

**REAKTIOVOIMAT JA HEILAHTAVAN JALAN KINEMAAT-
TISET MUUTTUJAT MAKSIMAALISESSA PIKAJUOKSUSSA
– YHTEYS JUOKSUNOPEUTEEN**

Janne Alasalmi

Kandidaatin tutkielmaseminaari

BME.A004

Kevät 2007

Liikuntabiologian laitos

Jyväskylän yliopisto

Työn ohjaaja: Mikko Virmavirta

TIIVISTELMÄ

Janne Alasalmi, 2007. Reaktivoimat ja heilahtavan jalan kinemaattisen muuttujat maksimaalisessa pikajuoksussa – yhteys juoksunopeuteen. Biomekaniikka. Kandidaatin tutkielmaseminaari. Jyväskylän yliopisto, liikuntabiologian laitos. 30s.

Juoksu on luonteeltaan syklistä ja pomppivaa askellusta, jota voidaan mallintaa hyvin jousi-massa-mallin avulla. Elastisen energian käytöllä on kasvava merkitys juoksunopeuden kasvaessa, jotta pystyttäisiin tuottamaan tarvittavia tukivoimia juoksualustaan. Juoksutekniikkaa tutkittaessa on perinteisesti tyydytty kinemaattisten muuttujien tarkasteluun liikeanalyysin perusteella. Uudet tutkimukset kertovat kuitenkin voimantuoton tärkeydestä, ja viittaavat juoksutekniikan olevan riippuvainen yksilön ominaisuuksista. Tämän tutkimuksen tarkoituksena oli tarkastella maksimaaliseen juoksunopeuteen vaikuttavia mekaanisia tekijöitä sekä selvittää käyttävätkö juoksijat tahdonalaisia teknisiä muutoksia juoksumekaniikassaan (esim. aktiivinen kuopaisu) nopeuden kasvattamiseksi.

Koehenkilöinä toimi seitsemän $26,3 \pm 10,1$ -vuotiasta yleisurheilijaa, jotka suorittivat verryttelyn jälkeen 2-3 maksimaalista lentävää 10 metrin juoksua 30-40 metrin kiihdytysmatkasta. Tämän jälkeen he juoksivat submaksimaaliset juoksut 70, 80 ja 90 % arvotussa järjestyksessä. Juoksuista mitattiin reaktivoimat 7,2 metrin matkalta, juoksu-aika valokennoilla 10 metrin matkalta, ja lisäksi juoksuista tehtiin 2D-liikeanalyysi juoksijan oikealta puolelta.

Juoksijat kasvattivat nopeuttaan 70 %:sta 100 %:iin lähinnä lisäämällä askeltiheyttään (3,26 Hz:stä 4,55 Hz:iin, $p < .001$) askelpituuden säilyessä samana. Kontaktiaika, efektiivinen impulssi ja heilahdusaika pienenevät nopeuden kasvaessa ($p < .001$), kuten myös lentoaika ($p < .01$). Kontaktimatka pysyi muuttumattomana nopeudesta riippumatta. Vertikaalisessa voimantuotossa ei havaittu merkitseviä muutoksia, mutta horisontaalivoiman minimiarvo jarrutusvaiheessa kasvoi nopeuden kasvaessa ($p < .05$). Horisontaalivoiman maksimiarvo työntövaiheessa kasvoi vain 80 ja 90 %:n nopeuksien välillä ($p < .01$). Juoksunopeuteen vaikuttavien mekaanisten tekijöiden ja nopeuden välillä ei löytynyt merkitseviä korrelaatioita. Liikeanalyysin tuloksista löytyi korrelaatio vain juoksunopeuden ja tukijalan lonkan ojennusnopeuden väliltä ($r = 0,839$, $p < .05$).

Koehenkilöiden odotettua pienemmäksi jäänyt lukumäärä sekä suorituskyvyn tasaisuus estivät tilastollisesti merkitsevien korrelaatioiden löytämisen juoksunopeuden ja siihen vaikuttavien mekaanisten tekijöiden väliltä. Toisaalta tämä voi myös osoittaa kuinka yksilöt käyttävät eri strategioita tietyn nopeuden saavuttamiseksi.

Avainsanat: pikajuoksu, reaktivoima, tekniikka, jousi-massa-malli, liikeanalyysi

SISÄLTÖ

TIIVISTELMÄ

1	JOHDANTO.....	3
2	PIKAJUOKSUN BIOMEKANIikka.....	4
2.1	Lihasten voimantuottoon vaikuttavia tekijöitä pikajuoksussa.....	6
2.2	Reaktiovoimat pikajuoksussa.....	8
2.3	Kinemaattiset muuttujat pikajuoksussa.....	10
2.4	Juokstekniikan vaikutusmekanismit nopeuteen.....	13
3	TUTKIMUSONGELMAT.....	15
4	MENETELMÄT.....	16
4.1	Tutkimusasetelma.....	16
4.2	Mittaukset.....	17
4.3	Analyysit.....	18
4.4	Tilastolliset analyysit.....	19
5	TULOKSET.....	20
5.1	Juoksunopeudet ja reaktiovoimat.....	20
5.2	Heilahtavan jalan toiminta.....	21
6	POHDINTA.....	25
7	LÄHTEET.....	28

1 JOHDANTO

Juoksu on luonteeltaan syklistä ja pomppivaa askellusta, jossa elastisen energian varastoinnilla jarrutusvaiheessa ja käytöllä työntövaiheessa on tärkeä asema (mm. Cavagna ym. 1971; Komi 2000). Käyttämällä yksinkertaista jousi-massa-mallia, voidaan juoksun mekaniikkaa mallintaa onnistuneesti (Blickhan 1989; Farley & Gonzalez 1996; Kerdok ym. 2002; McMahon & Cheng 1990; Seyfarth ym. 2003).

Viimeaikaiset tutkimukset osoittavat, että huippupikajuoksijat eivät heilauta jalkojaan nopeammin ilmassa seuraavaa askelta varten kuin hitaammat verrokkit huolimatta heidän nopeammista lihassoluistaan. Sen sijaan tukivaiheen vertikaalinen voimantuottokyky on maksimaalista juoksunopeutta rajoittava tekijä. (Weyand ym. 2000.) Voimantuoton merkitys juoksunopeuden kannalta on havaittu myös aikaisemmissa tutkimuksissa (mm. Mero & Komi 1986). Lähes kuka tahansa kykenee pyörittämään jalkojaan ilmassa huippupikajuoksijoille tyypillisen askeltiheyden vaatimalla nopeudella, noin viisi kertaa sekunnissa, koska vastusvoimat ovat pieniä. Valmennuksessa kuitenkin käytetään edelleen paljon aikaa jalkojen liikenopeuden kehittämiseksi ja tekniikan hiomiseksi nopeamman jalan heilahduksen saavuttamiseksi. Puhtaasti kinemaattiset tutkimukset (Mann 1984; Mann & Herman 1985) eivät ole ottaneet huomioon juoksussa tuotettuja voimia, ja ovatkin täten puutteellisia. Niiden pohjalta ei voida tehdä suoria yleistyksiä kaikille eri tasoisille juoksijoille optimaalisesta juoksutekniikasta. Pikajuoksussa tuotetut reaktiivoimat ovat liian suuria ja nopeita, jotta ne voitaisiin tuottaa puhtaasti tahdonalaisesti mekaanisella lihastyöllä (Cavagna 2006; Roberts ym. 1997). Voi siis olla mahdollista, että yksilöllinen juoksutekniikka on seurausta voimantuotosta eikä toisinpäin.

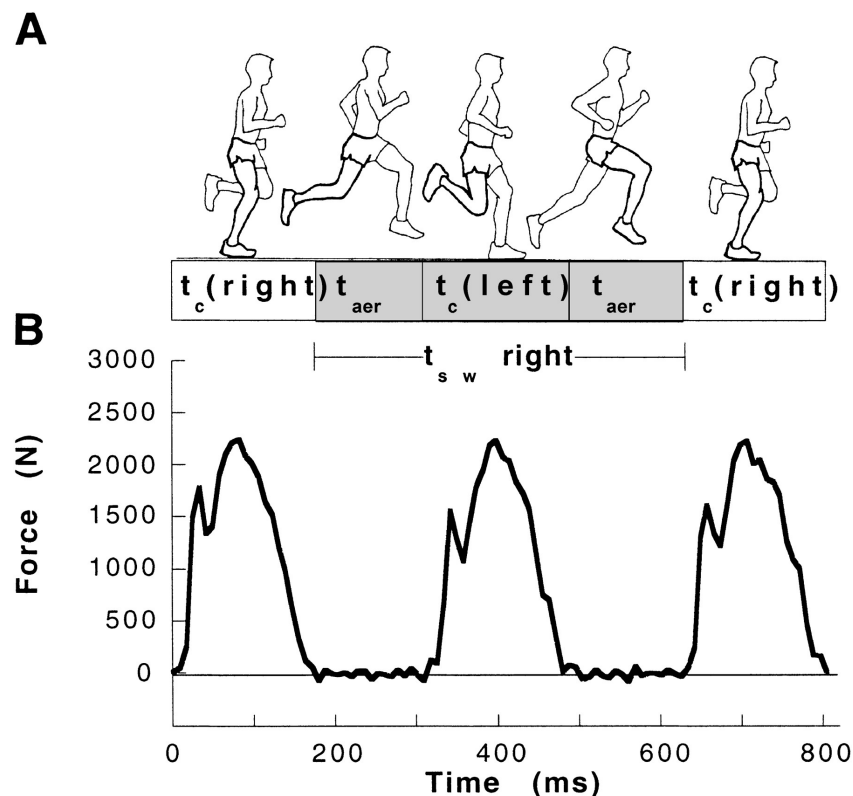
Tämän tutkimuksen tarkoituksena on tarkastella maksimaaliseen juoksunopeuteen vaikuttavia mekaanisia tekijöitä uusimman tutkimustiedon valossa. Tarkoituksena on selvittää käyttävätkö juoksijat tahdonalaisia teknisiä muutoksia juoksumekaniikassaan (esim. aktiivinen kuopaisu) lisätäkseen juoksunopeutta, vai ovatko nämä tekijät vain yksilöllisiä piirteitä ilman suoraa yhteyttä maksimaaliseen nopeuteen.

2 PIKAJUOKSUN BIOMEKANIikka

Juoksunopeuden peruskaava on

$$\text{Nopeus [m}\cdot\text{s}^{-1}] = \text{askeltiheys [Hz]} \cdot \text{askelpituus [m]}.$$

Askelsykli (Kuva 1) voidaan jakaa tukivaiheeseen ja lentovaiheeseen, joista vain tukivaiheen aikana voidaan tuottaa positiivista työtä nopeuden lisäämiseksi. Lentovaiheen, eli kahden peräkkäisen tukivaiheen välin, aikana ilmanvastus vaikuttaa jonkin verran nopeutta hidastavasti. Yleensä ero juoksun ja kävelyn välillä on määritelty siten, että kävelyssä lentovaihetta ei esiinny, vaikka parempi määritelmä liittyykin painopisteen liikkeeseen kontaktin aikana. Juoksussa painopiste laskee kontaktin puoliväliin eli keskitukivaiheeseen asti, kun taas kävelyssä se saavuttaa lakikorkeuden samassa pisteessä. (Cavagna ym. 1971; Cavagna & Kaneko 1977; Cavagna ym. 1988.)



KUVA 1. Askelsyklin vaiheet juoksussa (A) ja tyypillinen vertikaalinen reaktiivoimakuvajaaja (B). t_c on kontaktiaika, t_{aer} lentoaika ja t_{sw} jalan heilahdusaika. (Weyand ym. 2000).

Tukivaihe voidaan jakaa jarruttavaan ja työntävään vaiheeseen joko painopisteen vertikaalisen liikkeen tai horisontaalisen reaktivoiman mukaan. Jarrutusvaihe aiheutuu heilahtavan jalan alastulosta maahan hiukan kehon painopisteen etupuolelle. Jalka liikkuu ennen kontaktia alas- ja eteenpäin maahan nähden, jolloin Newtonin kolmannen lain mukaisesti, jalan pysähtyessä maan pintaan, juoksijaan kohdistuu yhtä suuri, mutta vastakkaisuuntainen voima. Työntävä vaihe alkaa kun painopiste aloittaa nousevan liikkeen tai horisontaalinen reaktivoima muuttuu positiiviseksi. (Mero ym. 1986.)

Tukivaiheen kestoa kutsutaan kontaktiajaksi (t_c) ja lentovaiheen kestoa lentoajaksi (t_{acr}). Aikaa jonka toinen jalka on ilmassa kutsutaan jalan heilahdusajaksi (t_{sw}). Heilahdusaika muodostuu siis vastakkaisen jalan kontaktiajan ja kahden lentoajan summasta. Tämän perusteella askeltiheyttä voidaan kasvattaa joko lyhentämällä kontaktiaikaa tai heilahdusaikaa. Mikäli suurin osa jalan heilahdukseen tarvittavasta mekaanisesta energiasta saadaan passiivisesti elastisten osien vapauttamana sekä segmenttien välisten energiansiirtojen kautta, aktiivisen lihastyön sijaan, lihassolujen nopeus ei vaikuttaisi minimiheilahdusaikaan merkittävästi. Toisin sanottuna askeltiheyden eniten vaikuttava tekijä maksimaalisessa juoksunopeudessa on kontaktiaika, joka pienenee juoksunopeuden kasvaessa (Cavagna & Kaneko 1977; Weyand ym. 2000).

Ihmiset käyttävät sekä askeltiheyden että askelpituuden muutoksia lisätessään juoksunopeuttaan, mutta eri suhteissa nopeuskäyrän eri päissä. Hitaista nopeuksista lähdettäessä lisätään ensin suhteessa enemmän askelpituutta, askeltiheyden ollessa suuremmassa osassa lähestyttäessä maksiminopeutta. Askeltiheyttä lisätään lyhentämällä lentoaikaa ja kontaktiaikaa, mikä näyttäisi tapahtuvan muuttamatta jalan jäykkyyttä. Jalan täydelliselle heilahdukselle tarvittava minimiheilahdusaika asettaa kuitenkin rajoitteita lentoajan lyhentämiselle, jolloin loppuosa askeltiheyden kasvattamisesta tapahtuu lyhentämällä kontaktiaikaa. Minimiheilahdusaika näyttäisi olevan lähes identtinen juoksijoilla, joiden maksiminopeus eroaa jopa 1,8-kertaisesti. (Farley & Gonzalez 1996; Luhtanen & Komi 1978; Weyand 2000).

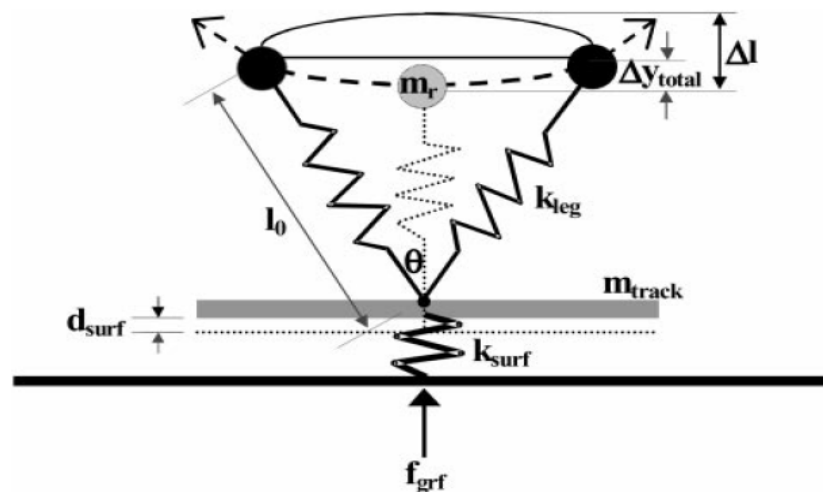
Mekaaniset keinot juoksunopeuden lisäämiseksi voidaan ilmaista myös yhdellä kaavalla jakamalla askelpituus kahteen tekijään (Weyand ym. 2000)

$$\text{Nopeus} = \text{askeltiheys} \cdot F_{\text{avg}}/W_b \cdot L_c,$$

missä F_{avg}/W_b on keskimääräinen juoksijan painoon suhteutettu vertikaalivoima tukivaiheen aikana eli tukivoima, ja L_c on kontaktimatka eli se matka, jonka kehon painopiste kulkee horisontaalisesti tukivaiheen aikana. Koska kontaktimatka on pitkälti juoksijan jalan pituudesta (matka kontaktipisteestä kehon painopisteeseen) riippuvainen, voidaan sen osuuden olettaa olevan minimaalinen juoksunopeuden lisäämisen kannalta (McMahon & Cheng 1990). Näin ollen voitaisiin olettaa askeltiheyden ja erityisesti tukivoiman olevan juoksunopeuden kannalta merkitseviä mekaanisia tekijöitä. Weyand ym. (2000) juoksumatolla tekemässä tutkimuksessa juoksijan tukivaiheen aikana tuottama tukivoima korreloi hyvin juoksunopeuden kanssa ($R^2 = 0,39$, $P = 0,01$).

2.1 Lihasten voimantuottoon vaikuttavia tekijöitä pikajuoksussa

Juoksun kuvaamisessa on yleisesti käytetty pomppivan kumipallon analogiaa (mm. Cavagna ym. 1988) ja sen mallintamiseen on kehitetty ns. jousi-massa-malli (kuva 2).



KUVA 2. Jousi-massa-malli ihmisen alaraajasta juoksussa ottaen huomioon alustan joustavuuden. Jalan pituus l_0 , kehon massa m_r , jalan jousivakio k_{leg} , jalkakulma kontaktin alussa θ , kehon painopisteen maksimaalinen korkeuden muutos Δy_{total} , jalkajousen maksimaalinen kompressio Δl , juoksualueen efektiivinen massa m_{track} , juoksualueen jousivakio k_{surf} , juoksualueen joustamisen määrä d_{surf} sekä vertikaalinen reaktiovoima f_{grf} . (Kerdok ym. 2002.)

Matalassa kulmassa tielle heitetty kumipallo pomppii eteenpäin säilyttäen hyvin nopeutensa käyttämällä pelkästään elastisen energian varastointia ja vapauttamista kontaktin aikana. Eläimen tuki- ja liikuntaelimestön voidaan ajatella toimivan mekaanisesti aktiivisena, epälineaarisenä ja moniosaisena jousi-massa-järjestelmänä. Jarrutusvaiheessa jousi painuu kasaan varastoiden mekaanista energiaa, ja työntövaiheessa palautuu lepopituuteensa vapauttaen varastoitua energiaa. Jousina toimivat lihakset, jänteet, nivelsiteet ja jopa luut. Yksinkertaistetussa mallissa ajatellaan pistemassan pomppivan passiivisesti massattoman jousen varassa ilman viskoottisia häviöitä. Mallin on havaittu kuvaavan erittäin hyvin liikkumisen mekaniikkaa sekä paikallaan hyppelyssä että eteenpäin suuntautuvassa hyppelyssä eli juoksussa. (Blickhan 1989; Enoka 2002; Farley & Gonzalez 1996; Kerdok ym. 2002; McMahon & Cheng 1990; Seyfarth ym. 2003.)

Malli ennustaa juoksunopeuden kasvaessa mm. jousen jäykkyyden kasvamisen, painopisteen vertikaalisen liikkeen vähenemisen ja kontaktiajan pienenemisen. Lyhyt kontaktiaika aiheuttaa tarvittavan vertikaalivoiman huippuarvon kasvamisen suhteessa juoksunopeuteen. (Blickhan 1989.) Nämä tulokset vastaavat pitkälti pikajuoksijoilla tehtyjä mittaustuloksia (mm. Mero & Komi 1986). Ihmisjuoksijat eivät kuitenkaan näyttäsi lisäävän jousen jäykkyyttä nopeuden kasvaessa, vaan kontaktiajan lyheneminen ja vertikaalisen liikkeen väheneminen saavutetaan tukijalan kontaktin aikana kääntymää kulmaa 20° kasvattamalla (Farley & Gonzalez 1996). Jalkajousen jäykkyyteen vaikuttavat mm. lihasten aktiivisuus ja jalan geometria kontaktin aikana, mutta sen säätelymekanismeja ei täysin tunneta (Enoka 2002; McMahon ym. 1987).

Pikajuoksussa tukivaiheen aikana tuotetut keskimääräiset vertikaalivoimat ovat yli kaksi kertaa kehon painon suuruisia, ja ne kasvavat lähes lineaarisesti nopeuden lisääntyessä. Vertikaalivoiman huippuarvot voivat olla jopa viisi kertaa kehon painon suuruisia. Tarvittavan voiman tuottaminen tahdonalaisesti supistuvan osan mekaanisella lihastyöllä ei ole mahdollista. (Cavagna 2006; Weyand ym. 2000.) Erityisesti täytyy ottaa huomioon voimantuottonopeus, joka ylittää huomattavasti konsentrisen lihastyön mahdollisuudet. Tyypillinen kontaktiaika maksiminopeuden vaiheessa on vain 0,080-0,100 sekuntia, josta työntövaiheen osuus on noin 55 % (Mero ym. 1992). Jousi-massa-malli tarjoaa kuitenkin tähän ongelmaan ratkaisun: lihasten supistuvat osat toimivat lähes isometrisesti elastisten osien venymisen ja rekyylin tehdessä työn. Isometrinen lihastyötapa mahdol-

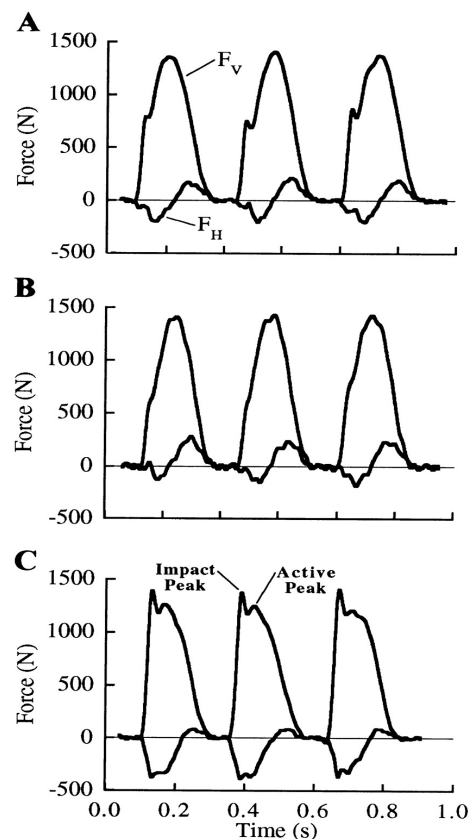
listaa suuren voimantuoton ja taloudellisuuden. Juoksunopeuden kasvaessa lihaksen supistuvan komponentin tekemä työ vähenee progressiivisesti johtuen kahdesta syystä: jänteiden suuremmasta suhteellisesta pituuden muutoksesta jarrutusvaiheessa ja voimantuottokyvyn pienentymisestä lihaksen lyhenemisnopeuden kasvaessa. Tämän vuoksi suurilla juoksunopeuksilla työntövaiheessa vapautettu mekaaninen energia on käytännössä ainoastaan aikaisemmin elastisiin osiin varastoitua, ja supistuvan osan tehtäväksi jää tuottaa riittävän suuri voima hyödyntämään koko elastisten osien venytyskapasiteetti mekaanisen energian varastointia varten (Cavagna 2006; Enoka 2002; Roberts ym. 1997; Roberts & Scales 2002.) Venytysrefleksillä on luultavasti voimantuottoa lisäävä merkitys tukivaiheen aikana (Komi 2000).

2.2 Reaktivoimat pikajuoksussa

Newtonin kolmannen lain mukaisesti kappaleen vaikuttaessa toiseen kappaleeseen voimalla F , vaikuttaa siihen saman suuruinen, mutta vastakkaissuuntainen voima $-F$. Voimalevyillä voidaan mitata näitä reaktivoimia (Enoka 2002). Juoksussa painovoima vaikuttaa kiihdyttämällä ilmassa lentävän kehon painopistettä alaspäin kohti maata. Tästä aiheutuu tukivaiheen aikana nähtävä vertikaalinen reaktivoima. Lihakset toimivat tukivaiheen aikana vastustaen tätä kiihtymistä tuottamalla tukivoimaa, joka estää juoksijan lyyhistymisen kasaan, ja samalla varastoituu mekaanista energiaa mm. jänteisiin. Juoksussa vertikaaliset voimat ovat keskimäärin 5-10 kertaa suurempia kuin horisontaaliset (Munro & Miller 1987). Sekä vertikaalinen että horisontaalinen voima kasvavat juoksunopeuden kasvaessa (Mero & Komi 1986).

Horisontaaliset voimat ovat merkitsevässä osassa kiihdytysvaiheessa, mutta tasaisen nopeuden vaiheessa jarruttava ja kiihdyttävä impulssi ovat yhtä suuret jos ilmanvastusta ei oteta huomioon (Roberts & Scales 2002; Harland & Steele 1997). Vertikaalivoimien vallitsevuudelle juoksussa on syynsä. Niiden tuottaminen on huomattavasti taloudellisempaa kuin horisontaalivoimien (Chang & Kram 1999). Kuvassa 3 on esitetty tyypilliset voimakuvaajat $3,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ juoksunopeudella eri tilanteissa. Kuvaajista huomataan kuinka horisontaalivoima käyttäytyy riippuen vastustetaanko vai avustetaanko juoksua horisontaalisesti, jotta nopeus pysyisi vakiona. Jarruttava ja työntävä horisontaalinen

impulssi ovat yhtä suuret kun ulkoisia jarruttavia voimia ei ole. Kun juoksijaa vastustetaan horisontaalisesti, kasvaa työntävä impulssi suuremmaksi kuin jarruttava ja päin vastoin. Urheilijoilla tehdyissä tutkimuksissa ns. ylinopeusvedoissa, eli urheilijaa horisontaalisesti avustamalla, on havaittu saman suuntaisia muutoksia reaktiivoimissa (Mero ym. 1986 & 1987). Myös muuttamalla juoksualustan kallistusta voidaan vaikuttaa reaktiivoimiin vastaavasti; alamäen korostaessa jarruttavia horisontaalivoimia, ja ylämäen korostaessa työntäviä horisontaalivoimia (Gottschall & Kram 2005).



KUVA 3. Tyypilliset vertikaali- ja horisontaalivoimakäyrät kolmelta askeleelta yhdeltä koehenkilöltä. Ensimmäisessä tapauksessa (A) avustamaton, toisessa (B) horisontaalisesti vastustettu (6 % kehon painosta) ja kolmannessa (C) horisontaalisesti avustettu (15 % kehon painosta) juoksu. (Chang & Kram 1999.)

Chang ym. (2000) havaitsivat, että painovoima vaikuttaa itseasiassa enemmän horisontaali- ja vertikaalivoimien suuruuteen kuin inertia. Koehenkilöt muuttivat vertikaali- ja horisontaalivoimantuottoa kontaktin eri vaiheissa siten, että resultanttivoimavektorin suunta säilyi lähes muuttumattomana, huolimatta lähes kolminkertaisesta muutoksesta

voimien suuruudessa eri tilanteissa. Tämä resultanttivoimavektorin suunnan säilyttäminen suuren voimantuoton aikana auttaa minimoimaan yksittäisten lihasten tarvittavan voimantuoton linjaamalla resultanttivoimavektorin jalan pitkän akselin suuntaisesti, jolloin nivelten yli vaikuttavat momentit minimoituvat. Nämä havainnot viittaavat siihen, että juoksijoilla ei ole mitään syytä yrittää tahdonalaisesti (esim. aktiivisella kuopaisulla) vähentää jarrutusvoimia, koska liikkeiden säätely näyttäisi olevan automaattista resultanttivoimavektorin suunnan säilyttämiseksi optimaalisena kontaktin eri vaiheissa. (Chang ym. 2000; Seyfarth ym. 2003.)

2.3 Kinemaattiset muuttujat pikajuoksussa

Juoksua on tutkittu runsaasti kuvaamalla silmille näkyvässä olevaa tietoa eli kinemaattisia muuttujia (mm. Mann 1984; Mann & Herman 1985). Tässä tarkastelutavassa on kuitenkin heikkoutensa. Se ei kerro miten havaitut liikkeet aiheutuvat tai miten ne vaikuttavat voimantuottoon – se ei kerro tapahtumien välistä syy-seuraus-suhdetta.

Kädet. Käsien liikkeiden merkityksen maksiminopeuden vaiheessa on havaittu olevan pientä, lähinnä tasapainon säilyttämiseen viittaavaa (Mann 1984; Mann & Herman 1985; Mero ym. 1986). Kiihdytysvaiheessa ihmisjuoksijat käyttävät kuitenkin käsiään suuren vartalon nojan lisäksi siirtämään painopistettä eteenpäin tehokkaan kiihdytysasennon mahdollistamiseksi eli linjaamaan resultanttireaktiivoimavektorin painopisteen kanssa (Harland & Steele 1997; Roberts & Scales 2002).

Heilahtava jalka. Heilahtavan jalan liikettä on myös tutkittu suhteellisen paljon. Esimerkiksi reiden eteenheilahdusnopeuden ja juoksunopeuden välillä ei ole havaittu yhteyttä. Myöskään jalan kuopaisunopeudella (säären kulmanopeus ja jalkaterän horisontaalinopeus ennen kontaktia) ei ole havaittu yksiselitteistä yhteyttä juoksunopeuteen. (Mann & Herman 1985.) Esimerkiksi taulukon 1 arvoja vertailemalla nähdään kuinka kahdeksanneksi sijoittuneen aktiivista kuopaisua kuvaavat arvot, säären kulmanopeus ja jalkaterän nopeus, olivat paremmat kuin hopeamitalistin, osin jopa paremmat kuin kultamitalistin. Silti juoksunopeus, ja kontaktipisteen etäisyys kehon painopisteestä kontaktin alussa, olivat selkeästi heikommat. Näissä muuttujissa nähdään siis yksilöllistä vaih-

telua muttei selkeää yhteyttä juoksunopeuteen. Seyfarth ym. (2003) lisäsivät jousi-massa-malliin jalan retraktion vakiokulmanopeudella ennen kontaktia ja havaitsivat sen lisäävän alastulon vakautta juoksussa. Retraktionopeuden vaihtelu näyttäisi mahdollistavan eri jalan jäykkyyksien ja maahantulokulmien käytön, mutta sen kontrollointi tapahtuu ns. feedforward-periaatteella. Tämä tarkoittaisi sitä, ettei jalkaa voi tähdätä haluttuun kohteeseen maassa, vaan ohjaus tapahtuu automaattisesti taustalla ilman tietoisia prosesseja. Juoksijat näyttäisivät valitsevan automaattisesti lähes saman alastulokulman myös joutuessaan heilauttamaan jalan odottamattomien esteiden yli sekä muunnetuissa painovoima- ja massaolosuhteissa ilman tekniikkaharjoittelua. (Chang ym 2000; Seyfarth ym. 2003.) Luonnostaan valitun juoksumekaniikan muuttamisella voi olla jopa selvästi negatiivisia vaikutuksia suorituskykyyn (Farley & Gonzalez 1996).

Aktiivisen kuopaisun, eli ennen kontaktia tapahtuvan jalan tahdonalaisen alas- ja taaksepäin kiihtyvän liikkeen, uskotaan kuitenkin vähentävän jarrutusvoimia asettamalla jalan lähes suoraan painopisteen alapuolelle ja näin mahdollistavan suuremman juoksunopeuden. Kuitenkaan yhdeltäkään juoksijalta ei ole mitattu maahan nähden negatiivista kontaktiin tulevan jalan nopeutta tai juurikaan alle 20 cm alastuloetäisyyttä. (Mann ym. 1984; Mero ym. 1992.) Heilahtavan jalan retraktiolla on merkitystä alastulon vakauden kannalta (Seyfarth ym. 2003), mutta kiihtyvä liike todennäköisesti aiheuttaisi vain suurempia iskuvoimia, jotka ovat häviöllisiä, eivätkä täten mahdollistaisi tehokkaampaa voimantuottoa kontaktin aikana (Chang & Kram 1999). Horisontaaliset jarrutus- ja työntövoimat ovat tärkeitä tasapainon kannalta koska ne auttavat säilyttämään resultant-tireaktiovoimavektorin linjassa painopisteeseen nähden (Roberts & Scales 2002). Edellä mainitut havainnot ihmisjuoksijoiden voimantuoton muutoksista kevennetyssä painovoimassa tukevat tätä käsitystä (Chang ym. 2000).

Vaikka jalan maahantuloa painopisteen etupuolelle pidetään puutteellisen kuopaisun aiheuttamana, syy voikin olla siinä, että juoksija ei kykene tuottamaan riittävän suuria tukivoimia riittävän nopeasti, ja tästä johtuen ilmalentovaihe on liian lyhyt jalan täydelliselle heilahdukselle. Tällainen tekniikka mahdollistaa pienempien jalan jäykkyyksien käyttämisen kontaktiajan ja taloudellisuuden kustannuksella. Juoksija voi pienentää näin kehon läpi kontaktin aikana kulkevaa shokkia. (McMahon ym. 1987.) Lihaksen jousi-ominaisuudet ovat kehitettävissä tietyn tyyppisellä harjoittelulla, ja niitä muuttamalla

voitaisiin mahdollistaa myös suuremmat juoksunopeudet (Reich ym. 2000). Valmennuksessa yleisesti käytettyjen tekniikkadrillien, kuten aktiivinen kuopaisu, siirtovaikutus maksimaaliseen juoksuvauhtiin on kyseenalaista eikä siitä löydy tutkimustietoa.

TAULUKKO 1. Koottuja kinemaattisia muuttujia miesten 200 metrin olympiafinaalista vuodelta 1984. Mittaustulokset on kerätty 100 Hz kuvanopeudella 125/180 metrin kohdalta. Reiden kulmanopeus heilahduksen aikana on keskiarvonopeus molempiin suuntiin. Tulokset ovat keskiarvoja vähintään kahdesta askeleesta. (Mann & Herman 1985.)

Kinemaattinen muuttuja	Kultamitalisti	Hopeamitalisti	Kahdeksas
Horisontaalinen nopeus (m/s)	10,21/10,82	9,93/10,39	9,29/9,96
Askelpituus (m)	2,38/2,48	2,38/2,49	2,31/2,38
Askeltiheys (Hz)	4,30/4,35	4,17/4,17	4,01/4,17
Kontaktiaika (s)	0,10/0,10	0,11/0,11	0,13/0,12
Lentoaika (s)	0,13/0,13	0,13/0,13	0,12/0,12
Reiden kulmanopeus (astetta/s)			
- kontaktin alussa	-228/-153	-200/-157	-228/-150
- tukivaiheen aikana	-429/-472	-378/-481	-328/-419
- heilahduksen aikana	301/344	257/313	308/420
Säären kulmanopeus (astetta/s)			
- kontaktin alussa	-330/-424	-115/-165	-150/-329
Kontaktipisteen etäisyys kehon painopisteestä (m)			
- kontaktin alussa	0,217/0,276	0,284/0,286	0,327/0,309
Jalkaterän nopeus (m/s)			
- kontaktin alussa	-7,93/-7,18	-5,84/-5,22	-6,47/-7,20

Mero ym. (1986) mittasivat mm. heilahtavan reiden painopisteen horisontaalisen nopeuden tukivaiheen jarrutus- ($12,38 \pm 0,58 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) ja työntövaiheessa ($11,78 \pm 0,97 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) miesjuoksijoilla, joiden nopeus oli $9,58 \pm 0,46 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Toisessa tutkimuksessa heilahtavan reiden maksimaaliseksi nopeudeksi vastakkaisen jalan kontaktin aikana saatiin $12,91 \pm 0,66 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ juoksijoiden nopeuden ollessa $9,85 \pm 0,47 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (Mero ym. 1987).

Weyand ym. (2000) eivät havainneet merkitsevää eroa jalan heilahdusajassa hitaimman ($6,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) ja nopeimman ($11,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) juoksijan välillä. Jos jalan heilahduksen tahdonalaisella nopeuttamisella olisi merkitystä, olisi sen voinut olettaa näkyvän selvänä muutoksena heilahdusajassa kun juoksunopeus muuttuu 1,8-kertaiseksi. Näiden tutkimustulosten pohjalta voidaan olettaa, että eri nopeuksisten juoksijoiden tekniikassa esiintyy yksilöllisiä eroja, mutta ne eivät ole välttämättä mekaanisia keinoja, joilla suurempi maksimaalinen juoksunopeus voidaan saavuttaa. Nopeammat juoksijat eivät myöskään

tällöin hyödynnä parempaa voimantuottokykyään heilahtavan jalan nopeampaan liikuttamiseen. Todennäköisesti heilahtavan jalan liike tapahtuukin lähes passiivisesti aikaisemmin mainittuja mekanismeja hyödyntäen. (Weyand ym. 2000.)

Tukijalka. Kuten myös taulukosta 1 käy ilmi, tukivaiheen aikaisen lonkan ojentumista kuvaavan reiden kulmanopeuden on havaittu olevan nopeilla juoksijoilla suurempi (Mann 1984; Mann & Herman 1985), mutta tämä voi johtua yksinkertaisesti heidän suuremmasta juoksunopeudestaan. Kehon painopiste jatkaa matkaansa eteenpäin jalkaterän pysähtyessä maahan kontaktin alussa, ja tällöin myös lonkka ojentuu sitä nopeammin mitä nopeammin painopiste liikkuu inertian vaikutuksesta paikallaan olevan jalan yli. Toisin sanottuna kyseessä ei välttämättä ole tahdonalainen liike, johon tekniikalla voitaisiin vaikuttaa. Myös nilkan plantaarifleksorien rooli aktiivisina työntäjinä tukivaiheen lopussa on havaittu olevan pientä, ts. nilkan ojentuminen on vain passiivinen reaktio aikaisempaan venytykseen (Kuitunen ym. 2002; Mann 1981; Mann & Sprague 1980).

2.4 Juoksutekniikan vaikutusmekanismit nopeuteen

Jos jalan aktiivinen kuopaiseminen, tai mikä tahansa muu tahdonalainen tekninen muutos, vaikuttaisi maksimaalista juoksunopeutta parantavasti, täytyisi sen vaikuttaa joko lyhentämällä kontaktiaikaa, lisäämällä tukivoimaa tai kasvattamalla kontaktimatkaa. Mann ym. (1984) ehdottivatkin, että kontaktiajan lyhentäminen kävisi mm. tehokkaalla jalan kuopaisuliikkeellä. Toisaalta lyhyt kontaktiaika vaatii suuria jalan jäykkyysominaisuuksia ja voimantuottoa, joten mikäli urheilija ei näitä omaa, ei hän myöskään pysy juoksemaan samalla alastulotekniikalla kuin maailmanennätysmies. Tutkimustulokset viittaavat juoksijoiden käyttävän automaattisesti tekniikkaa, joka soveltuu heidän yksilölliselle rakenteelleen ja voimantuottokyvyilleen. Eläinten yleisesti käyttämällä jalan retraktiolla ennen kontaktia on vain alastulon vakautta lisäävä vaikutus. (Farley & Gonzales 1996; McMahan ym. 1987; Seyfarth ym. 2003.) Toinen vaihtoehto eli tukivoiman kasvattaminen aktiivisella jalan kuopaisuliikkeellä taas vaatisi liikemäärän säilymislain rikkomista. Ilmassa oleva ja maata kohden vapaasti putoava juoksija on ns. suljettu systeemi. Maahan (ulkopuolinen kappale) törmätessään se aiheuttaa impulssin,

joka kuvaa koko kehon kokemaa liikemäärän muutosta tukivaiheen aikana. Jalan eli yhden suljetun systeemin osan kiihdyttäminen maata kohden ei voi lisätä kehon kokonaisliikemäärää ja impulssia, joka tarvitaan koko kehon liikemäärän suunnan muuttamiseksi tukivaiheen aikana. Kolmannen tekijän eli kontaktimatkan ei ole havaittu olevan yhteydessä juoksunopeuteen. (McMahon & Cheng 1990; Weyand ym. 2000). On myös ehdotettu, että jalan aktiivinen alaspainaminen lisääsi lihasten esiaktiivisuutta, ja mahdollistaisi näin suuremman voimantuoton kontaktin aikana (Mero & Komi 1986). Tutkimustulokset eivät kuitenkaan tue juoksijan luontaisesti valitseman jalan jäykkyyden muuttamisen parantavan suorituskykyä, päinvastoin tämä voi jopa heikentää sitä (Farley & Gonzalez 1996).

3 TUTKIMUSONGELMAT

Tämän tutkimuksen tarkoituksena on selvittää maksimaaliseen juoksunopeuteen liittyvien mekaanisten tekijöiden merkitystä. Lisäksi tarkastellaan heilahtavan jalan tekniikkaa suhteessa juoksunopeuteen. Heilahtavan jalan muuttujista tarkastellaan reiden eteenheilahdusnopeutta lonkkanivelen kulmanopeutena, nilkan horisontaalista ja vertikaalista nopeutta ennen kontaktia sekä lonkan ojennusnopeutta eri vaiheissa askelsykliä. Nilkan liikettä tarkastellaan suhteessa juoksijan painopisteeseen käytettävään lonkan nivelpisteeseen. Jalan kokonaisheilahdusajalla arvioidaan jalan keskimääräistä heilahdusnopeutta.

Tutkimushypoteesit. Kirjallisuuskatsauksen perusteella voidaan olettaa, että juoksunopeuteen vaikuttaa ensisijaisesti tuotettu tukivoima F_{avg}/W_b ja toissijaisesti askeltiheys. Kontaktimatka vaihtelee yksilöllisesti lähinnä juoksijan jalan pituuden vaikutuksesta, eikä se ole merkitsevä tekijä juoksunopeuden kannalta. Jalan heilahdusaika ei myöskään riipu juoksunopeudesta, mikä asettaa käytännön rajoitteita tahdonalaisen tekniikan käytölle jalan heilahduksen nopeuttamiseksi. Reiden eteenheilahdusnopeuden voidaan täten olettaa olevan riippumaton juoksunopeudesta. Nilkan horisontaalinen nopeus maahan nähden oletettavasti hidastuu juuri ennen kontaktia tehokkaan alastulon aikaansaamiseksi, mutta yksilöt käyttävät nopeudesta riippumatta eri strategioita alastulossa.

4 MENETELMÄT

Koehenkilöinä toimi kuusi yleisurheilua aktiivisesti harrastavaa miestä, ja yksi harrastuksen jo lopettanut mieshenkilö. Kaikki koehenkilöt olivat muuten hyväkuntoisia, mutta yksi oli toipumassa flunssasta. Koehenkilöiden määrä jäi oletettua pienemmäksi mm. loukkaantumisten ja hallikilpailukauden alkamisen takia. Koehenkilöiden tiedot löytyvät taulukosta 2. Rasvaprosentti mitattiin ihopoimuista neljän pisteen menetelmällä (hauis, ojentaja, suoliluun harju ja rinta) ennen juoksumittauksia.

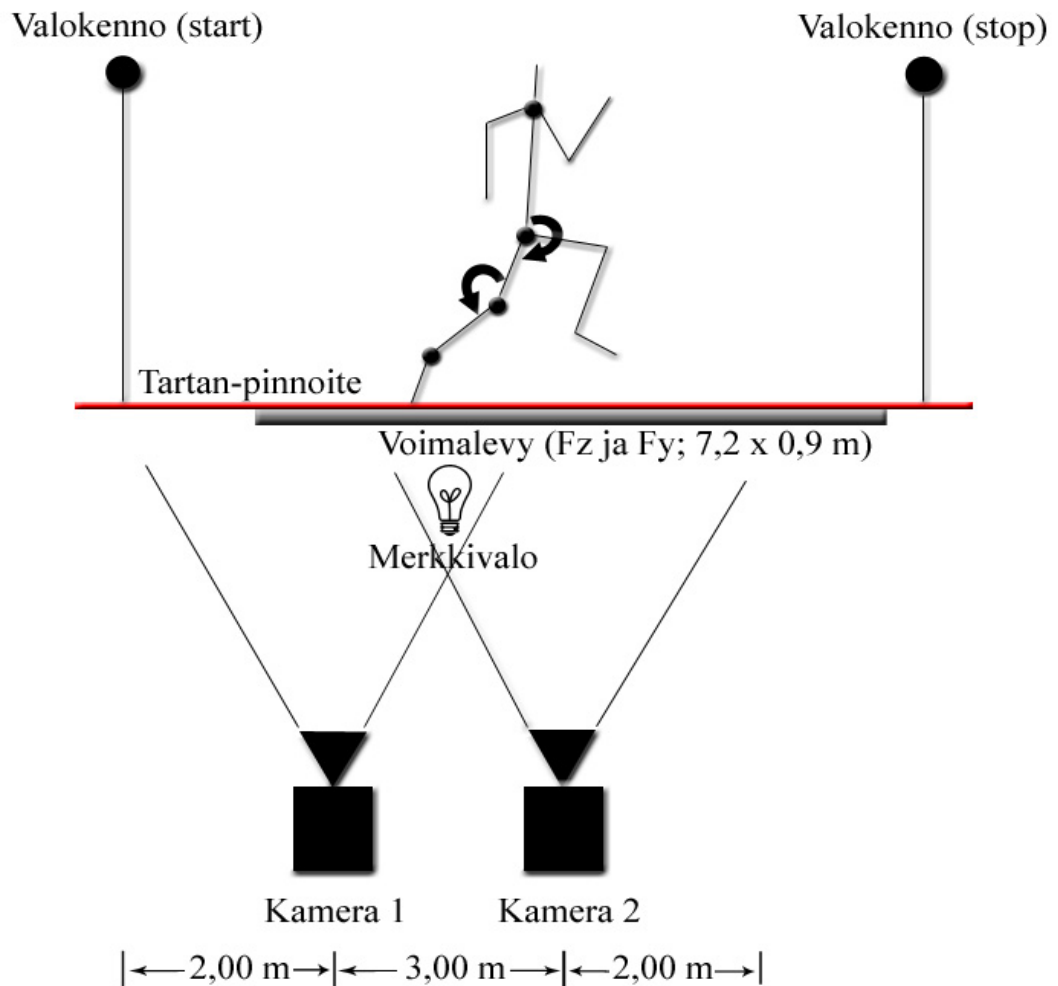
TAULUKKO 2. Koehenkilöiden tiedot (keskiarvo \pm keskihajonta).

	Miehet, n = 7
ikä (v)	26,3 \pm 10,1
pituus (cm)	177,3 \pm 5,1
paino (kg)	68,7 \pm 4,7
rasva-%	14,3 \pm 2,5
100m ennätys (s)	11,73 \pm 0,37

4.1 Tutkimusasetelma

Mittaukset suoritettiin sisähallissa tammikuussa 2007. Koehenkilöille selvitettiin ensin mittauksen kulku, ja he allekirjoittivat kirjallisen suostumuksen, minkä jälkeen kyseltiin henkilöiden pituus sekä mitattiin paino voimalevyllä ja rasvaprosentti. Seuraavaksi koehenkilöt saivat suorittaa normaalin verryttelyn sisältäen mm. hölkkää ja aukaisuvetoja oman valinnan mukaisesti. Verryttelyn jälkeen koehenkilöiden nivelpisteet merkittiin heijastavilla markkereilla liikeanalyysiä varten kehon oikealle puolelle. Tämän jälkeen koehenkilöt suorittivat kahdesta kolmeen maksimaalista lentävää 10 metrin juoksua 30-40 metrin kiihdytysmatkasta. Opastuksena henkilöitä kehoitettiin kiihdyttämään tavoitevauhtiin ennen ensimmäistä valokennoa ja ylläpitämään vauhdin mahdollisimman tasaisena 10 metrin mittausmatkan. Parhaimman juoksun ajan perusteella laskettiin submaksimaalisten nopeuksien (70 %, 80 % ja 90 %) tavoiteajat. Seuraavaksi urheilija suoritti kahdesta kolmeen yritystä jokaisella submaksimaalisella juoksunopeudella etukäteen ar-

votussa järjestyksessä. Hyväksyttävänä tarkkuutena pidettiin noin $\pm 2\%$:a tavoiteajasta. Juoksuista valittiin lähinnä tavoiteaikaa oleva juoksu analyysia varten. Palautusajat juoksujen välillä olivat noin 3-8 minuuttia. Kuvassa 4 on yhteenveto mittausasetelmasta.



KUVA 4. Mittausasetelma. Nivelkulmien mittaussuunnat on merkitty nuolilla kuvaan. Positiivinen kulmanopeus kuvaa siis aina kyseisen nivelen ojentumista.

4.2 Mittaukset

Juoksunopeus. Mittausten aikana juoksunopeutta kontrolloitiin valokennolaitteiston (Newtest Oy) avulla. Valokennot oli asetettu juoksijan pään korkeudelle parhaan mitaustarkkuuden saavuttamiseksi. Juoksuaika saatiin suoraan kellon näytöltä tuhannesosasekunnin tarkkuudella, sekä lisäksi se aiheutti merkkisignaalin tietokoneelle, josta se oli siis tarvittaessa mahdollista tarkistaa.

Reaktiovoimat. Juoksusta kerättiin vertikaaliset ja horisontaaliset reaktiovoimat 7,2 m x 0,9 m kokoisella voimalevyjonolla, jonka päällä oli Tartan-pinnoite (Raute Precision Oy, ominaisvärähtelytaajuudet 180 ± 10 Hz vertikaalivoimille ja 130 ± 10 Hz horisontaalivoimille). Voimasignaalit kerättiin tietokoneelle CED Signal -ohjelmalla (versio 3.08) näytteenottotaajuudella 1000 Hz, jolla ne myös myöhemmin analysoitiin.

Liikeanalyysit. Juoksut kuvattiin kohtisuorasti juoksijaan nähden 7 metrin matkalta, juoksijan oikealta puolelta, kahdella high-speed videokameralla (Sony Handycam HDR-HC3E), joiden kuvanopeus oli $200 \text{ kuvaa} \cdot \text{s}^{-1}$. Kamerat oli asetettu kolmen metrin etäisyydelle toisistaan, ja zoomattu siten, että niiden kuvausalueet olivat noin 4 metriä leveitä, ja kuvausalueiden keskellä oli yhden metrin päällekkäisyys. Kameroiden etäisyys juoksulinjasta oli 15 m, ja optisen akselin korkeus maan pinnasta mitattuna 99 cm. Tutkimuksen kannalta oleelliset pisteet – lateraalinen malleolus, femurin lateraalinen epikondylus, trochanter major ja olkapää – oli merkitty heijastavilla pallon muotoisilla markkereilla kehon oikealle puolelle. Ennen mittauksia suoritettiin kalibrointi asettamalla kalibrointikehikko (3,98 x 2,00 m) keskelle kunkin kameran kuvausaluetta. Nivelpistekoordinaatit digitoitiin (Peak Motus, versio 8.5) ja suodatettiin (Butterworth-aliäästösuodatin, rajataajuus 20 Hz) tietokoneella analyysiä varten. Tuloksena saadut nivelkulmat, kulmanopeudet sekä nivelpisteiden lineaariset nopeudet vietiin taulukkolaskenta-ohjelmaan (OpenOffice Calc, versio 2.0.4) analyysiä varten.

Synkronisointi. Kameroiden kuva-alueen päällekkäisellä alueella oli näkyvässä merkkivalo, joka syttyi vertikaalivoiman ylittäessä 500 N. Näin saatiin merkkisignaali sekä tietokoneelle että videolle datan synkronisointia varten (kuva 4).

4.3 Analyysit

Maksimaalisista juoksuista nopein, ja jokaisesta submaksimaalisesta juoksusta lähimpänä tavoitenopeutta oleva juoksu valittiin analysoitavaksi. Juoksusta määritettiin painopisteen keskimääräinen nopeus 10 metrin matkalta valokennojen avulla. Liikeanalyysissä painopisteen nopeuden arvioinnissa käytettiin oikean lonkan nivelpisteen nopeutta. Mitatusta voimadatasta määritettiin neljän peräkkäisen kontaktin vertikaali- ja horison-

taaliivoimien keski- ja huippuarvot. Tukivoima saatiin suhteuttamalla vertikaalinen keskiarvo voima juoksijan painoon. Juoksualustaan tuotetut efektiiviset impulssit määritettiin tukivoiman ja kontaktiajan tulona. Voimadatan perusteella laskettiin myös kontaktiaika, lentoaika sekä oikean jalan heilahdusaika. Askeltiheys laskettiin kahteen peräkkäiseen askeleeseen kuluneesta ajasta. Askelpituus saatiin jakamalla keskimääräinen nopeus lasketulla askeltiheydellä. Kontaktimatka laskettiin kertomalla keskimääräinen nopeus kontaktiajalla.

Liikeanalyysistä määritettiin heilahtavan nilkan nopeus 5 ms ajalta ennen kontaktia ja heilahtavan reiden nopeus lonkan kulmanopeutena vastakkaisen jalan kontaktin alussa ja keskiarvona sen aikana. Lisäksi lonkan kulmanopeus määritettiin 5 ms ajalta ennen oikean jalan kontaktia ja keskiarvona kontaktin aikana. Nivelkulmista analysoitiin minimipolvikulma kontaktin aikana sekä minimilonkkakulma askelsyklin aikana. Kaikkien muuttujien arvot laskettiin keskiarvona kahden peräkkäisen askelsyklin ajalta jos mahdollista.

4.4 Tilastolliset analyysit

Muuttujien tilastollisissa analyysissä käytettiin SPSS-ohjelman versiota 13.0. Muuttujille laskettiin keskiarvot ja keskihajonnat. Eri muuttujien merkitsevyyttä maksiminopeuden funktiona arvioitiin lineaarisen regression avulla. Juoksunopeuden vaikutusta eri muuttujiin tarkasteltiin käyttämällä toistomittaus ANOVA:a ja Bonferronin post-hoc -testiä. Tilastollisen merkitsevyyden tasot on merkitty seuraavin symbolein: * = $p < .05$, ** = $p < .01$ ja *** = $p < .001$.

5 TULOKSET

Mittausten tulosten esittely on jaettu kahteen osaan. Ensin käydään läpi saavutetut juoksunopeudet, voimantuotto ja joidenkin yleisten kinemaattisten muuttujien käyttäytymisen juoksunopeuden kasvaessa. Toisessa osassa tarkastellaan lähemmin heilahtavan jalan toimintaa ja sen yhteyttä maksimaaliseen juoksunopeuteen.

5.1 Juoksunopeudet ja reaktivoimat

Paras juoksija saavutti mittauksissa $9,73 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ nopeuden hitaimman jäädessä tästä $1,35 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Ero nopeimman ja hitaimman välillä oli siis vain 1,16-kertainen. Taulukossa 3 on esitetty kaikkien koehenkilöiden suorituksista lasketut keskiarvot ja keskihajonnat voimadatan perusteella.

TAULUKKO 3. Suoritusten keskiarvot ja keskihajonnat. Fz on vertikaalivoima, Fy horisontaalivoima ja Wb on kehonpaino. Tähdellä on merkitty tilastolliset merkitsevyydet siirryttäessä hitaammasta nopeudesta suurempaan.

	100%	90%	80%	70%
todellinen %	100	91,1 ± 1,4	79,4 ± 2,5	71,6 ± 2,1
nopeus (m/s)	9,12 ± 0,43***	8,32 ± 0,48***	7,24 ± 0,35***	6,53 ± 0,34
askeltiheys (Hz)	4,55 ± 0,33**	4 ± 0,20**	3,50 ± 0,09*	3,26 ± 0,15
askelpituus (m)	2,02 ± 0,14	2,09 ± 0,11	2,07 ± 0,09	2,01 ± 0,11
kontaktimatka (m)	0,98 ± 0,06	0,98 ± 0,04	0,97 ± 0,03	0,96 ± 0,04
kontaktaika (ms)	108 ± 8**	118 ± 8***	134 ± 9***	147 ± 10
% kontaktaijasta (jarutus / työntö)	42 / 58	44 / 56	44 / 56	46 / 54
lentoaika (ms)	113 ± 11*	133 ± 9*	152 ± 8	161 ± 14
heilahdusaika (ms)	331 ± 26**	379 ± 19**	434 ± 19	463 ± 26
max Fz / Wb	3,62 ± 0,32	3,63 ± 0,24	3,79 ± 0,33	3,61 ± 0,29
keskim. Fz / Wb	2,08 ± 0,09	2,15 ± 0,10	2,21 ± 0,11	2,12 ± 0,14
efektiivinen impulssi (s)	0,12 ± 0,01***	0,14 ± 0,01*	0,16 ± 0,01	0,16 ± 0,02
min Fy / Wb	-1,70 ± 0,47	-1,41 ± 0,29	-1,15 ± 0,33	-1,00 ± 0,23
max Fy / Wb	0,78 ± 0,10	0,80 ± 0,08**	0,72 ± 0,07	0,67 ± 0,10
horisontaalinen nettoimpulssi (Ns)	4,1 ± 1,2	5,1 ± 1,8	3,1 ± 3,4	1,0 ± 3,4

Koehenkilöt kasvattivat juoksunopeuttaan 70 %:sta 100 %:iin lisäämällä lähinnä askeltiheyttä ($p < .001$) askelpituuden säilyessä samana. Kontaktaika, efektiivinen impulssi ja heilahdusaika pienenevät nopeuden kasvaessa ($p < .001$), kuten myös lentoaika ($p < .01$). Kontaktimatka ei muuttunut nopeuden kasvaessa. Tuotettu maksimaalinen verti-

kaalivoima ei muuttunut nopeuden funktiona, kuten ei myöskään keskimääräinen vertikaalivoima. Horisontaalivoiman minimiarvo jarrutusvaiheessa kasvoi nopeuden kasvaessa ($p < .05$), mutta maksimiarvo työntövaiheessa ei kasvanut merkitsevästi kuin 80 ja 90 %:n välillä. Tuotetussa horisontaalisessa nettoimpulssissa ei ollut muutoksia eri juoksunopeuksien välillä. Seuraavan kappaleen lopussa olevan kuvasarjan kuvassa 7 on esitetty tyypillinen reaktiovoimakuvaaja vertikaali- ja horisontaalivoimasta maksimaalisessa pikajuoksussa.

Kun eri mekaanisten tekijöiden (askeltiheys, tukivoima ja kontaktimatka) vaikutusta maksimaaliseen juoksunopeuteen tarkasteltiin lineaarisella korrelaatiolla, ei merkitsevää yhteyttä löydetty minkään muuttujan osalta. Kontaktiajan ja askeltiheyden väliltä löytyi odotetusti vahva negatiivinen korrelaatio ($r = -0,85$, $p < .05$) samoin kuin lentoajan ja askeltiheyden ($r = -0,896$, $p < .01$) sekä heilahdusajan ja askeltiheyden väliltä ($r = 0,968$, $p < .001$). Kontaktimatka korreloi hyvin askelpituuden kanssa ($r = 0,778$, $p < .05$).

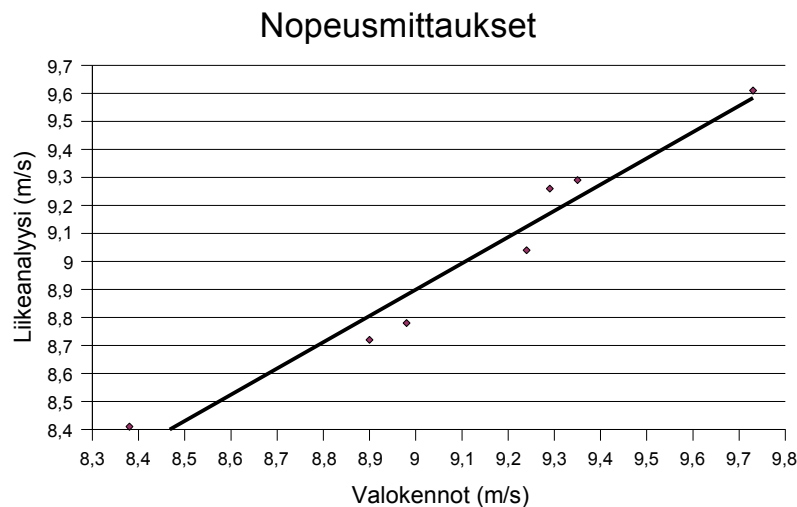
5.2 Heilahtavan jalan toiminta

Mitatuista kinemaattisista muuttujista juoksunopeuden kanssa korreloi merkitsevästi ainoastaan tukijalan lonkan ojennusnopeus kontaktin aikana ($r = 0,839$, $p < .05$). Taulukossa 4 on esitetty eri muuttujien keskiarvot maksimaalisessa juoksussa kaikilla koehenkilöillä.

TAULUKKO 4. Eri juoksijoiden kinemaattisia muuttujia järjestettynä juoksunopeuden mukaan. Ns. juoksuteknisesti parhaat arvot näkyvät tummennettuina.

	1	2	3	4	5	6	7
keskimääräinen juoksunopeus (m/s)	9,73	9,35	9,29	9,24	8,96	8,91	8,38
lonkan nivelpisteen keskinopeus (m/s)	9,61	9,26	9,29	9,04	8,78	8,72	8,41
oikean nilkan nopeus 5 ms ennen kontaktia							
- horisontaalinen (m/s)	-5,43	-4,54	-5,60	-5,36	-5,59	-6,28	-5,47
- vertikaalinen (m/s)	-2,21	-1,97	-2,29	-2,40	-1,52	-0,81	-1,80
- resultantti (m/s)	5,86	4,95	6,05	5,87	5,79	6,33	5,75
oikean lonkan kulmanopeus (astetta/s)							
- 5 ms ennen kontaktia	-214	-308	-489	-210	-179	-377	-318
- kontaktin aikana (ka)	-487	-506	-436	-438	-476	-391	-324
- vasemman jalan kontaktin alussa	355	409	442	492	585	439	444
- vasemman jalan kontaktin aikana (ka)	391	474	491	624	444	359	368
minimipolvikulma kontaktin aikana	148	130	137	135	142	125	137
minimilonkkakulma	119	109	116	109	114	132	116

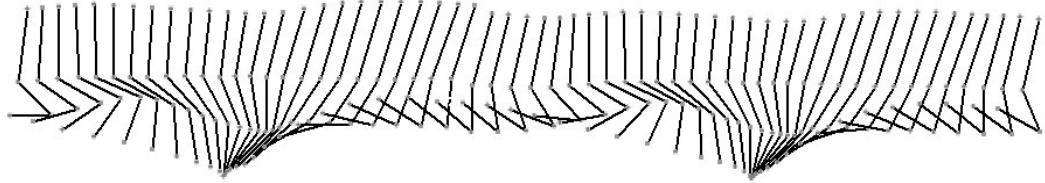
Liikeanalyysistä määritetty lonkan nivelpisteen keskimääräinen nopeus 7 metrin matkalla aliarvioi hiukan valokennoilla 10 metrin matkalta mitattua keskinopeutta ($p < .05$). Kuten kuvasta 5 käy ilmi, nopeuksien välinen korrelaatio oli kuitenkin voimakas ($r = 0,975$, $p < .001$). Heilahtavan jalan nilkan nivelpisteen horisontaalinen nopeus 5 millisekunnin ajalta ennen kontaktia vaihteli välillä $-6,28$ ja $-4,54 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, eikä merkitsevää korrelaatiota juoksunopeuteen löytynyt riippumatta tarkasteltiin horisontaalista, vertikaalista vai resultanttinopeutta. Oikean lonkan kulmanopeutta ennen kontaktia voidaan myös pitää yhtenä kuopaisua ilmentävänä muuttujana. Myöskään siinä ei havaittu korrelaatiota juoksunopeuteen. Reiden eteenheilahdusnopeutta kuvattiin oikean lonkan kulmanopeutena vastakkaisen jalan kontaktin alussa ja keskiarvona sen aikana. Tässäkään nopeudessa ei havaittu korrelaatiota juoksunopeuteen. Taulukossa on lisäksi esitetty minimipolvikulma kontaktin aikana, joka kuvaa polvinivelen jäykkyyttä. Minimilonkkukulma kertoo kuinka korkealle polvea on nostettu eteenheilahduksen aikana. Näissä muuttujissa ei havaittu eroja suhteessa juoksunopeuteen.



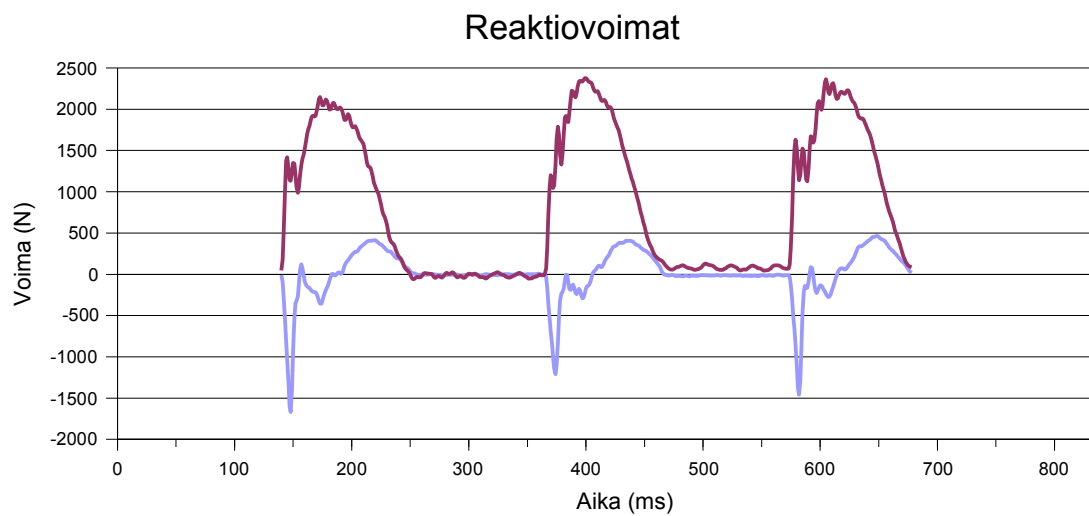
KUVA 5. Valokennojen ja liikeanalyysin avulla määritetty keskimääräinen juoksunopeus korreloivat voimakkaasti keskenään ($r = 0,975$, $p < .001$).

Kuvissa 6-10 on esitetty yhden koehenkilön tikku-ukko-malli, reaktiivoimat, nopeuskäyrät heilahtavan nilkan toiminnasta sekä nivelkulmien muutokset ja kulmanopeudet maksimaalisessa pikajuoksussa. Kuvista nähdään tyypillinen jalan retraktioliike ennen kontaktia, eli nilkan nivelpisteen horisontaalisen nopeuden hidastuminen maahan nähden. Lonkkanivel ojentuu koko kontaktin ajan, mutta polvikulmassa nähdään pieni joustoliike keskitukivaiheeseen ja ojentuminen kontaktin loppuun. Lonkan ojentumisen kul-

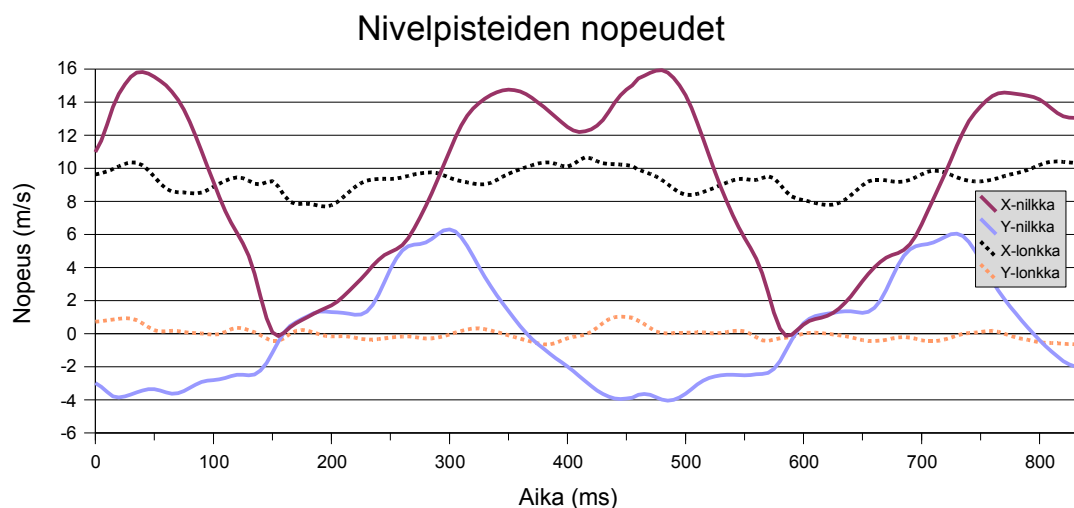
manopeus hidastuu kontaktin alussa ja kiihtyy jälleen kohti kontaktin loppua, saavuttaen maksiminopeuden kontaktin lopussa lähes yhtäaikaisesti polvinivelen maksimikulmanopeuden kanssa.



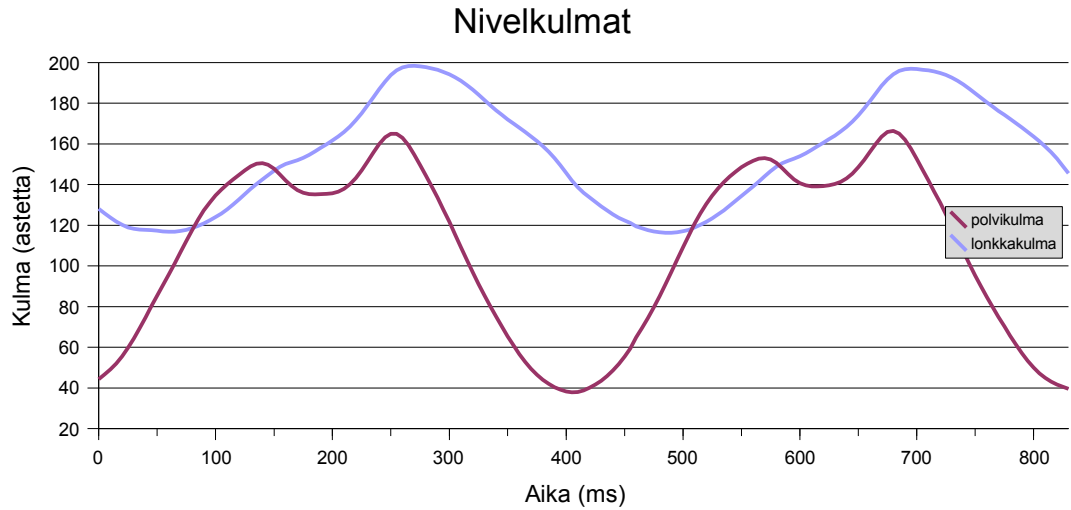
KUVA 6. Tikku-ukko-malli esimerkkisuorituksesta.



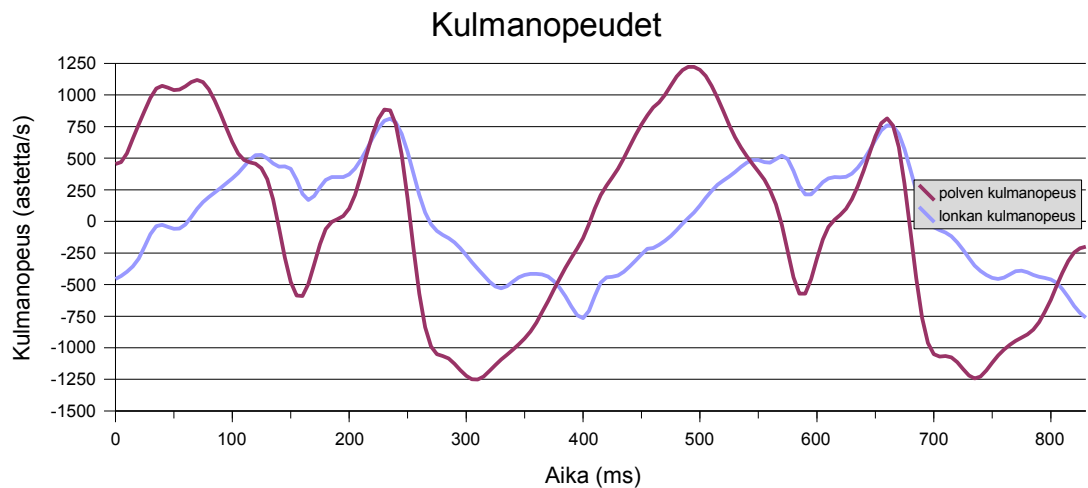
KUVA 7. Vertikaalinen (tumma viiva) ja horisontaalinen (vaalea viiva) reaktiivoima.



KUVA 8. Nilkan ja lonkan (katkoviivalla) nivelpisteiden horisontaali- ja vertikaalinopeudet. Oikean jalan kontaktit ovat aikaväleillä 140-240 ms ja 575-670 ms. Nilkan horisontaalinen nopeus maahan nähden hidastuu ennen kontaktia, mutta vertikaalinen nopeus pysyy lähes vakiona.



KUVA 9. Polven ja lonkan nivelkulmat. Oikean jalan kontaktit ovat aikaväleillä 140-240 ms ja 575-670 ms. Kontaktin aikana polvi koukistuu ensin ja ojentuu kontaktin loppuun, kun taas lonkkanivel ojentuu koko kontaktin ajan.



KUVA 10. Polven ja lonkan kulmanopeudet. Oikean jalan kontaktit ovat aikaväleillä 140-240 ms ja 575-670 ms. Kontaktin alussa lonkan ojentuminen hidastuu ensin, mutta kiihtyy kontaktin loppuun. Polvi koukistuu kontaktin alussa, mutta ojentuu kiihtyvästi kontaktin loppuun saavuttaen maksimin lonkan kanssa samanaikaisesti maastairtoamishetkellä.

6 POHDINTA

Juoksijat kasvattivat nopeuttaan lähinnä lisäämällä askeltiheyttä. Tämän johdosta myös heilahdusaika lyheni nopeuden kasvaessa. Minimiheilahdusajassa ei kuitenkaan havaittu korrelaatiota nopeuden suhteen, joten jalan heilahdukseen kuluva aika ei todennäköisesti ole nopeutta rajoittava tekijä. Kontaktimatka säilyi vakiona juoksunopeuden kasvaessa kaikilla juoksijoilla kontaktiajan lyhentyessä kuten odotettua. Kontaktimatka korreloi hyvin askelpituuden kanssa, mutta juoksijan pituus ei yllättäen korreloinut kontaktimatkan kanssa. Tätä voi selittää juoksijoiden erilainen ruumiinrakenne, joten olisi ollut mielenkiintoista mitata myös jalan pituus suoraan vertailua varten. Supramaksimaalisessa juoksussa on havaittu kontaktiaikojen säilyvän maksimaalisen juoksun tasolla, mikä kasvattaa tällöin kontaktimatkaa (Mero ym. 1986 & 1987). Tämän perusteella supramaksimaalisessa pikajuoksuharjoittelussa juoksunopeuden kasvu saavutetaan käyttämällä eri mekanismeista kuin normaalissa maksimaalisessa juoksussa, mikä voi asettaa jollain osin kyseenalaiseksi tämän harjoitusmuodon hyödyllisyyden.

Koehenkilöiden odotettua pienemmäksi jäänyt lukumäärä ja suorituskyvyn tasaisuus johtivat siihen, että tilastollisesti merkitseviä korrelaatioita ei löytynyt nopeuteen vaikuttavissa mekaanisissa tekijöissä. Nopein juoksija oli nyt vain 1,16 kertaa nopeampi kuin hitain (9,73 vs 8,38 m·s⁻¹). Weyandin ym. (2000) tekemässä tutkimuksessa nopein juoksija oli 1,8 kertaa nopeampi kuin hitain, ja koehenkilöiden lukumäärä oli 24. Nopeuden vaihteluvälin ollessa pieni, voivat juoksijoiden käyttämät erilaiset keinot juoksunopeuden kasvattamiseksi lisätä hajontaa niin paljon, että tulosten merkitsevyys katoaa. Esimerkiksi nyt mukana oli hyvin eri tyyppisiä juoksijoita kun tarkastellaan kontaktiaikoja ja askelpituuksia. Osa juoksijoista käytti pitkää askelpituutta ja kontaktiaikaa, jolloin voimantuotto oli suhteessa suurempaa kuin niillä, jotka juoksivat lyhyemmällä askeleella ja kontaktiajalla lähes vastaavalla nopeudella. Vertikaalinen voimantuotto määrää nimenomaan askelpituuden tietyllä juoksuvauhdilla, ja kun koehenkilöt eivät kyenneet askelpituuttaan lisäämään, ei muutosta nähty myöskään voimantuotossa. Kun kaikkia suorituksia tarkasteltiin vielä yhtenä ryhmänä, ja nopeutta korreloitiin eri muuttujiin, askeltiheys korreloi nopeuden kanssa erittäin voimakkaasti ($r = 0,919$, $p < .001$) kun

taas askelpituus ei lainkaan. Tukivoiman ja askelpituuden välinen korrelaatio oli myös hyvä ($r = 0,52$, $p < .01$), mikä kertoo sen tärkeydestä jos halutaan saavuttaa suurempia juoksunopeuksia, sillä askeltiheyttä ei voida kasvattaa loputtomiin jalan heilahduksen asettamien rajoitusten johdosta. Maksiminopeudella vastaava korrelaatio ei ollut merkitsevä ($r = 0,65$, $p < .12$). Huippupikajuoksijoilla nimenomaan askelpituuden on havaittu olevan ratkaiseva tekijä keskikastin juoksijoihin verrattuna (Ito ym. 2006).

Selkeänä erona Weyand ym. (2000) tutkimukseen oli se, että nyt juostiin maan pinnalla juoksumaton sijaan. Tämä voi aiheuttaa muutoksia juoksun vaatimuksiin mm. horisontaalisen voimantuoton kannalta ilmanvastuksen lisääntyessä nopeuden kasvaessa. Aikaisemmissa tutkimuksissa on kuitenkin mitattu vastaavia maksiminopeuksia juoksumatolla ja radalla, joten tämän tekijän ei luulisi vaikuttavan tuloksiin oleellisesti (Bundle ym. 2003). Myöskään mitatuissa horisontaalivoimissa ja horisontaalisessa nettoimpulssissa ei havaittu eroja hitaampien ja nopeampien välillä. Reaktiivoimien mittaamiseen käytetyt voimalevyt eivät toimineet koko pituudeltaan, jonka vuoksi käyttöön jäi aikaisemmin mainittu 7,2 metriä. Myös näiden levyjen osalta voi olla syytä epäillä niiden toimintakuntoa johtuen kovasta käyttöhistoriasta ja huollon tarpeesta. Voimasignaalisissa oli havaittavissa välillä suuriakin tason heilahduksia ja häiriötä, jopa kesken suorituksen, jotka saattoivat vaikuttaa analyyseihin. Pikajuoksussa mitattavat reaktiivoimat sisältävät suhteellisen korkeataajuisia muutoksia, jolloin voimalevyn ominaisvärähtelytaajuus voi myös olla mittaustarkkuutta rajoittava tekijä.

Liikeanalyysistä saatujen heilahtavan jalan kinemaattisten muuttujien ja juoksunopeuden väliltä ei löydetty yhteyttä, lukuun ottamatta tukijalan lonkan ojennusnopeutta kontaktin aikana. Pieni koehenkilöiden määrä ja heidän suorituskyvyn tasaisuus eivät kuitenkaan mahdollista pidemmälle vietyjen johtopäätösten tekoa. Tulokset tukevat alustavasti hypoteesia, että heilahtavan jalan tekniikassa havaitaan yksilöjen välisiä eroja, mutta ei selkeää yhteyttä juoksunopeuteen. Mann & Herman (1985) saamat tulokset osoittivat myös tämän ilmiön, ja heidän tutkimuksen antamat lonkan kulmanopeudet vastaavat suuruusluokaltaan tässä mitattuja. Heidän tutkimuksessaan kuopaisnopeutta mitattiin jalkaterän nopeutena, joten nopeudet ovat hiukan tässä mitattuja suurempia. Liikeanalyysissä on aina mukana useita virhelähteitä, jotka voivat vaikuttaa saatuihin tuloksiin. Näitä ovat mm. digitoinnissa syntyvät virheet – esim. lonkan nivelpisteen ar-

viointi sen jäädessä heilahtavan käden alle piiloon – kalibroinnin epätarkkuudet ja perspektiivin aiheuttama vääristymä kuva-alueen reunoilla. Lonkan nivelpisteen ja valokennoilla mitatun keskimääräisen nopeuden välinen korrelaatio oli kuitenkin niin vahva, että mainittujen virhelähteiden vaikutusta voidaan pitää pienenä. Juoksussa on myös askelten välillä luonnollista vaihtelua, jolloin pitäisi toistettavien tulosten saamiseksi pyrkiä mittaamaan halutut muuttujat mahdollisimman useasta askeleesta keskiarvona. Tässä tutkimuksessa kuva-alueeseen mahtui yleensä kaksi oikean jalan kontaktia, mikä on ilmeisesti sama kuin Mann & Herman (1985) tutkimuksessa.

Tutkimusasetelman asettamista rajoituksista huolimatta voidaan asettaa kyseenalaiseksi valmennuksessa korostettu tahdonalaisen tekniikkaharjoittelun merkitys. Ensinnäkin on mahdotonta määritellä yksiselitteisesti yhtä universaalia, kaikille yksilöille parhaan suorituskyvyn tuovaa, juoksutekniikkaa. Juoksutekniikassa on aina yksilöiden välisiä eroja tasosta riippumatta, ja jopa yksilön askelten välistä vaihtelua. Toiseksi saman juoksunopeuden voi ilmeisestikin saavuttaa montaa eri strategiaa käyttäen. Todennäköisesti tämä säätely tapahtuu pitkälti automaattisesti ottaen huomioon lihasten voimantuottokyvyn, jäykkyyden, segmenttien pituudet jne. Juoksutekniikan sanotaan mahdollistavan tehokkaan voimantuoton lyhyen kontaktin aikana (Mann ym. 1984). Toisaalta useat tutkimukset osoittavat, että ihmisjuoksijat osaavat suunnata resultanttivoimavektorin muuttuvissa olosuhteissa automaattisesti säilyttääkseen juoksunopeuden sekä tasapainon, ja muutokset luonnostaan valittuun jalan jäykkyyteen, pyrkimällä tahdonalaisesti suurempaan lihasaktiivisuuteen, voivat jopa heikentää suorituskykyä (Chang & Kram 1999; Chang ym. 2000; Farley & Gonzalez 1996; Seyfarth ym. 2003).

Tulevaisuudessa olisi mielenkiintoista nähdä, miten suurempi koehenkilöjoukko, sekä ennen kaikkea suurempi suorituskyvyn vaihteluväli, vaikuttaisivat tässä saatuihin tuloksiin. Olisi myös hyödyllistä suorittaa juoksutestit sekä juoksumatolla että radalla, jotta voitaisiin tarkemmin arvioida menetelmien välisiä eroja kuvaamaan pikajuoksun vaatimuksia.

7 LÄHTEET

- Blickhan, R. 1989. The spring-mass model for running and hopping. *Journal of Biomechanics* 22, 1217-1227.
- Bundle, M.W., Hoyt, R.W., Weyand, P.G. 2003. High-speed running performance: a new approach to assessment and prediction. *Journal of Applied Physiology* 95, 1955-1962.
- Cavagna, G.A. 2006. The landing–take-off asymmetry in human running. *Journal of Experimental Biology* 209, 4051-4060.
- Cavagna, G.A., Komarek, L. & Mazzoleni, Stefania 1971. The mechanics of sprint running. *Journal of Physiology* 217, 709-721.
- Cavagna, G.A. & Kaneko, M. 1977. Mechanical work and efficiency in level walking and running. *Journal of Physiology* 268, 467-481.
- Cavagna, G.A., Franzetti, P., Heglund, N.C. & Willems, P. 1988. The determinants of the step frequency in running, trotting and hopping in man and other vertebrates. *Journal of Physiology* 399, 81-92.
- Cavagna, G.A., Heglund, N.C. & Williams, P.A. 2005. Effect of an increase in gravity on the power output and the rebound of the body in human running. *Journal of Experimental Biology* 208, 2333-2346.
- Chang, Y-H. & Kram, R. 1999. Metabolic cost of generating horizontal forces during human running. *Journal of Applied Physiology* 86, 1657-1662.
- Chang, Y-H., Huang, H-W.C., Hamerski, C.M. & Kram, R. 2000. The independent effects of gravity and inertia on running mechanics. *Journal of Experimental Biology* 203, 229-238.
- Enoka, R.M. 2002. *Neuromechanics of human movement*. Human Kinetics, USA.
- Farley, C.T. & Gonzalez, O. 1996. Leg stiffness and stride frequency in human running. *Journal of Biomechanics* 29, 181-186.
- Gottschall, J.S. & Kram, R. 2005. Ground reaction forces during downhill and uphill running. *Journal of Biomechanics* 38, 445-452.
- Harland, M.J. & Steele, J.R. 1997. The biomechanics of the sprint start. *Sports Medicine* 23, 11-20.
- Ito, A., Ishikawa, M., Isolehto, J. & Komi, P.V. 2006. Changes in the step width, step

- length, and step frequency of the world's top sprinters during the 100 meters. *New Studies in Athletics* 21, 35-39.
- Kerdok, A.E., Biewener, A.A., McMahon, T.A., Weyand, P.G. & Herr, H.M. 2002. Energetics and mechanics of human running on surfaces of different stiffnesses. *Journal of Applied Physiology* 92, 469-478.
- Komi, P.V. 2000. Stretch-shortening cycle: A powerful model to study normal and fatigued muscle. *Journal of Biomechanics* 33, 1197-1206.
- Kuitunen, S., Komi, P.V. & Kyröläinen, H. 2002. Knee and ankle joint stiffness in sprint running. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 34, 166-173.
- Luhtanen, P. & Komi, P.V. 1978. Mechanical factors influencing running speed. Teoksessa Asmussen, E. & Jørgensen K. (toim.) *Biomechanics VI-B: Proceedings of the sixth international congress of biomechanics*. Baltimore, University Park Press, 23-29.
- Mann, R.V. 1981. A kinetic analysis of sprinting. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 13, 325-328.
- Mann, R.V. & Sprague, P. 1980. A kinetic analysis of the ground leg during sprint running. *Research Quarterly for Exercise and Sport* 51, 334-348.
- Mann, R.V., Kotmel, J., Johnson, B. & Schultz, C. 1984. Kinematic trends in elite sprinters. Teoksessa Terauds, J. et al (toim.) *Sports biomechanics: Proceedings of the international symposium of biomechanics in sports*. J Delmar California, Academic Publishers, 17-33.
- Mann, R.V. & Herman, J. 1985. Kinematic analysis of olympic sprint performance: Men's 200 meters. *International Journal of Sport Biomechanics* 1, 151-162.
- McMahon, T.A., Valiant, G. & Frederick, E.C. 1987. Groucho running. *Journal of Applied Physiology* 62, 2326-2337.
- McMahon, T.A. & Cheng, G.C. 1990. The mechanics of running: How does stiffness couple with speed? *Journal of Biomechanics* 23, 65-78.
- Mero, A. & Komi, P.V. 1986. Force-, EMG-, and elasticity-velocity relationships at submaximal, maximal and supramaximal running speeds in sprinters. *European Journal of Applied Physiology* 55, 553-561.
- Mero, A., Luhtanen, P. & Komi, P.V. 1986. Segmental contribution to velocity of center of gravity during contact at different speeds in male and female sprinters. *Journal of Human Movements Studies* 12, 215-235.
- Mero, A., Komi, P.V., Rusko, H. & Hirvonen, J. 1987. Neuromuscular and anaerobic

- performance of sprinters at maximal and aupramaximal speed. *International Journal of Sports Medicine* 8, 55-60.
- Mero, A., Komi, P.V. & Gregor, R.J. 1992. Biomechanics of sprint running – A review. *Sports Medicine* 13, 376-392.
- Munro, C.F. & Miller, A.J. 1987. Ground reaction forces in running: A reexamination. *Journal of Biomechanics* 2, 147-155.
- Reich, T.E., Lindstedt, S.L., LaStayo, P.C & Pierotti, D.J. 2000. Is the spring quality of muscle plastic? *American Journal of Physiology – Regulatory, Integrative and Comparative Physiology* 278, R1661-R1666.
- Roberts, T.J., Marsh, R.L., Weyand, P.G. & Taylor, C.R. 1997. Muscular force in running turkeys: The economy of minimizing work. *Science* 275, 1113-1115.
- Roberts, T.J. & Scales, J.A. 2002. Mechanical power output during running accelerations in wild turkeys. *Journal of Experimental Biology* 205, 1485-1494.
- Seyfarth, A., Geyer, H. & Herr, H. 2003. Swing-leg retraction: a simple control model for stable running. *Journal of Experimental Biology* 206, 2547-2555.
- Weyand, P.G., Sternlight, D.B., Bellizzi, M.J. & Wright, S. 2000. Faster top running speeds are achieved with greater ground forces not more rapid leg movements. *Journal of Applied Physiology* 89, 1991-1999.