

**JUOKSUN KINEMATIikka ERITASOISILLA 1500 m:n
JUOKSIJOILLA KILPAILUVAUHDISSA**

Antti Leskinen

Pro-gradu tutkielma

Valmennus- ja testausoppi

Kevät 2007

Liikuntabiologian laitos

Jyväskylän yliopisto

Työn ohjaajat:

Keijo Häkkinen,

Heikki Kyröläinen

TIIVISTELMÄ

Leskinen, Antti 2007. Juoksun kinematiikka eritasoisilla 1500 m:n juoksijoilla kilpailuvauhdissa. Valmennus- ja testausopin pro gradu -tutkielma. Liikuntabiologian laitos. Jyväskylän yliopisto. 78 s.

Juoksun kinemaattisten muuttujien ja juoksun taloudellisuuden välisistä yhteyksistä on tehty tutkimuksia, mutta aikaisemmin ei ole vertailtu juoksun kinematiikkaa aidossa kilpailutilanteessa suorituskyvyltään eritasoisten juoksijoiden välillä. Tämän tutkimuksen tarkoituksena oli selvittää, onko juoksun kinematiikassa eroja eritasoisten 1500m:n juoksijoiden välillä aidossa kilpailutilanteessa, ja muuttuuko juoksun kinematiikka kilpailun aikana juoksunopeuden lisääntyessä. Lisäksi selvitettiin mahdollisten ryhmien välisten erojen taustalla olevia tekijöitä kinemaattisten muuttujien välisiä yhteyksiä tarkastelemalla.

Mittaukset suoritettiin elokuussa 2005 Helsingin olympiastadionilla järjestettyjen GE Money Grand Prix kilpailun ja yleisurheilun maailmanmestaruuskilpailujen aikana. GE Money GP:n yhteydessä juosti kansallinen alle 22-vuotiaiden miesten 1500 m:n kilpailu, jonka toiselta kierrokselta analysoitiin kuusi nuorta suomalaista juoksijaa. MM-finaalin toiselta kierrokselta analysoitiin viisi juoksijaa. Näistä viidestä juoksijasta neljä analysoitiin myös kolmannelta kierrokselta. Videomateriaalin keräämiseen käytettiin kahta kameraa 200 Hz:n kuvanopeudella 3-D pan & tilt -järjestelmää hyödyntäen. Jokaiselta juoksijalta analysoitiin yksi askelsykli/kierros, jonka aikana analysoitiin vasemman jalan liikettä. Analyysissä käytettiin neljää nivelpistettä, jotka olivat pää, lonkka, polvi ja nilkka.

Juoksunopeudessa ja askeleen kontaktiajassa ei ollut eroja ryhmien välillä kilpailuiden toisella kierroksella. Askeleen tukivaiheessa polvikulman minimiarvo oli suomalaisilla juoksijoilla pienempi ($131 \pm 4^\circ$ vs. $138 \pm 2^\circ$, $p \leq 0.01$) kuin MM-finalisteilla. Samalla polven koukistumisen kesto oli suomalaisilla pidempi (64 ± 7 ms vs. 46 ± 9 ms, $p \leq 0.01$) ja polven ojentumisen nopeus tukivaiheessa suurempi (474 ± 90 °/s vs. 318 ± 30 °/s, $p \leq 0.01$) kuin MM-finaalin juoksijoilla. Lonkka koukistui heilahdusvaiheen alussa MM-finalisteilla nopeammin (-157 ± 49 °/s vs. -90 ± 31 °/s, $p \leq 0.05$) kuin suomalaisilla, ja lonkkakulma oli MM-finalisteilla pienempi ($132 \pm 2^\circ$ vs. $140 \pm 4^\circ$, $p \leq 0.01$) vastakkaisen jalan keskitukivaiheessa suomalaisiin juoksijoihin verrattuna.

Suomalaisten polven koukistuessa syvemmälle askeleen tukivaiheessa he ojentavat polvea nopeammin kuin MM-finalistit askeleen kontaktiajan ollessa sama ryhmien välillä. Polven ojentamisen vaatimasta lihastyöstä suomalaiset tekevät todennäköisesti suuremman osan ilman elastisen energian hyödyntämistä MM-finalisteihin verrattaessa. Lisäksi suuri polvikulma askeleen tukivaiheessa mahdollistaa hyvät olosuhteet mekaanisen voimantuoton kannalta ja minimoi vertikaalista oskillaatiota, joten MM-finalistien juoksu voi olla hyvin taloudellista. MM-finalisteilla lantion toiminta on tehokkaampaa kuin suomalaisilla juoksijoilla, ja tehokas lonkan ojentuminen askeleen esiaktiivisuus ja tukivaiheissa helpottaa polven pitämistä suorana askeleen tukivaiheen aikana.

Avainsanat: juoksu, askelsykli, kinematiikka, liikeanalyysi, nivelkulma

SISÄLTÖ

TIIVISTELMÄ

| | |
|---|----|
| 1 JOHDANTO | 6 |
| 2 KESTÄVYYSJUOKSUSUORITUSKYKYYN VAIKUTTAVIA TEKIJÖITÄ..... | 8 |
| 2.1 Aerobinen kapasiteetti | 10 |
| 2.1.1 Maksimaalinen hapenottookyky ja juoksunopeus maksimaalisen hapenoton tasolla (vVO ₂ max)..... | 10 |
| 2.1.2 Anaerobinen kynnys..... | 11 |
| 2.2 Anaerobinen kapasiteetti..... | 11 |
| 2.3 Hermolihasjärjestelmän kapasiteetti | 12 |
| 3 JUOKSUN TALOUDELLISUUS – | |
| HERMOLIHASJÄRJESTELMÄN MERKITYS | 14 |
| 3.1 Juoksun taloudellisuus | 14 |
| 3.1.1 Taloudellisuuden määrittäminen | 14 |
| 3.1.2 Taloudellisuuden merkitys suorituskyvyn kannalta | 15 |
| 3.1.3 Taloudellisuuteen vaikuttavat tekijät..... | 16 |
| 3.2 Venymis-lyhenemissyklin hyödyntäminen kestävyysjuoksussa | 17 |
| 3.2.1 Elastisten rakenteiden merkitys | 19 |
| 3.2.2 Refleksitoiminta ja lihasjännekompleksin jäykkyys | 21 |
| 3.3 Juoksun mekaniikka..... | 23 |
| 4 JUOKSUN KINEMATIikka..... | 25 |
| 4.1 Askelpituus ja -tiheys sekä askelkontaktin kesto..... | 26 |
| 4.2 Kehon osien liikkeet | 27 |
| 4.2.1 Nilkkakulma juoksusyklin aikana | 28 |
| 4.2.2 Polvikulma juoksusyklin aikana..... | 29 |
| 4.2.3 Reisikulma juoksusyklin aikana | 30 |
| 4.2.4 Kulmanopeudet ja massakeskipiste | 31 |

| | |
|--|----|
| 4.3 Tehokkaan askeleen ominaisuuksia..... | 31 |
| 4.4 Juoksun kinematiikan vaikutukset juoksun taloudellisuuteen | 35 |
| 4.4.1 Askelpituus ja -tiheys sekä askelkontaktin kesto | 35 |
| 4.4.2 Kehon osien liikkeet | 36 |
| 5 JUOKSUN KINEMATIikka ERI JUOKSUVAUHDEILLA | 38 |
| 5.1 Askelpituus ja -tiheys sekä askelkontaktin kesto eri kilpailumatkoilla | 38 |
| 5.1.1 Askelpituus ja -tiheys sekä askelkontaktin kesto pikajuoksussa | 38 |
| 5.1.2 Askelpituus ja -tiheys sekä askelkontaktin kesto kestävyysjuoksussa | 39 |
| 5.2 Askelpituus ja -tiheys sekä askelkontaktin kesto juoksuvauhdin lisääntyessä | 40 |
| 5.3 Kehon osien liikkeet eri juoksuvauhdeilla..... | 42 |
| 6 TUTKIMUKSEN TARKOITUS JA TUTKIMUSONGELMAT..... | 45 |
| 7 MENETELMÄT | 47 |
| 7.1 Koehenkilöt..... | 47 |
| 7.2 Mittausprotokolla..... | 47 |
| 7.3 Videodatan analysointi | 49 |
| 7.4 Muuttujien määrittäminen..... | 49 |
| 7.4.1 Nivelkulmat ja kulmanopeudet..... | 49 |
| 7.4.2 Aikaan ja paikkaan liittyvät muuttujat..... | 51 |
| 7.4.3 Muuttujien väliset yhteydet | 51 |
| 7.5 Tilastollinen analyysi..... | 51 |
| 8 TULOKSET | 53 |
| 8.1 Juoksijoiden nopeus, kontaktiaika ja askeltiheys kilpailujen aikana | 53 |
| 8.2 Nivelkulmat eritasoisilla juoksijoilla | 54 |
| 8.3 Kulmanopeudet eritasoisilla juoksijoilla..... | 55 |
| 8.4 Nivelkulmat ja kulmanopeudet eri nopeuksilla juostaessa | 57 |
| 8.5 Nivelkulmien ja kulmanopeuksien väliset yhteydet | 58 |

| | |
|--|----|
| 9 POHDINTA | 61 |
| 9.1 Polvinivelen toiminta askeleen tukivaiheen aikana | 61 |
| 9.1.1 Lihasjäykkyys, elastisen energian hyödyntäminen ja juoksun taloudellisuus | 61 |
| 9.1.2 Polvi- ja lonkkanivelen välinen yhteistoiminta askeleen tukivaiheessa | 63 |
| 9.1.3 Väsymisen vaikutus | 63 |
| 9.2 Lonkkanivelen toiminta askelsyklin aikana | 64 |
| 9.3 Tehokkaalle juoksuaskeleelle ominaisia piirteitä | 66 |
| 9.4 Tutkimuksen rajoitukset ja muuttujien toistettavuus | 67 |
| 9.5 Johtopäätökset | 69 |
| LÄHTEET | 71 |
| LIITTEET | |

1 JOHDANTO

Juoksun mekaniikka voi vaikuttaa suorituskykyyn kestävyysjuoksussa taloudellisuuden, niveliin kohdistuvan kuormituksen tai lihasten väsymisen kautta. Juoksuaskeleen yksilölliseen muokkautumiseen liittyvistä tekijöistä jotkut riippuvat kehon toiminnallisista ominaisuuksista kuten liikkuvuudesta (Nelson ym. 2001, Graib ym. 1996), hermolihajärjestelmän toiminnasta (Paavolainen ym. 1999a) tai kehon rakenteesta (Frederick 1990), ja toiset tekijät saattavat johtua esimerkiksi vuosien harjoittelusta tai vammoihin sopeutumisesta. Vaikka yleiset liikemallit ovat hyvin samansuuntaisia kaikilla juoksijoilla, voivat askeleen spesifimmät ominaisuudet (esimerkiksi nivelten liikelaajuudet) vaihdella suuresti jopa samantasoisten juoksijoiden välillä. (Williams 1993, 4-7.)

Kaikkien edellä mainittujen tekijöiden yhteen liittäminen aiheuttaa sen, että juoksun mekaniikan optimointi on erittäin monimutkainen prosessi. Biomekaanisen tutkimuksen tulisi pyrkiä parantamaan ymmärrystä mahdollisista malleista, joita voidaan soveltaa yleisesti kaikkiin juoksijoihin. Lisäksi pitäisi pyrkiä ymmärtämään paremmin juoksu-tekniikan yksilöllisiä eroja ja niihin vaikuttavia tekijöitä. (Williams 1993, 6-7.) Vaikka juoksu-tekniikkaa kehitettäessä on tärkeää keskittyä tiettyihin yleisesti hyväksytyihin seikkoihin (Greene & Pate 1997; 67-68, Sinkkonen 2000, 35-40), on useimpien kinemaattisten muuttujien havaittu selittävän huonosti juoksijoiden taloudellisuudessa havaittuja eroja (Kyröläinen ym. 2001). Esimerkiksi juoksijoiden luonnollisesti valitsema askelpituus on yleensä hyvin lähellä heidän taloudellisinta askelpituuttaan (Williams 1990, 283-284; McArdle ym. 2001, 211).

1500m on mielenkiintoinen juoksumatka, koska siinä tarvitaan ehdottomasti suurta aerobista kapasiteettia, mutta samalla on oltava valmiudet nopeaan ja taloudelliseen juoksuun. Keskimatkojen juoksuissa käytetyt juoksunopeudet asettavat suuret vaatimukset hermolihajärjestelmän toiminnalle tehokkaan ja taloudellisen juoksuaskeleen mahdollistamiseksi (Skof & Stuhc 2004, Kyröläinen ym. 2003). Juoksunopeuden kasvaessa elastisen energian hyödyntämisen ja juoksun mekaniikan merkitys korostuu (Paavolainen ym. 1999a, Kyröläinen ym. 2001, 2005).

Monet juoksun kinematiikkaa koskevat tutkimukset liittyvät juoksun taloudellisuuteen (Williams & Cavanagh 1987, Kyröläinen ym. 2001), mutta suorituskyvyltään eritasoisia juoksijoita vertailevia tutkimuksia ei ole juurikaan tehty. Lisäksi vain harvoissa tutkimuksissa on analysoitu juoksun kinematiikkaa kestävyysmatkoilla kilpailusuorituksen aikana. Niinpä tämän tutkimuksen tarkoituksena oli vertailla juoksun kinematiikkaa eritasoisten 1500 m juoksijoiden välillä aidossa kilpailutilanteessa. Tarkoituksena oli myös selvittää, muuttuuko juoksun kinematiikka kilpailun aikana juoksunopeuden lisääntyessä. Lisäksi selvitettiin mahdollisten ryhmien välisten erojen taustalla olevia tekijöitä kinemaattisten muuttujien välisiä yhteyksiä tarkastelemalla.

2 KESTÄVYYSJUOKSUSUORITUSKYKYYN VAIKUTTAVIA TEKIJÖITÄ

Kuormitusfysiologian tärkeimmän lähtökohdan mukaan työn tekemiseksi tarvitaan energiaa. Jotta lihakset pystyvät ylläpitämään tietyn työmäärän ennalta määritetyn matkan ajan, täytyy lihasten poikittaissiltojen saada tarvittava määrä ATP:tä niin nopeasti kuin sitä kulutetaan. Mitä kauemmin maksimaalinen suoritus kestää, sitä enemmän ATP:tä tuotetaan aerobisesti oksidatiivisen fosforylaation avulla. (Bassett & Howley 2000.) Monet kestävyysurheilijoilla tehdyt tutkimukset ovat osoittaneet, että mitä parempi kestävyysurheilija on kyseessä, sitä korkeammat ovat myös hänen kestävyysominaisuuksiensa tasoa kuvaavat aerobinen kynnys, anaerobinen kynnys ja maksimaalinen hapenottoikyky. (Fogelholm & Vuorimaa 1991, 32.)

Aerobisen ja anaerobisen energiantuoton merkitys vaihtelee eri kestävyysjuoksumatkoilla (taulukko 1). 1500 m:n juoksussa aerobisen energiantuoton osuus on pienempi kuin pidemmällä kestävyysmatkoilla, mutta silti se käsittää keskimäärin 75 % kokonaisenergiantuotosta. (Newsholme ym. 1992.)

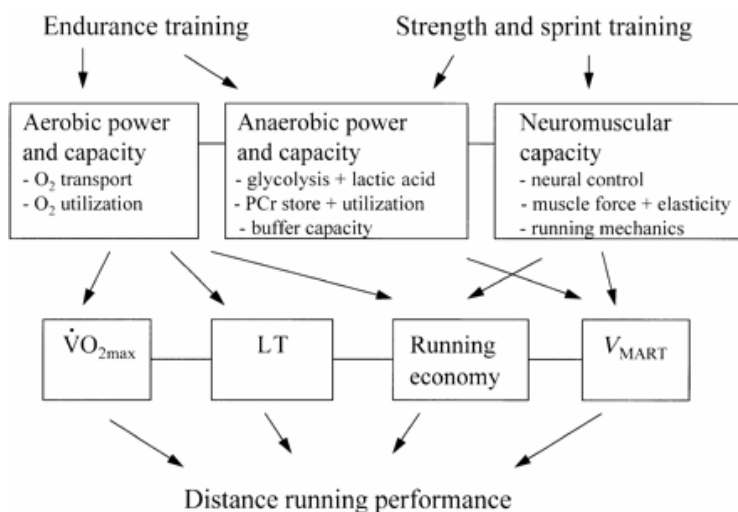
TAULUKKO 1. Aerobisen energiantuoton osuudet ATP:n muodostuksessa eri juoksumatkoilla (Newsholme ym. 1992).

| Matka (m) | Aerobisen energianmuodostuksen kautta tuotetun ATP:n osuus (%) |
|--------------|---|
| 800 | 50 |
| 1500 | 75 |
| 5000 | 87,5 |
| 10 000 | 97 |
| maraton | 100 |

Aerobisen energiantuoton osuuden on myös ehdotettu olevan keskimatkoilla hieman taulukon 1 arvoja suuremman. 1 min 52 s kestävässä 800 m:n juoksussa energiaa tuotettaisiin tällöin aerobisesti 60 % ja 3 min 51 s kestävässä 1500 m:n juoksussa 77 %. (Fallowfield & Wilkinson 1999, 21.) Aerobisen ja anaerobisen energiantuoton merkitys

tietyllä matkalla voi luonnollisesti olla hieman erilainen juoksijoiden yksilöllisistä fysiologisista ominaisuuksista johtuen (Brandon 1995). Matkasta riippuen juoksijoiden on pystyttävä hyödyntämään myös rasvoja energianlähteinä kovillakin tehoilla ja juoksemaan kilpailuvauhdilla taloudellisesti suhteellisen pienellä energiankulutuksella (Conley & Krahenbul 1980). Kestävyyssuoritusta selittäviä tekijöitä ovat Bassetin & Hawleyn (1997) mukaan maksimaalinen hapenotto (VO_{2max}), juoksun taloudellisuus ja %VO_{2max}, jonka juoksija pystyy säilyttämään kilpailun ajan.

Suomalaisessa kestävyysvalmennuksessa on yleensä keskitytty kestävyysuorituskyvyn parantamiseen pääasiassa aineenvaihdunnallisten tekijöiden avulla. Niinpä esimerkiksi urheilijan taloudellisuus ja lihasten voimantuotto ovat jääneet vähemmälle huomiolle. (Fogelholm & Vuorimaa 1991, 32.) Kestävyysjuoksuuorituskyky voidaan jakaa aerobiseen tehoon ja kapasiteettiin, anaerobiseen tehoon ja kapasiteettiin sekä hermolihasjärjestelmän kapasiteettiin (kuva 1). Näitä kuvaamaan voidaan käyttää esimerkiksi maksimaalista hapenottoa (VO_{2max}), anaerobista kynnystä, juoksun taloudellisuutta sekä anaerobista suorituskykyä. Juoksijoiden anaerobisen suorituskyvyn määrittämisessä on käytetty MART-testiä (maximal anaerobic running test) (Rusko ym. 1993), jonka maksiminopeutta V_{mart} voitaneen käyttää anaerobisen suorituskyvyn mittarina. (Paavolainen ym. 1999a.)



KUVA 1. Hypoteettinen malli kestävyysjuoksuuorituskyvyn vaikuttavista tekijöistä (Paavolainen ym. 1999a).

2.1 Aerobinen kapasiteetti

2.1.1 Maksimaalinen hapenottokyky ja juoksunopeus maksimaalisen hapenoton tasolla (vVO_{2max})

Maksimaalisen hapenottokyvyn perusteella on mahdollista selittää kestävyysjuoksusuorituskyvyn eroavaisuuksia heterogeenisissä ryhmissä. Costill ym. (1973) havaitsivat tutkimuksissaan selkeän käänteisen korrelaation ($R=-0.91$) maksimaalisen hapenottokyvyn ja 10 mailin juoksuajan välille. Tässä tutkimuksessa käytettiin koehenkilöitä, joiden maksimaalisen hapenottokyvyn arvot olivat selkeästi erilaisia vaihdellen 54.8 ja 81.6 ml/min/kg välillä. Jos taas vertailtaisiin saman hapenottokyvyn omaavia juoksijoita, hapenottokyvyn ja suorituskvyn välinen korrelaatiokerroin pienenesi merkittävästi (Bassett & Howley 2000). Maksimaalisen hapenottokyvyn voidaan ajatella määrittävän kestävyysuorituskyvyn ylärajan, mutta hapenottokyvyn perusteella ei voida ennustaa suorituskvystä hapenottokyvyltään homogeenisissä ryhmissä (Bassett & Howley 1997). Aerobisen ja anaerobisen energiantuoton osuuden vaihdella eri juoksumatkoilla myös hapenottokyvyn merkitys on erilainen juostavasta matkasta riippuen. Espanjalaisia korkean tason juoksijoita tutkittaessa 1500 m:n juoksijoilla (kauden parhaan keskiarvo 3.42,08, n = 9) VO_{2max} oli 73.9 ± 5.9 ml/kg/min. 800 m:n juoksijoilla (kauden parhaan keskiarvo 1.50,07, n = 6) VO_{2max} oli hieman pienempi (68.5 ± 5.0 ml/kg/min) ja 5000 m:n juoksijoilla (kauden parhaan keskiarvo 13.45,49, n = 7) puolestaan suurempi (78.9 ± 5.5 ml/kg/min). (Arrese ym. 2005.)

Maksimaalisen hapenottokyvyn tasoa vastaavan juoksunopeuden (vVO_{2max}) on havaittu olevan merkittävä kestävyysjuoksusuoritusta selittävä tekijä. Tämä nopeus voidaan määrittää nousujohteisessa maksimaalisen hapenottokyvyn testissä juoksumatolla, vVO_{2max} :n ollessa se nopeus, jolla juoksija saavuttaa maksimaalisen hapenoton. Tämän nopeuden on havaittu korreloivan parhaiten 5 km:n juoksuajaan eri fysiologisia suorituskvymuuttujia vertailtaessa. (Paavolainen ym. 1999a.) Suorassa hapenottokyvyn testissä vVO_{2max} kertoo yleensä enemmän kestävyysjuoksijan suorituskvystä kuin pelkkä VO_{2max} , koska juoksunopeuteen maksimaalisen hapenottokyvyn tasolla vaikuttaa maksimaalisen hapenottokyvyn lisäksi myös suorituksen taloudellisuus ja hermolihaskäytön järjestelmän suorituskvysi (Nummela 2004, 68).

2.1.2 Anaerobinen kynnys

Korkean anaerobisen kynnyksen avulla on mahdollista juosta lähellä maksimaalista hapenottoa tuottamatta suurta määrää maitohappoa. Sen onkin todettu olevan yhteydessä yli 5000 m kilpailutulosten kanssa. Lyhempien matkojen tulosten selittämiseksi anaerobisella kynnyksellä ei kuitenkaan ole suurta osuutta. (Brandon 1995.) 1500 m:n juoksussa vaadittavia tärkeitä ominaisuuksia kehitettäessä on kuitenkin muistettava, että ilman suhteellisen matalatehoista aerobista harjoittelua ei korkean intensiteetin harjoittelua pystytä tekemään tarpeeksi tehokkaasti ilman ylikuormittumisen riskiä (Midgley ym. 2006). Niinpä anaerobisen kynnyksen on mitä ilmeisimmin oltava suhteellisen korkealla tasolla myös 1500 m:llä, vaikka sen avulla ei varsinaisesti pystytä suorituskykyä selittämään.

Anaerobinen kynnys voidaan määritellä laktaattikynnyksenä, respiratorisena kompensatiokynnyksenä tai niiden yhdistelmänä. Laktaattikynnys voidaan määrittää veren laktaattipitoisuuden toisen jyrkemmän lineaarisuudesta poikkeavan nousukohtan perusteella. Respiratorinen kompensatiokynnys ilmentää ventilaation lineaarisuudesta poikkeavaa muutoskohtaa suhteessa hiilidioksidin tuottoon, tai ventilaatioekvivalenttien (VE/VO_2 ja VE/VCO_2) lineaarisuudesta poikkeavaa jyrkkää muutoskohtaa. Anaerobisen kynnyksen voidaan määrittää olevan suurin työteho ja energiankulutuksen taso, jossa veren laktaattipitoisuus ei kasva koko suorituksen ajan. (Nummela 1999, 25; Nummela 2004, 51, 66.)

2.2 Anaerobinen kapasiteetti

Kun anaerobisen energiantuoton merkitys kasvaa kilpailtavan matkan lyhentyessä, tällöin luonnollisesti myös anaerobisen kapasiteetin (lyhytkestoisen maksimaalisen työn aikana anaerobisesti resyntetisoidun ATP:n määrä) merkitys korostuu. Naisilla tehdyssä tutkimuksessa Wingaten 30 sekunnin pp-ergometritestin tulokset olivat yhteydessä 800 m juoksun suorituskykyyn, kun taas samaa yhteyttä ei löydetty 1500 ja 3000 m:llä. (Yoshida ym. 1990.) Keskimatkojen juoksijoilla on havaittu olevan enemmän nopeita soluja pitkän matkan juoksijoihin verrattuna (47.8 % KM, 34.6 % PM) (Taunton ym.

1981). Nopeiden solujen suuret glykogeeni- ja kreatiinifosfaattivarastot sekä glykolyytisten entsyymien korkeat aktiivisuudet (Maughan ym. 1997, 145-147) selittävät keskimatkan juoksijoiden suurta anaerobista kapasiteettia. Esimerkiksi maksimaalisen 30 sekunnin pp-ergometritestin jälkeen keskimatkojen juoksijoilta verestä mitatut laktaattipitoisuudet ovat olleet korkeampia kuin pidempien matkojen juoksijoilla (Taunton ym. 1981). Anaerobisen kapasiteetin on myös osoitettu olevan yhteydessä aikaan, jonka juoksija pystyy ylläpitämään maksimaalisen hapenoton tasoa vastaavaa juoksunopeutta (vVO_{2max}). On havaittu jopa niin, että korkea anaerobinen kapasiteetti on yhteydessä hyvään taloudellisuuteen vVO_{2max} :lla. (Renoux ym. 1999.)

Uudessa tutkimuksessa on tuotu esille muuttuja, joka kuvaa kykyä tuottaa tehoa VO_{2max} :n yläpuolella. Tämä muuttuja (MART VO_{2gain}) saadaan, kun MART testin maksimaalisesta hapentarpeesta vähennetään VO_{2max} . Yhdessä VO_{2max} :in kanssa MART VO_{2gain} selitti parhaiten 5 km:n juoksun suorituskykyä regressioanalyysillä määritettynä (73 %). MART testin loppunopeus (V_{MART}) ja MART VO_{2gain} olivat myös yhteydessä juoksun taloudellisuuteen. (Nummela ym. 2006.) Täytyy kuitenkin muistaa, että V_{MART} :iin vaikuttaa anaerobisen kapasiteetin lisäksi myös hermolihasjärjestelmän kapasiteetti (Rusko ym. 1993, Paavolainen ym. 1999a, Nummela ym. 2006).

2.3 Hermolihasjärjestelmän kapasiteetti

Suorituskykyyn kestävyysjuoksussa vaikuttaa myös hermolihasjärjestelmän kapasiteetti tuottaa voimaa (Nummela ym. 2006, Paavolainen ym. 1999a). Lihasten voimantuottoa selittävät käytettävien lihasten koko sekä hermoston kyky aktivoida lihaksia (Enoka 2002, 257-259). Hermolihasjärjestelmän kapasiteetilla on merkitystä myös elastisuuden hyödyntämisen ja juoksun mekaniikan kannalta (Paavolainen ym. 1999a). Huolimatta hermolihasjärjestelmän merkityksestä, monet eliittitason kestävyysjuoksijat ovat kuitenkin saavuttaneet tasonsa käyttämättä harjoittelussaan juurikaan voimaharjoittelua. Usein voimaharjoittelua voi olla vaikeaa hyödyntää kestävyysjuoksusuorituksessa, joten tämän takia monet kestävyysjuoksijat jopa karttavat voimaharjoittelua. Tätä ilmiötä voi selittää juoksusuorituksen neuromotorisesti monimutkainen luonne, joka eroaa selkeästi esimerkiksi pyöriäilystä. (Berg 2003.) Periaatteessa jopa lihaksia kasvattava voimahar-

joittelu voi olla hyödyllistä kestävyysurheilussa. Maksimivoiman kasvaessa urheilija pystyy työskentelemään aikaisempaa pienemmällä suhteellisella voimantuotolla kaikilla absoluuttisilla voimantuottotasoilla, jolloin voimantuottoa on mahdollista tarvittaessa lisätä aikaisempaa enemmän. Lihaksen poikkipinta-alan kasvaessa nopeiden solujen rekrytointi voidaan mahdollisesti aloittaa hieman aikaisempaa suuremmilla voimatasoilla, jolloin väsymisen sieto saattaa parantua. Jopa noin 15 %:n kasvu lihaksen poikkipinta-alassa on ollut mahdollista ilman lihaksen mitokondriaalisen kapasiteetin tai kapillari/lihassolu suhteen heikkenemistä. (Green 2000 168-169.) Pyöräilyssä (Hickson ym. 1988), uinnissa (Sharp ym. 1982) ja hiihdossa (Rundell 1995), joissa tehtävä työ voidaan eristää juoksua tehokkaammin tietyille lihaksille, voimaharjoittelun on havaittu tutkimusten mukaan parantavan merkitsevästi suorituskykyä (Berg 2003).

Kestävyysjuoksussa hermolihaskäytön toimintaa kehittävän nopeusvoimaharjoittelun on osoitettu voivan parantaa juoksijoiden suorituskykyä ja taloudellisuutta ilman muutoksia maksimaalisessa hapenottokyvyssä (Paavolainen ym. 1999a). Plyometrinen nopeusvoimaharjoittelu, joka sisältää erilaisia hyppyjä ja loikkia, onkin juoksijalle hyvin lajinomaista voimaharjoittelua, toisin kuin esimerkiksi levytankoharjoittelu. Plyometrinen liikkeen voimantuottonopeudet ovat myös samankaltaisia juoksuun verrattuna. (Berg 2003.) Nopeusvoimaharjoittelu parantaa motoristen yksiköiden rekrytointia ja synkronisaatiota, joiden parantuminen voidaan sitten havaita voimantuoton ja juoksun hyötysuhteen paranemisena. Ei ole kuitenkaan selvillä, vaikuttaako kasvanut voimantuotto vain parantamalla hyötysuhdetta ja sitä kautta suorituskykyä, vai voiko hermolihaskäytön voimantuottokyky olla muista tekijöistä riippumaton vaikuttaja, joka asettaa ylärajan kestävyys suorituskyvyille. (Nummela ym. 2006.)

3 JUOKSUN TALOUDELLISUUS – HERMOLIHASJÄRJESTELMÄN MERKITYS

3.1 Juoksun taloudellisuus

3.1.1 Taloudellisuuden määrittäminen

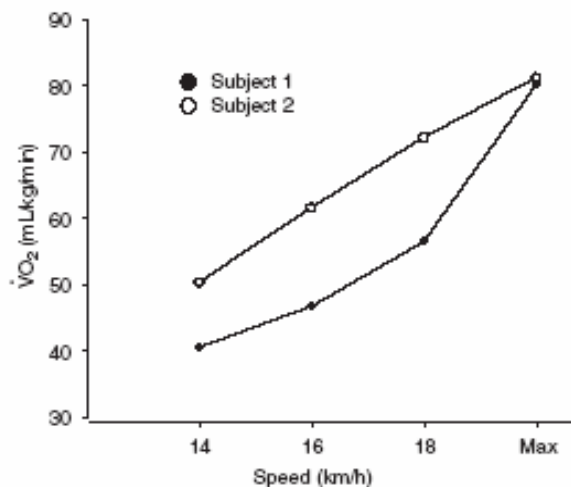
Saatavilla olevan energian tehokas hyödyntäminen optimoi kaikkien kestävyysmatkojen suorituskyvyn. Taloudellisuus viittaakin tehdyn työn ja kulutetun energian väliseen suhteeseen. (Daniels 1985.) Melko yksinkertainen ja yleisesti käytetty menetelmä taloudellisuuden määrittämisessä on hapenkulutuksen tarkastelu tietyssä vakioitehoisessa harjoituksessa. Esimerkiksi tietyllä nopeudella juostaessa, pyöräiltäessä tai uitaessa taloudellinen urheilija kuluttaa vähemmän happea epätaloudellisempiin urheilijoihin verrattaessa. (McArdle ym. 1996, 168.) Toinen mahdollisuus taloudellisuuden määrittämisessä on ilmaista hapenkulutus juostua kilometriä kohden. Tämä menetelmä mahdollistaa juoksun taloudellisuuden vertailun eri nopeuksilla. Täytyy kuitenkin muistaa, ettei hapenkulutus juostua matkaa kohden ole aina samanlainen kaikilla vauhdeilla. Taloudellisuuden vertailu voidaan suorittaa myös hapenkulutuksena kilometriä kohden tietyllä suhteellisella intensiteetillä (esimerkiksi ml/kg/km 60 %:n teholla maksimaalisesta hapenkulutuksesta). (Fallowfield & Wilkinson 1999, 109.)

Juoksun taloudellisuus voidaan siis määrittää energiankulutuksena tietyllä nopeudella tai matkalla, ja se on mahdollista ilmaista hapenkulutuksen avulla (McArdle ym 1996, 168, Fallowfield & Wilkinson 1999, 109). Juoksun energiankulutus heijastaa kuitenkin sekä aerobista että anaerobista aineenvaihduntaa, joten pelkkä hapenkulutuksen mittaus ei välttämättä ilmennä jouleina määritettyä kokonaisenergiankulutusta (Daniels 1985). Hapenkulutuksen perusteella ei myöskään tiedetä eri energiaravintoaineiden osuutta energiantuotosta (Maughan ym. 1997). Taloudellisuuden määrittämisessä onkin käytetty apuna veren laktaattipitoisuutta. Lisäksi on kehitetty energiaekvivalentti, jonka mukaan yksi kulutettu happilitra vastaisi 20202 joulea silloin, kun hengitysosamäärä on 0.82. Hengitysosamäärän vaihtelu ± 0.01 vaikuttaa energiaekvivalenttiin $\pm 50J$. Kun veren laktaattipitoisuus on alle 2 mM/l, jätetään glykolyyttisen aineenvaihdunnan osuus huo-

mioimatta. Tämän kynnyksen ylittyessä lisätään energiankulutukseen 60 J/kg/min (3ml/kg/min) jokaista yli 2mM/l nousutta millimoolia kohden. (Kyröläinen ym. 2001, DiPrampo ym.1993.)

3.1.2 Taloudellisuuden merkitys suorituskyvyn kannalta

Vaikka matala hapenkulutus jollakin tietyllä submaksimaalisella juoksuvauhdilla ei välttämättä kerro hyvästä suorituskyvystä, on juoksun taloudellisuuden ja suorituskyvyn välillä selkeä yhteys. Samanlaisilla ominaisuuksilla varustetuilla juoksijoilla submaksimaalisen juoksuvauhdin hapenkulutuksen ja suorituskyvyn välillä on löydetty jopa 0.79, 0.82, ja 0.83 korrelaatiot kolmella eri juoksuopeudella juostaessa. (Conley & Krahenbul 1980.) Kahta kansainvälisen tason juoksijaa vertailtaessa havaittiin, että taloudellinen juoksija pystyi juoksemaan 10 km minuutin kovempaa kuin huonommalla taloudellisuudella varustettu juoksija (kuva 2). Maksimaalinen hapenotto kyky oli molemmilla juoksijoilla yhtä suuri. (Saunders ym. 2004.)



KUVA 2. Erilainen taloudellisuus juoksijoilla, joilla on yhtä suuri maksimaalinen hapenotto kyky (Saunders ym. 2004).

Taloudellisuuden merkitykselle suorituskyvyn kannalta voidaan saada lisää syvyyttä havainnosta, jonka mukaan erään hyvin menestyneen kenialaisjuoksijan on osoitettu olevan yksi taloudellisimmista juoksijoista, joiden tuloksia on ikinä raportoitu. Kenialaisjuoksija pystyi juoksemaan nopeudella 16 km/h hapenkulutuksella 45 ml/kg/min.

Toisin sanoen hän kulutti happea 169 ml/kg/km 53 %:n teholla maksimaalisesta hapenottokyvystä. (Fallowfield & Wilkinson 1999, 109.)

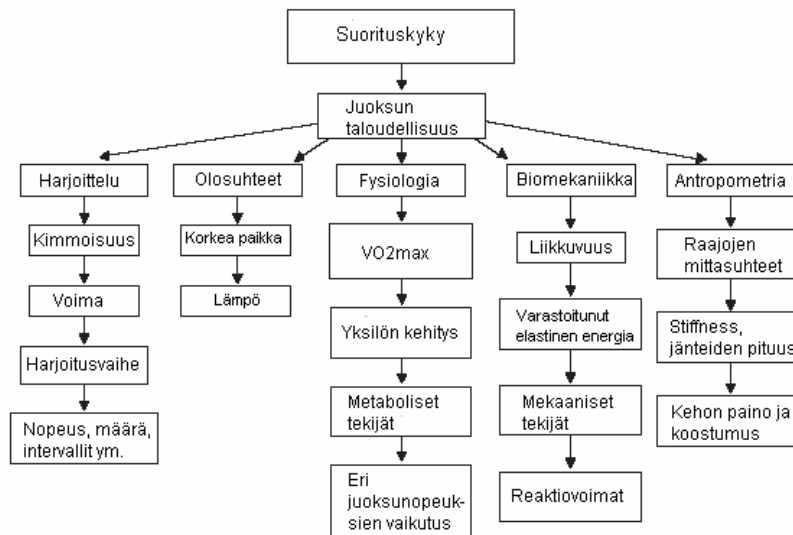
Taloudellisuuden merkitystä on helppo ajatella siten, että jos esimerkiksi juoksun mekaniikkaa muuttamalla juoksija onnistuu vähentämään energiankulutustaan kaikilla submaksimaalisilla juoksuvauhdeilla, voidaan samalla myös maksimaalisen suorituskyvyn olettaa parantuvan. Jos juoksija pystyy alun perin juuri ja juuri ylläpitämään tietyn keskivauhdin jollakin tietyllä matkalla, niin taloudellisuuden parantuessa tämä vauhti ei enää vaadikaan niin suurta energiankulutusta kuin aikaisemmin. Siispä taloudellisuuden parantuessa esimerkiksi laktaatin tuotto, glykokeenin hajoamisnopeus tai muut uupumukseen vaikuttavat tekijät ovatkin entisellä maksimivauhdilla nyt subkriittisillä tasoilla. Näin vauhtia pystytään vielä kiristämään siihen saakka, kunnes nämä rajoittavat tekijät ovat taas saavuttaneet kriittiset suoritusta rajoittavat tasonsa. (Williams 1990, 273.) Eliittitason juoksijoilla erot suorituskyvyssä näyttäisivätkin selittyvän suurelta osin taloudellisuuden eroavaisuuksilla (Conley & Krahenbul 1980).

Di Prampero ym. (1993) osoittivat tutkimuksessaan, että 5 % paraneminen juoksun taloudellisuudessa johti 3,8 % paranemiseen juoksun suorituskyvyssä. Tällaiset muutaman prosentin muutokset saattavat tuntua pieniltä, mutta esimerkiksi maratonin maailmanennätysvauhdissa niinkin pieni kuin 2 prosentin parantuminen juoksuajassa vastaa yli kahta minuuttia lopputuloksissa. Tutkimusten kannalta tällaisten pienten muutosten merkityksellisyys luo joitakin vaikeuksia, sillä vaikka kahden prosentin muutos olisi todella selkeä suorituskyvyn kannalta, voi näin pientä muutosta olla vaikea osoittaa tilastollisesti merkitseväksi. (Williams 1990, 273.)

3.1.3 Taloudellisuuteen vaikuttavat tekijät

Juoksun taloudellisuuteen vaikuttavat useat eri fysiologiset ja biomekaaniset tekijät. Myös kehon mittasuhteilla ja sen koostumuksella on merkitystä taloudellisuuden kannalta. Useat tutkimukset ovat osoittaneet, että harjoitelleet ovat taloudellisempia kuin harjoittelemattomat tai vähemmän harjoitelleet. Kestävyysharjoittelun lisäksi voimaharjoittelulla on pystytty parantamaan juoksun taloudellisuutta. Myös kuumassa tai korkeassa ilmanalassa harjoittelu voi vaikuttaa taloudellisuuteen. (kuva 3) (Saunders ym. 2004.) On lisäksi havaittu, että maratoonarit ovat taloudellisempia maratonjuoksun no-

peuksissa kuin 800 m:n -1500 m:n juoksijat. Samalla tavoin mailerit ovat taloudellisempia mailimatkojen kilpailuvauhteissa kuin maratoonarit. (Daniels & Daniels 1992.)

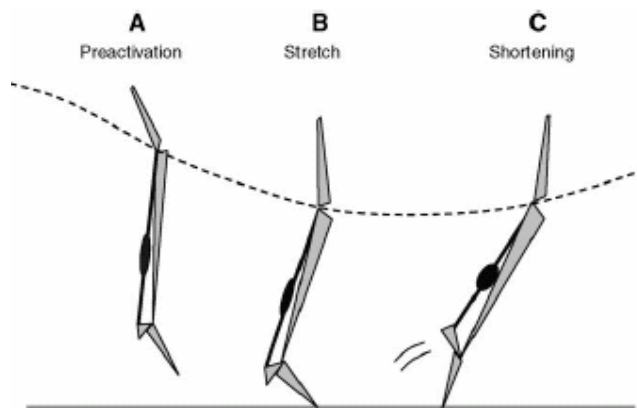


KUVA 3. Juoksun taloudellisuuteen vaikuttavat tekijät (mukaeltu Saunders ym. 2004).

Hermolihasjärjestelmän toiminta vaikuttaa juoksun taloudellisuuteen elastisen energian hyödyntämisen ja juoksun mekaniikan kautta. Bosco ym. (1987) ovat osoittaneet yhteyden hyppinessä havaitun elastisen energian tehokkaan varastoinnin ja juoksun taloudellisuuden välillä. Elastisen energian hyödyntäminen voi selittää juoksun taloudellisuuden eroavaisuuksia varsinkin kovissa vauhteissa, joissa askeleen törmäysvoimat kasvavat. Venymis-lyhenemissyklin tehokkaan hyödyntämisen kannalta hermolihasjärjestelmän toiminnalla on suuri merkitys. (Komi & Gollhofer 1997, Paavolainen ym. 1999a, Falloufield & Wilkinson 1999, 83.)

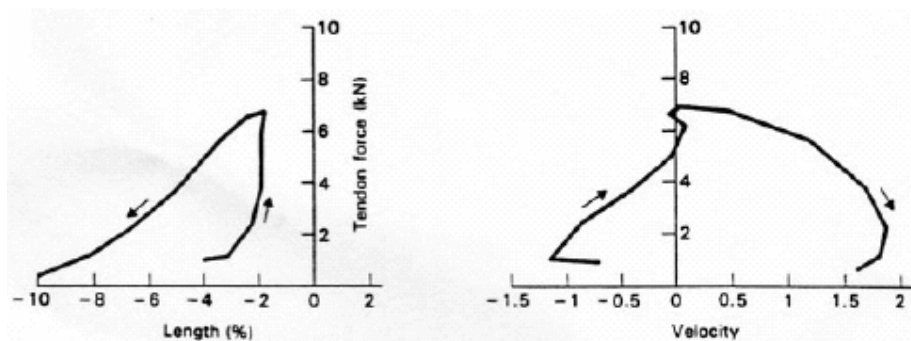
3.2 Venymis-lyhenemissyklin hyödyntäminen kestävyysjuoksussa

Lihasten toimiessa luonnollisessa ympäristössään kehon segmentteihin vaikuttavat usein sekä törmäys- että venytysvoimat. Juoksu, kävely ja hyppiminen ovat tyypillisiä esimerkkejä siitä, kuinka ulkoiset voimat voivat venyttää lihaksia. Tämän venymisvaiheen aikana lihas käyttäytyy eksentrisesti. Venymisvaiheen jälkeen lihas taas supistuu eli tekee konsentrista työtä (kuva 4). Tällaista luonnollisessa liikkumisessa tapahtuvaa eksentrisen ja konsentrisen lihastyön yhdistelmää kutsutaan venymis-lyhenemis sykliksi. (Komi 2003, 184.)

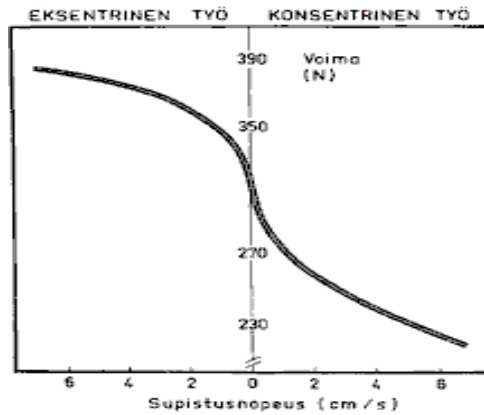


KUVA 4. Venymis-lyhenemissykli. Ennen maakontaktia oikea-aikaisella esijännityksellä (A) voidaan luoda hyvät edellytykset elastisen energian tehokkaalle varastoimiselle eksentrisessä venytysvaiheessa (B) ja hyödyntämiselle konsentrisessa työntövaiheessa (C). (Komi 2003, 185.)

Nopeassa juoksussa venymisvaiheen aikana jänteeseen kohdistuva voima kasvaa hyvin nopeasti. Tähän voiman kasvuun liittyy samanaikainen hyvin pieni muutos lihaksen pituudessa. Lihaspituuden ja voiman välinen suhtautuminen on nähtävissä kuvan 5 vasemmalla puolella. Oikea puoli kuvasta puolestaan käsittelee hetkellistä voimasupistumisnopeus suhdetta. Tästä voidaan nähdä selkeä voiman potentoituminen lihas-työn konsentrisen vaiheen aikana perinteiseen eristetystä lihaksesta määritettyyn voima-nopeuskäyrään (kuva 6) verrattuna. (Komi 2003, 190.)



KUVA 5. Gastrocnemius lihaksen voima-pituus ja voima-nopeus käyrät venymis-lyhenemissyklissä kun koehenkilö juoksi nopeudella 9 m/s. Ylöspäin menevä käyrä kuvaa lihaksen venymistä (eksentrisen lihastyö) ja alaspäin menevä käyrä lyhenemistä (konsentrisen lihastyö). (Komi 2003, 190.)

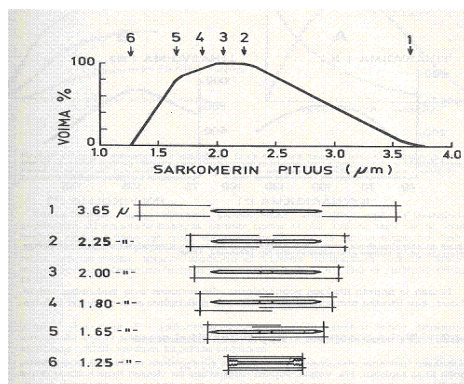


KUVA 6. Perinteinen eristetystä lihaksesta määritetty voima-nopeus käyrä (Komi ym. 1978).

3.2.1 Elastisten rakenteiden merkitys

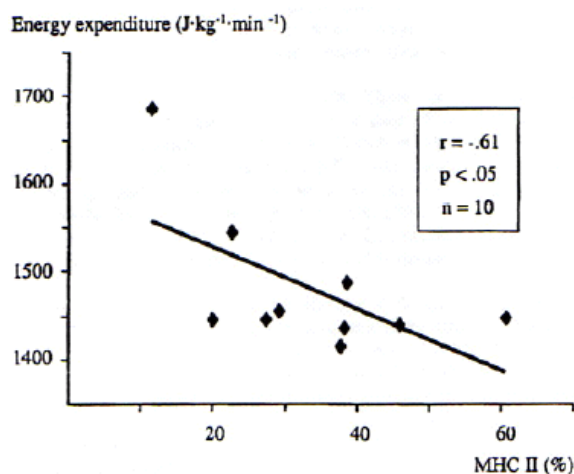
Eksentrisen lihastyön aikana syntyneen suuren voiman ansiosta lihas-jännekompleksiin voidaan varastoida elastista energiaa tehokkaasti. Osa tästä varastoidusta elastisesta energiasta voidaan sitten hyödyntää eksentristä vaihetta seuraavan konsentrisen lihastyön vaiheen aikana. Elastisen energian vapautumisen avulla voidaan siis tuottaa enemmän voimaa konsentrisesti kuin ilman esivenytyksen hyödyntämistä. (Komi 2003, 192.) On arvioitu, että elastisen energian hyödyntäminen laskisi juoksun hapenkulutusta jopa 30-40 % (Cavagna ym. 1964). Joissakin tilanteissa tämä mekanismi selittää kaiken esivenytyksen aiheuttamasta voimantuoton potentoitumisesta venymis-lyhenemissyklin konsentrisessä vaiheessa (Huijing 1992, 159).

Lihäs-jännekompleksin elastisten jännteiden rakenteiden venyessä tietyllä lihas-jännekompleksin pituudella lihassolut ovat lyhyempiä. Lisäksi elastisen energian vapautuminen johtaa suureen jänteisistä komponenteista alkunsa saavaan nopeuteen. Niinpä tietyllä liikkeen nopeudella lihassolut supistuvat hitaammin. Esimerkiksi lihassolujen toimiessa optimaalisen pituutensa yläpuolella voi venymis-lyhenemissyklissä tapahtuva jännteiden venyminen tuoda ne lähemmäksi optimaalisinta voimantuottopituuttaan (kuva 7), mutta voi käydä myös päinvastoin. Samanlaisia päätelmiä voidaan tehdä lihassolujen supistumisen nopeudesta niiden optimaalisiin voimantuottonopeuksiin suhteutettuna. (Huijing 1992, 159.)



KUVA 7. Venymis-lyhenemissyklissä elastisten komponenttien ansiosta supistuva komponentti voi sijoittua voimantuoton kannalta optimaalisemmin voima-pituus käyrällä (Komi ym. 1978).

Taloudellisilla juoksijoilla juoksu voi olla taloudellista jo hyvin hitailla nopeuksilla huonommalla taloudellisuudella varustettuihin juoksijoihin verrattuna. Tämä saattaa johtua siitä, että taloudellisilla juoksijoilla lihasten rakenteet ovat hyvin elastisia. (Kyröläinen ym. 2001.) Myös lihassolujakauma voi vaikuttaa juoksijoiden välisiin eroihin taloudellisuudessa. Nopeiden ja hitaiden solujen erilaisista viskoelastisista ominaisuuksista johtuen nämä pystyvät hyödyntämään venymis-lyhenemissykliä eri tavalla liikkeen nopeudesta riippuen. Nopeilla soluilla esivenytyksen aiheuttama voimantuoton potentioituminen on suurta nopeassa liikkeessä, kun taas hitaat solut pystyvät hyödyntämään venymis-lyhenemissykliä nopeita soluja paremmin liikkeen ollessa hidat. (Bosco ym. 1982.) Nopeiden solujen pinta-alan ($r = -0.67$) ja nopeiden solujen osuuden ($r = -0.64$) onkin havaittu olevan yhteydessä juoksun energiankulutukseen nopeudella 7 m/s, joka on hyvin lähellä maailman parhaiden 1500 m:n juoksijoiden kilpailuvauhtia. Kuvasta 8 voidaan havaita käänteinen korrelaatio tyypin II myosiiniraskasketjujen osuuden ja juoksun energiankulutuksen välillä. (Kyröläinen ym. 2003.)



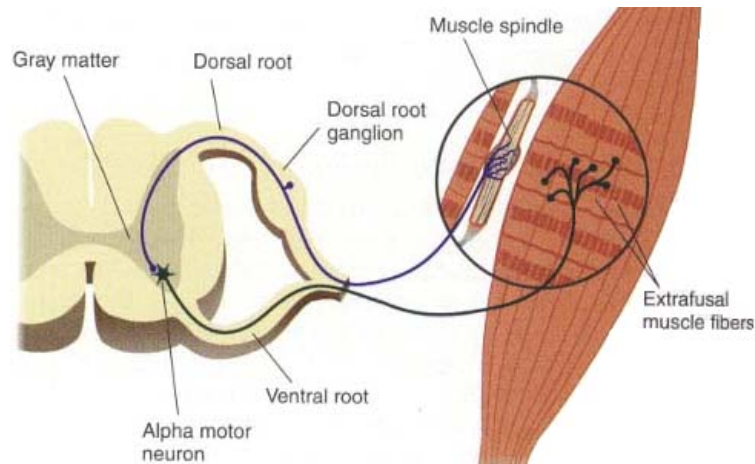
KUVA 8. Energiankulutuksen ja tyypin II myosiiniraskasketjujen osuuden välinen suhde (Kyröläinen ym. 2003).

3.2.2 Refleksitoiminta ja lihasjännekompleksin jäykkyys

Hermolihasjärjestelmän tasapainoisen toiminnan kannalta pelkkä liikkeiden tuottaminen ei riitä. Liikkeiden tulee olla sellaisia, että ne soveltuvat kehon ulkoiseen ympäristöön. Proprioceptorit, joihin kuuluvat lihasspindelit, golgin jänne-elimet ja nivelreseptorit, pystyvät tarjoamaan järjestelmälle informaatiota, joka mahdollistaa sen sopeutumisen ympäristön vaatimuksiin. Sopeutuminen onnistuu avustavien ja vastustavien refleksien sekä sopivien synergistilihasten toiminnan avulla. Nivelissä tapahtunut liike ei riipu ainoastaan neuraalisista ärsykkeistä, vaan myös lihaksen mekaanisilla ominaisuuksilla ja nivelkulmilla on suuri merkitys. Proprioceptorit voivat tarjota tietoa lihasten ja nivelten tilasta tai useiden nivelten välisistä suhteista, joten näin tietyn liikkeen mahdollistamiseksi voidaan antaa oikeanlaisia käskyjä. (Enoka 1994, 174-175, 182-183.)

Toimiakseen tehokkaasti venymis-lyhenemissykli tarvitsee tietynlaiset olosuhteet. Ensinnäkin on tärkeää, että lihaksissa tapahtuu oikea-aikaista esiaktiivisuutta ennen eksentrisen vaiheen alkua. Lisäksi eksentrisen vaiheen on oltava riittävän lyhyt ja nopea. Eksentrisen vaiheen loputtua on myös tärkeää, että konsentrisen vaihe seuraa eksentristä vaihetta mahdollisimman nopeasti. (Komi & Gollhofer 1997.) Vauhdin kasvaessa tärkeimpien juoksulihasien keskiarvostettu EMG kasvaa varsinkin juoksuaskeleen esiaktiivisuus- ja jarrutusvaiheissa. Suurilla nopeuksilla aEMG kasvaa jopa maksimaalisia isometrisiä arvoja suuremmiksi. Esiaktiivisuuden tehostuminen korostaa venytysrefleksin toiminnallista merkitystä juoksuvauhdin kasvaessa. (Kyröläinen ym. 2005.) Tehokkaan ja taloudellisen juoksuaskeleen kannalta venytysrefleksi on merkittävässä roolissa venymis-lyhenemissyklin toiminnan tehostamisessa (Komi 2003, 196).

Venytysrefleksi. Lihasspindelien avulla on mahdollista aistia lihasten pituuksissa tapahtuneet muutokset. Niinpä lihakseen kohdistuvan voiman kasvaessa lihaksen pidentymisen aiheuttaa lihasspindelien ärsytyksen, jonka johdosta lihaksen ja sen synergistien alfa-motoneuroneissa tapahtuu ekstradepolarisaatio. Näin lihaspituuden äkillinen kasvu voidaan nopeasti kompensoida venytysrefleksin aiheuttaman aktivaation kasvun avulla. Lihasspindelit antavat siis palautetta, jonka avulla lihaksen pituutta pystytään stabiloimaan. Spindeleiden sensorinen alue voidaan kuvata vertailijana, joka lähettää signaaleja ekstrasfusaalisolujen ja intrasfusaalisolujen välisistä pituuseroista alfa-motoneuroneille joko poly- tai monosynaptisen yhteyden avulla (kuva 9). (Huijing 1992, 17-18.).



KUVA 9. Refleksikaaren rakenne (www.nawrot.psych.ndsu.nodak.edu).

Lihäsjäykkyys määritetään lihaksen voiman muutoksen ja samanaikaisen lihaspituuden muutoksen suhteena ($\Delta f / \Delta x$) (Houk & Rymer 1981, 270). Jäykät lihakset nilkan ja polven nivelten ympärillä askeleen jarrutusvaiheessa mahdollistavat elastisen energian tehokkaan hyödyntämisen askeleen työntövaiheessa. Lihaksen esiaktiivisuuden uskotaan kasvattavan lihasspindelien sensitiivisyyttä. Tällöin venytysrefleksi potentoituu ja lihasjännekompleksin jäykkyys kasvaa edelleen. (Kyröläinen ym. 2001, Kyröläinen ym. 2005.) Venytysrefleksin avulla jäykkyys voi kasvaa jopa 75 % aktiivisten isometristen arvojen yläpuolelle (Sinkjaer ym.1988). Näin jäykän lihasjännekompleksin avulla on juostessa mahdollista kuluttaa suhteellisen vähän kemiallista energiaa, joten lihaksen jäykkyydellä (muscle stiffness) on suuri merkitys juoksun taloudellisuuden kannalta (Kyröläinen 2001).

Ensimmäisestä venytyksestä voiman potentoitumiseen venytysrefleksin aikana kuluu n. 50-55 ms. Esimerkiksi maratonjuoksussa askelkontaktin kesto voi olla melkein 250 ms, joten venytysrefleksillä on yleensä hyvin aikaa toimia lihasjäykkyyden säätelyssä jo juoksuaskeleen eksentrisen vaiheen aikana. Pikajuoksussa askelkontakti voi kestää vain 90-100 ms, joten tällöin venytysrefleksi voi aiheuttaa voiman potentoitumista eksentrisen jarrutusvaiheen lopussa ja jopa konsentrisen työntövaiheen alussa. (Komi 2003, 198.)

Lihaksen ollessa passiivisena rinnakkain olevat elastiset rakenteet vastaavat pääasiassa lihaksen pitenemisen vastustamisesta. Passiivinen ja aktiivinen jäykkyys ovat yhteydes-

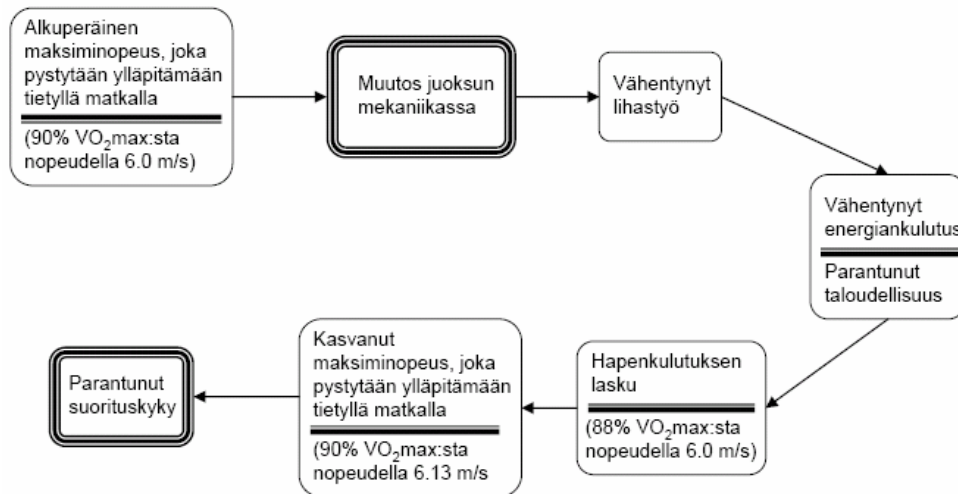
sä toisiinsa, mutta niitä ei voida pitää yhtenevinä termeinä. (Blackburn ym. 2004.) Lihaksen passiivisen jäykkyyden ei ole havaittu vaikuttavan jänteisten rakenteiden elastisuuteen (Kubo ym. 2001), mutta riittämätön passiivinen jäykkyys voi johtaa riittämättömään aktiiviseen jäykkyyteen. Kuitenkin passiivisen jäykkyyden on havaittu muodostavan vain 25 % aktiivisen jäykkyyden variaatioista. Aktiivisessa tilassa lihasjännekompleksin jäykkyyden suurin määrittäjä näyttäisikin olevan poikkisiltojen muodostuminen, joten tällöin lihaksen supistuvan koneiston ulkopuolisten elastisten rakenteiden merkitys ei ole kovin suuri. (Blackburn ym. 2004.)

3.3 Juoksun mekaniikka

Vaikka vielä ei olekaan tarkkaa tietoa siitä, miten eri fysiologisten ja biomekaanisten tekijöiden välinen yhteistoiminta vaikuttaa juoksun taloudellisuuteen, uskotaan juoksun mekaanisten tekijöiden voivan selittää merkittävän osuuden juoksun taloudellisuuden variaatioista (Kyröläinen ym. 2001). Lisäksi juoksun mekaniikkaa tarkasteltaessa tulee ottaa huomioon kudoksiin kohdistuva kuormitus ja lihasten väsyminen (Williams 1993, 4). Niinpä hermolihaskäytännön toiminta vaikuttaa suorituskykyyn kestävyysjuoksussa myös juoksun mekaniikan kautta.

Yleensä juoksijat pyrkivät joko tietoisesti tai tiedostamattaan optimoimaan juoksun mekaniikkaansa. Juoksuaskeleen yksilölliseen muokkautumiseen liittyvistä tekijöistä jotkut riippuvat kehon toiminnallisista ominaisuuksista kuten liikkuvuudesta (Nelson ym. 2001, Graib ym. 1996), hermolihaskäytännön toiminnasta (Paavolainen ym. 1999a) tai kehon rakenteesta (Frederick 1990), ja toiset tekijät saattavat johtua esimerkiksi vuosien harjoittelusta tai vammoihin sopeutumisesta. Näiden kaikkien tekijöiden yhteen liittäminen aiheuttaakin sen, että juoksun mekaniikan optimointi on erittäin monimutkainen prosessi. Biomekaanisen tutkimuksen tulisikin pyrkiä parantamaan ymmärrystä mahdollisista malleista, joita voidaan soveltaa yleisesti kaikkiin juoksijoihin. Lisäksi pitäisi pyrkiä ymmärtämään paremmin juokсутekniikan yksilöllisiä eroja ja niihin vaikuttavia tekijöitä. (Williams 1993, 5-7.)

Juoksun mekaniikkaan liittyvät tekijät voivat olla yhteydessä juoksun taloudellisuuteen yllättävän monimutkaisten tapahtumaketjujen kautta. Mikä tahansa muutos juoksun askelmalleissa saattaa vaikuttaa käytettyjen lihasten aktivointiin, jolloin juoksun energiankulutus saattaa joko kasvaa tai vähentyä (kuva 10). (Williams 1990, 281-282.)



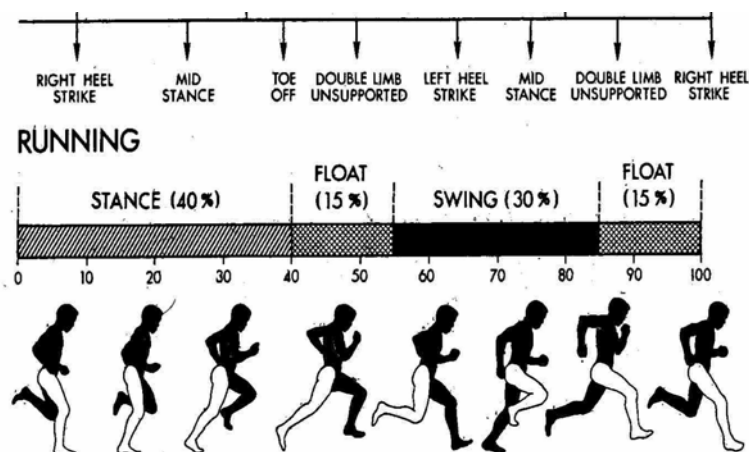
KUVA 10. Mahdollinen mekanismi juoksun mekaniikan muutosten vaikutuksista taloudellisuuteen ja sitä kautta suorituskykyyn (mukaeltu Williams 1990, 274).

Tietyllä vauhdilla juostaessa energiankulutus voi vähentyä, ja taloudellisuus näin parantua, pääasiassa kahden eri mekanismin kautta. Ensiksikin energiankulutus voi vähentyä juoksun aikana aktiivisina olevien lihasten määrää vähentämällä. Niinpä juoksun aikana olisi tärkeää välttää ylimääräisiä liikkeitä ja lihassupistuksia. Toisaalta taloudellisuus voi parantua opittaessa hyödyntämään tehokkaammin elastista energiaa venymislyhenemissyklin aikana. Lisäksi jouhevammaksi muuttunut energian siirtyminen kehon segmenttien välillä voi vähentää juoksun aikaista energiankulutusta. (Williams 1990, 281-282.)

4 JUOKSUN KINEMATIikka

Kinematiikka määritetään mekaniikan haaranä, joka käsittää pisteiden ja rakenteiden liikettä tilassa huomioimatta liikettä tuottavia voimia. Juoksun kinematiikka voidaan yksinkertaisesti määrittää kehon osien liikkumisen kuvauksena. (Milliron & Cavanagh 1990.) Juoksun kinemaattisia muuttujia voidaan tarkastella juoksusyklin eri vaiheiden aikana (Adelaar 1986, Mero ym. 1988, Milliron & Cavanagh 1990, 65-105, Cavanagh & Kram 1990, Ounpuu 1994, Pink ym. 1994, Skof & Stuhec 2004).

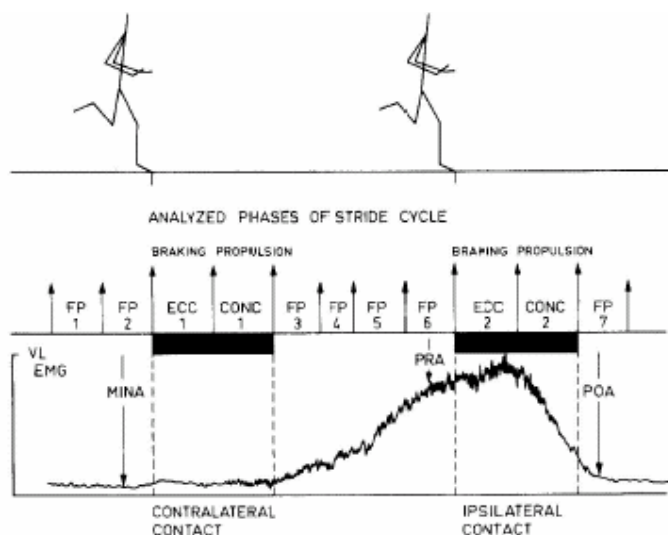
Juoksusykli alkaa jalan koskettaessa maata ja loppuu saman jalan seuraavaan maakosketukseen. Sykli voidaan tavallisesti jakaa askeleen tukivaiheeseen ja heilahdusvaiheeseen (kuva 11). Tukivaihe alkaa jalan koskettaessa maata (strike) ja loppuu varpaiden irrottua maasta (toe-off), kun taas heilahdusvaihe on jalan maasta irtoamisen ja maahan koskemisen välinen jakso. (Enoka 2002, 179.)



KUVA 11. Juoksusyklin rakenne (Mukaeltu Adelaar 1984).

Askeleen tukivaihe voidaan jakaa jarrutusvaiheeseen ja työntövaiheeseen, joita erottaa tukivaiheen keskivaihe. Lisäksi heilahdusvaihe voidaan jakaa takaheilahdusvaiheeseen ja etuheilahdusvaiheeseen. Heilahdusvaiheen alussa ja lopussa on vaihe, jolloin kumpaankin jaloista ei kosketa maahan. Tuki- ja heilahdusvaiheen osuudet juoksusykliissä muuttuvat juoksunopeudesta riippuen; vauhdin lisääntyessä tukivaiheen kesto pienenee ja heilahdusvaiheen osuus kasvaa. (Ounpuu 1994.)

Mero & Komi (1987) ovat tutkimuksessaan jakaneet askelsyklin vielä useampiin osiin (kuva 12). Tarkempi jako mahdollistaa lihasten EMG-aktiivisuuden määrittämisen useissa askelsyklin vaiheissa. Kontaktivaihe jaettiin edelleen jarrutus - ja työntövaiheeseen. Lentovaiheet 2, 3, 6 ja 7 määritettiin kestämään 50 ms. Muiden vaiheiden kestot määritettiin juoksunopeudesta riippuen sopiviksi. Lihaksen esiaktiivisuus ennen askelleen kontaktivaihetta mitattiin lentovaihe 6:ssa. Jälkiaktiivisuus askelkontaktin jälkeen mitattiin lentovaihe 7:ssä ja minimiaktiivisuus ennen kontralateraalisen jalan kontaktia lentovaiheessa 2. (Mero & Komi 1987.)

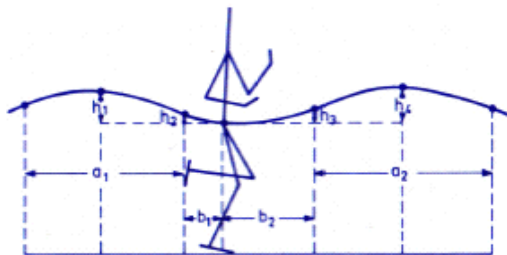


KUVA 12. Tutkimuksessa käytetty askelsyklin jako eri vaiheisiin. Kuvasta näkyy myös Vastus Lateraliksen aktiivisuus askelsyklin aikana. ECC = eksentrinen eli jarrutusvaihe, CON = koncentrinen eli työntövaihe, FP = lentovaihe, PRA = esiaktiivisuus, POA = jälkiaktiivisuus, MINA = minimiaktiivisuus. (Mero & Komi 1987.)

4.1 Askelpituus ja -tiheys sekä askelkontaktin kesto

Juoksuaskeleen aikaisia kinemaattisia muuttujia tarkasteltaessa kiinnitetään usein huomiota juoksijoiden askelpituuteen ja -tiheyteen (Mero ym. 1988, Cavanagh & Kram 1990, 35-57). Lisäksi askelkontaktin eli askeleen tukivaiheen kesto on ollut yleinen tutkimusten kohde (Mero ym. 1988, Williams 1990, 295-297). Tukivaiheeseen sisältyvien jarrutusvaiheen ja työntövaiheen kestot voidaan määrittää voimalevyn avulla (Kyröläi-

nen ym. 2001), mutta samat muuttujat on määritelty myös liikeanalyysin avulla kehon massakeskipisteen liikkeen perusteella (kuva 13) (Mero ym. 1988).



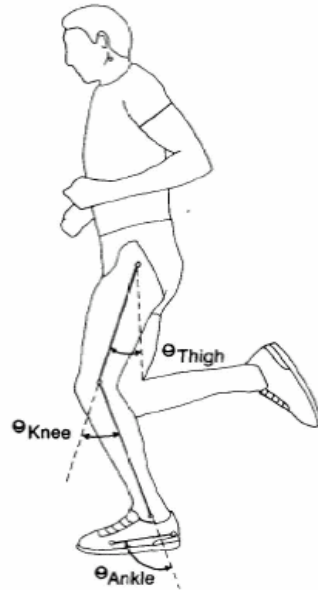
KUVA 13. Kehon massakeskipisteen liike juoksusyklin aikana. $a_{1,2}$ = lentovaiheen aikainen horisontaalinen siirtymä, $b_{1,2}$ = kontaktivaiheen aikainen horisontaalinen siirtymä (1 = eksentriinen eli jarrutusvaihe, 2 = konsentriinen eli työntövaihe), $h_{1,4}$ = vertikaalinen siirtymä. (Mero ym. 1988.)

Tietyllä juoksunopeudella jokainen juoksija yleensä valitsee tiedostamattaan itselleen sopivan askelpituuden ja askeltiheyden yhdistelmän. Askelmuuttujien valintaan vaikuttavat monet tekijät, kuten esimerkiksi kehon mittasuhteet, lihassolujakauma ja väsyminen. Askelmuuttujien tutkimisessa on tärkeää huomioida, että askelpituuden valinnalla pyritään mahdollisesti minimoimaan juoksemisen energiankulutusta, mekaanista tehoa, vammautumisen riskiä tai jotain näiden tekijöiden yhdistelmää. (Cavanagh & Kram 1990, 35-36.)

4.2 Kehon osien liikkeet

Nivelten liikkeitä voidaan kuvailla käsitteellä range of motion (ROM), joka tarkoittaa nivelen maksimaalista kulmamuutosta (Enoka 2002, 476). Nivelkulmien amplitudien lisäksi on hyödyllistä analysoida myös nivelkulmia tiettyjen juoksusyklin vaiheiden aikana. Samalla tavalla voidaan tarkastella nivelpisteiden liikeratoja ja nopeuksia. Lisäksi kinemaattisesta informaatiosta on mahdollista laskea esimerkiksi kehon massakeskipisteen sijainti tai eri nivelten kulmanopeuksia. Juoksuaskeleeseen oleellisin liittyvät nivelkulmat ovat nilkka-, polvi- ja lonkkaniveliin liittyvät kulmat (kuva 14). Kuvassa olevista kulmista käytetään nimityksiä nilkka-, polvi-, ja reisikulmat. Näiden kulmien lisäksi lonkkakulmana voidaan käyttää reisiluun ja vartalon välistä kulmaa. (Milliron & Cavanagh 1990, 65-105, Skof & Stuhec 2004.)

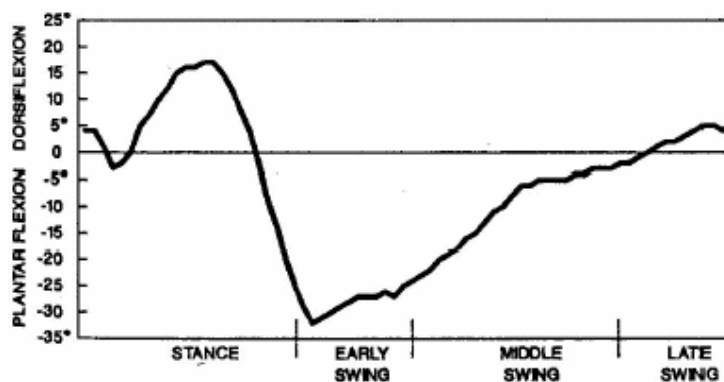
KUVA 14. Juoksussa tärkeimpiä mitattavia nivelkulumia (Milliron & Cavanagh 1990, 68).



Kinemaattisten muuttujien arvot ovat luonnollisesti hieman erilaisia juoksunopeudesta riippuen. Jotta voidaan saada yleinen käsitys mitattavista muuttujista, on hyvä että niitä tarkastellaan vain tietyllä juoksunopeudella. Seuraavassa kappaleessa käsitellään nivelkulumien muutoksia juoksusyklin aikana nopeudella, joka on noin 3.83 m/s. Tätä nopeutta on kirjallisuudessa käytetty kuvaamaan tyypillistä kestävyysjuoksunopeutta. (Milliron & Cavanagh 1990, 69.)

4.2.1 Nilkkakulma juoksusyklin aikana

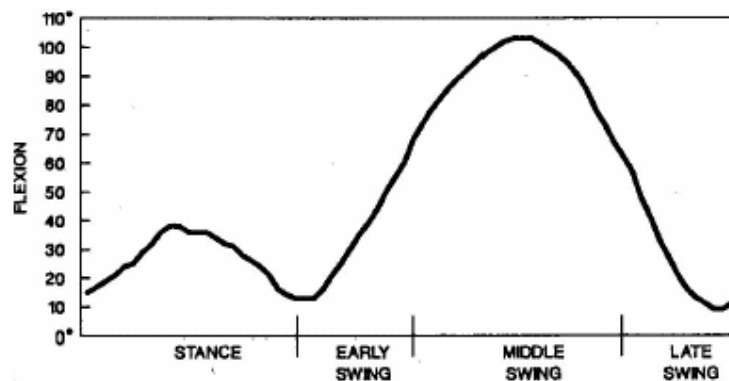
Jalan koskettaessa maata nilkan kulma on yleensä noin 90 astetta. Välittömästi maakosketuksen jälkeen nilkassa tapahtuu pieni plantaarifleksio, jonka jälkeen nilkka kuitenkin saavuttaa maksimaalisen dorsifleksion suurin piirtein tukivaiheen keskivaiheen kohdalla. Tämän jälkeen nilkka alkaa ojentua saavuttaen maksimaalisen plantaarifleksion hieman varpaiden maasta irtoamisen jälkeen. Maksimaalisen plantaarifleksion jälkeen nilkkakulma palautuu heilahdusvaiheen aikana takaisin lähelle neutraalia 90 asteen kulmaa. (Milliron & Cavanagh 1990, 72-73.) Kuvassa 15 nähdään nilkkakulman kehitys juoksusyklin aikana keskimääräisellä nopeudella 3.94 m/s. Tässä kuvassa 90 asteen nilkkakulma vastaa neutraalia 0 kulmaa, jossa nilkka ei ole dorsifleksiossa eikä plantaarifleksiossa. (Pink ym 1994.)



KUVA 15. Nilkkakulman muutos juoksusyklin aikana keskimääräisellä nopeudella 3.94 m/s (Pink ym.1994).

4.2.2 Polvikulma juoksusyklin aikana

Jalan osuessa maahan askeleen kontaktivaiheen alussa polvi on yleensä koukistuneena noin 10-20 asteen kulmaan. Törmäysvaiheen jälkeen polven koukistuminen jatkuu tukivaiheen keskivaiheen paikkeille, jonka jälkeen polvi alkaa taas ojentua. Ojentumista voi kestää varpaiden maasta irtoamisen vaiheeseen asti tai hieman sen yli. Heilahdusvaiheen aikana polvi koukistuu nopeasti saavuttaen maksimifleksionsa noin heilahduksen keskivaiheessa. Heilahdusvaiheessa koukistuksen jälkeen polvi ojentuu lähestulkoon samalla nopeudella kuin koukistuukin. Polven ojentumisen lopussa polvikulma jää hieman täydestä ekstensiosta ja ennen uutta törmäysvaihetta on yleensä havaittavissa vielä muutaman asteen koukistuminen. (Milliron & Cavanagh 1990, 71-72.) Kuvassa 16 voidaan nähdä polvikulman kehitys askelsyklin aikana keskimääräisellä nopeudella 3.94 m/s (Pink ym. 1994).

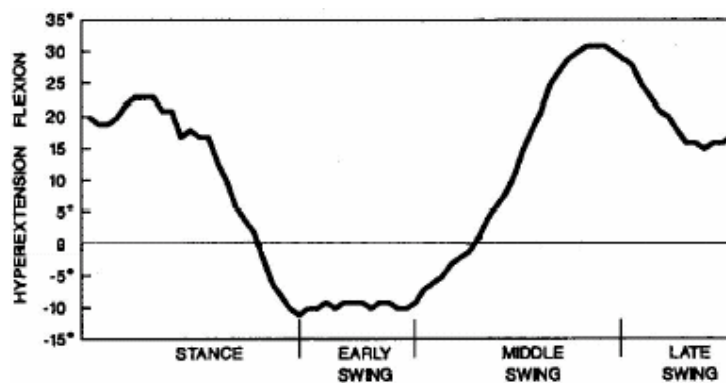


KUVA 16. Polvikulman muutos juoksusyklin aikana keskimääräisellä nopeudella 3.94 m/s (Pink ym. 1994).

4.2.3 Reisikulma juoksusyklin aikana

Reisikulmalla tarkoitetaan tässä katsauksessa reisiluun ja vertikaalisen tason välistä kulmaa. Lonkkanivelen liikettä tarkasteltaessa on käytetty myös reisiluun ja vartalon/pään välistä kulmaa, mutta tällöin täytyy huomioida vartalon kallistuksen vaikutus mitatun kulman suuruuteen. Vartalon kallistuessa eteenpäin lonkan koukistuksen kulmat korostuvat ja ojennuksen kulmat puolestaan pienenevät pelkästään reiden liikkeen tarkasteluun verrattuna. (Milliron & Cavanagh 1990, 69.)

Maakosketuksen aikana lonkkanivel on hieman koukistuneena reisikulman ollessa noin 20-25 astetta. Tukivaiheen alussa reisikulma on muuttunut tutkimuksista riippuen hieman eri tavalla. Joidenkin tutkimusten mukaan reisi pysyy suhteellisen paikallaan kunnes polvinivel on koukistunut maksimaalisesti. Toisissa tutkimuksissa on kuitenkin havaittu myös reiden pientä liikettä joko eteen tai taaksepäin. (Milliron & Cavanagh 1990, 69-70.) Kuvan 17 perusteella voidaan nähdä reisikulman pienenevän vähän kontaktin alussa keskimääräisellä nopeudella 3.94 m/s, jonka jälkeen se hieman kasvaa lonkan koukistuessa ennen askeleen tukivaiheen keskivaihetta (Pink ym. 1994).



KUVA 17. Reisikulman muutos juoksusyklin aikana keskimääräisellä nopeudella 3.94 m/s (Pink ym. 1994).

Polven koukistumisen saavuttaessa huippunsa myös lonkka alkaa ojentua polvinivelen kanssa samanaikaisesti ja vieläpä lähes samalla nopeudella. Maksimaalisen ojennuksen lonkkanivel saavuttaa varpaiden maasta irtoamisen hetkellä tai hieman aikaisemmin. Heilahdusvaiheen aikana reiden liikesuunta vaihtuu lähes välittömästi varpaiden irtoamisen jälkeen, mutta lonkan koukistus tapahtuu huomattavasti hitaammin kuin saman-

aikainen polven koukistus. Lisäksi lonkan koukistuminen jatkuu jonkin verran vielä sen jälkeen kun polvi saavuttaa maksimaalisen koukistuksensa. Polven alkaessa ojentua lonkka jatkaa vielä koukistumistaan. Maksimaalisen koukistuksen jälkeen lonkka alkaa taas ojentua kunnes uusi törmäysvaihe aloittaa uuden askelsyklin. (Milliron & Cavanagh 1990, 70.)

4.2.4 Kulmanopeudet ja massakeskipiste

Reiden segmentin sekä nilkka- ja polvinivelten kulmanopeudet voidaan laskea tiedettäessä kulmien muutokset tietyssä ajassa. Kulmanopeuksia määrittäessä on hyödyllistä tarkastella maksimaalisia nopeuksia juoksusyklin eri vaiheiden aikana. Juoksussa voidaan esimerkiksi nähdä, että reiden segmentin kulmanopeus on suurempi lonkan koukistuksen kuin ojennuksen aikana. Tämä onkin ymmärrettävää, koska koukistus tapahtuu pelkästään ilman vastusta vastaan, kun taas ojennus tapahtuu askeleen tukivaiheen aikana. (Milliron & Cavanagh 1990, 90-91.)

Kinemaattisen datan perusteella on mahdollista laskea myös koko kehon massakeskipisteen tai yksittäisten segmenttien massakeskipisteiden sijainnit antropometrisia malleja apuna käyttäen (Skof & Stuhec 2004). Kehon massakeskipisteen vertikaalinen oskillaatio onkin yksi oleellinen juoksun taloudellisuuteen liittyvä muuttuja (Williams 1990, 285). Massakeskipisteiden avulla on pyritty määrittämään myös juoksun aikana tehdyn mekaanisen työn määrää. Tällöin mekaanisen työn määrittämisessä voidaan käyttää joko koko kehon massakeskipisteen potentiaali- ja liike-energian yhdistelmää, tai se on mahdollista määrittää samalla tavalla jokaisen yksittäisen segmentin massakeskipisteen avulla. (Belli 1996, 58.)

4.3 Tehokkaan askeleen ominaisuuksia

Vaikka jokaisen juoksijan henkilökohtainen juoksutyyli on aina hieman erilainen, voidaan tehokkaasta askeleesta löytää aina tiettyjä piirteitä. Juoksutekniikkaa analysoitaessa tulee muistaa, että jokainen ylimääräinen lihassupistus kuluttaa energiaa. Niinpä esimerkiksi hartioiden ja käsien tulee olla rentoina sellaisessa asennossa, jossa ne rytmittä-

vät juoksua ilman korostunutta heiluntaa. Käsien ja jalkojen tulee liikkua suoraviivaisesti eteen-taakse suunnassa. Vartalo on pystyssä tai hieman eteenpäin kallistuneena kuitenkin siten, että samalla lantio pysyy ylhäällä. Juoksussa tulisi myös välttää liiallista vertikaalista liikettä ja kontaktivaiheen alussa jalan tulee laskeutua horisontaalisuunnassa mahdollisimman lähelle kehon painopistettä. Tehokkaan ja taloudellisen juoksun tyypillisiä ominaisuuksia voidaan nähdä kuvassa 18. (Greene & Pate 1997; 67-68, Sinkkonen 2000, 35-40.)

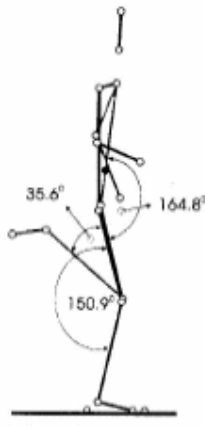


KUVA 18. Tyypillinen 1500 m juoksijan askel. Kädet työskentelevät rennosti mutta tehokkaasti. Vartalo on lähes pystysuorassa ja jalka tulee maahan päkiän ulkoreunalla ja pysyy koko askeleen ajan päkiällä. Askel on laaja ja kantapää nousee lähelle pakaraa. Huomaa lantion pysyminen korkealla myös askeleen tukivaiheessa. (Mukailtu Sinkkonen 2000, 42-43.)

Juoksussa askeleen jarrutusvaiheen tulisi olla mahdollisimman lyhyt. Tämä on mahdollista asettamalla jalka mahdollisimman lähelle massakeskipisteestä vedettyä vertikaalista suoraa. (Skof & Stuhec 2004.) Tutkittaessa maailman huippujuoksijoita 400m:n matkalla Helsingin MM-kisoissa havaittiin tämän etäisyyden olevan sekä miehillä että naisilla keskimäärin 31 cm. Pienimmillään tämä etäisyys oli 27 cm. (Mero ym. 1988.) Naispuolista kansainvälisen huipputason 800 m:n juoksijaa tutkittaessa kilpailun loppusuoralla massakeskipisteen ja tukipisteen etäisyys törmäysvaiheessa oli 32 cm (Skof & Stuhec 2004). Vertailtaessa massakeskipisteen vertikaalista heilahtelua voidaan havaita sen olevan keskimäärin 8cm sekä nais- ja miespuolisilla 400 m:n juoksijoilla että kansainvälisen huipputason 800 m:n naisjuoksijalla (Mero ym 1988, Skof & Stuhec 2004). Eliittitason naispuolisia keskimatkan juoksijoita tutkittaessa vertikaalinen oskillaatio oli 7.6 cm (Williams ym. 1987). Verrattaessa eliittitason kestävyysjuoksijoita harrastelijoihin on vertikaalinen oskillaatio eliittitason juoksijoilla pienempi (Slawinski & Billat 2004). Reaktiivoimia vertailtaessa menestyneillä kestävyysjuoksijoilla on havaittu suh-

teellisen pieni vertikaalinen voimapiikki askelkontaktin alussa heikompiin juoksijoihin verrattuna (Williams & Cavanagh 1987).

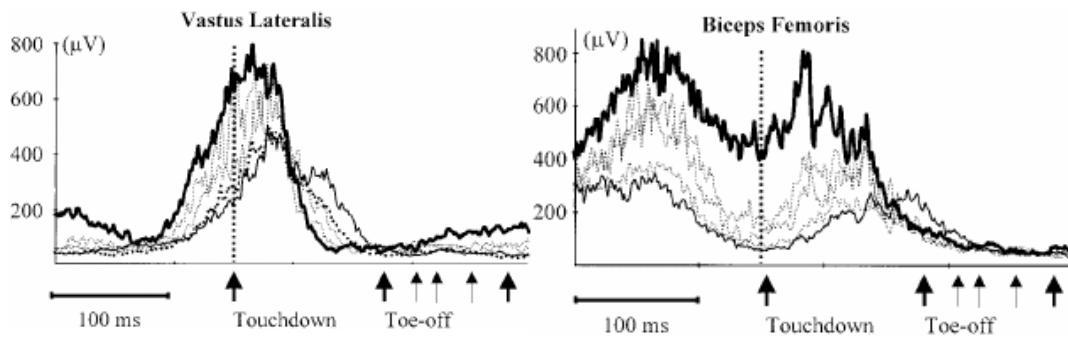
Kestävyysjuoksusuorituksen kannalta on tärkeää, että oikein ajoitetun esiaktiivisuuden ja riittävän lihasjäykkyyden avulla sekä nilkan dorsifleksio että ja polven ja lonkan koukistuminen pystytään pitämään mahdollisimman pienenä askeleen törmäysvaiheessa (kuva 19). Myös heilahtavan jalan liikerata ja heilahtavan jalan nopeus ovat tärkeitä tekijöitä tehokkaan askeleen kannalta. (Skof & Stuhec 2004.) Kansainvälisen huipputasoisen naisjuoksijalla on raportoitu 800 m:n kilpailussa poikkeuksellisen suuria arvoja esimerkiksi reiden liikelaajuuden ja heilahdusvaiheen aikaisen maksimipolvikulman kohdalta. Reisikulman liikelaajuus oli jopa 99.6 astetta ja heilahdusvaiheen maksimaalinen polvikulma 147.9 astetta (huomioi eri tavalla määritelty polvikulma kuin kuvassa 19). Lisäksi jalkaterän horisontaalinen nopeus heilahdusvaiheen aikana saavutti maksimissaan arvon 14.25 m/s. Edellä mainitut arvot ovat hyvin vertailukelpoisia jopa 200-400m:n pikajuoksussa saavutettuihin arvoihin. (Skof & Stuhec 2004, Mero ym. 1988, Koh ym. 2002 Skof & Stuhec 2004 mukaan.) Vastaavanlaisia tutkimuksia ei ole tehty miespuolisilla keskimatkan juoksijoilla, mutta on oletettavaa, että myös miehillä keskimatkojen juoksu asettaa suuret vaatimukset hermolihasjärjestelmän toiminnalle tehokkaan juoksuaskeleen mahdollistamiseksi.



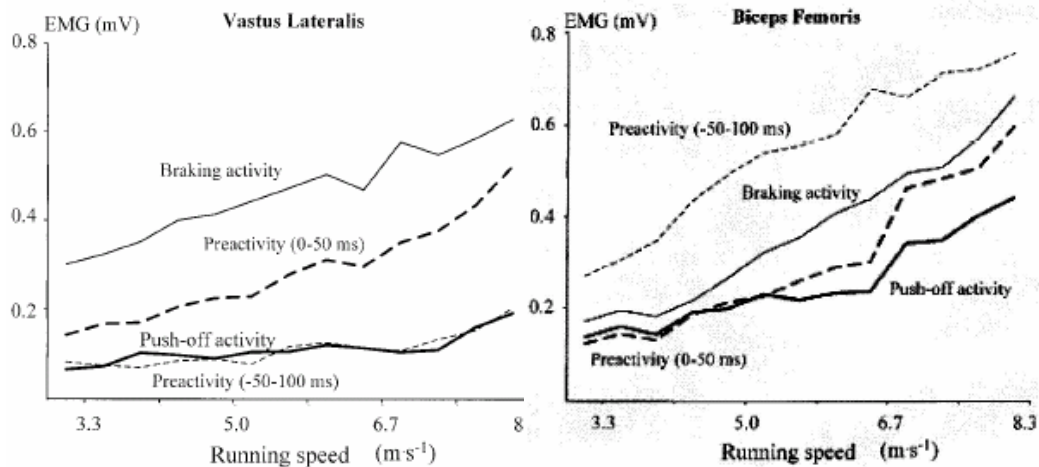
KUVA 19. Nivelkulmia askeleen tukivaiheen keskivaiheessa eliittitason naisjuoksijalla 800 m:n matkalla. Maakontaktissa olevan jalan lonkkakulma (164.8°) ja polvikulma (150.9°) pysyvät suurina myös askeleen tukivaiheessa. (Skof & Stuhec 2004.) Huomioi eri tavalla määritetty polvikulma kuin aikaisemmassa tekstissä (kuva 13).

Suurilla juoksunopeuksilla varsinkin lonkan ojentajalihakset ovat tärkeässä roolissa tehokkaan juoksuaskeleen kannalta. Suuri pakaralihas työskentelee eksentrisesti heilahdusvaiheen lopussa jarruttaen lonkan koukistumista ja konsentrisesti lonkan ojentuessa kontaktin alussa. Takareiden lihakset ovat aktiivisina jo heilahdusvaiheen lopussa hidas-

taen lonkan koukistumista ja polven ojentumista, mutta askeleen kontaktivaiheessa ne toimivat lonkan ojentajina. Polven ojentajalihasten aktiivisuus on korkealla varsinkin askeleen jarrutusvaiheen aikana, mutta polven ojentuessa Vastus lateraliuksen aktiivisuus häviää lähes kokonaan (kuva 20). Juoksunopeuden kasvaessa takareiden lihakset tuottavatkin suuren osan askeleen työntövaiheen voiman kasvusta. Kuvan 21 mukaisesti Biceps femoriksen aktiivisuuden voidaan havaita kasvavan myös askeleen työntövaiheessa juoksunopeuden lisääntyessä, kun taas Vastus lateraliuksen aktiivisuus työntövaiheessa ei kasva. (McClay ym. 1990 171-175, Kyröläinen ym. 1999.)



KUVA 20. Vastus lateraliuksen ja Biceps femoriksen aktiivisuudet juoksuzyklin aikana. Ohut viiva kuvaa lihasaktiivisuutta nopeudella 3.25 m/s ja paksu viiva maksimaalisella nopeudella. Katkoviivat kuvaavat lihasaktiivisuuksia kolmelta keskimmaiselta juoksunopeudelta. (Kyröläinen ym. 1999.)

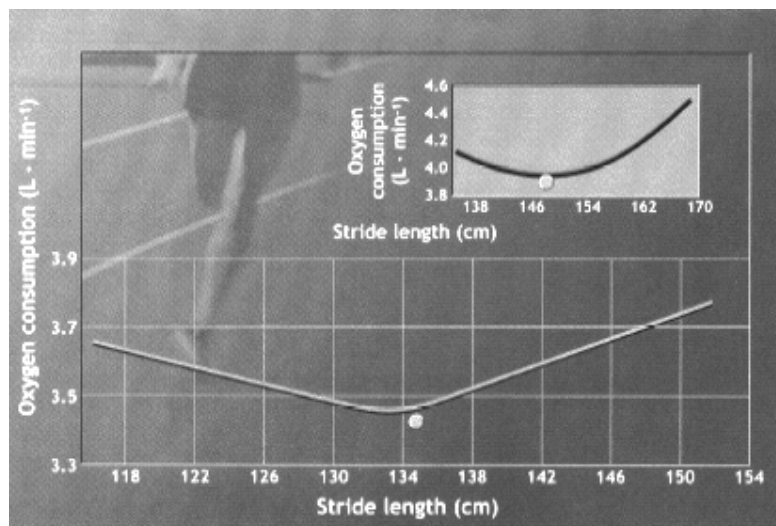


KUVA 21. Vastus lateraliuksen aEMG kasvoi juoksunopeuden lisääntyessä esijännitys- ja jarrutusvaiheissa, mutta työntövaiheessa ei tapahtunut muutoksia. Biceps femoriksen aEMG kasvoi juoksunopeuden lisääntyessä kaikissa askelsyklin vaiheissa. (Kyröläinen ym. 1999.)

4.4 Juoksun kinematiikan vaikutukset juoksun taloudellisuuteen

4.4.1 Askelpituus ja -tiheys sekä askelkontaktin kesto

Askelpituuden muuttuessa juoksun aikaiset liikemallit muuttuvat, joten myös energiankulutuksessa mitä ilmeisimmin tapahtuu muutoksia. Tutkimusten mukaan ei ole löydetty selkeää linjaa optimaalisesta askelpituudesta, mutta askelpituuden muutosten on havaittu vaikuttavan energiankulutukseen. Hyvin harjoitelleet urheilijat yleensä löytävät automaattisesti heille taloudellisimman askelpituuden, jonka pidentäminen tai lyhentäminen kasvattaa energiankulutusta (kuva 22). Lisäksi on havaittu, että askeleen pidentäminen olisi taloudellisuuuden kannalta haitallisempaa kuin askeleen lyhentäminen. On myös viitteitä siitä, että taloudellinen askel määräytyisi askeltiheyden perusteella siten, että kaikilla nopeuksilla juoksu olisi taloudellisinta lähestulkoon samalla askeltiheydellä. (Williams 1990, 283-284.)



KUVA 22. Askelpituuden ja hapenkulutuksen yhteydet nopeuksilla 14 km/h (iso kuva) ja 16 km/h (pieni kuva). Pallot kuvassa näyttävät juoksijan luonnollisen askelpituuden, mikä on hyvin lähellä taloudellisinta askelpituutta. (McArdle ym. 2001, 211.)

Joidenkin tutkimusten mukaan askeleen kontaktiajan on havaittu olevan yhteydessä matalaan submaksimaaliseen hapenkulutukseen, mutta tästä asiasta on ristiriitaisia tuloksia (Williams 1990, 295-297). Yhdessä pitkän kontaktiajan ja juoksun hyvän taloudellisuuden välisen yhteyden esittävässä tutkimuksessa juoksunopeus oli 3,6 m/s, joka on melko kaukana huippujuoksijoiden kilpailuvauhdeista (Williams & Cavanagh 1987).

Askeleen lyhyen kontaktiajan 10000 m juoksun aikana on havaittu olevan yhteydessä hyvään suorituskykyyn eritasoisia juoksijoita vertailtaessa (Paavolainen ym 1999b).

Toimiakseen tehokkaasti juoksuaskeleessa tapahtuva venymis-lyhenemissykli tarvitsee tietynlaiset olosuhteet. Askelkontaktin aikaisen eksentrisen vaiheen on oltava riittävän lyhyt ja nopea. Eksentrisen vaiheen loputtua on myös tärkeää, että konsentrisen vaihe seuraa eksentristä vaihetta mahdollisimman nopeasti. Tällöin askeleen työntövaiheen aikana on mahdollista hyödyntää tehokkaasti eksentrisen vaiheen aikana varastoitunutta elastista energiaa. (Komi & Gollhofer 1997, Komi ym. 1987.) On arvioitu, että elastisen energian hyödyntäminen laskisi juoksun hapenkulutusta jopa 30-40 % (Cavagna ym. 1964), joten juoksun taloudellisuuden kannalta on erittäin tärkeää luoda olosuhteet, joissa elastista energiaa on mahdollista hyödyntää tehokkaasti. Vauhdin kasvaessa polven ja nilkan nivelten ympärillä olevien lihasten jäykkyys askeleen jarrutusvaiheessa kasvaa, jolloin voiman potentioituminen askeleen työntövaiheessa lisääntyy. Hyvät juoksijat voivat pystyä hyödyntämään tätä voiman potentioitumista heikompia juoksijoita paremmin, jolloin hyvillä juoksijoilla energiankulutuksen kasvu vauhdin lisääntyessä on pienempää kuin huonommilla juoksijoilla (Kyröläinen ym. 2001). Niinpä nykyisin kestävyysmatkoilla vaadittavissa nopeuksissa askelkontaktin nopeudella on mitä luultavimmin suuri merkitys juoksun taloudellisuuden kannalta.

4.4.2 Kehon osien liikkeet

Loogisesti ajatellen voidaan pitää selvänä, että painopisteen suuri ylösalainen liike vaikuttaa juoksun taloudellisuutta heikentävästi. Juoksussahan energian tulisi kohdistua horisontaaliseen liikkeeseen, eikä sitä pitäisi tuhlata vertikaalisen liikkeen aikaansaamiseksi. Williamsin & Cavanaghin tutkimuksessa (1987) havaittiinkin korrelaatio hyvän taloudellisuuden ja pienen vertikaalisen oskillaation välille. On kuitenkin tehty myös tutkimuksia, joissa korrelaatiot ovat olleet hyvin pieniä. Niinpä näyttääkin siltä, että vaikka pieni painopisteen vertikaalinen heilahtelu voi olla hyvään taloudellisuuteen liittyvä tekijä, on mahdollista juosta taloudellisesti myös suhteellisen suurella painopisteen vertikaalisella heilahtelulla. (Williams 1990, 285.)

Kyröläisen ym. (2001) tutkimuksen mukaan nilkan, polven ja lonkan nivelkulmien muutokset ja nivelten kulmanopeudet eivät ole hyviä juoksun taloudellisuuden määrittä-

jiä. Aikaisemmassa tutkimuksessa löydettiin muutamia tekijöitä, jotka voivat selittää juoksun taloudellisuuden eroavaisuuksia. Tässä tutkimuksessa 31 juoksijaa jaettiin taloudellisuuden perusteella kolmeen ryhmään, joista kaikki juoksivat testit nopeudella 3.6 m/s. Hyvän taloudellisuuden kanssa olivat merkittävästi yhteydessä säären ja vertikaalisen välinen suuri kulma törmäysvaiheessa, vartalon suuri eteenpäin kallistuminen ja nilkan pieni plantaarifleksio varpaiden maasta irtoamisen vaiheessa. (Williams & Cavanagh 1987.) Tämän tutkimuksen tuloksia tarkasteltaessa on otettava huomioon mittauksissa käytetty alhainen juoksuvauhti. Kahdessa muussa tutkimuksessa ei löydetty samanlaisia merkittäviä yhteyksiä. Näissä molemmissa tutkimuksissa pieni polvikulma varpaiden maasta irtoamisen hetkellä oli yhteydessä hyvään taloudellisuuteen, mutta esimerkiksi maksimaalisen reiden ojennuksen kulmien suhtautumiset taloudellisuuteen olivat päinvastaisia. (Williams ym. 1987, Williams & Cavanagh 1986 Williams 1990, 295-297 mukaan.)

Edellä mainittuja tuloksia tarkasteltaessa on otettava huomioon, että mikään yksittäinen liikemalli ei voi olla kovinkaan suuri taloudellisuutta määrittävä tekijä. Jokaisella yksittäisellä mekaanisella tekijällä voi olla tietyn suuruinen vaikutus juoksun taloudellisuuteen, mutta esimerkiksi energiankulutusta nostavan suuren vertikaalisen oskillaation vaikutus voidaan kompensoida muiden taloudellisuuteen vaikuttavien tekijöiden avulla. On myös mahdollista, että jonkun itsessään taloudellisuutta heikentävän tekijän vaikutuksesta jotkut muut tekijät voivat muuttua taloudellisuuden kannalta edullisemmiksi. (Williams 1990, 285.)

5 JUOKSUN KINEMATIikka ERI JUOKSUVAUHDEILLA

5.1 Askelpituus ja -tiheys sekä askelkontaktin kesto eri kilpailumatkoilla

5.1.1 Askelpituus ja -tiheys sekä askelkontaktin kesto pikajuoksussa

100 m:n juoksussa askelpituuden ja -tiheyden arvot vaihtelevat luonnollisesti juoksun eri vaiheissa. Tokion MM-kisojen finaalia vuonna 1991 tarkasteltaessa voidaan havaita, että keskimäärin askelpituus saavutti huippunsa 70-80 m:n välillä. Jaettaessa finaalin kahdeksan miestä kahteen neljän hengen ryhmään lopputuloksen perusteella, havaittiin kuitenkin neljän parhaan juoksijan askelpituuden (2.60 ± 0.13) olleen suurimmillaan 90-100 m:n välillä. Neljän huonoimman juoksijan askelpituus saavutti huippunsa keskimäärin 70-80 m:n kohdalla ollen tällöin 2.53 ± 0.12 m. (Ae ym. 1992.)

Askeltiheys saavutti huippunsa hieman askelpituutta aikaisemmin jo 50-60 metrin välillä. MM-finaalissa vuonna 1991 neljän parhaan juoksijan askeltiheys oli 4.75 ± 0.19 Hz ja neljän huonoimman hieman suurempi eli 4.83 Hz. (Ae ym. 1992.) Vertailtaessa maailman huippuja kansallisen tason ranskalaisiin juoksijoihin havaittiin huippujen pystyvän kiihdyttämään juoksuaan noin 1.3 sekuntia pidemmälle kuin ranskalaisten juoksijoiden. Pikajuoksun huipulla näyttääkin siltä, että askeltiheyden perusteella ei voida enää määrittää 100 m:n juoksusuoritusta. On tärkeää kehittää maksimaalista askelpituutta ja pystyä ylläpitämään se koko matkan ajan. (Gajer ym. 1999.)

Helsingin MM-kisoista vuonna 1983 on analysoitu miesten 4 x 400 m:n viestistä seitsemän miehen askelmuuttujia. Analysoitujen juoksijoiden osuusajat olivat välillä 44.87 – 46.42 s. Analyysi tehtiin loppusuoran alussa, jolloin väsymyksellä oli jo luultavasti vaikutusta juoksun mekaniikkaan. Askelpituudet olivat näillä seitsemällä juoksijalla 2.40 ± 0.14 m kun samanaikainen askeltiheys oli 3.61 ± 0.21 Hz. Suurin askelpituus oli jopa 2.64 metriä. Askeleen kontaktiajan kesto oli 0.121 ± 0.011 s. Kontaktiaika jakautui askeleen jarrutus- ja työntövaiheen osalta siten, että jarrutusvaiheen kesto oli 0.046 ± 0.011 s ja työntövaiheen 0.076 ± 0.008 s. (Mero ym. 1988.)

5.1.2 Askelpituus ja -tiheys sekä askelkontaktin kesto kestävyysjuoksussa

Japanilaiset tutkijat tekijät Tokion MM-kisoista vuonna 1991 todella kattavan askelpituutta ja -tiheyttä käsittelevän tutkimuksen myös kestävyysjuoksujen osalta (Matsuo ym. 1994). Seuraavassa käsitellään pääpiirteittäin askelpituuksia ja -tiheyksiä eri kestävyysjuoksumatkoilla miespuolisten huippujuoksijoiden kohdalta. Jokaiselta matkalta esitellään muutaman parhaan juoksijan tuloksia.

800 m:n juoksusta analysoitiin askelpituudet ja -tiheydet sadan metrin keskiarvoina. Ensimmäisen kierroksen lopussa 300-400 m:n välillä kolmen kärkijuoksijan keskimääräisen nopeuden ollessa 7.37 m/s askelpituus oli keskimäärin 2.27 m. Tällöin askeltiheys oli 3.25 Hz. Loppusuoralla nopeus oli hieman noussut sen ollessa keskimäärin 7.51 m/s, mutta samalla askelpituus oli lyhyempi (2.18 m) ja askeltiheys suurempi (3.44 Hz). (Matsuo ym. 1994.)

1500 m:llä askelmuuttujia analysoitiin samalla tavalla 100 m:n pätkissä. Toisen kierroksen etusuoralla (600-700 m) neljän kärkijuoksijan keskimääräinen juoksunopeus oli 6.65 m/s. Tällöin heidän keskimääräinen askelpituutensa oli 2.07 m ja askeltiheys 3.22 Hz. Loppusuoran kirikamppailussa nopeus oli keskimäärin 7.20 m/s, vaikka samalla askelpituus lyheni 2.01 metriin. Askelpituuden lyheneminen kompensoitiin tällöin luonnollisesti kasvaneella askeltiheydellä, joka oli keskimäärin 3.59 Hz. (Matsuo ym. 1994.)

5000 m:llä kaksi kilpailun kärkijuoksijaa juoksivat kilpailun puolivälissä (2400-2500 m) keskimäärin nopeudella 6.28 m/s, jolloin heidän keskimääräinen askelpituutensa oli 1.89m ja askeltiheydensä 3.33 Hz. Kilpailun loppusuoralla nopeus oli noussut lukemaan 6.79 m/s, samalla kun askelpituus kasvoi arvoon 2.07m. Askeltiheys yllättäen kuitenkin laski loppusuoralla arvoon 3.28 Hz. Loppusuoralla kahden parhaan juoksijan arvoja keskiarvoistettaessa tulee kuitenkin ottaa huomioon, että voittaja sai juosta lopun jo hieman vauhtia hidastaen. (Matsuo ym. 1994.)

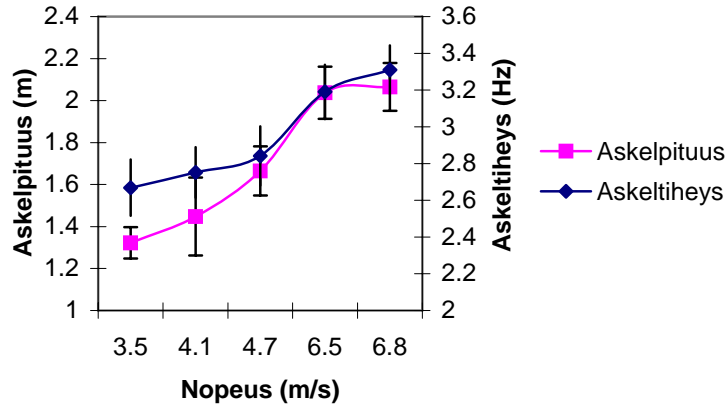
10000 m:llä kilpailun puolivälin tienoilla (4300-4400 m) kaksi parasta juoksijaa juoksivat keskimäärin nopeudella 5.98 m/s. Tällä vauhdilla he juoksivat keskimäärin 1.83 metriä pitkällä askeleella ja 3.27 Hz askeltiheydellä. Loppusuoralla juoksijat innostuivat

valtaisaan kirikamppailuun juosten sen keskimäärin nopeudella 7.54 m/s. Tällöin heidän askelpituutensa oli keskimäärin vain 2.02 m, mutta askeltiheys oli jopa 3.73 Hz. Voi-daankin nähdä, että 10000 m:llä juoksijat tulivat loppusuoran lähes samalla vauhdilla kuin 800 m:n juoksussa, vaikka askelpituus oli huomattavasti lyhyempi. 10000 m:llä juoksijat pystyivät kiihdyttämään askeltiheyttään selkeästi juoksun loppusuoralla. (Matsuo ym. 1994.)

Suomalaisten kansallisen tason juoksijoiden taloudellisuutta tutkittaessa kymmenen juoksijaa juoksivat viisi suoritusta eri nopeuksilla. Taloudellisuutta määritettiin hapen-kulutuksen ja veren laktaattipitoisuuden avulla. Oikean vauhdin löytämisessä käytettiin valotahdistusta. Nopein juoksuvauhti oli 6.8 m/s, jolla vauhdilla juoksijat juoksivat 400 metrin vedon. Loppusuoralla juoksijat juoksivat voimalevyn yli, jolloin heidän askelpi-tuutensa oli 2.07 ± 0.11 m ja askeltiheydensä 3.31 ± 0.13 Hz. Voimalevyn avulla voitiin määrittää myös askeleen kontaktiaika, joka oli edellä mainitulla nopeudella 0.150 ± 0.013 s. (Pulkkanen 2005.) Mielenkiintoisesti voidaan havaita, että tässä tutkimuksessa juoksijoiden askelpituus oli keskimääräisesti yhtä suuri kuin Tokion MM-kisoissa 1500 m:n kärkejuoksijoilla kilpailun toisella kierroksella nopeuden ollessa MM-kisoissa 0.15 m/s matalampi. (Matsuo ym. 1994.)

5.2 Askelpituus ja -tiheys sekä askelkontaktin kesto juoksuvauhdin li-sääntyessä

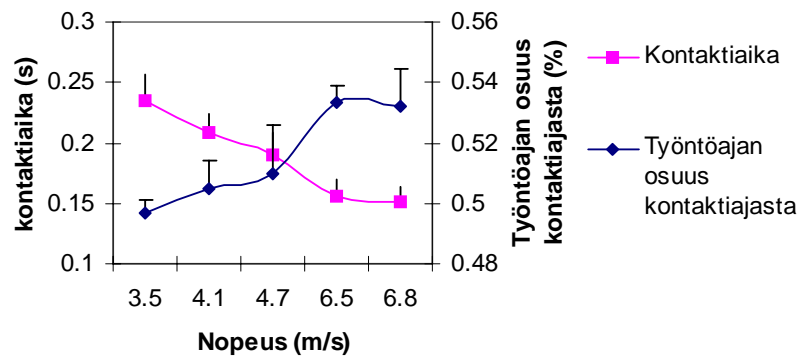
Askelmuuttujien kehityksestä juoksunopeuden kasvaessa voidaan saada hyvä kuva tarkasteltaessa jo aikaisemmin esitellyn juoksun taloudellisuutta tutkineen tutkimuksen tuloksia. Tutkimuksessa juostiin viidellä eri nopeudella, joiden aikana määritettiin askelpituus, askeltiheys ja askelkontaktin kesto voimalevyn yli juoksemalla. Tutkimuk-sessa käytetyt nopeudet olivat 3.5, 4.1, 4.7, 6.5 ja 6.8 m/s. (Pulkkanen 2005.) Askelpi-tuuden ja askeltiheyden kehitys nopeuden kasvaessa voidaan nähdä kuvassa 23.



KUVA 23. Askelpituuden ja askeltiheyden kehitys juoksuvauhdin lisääntyessä (Pulkkanen 2005).

Kyröläinen ym. (2001) ovat myös tutkineet suomalaisia kestävyysjuoksijoita. Tässä tutkimuksessa askelpituus kasvoi 1.17 ± 0.011 metristä 2.03 ± 0.17 metriin vauhdin kasvaessa nopeudesta 3.25 m/s maksimaaliseen nopeuteen 8.31 m/s. Samalla askeltiheys kasvoi arvosta 2.79 ± 0.08 Hz arvoon 4.09 ± 0.19 Hz. Onkin yleisesti havaittu, että ihmiset pyrkivät juostessaan vauhdin kasvaessa lisäämään sekä askelpituuttaan että -frekvenssiään. Yleensä askelpituus saavuttaa tasanteen ennen askelfrekvenssiä, ja on tavallisesti niin, että askeltiheyden tasanne alkaa selkeästi suuremmilla nopeuksilla kuin mitä kestävyysjuoksussa yleensä saavutetaan. (Cavanagh & Kram 1990.)

Pulkkasen tutkimuksessa (2005) askelkontaktin kesto lyheni vauhdin lisääntyessä. Samalla askeleen työntöajan osuus kontaktiajasta kasvoi. Kuvassa 24 kontaktiaika ja työntöajan osuus kontaktiajasta on esitetty juoksunopeuden funktiona. Toisessa tutkimuksessa kontaktiaika lyheni myös vauhdin kasvaessa. Nopeudella 3.25 m/s kontaktiaika oli 0.227 ± 0.011 s ja maksimaalisella nopeudella (8.31 m/s) 0.115 ± 0.007 s (Kyröläinen ym. 2001).



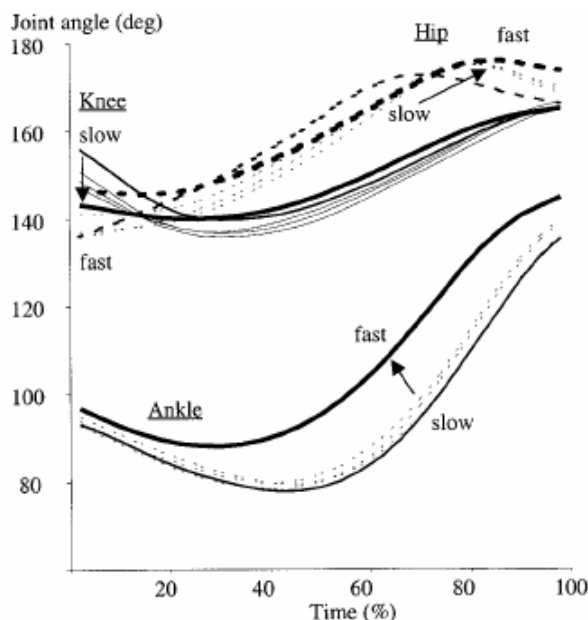
KUVA 24. Askelkontaktin kesto ja askeleen työntöajan osuus kontaktiajasta vauhdin lisääntyessä (Pulkkanen 2005).

5.3 Kehon osien liikkeit eri juoksuvauhdeilla

Vertailtaessa kestävyysjuoksussa käytettyjä juoksunopeuksia pikajuoksunopeuksiin, on juoksun kinematiikassa havaittu joitakin eroavaisuuksia. Mann & Hagy (1980) vertailivat tutkimuksessaan juoksun kinematiikkaa nopeuksilla 5.36 m/s ja 7.69 m/s. Ensimmäinen nopeus voi kuvata hyvin harjoitelleen kestävyysjuoksijan 10000 m:n juoksunopeutta, kun taas suurempi nopeus vastaa 100 m:n juoksuaikana noin 13 sekuntia. Vaikka kyse ei olekaan maailman huipulla käytetyistä juoksunopeuksista, havaittiin näilläkin selkeitä eroavaisuuksia. Lonkkanivelen liikettä vertailtaessa lonkan koukistumisen lisääntyi pikajuoksussa, mutta lonkan ojentuminen jopa hieman vähentyi pikajuoksua kestävyysjuoksunopeuteen verrattaessa. Polvinivelen liikkeessä voidaan nähdä, että kestävyysjuoksunopeuksissa tapahtuva kontaktivaiheen ”pumppausvaihe” jää pois pikajuoksunopeuksissa. Askeleen kontaktivaiheessa ei siis pikajuoksussa tapahdu kuvassa 15 havaittavaa polven ojennusta ennen heilahdusvaiheen polven koukistusta. Nilkkanivelessä tapahtuu pikajuoksussa kestävyysjuoksun tavoin maakontaktin jälkeen iskua vaimentava dorsifleksio, mutta pikajuoksussa kantapää ei kosketa maata. (Mann & Hagy 1980.)

Myös muissa tutkimuksissa juoksunopeuden kasvaessa nilkan ja polven nivelkulmien muutosten on havaittu pienenevän askeleen jarrutusvaiheen kontaktivaiheessa. Kuvassa 25 voidaan nähdä nilkka-, polvi- ja lonkkakulmien muutokset eri nopeuksilla vauhdin

kasvaessa nopeudesta 3.25 m/s maksimaaliseen nopeuteen, joka tässä tutkimuksessa oli 8.31 m/s. (Kyröläinen ym. 2001.)



KUVA 25. Nilkka-, polvi ja lonkkakulmat askeleen kontaktivaiheessa vauhdin kasvaessa nopeudesta 3.25 m/s nopeuteen 8.31 m/s (Kyröläinen ym. 2001).

Uudehossa tutkimuksessa (Kivi ym. 2002) verrattiin polven ja lonkan nivelkulmia ja kulmanopeuksia juoksumatolla juostaessa nopeuksilla 70, 80, 90 ja 95 % maksimaalisesta nopeudesta (tässä tutkimuksessa lonkkakulmalla tarkoitetaan tässä katsauksessa käytettyä reisikulmaa). Prosentuaalisia nopeuksia vastaavat vauhdit olivat tällöin 7.3, 8.4, 9.4 ja 9.9 m/s. Tilastollisessa analyysissä muita nopeuksia verrattiin nopeuteen 9.9 m/s. Lonkan koukistuminen oli merkitsevästi erilainen nopeuksia 7.3 m/s ja 9.9 m/s vertailtaessa ($60 \pm 5^\circ$ vs. $67 \pm 8^\circ$), mutta muita nopeuksia suurimpaan nopeuteen verrattaessa lonkan koukistumisessa ei havaittu eroja. Lonkan ojennuksessa ei ollut eroja nopeuksien välillä, kuten ei myöskään polven maksimaalisessa koukistuksessa tai ojennuksessa varpaiden maasta irtoamisen hetkellä. (Kivi ym. 2002.)

Kulmanopeuksia vertailtaessa lonkan koukistus ja polven ojennus olivat suurimmalla nopeudella merkitsevästi nopeampia kuin hitaimmalla nopeudella. Lonkan ojennuksen ja polven koukistuksen kulmanopeus kasvoi merkitsevästi verrattaessa kahta hitainta nopeutta suurimpaan nopeuteen. Lonkan koukistuksen kulmanopeus vaihteli välillä 634

± 44 °/s - 726 ± 51 °/s ja lonkan ojennuksen kulmanopeus välillä 523 ± 46 °/s - 666 ± 53 °/s. Polven koukistumisen kulmanopeus vaihteli puolestaan välillä 844 ± 98 °/s - 1083 ± 119 °/s ja polven ojennuksen kulmanopeus välillä 1016 ± 101 °/s - 1165 ± 119 °/s. Valitettavasti tässä tutkimuksessa kaikkia hitaampia vauhteja verrattiin vain nopeimpaan juoksuvauhtiin, mutta ainakaan polven koukistumisen ja ojennuksen sekä lonkan ojennuksen nivelkulmissa ei ollut eroja tutkimuksessa käytettyjen nopeuksien välillä. (Kivi ym. 2002.)

6 TUTKIMUKSEN TARKOITUS JA TUTKIMUSONGELMAT

Tämän tutkimuksen tarkoituksena oli vertailla juoksun kinematiikkaa eritasoisten 1500 m juoksijoiden välillä aidossa kilpailutilanteessa. Tarkoituksena oli myös selvittää, muuttuuko juoksun kinematiikka kilpailun aikana juoksunopeuden lisääntyessä. Lisäksi selvitettiin mahdollisten ryhmien välisten erojen taustalla olevia tekijöitä kinemaattisten muuttujien välisiä yhteyksiä tarkastelemalla. Tutkimuksen tärkeimmät muuttujat olivat polvi- ja lonkkanivelen nivelkulmat ja kulmanopeudet sekä askeleen kontaktiaika.

Tutkimusongelmat:

1) Käyttäytyvätkö nivelkulmat ja kulmanopeudet eri tavalla ryhmien välillä askelsyklin aikana, ja onko askelkontaktin kestossa eroja?

Kestävyysjuoksusuorituksen kannalta on tärkeää, että oikein ajoitetun esiaktiivisuuden ja riittävän lihasjäykkyyden avulla polven ja lonkan koukistuminen pystytään pitämään mahdollisimman pienenä askeleen jarrutusvaiheessa. Myös heilahtavan jalan liikerata ja heilahtavan jalan nopeus ovat tärkeitä tekijöitä tehokkaan askeleen kannalta. (Skof & Stuhec 2004.) Elastisen energian tehokkaan hyödyntämisen kannalta askeleen kontaktiajan tulisi olla riittävän lyhyt (Kyröläinen ym. 2001). On oletettavaa, että maailman huippujuoksijoiden juoksutekniikka on lähempänä optimaalista kuin suomalaisilla juoksijoilla, joten MM-finalistien askelkontakti on todennäköisesti lyhyempi ja polven sekä lonkan koukistuminen pienempää askeleen tukivaiheen aikana suomalaisiin juoksijoihin verrattuna. Heilahdusvaiheen aikana MM-finalistien lonkka- ja polvikulmien kulmanopeudet voivat olla suurempia kuin suomalaisilla juoksijoilla.

2) Muuttuvatko nivelkulmat, kulmanopeudet ja askelkontaktin kesto juoksuvauhdin lisääntyessä kilpailun aikana?

Juoksunopeuden kasvaessa polven koukistumisen on havaittu vähenevän askeleen tukivaiheessa (Mann & Hagy 1980, Kyröläinen ym. 2001), kun taas lonkan koukistuminen heilahdusvaiheessa lisääntyy (Mann & Hagy 1980, Kiwi ym. 2002). Nivelten kulmano-

peudet luonnollisesti kasvavat juoksunopeuden kasvaessa (Kiwi ym. 2002) samalla kun askeleen kontaktiaika lyhenee (Kyröläinen ym. 2001, Pulkkanen ym. 2005). Suurilla juoksunopeuksilla varsinkin lonkan ojentajalihasten merkitys korostuu (Kyröläinen ym. 1999). Tässäkin tutkimuksessa juoksunopeuden kasvaessa myös juoksun kinematiikassa todennäköisesti tapahtuu muutoksia, jotka voivat näkyä pienempänä polven koukistumisena tukivaiheessa ja suurempana lonkan koukistumisena heilahdusvaiheessa. Lonkan ojentumisen kulmanopeus kasvaa todennäköisesti enemmän kuin polven ojentumisen kulmanopeus tukivaiheessa, ja askelkontaktin kesto lyhenee.

7 MENETELMÄT

7.1 Koehenkilöt

Mittaukset suoritettiin elokuussa 2005 Helsingin olympiastadionilla järjestettyjen GE Money Grand Prix kilpailun ja yleisurheilun kymmenensien maailmanmestaruuskilpailujen aikana osana suurempaa tutkimusprojektia. GE Money GP:n yhteydessä juostiin kansallinen alle 22-vuotiaiden miesten 1500 m:n kilpailu, jonka toiselta kierrokselta pystyttiin analysoimaan kuusi suomalaista juoksijaa. MM-finaalin toiselta kierrokselta analysoitiin viisi juoksijaa, joista neljä oli mahdollista analysoida myös kolmannelta kierrokselta. Yhteensä MM-finaalin kolmannelta kierrokselta pystyttiin analysoimaan kahdeksan juoksijaa. Juoksijoiden taustatiedot ovat taulukossa 2.

TAULUKKO 2. Juoksijoiden taustatiedot. MM finaali 2. ja 3. kierros tarkoittaa niitä juoksijoita, jotka pystyttiin analysoimaan sekä toiselta että kolmannelta kierrokselta. MM-kisojen kolmannelta kierrokselta yhden juoksijan pituus- ja painotietoja ei löytynyt. (www.tilastopaja.fi, www.iaaf.org, www.es.sports.yahoo.com, www.rfea.es.)

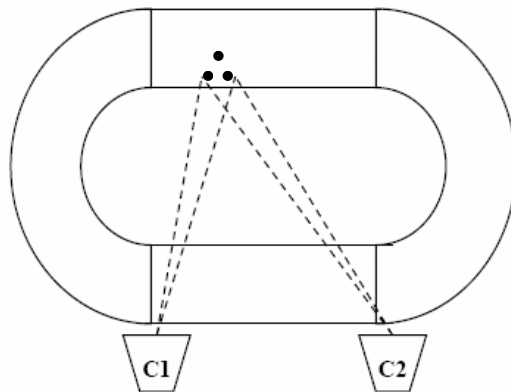
| | ikä (vuosi) | kauden paras tulos | pituus (m) | paino (kg) |
|--|-------------|--------------------|----------------------|--------------------|
| suomalaiset (n = 6) | 20.0 ± 1.7 | 3min 49.2 ± 3.2s | 181.5 ± 0.06 | 66.5 ± 6.3 |
| MM-finaali 2. kierros (n = 5) | 26.4 ± 2.7 | 3min 35.6 ± 2.6s | 179.4 ± 0.07 | 67.8 ± 5.7 |
| MM-finaali 3. kierros (n = 8) | 25.1 ± 2.4 | 3min 33.9 ± 3.0s | 179.6 ± 0.06 (n = 7) | 67.7 ± 5.7 (n = 7) |
| MM-finaali 2. ja 3. kierros (n = 4) | 26.0 ± 2.9 | 3min 36.4 ± 2.1s | 180.8 ± 0.07 | 69.3 ± 5.4 |

7.2 Mittausprotokolla

Mittaukset suoritettiin osana IAAF:n tutkimusprojektia mahdollisimman huomaamattomasti häiritsemättä kilpailuiden suorittamista tai yleisön mahdollisuutta kilpailujen seuraamiseen. Videomateriaalin keräämiseen käytettiin kahta kameraa 200 Hz:n kuvanopeudella (HSC 200, Peak Performance Technologies, Inc.) 3-D pan & tilt järjestelmää hyödyntäen. Pan & tilt järjestelmän avulla juoksija on mahdollista pitää kuvassa suurempana kuin normaalissa 3-D analyysissä varsinkin silloin, kun halutaan kuvata juoksijaa pitkältä matkalta. Tämä järjestelmä perustuu kameroiden pan- (horisontaali-

nen) ja tilt- (vertikaalinen) kulmien muutoksen määrittämiseen kameran liikkussa akselinsa ympärillä. (Korhonen ym 2003, Allard ym. 1995, 27.) Kameran asetettiin niitä varten suunnitellun kolmijalan päälle yhdessä pan & tilt koodaajan kanssa.

Molemmissa kilpailuissa kamerat sijoitettiin takasuoran katsomon molempiin päätyihin videokameroita varten rakennetuille lavoille, mistä ne kohdistettiin etusuoralle. Kameroiden kalibrointi suoritettiin kilpailuiden jälkeen asettamalla kolme kalibrointikeppiä juoksuradalle kameran kuva-alaan. GE Money GP:ssä keppiä pituus oli 2.44 metriä ja ne sijoitettiin 100 m:n lähtöpaikalle, 60 metrin päähän 100 m:n lähtöpaikasta sekä maaliviivalle. MM-finaalissa kalibrointikepit sijoitettiin noin 30 - 40 metrin päähän maalista siten, että ensimmäinen ja toinen olivat ensimmäisellä radalla 9 metrin päässä toisistaan ja kolmas niiden välissä kolmannella radalla kuvan 26 mukaisesti. MM-finaalin kalibroinnissa keppiä pituus oli 3.66 metriä. Kameroiden välinen etäisyys oli 96 metriä ja ne olivat 10 metriä radan pinnan yläpuolella. Kuvattu aineisto nauhoitettiin S-VHS nauhoille.



KUVA 26. Kaaviokuva kameroiden sijoituksesta. Kamerat (C1 ja C2) sijoitettiin takasuoran katsomoon, josta ne kohdistettiin etusuoralle. Kuvassa näkyvät myös MM-finaalin kalibrointikeppiä sijainnit.

GE Money GP:ssä juoksijoiden etenemistä seurattiin koko etusuoran matkalta, mutta MM-finaalissa kamerat asetettiin kiinteiksi kuvaamaan juoksijoita noin 15 metrin matkalta noin 40 - 25 metrin päässä maalista. Kiinteät kameran asetukset valittiin MM-finaaliin GE Money GP:ssä tehtyjen havaintojen perusteella, koska tällöin juoksijajoukon hajaantuessa riittävä määrä juoksijoita mahtui samaan kuvaan vain juoksun toiselta kierrokselta. Kiinteillä asetuksilla varmistuttiin siitä, että periaatteessa jokainen juoksija oli mahdollista saada kuvatuksi. MM-finaalissa ongelmaksi tuli kuitenkin se, että ensimmäisillä kierroksilla juoksijat olivat yhtenäisessä ryppäessä kahdella radalla, jolloin ainoastaan sisäradan juoksijoita oli mahdollista analysoida.

7.3 Videodatan analysointi

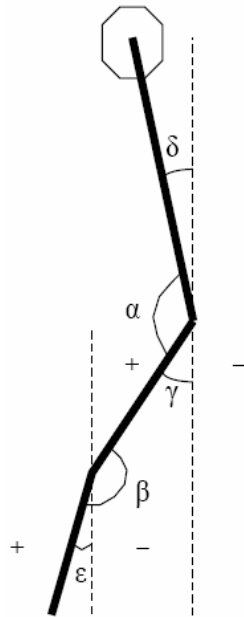
Nauhoitetut suoritukset muutettiin analogisesta digitaaliseen muotoon digisovittimen avulla. Analysoitavat videopätkät kaapattiin VHS nauhurilta (Panasonic VCR AG-7355) tietokoneelle, jonka jälkeen ne muunnettiin AVI-tiedostoiksi (Studio 9, Pinnacle). Videodatan analysointi suoritettiin Motus 8.5 (Peak Performance Technologies, inc) liikeanalyysiohjelmistolla. Kameroiden kuvat synkronisoitiin GE Money GP:ssä lähettäjän pistoolin savun perusteella, mutta MM-finaalissa synkronisointi suoritettiin etsimällä molemmista kameroista sama kuva esimerkiksi juoksijan tietyn askelkontaktin alusta. 200 Hz:n kuvanopeuden ansiosta näillä menetelmillä kamerat pystyttiin synkronisoimaan tarkasti. Askelsykliä analysoitiin kuva kuvalta, jolloin nivelpisteitä vastaavat pikselit etsittiin ruudulta jokaisesta kuvasta tikku-ukkomallin luomista varten. Nivelkulmadata suodatettiin 5 Hz:n taajuudella ja kulmanopeusdata 8 Hz:n taajuudella.

7.4 Muuttujien määrittäminen

Jokaiselta juoksijalta analysoitiin yksi askelsykli/kierrös. Askelsykli alkaa vasemman jalan koskettaessa maata ja loppuu seuraavaan vasemman jalan maakontaktin alkuun. Aineistosta pystyttiin analysoimaan ainoastaan vasemman jalan liikettä. Useimmat juoksun kinematiikan muuttujat ovat kuitenkin symmetrisiä kehon eri puolien välillä. (Karamanidis ym. 2003).

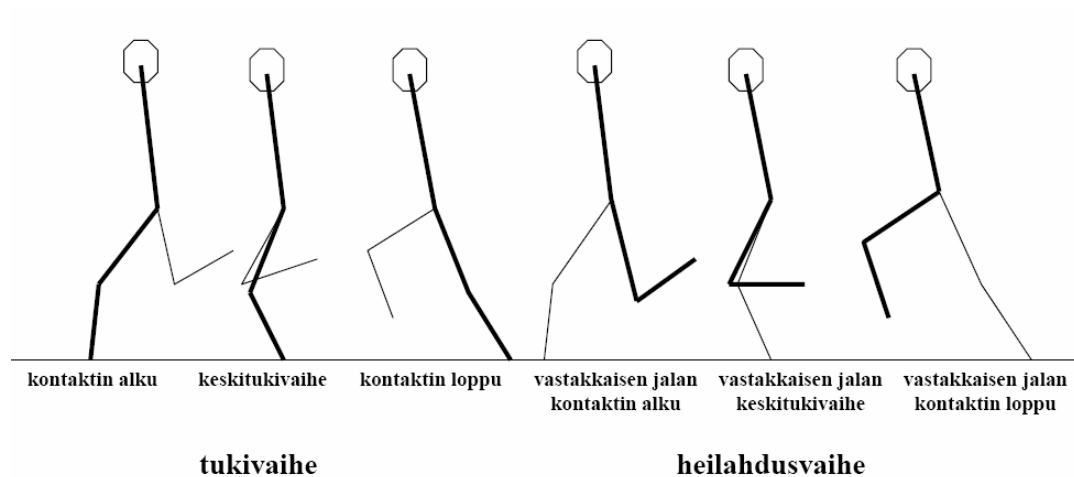
7.4.1 Nivelkulmat ja kulmanopeudet

Analyysissä käytettiin neljää nivelpistettä, jotka olivat pää (korvakäytävä), lonkka (iso sarvennoinen), polvi (nivelrako reisi- ja pohjeluun välillä) sekä nilkka (ulkokehräs). Tutkimuksessa analysoitiin nivelkulmia ja kulmanopeuksia polven ja lonkan nivelten ympärillä. Määritetyt nivelkulmat olivat polvikulma, lonkkakulma, reiden ja vertikaalisen tason välinen kulma (tästä eteenpäin reisikulma), säären ja vertikaalisen tason välinen kulma (tästä eteenpäin säärikulma) sekä ylävartalon ja vertikaalisen tason välinen kulma (kuva 27). Kulmanopeuksista määritettiin polvi-, lonkka- ja reisikulmien kulmanopeudet.



KUVA 27. Analysoitujen nivelkulmien määrittäminen: α = lonkkakulma, β = polvikulma, γ = reiden ja vertikaalisen tason välinen kulma (reisikulma), δ = ylävartalon ja vertikaalisen tason välinen kulma, ϵ = säären ja vertikaalisen tason välinen kulma (säärikulma). Kuvassa näkyvät myös sääri- ja reisikulmien suunnat.

Askelsykleistä määritettiin kuusi kohtaa, joiden tapahtumahetkillä muuttujia analysoitiin. Nämä kohdat ovat kontaktin alku, keskitukivaihe, kontaktin loppu, vastakkaisen jalan kontaktin alku, vastakkaisen jalan keskitukivaihe sekä vastakkaisen jalan kontaktin loppu (kuva 28). Lisäksi analysoitiin nivelkulmien ja kulmanopeuksien maksimi- ja minimiarvoja sekä nivelkulmien muutoksia.



KUVA 28. Malli nivelpisteiden määrittämisestä askelsyklin eri vaiheiden aikana. Paksumpi viiva kuvaa analysoidun jalan liikkeitä.

Kulmanopeuksista analysoitiin myös keskiarvoiset kulmanopeudet juoksusyklin vaiheiden aikana. Polvikulmalla nämä vaiheet olivat vasemman jalan kontaktin alku – tuki-

vaiheen minimi, tukivaiheen minimi – kontaktin loppu, kontaktin loppu – heilahdusvaiheen minimi ja heilahdusvaiheen minimi – etuheilahdusvaiheen maksimi. Lonkka- ja reisikulmien analysoidut vaiheet olivat kontaktin alku – keskitukivaihe, keskitukivaihe – kontaktin loppu, kontaktin loppu – vastakkaisen jalan kontaktin alku, vastakkaisen jalan kontaktin alku – heilahdusvaiheen maksimaalinen koukistuminen, heilahdusvaiheen maksimaalinen koukistuminen – uuden kontaktin alku.

7.4.2 Aikaan ja paikkaan liittyvät muuttujat

Juoksijoiden nopeudet määritettiin kilpailuista kuvatun materiaalin ja televisiokuvan avulla keskinopeutena etusuoralla. Näin toimittiin, koska MM-kilpailuiden horisontaalisen etäisyyden kalibrointia ei saatu tarpeeksi tarkaksi. Niinpä horisontaaliseen liikkeeseen perustuvia muuttujia ei pystytty analysoimaan, ja tämän vuoksi esimerkiksi askelpituutta ja hetkellistä juoksunopeutta ei määritetty. Juoksijoiden askelkontaktin kesto analysoitiin laskemalla niiden kuvien lukumäärä, joiden aikana jalan havaittiin olevan maassa askelkontaktin aikana. Analyysissä käytettiin kahden peräkkäisen askelkontaktin keskiarvoa. Askeltiheys määritettiin askelsyklin keston perusteella.

7.4.3 Muuttujien väliset yhteydet

Muuttujien välisiä yhteyksiä tarkasteltiin kahdella eri juoksunopeudella. Analysoidut suoritukset jaettiin ryhmiin siten, että suomalaiset juoksijat ja MM-finaalin juoksijat toiselta kierrokselta yhdistettiin hitaan juoksun ryhmäksi, ($n = 11$) ja MM-finaalin juoksijat kolmannelta kierrokselta muodostivat nopean juoksun ryhmän ($n = 8$).

7.5 Tilastollinen analyysi

Tulokset esitetään keskiarvoina ja -hajontoina. Datan käsittelyssä käytettiin Microsoft Excel 2000 ja SPSS 14.0 ohjelmistoja. Muuttujien normalisuus tarkastettiin Shapiro-Wilk testillä. Erot ryhmien välillä testattiin parittomalla t-testillä muuttujien ollessa normaalisti jakautuneita. Jos jakauma ei ollut normaali, käytettiin nonparametrista Mann-Whitneyn U-testiä. Muuttujien vertailu eri nopeuksilla suoritettiin parillisen t-

testin avulla. Myös nopeuden vaikutusta tarkasteltaessa käytettiin nonparametrista testiä (Wilcoxonin signed rank) silloin, kun muuttujien arvot eivät olleet normaalisti jakautuneita. Muuttujien välisiä yhteyksiä tarkasteltaessa käytettiin Pearsonin korrelaatiokerrointa.

8 TULOKSET

8.1 Juoksijoiden nopeus, kontaktiaika ja askeltiheys kilpailujen aikana

GE Money GP:n 1500 m kilpailun ensimmäiseen kierrokseen kului aikaa 59.51 sekuntia ja toiseen 63.85 sekuntia. MM-finaalissa vastaavat kierrosajat olivat 60.73 ja 63.05 sekuntia. MM-finaalin kolmannella kierroksella vauhti kiihtyi kierrosajan ollessa 53.86 sekuntia. Suomalaiset juoksivat GE Money GP:n toisella kierroksella lähes samalla nopeudella kuin MM-finaalin juoksijat toisella kierroksella. Kontaktiajoissa tai askeltiheudessa ei ollut eroja suomalaisten ja MM-finaalin juoksijoiden välillä. (taulukko 3) MM-finaalin kolmannella kierroksella nopeuden kiihtyessä askeltiheys kasvoi ja kontaktiaika lyheni toiseen kierrokseen verrattuna (taulukko 4).

TAULUKKO 3. Suomalaisen juoksijoiden sekä MM-finalistien juoksunopeus, kontaktiaika ja askeltiheys kilpailun toisella kierroksella. Taulukossa näkyy myös juoksijoiden kauden nopeimman kilpailun keskinopeus.

| | nopeus (m/s) | kontaktiaika (ms) | askeltiheys (Hz) | keskinopeus kauden paras (m/s) |
|--------------------------------|-----------------|----------------------|---------------------|--------------------------------------|
| Suomalaiset 2. kierros (n = 6) | 6.4 ± 0.1 | 150 ± 6 | 3.11 ± 0.14 | 6.55 ± 0.09 |
| MM-finaali 2. kierros (n = 5) | 6.5 ± 0.1 | 154 ± 4 | 3.21 ± 0.05 | 6.96 ± 0.08 |
| | NS | NS | NS | *** |

*** $p \leq 0.001$

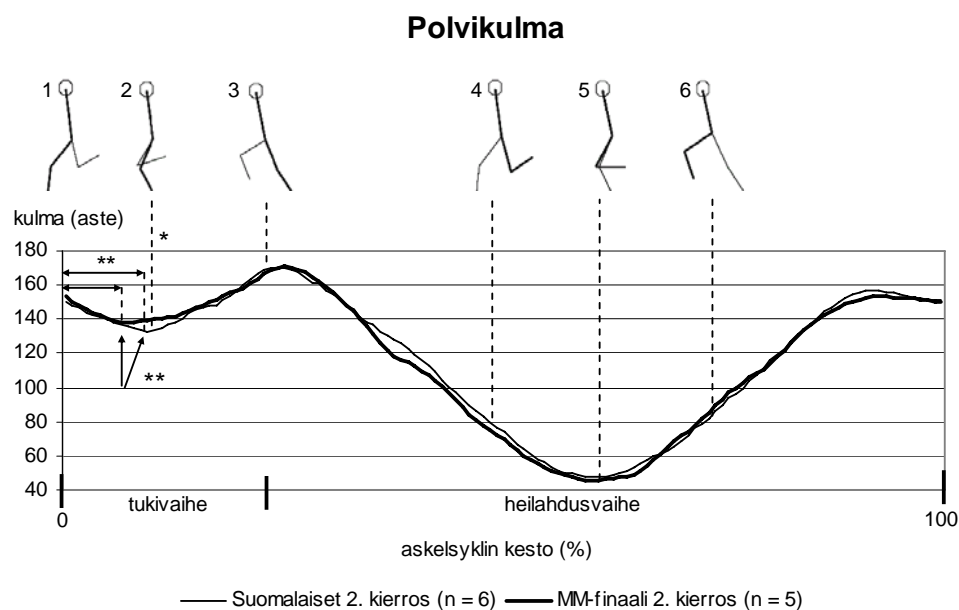
TAULUKKO 4. MM-finalistien nopeus, kontaktiaika, ja askeltiheys kilpailun toisella ja kolmannella kierroksella. Taulukossa näkyy myös juoksijoiden kauden nopeimman kilpailun keskinopeus.

| | nopeus (m/s) | kontaktiaika (ms) | askeltiheys (Hz) | keskinopeus kauden paras (m/s) |
|-------------------------------|-----------------|----------------------|---------------------|--------------------------------------|
| MM-finaali 2. kierros (n = 4) | 6.5 ± 0.1 | 154 ± 5 | 3.21 ± 0.05 | 6.93 ± 0.07 |
| MM-finaali 3. kierros (n = 4) | 7.2 ± 0.1 | 146 ± 3 | 3.41 ± 0.04 | 6.93 ± 0.07 |
| | *** | * | *** | |

* $p \leq 0.05$, *** $p \leq 0.001$

8.2 Nivelkulmat eritasoisilla juoksijoilla

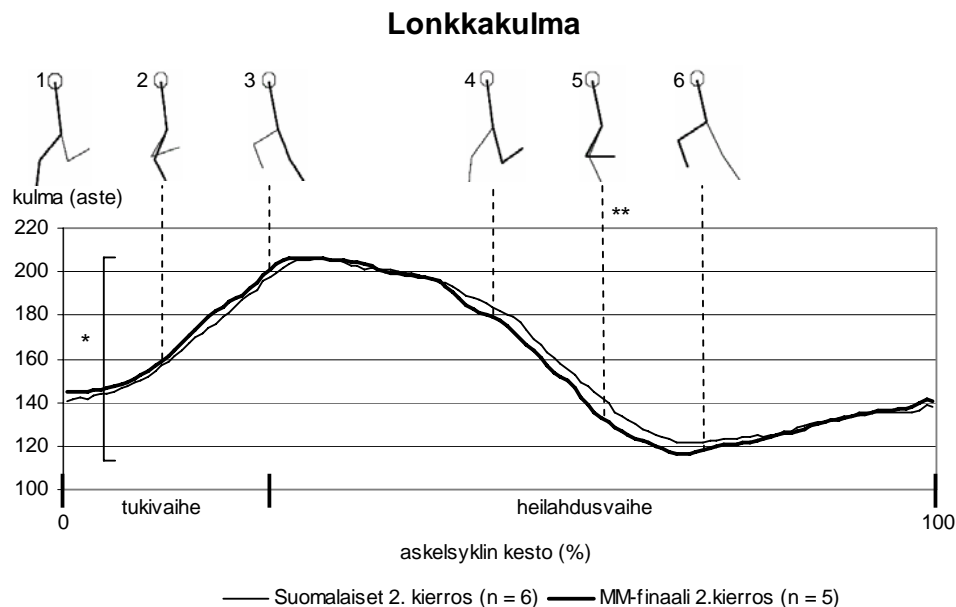
Polvikulman minimiarvo askeleen tukivaiheessa oli MM-finalisteilla suurempi kuin suomalaisilla juoksijoilla ($138 \pm 2^\circ$ vs. $131 \pm 4^\circ$, $p \leq 0.01$). Samansuuntainen ero havaittiin myös keskitukivaiheessa ($141 \pm 3^\circ$ vs. $133 \pm 5^\circ$, $p \leq 0.05$). Tukivaiheen polven koukistumisen kesto oli MM-finaalin juoksijoilla lyhyempi kuin suomalaisilla (46 ± 9 ms vs. 64 ± 7 ms, $p \leq 0.01$). Lisäksi polvikulman muutos askeleen tukivaiheen ojennusvaiheessa oli MM-finalisteilla suuntaa antavasti pienempi kuin suomalaisilla ($33 \pm 5^\circ$ vs. $39 \pm 6^\circ$, $p = 0.088$) (kuva 29).



KUVA 29. Polvikulma askelsyklin aikana suomalaisilla juoksijoilla ja MM-finalisteilla.

1 = kontaktin alku, 2 = keskitukivaihe, 3 = kontaktin loppu, 4 = vastakkaisen jalan kontaktin alku, 5 = vastakkaisen jalan keskitukivaihe, 6 = vastakkaisen jalan kontaktin loppu.

Vastakkaisen jalan keskitukivaiheen aikana lonkkakulma oli maailman huippujuoksijoilla pienempi kuin suomalaisilla juoksijoilla ($132 \pm 2^\circ$ vs. $140 \pm 4^\circ$, $p \leq 0.01$). Kulman muutos askelsyklin aikana oli MM-finalisteilla puolestaan suurempi ($94 \pm 8^\circ$ vs. $83 \pm 8^\circ$, $p \leq 0.05$), ja lonkkakulma kontaktin lopussa suuntaa antavasti suurempi kuin suomalaisilla juoksijoilla ($203 \pm 6^\circ$ vs. $197 \pm 4^\circ$, $p = 0.061$) (kuva 30).



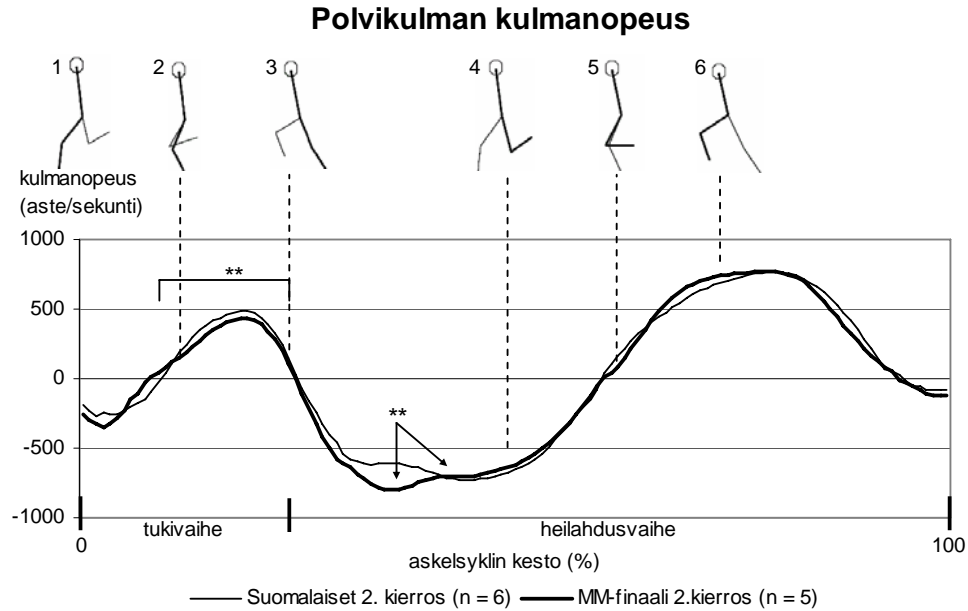
KUVA 30. Lonkkakulma askelsyklin aikana suomalaisilla juoksijoilla ja MM-finalisteilla.

1 = kontaktin alku, 2 = keskitukivaihe, 3 = kontaktin loppu, 4 = vastakkaisen jalan kontaktin alku, 5 = vastakkaisen jalan keskitukivaihe, 6 = vastakkaisen jalan kontaktin loppu.

Vastakkaisen jalan keskitukivaiheen aikana reisikulma oli maailman huipuilla suurempi kuin suomalaisilla ($37 \pm 4^\circ$ vs. $30 \pm 3^\circ$, $p \leq 0.01$). Lisäksi tämä kulma oli MM-finalisteilla suuntaa antavasti pienempi askeleen keskitukivaiheen aikana suomalaisiin juoksijoihin verrattuna ($7 \pm 4^\circ$ vs. $11 \pm 2^\circ$, $p = 0.094$). Ylävartalon ja vertikaalisen tason välisen kulman muutos askelsyklin aikana oli MM-finalisteilla suuntaa antavasti pienempi kuin suomalaisilla ($9 \pm 2^\circ$ vs. $11 \pm 1^\circ$, $p = 0.054$). Kaikki nivelkulmien tulokset molemmilla ryhmillä ovat nähtävissä liitteessä 1.

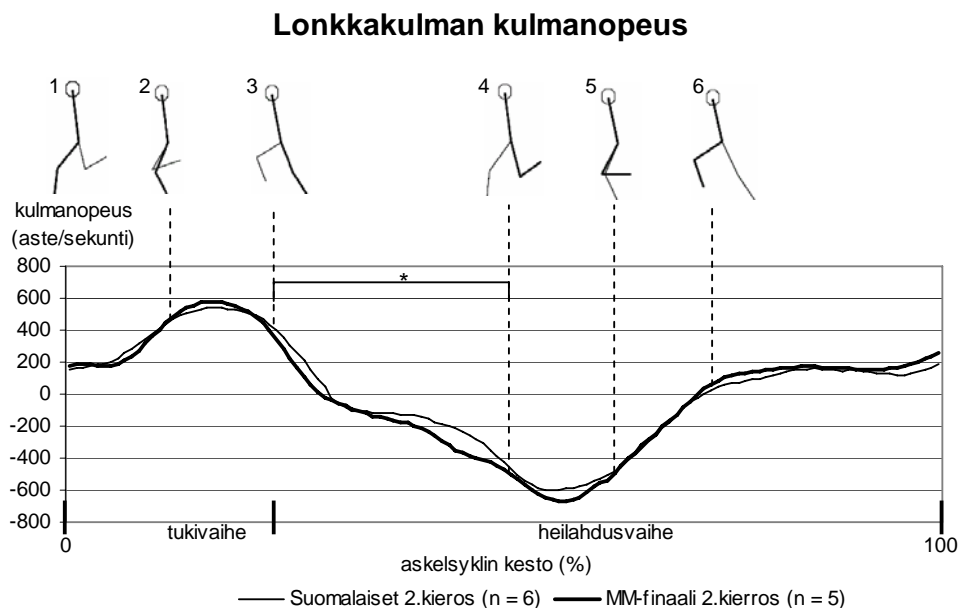
8.3 Kulmanopeudet eritasoisilla juoksijoilla

Tukivaiheessa polven ojentumisen keskinopeus (tukivaiheen minimi – kontaktin loppu) oli MM-finalisteilla pienempi kuin suomalaisilla (318 ± 30 °/s vs. 474 ± 90 °/s, $p \leq 0.01$). Heilahdusvaiheessa polven maksimaalinen koukistusnopeus oli MM-finaalin juoksijoilla suurempi kuin suomalaisilla juoksijoilla (-835 ± 45 °/s vs. -744 ± 66 °/s, $p \leq 0.01$) (kuva 31).



KUVA 31. Polvikulman kulmanopeus askelsyklin aikana suomalaisilla juoksijoilla ja MM-finalisteilla. 1 = kontaktin alku, 2 = keskitukivaihe, 3 = kontaktin loppu, 4 = vastakkaisen jalan kontaktin alku, 5 = vastakkaisen jalan keskitukivaihe, 6 = vastakkaisen jalan kontaktin loppu.

MM-finalisteilla lonkka koukistui heilahdusvaiheen alussa (kontaktin loppu – vastakkaisen jalan kontaktin alku) keskimäärin nopeammin kuin suomalaisilla juoksijoilla (-157 ± 49 °/s vs. -90 ± 31 °/s, $p \leq 0.05$). Lonkan ojentumisen keskinopeus heilahdusvaiheen lopussa (maksimaalinen koukistuminen – kontaktin alku) oli MM-finalisteilla suuntaa antavasti suurempi kuin suomalaisilla (143.6 ± 26.9 °/s vs. 108.9 ± 31.2 °/s, $p = 0.083$). Lisäksi lonkkakulman kulmanopeus oli maailman huipuilla suuntaa antavasti pienempi kuin suomalaisilla kontaktin lopussa varpaiden maasta irtoamisen hetkellä (345 ± 32 °/s vs. 426 ± 83 °/s, $p = 0.072$) (kuva 32). Myös reisikulman kulmanopeus oli MM-finalisteilla keskimäärin suurempi kuin suomalaisilla heilahdusvaiheen alussa (kontaktin loppu – vastakkaisen jalan kontaktin alku) (160 ± 38 °/s vs. 111 ± 33 °/s, $p \leq 0.05$). Kaikki kulmanopeuksien tulokset molemmilla ryhmillä ovat nähtävissä liitteessä 2.



KUVA 32. Lonkkakulman kulmanopeus askesyklin aikana suomalaisilla juoksijoilla ja MM-finalisteilla. 1 = kontaktin alku, 2 = keskitukivaihe, 3 = kontaktin loppu, 4 = vastakkaisen jalan kontaktin alku, 5 = vastakkaisen jalan keskitukivaihe, 6 = vastakkaisen jalan kontaktin loppu.

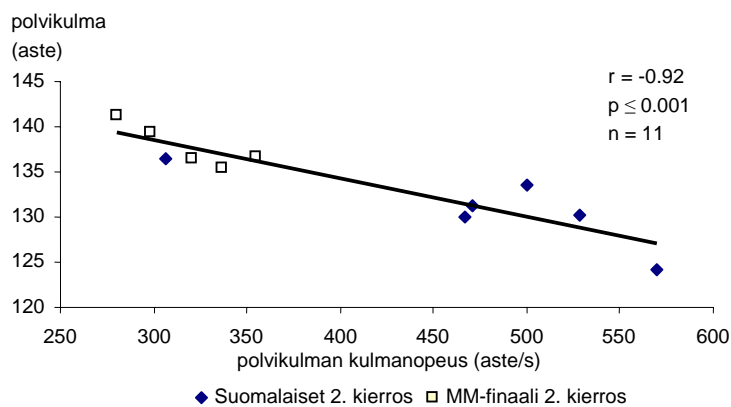
8.4 Nivelkulmat ja kulmanopeudet eri nopeuksilla juostaessa

Juoksunopeuden kasvaessa MM-finaalin aikana polvikulma oli kovassa vauhdissa suurempi kuin hitaassa vauhdissa vastakkaisen jalan kontaktin loppuhetkellä ($82 \pm 8^\circ$ vs. $90 \pm 8^\circ$, $p \leq 0.05$). Polvi ojentui kovassa vauhdissa nopeammin kuin hitaassa vauhdissa vastakkaisen jalan kontaktin keskitukivaiheessa ($99 \pm 28^\circ/\text{s}$ vs. $191 \pm 62^\circ/\text{s}$, $p \leq 0.05$). Lonkka koukistui vastakkaisen jalan kontaktin alussa kovassa vauhdissa suuntaa antavasti nopeammin kuin hitaassa vauhdissa ($-444 \pm 90^\circ/\text{s}$ vs. $-558 \pm 57^\circ/\text{s}$, $p = 0.066$) ja reisikulman maksimikulmanopeus lonkan koukistuessa heilahdusvaiheessa oli suuntaa antavasti suurempi kovassa vauhdissa hitaaseen vauhtiin verrattuna ($628 \pm 52^\circ/\text{s}$ vs. $681 \pm 35^\circ/\text{s}$, $p = 0.054$). Kaikki nivelkulmien ja kulmanopeuksien tulokset eri juoksunopeuksia vertailtaessa ovat nähtävissä liitteissä 3 ja 4.

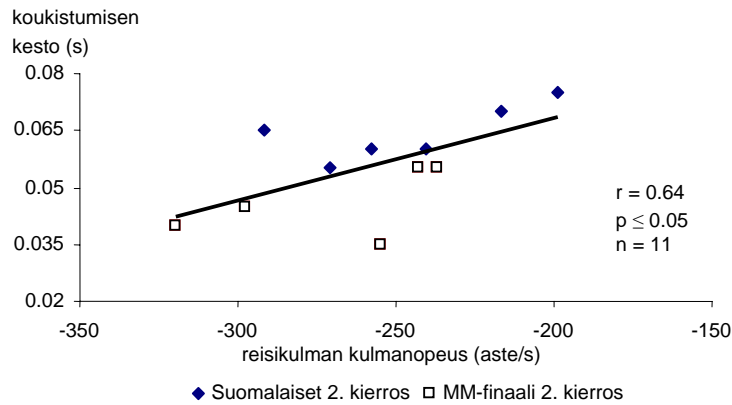
8.5 Nivelkulmien ja kulmanopeuksien väliset yhteydet

Muuttujien välisiä yhteyksiä tarkasteltaessa kulmanopeuksien negatiivisten arvojen merkitys tulee ottaa huomioon, koska esimerkiksi lonkan koukistuksessa pieni kulmanopeuden arvo (suuri negatiivinen arvo) tarkoittaa suurta lonkan koukistumisen kulmanopeutta. Yhteydet ovat hitaassa vauhdissa (suomalaiset ja MM-finaali 2. kierros, 6.4 – 6.5 m/s, $n = 11$) havaittuja ellei toisin mainita. Kova vauhti tarkoittaa MM-finalistien nopeutta kilpailun kolmannella kierroksella (7.2 m/s, $n = 8$).

Lonkan ojentumisen nopeus ennen kontaktin alkua ($r = 0.74$, $p \leq 0.01$) sekä ylävartalon ja vertikaalisen tason välisen kulman muutos askelsyklin aikana ($r = -0.70$, $p \leq 0.05$) olivat yhteydessä polvikulman minimiarvoon tukivaiheessa. Polvikulman minimiarvo tukivaiheessa oli lisäksi yhteydessä tukivaiheen polven ojentumisen kulmanopeuteen ($r = -0.92$, $p \leq 0.001$) (kuva 33). Polven koukistumisen kesto tukivaiheessa oli yhteydessä reisikulman kulmanopeuteen tukivaiheen alussa (kontaktin alku – keskitukivaihe) ($r = 0.64$, $p \leq 0.05$) (kuva 34). Kovassa vauhdissa polven koukistumisen kesto oli yhteydessä polven ojentumisen maksiminopeuteen tukivaiheessa ($r = 0.80$, $p \leq 0.05$) ja polvikulman minimiarvo tukivaiheessa oli yhteydessä reisikulman kulmanopeuteen tukivaiheen lopussa (keskitukivaihe – kontaktin loppu) ($r = -0.80$, $p \leq 0.05$).

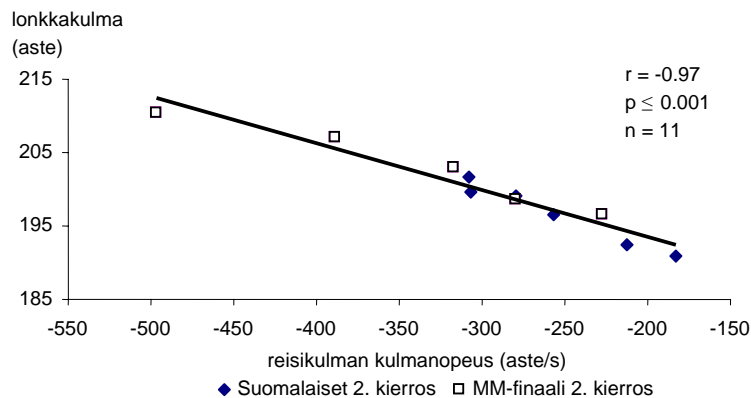


KUVA 33. Tukivaiheen polvikulman minimin ja tukivaiheen polven ojentumisen kulmanopeuden välinen suhde.

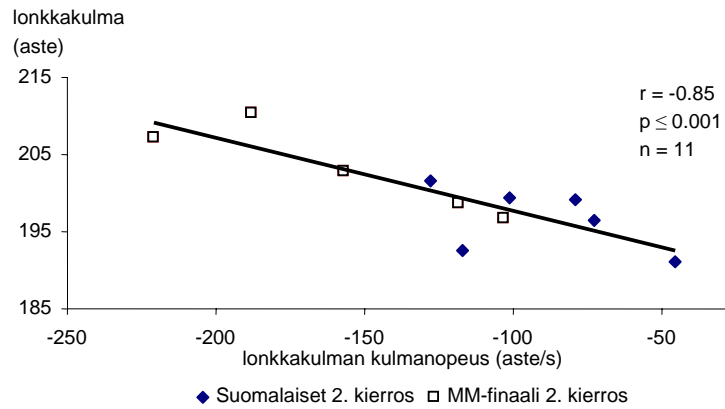


KUVA 34. Tukivaiheen polven koukistumisen keston ja tukivaiheen alun (kontaktin alku – keskitukivaihe) reisikulman kulmanopeuden välinen suhde.

Reisikulman kulmanopeus varsinkin tukivaiheen loppuvaiheessa (keskitukivaihe – kontaktin loppu) oli yhteydessä lonkkakulmaan kontaktin lopussa varpaiden maasta irtoamisen hetkellä ($r = -0.97$, $p \leq 0.001$) (kuva 35). Lonkkakulma kontaktin lopussa oli puolestaan yhteydessä lonkan koukistumisen nopeuteen heilahdusvaiheen alussa (kontaktin loppu – vastakkaisen jalan kontakti) ($r = -0.85$, $p \leq 0.001$) (kuva 36).



KUVA 35. Tukivaiheen lopun (keskitukivaihe-kontaktin loppu) reisikulman kulmanopeuden ja kontaktin lopun lonkkakulman välinen suhde.



KUVA 36. Kontaktin lopun lonkkakulman ja heilahdusvaiheen alun (kontaktin loppu – vastakkaisen jalan kontaktin alku) lonkan koukistumisen nopeuden välinen suhde.

Polven koukistumisen maksiminopeus heilahdusvaiheessa oli yhteydessä reisikulman kulmanopeuteen heilahdusvaiheen koukistumisen alussa (kontaktin loppu – vastakkaisen jalan kontaktin alku) ($r = -0.73$, $p \leq 0.05$). Reisikulman kulmanopeus heilahdusvaiheen koukistumisen lopussa (vastakkaisen jalan kontaktin alku – maksimaalinen koukistus) oli yhteydessä lonkan ojentumisen kulmanopeuteen ennen uuden kontaktin alkua ($r = 0.85$, $p \leq 0.001$). Lisäksi reisikulman maksimi oli yhteydessä reisikulman kulmanopeuteen ennen uuden kontaktin alkua (maksimaalinen koukistuminen – kontaktin alku) ($r = -0.76$, $p \leq 0.01$).

9 POHDINTA

Tämän tutkimuksen päätulosten mukaan polvi koukistui suomalaisilla juoksijoilla syvemmälle kuin MM-finalisteilla askeleen tukivaiheen aikana. Samalla polven koukistumisen kesto oli suomalaisilla pidempi ja polven ojentumisen nopeus tukivaiheessa suurempi kuin MM-finaalin juoksijoilla. Askeleen kontaktiajassa ja juoksunopeudessa ei ollut eroja ryhmien välillä. Lonkka koukistui heilahdusvaiheen alussa MM-finalisteilla nopeammin kuin suomalaisilla ja lonkkakulma oli MM-finalisteilla pienempi kuin suomalaisilla juoksijoilla vastakkaisen jalan keskitukivaiheessa. Juoksunopeuden kasvaessa MM-finaalin aikana askeltiheys kasvoi ja askeleen kontaktiaika lyheni oletetusti. Kulmanopeudet kasvoivat lähinnä suuntaa antavasti askeleen heilahdusvaiheessa. Juoksunopeuden muutos kilpailun aikana ei ollut ilmeisesti riittävän suuri aiheuttamaan muita muutoksia juoksun kinematiikassa näin pienellä koehenkilöryhmällä.

9.1 Polvinivelen toiminta askeleen tukivaiheen aikana

Polvinivelen toiminta askeleen tukivaiheen aikana vaikuttaa elastisen energian hyödyntämiseen ja sitä kautta juoksun taloudellisuuteen. Polvinivelen toiminta ei ole kuitenkaan riippuvainen pelkästään polven ympärillä olevien lihasten toiminnasta, vaan myös lonkan ojentajien toiminta vaikuttaa polvinivelen toimintaan askeleen tukivaiheessa. Kilpailun aikana kasaantuvalla väsymisellä on myös merkitystä nivelkulmien toiminnan kannalta.

9.1.1 Lihäsjäykkyys, elastisen energian hyödyntäminen ja juoksun taloudellisuus

Polvikulman minimiarvo askeleen tukivaiheessa oli suomalaisilla juoksijoilla pienempi kuin MM-finalisteilla, joten suomalaisilla juoksijoilla polvi ikään kuin pettää enemmän maailman parhaisiin juoksijoihin verrattuna. Polven koukistumisen minimoimiseksi polvi- ja lonkkanivelten ympärillä olevien lihasten jäykkyyden tulisi olla riittävällä tasolla askeleen jarrutusvaiheen aikana, joten MM-finalisteilla lihasjäykkyys on todennäköisesti suurempaa kuin suomalaisilla juoksijoilla. Jotta lihasjäykkyys olisi askeleen

jarrutusvaiheessa riittävän korkealla tasolla, tulee juoksijoiden aktivoida lihaksiaan tehokkaasti jarrutusvaiheen lisäksi jo askeleen esiaktiivisuuden vaiheessa. Esiaktiivisuuden avulla on mahdollista kasvattaa lihasten aktiivisuutta askeleen jarrutusvaiheessa, jolloin lihajäykkyys kasvaa. Korkean lihajäykkyyden ansiosta varastoitunut elastinen energia voidaan vapauttaa tehokkaasti askeleen työntövaiheessa ja polvi voi ojentua ilman suurta lihasaktivaatiota. (Kyröläinen ym. 1999, 2001, 2005, Skof & Stuhec 2004.)

Tässä tutkimuksessa polven havaittiin ojentuvan tukivaiheessa sitä nopeammin mitä syvemmälle polvi koukistui (kuva 33). Polven koukistumisen ja polven ojentumisen nopeuden välistä yhteyttä vahvistaa kovassa vauhdissa havaittu yhteys polven koukistumisen keston ja polven ojentumisen maksiminopeuden välillä. Suuresta polven koukistumisesta johtuen suomalaisten juoksijoiden täytyy suorittaa polven ojentaminen tehokkaammin kuin MM-finalistien, koska askeleen kontaktiaika oli molemmilla ryhmillä yhtä suuri. Niinpä suomalaiset tekevät polven ojennusvaiheessa enemmän työtä kuin MM-finalistit. Tästä polven ojentamisen vaatimasta lihastyöstä suomalaiset tekevät todennäköisesti suuremman osan aktiivisesti ilman elastisen energian hyödyntämistä MM-finalisteihin verrattaessa, joten juoksun taloudellisuudessa voi olla eroja ryhmien välillä. Näyttääkin siltä, että polven ojentumisen kulmanopeuden merkitys on melko pieni tehokkaan juoksuaskeleen kannalta. Tämän tutkimuksen mukaan on mahdollista juosta lyhyellä askelkontaktilla, vaikka polvi koukistuisikin syvälle askeleen jarrutusvaiheen aikana. Tällöin polven ojentumisen täytyy tapahtua tehokkaasti.

Suuri polvikulma voi olla hyödyllistä myös lihaksen mekaanisen voimantuoton kannalta. Juoksijoiden polven ojentajalihasten optimaalisen voimantuottopituuden on havaittu olevan lyhyempi kuin pyöräilijöillä, joten lihakset näyttävät sopeutuvan lajin vaatimuksiin. Juoksussahan polvi ei ole missään vaiheessa yhtä koukistuneena kuin pyöräilyssä. (Savelberg & Meijer 2003.) Viimeaikaisessa tutkimuksessa havaittiin löysän nelipäisen reisilihaksen jänteen olevan yhteydessä hyvään juoksun taloudellisuuteen. Jänteen venyessä lihas tekee työtä lyhyemmällä lihaspituuksilla, jolloin lihaksen voimantuottokyky voi parantua. Tällöin juoksussa tarvittavan aktiivisen lihasmassan määrä vähentyy ja juoksun taloudellisuus paranee. (Arampatzis ym. 2006.) Suuri polvikulma askeleen tukivaiheen aikana mahdollistaa sen, että polven ojentajalihakset tekevät työtä lyhyellä lihaspituudella, jolloin juoksu on taloudellista.

Polvinivelen ympärillä tapahtunut suuri liike voi kertoa suuresta vertikaalisesta oskillaatiosta, jonka on havaittu olevan yhteydessä juoksun taloudellisuuteen. Huippujuoksijoilla on aikaisemmin havaittu pieni vertikaalinen oskillaatio harrastelijoihin verrattaessa (Slawinski & Billat 2004). Nyt tehdyssä tutkimuksessa ylävartalo liikkui sitä enemmän horisontaalisessa suunnassa mitä syvemmälle polvi koukistui tukivaiheessa. Ylävartalon heiluminen askelsyklin aikana on turhaa ja energiaa kuluttavaa.

9.1.2 Polvi- ja lonkkanivelen välinen yhteistoiminta askeleen tukivaiheessa

Muuttujien välisiä yhteyksiä tarkasteltaessa polven havaittiin koukistuvan tukivaiheessa sitä vähemmän mitä nopeammin lonkka ojentuu ennen askelkontaktin alkua. Tämä havainto kertoo lonkan ojentajien esiaktiivisuuden vaikutuksesta polven koukistumiseen tukivaiheessa. Tehokas lonkan ojentuminen esiaktiivisuuden vaiheessa mahdollistaa kontaktin alun sijoittuvan mahdollisimman lähelle kehon massakeskipisteestä vedettyä vertikaalista suoraa, jolloin askeleen jarrutusaika lyhenee ja polven pitäminen suorassa helpottuu. Lisäksi lonkka ojentui tukivaiheen alussa sitä nopeammin mitä lyhyempi oli polven koukistumisen kesto (kuva 34). Kovassa vauhdissa polvikulman minimiarvo tukivaiheessa oli puolestaan yhteydessä reisikulman kulmanopeuteen tukivaiheen lopussa. Näiden yhteyksien mukaan polvi koukistui tukivaiheessa vain vähän silloin kun reiden segmentti liikkui tukivaiheessa nopeasti vertikaaliseen tasoon nähden. Polven ojentajalihasten aktiivisuuden on havaittu vähenevän merkittävästi polven koukistumisen jälkeen, joten polven ojentumisen uskotaan tapahtuvan lähinnä elastisen energian hyödyntämisen avulla (Kyröläinen ym 1999). On kuitenkin ehdotettu, että lonkan ojentajien toiminta aiheuttaisi myös polven ojentumista askeleen työntövaiheessa (McClay ym. 1990, 184).

9.1.3 Väsymisen vaikutus

Verrattaessa suomalaisia juoksijoita MM-finalisteihin samalla absoluuttisella juoksunopeudella, on otettava huomioon myös väsymisen vaikutus. Suomalaiset juoksivat kilpailun toisella kierroksella lähempänä heidän kauden parhaan tuloksensa keskinopeutta kuin MM-finalistit, joten suomalaisten voidaan olettaa olleen väsyneempiä juoksun tässä vaiheessa. Väsymisen on havaittu heikentävän lihasjäykkyyden säätelymekanismeja (Avela & Komi 1998). Uupumiseen asti juostussa juoksumattotestissä lihasjäykkyyden

on havaittu vähenevän testin edetessä samalla kun nilkan ja lonkan välisen vertikaalisen etäisyyden havaittiin lyhenevän askeleen tukivaiheessa (Dutto & Smith 2002), joten polven suuri koukistuminen voi periaatteessa johtua myös väsymisestä.

Aikaisemmin on tehty tutkimus, jossa naispuolista 800 m:n juoksijaa analysoitiin kilpailun loppusuoralta. Huolimatta ilmeisestä väsymyksestä kilpailun tässä vaiheessa polvikulman muutos askeleen jarrutusvaiheessa pysyi hyvin pienenä (6.9°) nopeudella 7.1 m/s (Skof & Stuhc 2004). Nyt tehdyssä tutkimuksessa polvi koukistui suomalaisilla tukivaiheen aikana $19 \pm 7^\circ$ ja MM-finalisteilla $16 \pm 5^\circ$. Kolmannella kierroksella MM-finalistit juoksivat nopeudella 7.2 m/s, ja todennäköisesti olivat väsyneempiä kuin suomalaiset toisella kierroksella, mutta polvikulman minimi tai polven koukistuminen tukivaiheessa eivät muuttuneet merkittävästi. MM-kisojen kolmannella kierroksella oli kuitenkin havaittavissa suuri hajonta polven koukistumisessa tukivaiheessa siten, että yhdellä juoksijalla polvi petti selkeästi enemmän kolmannella kuin toisella kierroksella. Väsymisen vaikutuksesta polven koukistuminen tukivaiheessa voi siis kasvaa, ja tämä tekijä saattaa selittää eroja suomalaisten ja MM-finalistien välillä. Todennäköisesti suomalaiset eivät kuitenkaan olleet liian väsyneitä kilpailun toisella kierroksella pitääkseen yllä riittävää lihasjäykkyyttä. On vielä huomattava, että kuudesta analysoidusta suomalaisesta juoksijasta kaksi juoksi kilpailussa kauden parhaan tuloksensa, ja kilpailun 800 m:n väliaika oli tasaisen vauhdin taulukolla (2.03.76) juuri sopiva tälle juoksijaryhmälle.

9.2 Lonkanivelen toiminta askelsyklin aikana

Lonkan havaittiin olevan MM-finalisteilla koukistuneempana kuin suomalaisilla vastakkaisen jalan keskitukivaiheen hetkellä. Polvi oli siis tässä vaiheessa noussut MM-finalisteilla korkeammalle kuin suomalaisilla. Tätä eroa selittää lähinnä ero lonkan koukistumisen nopeudessa heilahdusvaiheen alussa (kontaktin loppu - vastakkaisen jalan kontaktin alku). MM-finalisteilla lonkka ojentui suuntaa antavasti nopeammin suomalaisiin juoksijoihin verrattuna heilahdusvaiheen lopussa ennen uuden kontaktin alkua. (maksimaalinen koukistuminen - kontaktin alku). Lisäksi lonkkakulman muutos askelsyklin aikana oli MM-finalisteilla suurempi ja lonkkakulma kontaktin lopussa suuntaa

antavasti suurempi kuin suomalaisilla juoksijoilla. Tulosten perusteella voidaan vetää johtopäätös, jonka mukaan MM-finalistien lantion toiminta askelsyklin aikana on yleisesti ottaen tehokkaampaa kuin suomalaisilla juoksijoilla.

Heilahdusvaiheen alussa lonkka koukistui sitä nopeammin mitä suurempi lonkkakulma oli kontaktin lopussa (kuva 36). Tehokas lonkan ojentuminen voi näin ollen vaikuttaa myös lonkan koukistumiseen, sillä reisikulman kulmanopeus tukivaiheessa oli erittäin merkittävästi yhteydessä lonkkakulmaan kontaktin lopussa (kuva 35). Vaikka lonkkakulma kontaktin lopussa oli suuntaa antavasti erilainen suomalaisten ja MM-finalistien välillä, ei lonkkakulman maksimiarvossa ollut eroa. Tämä kertoo siitä, että suomalaisilla reisi liikkuu enemmän taakse kontaktin lopun jälkeen MM-finalisteihin verrattaessa, jolloin lonkan koukistaminen vaikeutuu. Lisäksi lonkkakulman kulmanopeus oli MM-finalisteilla suuntaa antavasti hitaampi kuin suomalaisilla kontaktin loppuhetkellä. Hyvä koordinaatio lihasten välillä vaatii myös lihasten rentoutumista (Simonsen ym. 1985), joten MM-finalistien jalan ojentajalihakset saattavat rentoutua aikaisemmin suomalaisiin juoksijoihin verrattuna. Tällöin maailman huippujuoksijoiden lonkan koukistajat pystyvät toimimaan tehokkaammin ja oikea-aikaisemmin eksentrisen lihastyön vaiheessa suomalaisten juoksijoiden vastaaviin lihaksiin verrattuna, jolloin suuresta tukivaiheen aikaisesta lonkan ojentumisen nopeudesta huolimatta pystyvät maailman parhaat juoksijat hidastamaan jalan liikettä tehokkaasti juuri ennen kontaktin loppumista.

Myös polven koukistumisella voi olla vaikutusta lonkan koukistumisen nopeuteen heilahdusvaiheessa. MM-finalisteilla polven koukistumisen maksiminopeus heilahdusvaiheessa oli suurempi kuin suomalaisilla juoksijoilla. Lonkka koukistuikin heilahdusvaiheen alussa sitä nopeammin mitä suurempi oli polven koukistumisen maksiminopeus. Jalkaterän heilahtaessa mahdollisimman läheltä reittä pysyy heilahtavan jalan vipuvarsi pienenä, jolloin jalan eteen heilahtaminen helpottuu. Lonkan koukistumisella on merkitystä juoksuaskeleen tehokkuuden kannalta, koska askeleen jarrutusvaiheessa heilahtavan jalan liike tuottaa ainoan eteenpäin suuntautuvan voiman. (Skof & Stuhc 2004.) Heilahdusvaiheen aikainen lihastyö kannattaa tehdä tehokkaasti, koska sen on arvioitu aiheuttavan vain noin 20 % juoksun kokonaisenergiankulutuksesta (Modica & Kram 2005). Nyt tehdyssä tutkimuksessa kulmanopeuksien havaittiin juoksunopeuden lisääntyessä kasvavan merkittävästi tai lähes merkittävästi heilahdusvaiheen aikana, kun taas tukivaiheessa ei havaittu eroja.

Heilahdusvaiheessa lonkka ojentui ennen uuden kontaktin alkua sitä nopeammin mitä nopeammin ja mitä enemmän lonkka koukistui heilahdusvaiheessa. Näistä yhteyksistä voidaan päätellä, että polven kannattaa nousta nopeasti ja korkealle, jotta lonkan ojentuminen voidaan suorittaa tehokkaasti heilahdusvaiheen lopussa ennen uuden kontaktin alkua. Polvea tuskin kannattaa tietoisesti nostaa korkealle, mutta suorittamalla lonkan koukistuminen tehokkaasti heilahdusvaiheen alussa nousee polvi kuin itsestään riittävän korkealle riittävän nopeasti.

9.3 Tehokkaalle juoksuaskelelle ominaisia piirteitä

Tämän tutkimuksen tulosten perusteella voidaan määrittää tehokkaalle juoksuaskelelle ominaisia piirteitä keskimatkojen juoksussa. Johtopäätökset perustuvat olettamukseen, jonka mukaan maailman parhailla juoksijoilla askel on joko luonnostaan tai harjoittelun kautta tehokkaampi ja taloudellisempi kuin suomalaisilla kansallisen tason juoksijoilla. Tulokset eivät tietenkään päde suoraan kaikkiin juoksijoihin, koska yksilölliset erot ovat suuria ja taloudellisin askel voi olla hieman erilainen esimerkiksi kehon mittasuhteista johtuen. Lisäksi pidemmällä juoksumatkoilla taloudellisin askel voi olla hieman erilainen kuin keskimatkoilla; toisaalta myös pikajuoksuaskel on hieman erilainen kuin keskimatkojen juoksussa käytetty askel. Tutkimuksen perusteella voidaan havaita, että askelsyklin vaiheet ovat yhteydessä toisiinsa. Tietyissä askeleen osa-alueessa havaittua virhettä voi olla vaikea korjata pelkästään tähän osa-alueeseen keskittymällä, mutta tietämällä enemmän askelsyklin rakenteesta voidaan virheen taustalla olevat syyt tunnistaa paremmin.

1500m:n kilpailuvauhdissa lantion toiminnan merkitys on suuri. Lonkan tulisi ojentua tehokkaasti esiaktiivisuuden vaiheessa ja askeleen tukivaiheessa. Lonkan tehokas ojentuminen auttaa pitämään polven suorana tukivaiheen jarrutusvaiheessa. Polven koukistuessa syvälle täytyy juoksijoiden polven ojennuksen tapahtua tehokkaasti, joka kuluttaa energiaa. Myös nelipäisen reisilihaksen tulisi aktivoitua tehokkaasti esiaktiivisuuden vaiheen aikana, jolloin lihasjäykkyys askeleen jarrutusvaiheessa olisi riittävän suuri. Lisäksi ylävartalon ja vertikaalisen tason välisen kulman muutos tulisi pitää mahdollisimman pienenä askelsyklin aikana.

Tehokas lonkan ojentuminen tukivaiheen aikana 1500 m:n kilpailuvauhdissa mahdollistaa suuren lonkkakulman kontaktin lopussa. Suuri lonkkakulma kontaktin lopussa on puolestaan yhteydessä tehokkaaseen lonkan koukistumiseen askeleen heilahdusvaiheessa. Lonkan ojentuessa reisi ei saa liikkua liikaa taakse varpaiden maasta irtoamisen jälkeen, koska tämä vaikeuttaa lonkan koukistamista. Lonkan koukistumisen ollessa tehokas heilahdusvaiheen alussa, voi polvi nousta korkealle nopeasti ja helposti. Tällöin juoksijalle jää hyvin aikaa keskittyä taas tehokkaaseen lonkan ojentamiseen ennen uuden askelkontaktin alkua. Nopea polven koukistuminen heilahdusvaiheessa voi tehostaa lonkan koukistumista.

Tehokkaan askelsyklin kannalta syklin eri vaiheiden välinen ajoitus on tärkeää. Jos juoksija ei onnistu esimerkiksi koukistamaan lonkkaa tehokkaasti askeleen heilahdusvaiheen aikana, voi tämä johtaa puutteellisiin liikemalleihin muissa askelsyklin vaiheissa. Polven jäädessä liian matalalle ei ole mahdollista suorittaa lonkan ojentumista tehokkaasti esiaktiivisuuden vaiheessa, jolloin joudutaan tekemään enemmän työtä polvinivelen ympärillä askeleen tukivaiheessa lantion toiminnan ollessa puutteellista.

On syytä muistaa, että tässä tutkimuksessa ei mitattu juoksun taloudellisuutta. Tutkimuksessa havaittujen kinemaattisten erojen perusteella MM-finalistien voidaan periaatteessa olettaa olevan taloudellisempia kuin suomalaisten, mutta aikaisempien tutkimusten perusteella kinemaattiset muuttujat selittävät juoksun taloudellisuutta huonosti (Kyöroläinen ym. 2001). Aiemmin ei ole kuitenkaan vertailtu juoksun kinematiikkaa aidossa kilpailutilanteessa näin eritasoisten ryhmien välillä.

9.4 Tutkimuksen rajoitukset ja muuttujien toistettavuus

Tutkimus tehtiin aidossa kilpailutilanteessa, joten tilanne ei ollut tutkimuksen kannalta optimaalinen. Tarkkojen tutkimusongelmien asettaminen oli vaikeaa, koska kilpailuiden kulkua ei voitu tietää etukäteen. Kameroiden kuva-ala piti säätää melko suureksi, jotta tarpeeksi monta juoksijaa saatiin mahtumaan kuviin. Niinpä analyysi pystyttiin tekemään vain neljän nivelpisteen perusteella, joten kehon massakeskipisteen liikettä ei pystytty analysoimaan. Myös nilkkanivelen toiminta jäi analysoimatta. Nivelpisteiden mää-

rittämistä varten ei pystytty asettamaan heijastavia markkereita, joten nivelpisteet täytyi paikantaa juoksijoiden kehosta joka kuvassa erikseen. On kuitenkin huomioitava, että juoksusyklin aikana kehon eri osien perspektiivit voivat muuttua, joten nivelpisteitä määritettäessä tulisi ottaa huomioon myös kuvakulman muutos. Niinpä segmenttien välisiä nivelten keskipisteitä määritettäessä ei välttämättä edes kannata käyttää iholle kiinnitettyjä markkereita, koska kuvakulman muuttuessa markerit eivät kuvaa parhaiten nivelten keskipisteiden liikkeitä. (Williams 1993, 8-9.)

Aikaan ja paikkaan perustuvat askelmuuttujat ovat yleensä hyvin toistettavia (Schache ym. 2002, Hunter ym. 2004). Askelpituus ja kontakti- sekä lentoaikojen kestot korreloivat hyvin sekä peräkkäisten askelien ($r = 0.96-0.99$) että myös päivien ($r = 0.93-0.98$) välistä toistettavuutta määritettäessä (Morgan ym. 1991). Muista kinemaattisista muuttujista on havaittu, että lineaari- ja kulmanopeudet ovat huonoiten toistettavia ($r < 0.80$). Nopeusmuuttujia määritettäessä suositellaankin useamman kuin yhden suorituksen analysointia. Useimpien muiden kinemaattisten muuttujien on havaittu olevan hyvin toistettavia ($r > 0.80$). (Karamanidis ym. 2003.) Toistettavuus paranee selkeästi analysoitaessa useiden suoritusten keskiarvoja (Hunter ym. 2004). Ryhmän keskiarvoissa yksilöiden välinen satunnainen vaihtelu tasoittuu, joten ryhmien keskiarvojen vertailu antaa luotettavampia tuloksia kuin yksittäisten koehenkilöiden vertailu (Ferber ym. 2002). Tässä tutkimuksessa pystyttiin analysoimaan vain yksi askelsykli jokaiselta juoksijalta, joten yksittäisten juoksijoiden vertailu ei ole tämän tutkimuksen kannalta järkevää varsinkaan kulmanopeuksien kohdalla. Ryhmien keskiarvojen vertailu on todennäköisesti luotettavampaa. Tutkimuksen tuloksia tarkasteltaessa tulee kuitenkin huomioida, että tässä tutkimuksessa ei tehty toistettavuusanalyysiä. Kaikki suoritukset analysoitiin yhden tutkijan toimesta, jolloin tuloksissa ei ole havaittujen välisestä vaihtelusta aiheutuvaa virhettä.

Juoksijoiden nopeuden määrittäminen ei kuvaa täysin hetkellistä nopeutta analyysihetkellä, koska nopeusanalyysi tehtiin etusuoran keskinopeuden perusteella. Horisontaalisen etäisyyden kalibroinnin epäonnistuminen onkin tutkimuksen suurin heikkous, koska askelpituutta ei pystytty edes määrittämään. Mielenkiintoinen määrittämättä jäänyt muuttuja on myös kontaktin alkuhetken tukipisteen ja massakeskipisteen välinen horisontaalinen etäisyys. Juoksijat etenivät analysoitujen kierrosten etusuoralla silmämääräisesti tasaisella nopeudella, joskin pientä nopeuden vaihtelua 100m:n matkalla on toki voinut olla.

Nyt tehdyssä tutkimuksessa monet kinemaattiset muutokset olivat vauhdin kasvaessa pienempiä kuin erot MM-finalistien ja suomalaisten juoksijoiden välillä samalla nopeudella. Niinpä mahdolliset muutaman prosentin erot juoksunopeudessa eivät todennäköisesti vaikuta tuloksiin merkittävästi. Esimerkiksi polven ojentumisen nopeuden havaittiin olevan suomalaisilla juoksijoilla jopa suurempi kuin MM-finalisteilla kovalla juoksunopeudella. Vastaavanlainen tutkimus olisi tärkeää pystyä tekemään kontrolloiduissa laboratorio-olosuhteissa. Tällöin on kuitenkin hyvin vaikeaa saada kokoon tämän tutkimuksen koehenkilöitä vastaavaa joukkoa.

9.5 Johtopäätökset

Suomalaisten polvi koukistuu syvemmälle askeleen jarrutusvaiheen aikana, jonka jälkeen he ojentavat polvea enemmän ja nopeammin MM-finalisteihin verrattuna. Askeleen kontaktiajoissa ja juoksunopeudessa ei ollut eroja ryhmien välillä. Niinpä suomalaiset tekevät polven ojennusvaiheessa enemmän työtä kuin MM-finalistit. Tästä polven ojentamisen vaatimasta lihastyöstä suomalaiset tekevät todennäköisesti suuremman osan aktiivisesti ilman elastisen energian hyödyntämistä MM-finalisteihin verrattuna. Suuri polvikulma askeleen tukivaiheessa mahdollistaa hyvät olosuhteet mekaanisen voimantuoton kannalta ja minimoi vertikaalista oskillaatiota, joten MM-finalistit voivat juosta taloudellisemmin kuin suomalaiset juoksijat. Tehokas lonkan ojentuminen askeleen esiaktiivisuus- ja tukivaiheissa helpottaa polven pitämistä suorana askeleen tukivaiheen aikana, mutta polven ojentajalihasten jäykkyyden säätelyllä on myös merkitystä. MM-finalistien lantion toiminta on tehokkaampaa suomalaisiin juoksijoihin verrattuna, jonka ansiosta esimerkiksi lonkan koukistumisen nopeus heilahdusvaiheen alussa oli MM-finalisteilla suurempi kuin suomalaisilla juoksijoilla. Juoksunopeuden kasvaessa erot juoksun kinematiikassa havaittiin parhaiten askeleen heilahdusvaiheen aikaisissa kulmanopeuksissa, joten heilahdusvaiheen toteutuksella on myös merkitystä tehokkaan juoksuaskeleen kannalta. Tutkimuksen mukaan askelsyklin vaiheet ovat yhteydessä toisiinsa, joten eri vaiheiden välinen ajoitus ja lihasten oikea-aikainen rentoutuminen ovat tärkeitä tekijöitä tehokkaan ja taloudellisen juoksuaskeleen mahdollistamiseksi.

Valmennuksen kannalta tutkimuksen merkittävin löydös on, että Suomen parhailla nuorilla 1500 m:n juoksijoilla näyttäisi olevan kehitettävää juoksutekniikassaan. Tutkimuksen perusteella ei kuitenkaan pystytä sanomaan, johtuvatko juoksutekniset erot esimerkiksi nopeusvoimaominaisuuksista, vai osaavatko maailman huiput yksinkertaisesti juosta paremmin. Suomalaisten juoksijoiden tulisi keskittyä lantion käytön tehostamiseen. Pakaran ja takareiden lihasten tulisi aktivoitua tehokkaasti jo ennen kontaktin alkua sekä varsinkin askeleen törmäysvaiheessa, jolloin lantio ei saa pudota. Kaikessa harjoittelussaan juoksijoiden on tärkeää keskittyä tuottamaan voimaa terävästi kontaktin alussa, jolloin askelta ei tarvitse niin sanotusti työntää kontaktin loppuvaiheessa. Askel-syklin rakenteen ymmärtäminen auttaa valmentajia tunnistamaan juoksutekniikan virheiden taustalla olevat tekijöitä.

LÄHTEET

- Adelaar, R. S. 1986. The practical biomechanics of running. *The American Journal of Sports and Science* 14, 497-500.
- Ae, M., Ito, A. & Suzuki, M. 1992. The men's 100 metres. *New Studies in Athletics* 7, 47-52.
- Allard, P., Stokes, I. & Blanchii, J-P. 1995. *Three-Dimensional Analysis of Human Movement*. Human Kinetics, USA.
- Arampatzis, A., De Monte, G., Karamanidis, K., Morey-Klapsing, G., Stafilidis, S. & Bruggemann, G.P. 2006. Influence of the muscle-tendon unit's mechanical and morphological properties on running economy. *Journal of Experimental Biology* 206, 3345-3357.
- Arrese, A. L., Izquierdo, D.M. & Urdiales, D.M. 2005. A review of the maximal oxygen uptake values necessary for different running performance levels. *New Studies in Athletics* 20, 7-20.
- Avela, J. & Komi, P.V. 1998. Reduced stretch reflex sensitivity and muscle stiffness after long-lasting stretch-shortening cycle exercise in humans. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology* 78, 403-410.
- Bassett, D.R. & Howley, E.T. 1997. Maximal oxygen uptake: "classical vs. contemporary" viewpoint. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 29, 591-603.
- Bassett, D.R. & Howley, E.T. 2000. Limiting factors for maximum oxygen uptake and determinants of endurance performance. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 32, 70-84.
- Belli, A. 1996. Measurement of mechanical factors of running efficiency. Teoksessa Marconnet P., Saltin B., Komi P., Poortmans J (toim.) *Human muscular function during dynamic exercise*. International Council of Sport and Physical Education, Basel.
- Berg, K. 2003. Endurance training and performance in runners. Research limitations and unanswered questions. *Sports Medicine* 33, 59-73.
- Blackburn, J.T., Padua, D.A., Riemann, B.D. & Guskiewicz, K.M. 2004. The relationships between active extensibility and passive and active stiffness of the knee flexors. *Journal of Electromyography and Kinesiology* 14, 683-691.

- Bosco, C., Tihanyi, J., Komi, P.V., Fekete, G. & Apor, P. 1982. Store and recoil of elastic energy in slow and fast types of human skeletal muscles. *Acta Physiologica Scandinavica* 116, 343-349.
- Bosco, C., Montanari, G. & Ribacchi, R. 1987. Relationship between the efficiency of muscular work during jumping and the energetics of running. *European Journal of Applied Physiology* 56, 138-143.
- Brandon, L. J. 1995. Physiological factors associated with middle distance running performance. *Sports Medicine* 19, 268-277.
- Cavagna, G.A., Saibene, F.B. & Margaria, R. 1964. Mechanical work in running. *Journal of Applied Physiology* 19, 249-256.
- Cavanagh, P.R. & Kram, R. 1990. Stride Length in Distance Running: Velocity, Body Dimensions, and Added Mass Effects. Teoksessa Cavanagh P. R. (toim.) 1990. *Biomechanics of Distance Running*. Human Kinetics, Champaign. USA.
- Conley, D.L. & Krahenbul, G.S. 1980. Running economy and distance running performance of highly trained athletes. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 12, 357-360.
- Costill, D.L., Thomason, H. & Roberts, E. 1973. Fractional utilization of aerobic capacity during distance running. *Medicine and Science in Sports & Exercise* 5, 248-252.
- Daniels, J. T. 1985. A physiologist's view of running economy. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 17, 332-338.
- Daniels, J. & Daniels, N. 1992. Running economy of elite male and elite female runners. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 24, 483-489.
- Di Prampero, P.E., Capelli, C., Pagliaro, P., Antonutto, G., Girardis, M., Zamparo, P. & Soule, R.G. 1993. Energetics of best performances in middle-distance running. *Journal of Applied Physiology* 74, 2318-2324.
- Dutto, D.J. & Smith, G.A. 2002. Changes in spring-mass characteristics during treadmill running to exhaustion. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 34, 1324-1331.
- Enoka, R.M. 1994. *Neuromechanical basis of kinesiology*, second edition. Human Kinetics. USA.
- Enoka, R.M. 2002. *Neuromechanics of human movement*, third edition. Human Kinetics. USA.

- Fallowfield, J.L. & Wilkinson, D.M. 1999. Improving sports performance in middle and long-distance running. A scientific approach to race preparation. John Wiley & Sons, Chichester, England.
- Ferber, R., McClay Davis, I., Williams, D.S. & Laughton, C. 2002. A comparison of within- and between day reliability of discrete 3-D lower extremity variables in runners. *Journal of orthopaedic research* 20, 1139-1145.
- Fogelholm, M. & Vuorimaa, T. 1991. *Haasteena pitkät kestävyyslajit*. Gummerus kirjapaino oy, Jyväskylä.
- Frederick, E.C. 1990. Scale effects in distance running. Teoksessa Cavanagh, P.R. (toim.) *Biomechanics of Distance Running*. Human Kinetics, Champaign, USA.
- Gajer, B., Thépaut-Mathieu, C. & Lehénaff, D. 1999. Evolution of stride and amplitude during course of the 100 m event in athletics. *New Studies in Athletics* 14, 43-50.
- Graib, M.W., Mitchell, V.A., Fields, K.B., Cooper, T.R., Hopewell, T.R. & Morgan, D.V. 1996. The association between flexibility and running economy in sub-elite male distance runners. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 28, 737-743.
- Green, H.J. 2000. Muscular factors in endurance. Teoksessa Shephard, R.J. & Åstrand, P.-O. *Endurance in sport*. Blackwell publishing company, Oxford.
- Greene, L. & Pate, R. 1997. *Training for young distance runners*, Human Kinetics, Champaign, USA.
- Hickson, R., Dvorak, B., Gorostiaga, E., Kurowski, T. & Foster, C. 1988. Potential for strength and endurance training to amplify endurance performance. *Journal of Applied Physiology* 65, 2285-2290.
- Houk, J.C. & Rymer, W.Z. 1981. Neural control of muscle length and tension. Teoksessa Brookhart, J.M, Mountcastle, V.B., Brooks, V.B. & Geiger, S.R. (toim.) *Handbook of physiology*. USA.
- Huijing, P. A. 1992. Elastic potential of muscle. Teoksessa Komi, P.V. (toim.) *Strength and power in sport*. Blackwell scientific publications, Oxford.
- Hunter, J.P., Marshall, R.H. & McNair, P. 2004. Reliability of biomechanical variables of sprint running. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 36, 850-861.
- Karamanidis, K. Arampatzis, A. & Bruggeman, G.-P. 2003. Symmetry and reproducibility of kinematic parameters during various running techniques. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 35, 1009-1016.

- Kivi, D., Maraj, B. & Gervais, P. 2002. A kinematic analysis of high speed treadmill sprinting over a range of velocities. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 34, 662-666.
- Komi, P.V. 2003. Stretch-shortening cycle. Teoksessa Komi, P. V. (toim.) *Strength and power in sport*. Blackwell publishing company, Oxford.
- Komi, P.V. & Gollhofer, A. 1997. Stretch reflex can have an important role in force enhancement during SSC-exercise. *Journal of Applied Biomechanics* 13, 451-460.
- Komi, P.V., Jungman, L. & Silen, T. 1978. *Voimavalmennus*. Hangan kirjapaino, Hanko.
- Komi, P.V., Gollhofer, A., Schmidtpleicher, D. & Frick, U. 1987. Interaction between man and shoe in running: considerations for a more comprehensive measurement approach. *International Journal of Sports medicine* 8, 196-202.
- Korhonen, M., Mero, A. & Suominen, H. 2003. Age related changes in 100-m sprint performance in male and female masters sprinters. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 35, 1419-1428.
- Kubo, K., Kanehisa, H. & Fukunaga, T. 2001. Is passive stiffness in human muscles related to the elasticity of tendon structures? *European Journal of Applied Physiology* 85, 226-232.
- Kyröläinen, H., Komi, P.V. & Belli, A. 1999. Changes in muscle activity patterns and kinetics with increasing running speed. *Journal of Strength and Conditioning Research* 13, 400-406.
- Kyröläinen, H., Belli, A. & Komi, P.V. 2001. Biomechanical factors affecting running economy. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 33, 1330-1337.
- Kyröläinen, H., Kivelä, R., Koskinen, S., McBride, J., Andersen, J.A., Takala, T., Sipilä, S. & Komi, P.V. 2003. Interrelationships between muscle structure, muscle strength, and running economy. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 35, 45-49.
- Kyröläinen, H., Avela, J. & Komi, P.V. 2005. Changes in muscle activity with increasing running speed. *Journal of Sports Sciences* 23, 1101-1109.
- Mann, R.A. & Hagy, J. 1980. Biomechanics of walking, running, and sprinting. *The American Journal of Sports Medicine* 8, 345-350.

- Matsuo, A., Sugita, M., Ae, M., Kobayashi, K. & Okada, H. 1994. Changes of speed, stride frequency and stride length in middle and long distance. Teoksessa Sasaki, H., Kobayashi, K. & Ae, M. (toim) Techniques of top athletes in 3rd IAAF World Championships in Tokio 1991. Nippon Rikujyo Kyogirenmei, Japani.
- Maughan, R., Gleeson, M. & Greenhaff, P.L. 1997. Biochemistry of exercise & training. Oxford university press, New York.
- McArdle, W.D., Katch, F.I., & Katch, V.L. 1996. Exercise physiology. Williams & Wilkins, Baltimore.
- McArdle, W.D., Katch, F.I., & Katch, V.L. 2001. Exercise physiology. Williams & Wilkins, Baltimore.
- McClay, I.S., Lake, M.J. & Cavanagh, P.R. 1990. Muscle activity in running. Teoksessa Cavanagh, P.R. (toim.) Biomechanics of Distance Running. Human Kinetics, Champaign. USA.
- Midgley, A.W., McNaughton, L.R. & Wilkinson, M. 2006. Is there an optimal training intensity for enhancing the maximal oxygen uptake of distance runners?: empirical research findings, current opinions, physiological rationale and practical recommendations. Sports Medicine 36, 117-132.
- Milliron, M.J. & Cavanagh, P.R. 1990. Sagittal plane kinematics of the lower extremity during distance running. Teoksessa Cavanagh, P. R. (toim.) 1990. Biomechanics of Distance Running. Human Kinetics, Champaign. USA.
- Mero, A. & Komi, P.V. 1987. Electromyographic activity in sprinting at speeds ranging from sub-maximal to supra-maximal. Medicine and Science in Sports and Exercise 19, 266-274.
- Mero, A., Luhtanen, P., Komi, P. & Susanka, P. 1988. Kinematics of top sprint (400m). Running in fatigued conditions. Track & Field Quarterly Reviews 74, 42-45.
- Modica, J.R. & Kram, R. 2005. Metabolic energy and muscular activity required for leg swing in running. Journal of Applied Physiology 98, 2126-2131.
- Morgan, D.W., Marin, P.E., Krahenbuhl, G.S. & Baldini, F.D. 1991. Variability in running economy and mechanics among trained male runners. Medicine and Science in Sports and Exercise 23, 378-383.
- Nelson, A.G., Kokkonen, J., Eldredge, C., Cornwell, A & Clickman-Weiss, E. 2001. Chronic stretching and running economy. Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports 11, 260-265.

- Newsholme, E.A., Blomstrand, E., McAndrew, N. & Parry Billings, M. 1992. Biochemical causes of fatigue and overtraining. Teoksessa Shephard, R.J. & Åstrand, P-O. Endurance in sport. Blackwell publishing, Oxford.
- Nummela, A. T. 1999. Urheilijat. Teoksessa Kuntotestauksen perusteet. Liikuntalääketieteen ja testaustoiminnan edistämisyhdistys Liite, Helsinki.
- Nummela, A. 2004. Kestävyysominaisuuksien mittaaminen. Teoksessa Keskinen, K.L., Häkkinen, K. & Kallinen, K. Kuntotestauksen käsikirja. Tammer-Paino oy, Tampere.
- Nummela, A.T., Paavolainen, L.P., Sharwood, K.A., Lambert, M.I., Noakes, T.D. & Rusko, H. 2006. Neuromuscular factors determining 5 km running performance and running economy in well-trained athletes. *European Journal of Applied Physiology* 97, 1-8.
- Ounpuu S. 1994. The biomechanics of walking and running. *Clinics in Sports Medicine* 13, 843-863.
- Paavolainen, L., Häkkinen, K., Hämäläinen, I., Nummela, A. & Rusko H. 1999a. Explosive-strength training improves 5-km running time by improving running economy and muscle power. *Journal of Applied Physiology* 86, 1527-1533.
- Paavolainen, L., Nummela, A., Rusko, H. & Häkkinen, K. 1999b. Neuromuscular characteristics and fatigue during 10 km running. *International Journal of Sports Medicine* 20, 516-521.
- Pink, M., Perry, J., Houglum, P.A. & Devine, D.J. 1994. Lower extremity range of motion in the recreational sport runner. *The American Journal of Sports Medicine* 22, 541-549.
- Pulkkanen, O. 2005. Jalkojen liikkuvuuden ja nopeusvoimaominaisuuksien yhteys askelmuuttujiin kestävyysjuoksijoilla. Kandidaatin tutkielma, Jyväskylän yliopisto, Liikuntabiologian laitos.
- Renoux, J.C., Betit, B., Billat, V. & Koralsztein, J.P. 1999. Oxygen deficit is related to the exercise time to exhaustion at maximal aerobic speed in middle distance runners. *Archives of Physiology and Biochemistry* 107, 280-285.
- Rundell, K. 1995. Treadmill roller ski test predicts biathlon roller ski race results of top US biathlon women. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 27, 1677-1685.

- Rusko, H., Nummela, A.T. & Mero, A. 1993. A new method for the evaluation of anaerobic running power in athletes. *European Journal of Applied Physiology* 66, 97-101.
- Saunders, P.U., Pyne, D.P., Telford, R.D. & Hawley, J.A. 2004. Factors affecting running economy in trained distance runners. *Sports Medicine* 34, 465-485.
- Savelberg, H.H. & Meijer, K. 2003. Contribution of mono- and biarticular muscles to extending knee joint moments in runners and cyclists. *Journal of Applied Physiology* 94, 2241-2248.
- Schache, A.G., Blanch, P.D., Rath, D.A., Wrigley, T.V., Starr, R. & Bennell, K.L. 2002. Intra-subject repeatability of three dimensional angular kinematics within the lumbo-pelvic-hip complex during running. *Gait and Posture* 15, 136-145.
- Sharp, R., Troup, J. & Costill, D. 1982. Relationship between power and sprint freestyle swimming. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 14, 53-56.
- Simonsen, E.B., Thomsen, L & Klausen, K. 1985. Activity of mono- and biarticular leg muscles during sprint running. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology* 54, 524-532.
- Sinkjaer, T., Toft, S., Andreassen, B. & Hornemann, B. 1988. Muscle stiffness in human ankle dorsiflexors: intrinsic and reflexive components. *Journal of Neurophysiology* 60, 1110-1121.
- Sinkkonen, K. 2000. Juoksukirja. YkkösOffset oy, Vaasa.
- Skof, B. & Stuhec, S. 2004. Kinematic analysis of Jolanda Ceplak's running technique. *New Studies in Athletics* 19, 23-31.
- Slawinski, J.L. & Billat, V.L. 2004. Difference in mechanical and energy cost between highly, well, and nontrained runners. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 36, 1440-1446.
- Taunton, J.E., Maron, H. & Wilkinson, J.G. 1981. Anaerobic performance in middle and long distance runners. *Canadian Journal of Applied Sport Sciences* 6, 109-113.
- Williams, K.R. 1990. Relationships between distance running biomechanics and running economy. Teoksessa Cavanagh, P.R. (toim.) *Biomechanics of distance running*. Human Kinetics, Champaign. USA.
- Williams, K.R. 1993. *Biomechanics of distance running*. Teoksessa Grabiner, M.D. (toim.) 1993. *Current Issues in Biomechanics*, Human Kinetics, Champaign. USA.

- Williams, K.R. & Cavanagh, P.R. 1987. Relationship between distance running mechanics, running economy, and performance. *Journal of Applied Physiology* 63, 1236-1245.
- Williams, K.R., Cavanagh, P.R., & Ziff, J.L. 1987. Biomechanical studies of elite female distance runners. *International Journal of Sports Medicine* 8 (suppl.), 107-118.
- Yoshida, T., Udo, M., Iwai, K., Chida, M., Ichioka, M., Nakadomo, F. & Yamaguchi, T. 1990. Significance of aerobic and anaerobic components to several distance running performances on female athletes. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology* 60, 249-253.

Liite 1. Nivelkulmat suomalaisilla juoksijoilla (n = 6) ja MM-finalisteilla (n = 5) kilpailun toisella kierroksella samalla juoksunopeudella (aste).

p ≤ 0.1, * p ≤ 0.05, ** p ≤ 0.01

Polvikulma

| | vasen jalka kontaktin alku | vasen jalka keskitukivaihe | vasen jalka kontaktin loppu | oikea jalka kontaktin alku | oikea jalka keskitukivaihe | oikea jalka kontaktin loppu | minimi | maksimi | tukivaiheen minimi | kulman muutos | polven koukistuksen amplitudi tukivaiheessa | polven ojennuksen amplitudi tukivaiheessa |
|--------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|--------|---------|-----------------------|------------------|--|--|
| suomalaiset 2.kierros | 150 ± 6 | 133 ± 5 | 170 ± 4 | 67 ± 11 | 49 ± 9 | 86 ± 8 | 47 ± 8 | 172 ± 3 | 131 ± 4 | 126 ± 10 | 19 ± 7 | 39 ± 6 |
| MM-finaali 2.kierros | 153 ± 3 | 141 ± 3 | 171 ± 3 | 71 ± 7 | 46 ± 5 | 87 ± 13 | 45 ± 6 | 172 ± 3 | 138 ± 2 | 127 ± 8 | 16 ± 5 | 33 ± 5 |
| | NS | * | NS | NS | NS | NS | NS | NS | ** | NS | NS | # |

Lonkkakulma

| | vasen jalka kontaktin alku | vasen jalka keskitukivaihe | vasen jalka kontaktin loppu | oikea jalka kontaktin alku | oikea jalka keskitukivaihe | oikea jalka kontaktin loppu | minimi | maksimi | kulman muutos |
|-----------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|---------|---------|------------------|
| suomalaiset 2.kierros | 140 ± 3 | 156 ± 5 | 197 ± 4 | 181 ± 6 | 140 ± 4 | 122 ± 6 | 122 ± 6 | 205 ± 6 | 83 ± 8 |
| MM-finaali 2.kierros | 144 ± 7 | 159 ± 7 | 203 ± 6 | 178 ± 4 | 132 ± 2 | 119 ± 8 | 115 ± 7 | 209 ± 6 | 94 ± 8 |
| | NS | NS | # | NS | ** | NS | NS | NS | * |

Reisikulma

| | vasen jalka kontaktin alku | vasen jalka keskitukivaihe | vasen jalka kontaktin loppu | oikea jalka kontaktin alku | oikea jalka keskitukivaihe | oikea jalka kontaktin loppu | minimi | maksimi | kulman muutos |
|-----------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|---------|---------|------------------|
| suomalaiset 2.kierros | 29 ± 3 | 11 ± 2 | -30 ± 2 | -11 ± 6 | 30 ± 3 | 51 ± 4 | -38 ± 3 | 52 ± 3 | 90 ± 2 |
| MM-finaali 2.kierros | 27 ± 4 | 7 ± 4 | -33 ± 3 | -8 ± 4 | 37 ± 4 | 53 ± 8 | -39 ± 2 | 54 ± 7 | 93 ± 7 |
| | NS | # | NS | NS | ** | NS | NS | NS | NS |

Liite 2. Kulmanopeudet suomalaisilla juoksijoilla (n = 6) ja MM-finalisteilla (n = 5) kilpailun toisella kierroksella samalla juoksunopeudella

(aste/s). # $p \leq 0.1$ * $p \leq 0.05$, ** $p \leq 0.01$

Polvikulma

| | vasen jalka keskitukivaihe | vasen jalka kontaktin loppu | oikea jalka kontaktin alku | oikea jalka keskitukivaihe | oikea jalka kontaktin loppu | tukivaiheen ojennuksen maksimi | heilahdusvaiheen koukistuksen maksimi | heilahdusvaiheen ojennuksen maksimi |
|-----------------------|----------------------------|-----------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------|--------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|
| suomalaiset 2.kierros | 199 ± 145 | 201 ± 63 | -604 ± 84 | 119 ± 83 | 710 ± 113 | 516 ± 42 | -744 ± 66 | 781 ± 73 |
| MM-finaali 2.kierros | 155 ± 91 | 106 ± 105 | -619 ± 70 | 120 ± 52 | 762 ± 58 | 480 ± 94 | -835 ± 45 | 824 ± 102 |
| | NS | # | NS | NS | NS | NS | ** | NS |

Lonkkakulma

| | vasen jalka keskitukivaihe | vasen jalka kontaktin loppu | oikea jalka kontaktin alku | oikea jalka keskitukivaihe | oikea jalka kontaktin loppu | tukivaiheen ojennuksen maksimi | heilahdusvaiheen koukistuksen maksimi | heilahdusvaiheen ojennuksen maksimi |
|-----------------------|----------------------------|-----------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------|--------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|
| suomalaiset 2.kierros | 447 ± 138 | 426 ± 83 | -477 ± 69 | -534 ± 72 | 28 ± 32 | 603 ± 27 | -638 ± 56 | 249 ± 115 |
| MM-finaali 2.kierros | 462 ± 85 | 345 ± 32 | -470 ± 98 | -506 ± 36 | 93 ± 70 | 607 ± 51 | -685 ± 81 | 310 ± 89 |
| | NS | # | NS | NS | NS | NS | NS | NS |

Reisikulma

| | vasen jalka keskitukivaihe | vasen jalka kontaktin loppu | oikea jalka kontaktin alku | oikea jalka keskitukivaihe | oikea jalka kontaktin loppu | tukivaiheen ojennuksen maksimi | heilahdusvaiheen koukistuksen maksimi | heilahdusvaiheen ojennuksen maksimi |
|-----------------------|----------------------------|-----------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------|--------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|
| suomalaiset 2.kierros | -427 ± 83 | -379 ± 79 | 424 ± 62 | 544 ± 59 | 23 ± 39 | -532 ± 42 | 582 ± 49 | -256 ± 146 |
| MM-finaali 2.kierros | -434 ± 67 | -327 ± 49 | 390 ± 42 | 516 ± 37 | -34 ± 40 | -543 ± 42 | 620 ± 49 | -223 ± 49 |
| | NS | NS | NS | NS | * | NS | NS | NS |

Polvikulman keskiarvoiset kulmanopeudet

| | Tukivaiheen polven koukistuminen (aste/s) | Tukivaiheen polven ojentuminen (aste/s) | Heilahdusvaiheen polven koukistuminen (aste/s) | Heilahdusvaiheen polven ojentuminen (aste/s) | Tukivaiheen polven koukistumisen kesto (ms) | Tukivaiheen polven koukistumisen keston osuus kontaktiajasta (%) |
|-----------------------|---|---|--|--|---|--|
| suomalaiset 2.kierros | -289 ± 93 | 474 ± 90 | -529 ± 61 | 532 ± 35 | 64 ± 7 | 43 ± 0.04 |
| MM-finaali 2.kierros | -349 ± 140 | 318 ± 30 | -582 ± 54 | 576 ± 130 | 46 ± 9 | 30 ± 0.06 |
| | NS | ** | NS | NS | ** | ** |

Lonkkakulman keskiarvoiset kulmanopeudet

| | Lonkan ojentuminen (kontaktin alkukeskitukivaihe) | Lonkan ojentuminen (keskitukivaihekontaktin loppu) | Lonkan koukistuminen (kontaktin loppu-oikean jalan kontaktin alkua) | Lonkan koukistuminen (oikean jalan kontaktin alkumaksimaalinen koukistus) | Lonkan ojentuminen (maksimaalinen koukistuskontaktin alkua) |
|-----------------------|---|--|---|---|---|
| suomalaiset 2.kierros | 215 ± 47 | 505 ± 109 | -90 ± 31 | -450 ± 88 | 109 ± 31 |
| MM-finaali 2.kierros | 196 ± 49 | 576 ± 73 | -157 ± 49 | -479 ± 39 | 144 ± 27 |
| | NS | NS | * | NS | # |

Reisikulman keskiarvoiset kulmanopeudet

| | Reiden ojentuminen (kontaktin alkukeskitukivaihe) | Reiden ojentuminen (keskitukivaihekontaktin loppu) | Reiden koukistuminen (kontaktin loppu-oikean jalan kontaktin alkua) | Reiden koukistuminen (oikean jalan kontaktin alkumaksimaalinen koukistus) | Reiden ojentuminen (maksimaalinen koukistuskontaktin alkua) |
|-----------------------|---|--|---|---|---|
| suomalaiset 2.kierros | -246 ± 34 | -257 ± 51 | 111 ± 33 | 294 ± 86 | -127 ± 16 |
| MM-finaali 2.kierros | -270 ± 36 | -341 ± 104 | 160 ± 38 | 330 ± 84 | -141 ± 23 |
| | NS | NS | * | NS | NS |

Ylävartalon ja vertikaalisen tason välinen kulma

| | vasen jalka kontaktin alku | vasen jalka keskitukivaihe | vasen jalka kontaktin loppu | oikea jalka kontaktin alku | oikea jalka keskitukivaihe | oikea jalka kontaktin loppu | minimi | maksimi | kulman muutos | keskiarvo |
|----------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|--------|---------|------------------|-----------|
| MM-finaali 2.kierros | 7 ± 4 | 12 ± 3 | 10 ± 4 | 10 ± 2 | 10 ± 3 | 7 ± 2 | 4 ± 2 | 13 ± 3 | 9 ± 2 | 9 ± 3 |
| MM-finaali 3.kierros | 6 ± 2 | 9 ± 1 | 8 ± 1 | 8 ± 2 | 9 ± 2 | 7 ± 2 | 4 ± 2 | 11 ± 2 | 7 ± 2 | 8 ± 2 |
| | NS | # | NS | # | # | NS | NS | NS | NS | NS |

Säärikulma

| | vasen jalka kontaktin alku | vasen jalka keskitukivaihe | vasen jalka kontaktin loppu | oikea jalka kontaktin alku | oikea jalka keskitukivaihe | oikea jalka kontaktin loppu | maksimi | minimi | kulman muutos |
|----------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|---------|----------|------------------|
| MM-finaali 2.kierros | 0 ± 4 | -32 ± 2 | -42 ± 4 | -116 ± 3 | -97 ± 3 | -43 ± 3 | 11 ± 3 | -119 ± 3 | 133 ± 10 |
| MM-finaali 3.kierros | 1 ± 2 | -37 ± 6 | -47 ± 2 | -120 ± 6 | -97 ± 6 | -35 ± 7 | 14 ± 4 | -123 ± 7 | 138 ± 10 |
| | NS | NS | * | NS | NS | * | NS | NS | NS |

Liite 4. Kulmanopeudet MM-finalisteilla (n = 4) eri nopeuksilla juostaessa (aste/s). # p ≤ 0.1, * p ≤ 0.05

Polvikulma

| | vasen jalka keskitukivaihe | vasen jalka kontaktin loppu | oikea jalka kontaktin alku | oikea jalka keskitukivaihe | oikea jalka kontaktin loppu | tukivaiheen ojennuksen maksimi | heilahdusvaiheen koukistuksen maksimi | heilahdusvaiheen ojennuksen maksimi |
|----------------------|----------------------------|-----------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------|--------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|
| MM-finaali 2.kierros | 114 ± 17 | 104 ± 122 | -616 ± 80 | 99 ± 28 | 751 ± 61 | 491 ± 105 | -828 ± 48 | 794 ± 88 |
| MM finaali 3.kierros | 219 ± 121 | 162 ± 132 | -655 ± 78 | 193 ± 62 | 769 ± 84 | 480 ± 33 | -872 ± 75 | 807 ± 77 |
| | NS | NS | NS | * | NS | NS | NS | NS |

Lonkkakulma

| | vasen jalka keskitukivaihe | vasen jalka kontaktin loppu | oikea jalka kontaktin alku | oikea jalka keskitukivaihe | oikea jalka kontaktin loppu | tukivaiheen ojennuksen maksimi | heilahdusvaiheen koukistuksen maksimi | heilahdusvaiheen ojennuksen maksimi |
|----------------------|----------------------------|-----------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------|--------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|
| MM-finaali 2.kierros | 438 ± 76 | 348 ± 36 | -444 ± 90 | -501 ± 40 | 69 ± 53 | 585 ± 19 | -712 ± 62 | 305 ± 102 |
| MM-finaali 3.kierros | 541 ± 103 | 385 ± 53 | -558 ± 57 | -568 ± 81 | 72 ± 88 | 607 ± 60 | -723 ± 74 | 464 ± 273 |
| | NS | NS | # | # | NS | NS | NS | NS |

Reisikulma

| | vasen jalka keskitukivaihe | vasen jalka kontaktin loppu | oikea jalka kontaktin alku | oikea jalka keskitukivaihe | oikea jalka kontaktin loppu | tukivaiheen ojennuksen maksimi | heilahdusvaiheen koukistuksen maksimi | heilahdusvaiheen ojennuksen maksimi |
|----------------------|----------------------------|-----------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------|--------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|
| MM-finaali 2.kierros | -405 ± 26 | -329 ± 57 | 381 ± 42 | 513 ± 42 | -20 ± 29 | -527 ± 25 | 628 ± 52 | -242 ± 28 |
| MM-finaali 3.kierros | -499 ± 76 | -366 ± 50 | 476 ± 50 | 560 ± 83 | 4 ± 70 | -544 ± 50 | 681 ± 35 | -440 ± 231 |
| | NS | NS | # | NS | NS | NS | # | NS |

Polvikulman keskiarvoiset kulmanopeudet

| | Tukivaiheen polven koukistuminen (aste/s) | Tukivaiheen polven ojentuminen (aste/s) | Heilahdusvaiheen polven koukistuminen (aste/s) | Heilahdusvaiheen polven ojentuminen (aste/s) | Tukivaiheen polven koukistumisen kesto (ms) | Tukivaiheen polven koukistumisen keston osuus kontaktiajasta (%) |
|----------------------|---|---|--|--|---|--|
| MM-finaali 2.kierros | -290 ± 46 | 314 ± 32 | -591 ± 58 | 528 ± 86 | 49 ± 8 | 32 ± 0.05 |
| MM-finaali 3.kierros | -466 ± 181 | 356 ± 71 | -570 ± 70 | 620 ± 70 | 45 ± 4 | 31 ± 0.02 |
| | NS | NS | NS | NS | NS | NS |

Lonkkakulman keskiarvoiset kulmanopeudet

| | Lonkan ojentuminen (kontaktin alku-keskitukivaihe) | Lonkan ojentuminen (keskitukivaihe-kontaktin loppu) | Lonkan koukistuminen (kontaktin loppu-oikean jalan kontaktin alku) | Lonkan koukistuminen (oikean jalan kontaktin alku-maksimaalinen koukistus) | Lonkan ojentuminen (maksimaalinen koukistus-kontaktin alku) |
|----------------------|--|---|--|--|---|
| MM-finaali 2.kierros | 207 ± 48 | 548 ± 43 | -142 ± 39 | -496 ± 9 | 148 ± 29 |
| MM-finaali 3.kierros | 243 ± 66 | 577 ± 37 | -162 ± 20 | -560 ± 78 | 143 ± 17 |
| | NS | NS | NS | NS | NS |

Reisikulman keskiarvoiset kulmanopeudet

| | Reiden ojentuminen (kontaktin alku-keskitukivaihe) | Reiden ojentuminen (keskitukivaihe-kontaktin loppu) | Reiden koukistuminen (kontaktin loppu-oikean jalan kontaktin alku) | Reiden koukistuminen (oikean jalan kontaktin alku-maksimaalinen koukistus) | Reiden ojentuminen (maksimaalinen koukistus-kontaktin alku) |
|----------------------|--|---|--|--|---|
| MM-finaali 2.kierros | -274 ± 41 | -330 ± 117 | 150 ± 34 | 323 ± 95 | -148 ± 17 |
| MM-finaali 3.kierros | -306 ± 52 | -285 ± 91 | 172 ± 19 | 353 ± 18 | -166 ± 25 |
| | NS | NS | NS | NS | NS |