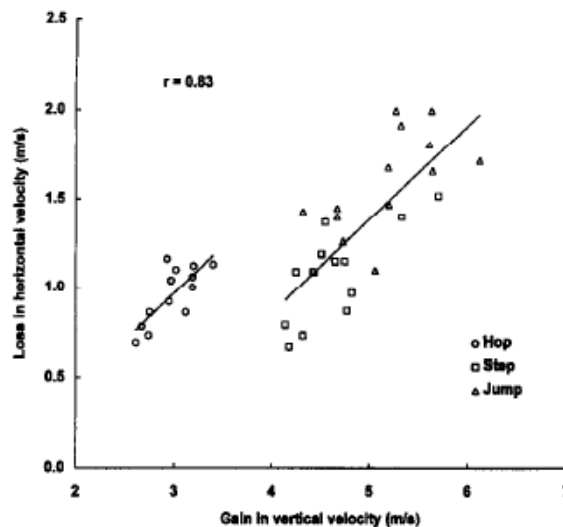
Sijoitus	Kinkka		Loikka		Hyppy	
	naiset	miehet	naiset	miehet	naiset	miehet
1	-0,91	-0,93	-0,58	-1,11	-0,92	-1,28
2	-0,82	-0,62	-0,92	-1,06	-1,20	-1,42
3	-1,00	-0,74	-0,72	-1,38	-1,35	-1,66
4	-0,89	-0,63	-0,75	-0,85	-1,11	-1,70
5	-0,86	-0,91	-0,94	-1,40	-1,22	-1,49
6	-0,98	-0,75	-0,73	-1,29	-1,12	-1,50
7	-1,04	-0,62	-0,64	-1,10	-1,03	-1,52
8	-0,84	-0,76	-1,22	-1,04	-1,05	-2,17
keskiarvo	-0,92	-0,71	-0,81	-1,15	-1,13	-1,59
keskihajonta	0,08	0,10	0,21	0,19	0,13	0,27

Vaakanopeuden muutokset Edwardsin maailmanennätyshypyissä olivat $0,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $-1,06 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ja $-0,80 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, eli hän kykeni säilyttämään vaakanopeuden huomattavasti paremmin kuin Ateenan kilpailussa hypänneet (Thorsson ym. 1996). Vastaavat vaakanopeuden muutokset miehillä Berliinissä 2009 olivat $-0,76 \pm 0,15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $-1,08 \pm 0,11 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ja $-1,31 \pm 0,22 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ja naisilla $-0,73 \pm 0,09 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $-0,70 \pm 0,17 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ja $-1,25 \pm 0,18 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Naisten selvästi pienempi nopeuden hidastuminen loikan kontaktissa selittyy heidän käyttämällään matalammalla ponnistuskulmalla. (Hommel 2009).

Ilmanvastuksen vaikutuksia kolmiloikkasuoritukseen ei ole tutkittu, mutta voitaisiin olettaa, että pienemmästä ilmanvastuksesta (myötätuuli tai muut tekijät) olisi hyötyä hypyn pituuteen joko mahdollistamalla suuremman lähestymisnopeuden tai auttamalla hyppääjää saavuttamaan optimaalisen lähestymisnopeutensa helpommin ja saapumaan näin ponnistuksiin paremmassa asennossa, jolloin vaakanopeuden menetykset jäisivät pienemmiksi. (Hay 1992.)

2.2.2 Optimaalinen vaihesuhde

Jokaiselle kolmiloikkaajalle voidaan löytää yksilöllinen lineaarinen suhde kontaktin aikaisen vaaka- (Δv_x) ja pystynopeuden (Δv_z) muutosten välillä, joka ilmaisee siis pystynopeuden kasvua vastaavan vaakanopeuden laskun määrän (kuva 4). Regressioanalyysillä voidaan tästä laskea muunnoskerroin A_1 , joka kuvaa yksilön kykyä muuntaa vaakanopeutta pystynopeudeksi eri kontakteissa, ja tämä suhde näyttäisi olevan ratkaiseva tekijä hyppääjän optimaalisen vaihesuhteen määrittämiseksi. (Yu 1999; Yu & Hay 1996.)



KUVA 4. Δv_x :n ja Δv_z :n suhde kolmiloikan eri tukivaiheiden aikana (Yu & Hay 1996).

Δv_x :n ja Δv_z :n välillä vallitseva suhde tukivaiheen aikana on tulosta kineettisen energian konversiosta vaakasuuntaisesta pystysuuntaiseksi. Urheilijan ponnistushetken pystysuuntaisella kineettisellä energialla on kaksi lähdettä: (a) urheilijan mekaaninen energia alastulohetkellä ja (b) kemiallinen energia, joka vapautuu tukivaiheen aikaisissa lihassupistuksissa. Vaakasuuntainen kineettinen energia muodostaa valtaosan urheilijan mekaanisesta energiasta tukivaiheen alastulohetkellä. Osa tästä energiasta varastoituu tukijalan lihaksiin ja jänteisiin eksentristen lihassupistusten välityksellä jarrutusvaiheen aikana ja vapautuu sitten pystysuuntaisesti samojen lihasten konsentrisen supistuksen välityksellä työntövaiheen aikana. Vaakasuuntaista kineettistä energiaa voidaan muuntaa pystysuuntaiseksi myös käsien ja vapaan jalan heilahdusliikkeen avulla. Näiden yhteenlaskettu vaikutus voi olla jopa 19 % vaakanopeuden menetyksestä ja 12 % painopisteen pystynopeuden kasvusta kolmiloikan kolmen tukivaiheen aikana. (Yu 1999.)

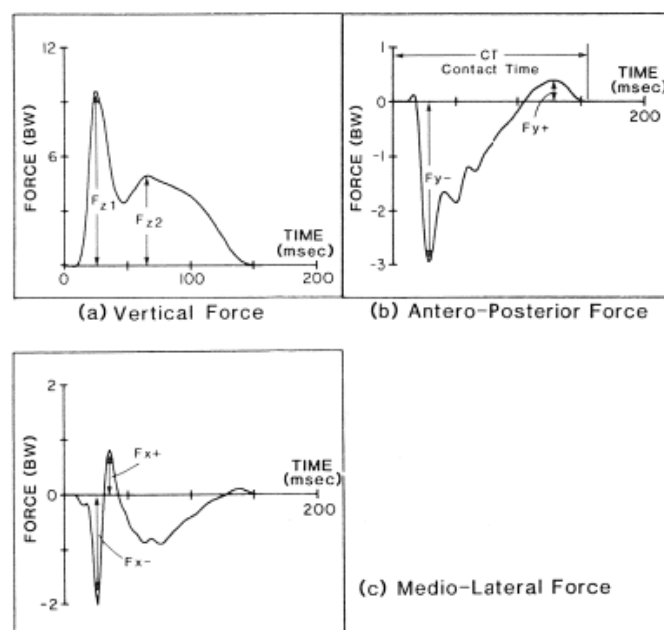
Tutkimuksissa saatujen optimointitulosten trendi on se, että hyppypainotteiset tekniikat ovat optimaalisia urheilijoille, joilla on suuri A_1 ($A_1 > 0,6$) ja kinkkapainotteiset tai tasapainoiset tekniikat ovat yleensä optimaalisia urheilijoille, joilla on matala A_1 ($A_1 < 0,6$). Toinen trendi oli se, että korkean A_1 :n urheilijat hyppäsivät pidemmälle. Vertaamalla saatuja tuloksia aiempiin pituushypyillä saatuihin tuloksiin, voidaan päätellä, että mitä pienempi A_1 , sitä tehokkaampi on kineettisen energian muunnos vaakasuuntaisesta pystysuuntaiseksi. Pitää kuitenkin muistaa, että A_1 ei ole välttämättä vakio tietyllä urheilijalla, vaan siihen voivat vaikuttaa (a) urheilijan fyysinen kunto ja (b) kehon segmenttien liike (eli tekniikka) jokaisen tukivaiheen aikana. Fyysisistä ominaisuuksista maksimaalinen lihasten supistumisnopeus tai maksimaalinen voimantuottokyky voivat vaikuttaa A_1 :n suuruuteen, koska ne vaikuttavat lihaksen voima-nopeus-suhteeseen ja tehokkuuteen elastisen energian muunnoksessa kineettiseksi energiaksi. A_1 voi myös olla jalan jäykkyyden funktio. Mikäli A_1 :n suuruus riippuu jostakin teknisestä muuttujasta, niin matala A_1 liittyy luultavasti pitkään alastulopituuteen ja suhteellisen vähäiseen polven fleksioon ponnistuksessa (pituushyppääjätyyppi) ja päinvastoin (kolmiloikkaajatyypin). Tämä tarkoittaa sitä, että parhaan tuloksen savuttamiseksi varsinkin kinkan ja loikan alastulojen pitäisi olla mahdollisimman juoksunomaisia kun taas hyppy on enemmän pituushyppynomainen. (Yu 1999; Yu & Hay 1996.)

2.2.3 Reaktivoimat ja jalkapohjien kuormittuminen

Törmäysvoiman eli passiivisen voiman huippuarvo saavutetaan ponnistuskontakteissa 50 ms sisällä kontaktin alusta. Koska nämä voimat voivat kolmiloikassa nousta hyvin suuressa määrässä, on niiden optimoinnilla suorituskyvyn lisäksi merkitystä loukkaantumisten ehkäisemisessä. Törmäysvoimia lisääviä tekijöitä ovat mm. kasvava alastulonopeus ja polvikulma. Päkiä-kantapää-alastulo vähentää törmäysvoimia verrattuna tasajalkaa tai kantapää edellä tulevaan alastuloon. (Dufek & Bates 1990.)

Kolmiloikassa hyppääjän alaraajaan kohdistuvat reaktivoimat ovat paljon suuremmat kuin on mitattu missään muussa tahdonalaisessa liikkeessä, vaikka saatavissa oleva data todennäköisesti jopa aliarvioi huippuhyppääjään kohdistuvia voimia (Hay 1993). Ramey ja Williams (1985) käyttivät yhtä voimalevyä (Kistler Model 9821A, keräystaajuus

500 Hz) kerätessään kolmiloikkasuorituksen eri vaiheiden kolmiulotteisia reaktiovoimia, ja tämän vuoksi yhden kokonaishypyn datan keräämiseksi jouduttiin suorittamaan kolme erillistä hyppyä. Harrastajatason hyppääjiin kohdistuneet maksimaaliset pystyvoimat vaihtelivat välillä 7-12 kertaa kehon paino (BW), maksimaalisten vaakavoimien jäädessä 3 BW suuruusluokkaan. Pystyvoimissa havaittiin kaksi erillistä huippua (kuva 5), joista ensimmäinen oli erittäin suuri saavuttaen suurimman arvonsa loikan kontaktissa, ja toisen huipun arvo laski asteittain kinkan kontaktista hypyn kontaktiin. Toisen pystyvoimahuipun arvot vaihtelivat välillä 3,3-5 BW. Vaakavoimissa ei havaittu järjestelmällisiä eroja eri ponnistusvaiheiden välillä, mutta voimakäyrissä oli havaittavissa useampia huippuja kuin pystyvoimissa. Nettoimpulsseista määritetyt vaak- ja pystynopeuden muutokset vastasivat suuruusluokaltaan aikaisemmissa tutkimuksissa saatuja arvoja. Tutkijat havaitsivat myös suurta yksilöiden välistä vaihtelua reaktiovoimien suuruuksissa sekä ajoituksissa, ja koska nämä erot eivät tule esille tyypillisessä ryhmäkeskiarvojen tarkasteluissa, voi yksilöllisen optimiteknikan määrittämiseksi olla tärkeämpää tarkastella dataa pitkittäistutkimuksen muodossa. (Ramey & Williams 1985.)



KUVA 5. Tyypilliset reaktiovoimakäyrät: (a) pystyvoima, (b) vaakavoima (etu-takasuunnassa) ja (c) poikittaisvoima (Ramey & Williams 1985).

Jyväskylän yliopiston liikuntabiologian laitoksella suoritetussa tutkimuksessa päästiin käyttämään 13 metriä pitkää voimalevyjonoa (keräystaajuus 1 kHz) mittaamaan suoraan

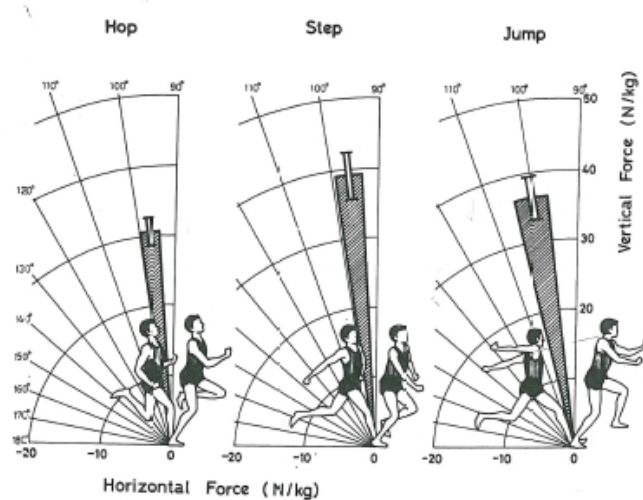
kokonaisten kolmiloikkasuoritusten reaktivoimia. Tutkimukseen osallistui neljä kansallisen tason mieshyppääjää (ikä 24 ± 2 vuotta, pituus 185 ± 4 cm, paino $76,7 \pm 3,8$ kg, ennätys $15,75 \pm 0,82$ m) ja kolme naishyppääjää (ikä 23 ± 3 vuotta, pituus 172 ± 2 cm, paino $63,6 \pm 4,9$ kg, ennätys $13,25 \pm 0,11$ m). Jalkapohjiin kohdistuvaa painetta mitattiin piikkareihin asennetuilla pohjallisilla (Paromed-System, keräystaajuus 200 Hz), joiden signaalit kerättiin hyppääjän vyötärölle kiinnitetyllä laitteistolla. Kontaktiajat jaettiin jarrutus- ja työntövaiheisiin vaakasuuntaisen reaktivoiman suunnan mukaisesti. Maksimi- ja keskiarvovoimat analysoitiin molemmissa suunnissa ja näistä laskettiin myös resultanttivoimat ja niiden suunnat. Jokaiselta hyppääjältä laskettiin jokaiselle kontaktille signaalien keskiarvo. Mieshyppääjien paras tulos tutkimuksessa oli $14,32 \pm 0,45$ m ($13,68$ - $15,24$ m) ja naishyppääjien $11,90 \pm 0,28$ m ($11,37$ - $12,39$ m). Pysty- (F_z) ja vaakasuuntainen (F_x) reaktivoima olivat suurimmat loikan tukivaiheessa, ja jarrutusvoimat olivat jokaisessa kontaktissa suurempia kuin työntövoimat. Jarrutusvaiheiden maksimaaliset pysty- ja vaakasuuntaiset reaktivoimat sekä resultanttivoimien suunnat löytyvät alta (taulukko 5). (Perttunen ym. 2000.)

TAULUKKO 5. Maksimaalinen pysty- ja vaakavoima jarrutusvaiheessa (BW) ja keskimääräisen resultanttivoiman kulma ($^\circ$) (Perttunen ym. 2000).

	Kinkka	Loikka	Hyppy
Max F_z (BW)	$11,3 \pm 3,6$	$15,2 \pm 3,3$	$12,9 \pm 3,1$
Max F_x (BW)	$4,8 \pm 1,4$	$7,0 \pm 3,9$	$6,2 \pm 1,1$
Jarrutuskulma ($^\circ$)	$67,7 \pm 2,1$	$71,0 \pm 5,4$	$69,5 \pm 3,3$
Työntökulma ($^\circ$)	$76,1 \pm 3,0$	$74,9 \pm 1,3$	$78,6 \pm 3,3$

Kinkan, loikan ja hypyn voimakäyrät keskiarvoistettiin, jotta voitiin arvioida lopulliseen tulokseen vaikuttavia tekijöitä. Maksimaalinen pystyvoima jarrutusvaiheessa sekä maksimaalinen vaakavoima työntövaiheessa olivat parhaat reaktivoimat ennustamaan hypyn pituutta ($58,9$ % ja $27,1$ %). Korkein jalkapohjiin kohdistunut paine mitattiin kanta-pään sekä päkiän alueilta (kanta-pään osalta paine ylitti välillä käytettyjen antureiden mittausalueen), ja alueet kuormittuivat kolmiloikkaajilla yhtäaikaaisesti. Paineen huippuarvo jalkaterän lateraalisen etuosan alla eri kontaktivaiheissa korreloi voimakkaasti hypyn kokonaispituuden kanssa ($r = 0,71$, $r = 0,87$ ja $r = 0,90$). (Perttunen ym. 2000.)

Fukashiro ym. (1981) määrittivät kontaktien aikaiset keskimääräiset reaktivoimat epä-suorasti liikeanalyysin perusteella. Ponnistuksen aikana tuotettu keskimääräinen pysty- ja vaakavoima laskettiin kontaktin aikaisen pysty- ja vaakanopeuden muutoksen sekä kontaktiajan avulla. Keskimääräisen resultanttivoiman suunta oli lähempänä 90 astetta kinkan ja loikan kontakteissa verrattuna hypyn kontaktiin (kuva 6). Resultanttivoima oli suurin loikan kontaktissa (4 BW), toiseksi suurin hypyn kontaktissa (3,8 BW) ja pienin kinkan kontaktissa. (Fukashiro ym. 1981.) 18 metrin kolmiloikkaajan on arvioitu joutuvan tuottamaan jokaisen ponnistuskontaktin aikana 3,6-4,4 BW keskimääräisiä resultanttivoimia, joiden kulma on noin 101 astetta (Fukashiro & Miyashita 1983).



KUVA 6. Jokaisen ponnistuskontaktin keskimääräisen resultanttivoiman vektori $14,45 \pm 0,46$ m hypyissä (Fukashiro ym. 1981).

2.2.4 Lihasaktiivisuudet ja ponnistavan jalan jäykkyys

Kolmiloikkaajan on ponnistuskontaktien aikana kyettävä vastaanottamaan erittäin suuria törmäysvoimia sekä vaakanopeuden säilyttämiseksi minimoitava kontaktiajat. Tämä vaatii suurta lihasten esiaktiivisuutta, jotta jarrutusvaiheen aikainen lihasaktiivisuus saataisiin ajoitettua oikein ja nostettua riittävälle tasolle. Tämä taas mahdollistaa tehokkaan elastisen energian hyödyntämisen sekä suuren jalan jäykkyyden jarrutusvaiheessa, mikä voi johtaa parempaan vaakanopeuden säilymiseen kolmiloikan eri vaiheiden läpi. (Brüggemann & Arampatzis 1997; Kyröläinen ym. 2008; Perttunen ym. 2000.) Elektromyografisten analyysien perusteella tärkeimmät lihasryhmät jarrutusvaiheessa ovat reiden ja säären etuosan lihakset, ja työntövaiheessa pohkeen, reiden takaosan, pakaran

ja selän lihakset saavat aikaan, lähinnä lonkan ojentumisen kautta, aktiivisen ponnistuksen (Hay 1991). Lihasaktiivisuus etureiden lihaksessa (m. vastus lateralis) on suurimmillaan jarrutusvaiheessa. Lisäksi loikassa sekä hyppyssä esiaktiivisuus on merkitsevästi suurempaa kuin työntövaiheen aktiivisuus. Pohkeen (m. gastrocnemius) esiaktiivisuuden ja kolmiloikkatuloksen väliltä on löytynyt voimakas korrelaatio $r = 0,83$ ($p < .01$). (Perttunen ym. 2000.)

Ponnistavan jalan tuottama voima kontaktin aikana voidaan ilmaista sen jäykkyyden ja pituuden muutoksen tulona. Jarrutusvaiheessa jalka lyhenee eli nivelet antavat periksi jäykkyyden ollessa suuri (suuri passiivinen voimahuippu) ja ponnistusvaiheessa jalka pitenee eli nivelet ojentuvat jäykkyyden pudotessa ja säilyessä matalana kontaktin loppuun (matala aktiivinen voimahuippu). Koska mm. ponnistukseen tulokulma vaihtelee riippuen hyppääjän juoksunopeudesta, ei ole mahdollista määrittellä yhtä optimaalista jäykkyyttä kaikille hyppääjille. Lisäksi kolmiloikan jokaiseen ponnistukseen tulo sekä itse ponnistuksen tavoite ovat erityyppisiä, toisin kuin pituushyppässä, jolloin on mahdoton määrittää yhtä optimaalista voimantuottotapaa. Voidaan kuitenkin olettaa, että on olemassa jokin minimijäykkyys, joka täytyy saavuttaa tietyllä alastulokulmalla, ja että sama hyppytuloksia voidaan saavuttaa monella eri tekniikalla. Kolmiloikasta ei ollut kirjotushetkellä saatavilla mitattuja arvoja jalan jäykkyydestä, mutta pituushyppässä on arvoksi saatu $14,2 \pm 3,8 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$. (Seyfarth ym. 1999.) Joissakin tutkimuksissa mitattu polvikulma vaikuttaa yhtenä tekijänä koko jalan jäykkyyteen ponnistuksessa. Kinkan tukivaiheessa polvikulma on alimmillaan $130\text{-}140^\circ$, loikan ponnistuksessa $125\text{-}142^\circ$ ja hypyn ponnistuksessa $115\text{-}140^\circ$. Suurin vaihtelu näyttäisi olevan siis loikan ja hypyn ponnistusten aikaisessa polvikulmassa, ja huippuhyppääjien on yleensä havaittu käyttävän suurempaa polvikulmaa. (von Gerich & Kyröläinen 1988; Hay 1991.)

3 TUTKIMUSONGELMAT JA HYPOTEESIT

Tutkimuksen tarkoituksena oli kartoittaa sovellutuksena testipatteristoa valmennukseen.

Tutkimusongelmat:

1. Miten vaakanopeuden muutokset tukivaiheiden aikana vaikuttavat suorituksen kokonaispituuteen?
2. Mikä nopeusmuutosten jakauma tuottaa pisimmän tuloksen yksittäiselle urheilijalle (vrt. optimaalinen vaihesuhde)?
3. Miten käytetyn vauhdin pituus vaikuttaa kontaktien aikaiseen nopeuden hidastumiseen?
4. Miten reaktiivoimat käyttäytyvät suhteessa hypyn pituuteen ja nopeuden hidastumiseen kontaktien aikana?

Hypoteesit:

1. Paremmat hyppääjät menettävät vähemmän vaakanopeuttaan kontaktien aikana ja vastaavasti saman hyppääjän vaakanopeuden lasku on vähäisempää pidemmissä hyppyissä.
2. Voimahyppääjä saavuttaa parhaan tuloksen painottamalla kinkan pituutta ja menettää näin siinä eniten nopeuttaan. Nopeushyppääjä saavuttaa parhaimman tuloksen jakamalla nopeuden hidastumisen tasaisemmin eri kontaktien välille.
3. Jokaisella hyppääjällä on löydettävissä optimaalinen lähestymisnopeus, jota hitaammilla tai suuremmilla nopeuksilla kontaktien aikaiset nopeuden hidastumiset kasvavat.
4. Maksimaalinen pystyvoima jarrutusvaiheessa ja maksimaalinen vaakavoima työntövaiheessa kasvavat suhteessa hypyn pituuteen. Jarrutusvaiheen reaktiivoiman suuri kulma ja työntövaiheen matala kulma korreloivat negatiivisesti kontaktin aikaisen nopeuden hidastumisen kanssa.

4 MENETELMÄT

Koehenkilöinä toimi kolme kansallisen tason mieshyppääjää, joiden tiedot on koottu taulukkoon 6. Kaksi hyppääjistä osallistui mittauksiin kahtena eri mittauspäivänä, mutta kolmas ei sairastumisen vuoksi ollut mukana ensimmäisellä kerralla. Ensimmäinen koehenkilö hyppäsi ponnistaen lankulta vasemmalla jalalla (V-V-O) ja kaksi muuta oikealla (O-O-V). Koehenkilöiden käyttämistä käsitekniikoista löytyi kaksi variaatiota. Kaksi ensimmäistä ponnistivat kinkan vuorokäsitekniikalla (V) ja loput ponnistukset kaksoiskäsitekniikalla (K), kun kolmas käytti kaksoiskäsitekniikkaa kaikissa ponnistuksissa.

TAULUKKO 6. Koehenkilöiden tiedot: ikä (v), pituus (cm), paino (kg), ulkorataennätys (m), halliennätys (m), maksimaalinen juoksunopeus ($m \cdot s^{-1}$) laskettuna lentävän 10/20 m ennätyksestä, ponnistava jalka ja käsitekniikka. Alle on laskettu keskiarvo (\bar{x}) sekä keskihajonta (sd).

koehlö	ikä	pituus	paino	ennätys	halliennätys	nopeus	ponnistus	käsitekniikka
AT	22	185	74	15,97	15,70	10,42	V-V-O	V-K-K
AI	22	191	73	15,45	15,06	10,10	O-O-V	V-K-K
JS	18	193	81	14,99	14,57	9,43	O-O-V	K-K-K
\bar{x}	20,7	189,7	76	15,47	15,11	9,98		
sd	2,3	4,2	4	0,49	0,57	0,51		

4.1 Tutkimusasetelma

Mittausten ensimmäinen osa suoritettiin sisähallissa tammikuun 2009 loppupuolella ja toinen osa kesäkuun alussa. Toinen mittauspäivä jouduttiin järjestämään teknisten ongelmien ja yhden koehenkilön sairastumisen vuoksi. Lisäksi vauhdinjuoksunopeuksia mitattiin kilpailutilanteessa Kalevan kisojen loppukilpailuun selvinneiltä Espoon Leppävaaran stadionilla elokuun alussa. Koehenkilöille selvitettiin ensin mittauksen kulku, ja he allekirjoittivat kirjallisen suostumuksen, minkä jälkeen mitattiin henkilöiden pituus sekä paino sekä kyseltiin harjoitustilanteessa tehtyjen nopeustestien tulokset maksimaalisen juoksunopeuden laskemiseksi. Hyppääjien ennätykset haettiin Tilastopajan tietokannasta (Tilastopaja 2009).

Ennen varsinaisten mittausten alkua koehenkilöt saivat suorittaa omatoimisen verryttelyn sisältäen mm. hölkkää, avausvetoja sekä loikkia oman valinnan mukaisesti. Verryttelyn yhteydessä suoritettiin myös kevennyshyppy- ja reaktiivisuushyppelytestit voimalevyllä. Tämän jälkeen hyppääjät suorittivat vuorotellen kolmiloikkasuorituksia valitsemastaan vauhdista. Ensimmäisellä mittauskerralla hyppyjä suoritettiin kahdesta eri vauhdista (lyhyt ja pitkä), joista lyhyt vauhti oli lentävän kuuden askeleen vauhti ja pitkä oman valinnan mukaan lentävä 10-12 askelta. Toisella mittauskerralla kaikki hypyt suoritettiin lentävän 10-12 askeleen vauhdilla. Hyppääjä sai itse päättää suoritettavien hyppyjen määrän, mutta tavoitteeksi asetettiin vähintään kuusi onnistunutta kokonais-suoritusta. Palautusaikoja hyppyjen välillä ei mitattu, mutta ohjeistuksena oli täydellinen palautuminen suoritusten välillä. Liitteessä 1 on esitetty kaaviokuva hyppypaikan voimalevyjonosta.

4.2 Mittaukset

Juoksunopeus. Vauhdinjuoksun nopeuden mittaamiseen käytettiin lasermittausjärjestelmää (LAVEG Sport, Jenoptik, Jena, Saksa), jonka mittaama etäisyysdata kerättiin kannettavalle tietokoneelle valmistajan omalla ohjelmistolla 50 Hz keräystaajuudella. Laite sijoitettiin vauhdinjuoksuradan päähän noin 40 metrin etäisyydelle ponnistuspaikasta ja noin 1,2 metrin korkeudelle (kuva 7). Ennen varsinaisten mittausten aloittamista järjestelmään asetettiin sopivat markkerit osoittamaan hyppääjän sijaintia mittaamalla ensin etäisyys ponnistuspaikkaan (ensimmäinen markkeri). Muiden markkerien paikat saatiin vähentämällä tästä etäisyydestä halutut välimatkat (1, 3 ja 10 m). Hyppyjen aikana lasersäde pyrittiin tähtäämään laitteen kiikaritähäimen avulla hyppääjän alaselkään, ja säilyttämään se tässä pisteessä mahdollisimman tarkasti ponnistushetkeen asti.

Juoksunopeutta kontrolloitiin mittausten aikana lisäksi valokennolaitteiston (Newtest Oy) avulla. Valokennot oli pyritty asettamaan hyppääjän kaulan korkeudelle parhaan mittaustarkkuuden saavuttamiseksi, mutta pidemmällä hyppääjillä korkeus osui välillä myös hartiatasoon haitaten mittaustarkkuutta. Juoksuaika saatiin suoraan kellon näytöltä tuhannesosasekunnin tarkkuudella. Kennot sijaitsivat yhden ja kolmen metrin etäisyydellä ponnistuspaikasta, jolloin saadun nopeuden pitäisi kuvastaa keskimääräistä lähes-

tymisnopeutta viimeisen askeleen aikana.



KUVA 7. LAVEG-mittauslaitteiston sijainti hyppääjän takana vauhdinottoradan päässä.

Askel- ja vaihepituudet. Kahden viimeisen vauhtiaskeleen ja hyppysuorituksen osapituudet mitattiin käyttämällä apuna radan pintaan levitettyä paperia. Piikkareiden paperiin jättämien jälkien perusteella pituudet mitattiin normaalisti mittanauhalla. Kaikki hyppy mitattiin tarkasta ponnistuskohdasta, eli ei kuten normaalisti kilpailussa lankun ja vahan rajalta, joten vauhdinjuoksun tarkkuus ei vaikuttanut hypyn tulokseen samassa määrin kuin kilpailutilanteessa.

Reaktiivoimat. Suorituksista kerättiin pysty-, vaaka- ja poikittaissuuntaiset reaktiivoimat kinkan ja hypyn osalta, mutta loikkakontaktista ei pystytty mittaamaan poikittaisvoimaa. Mittaaminen tapahtui yhden erillisen kolmiloikkalankun alle asennetun 0,6 m x 1,0 m voimalevyn (Kistler, Sveitsi, ominaisvärähtelytaajuus ≥ 400 Hz) ja 7,2 m x 0,9 m kokoisen sarjaankytketyn voimalevyjonon avulla (ks. liite 1), jonka päällä oli Tartanpinnoite (TR-test, Suomi, ominaisvärähtelytaajuus ≥ 170 Hz). Kolmiloikkalankku sijaitsi ensimmäisenä mittauspäivänä teknisistä syistä 13,7 m etäisyydellä hiekkakasan reunasta

ja toisena mittauspäivänä turvallisemmalla 12,7 m etäisyydellä. Voimasignaalit kerättiin tietokoneelle CED Signal -ohjelmalla (versio 3.08) näytteenottotaajuudella 1000 Hz, jolla ne myös myöhemmin analysoitiin.

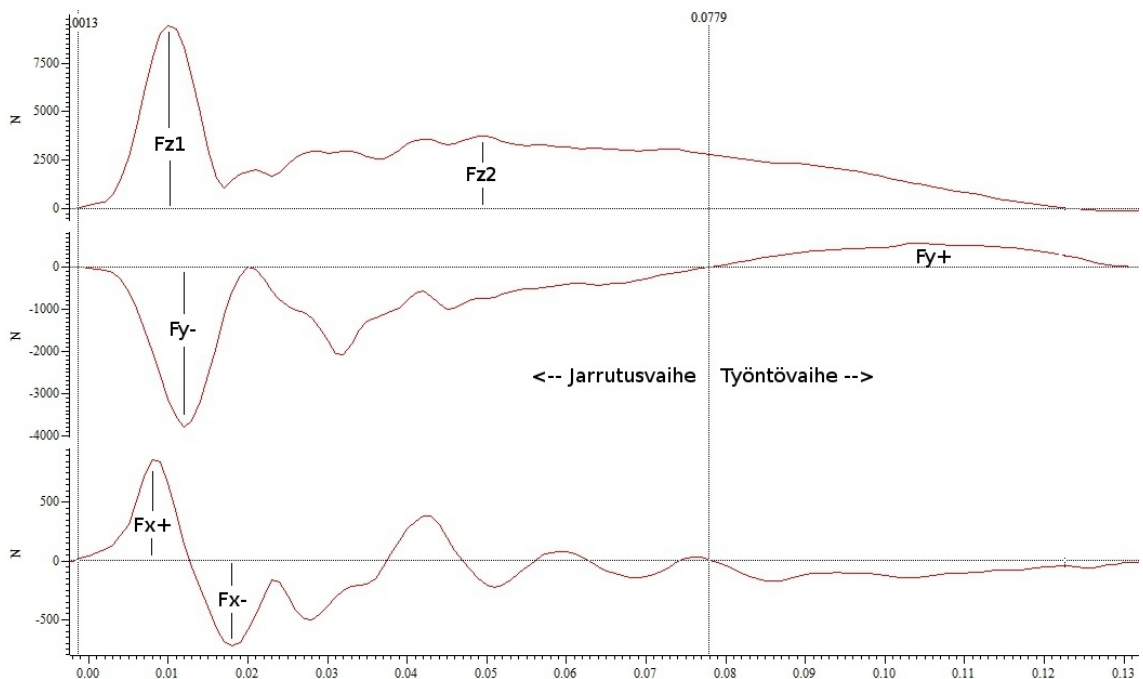
Video. Hyppyt kuvattiin hyppääjän oikealta puolelta high-speed videokameralla (Sony Handycam HDR-HC3E), jonka kuvanopeus oli 200 kuvaa·s⁻¹. Kamera oli asetettu noin kahdeksan metrin kohdalle ponnistuskohdasta hiekkakasan suuntaan, noin 13 metrin etäisyydelle hyppytasosta ja optisen akselin korkeus maan pinnasta mitattuna oli 99 cm. Kameralla seurattiin hyppääjää koko suorituksen ajan, ja kuvaus lopetettiin hyppääjän alastuloon hiekkakasaan. Kamera tallensi nauhalle tätä hetkeä edeltävät kolme sekuntia, jolloin suorituksesta saatiin talteen myös 1-3 viimeistä vauhtiaskelta. Videomateriaalia käytettiin vain kontrolloimaan hyppääjien käyttämää tekniikkaa, eikä liikeanalyysiä suoritettu.

4.3 Analyysit

Urheilijoiden kevennyshyppytulokset ja reaktiivisuus laskettiin reaktiivoimadatasta kirjallisuudesta löytyvillä laskukaavoilla (Keskinen, Häkkinen & Kallinen 2004). Vähäisen koehenkilömäärän vuoksi reaktiivoima-analyysit suoritettiin keskiarvoistamalla kaikkien hyppääjien kontaktit kinkan, loikan ja hypyn osalta. Analyysiin hyväksyttiin kaikki ne suoritukset, joissa kyseisen kontaktin reaktiivoimamittaus oli onnistunut eikä hypy keskeytetty (ns. läpijuoksu) ennen kontaktin silmämääräisesti maksimaalista läpiviemistä. Näin analyysiin otettujen suoritusten lukumäärät kaikilta koehenkilöiltä yhteensä olivat eri vaiheiden osalta 6, 10 ja 9 kesäkuun mittauspäivänä. Arvioitaessa eri voimamuuttujien merkitsevyyttä sitä seuraavan vaiheen pituuteen jouduttiin näistäkin vielä jättämään pois kaksi suoritusta sekä loikan että hypyn osalta, koska koehenkilön jalkaterä ei osunut sivuttaissuuntaisen liikkeen vuoksi mittauspaperin päälle. Tammi-kuun mittauspäivänä lyhytvauhtisissa hypyissä analysoitaviksi valitut kontaktien määrät olivat 3, 3 ja 3. Tammikuun pitkävauhtisten hypyjen kontakteja saatiin talteen vain 0, 2 ja 2. Suurta yliastuttujen ja keskeytettyjen hypyjen määrää selittää osaltaan tammikuussa lankun normaalia suurempi etäisyys hiekkakasasta, mutta valitettavasti myös

kesäkuun mittauksissa yhdeltä koehenkilöltä jäivät kaikkien kinkan kontaktien reaktiovoimat mittaamatta yliastumisten vuoksi.

Reaktiovoimadatasta (kuva 8) määritettiin eri vaiheiden lentoajat (vain kikka ja loikka), kontaktiajat, jarrutusajat, työntöajat, pystyvoiman ensimmäinen maksimi, pystyvoiman toinen maksimi, keskimääräinen pystyvoima (koko kontaktin, jarrutusvaiheen ja työntövaiheen osalta), pystysuuntainen nettoimpulssi, vaakavoiman maksimi- ja minimiarvot, keskimääräinen vaakavoima jarrutus- ja työntövaiheissa, vaakasuuntainen nettoimpulssi, poikittaisvoiman maksimi- ja minimiarvot, poikittainen nettoimpulssi, keskimääräinen resultanttivoima koko kontaktille sekä jarrutus- ja työntövaiheissa sekä jarrutus- ja työntökulma. Kontaktin alkamis- ja loppumispiste määritettiin pystyvoimasta ja voima-arvot suhteutettiin hyppääjän painoon. Kontaktin aikainen vaakanopeuden hidastuminen laskettiin jakamalla pitkittäinen nettoimpulssi hyppääjän massalla liikemäärän säilymislain mukaisesti $\Delta v = \Delta p / m$, missä $\Delta p = I$ ($v =$ nopeus, $p =$ liikemäärä, $I =$ impulssi).



KUVA 8. Esimerkkikuvaajat kinkan 3D-reaktiovoimista ja niistä määritetyistä muuttujista: pystyvoiman ensimmäinen maksimi (Fz1), pystyvoiman toinen maksimi (Fz2), vaakavoima minimi (Fy-), vaakavoiman maksimi (Fy+), poikittaisvoiman maksimi (Fx+) ja poikittaisvoiman minimi (Fx-) sekä jako jarrutus- ja työntövaiheisiin. Fx:n positiivinen suunta on tässä hyppääjästä vasemmalle.

Kahden viimeisen vauhtiaskeleen pituuksista laskettiin prosentuaalinen askeleen lyhenys ennen ponnistusta. Vaihepituuksien ja hypyn kokonaispituuden avulla laskettiin myös eri vaiheiden prosentuaaliset osuudet. LAVEG-järjestelmän keräämä raakadata suodatettiin 7-pisteen jatkuvana keskiarvona järjestelmän omalla ohjelmistolla, jonka jälkeen datasta poimittiin hetkelliset nopeudet markkereiden kohdilta (0, 1 ja 10 m ponnistuskohdasta) sekä laskettiin keskimääräinen nopeus välillä 6-1 ja 3-1 metriä ennen ponnistuskohtaa datasta poimittujen etäisyys-aika-pisteiden avulla. Ilman suodatusta signaaliin aiheutunut tähtäyskohdan sekä urheilijan paidan liikkeistä aiheutuva häiriö on suhteellisen voimakasta kuten liitteen 2 esimerkkikuvista nähdään. Valokennojen ja LAVEG-järjestelmän avulla saatujen keskimääräisten nopeuksien vastaavuutta testattiin lineaarisen korrelaation avulla.

4.4 Tilastolliset analyysit

Muuttujien tilastollisessa analyysissä käytettiin SPSS-ohjelman versiota 13.0. Muuttujille laskettiin keskiarvot ja keskihajonnat. Eri loikkakontaktien välisten erojen tilastollista merkitsevyyttä tarkasteltiin käyttäen yksisuuntaista varianssianalyysiä (ANOVA) ja Games-Howell post hoc -testiä. Niiden muuttujien tapauksissa, joissa varianssien yhtäsuuruus ryhmän sisällä ei täytynyt, käytettiin Welch:n testiä. Eri muuttujien merkitsevyyttä eri tulosten funktiona arvioitiin lineaarisen regression avulla. Tilastollisen merkitsevyyden tasot on merkitty seuraavin symbolein: * = $p < .05$, ** = $p < .01$ ja *** = $p < .001$.

5 TULOKSET

Hyppyjen kokonais- ja vaihepituudet. Parhaiden hyppyjen kokonaispituudet eri koehenkilöille on esitetty taulukossa 7. Talven suorituksissa vain toinen hyppääjistä pääsi lähelle omaa halliennätystään; AT 94,7 % ja JS 98,1 % ennätyksestä. Keväällä taso oli jo tasaisempi; AT 97,3 %, AI 97,6 % ja JS 96,1 % ennätyksestään.

TAULUKKO 7. Parhaiden kevennyshyppyjen korkeudet (m), reaktiivisuushyppelyn teho (W) ja 3-loikkasuoritusten kokonaispituudet (m) kevään ja talven pitkävauhtisista, talven lyhytvauhtisista hypyistä sekä seuranneilta kilpailukausilta.

koehenkilö	KH	reaktiivisuus	3L kevät	3L talvi	3L lyhyt	Halli-09	Kesä-09
AT	0,56	66,6	15,28	14,87	14,82	15,70	16,19
AI	0,58	55,1	14,70			14,65	15,22
JS	0,41	55,2	14,00	14,29	14,18	14,57	14,59
\bar{x}	0,52	59,0	14,66	14,58	14,50	14,97	15,33
sd	0,09	6,6	0,64	0,41	0,45	0,63	0,81

Kaikki hyppääjät käyttivät ns. tasapainoista hyppytekniikkaa, eli kinkka- ja hyppyvaiheiden suhteelliset pituudet olivat 2 %-yksikön sisällä toisistaan (taulukko 8).

TAULUKKO 8. Hyppääjien absoluuttiset (m) ja suhteelliset (%) vaihepituudet sekä käytetty tekniikka kevään pitkävauhtisissa hypyissä.

koehenkilö	kinkka	kinkka-%	loikka	loikka-%	hyppy	hyppy-%	tekniikka
AT, n=1	5,75	37,6	3,78	24,7	5,75	37,6	tasapainoinen
AI, n=3	5,21	35,6	4,44	30,4	4,97	34,0	tasapainoinen
JS, n=3	4,90	35,6	3,92	28,5	4,95	36,0	tasapainoinen

Vauhdinjuoksu. Kaikki hyppääjät toteuttivat kolmiloikan vauhdinjuoksulle ominaisen lankulle kiihtyvän ja tihentyvän vauhdinjuoksun, jossa viimeinen askel on hieman lyhyempi kuin toiseksi viimeinen. Lyhennyksen määrässä oli selviä yksilöllisiä eroja. Analyysiin valituista suorituksista mitatut muuttujat on esitetty taulukossa 9. Analyysiin otettiin mukaan vain lasermittausjärjestelmällä saadut nopeusarvot, jotka korreloivat 3-1 m mittausmatkalla voimakkaasti valokennoilla saatuihin arvoihin ($r = 0,81$; $p < .0001$)

huolimatta liian matalasta kennojen sijainnista.

TAULUKKO 9. Hyppääjien LAVEG:lla mitatut nopeudet ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), askelpituudet (m) ja lyhennys 2. viimeisestä viimeiseen askeleeseen (%) kevään hypyissä pitkällä vauhdilla.

koehenkilö	6-1m	3-1m	1m	2. viim.ask.	viim.ask.	lyhennys
AT, n=2	9,36	9,35	9,36	2,20	2,05	6,8
AI, n=4	8,90	9,03	9,29	2,31	2,23	3,2
JS, n=4	8,50	8,56	8,91	2,22	1,99	10,5
x (n=10)	8,83	8,91	9,15	2,25	2,10	6,8
sd (n=10)	0,36	0,35	0,26	0,08	0,15	4,4

Espoon Kalevan kisoissa 2009 tehdyissä mittauksissa AT:n lähestymisnopeus oli parhaassa 16,19 m kantaneessa hypyissä $10,02 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ja AI:n 14,93 m hypyissä nopeus oli $9,39 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. JS ei hypännyt loppukilpailussa. AT:n kilpailuvauhti oli siis suurempi kuin kevään testitilanteessa, mutta AI jäi samalle tasolle. Vauhdinjuoksussa toteutuivat samat piirteet myös lyhyellä vauhdilla hypättäessä (taulukko 10).

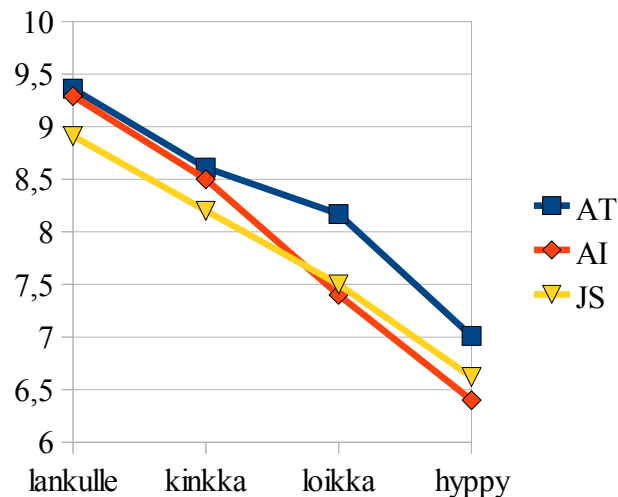
TAULUKKO 10. Hyppääjien LAVEG:lla mitatut nopeudet ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), askelpituudet (m) ja lyhennys 2. viimeisestä viimeiseen askeleeseen (%) talven hypyissä lyhyellä vauhdilla.

koehenkilö	6-1m	3-1m	1m	2. viim.ask.	viim.ask.	lyhennys
AT, n=2	8,84	8,92	9,03	2,25	2,17	3,5
JS, n=2	8,64	8,77	9,05	2,22	2,01	9,5
x (n=4)	8,74	8,84	9,04	2,23	2,09	6,5
sd (n=4)	0,13	0,11	0,13	0,04	0,10	4,0

Vaakanopeuden muutokset. Hyppääjien vaakanopeus hidastui jokaisen kontaktin aikana hidastumisen ollessa yhtä koehenkilöä (JS) lukuun ottamatta suurinta hypyn kontaktissa (taulukko 11). Vain kinkan ja hypyn hidastumisen määrä pitkällä vauhdilla erosi tilastollisesti merkitsevästi ($p < .05$). Loppunopeus arvioi hyppääjän jäljellä olevaa vaakanopeutta hypyn irtoamishetkellä, ja se on laskettu hyppääjän lähestymisnopeuden sekä kontaktien aikana menetetyt kokonaisnopeuden summana (ei ota huomioon ilmanvauhtuksen aiheuttamaa hidastumista ilmalennon aikana). Kuvassa 9 on esitetty graafisesti vaakanopeuden muuttuminen koehenkilöiden hypyissä pitkistä vauhdista.

TAULUKKO 11. Vaakanopeuden muutokset hypyn eri kontakteissa ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) nettoimpulsista laskettuna kevään hypyissä pitkällä vauhdilla ja suluissa lyhyellä vauhdilla.

koehenkilö	kinkka	loikka	hyppy	yhteensä	loppu
AT, n=2 (1)	-0,75 (-0,63)	-0,44 (-0,58)	-1,16 (-0,93)	-2,35 (-2,14)	7,01 (6,89)
AI, n=4	-0,79	-1,10	-1,00	-2,89	6,40
JS n=4 (1)	-0,71 (-0,67)	-0,70 (-0,76)	-0,88 (-0,94)	-2,29 (-2,37)	6,62 (6,68)
x, n=10 (2)	-0,74 (-0,65)	-0,81 (-0,67)	-0,96 (-0,94)	-2,51 (-2,26)	6,68 (6,79)
sd, n=10 (2)	0,04 (0,03)	0,28 (0,01)	0,18 (0,01)	0,33 (0,16)	0,31 (0,15)



KUVA 9. Hyppääjien vaakanopeus kevään pitkävauhtisissa hypyissä ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) lankulle tullessa sekä kinkan, loikan ja hypyn irtoamisvaiheessa.

Kontaktiajat ja reaktivoimat. Reaktivoimamittausten tulokset on koottu taulukkoon 13. Kontaktiajat erosivat merkitsevästi eri vaiheiden välillä ($p < .001$), noudattaen kasvavaa trendiä kinkasta hyppyyn. Pitkä- ja lyhytvauhtisten hyppyjen välillä ei ollut merkitseviä eroja, kuin hypyn osalta, jossa lyhytvauhtisissa kontaktiaika oli lyhyempi. Jarrutusaika oli kaikissa kontakteissa pidempi kuin työntöaika. Reaktivoimat on jaoteltu kuvan 5 mukaisesti, ja lisäksi on laskettu keskimääräinen resultanttivoima kontaktin ajalta, jarrutus- ja työntövaiheessa sekä niiden suunnat. Viimeiset kolme muuttujaa ovat nettoimpulsseja. Mittausteknisistä syistä talvella kinkan vaaka- ja pystyvoimien sekä molemmilla mittauskerroilla loikan pystyvoiman maksimia ei pystytty tarkasti määrittämään arvojen ylittäessä mittausasteikon. Kevään mittauksia varten ensimmäisen voimalevyn vahvistusta laskettiin mittauksen mahdollistamiseksi, mutta loikkakontaktissa pystyvoima-arvot ylittivät yhä mittauskaalan. Liitteessä 3 on esitetty yhden esimerkkisuorituksen (AT; 15,28 m) kaikkien kontaktien reaktivoimakuvajaat ja liitteessä 4

reaktiovoimien absoluuttiset arvot. Taulukon merkinnöistä puuttuva tilastollinen eroavuus kinkka- ja hyppyvaihedon välillä löytyi kontaktiajasta, jarrutusajasta sekä työntöajasta ($p < .001$) ja myös pystyvoiman toisesta maksimista ($p < .01$).

TAULUKKO 13. Reaktiovoimamittauksista kootut muuttujat pitkällä ja lyhyellä vauhdilla. Voima-arvot on esitetty hyppääjän painon kerrannaisina (BW). Kontaktien välinen tilastollisesti merkitsevä ero on merkitty tähdillä (***) $p < .001$, (**) $p < .01$, (*) $p < .05$).

	Kinkka		Pitkä vauhti		Hyppy	
			Loikka			
Kontakti- ja lentoajat (ms)						
Kontaktiaika	136 ± 7	***	163 ± 12	***	187 ± 12	
Jarrutusaika	86 ± 6		98 ± 13	**	116 ± 9	
Työntöaika	50 ± 5	***	66 ± 6		71 ± 10	
Lentoaika	515 ± 24	***	367 ± 73			
Pystyvoima (BW)						
1. maksimi	11,69 ± 0,70		>12		10,26 ± 1,74	
2. maksimi	4,74 ± 0,46		4,97 ± 0,24	***	4,06 ± 0,47	
Keskiarvo	3,13 ± 0,21	***	3,89 ± 0,18	***	3,11 ± 0,19	
Vaakavoima (BW)						
Minimi	-4,52 ± 0,57		-4,63 ± 1,36		-4,84 ± 0,82	
Maksimi	0,54 ± 0,21		0,76 ± 0,17	**	0,51 ± 0,05	
Keskiarvo	-0,50 ± 0,03		-0,47 ± 0,18		-0,50 ± 0,12	
Poikittaisvoima (BW)						
Minimi	-0,91 ± 0,33				-0,98 ± 0,27	
Maksimi	1,06 ± 0,23				1,43 ± 0,28	
Resultanttivoima (BW)						
Keskiarvo	3,17 ± 0,21		3,92 ± 0,19		3,15 ± 0,20	
Kulma (°)	99,1 ± 0,4		96,8 ± 2,5		99,0 ± 1,9	
Jarrutusvoima	4,08 ± 0,25	***	5,18 ± 0,21	***	4,05 ± 0,22	
Jarrutuskulma (°)	74,7 ± 0,5	***	77,4 ± 1,6	*	75,3 ± 1,5	
Työntövoima	1,84 ± 0,18	**	2,25 ± 0,15	***	1,86 ± 0,09	
Työntökulma (°)	78,0 ± 3,0		78,1 ± 1,4	*	79,9 ± 0,9	
Impulssit (Ns)						
Pysty	324,4 ± 20,2	***	496,3 ± 62,6		454,2 ± 45,3	
Vaaka	-58,7 ± 7,3		-67,6 ± 29,4		-77,5 ± 16,9	
Poikittainen	4,1 ± 8,7				2,9 ± 19,9	
n	6		10		9	

	Lyhyt vauhti		
	Kinkka	Loikka	Hyppy
Kontakti- ja lentoajat (ms)			
Kontaktiaika	134 ± 2	161 ± 2	176 ± 17
Jarrutusaika	83 ± 3	90 ± 4	106 ± 7
Työntöaika	51 ± 5	71 ± 6	70 ± 10
Lentoaika	489 ± 4	325 ± 68	
Pystyvoima (BW)			
1. maksimi	>7	>13,6	10,58 ± 0,72
2. maksimi	4,32 ± 0,51	5,17 ± 0,35	4,43 ± 0,18
Keskiarvo	2,73 ± 0,4	3,86 ± 0,17	3,20 ± 0,04
Vaakavoima (BW)			
Minimi	>2,7	-4,17 ± 0,72	-4,96 ± 0,82
Maksimi	0,64 ± 0,31	0,93 ± 0,19	0,57 ± 0,12
Keskiarvo			
Poikittaisvoima (BW)			
Minimi	-0,72 ± 0,20		-1,28 ± 0,47
Maksimi	1,23 ± 0,06		0,83 ± 0,21
Resultanttivoima (BW)			
Jarrutusvoima	3,68 ± 0,53	5,28 ± 0,21	4,24 ± 0,07
Jarrutuskulma (°)	73,7 ± 0,8	77,8 ± 0,2	75,2 ± 0,6
Työntövoima	1,50 ± 0,43	2,26 ± 0,13	1,87 ± 0,07
Työntökulma (°)	75,5 ± 3,2	75,4 ± 1,6	78,5 ± 2,3
Impulssit (Ns)			
Pysty	262,9 ± 46,6	447,4 ± 9,8	404,2 ± 32,0
Vaaka	-46,0 ± 1,9	-43 ± 11,7	-64,0 ± 6,7
Poikittainen	5,3 ± 14,6		-4,5 ± 15,5
n	3	3	3

Korrelaatiot kevään pitkävauhtisissa hyppyissä. Minkään vaiheen pituus ei korreloinut merkitsevästi suorituksen kokonaispituuden kanssa, vaikka kinkka- ja hyppyyvaiheiden osalta olikin havaittavissa selvät trendit ($r = 0,64$; $p = 0,17$ ja $r = 0,69$; $p = 0,08$) loikka-vaiheen jäädessä selvästi merkityksettömäksi ($r = 0,42$; $p = 0,31$).

Kinkan vaihepituuden kanssa korreloi voimakkaasti hyppääjän lähestymisnopeus ($r = 0,97$; $p < .001$) ja jäljellä oleva nopeus ponnistushetkellä ($r = 0,93$; $p < .01$). Myös vaakavoiman maksimiarvon ja kinkan vaihepituuden välillä oli positiivinen trendi ($r = 0,79$; $p = 0,061$). Työntökulman ja kinkan vaihepituuden välillä oli voimakas negatiivinen korrelaatio ($r = -0,94$; $p < .01$). Työntökulma korreloi negatiivisesti vaakavoiman maksimiarvon ($r = -0,91$; $p < .05$) ja negatiivisesti poikittaisvoiman maksimiarvon ($r =$

-0,91; $p < .05$), lähestymisnopeuden ($r = 0,98$; $p < .001$) sekä ponnistushetkellä jäljellä olevan nopeuden kanssa ($r = 0,97$; $p < .01$). Suorituksen kokonaispituus korreloi negatiivisesti kinkan pystyvoiman ensimmäisen maksimin ja jarrutuskulman kanssa ($r = -0,99$; $p < .001$ ja $r = -0,82$; $p < .05$). Kinkan kontaktin aikainen keskimääräinen pystyvoima korreloi negatiivisesti kontaktiajan kanssa ($r = -0,90$; $p < .01$) ja positiivisesti suhteellisen vaihepituuden kanssa ($r = 0,92$; $p < .01$).

Loikan vaihepituuden kanssa korreloivat positiivisesti kontaktiaika ($r = 0,80$; $p < .05$) sekä suhteellinen vaakanopeuden muutos ($r = 0,96$; $p < .05$) ja negatiivisesti vaakavoiman minimiarvo ($r = -0,84$; $p < .01$) sekä jarrutuskulma ($r = -0,75$; $p < .05$). Kontaktiaika korreloi negatiivisesti vaakavoiman minimiarvon ($r = -0,90$; $p < .001$), jarrutuskulman ($r = -0,88$; $p < .001$), työntövaiheen resultanttivoiman ($r = -0,70$; $p < .05$) ja kontaktinaikaisen vaakanopeuden muutoksen kanssa ($r = -0,83$; $p < .01$) sekä positiivisesti työntökulman kanssa ($r = 0,70$; $p < .05$). Vaakanopeuden muutos korreloi positiivisesti jarrutuskulmaan ($r = 0,91$; $p < .001$), vaakavoiman minimiarvoon ($r = 0,91$; $p < .001$), työntövaiheen resultanttivoimaan ($r = 0,64$; $p < .05$) ja kontaktin lopussa jäljellä olevaan nopeuteen ($r = 0,83$; $p < .05$). Kontaktin lopussa jäljellä olevan nopeuden ja työntökulman välillä oli negatiivinen korrelaatio ($r = -0,88$; $p < .05$). Loikan kontaktin aikainen keskimääräinen pystyvoima korreloi negatiivisesti työntöajan kanssa ($r = -0,89$; $p < .001$).

Hypyn vaihepituuden ja tutkittujen muuttujien väliltä ei löytynyt yhtään merkitsevää korrelaatiota, vaikka pystyvoiman toisen maksimin osalta olikin havaittavissa trendi ($r = 0,75$; $p = 0,051$). Hypyn kontaktin aikainen keskimääräinen pystyvoima korreloi positiivisesti pystyvoiman toisen maksimin ($r = 0,72$; $p < .05$) ja suhteellisen vaihepituuden kanssa. Myös keskimääräinen resultanttivoima jarrutusvaiheessa korreloi positiivisesti suhteellisen vaihepituuden kanssa ($r = 0,92$; $p < .01$).

6 POHDINTA

Vastaukset tutkimusongelmiin. Ensimmäisenä tutkimusongelmana oli kontaktien aikaisen vaakanopeuden muutosten vaikutus hypyn kokonaistulokseen. Tähän kysymykseen ei pystytty vastaamaan tämän tutkimuksen perusteella. Kävi kuitenkin selväksi, ettei 50 Hz näytteenottotaajuudella toimiva lasermittausjärjestelmä kykene seuraamaan nopeuden muutoksia kolmiloikkasuorituksessa tai tarjoamaan tietoa yksittäisten juoksukontaktien aikaisista nopeuden muutoksista, vaan tarvitaan joko nyt käytettyä reaktiivoima-analyysiä tai liikeanalyysiä. Tähtäyspisteen säilyttäminen hyppääjän alaselässä on mahdollista vauhdinjuoksun ajan, mutta varsinaisissa loikissa tulee niin paljon sekä pystyettä poikittaissuuntaista liikettä, ettei tähtäys säily, kuten liitteen 2 esimerkkikuvistakin voi nähdä. Myös hyppääjän paidan kankaan aiheuttama liike aiheuttaa tietyntäajuista häiriötä nopeussignaaliin, jolloin tarkkojen kontaktin alku ja loppupisteiden määrittäminen datasta on vaikeaa tai mahdotonta. Impulssista lasketut nopeuden muutokset vastasivat kuitenkin hyvin aikaisemmin kirjallisuudessa impulssista (Ramey & Williams 1985) sekä liikeanalyysistä saatuja arvoja (Brüggemann & Arampatzis 1997; Fukushima ym. 1981; Hommel 2009; Miller & Hay 1986).

Toisena tutkimusongelmana olleeseen kysymykseen ei voitu antaa näiden tulosten perusteella vastausta, mutta hyppääjien välillä havaittiin selkeitä eroja vaakanopeuden säilyttämiskyvyssä. Tämän perusteella tekniikkaharjoittelua voidaan ehkä ohjata yksilölle oikeaan suuntaan. Kaikkien koehenkilöiden nopeuden menetys kinkan kontaktissa oli samalla tasolla, mutta AT säilytti selvästi parhaiten nopeuden loikan kontaktin aikana, minkä auttoi saavuttamaan pitkän viimeisen vaiheen, vaikkakin osittain loikan pituuden kustannuksella. AI taas menetti eniten nopeuttaan loikan kontaktissa, saavutti näin pisin loikan vaihepituuden, mutta ei säästänyt tällä tekniikalla riittävästi nopeuttaan hyppyä varten. JS:n tekniikka oli nopeusmuutosten suhteen tasapainoisin, mutta loikan ja erityisesti hypyn suuntaus jäi näin ehkä liian matalaksi optimaalisen tuloksen kannalta.

Kolmantena tutkimusongelmana oli lähestymisnopeuden vaikutus nopeuden hidastumi-

sen määrään. Ideana oli hieman samaan tapaan kuin pudotushypyissä, määrittää urheilijalle optimaalinen lähestymisnopeus tekniikan ja ominaisuuksien kehittämiseksi lajiharjoittelulla. Lyhytvauhtisia hyppyjä ei kuitenkaan onnistuttu mittaamaan riittävää määrää, jotta tilastollista analyysiä olisi voitu suorittaa. Kahdella koehenkilöllä kinkan kontaktin aikainen nopeuden hidastuminen oli hieman vähäisempää lyhyt- kuin pitkävauhtisissa hyppyissä, mutta loikan kontaktissa ero oli päinvastoin.

Neljäntenä tutkimusongelmana oli reaktiovoimien, nopeuden hidastumisen ja hyppytuloksen välisten yhteyksien löytäminen. Kinkan vaihepituuteen näytti vaikuttavan eniten lähestymisnopeus ($r = 0,97$; $p < .001$), työntökulma ($r = -0,94$; $p < .01$) ja jäljellä oleva nopeus ponnistushetkellä ($r = 0,93$; $p < .01$), eli vaakanopeuden hidastumisen minimointi lankun ylityksessä näyttäisi olevan tärkeä tekijä kinkan vaihepituuden kannalta. Kinkan kontaktin aikainen keskimääräinen pystyvoima korreloi positiivisesti suhteellisen, mutta ei absoluuttisen vaihepituuden kanssa. Näin ollen tällä koehenkilöjoukolla oli kaikilla luultavasti riittävät voimantuotto-ominaisuudet pitkän kinkan suorittamiseksi ja rajoittavana tekijänä oli lähinnä lähestymisnopeus tai kyky muuntaa vaakanopeutta tehokkaasti pystynopeudeksi. Vastaavasti loikan vaihepituuteen vaikutti positiivisesti tekniikka, jossa kontaktiaika ja jarrutusvoimat olivat suuret. Toisaalta koska loikan vaihepituuden ei ole havaittu olevan merkitsevä hypyn kokonaistuloksen kannalta, tämän vaiheen korostaminen voi näin jopa heikentää kokonaistulosta, koska se johtaa vaakanopeuden vähenemiseen myös viimeisen vaiheen osalta (Hay 1992, 1993 & 1999). Hypyn vaihepituuden ja reaktiovoimien väliltä ei löytynyt merkitseviä korrelaatioita, mutta keskimääräinen pystyvoima jarrutusvaiheessa korreloi positiivisesti suhteellisen vaihepituuden kanssa. Loikan kontaktista ei kuitenkaan saatu mitattua tarkkaa maksimaalista reaktiovoimaa johtuen mittauslaitteiston mittausskaalan ylityksestä, joten analyysit ovat tältä osin vielä puutteellisia.

Pystysuuntaisten reaktiovoimien maksimi-arvot vastasivat kirjallisuudessa aiemmin saatuja ja niissä havaittiin tyypillinen kahden huipun muoto, vaikka toisen maksimin arvo ei tässä tutkimuksessa laskenutkaan kinkan tukivaiheesta loikan tukivaiheeseen (Ramey & Williams 1985). Vaakavoiman jarrutusvaiheen maksimi-arvo jäi huomattavasti matalammaksi kuin aikaisemmin vastaavantasoisilla hyppääjillä suoritetuissa mittauksissa; nyt alle 4,9 BW ja aikaisemmin 4,8-7 BW (Perttunen ym. 2000). Myös jarrutuskulma

oli nyt vastaavasti aikaisempaa suurempi eli vähemmän jarruttava. Fukushima ym. (1981) määrittivät liikeanalyysin avulla koko kontaktin keskimääräiset reaktiivoimat ja niissä oli pientä eroavuutta nyt saatuihin. Heidän laskemansa arvot näyttäisivät yliarvioivan resultanttivoimien suuruutta, mutta voimien kulmat olivat lähellä nyt mitattuja, vaikka hypyn kulma erosikin heidän hyppääjillä muista vaiheista enemmän jarruttavana. (Fukushiro ym. 1981.)

Huippusuoritusten arvoja. Jonathan Edwardsin maailmanennätyshypyn 18,29 m tekemiseen ja vastaaviin suorituksiin vaaditaan siis noin $10 - 10,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ lähestymisnopeus lankulle sekä sen säilyttäminen optimaalisesti eri ponnistusvaiheiden läpi. Lähtökulmat ponnistusvaiheissa ovat matalia eli noin $12 - 18$, $11 - 16$ ja $18 - 26$ astetta sekä vaakanopeuden hidastumiset noin $0,7 - 0,8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $1,0 - 1,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ sekä $1,3 - 1,6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Hyvillä hyppääjillä nopeus hidastuu eniten viimeisessä kontaktissa, kun heikommilla se tapahtuu jo loikkavaiheessa. Kontaktiaika lähestyy kinkassa juoksunomaista $0,11 \text{ s}$ ja loikan sekä hypyn kontakteissa se on noin $0,14 - 0,16 \text{ s}$. Lyhyt kontaktiaika vaatii suurta ponnistavan jalan jäykkyyttä ja voimantuottoa. Pystyvoiman maksimiarvo nousee kinkassa yli 15 BW ja keksimääräisten resultanttivoimien on arvioitu olevan 18 metrin suorituksessa noin $3,6 - 4,4 \text{ BW}$ ja suunnan keskimäärin 101 astetta.

Virhearviointia. Tutkimusongelmiin vastaamiseksi olisi tarvittu huomattavasti suurempi määrä koehenkilöitä ja onnistuneita suorituksia koehenkilöä kohti. Nyt tilastollisen tarkastelun mahdollistamiseksi kaikkien hyppääjien onnistuneet kontaktit jouduttiin keskiarvoistamaan, eikä yksilöllisiä eroja esimerkiksi optimaalisen hyppytekniikan osalta voitu näin analysoida. Harrastajamäärä lajissa on nykyään vähäinen ja mittaus teknisistä syistä vähimmäisvaatimuksena oli miesten SM-kilpailutason urheilija, joten sopivien koehenkilöiden rekrytoiminen ja saaminen paikan päälle kilpailukauden kynnyksellä oli vaikeaa. Lisäksi laji on fyysisiltä vaatimuksiltaan niin kova elimistölle, ettei yhdellä mittauskerralla voida väsymisen ja loukkaantumisvaaran vuoksi suorittaa aina tutkijan kannalta riittävää määrää onnistuneita hyppejä. Kansallisen tason eli tällä hetkellä $14,50-16 \text{ m}$ hyppääjien lyhytvauhtisten hyppejen kunnollinen suorittaminen vaatisi myös mittausasetelmalta sen, että ponnistuspaikka olisi korkeintaan 12 m etäisyydellä hiekkakasan reunasta. Nyt tammikuun mittauksissa etäisyys oli jopa $13,7 \text{ m}$ ja keväällä noin $12,7 \text{ m}$. Jos hyppääjät eivät tunne pääsevänsä lankulta turvallisesti hiekkalle, tulee

paljon yliastumisia sekä läpijuoksuja, ja lisäksi ero käytetyn lyhyen ja pitkän vauhdin välillä kapenee, mikä vaikeutti haluttujen vertailujen tekemistä.

Sovellutuksia käytäntöön. Tulevaisuudessa järkevä testi- ja seurantajärjestelmä kolmi-loikkaajille olisi jakaa mittaukset vähintään kahdelle eri päivälle kilpailuun valmistavan kauden aikana. Ensimmäisellä kerralla voitaisiin mitata vain lyhytvauhtisia hyppyjä mahdollisimman suuri toistomäärä koehenkilöä kohti, jotta kyettäisiin selvittämään myös erityisesti yksilölle optimaalista tekniikkaa. Lyhytvauhtisten hyppysten (ja naisurheilijoiden) mittausten toteuttamiseksi hallin voimalevyjonon rakennetta pitäisi voida muuttaa siten, että ponnistuspaikka olisi 11 metrin etäisyydellä kasan reunasta. Mittaukset toistettaisiin muutaman viikon kuluttua pidemmällä vauhdilla, kun koehenkilöiden harjoittelu ja valmiudet ovat jo vastaavalla tasolla. Näin saataisiin tietoa myös lyhyt- ja pitkävauhtisten hyppysten eroista ja soveltuvuudesta tekniikan sekä ominaisuuksien eri osa-alueiden kehittämiseen. Lajin vaativuuden vuoksi parhaat tulokset tehdään kuitenkin käytännössä aina mestaruuskilpailuissa, joten mittaamista pitäisi viedä myös sinne. Käytännössä ainoa kilpailutilanteeseen soveltuva menetelmä, josta saataisiin reaktiovoimia lukuun ottamatta kaikki oleellinen data nopeusmuutosten ja tekniikan osalta, on työläs liikeanalyysi, vaikka epäsuora reaktiovoimien arviointi on kyllä mahdollista myös liikeanalyysin perusteella (Fukashiro ym. 1981). Tärkeimmät testaukseen sisällytettävät reaktiovoimamuuttujat ovat tämän selvitystyön perusteella maksimaalinen pystyvoima jarrutusvaiheessa, maksimaalinen vaakavoima työntövaiheessa, keskimääräinen pystyvoima, keskimääräiset resultanttivoimat koko kontaktilta sekä jarrutus- ja työntövaiheista sekä niiden suunnat, vaakavoiman nettoimpulssi kontaktin aikaisen vaakanopeuden hidastumisen määrittämiseksi, kontaktiajat sekä jako jarrutus- ja työntöaikoihin. Lisäksi vaihepituuksien ja -suhteiden seuraaminen olisi mielenkiintoista ja helppoa toteuttaa samassa yhteydessä.

7 KIITOKSET

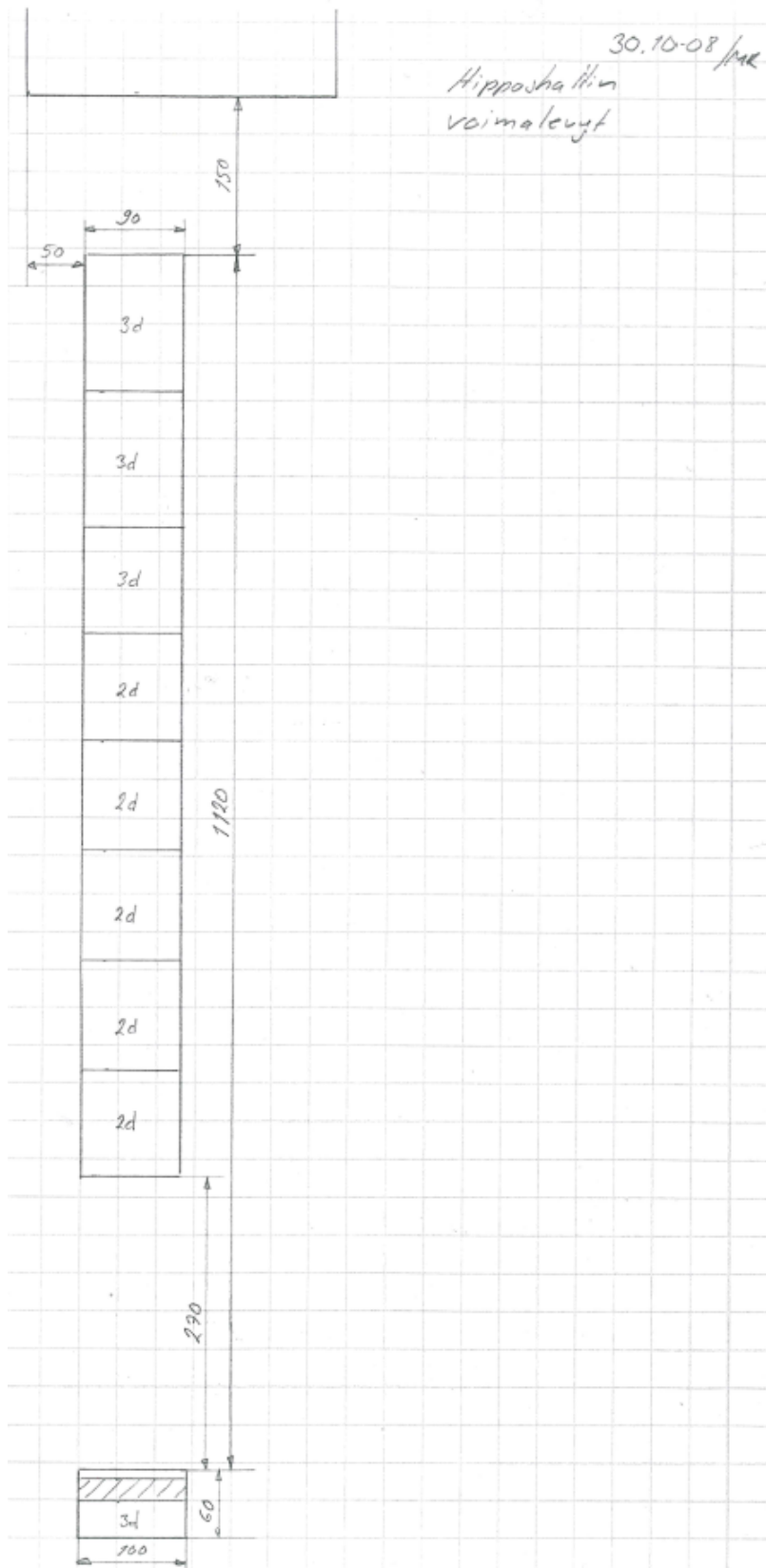
Haluan kiittää työn ohjaajia kärsivällisyydestä ja avusta vuonna 2008 alkaneen projektin viemisestä loppuun kaikista ongelmista huolimatta. Lisäksi kiitokset ansaitsee Suomen Urheiluliitto tarjoutuessaan kustantamaan kahden koehenkilön matkat testipaikalle, lajipäällikkö Jorma Kemppainen osallistuessaan omalta osaltaan tutkimuksen suunnitteluvaiheeseen, Kilpa- ja huippu-urheilun tutkimuskeskus (KIHU) tarjotessaan tutkimuksen käyttöön LAVEG-mittauslaitteiston, urheilubiomekaniikan tutkija Tapani Keränen opastettuaan laitteiston käytön ja Markku Ruuskanen sekä muu liikuntabiologian laitoksen henkilökunta ollessaan korvaamattomana apuna mittausten teknisen puolen järjestämisessä.

8 LÄHTEET

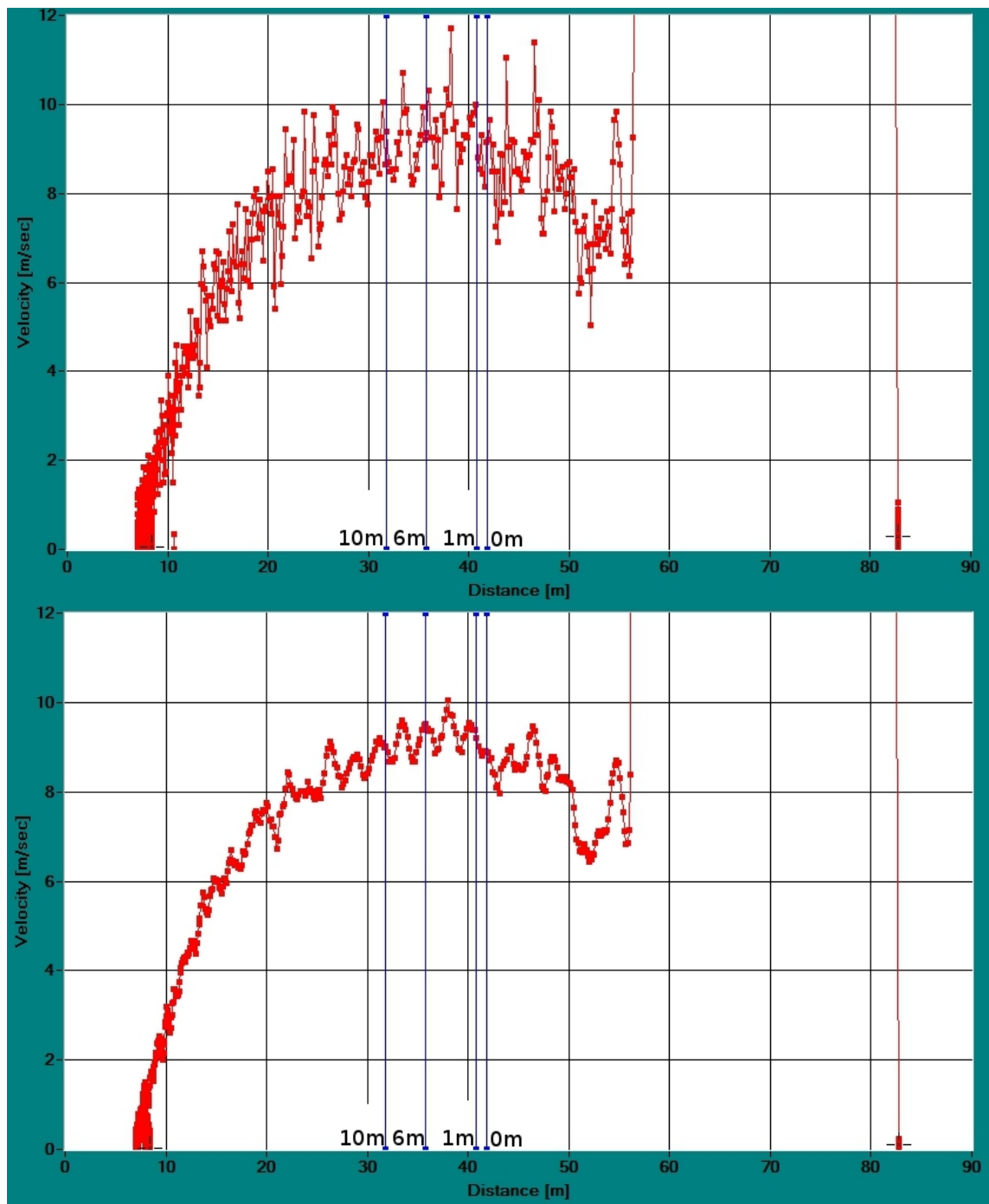
- Al-Kilani, M.A. & Widule, C.J. 1990. Selected kinematic characteristics of intercollegiate women triple jumpers. *The American Journal of Sports Medicine* 18, 267 - 270.
- Brüggemann, G.-P. & Arampatzis, A. 1999. Triple jump. Teoksessa Brüggeman, G.-P., Koszewski, D. & Müller, H. (toim.) *Biomechanical research project Athens 1997 Final report*. Meyer & Meyer Sport, Oxford, 114 - 129.
- Dyson, G.H.G. 1978. *The mechanics of athletics*. 7. painos. Hodder and Stoughton, Lontoo, 192 - 197.
- Fukashiro, S., Imoto, Y., Kobayashi, H. & Miyashita, M. 1981. A biomechanical study of the triple jump. *Medicine and science in sports and exercise* 13, 233 - 237.
- Fukashiro, S. & Miyashita, M. 1983. An estimation of the velocities of three take-off phases in 18-m triple jump. *Medicine and science in sports and exercise* 15, 309 - 312.
- Harrison, A.J., Jensen, R.L. & Donoghue, O. 2005. A comparison of laser and video techniques for determining displacement and velocity during running. *Measurement in physical education and exercise science* 9, 219 - 231.
- Hay, J.G. 1992. The biomechanics of the triple jump: A review. *Journal of Sports Sciences* 10, 343 - 378.
- Hay, J.G. 1993. Citius, altius, longius (faster, higher, longer): The biomechanics of jumping for distance. *Journal of biomechanics* 26, Suppl. 1, 7 - 21.
- Hay, J.G. 1999. Effort distribution and performance of Olympic triple jumpers. *Journal of applied biomechanics* 15, 36 - 51.
- Hommel, H. 2009. Scientific research project biomechanical analyses at the Berlin 2009 IAAF world championships in athletics. Saksan urheiluliitto.
- Keskinen, K.L., Häkkinen, K. & Kallinen, M. 2004. *Kuntotestauksen käsikirja*. Liikuntalääketieteellinen Seura ry, Helsinki.
- Koh, T.J. & Hay, J.G. 1990. Landing leg motion and performance in the horizontal jumps II: The triple jump. *International journal of sport biomechanics* 6, 361 - 373.
- Kyröläinen, H., Komi, P.V., Virmavirta, M. & Isolehto, J. 2008. Biomechanical

- Analysis of the Triple Jump. Neuromuscular Research Center, Liikuntabiologian laitos, Jyväskylän yliopisto, Jyväskylä. Julkaisematon raportti.
- Miller Jr., J.A. & Hay, J.G. 1986. Kinematics of a world record and other world-class performances in the triple jump. *International journal of sport biomechanics* 2, 272 - 288.
- Moura, N.A., Fernandes de Paula Moura, T. & Borin, J.P. 2005. Approach speed and performance in the horizontal jumps: What do Brazilian athletes do? *New studies in athletics* 20, 43 - 48.
- Perttunen, J., Kyröläinen, H., Komi, P.V. & Heinonen, A. 2000. Biomechanical loading in the triple jump. *Journal of Sports Sciences* 18, 363 - 370.
- Ramey, M.R. & Williams, K.R. 1985. Ground reaction forces in the triple jump. *International journal of sport biomechanics* 1, 233 - 239.
- Seyfarth, A., Friedrichs, A., Wank, V. & Blickhan, R. 1999. Dynamics of the long jump. *Journal of Biomechanics* 32, 1259 - 1267.
- Thorsson, O., Christensen, L., Aagaard, P., Havskrogh, M., Boysen-Möller, F. & Simonsen, E. 1996. Utveckling av hoppegenskaper i ett träningsystem. Teoksessa Dahlberg, L. (toim.) Rapport 4 utvecklingsprojekt. Sveriges Olympiska Kommitté, Farsta, 77 – 87.
- Tilastopaja 2009. <http://www.tilastopaja.org/fi/.01.09.2009>.
- von Gerich, S. & Kyröläinen, H. 1988. Pituushyppy kolmiloikka. Suomen Urheiluliitto, Helsinki.
- Yu, B. 1999. Horizontal-to-vertical velocity conversion in the triple jump. *Journal of Sports Sciences* 17, 221 - 229.
- Yu, B. & Hay, J.G. 1996. Optimum phase ratio in the triple jump. *Journal of Biomechanics* 29, 1283 – 1289.

LIITE 1. VOIMALEVYJONO

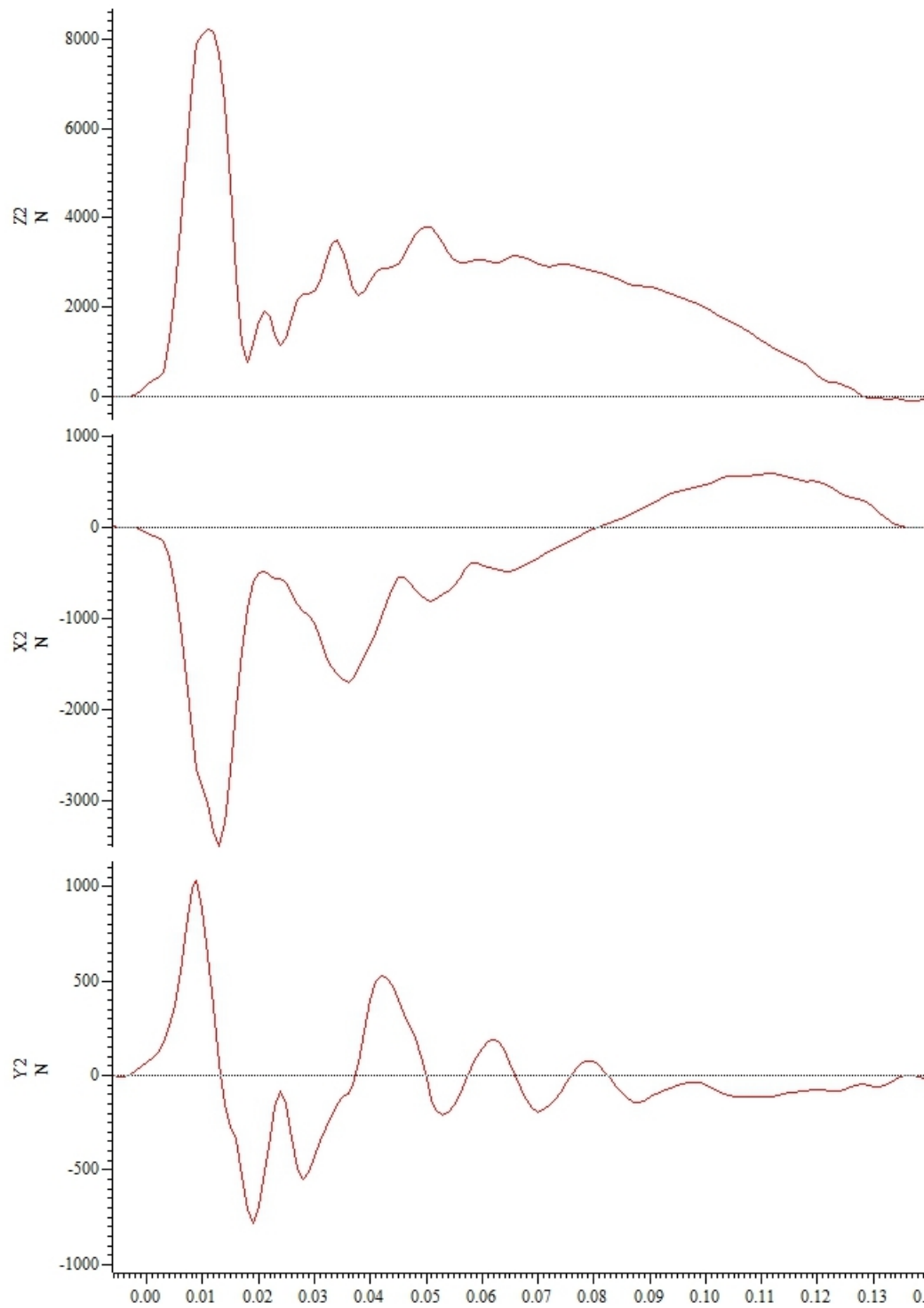


LIITE 2. LAVEG-KUVAAJAT

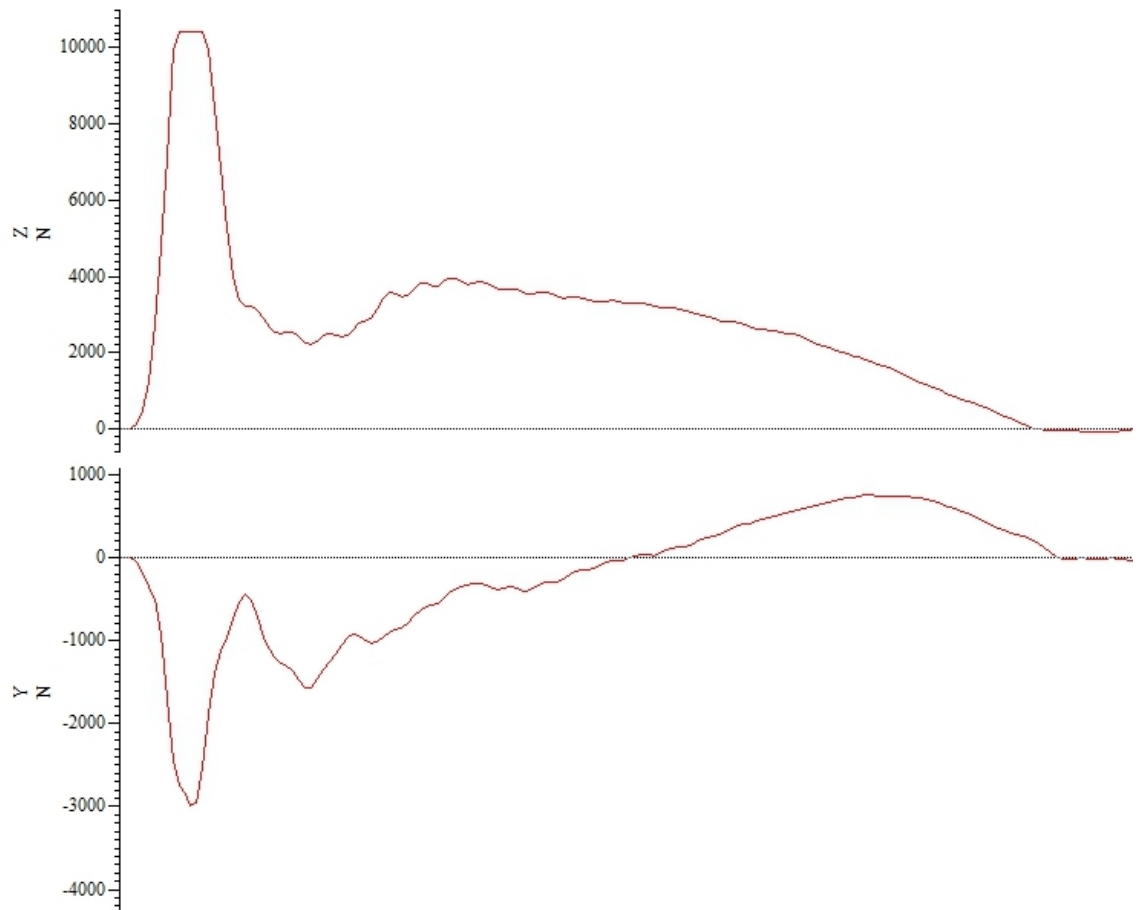


KUVA. Ylemmässä kuvassa LAVEG-järjestelmän antama etäisyys-nopeuskäyrä raakadatasta piirrettynä ja alemmassa suodatettu versio. Markkerit etäisyyksillä 0, 1, 6 ja 10 m ponnistuskohdasta.

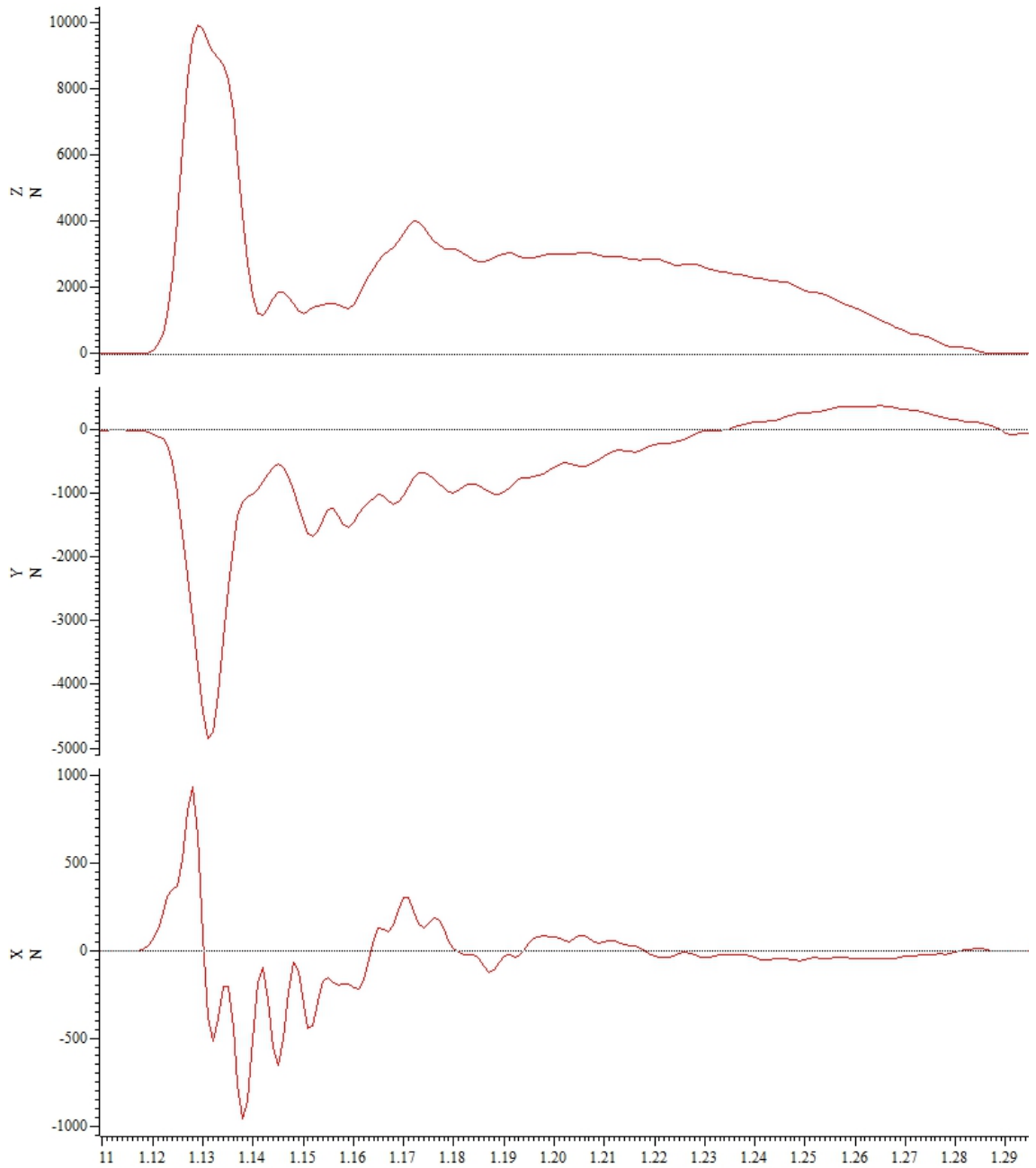
LIITE 3. VOIMAKUVAAJAT



KUVA. Kinkan esimerkivoimakuvajaat 15,28 m suoritukselta (vaihepituus 5,75 m). Ylhäältä alas: pysty-, vaaka- ja poikittaissuuntainen voima.



KUVA. Loikan esimerkivoimakuvajat 15,28 m suoritukselta (vaihepituus 3,78 m). Ylhäältä alas: pysty- ja vaakasuuntainen voima.



KUVA. Hypyn esimerkivoimakuvajaat 15,28 m suoritukselta (vaihepituus 5,75 m). Ylhäältä alas: pysty-, vaaka- ja poikittaissuuntainen voima.

LIITE 4. REAKTIOVOIMIEN ABSOLUUTTISET ARVOT

	Pitkä vauhti		
	Kinkka	Loikka	Hyppy
Vertikaalivoima			
1. maksimi	9066 ± 563	>10000	8177 ± 1591
2. maksimi	3663 ± 224	4004 ± 434	*** 3217 ± 336
Keskiarvo	2428 ± 214	*** 3127 ± 285	*** 2475 ± 232
Pitkittäisvoima			
Minimi	-3514 ± 505	-3795 ± 1401	-3864 ± 780
Maksimi	420 ± 163	610 ± 140	** 408 ± 51
Keskiarvo	-389 ± 31	-385 ± 169	-394 ± 98
Poikittaisvoima			
Minimi	-722 ± 319		-778 ± 219
Maksimi	827 ± 211		1131 ± 207
Resultanttivoima			
Keskiarvo	2459 ± 216	3153 ± 302	2507 ± 238
Kulma	99,1 ± 0,4	96,8 ± 2,5	99,0 ± 1,9
Jarrutusvoima	3164 ± 196	*** 4164 ± 296	*** 3218 ± 247
Jarrutuskulma	74,7 ± 0,5	*** 77,4 ± 1,6	* 75,3 ± 1,5
Työntövoima	1421 ± 97	** 1810 ± 168	*** 1476 ± 91
Työntökulma	78,0 ± 3,0	78,1 ± 1,4	* 79,9 ± 0,9
n	6	10	9