

**AKUUTTI VÄSYMYS SUBMAKSIMAALISESSA TUNNIN
KESTÄVYYSJUOKSUSSA KESTÄVYYSKUNTOILJOILLA**

Juha Sorvisto

Liikuntafysiologia

LFYA005

Kandidaatintutkielma

Kevät 2014

Liikuntabiologian laitos

Jyväskylän yliopisto

Työnohjaajat: Antti Metro ja Ritva

Taipale

TIIVISTELMÄ

Sorvisto, Juha 2014. Liikuntabiologian laitos, Jyväskylän yliopisto. Akuutti väsymys submaksimaalisessa tunnin kestävyysjuoksussa kestävyyskuntoilijoilla. Liikuntafysiologian kandidaatintutkielma, s. 53.

Johdanto. Kestävyys suorituskyvyn suorana fysiologisena mittarina on perinteisesti pidetty maksimaalista hapenottokykyä, mutta viimeisen reilun vuosikymmenen ajan on kestävyysjuoksun hermolihasjärjestelmän rooli osattu myös huomioida. Väsymiseen kestävyys suorituksen aikana vaikuttaa olennaisesti erityisesti suorituksen kesto, intensiteetti ja harjoitustausta. Suorituksen aikaista väsymistä arvioitaessa käytetään yleisesti hapenkulutusta mittaamaan suorituksen taloudellisuutta. Tämän työn tarkoituksena oli mitata sydän- ja verenkiertoelimistön muutosten lisäksi hermolihasjärjestelmän väsymystä kestävyyskuntoilijoilla tunnin submaksimaalisessa kestävyysjuoksukuormituksessa.

Menetelmät. Tutkimuksen koehenkilöinä oli kestävyyskuntoilevia miehiä ($n = 12$) ja naisia ($n = 10$), jotka harrastivat vähintään kolme kertaa viikossa kestävyystyyppistä liikuntaa. Alkumittausten jälkeen koehenkilöille suoritettiin 60 minuutin kestävyysjuoksukuormitus vakioteholla alle anaerobisen kynnysvauhdin. Ennen ja jälkeen kuormitusta, koehenkilöiden akuutteja sydän- ja verenkiertoelimistön ja hermolihasjärjestelmän vasteita juoksukuormitukseen seurattiin. Näihin testeihin kuuluivat hapenkulutus (VO_2), juoksun taloudellisuus ($RE =$ running economy), veren laktaatti, syke, isometrinen jalkojen maksimaalinen tahdonalainen ojennusvoima ($MVC =$ maximal voluntary contraction), submaksimaalisten juoksujen kontaktivoimat ($GRF =$ ground reaction force) ja eräitä muita juoksun mekaanisia muuttujia.

Tulokset. Tunnin submaksimaalinen kestävyysjuoksu nosti merkitsevästi sykettä molemmilla sukupuolilla. Hapenkulutus kasvoi painoon suhteutettuna molemmilla sukupuolilla, mutta matkaa kohden merkitsevästi vain miesten ryhmällä. Veren laktaattipitoisuus ei muuttunut juoksun aikana merkitsevästi kummallakaan ryhmällä. Miehillä väsymystä oli havaittavissa myös hermolihasjärjestelmän kuvaavissa muuttujissa, kuten $MVC:n$ ($p < 0.01$) ja juoksun vertikaalisen kontaktivoiman ($p < 0.01$) laskussa, joissa naisten ryhmällä ei tapahtunut vastaavia muutoksia. Juoksun mekaanisista muuttujista miesten ryhmällä askeltiheys laski kestävyyskuormituksen seurauksena. Juoksun mekaniikan muutokset eivät olleet yhteydessä maksimivoiman muuttumiseen.

Pohdinta ja johtopäätökset. Tämän tutkimuksen tulosten perusteella väsymys tunnin kestävyysjuoksukuormituksessa näkyy juoksun taloudellisuuden heikkenemisenä vahvemmin miehillä kuin naisilla. Myös hermolihasjärjestelmän maksimaalinen suorituskyky voi heikentyä kestävyyskuormituksen seurauksena vahvemmin miehillä. Luultavasti hermolihasjärjestelmän väsyminen tunnin kestävässä selvästi aerobisessa (laktaatti alle 2.2 mmol/l) submaksimaalisessa juoksusuorituksessa tapahtuu joko lihassolutalolla tapahtuvien pienten mikrovaurioiden johdosta tai ääreishermoston ja hermolihasliitoksen neuraalisessa aktivoinnissa tai mahdollisen lievästi kohonneen happamuuden takia. Väsyminen aiheuttaa korkeintaan lieviä muutoksia juoksun mekaniikassa.

Avainsanat: kestävyysjuoksu, juoksun taloudellisuus, juoksun mekaniikka, väsymys.

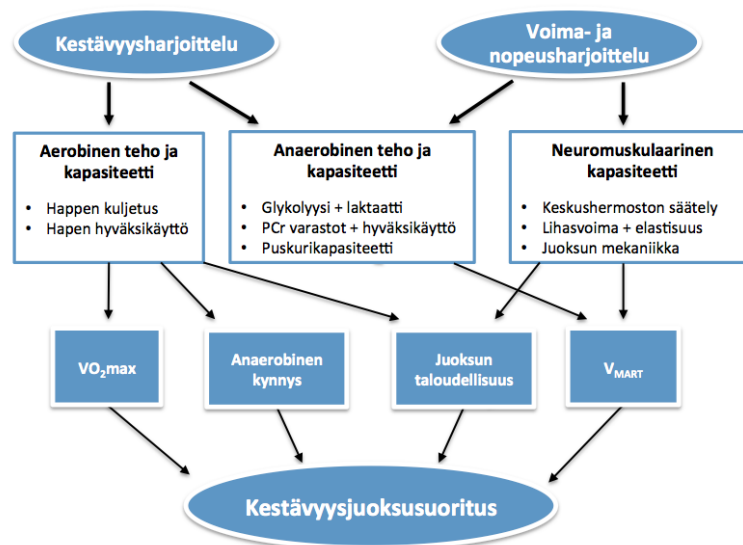
SISÄLTÖ

1	JOHDANTO.....	5
2	KESTÄVYYSJUOKSUSUORITUSKYKYYN VAIKUTTAVIA TEKIJÖITÄ.....	7
2.1	Aerobinen kapasiteetti	8
2.1.1	Maksimaalinen hapenottokyky	8
2.1.2	Anaerobinen ja aerobinen kynnys.....	10
2.2	Anaerobinen kapasiteetti	11
2.3	Neuromuskulaarinen kapasiteetti	12
2.3.1	Juoksun biomekaniikka.....	12
2.3.2	Lihasten aktivointi.....	16
3	JUOKSUN TALOUDELLISUUS	18
3.1	Juoksun taloudellisuuteen vaikuttavat tekijät.....	19
3.2	Voimaharjoittelun vaikutus juoksun taloudellisuuteen	21
4	AKUUTTI VÄSYMINEN KESTÄVYYSJUOKSUSSA	23
4.1	Väsymiseen vaikuttavat tekijät.....	23
4.1.1	Aineenvaihdunnallinen väsyminen	23
4.1.2	Hermolihasjärjestelmän väsyminen	26
4.2	Väsymisen mittarit	27
5	TUTKIMUSONGELMAT JA HYPOTEESEIT	32

6	MENETELMÄT	33
6.1	Koehenkilöt	33
6.2	Tutkimusprotokolla	33
6.3	Mittaukset.....	34
6.4	Tilastolliset menetelmät	36
7	TULOKSET	37
8	POHDINTA	41
8.1	Kardiovaskulaariset muutokset	41
8.2	Neuromuskulaariset muutokset	43
8.3	Johtopäätökset	44
	LÄHDELUETTELO.....	46

1 JOHDANTO

Kestävyysjuoksuosuoritukseen vaikuttavien ominaisuuksien yhtälö on monipuolistunut tutkijoiden silmissä 2000-luvun taitteesta alkaen. Paavolainen ym. (1999b) havaitsi, ettei 5 km juoksuosuituksen tulokseen vaikuttanut ainoastaan maksimaalinen hapenotto- ja -hyönteily (VO₂max), kynnyshäily ja/tai juoksun taloudellisuus (RE), vaan myös hermolihaskäijestelmän tehokkuus ja lihasvoima, joista jälkimmäisiä harjoittamalla kestävyysosuoritusta on pystytty kehittämään entisestään (Paavolainen ym. 1999a; 1999b). Täten hermolihaskäijestelmän (neuromuskulaarinen) kapasiteetti voidaan nähdä yhtenä erillisenä maksimaalista kestävyysosuituskykyä rajoittavana tekijänä, jolloin kestävyysurheilijoiden olisi hyvä huomioida myös voima- ja nopeusominaisuuksien monipuolinen harjoittelu kestävyysominaisuuksien lisäksi (Nummela ym. 2006).



KUVA 1. Hypoteettinen malli kestävyysjuoksuosuituksen vaikuttavista tekijöistä. V_{MART} = huippunopeus maksimaalisessa anaerobisessa juoksuosuutestissä (Paavolainen ym. 1999a).

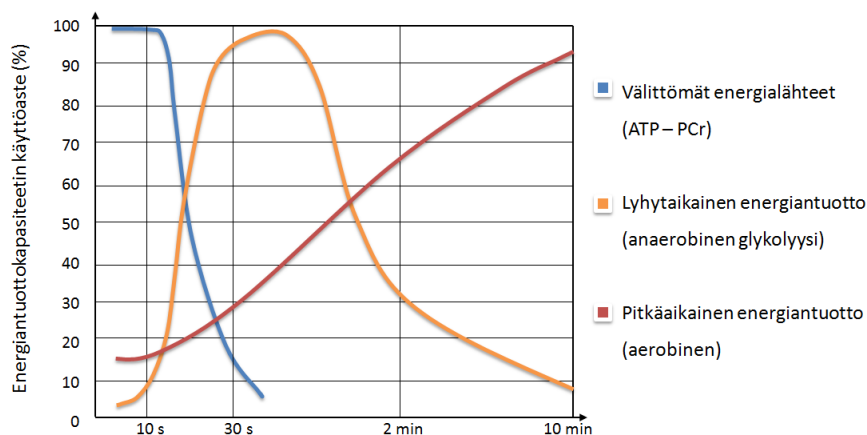
Pitkäkestoisen kestävyysjuoksuosuituksen aikaista taloudellisuuden muuttumista on tutkittu hapenkulutuksen muuttumisena juoksuosuituksen seurauksena (Kyröläinen ym. 2000; Place ym. 2004). Mielenkiintoinen kysymys on, missä määrin hermolihaskäijestelmän ominaisuuksien muutokset kuten juoksun mekaaniset tekijät (Paavolainen ym. 1999b; Kyröläinen ym. 2000), maksimaalinen voimantuotto ja

lihasaktivaatio (Avela ym. 1999; Lepers ym. 2000) ovat yhteydessä aineenvaihdunnallisiin muutoksiin. Tämän työn tarkoitus on selvittää, aiheuttaako 60 min submaksimaalinen juoksukuormitus väsymystä hengitys- ja verenkiertoelimistön ja/tai hermolihasjärjestelmän toiminnassa kestävyyskuntoilevilla miehillä ja naisilla.

2 KESTÄVYYSJUOKSUSUORITUSKYKYYN VAIKUTTAVIA TEKIJÖITÄ

Kestävyysjuoksusuoritukseen vaikuttavat tekijät ovat olleet tutkijoiden kiinnostuksen kohteena jo A.V. Hillin ajoilta 1920-luvulta alkaen. Nummelan (2004a, 97) mukaan hyvä kestävyysuorituskyky edellyttää hyvää maksimaalista hapenottokykyä ($VO_2\max$) ja suorituksen keston pidentyessä taloudellisuutta ja energiavarastojen riittävyyttä. Energiataloudellisuuteen ja väsymyksen sietoon viitaten Bassett ja Howley (2000) korostivat anaerobisen kynnyksen tasolla olevan juoksunopeuden merkitystä ehkä olennaisimpina kestävyysuorituksen ennustajana.

Kuormituksen kasvaessa aivon motoriset alueet lisäävät rekrytoitumiskäskeilyä yhä useammille motorisille yksiköille, jolloin yhä useammat lihassolut tuottavat entistä voimakkaampia lihassupistuksia. Tämä vaatii yhä tehokkaampaa energiantuottoa, mikä lisää myös hapenkulutusta. (Noakes 2001, 25). Yleisesti ottaen anaerobista energia-aineenvaihduntaa vaaditaan nopeissa lyhytkestoisissa suorituksissa (McArdle ym. 2001, 223). Kuva 2 osoittaa energia-aineenvaihdunnan jakautumisen eri kestoisissa maksimisuorituksissa aerobisen, anaerobisen ja välittömien energialähteiden osalta. Esimerkiksi 800 m:n juoksussa aerobinen osuus on noin 50 – 60 %, mutta kasvaa jo noin 75 – 77 %:n 1500 m:n juoksussa. 10 000 m:n juoksussa aerobisen energiantuoton osuus on jo noin 97 % (Fallowfield & Wilkinson 1999, 21; Newsholme ym. 1992.)



KUVA 2. Kolmen eri energiantuottoreitin osuus kokonaisenergiantuotosta eri kestoisten maksimisuoritusten aikana. Mukaeltu (McArdle ym. 2001, 223)

2.1 Aerobinen kapasiteetti

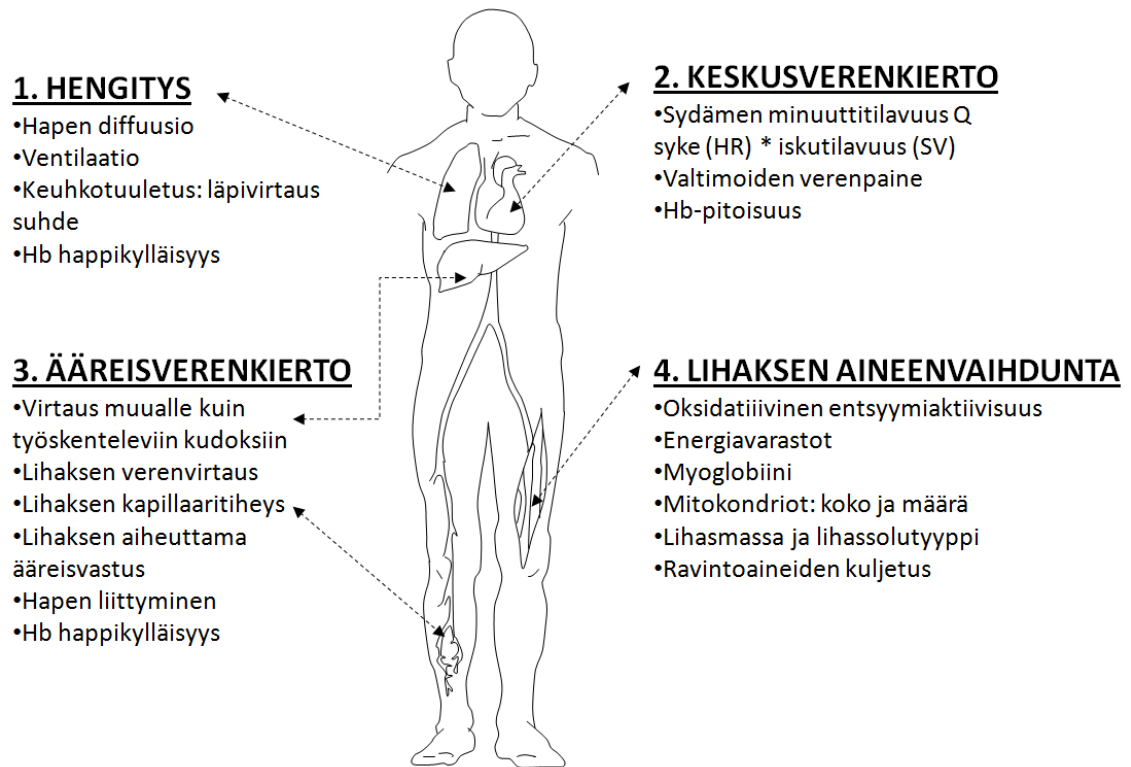
2.1.1 Maksimaalinen hapenottokyky

Maksimaalinen hapenottokyky kuvaa suurinta tehoa, jolla sisään hengitetty happi voidaan kuljettaa kuormituksessa työskenteleviin lihaksiin, ja siksi sitä käytetäänkin kuvaamaan hengitys- ja verenkiertoelimistön kuntoa (Bassett & Howley 2000). Hapenkulutus kasvaa suhteessa kuormituksen intensiteettiin saavuttaen maksimitehoisessa aerobisessa kuormituksessa huippuarvonsa – VO₂max (Noakes 2001, 48). VO₂max on ehkä olennaisin maksimaaliseen suorituskyykyyn vaikuttava tekijä kestävyyslajeissa, jotka kestävät yhtäjaksoisesti 5 – 40 min (Taulukko 1). VO₂max:n suuruuteen vaikuttavat työskentelevän lihassmassan osuus, sukupuoli, ikä ja harjoittelutausta. (Nummela 2004a, 105; Nummela 2004b, 52.)

TAULUKKO 1. Huipputason kestävyysurheilijoiden maksimaalisia hapenottokyvyn arvoja. Mukailtu (Noakes 2001, 40; Noakes 2005).

Pitkienmatkojen juoksijoita	VO ₂ max (ml/kg/min)	Saavutukset	Lähde	Keskimatkojen juoksijoita	VO ₂ max (ml/kg/min)	Saavutukset	Lähde
John Ngugi	85	5 * MM-maastojen 1.	Saltin, Larsen ym. (1995)	Steven Prefontaine	84	1 maili 3:54,6	Saltin, Larsen ym. (1995)
Dave Bedford	85	10 km ME 1973	Bergh (1982)	Kip Keino	82	2 km ME 1965	Saltin & Åstrand (1967)
Henry Rono	84	10 km ME 1978	Zur & Hymans (1991)	Don Lash	82	2 mailin ME 1937	Robinson ym. (1937)
Gary Tuttle	83	2:17:00 Mar.	Pollock (1977)	Jim Ryun	81	1 mailin ME 1967	Daniels (1974)
Craig Virgin	81	2:10:26 Mar.	Cureton ym. (1975)	Steve Scott	80	1 maili 3:47.69	Conley ym. (1984)
Joan Benoit	79	2:24:52 Mar.	Daniels & Daniels (1992)	Sebastian Coe	77	1 mailin ME 1981	Zur & Hymans (1991)
Bill Rodgers	79	2:09:27 Mar.	Rodgers & Concannon (1982)	John Landy	77	1 mailin ME 1954	Åstrand (1955)
Alberto Slazar	76	2:08:13 Mar. (ME)	Costill (1982)	Peter Snell	72	1 mailin ME 1964	Carter ym. (1967)
Zithulele Sinqe	72	2:08:05 Mar.	Coetzer ym. (1993)				
Frank Shorter	71	2:10:30 Mar.	Pollock (1977)				
Williet Mtolo	70	2:08:15 Mar.	Coetzer ym. (1993)				
Derek Calyton	70	2:08:34 Mar. (ME)	Costill ym. (1971)				
				Muutamia verrokkeja			
				Björn Dählie	93		
				Keskiaarvoinen terve kontrolli	40 - 45		

Kuormituksen aikana VO₂max rajoittuu elimistön kykyyn siirtää hengitys- ja verenkiertoelimistön välityksellä happea työskenteleviin lihaksiin. Hapen kuljetus ilmasta keuhkoin, ja sieltä veren mukana lihassolujen mitokondrioihin sisältää monta vaihetta, jotka kaikki voivat osaltaan rajoittaa hapen kuljetusta. Maksimaalista hapenottokyykyä voivat rajoittaa 1) keuhkojen diffuusiokapasiteetti, 2) sydämen minuuttitilavuus, 3) veren hapenkuljetuskapasiteetti lihaskudokseen ja 4) lihaksen aineenvaihdunta sekä ominaisuudet (Kuva 3). Tärkeimpinä rajoitteina voidaan nähdä hapenkuljetukseen liittyvät hengitys- ja verenkiertoelimistön keskeiset tekijät (1-3) (kuva 3) pikemmin kuin lihaksen aineenvaihdunta. (Bassett & Howley 2000)



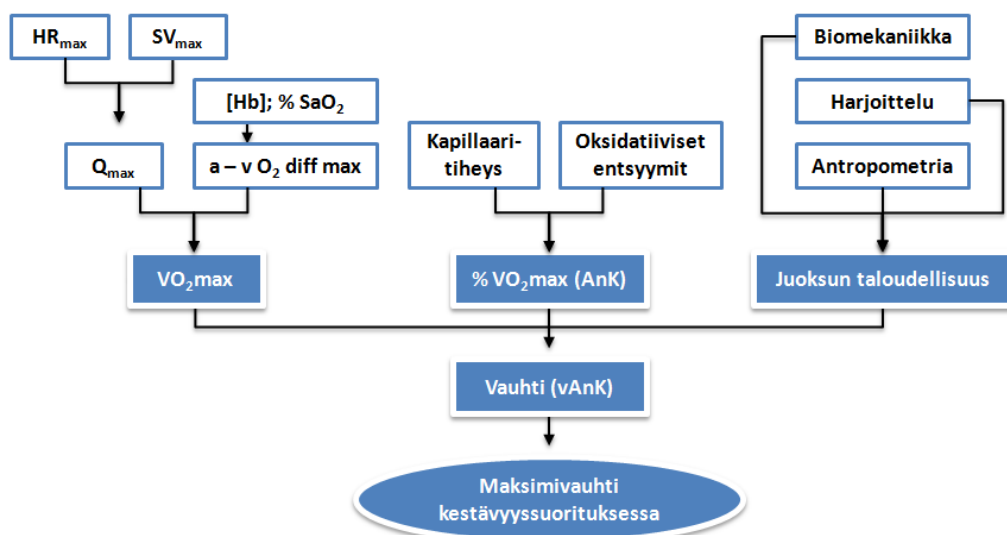
KUVA 3. Mahdolliset $VO_2\max$ rajoittavat tekijät kuormituksessa. Mukailtu (Bassett & Howley 2000; Noakes 2001, 49).

$VO_2\max$ ei välttämättä ole kestävyysuorituksen kuvaajana tarkoin mahdollinen, sillä taloudellisuus (=hapenkulutus tietyllä teholla) urheilijoiden kesken vaihtelee, ja lisäksi myös heidän maksiminopeutensa voi vaihdella paljon samasta maksimaalisesta aerobisesta tehosta huolimatta. Riippumatta $VO_2\max$:sta juoksija voi siis juosta hyvinkin kovaa, mikäli hän on riittävän taloudellinen (Taulukko 1). (Noakes 2001, 49.) $VO_2\max$ asettaa ns. ylärajan teholle, jolle urheilija voi nousta aerobisen energia-aineenvaihdunnan suhteen, mutta se ei ratkaise maksimaaliselta hapenotto kyvyltään homogeenisessa ryhmässä juoksijoiden paremmuutta (Bassett & Howley 1997). Toinen syy miksi $VO_2\max$ pelkästään ei ole hyvä kestävyysuoritusta ennustava tekijä on, ettei se kerro kuinka suurta osuutta tästä maksimaalisesta suorituskvyyvystä urheilija pystyy käyttämään hyväkseen pitkäkestoisen suorituksen aikana. Toisin sanoen puhdas $VO_2\max$ ei mittaa urheilijoiden väsymisen sietokykyä lajinomaisessa pitkäkestoisessa suorituksessa. (Noakes 2001, 50.) Useat tutkimukset ovatkin osoittaneet anaerobisen kynnyksen olevan parempi kestävyysuorituskyvyn ennustaja (Bassett & Howley 2000).

2.1.2 Anaerobinen ja aerobinen kynnys

Pitkäaikaista kestävyyttä voidaan kuvata määrittämällä aerobinen ja anaerobinen kynnys tehona [%VO₂max] tai vauhtina [%vVO₂max], joiden määrittäminen perustuu lihaksen energia-aineenvaihdunnassa (esim. laktaattipitoisuuden kasvussa) ja/tai keuhkotuuletuksessa tapahtuviin muutoksiin suoritustehon kasvaessa. Aerobinen kynnys (AK) on suurin työteho ja energiankulutuksen taso, jossa elimistön veren laktaattipitoisuus ensimmäinen kerran nousee lepotasoon verrattuna. Anaerobinen kynnys (AnK) voidaan määrittää veren laktaattipitoisuuden toisen jyrkemmin lineaarisuudesta poikkeavan nousukohtan perusteella. (Nummela 2004b, 52.)

Aerobisen ja anaerobisen energiantuoton suhde vaihtelee eri urheilijoiden välillä, sillä ainakin seuraavilla tekijöillä on vaikutusta aerobiseen energiantuottoon: lihassolusuhde, maksimaalinen hapenottokyky, suorituksen teho, suorituksen kesto ja harjoittelutausta (Nummela 2004a, 104). Kuvassa 4 on kuvattu anaerobisen kynnyksen, maksimaalisen hapenottokyvyn ja juoksun taloudellisuuden yhteyksiä kestävyysjuoksusuorituskykyyn (Bassett & Howley 1997). Hitaiden lihassolujen (I-tyyppi) osuus, alaraajojen kapillaaritiheyden kasvu ja suuret harjoitusmäärät siirtävät aerobista ja anaerobista kynnystä nopeammille juoksuvauhdeille. (Noakes 2001, 160).



KUVA 4. Maksimaaliseen hapenottokyvyn, anaerobisen kynnyksen (AnK) ja juoksun taloudellisuuden vaikutus kestävyysjuoksun maksimivauhtiin. SV = iskutilavuus, Q = Sydämen minuuttitilavuus. Mukailtu (Bassett & Howley 1997).

Kynnysten merkitystä pitkäkestoisessa kuormituksessa kuvaa hyvin Coylen ym. (1988) tutkimus, jossa 14, maksimaaliselta hapenottokyvyltään samankaltaisen, pyöräilijän väsymisen sietokykyä tutkittiin vakioitehoisessa (88 %VO₂max) kuormituksessa. Koehenkilöt jaettiin kahteen ryhmään: korkea AnK (81.5 %VO₂max) ja matala AnK (65.8 %VO₂max). Korkean kynnyksen ryhmän jaksoi yli kaksinkertaisen ajan kuormitusta (60.8 vrt. 29.1 min). Kuormituksen jälkeinen laktaattipitoisuus oli 7.4 vs. 14.7 korkeamman ja matalamman kynnyksen omaavilla, vastaavasti (Coyle ym. 1988). Anaerobisen kynnyksen tehon on havaittu korreloivan erittäin voimakkaasti ($r = 0.93$) tunnin suorituksen keskitehon kanssa (Coyle ym. 1991).

2.2 Anaerobinen kapasiteetti

Anaerobinen kapasiteetti kuvaa kestävyysuorituskykyä lyhyessä 30 – 90 s kestoisessa kuormituksessa, ja sillä tarkoitetaan maksimaalista adenosiinitrifosfaatin (ATP) määrää, joka voidaan tuottaa anaerobisen energia-aineenvaihdunnan avulla kyseisen lyhytestoisen ja maksimaalisen työn aikana (Nummela 2004a, 101; Nummela 2004b, 57). Anaerobisessa suorituksessa lihaksiin ja verenkiertoon kertyy runsaasti laktaattia ja vetyioneja (happamuutta). Anaerobisen glykolyysin lisäksi anaerobiseen kapasiteettiin vaikuttaa välittömien energiavarojen (ATP – KP) koko sekä lihasten ja veren happamuuden puskurointikyky (Nummela 2004a, 101).

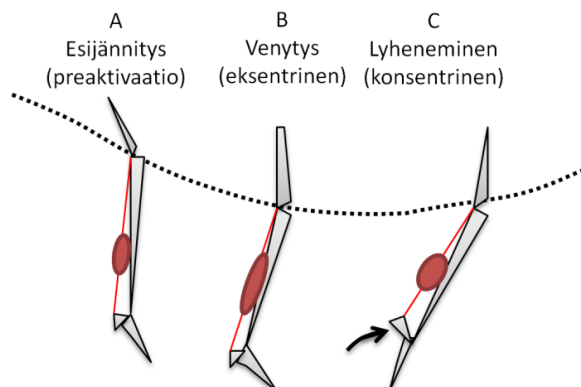
Nopeiden solujen suuret glykogeeni- ja kreatiini-fosfaattivarastot (KP) sekä glykolyyttisten entsyymien määrä on ominaista juoksijoille, joiden anaerobinen kapasiteetti on korkea (Maughan ym. 1997; 145 – 157). Teholajien urheilijat yleensä saavuttavat noin 20 – 30 % korkeammat laktaattiarvot, kuin kestävyyslajien urheilijat tai harjoittelemattomat. Syynä tälle on todennäköisesti harjoittelun aiheuttamia: 1) parantunut motivaatio kovatehoisessa suorituksessa 2) lihaksensisäisten glykogeenivarastojen kasvu, jotka aktivoituvat anaerobiseen työhön 3) parantuneen anaerobisen entsyymiaktiivisuuden kasvun (20 % harjoittelun seurauksena) johdosta, (erityisesti fosfofruktokinaasi). (McArdle ym. 2001, 160.)

2.3 Neuromuskulaarinen kapasiteetti

Kestävyyslajeissa vaaditaan huipputasolla erinomaisen aerobisen kapasiteetin lisäksi suhteellisen hyviä nopeus- ja voimaominaisuuksia. Tämä korostaa hermolihasjärjestelmän ominaisuuksien kuten tahdonalaisen ja tahdottoman lihasaktivaation, lihaksen maksimaalisen suorituskyvyn ja juoksun mekaniikan tärkeyttä huippu-urheilijoilla. (Paavolainen 1999c.) Teoriassa kestävyysominaisuuksiltaan tasaisista juoksijoista lopputuloksissa paremmin sijoittuu juuri nopeampi urheilija. Maksimaalista hapenottoa vastaava juoksunopeus $v\text{VO}_2\text{max}$ kertoo yleensä enemmän kestävyysjuoksijan suorituskyvystä kuin pelkkä VO_2max , koska juoksunopeuden maksimaalisen hapenottoa tasolla vaikuttaa maksimaalisen hapenottoa lisäksi myös suorituksen taloudellisuus ja hermolihasjärjestelmän suorituskyky (Nummela 2006, 68; Bassett & Howley 1997)

2.3.1 Juoksun biomekaniikka

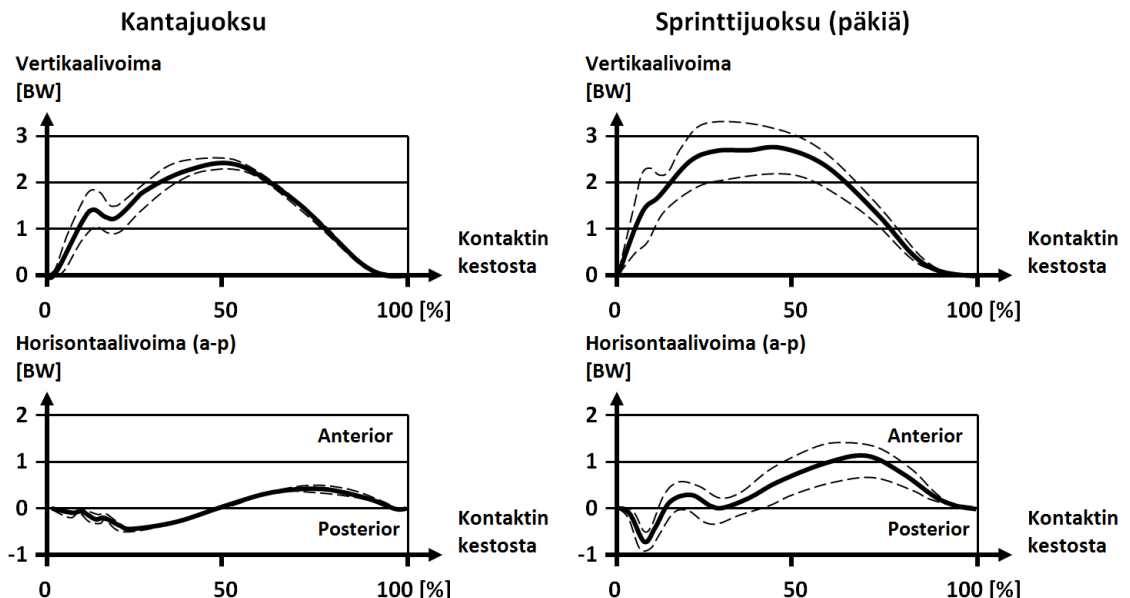
Juoksu on hyvä esimerkki liikkeestä, jossa kehon segmentteihin vaikuttavat sekä törmäys- että venytysvoimat. Venymisvaiheen aikana lihas tekee eksentristä lihastyötä. Venytysvaihe vaihtuu konsentriseen lihastyöhön ponnistuksen alkaessa. (Komi 2003, 184.) Juoksun aikana lihakset tekevät työtä vuorotellen eksentrisesti ja konsentrisesti - venymis-lyhenemissykleissä (kuva 5) (Cavagna ym. 1971).



KUVA 5, Esijännityksessä lihas jännittyy maakontaktiin (A), jossa energian varastoituminen lihas-jänneyksikköön alkaa eksentrisessä lihastyössä (B). Konsentrisessä ponnistuksessa venytettyyn lihakseen varastoitunut energia voidaan hyödyntää liike-energiana (C). Mukailtu (Komi 2003, 185.)

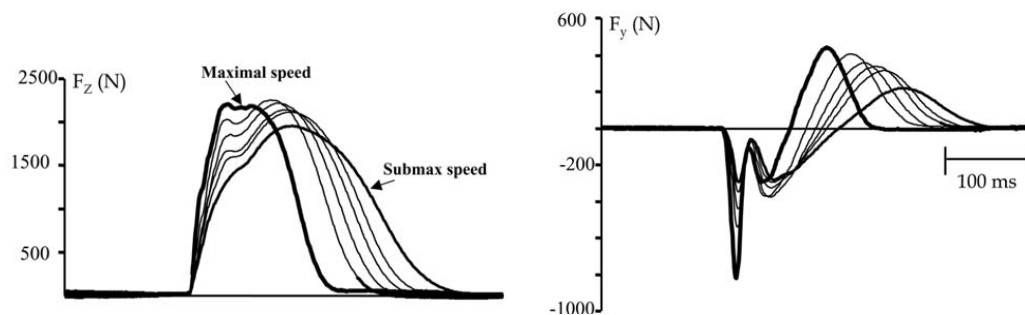
Aina kun juoksijan jalka on kosketuksissa maahan, kohdistuu alustaan voima, joka on yhtä suuri, mutta vastakkainen alustasta juoksijaan kohdistuvaan voimaan nähden (Nigg 2000, 255). Kontaktivoimia voidaan tarkastella eri tasoissa ja jakaa ne pysty- (vertikaali), pitkittäis- (*anterio-posterio tai horisontaali*) ja sivuttaissuunnan (*medio-lateraali*) resultanttivoimiin. Pystysuunnan voimassa ilmenee yleensä kaksi huippua, jos etenkin askellus tapahtuu kantapäävoittoisesti. Ensimmäinen pystyvoima huippu ilmenee noin 5 – 30 ms kontaktin alkamisen jälkeen. Päkiä edellä askelletaessa vertikaalisessa voimantuotossa ei ilmene kahta impaktia (kuva 6). Myös alustaan tuotettu voimantuottonopeus ”loading rate” ei ole yhtä voimakas kuin kantakontaktilla juostessa. (Nigg 1999, 278.)

Pitkittäis- eli horisontaalisuunnan avulla askelkontaktista voidaan määrittää jarrutus- ja ponnistusvaihe. Kontaktin alussa syntyy etenemissuuntaan kohden vastakkainen jarrutusvoima, jonka aikana puhutaan kontaktin jarrutusvaiheesta. Tätä seuraa ponnistusvaihe, jonka alkaessa pitkittäinen kontaktivoima muuttuu työntövoimaksi. (Nigg 1999, 278.) Alla olevassa kuvassa 6 on havainnollistettu juoksun aikaisia vertikaalisia ja horisontaalisia kontaktivoimia päkiä- ja kantapäävoittoisessa askelluksessa. (Nigg 2000, 255.)



KUVA 6. Juoksun aikaiset kontaktivoimat (paksulla keskiarvo, katkoviivalla keskihajonta) vertikaali ja horisontaalisuunnassa (anterior-posterior) kantajuoksussa (vasen) ja sprinttijuoksussa (oikea) kehon painoon [BW] suhteutettuna. N = 5 (mukaeltu Nigg 2000, 255).

Kontaktin alussa lihaksen venyvät varastoiden näin elastista energiaa, jota kontaktin ponnistusvaiheessa voidaan hyödyntää liike-energian tuottamiseen. (Cavagna et al. 1971; Komi 1984). Kontaktin kesto ja voima riippuvat lukuisista tekijöistä kuten juoksunopeudesta, juoksukengän ulko- ja välipohjan materiaalista, juoksukengän geometrisestä rakenteesta (Nigg 2000, 276) ja juoksutyylistä (Cavanagh & Lafortune 1980). Vauhdin kasvaessa alustaan kohdistuva voimantuottoaika lyhenee ja voimat kasvat merkittävästi niin pysty- kuin pitkittäissuunnassakin (kuva 7). Taulukossa 2 nähdään, että juoksunaikaiset vertikaaliset voimat ovat noin 1.5 – 3.0 kertaa juoksijan paino (Nigg 1999, 277).



KUVA 7. Pysty- (F_z) ja pitkittäissuunnan (F_y) juoksunaikaiset kontaktivoimat siirryttäessä hitaasta maksimaaliseen (paksu viiva) juoksunopeuteen, (Kyröläinen ym. 2005).

TAULUKKO 2. Pystysuunnan (F_z) maksimivoima kävelyssä ja juoksussa. F_{zmax}/BW = Pystysuunnan kontaktivoima suhteessa kehon painoon (*Laskettu olettaen koehenkilön painon olleen 700 N.) (Nigg 1999, 277).

Liike	Jalkine	Nopeus (m/s)	F_{zmax} (N)	F_{zmax}/BW	Lähde
Kävely	paljainjaloin	1,3	*385	0,55	Cavanagh 1981
	Armeijan saappaat	1,3	*259	0,37	Cavanagh 1981
	Vapaa-ajan kengät	1,3	*189	0,27	Cavanagh 1981
Juoksu (kantakontakti)	Juoksukenkä	4,5	*1540	2,2	Cavanagh 1980
	Juoksukenkä "kova"	4	2000	*2,9	Nigg 1980
	Juoksukenkä "pehmeä"	4	1100	*1,6	Nigg 1980
	Juoksukenkä	3,4	1365	2	Frederick 1981
	Juoksukenkä	3,8	1590	2,3	Frederick 1981
	Juoksukenkä	4,5	1963	2,9	Frederick 1981
	Juoksukenkä	3	1345	*2,0	Nigg 1987
	Juoksukenkä	4	1521	*2,2	Nigg 1987
	Juoksukenkä	5	1799	*2,6	Nigg 1987
	Juoksukenkä	6	2070	*3,0	Nigg 1987
Juoksu (päkiäkontakti)	Juoksukenkä	4	300	*0,4	Denoth 1980

*Koehenkilöiden painoksi oletettu 700 N.

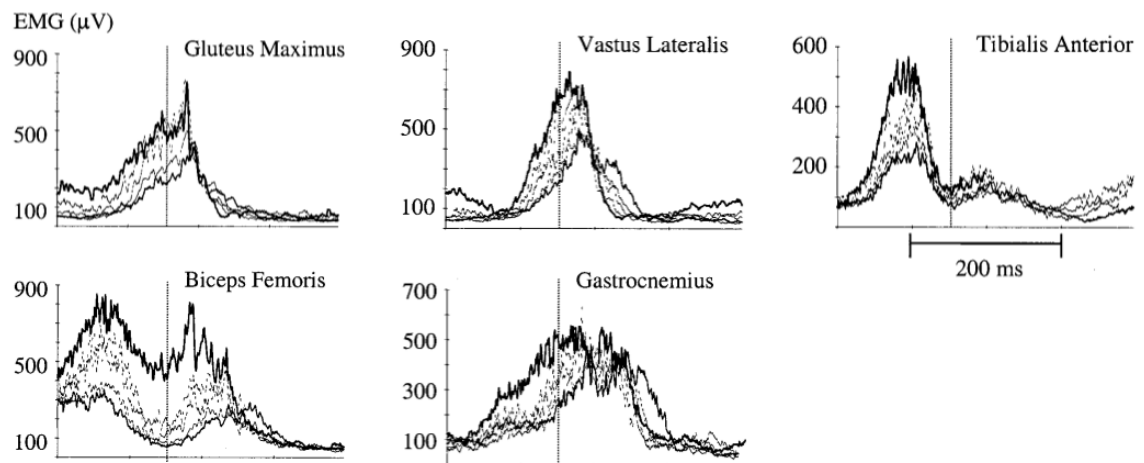
Kontaktin kesto mitattiin harjoitelleilla kestävyysjuoksijoilla hitaassa (4 m/s) juoksuvauhdissa 0.203 ± 0.011 s. Kontaktin kesto laski progressiivisesti 0.112 ± 0.007 s vauhdin lisääntyessä maksimaaliseen. Askelfrekvenssi kasvoi samanaikaisesti $2.82 \pm 0.13 \rightarrow 4.16 \pm 0.26$ Hz ja askelpituus $1.51 \pm 0.10 \rightarrow 2.12 \pm 0.15$ m. (Kyröläinen ym. 2005.) Nummela ym. (2007) havaitsivat lyhyemmän askelkontaktin olevan yhteydessä parempaan taloudellisuuteen ($r = 0.49$, $p < 0.05$) ja korkeampaan maksimaaliseen juoksuvauhtiin ($r = -0.52$, $p < 0.01$) mieskestävyysurheilijoilla, mikä tutkijoiden mukaan korostaa nopean voimantuoton tärkeyttä taloudellisen ja vauhdikkaan juoksun takaamiseksi.

Korkeammat reaktivoimat askelkontaktin alussa ovat yhteydessä lisääntyneeseen hapenkulutukseen (Williams 1990, 287). Askeleen reaktivoimia tarkasteltaessa on havaittu korrelaatio ($r = 0.56$) vertikaalisen voimapiikin ja submaksimaalisen hapenkulutuksen välillä kuntoilijoilla. Huippujuoksijoilla submaksimaalisen hapenkulutuksen ja suuren törmäysvoiman välillä ei ollut kuitenkaan yhteyttä (Williams & Cavanagh 1987). Heise & Martin (2001) tutkivat tuoreemmassa tutkimuksessa suorituskyvyltään homogeenisen ryhmän kontaktivoimien ja taloudellisuuden yhteyttä, ja löysivät vertikaalisen kokonais- ja nettoimpulssin ($F\Delta t$) korreloivan taloudellisuuden kanssa. Toisin sanoen alustaan suuremman voiman ajan suhteen tuottaneet henkilöt olivat epätaloudellisempia. Pystysuunnan kokonaisimpulssi (tukivaiheen lihastyö) selitti 38 % yksilön välisistä vaihteluista juoksun taloudellisuudessa pystysuunnan nettoimpulssin (pystysuunnan ylimääräinen työ) selittäessä 36 % yksilöiden eroista taloudellisuudessa. (Heise & Martin 2001.)

Nummela ym. (2007) tutkimuksessa ei löytynyt yhteyttä juoksun taloudellisuuden ja kontaktivoimien välillä. Ainoastaan juoksuaskeleen kontaktiajalla ja juoksun taloudellisuudella näytti olevan suora korrelaatio ($r = 0.49$). Tämän perusteella tutkijaryhmä arvioi nopean voimantuoton askelkontaktissa olevan olennaista taloudelliselle juoksemiselle, vaikkakin kontaktivoimia ei ollut mitattu samoilta nopeuksilta taloudellisuusmittauksen kanssa. (Nummela ym. 2007.) Ehkä juuri sen vuoksi Kyröläinen ym. (2001) eivät löytäneet yhteyttä kontaktiaikojen ja juoksun aikaisen submaksimaalisen hapenkulutuksen välille.

2.3.2 Lihasten aktivointi

Juoksunopeuden lisääntyessä voimantuotto lihaksissa kasvaa, minkä johdosta myös esiaktiivisuus kasvaa jalkojen valmistautuessa seuraavaan askelkontaktiin. Jalkojen ojentajalihasten aktiivisuus lisääntyy ennen askelkontaktia sekä heti kontaktin alussa. (Mero ym. 2004, 59; Kyröläinen ym. 2001.) Alla olevassa kuvassa 8 on esitetty jalkojen ojentajalihasten aktivoinnin lisääntyminen juoksunopeuden kasvaessa.

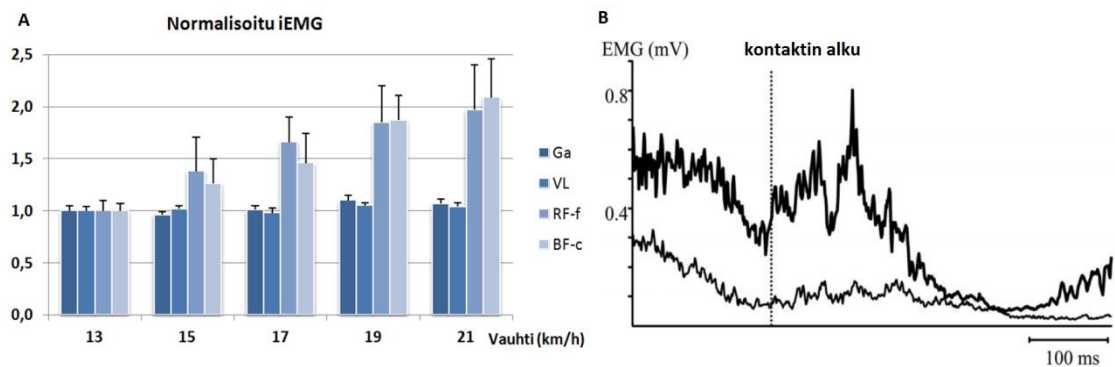


KUVA 8. Jalkojen ojentajalihasten aktivointi juoksuvaudin lisääntyessä hitaasta vauhdista (3,25 m/s – ohut viiva) maksimaaliseen vauhtiin (paksu viiva). Pisteviiva kuvaa askelkontaktin alkua. (Kyröläinen ym. 2001).

Kyröläinen ym. (2005) havaitsivat, että lihasten aktivointi kasvoi etenkin ennen kontaktia ja jarrutusvaiheessa juoksuvaudin lisääntyessä. Korkeissa juoksuvahteissa havaittiin myös EMG-aktiivisuuden ylittävän tahdonalaisen maksimaalisen lihassupistuksen aktivoititason (EMG 100 %MVC), mikä osoittaa, ettei maksimaalista lihasrekrytointipotentiaalia voida kuvata pelkästään isometrisen maksimisuorituksen avulla (Kyröläinen ym. 2005).

Juoksunopeuden lisääntyessä takareisien aktivoinnin on todettu korostuvan takareisilihaksien (*biceps femoris*) kohdalla (Kyröläinen ym. 2001). Kahden nivelen yli kulkevana lihaksina takareisiä aktivoidaan sekä kontakti- että lentovaiheen aikana – koko askelsyklin ajan (Mero ym. 2004, 59). Tämän saman havainnon teki myös Hanon ym. (2005) tutkiessaan jalkojen ojentajien aktivaation muuttumista juoksunopeuden

muuttuessa. Yli kahden nivelen toimivat, lantiota liikuttavat kaksipäinen reisilihas (*biceps femoris*) ja myös suoran etumaisen reisilihaksen (*rectus femoris*) aktiivisuus kasvoi suhteessa juoksunopeuden lisääntymiseen (Kuva 9). Myös Kyröläinen ym. (2005) havaitsivat etumaisen reisilihaksen (*rectus femoris*) aktiivisuuden lisääntyvän kahdessa vaiheessa: ensinnäkin, juuri ennen kontaktia ja kontaktin lopussa, jolloin polvi ojentuu ja pitää lantion ylhäällä; toiseksi, heilautusvaiheen alussa voimakkaassa lonkkanivelen koukistuksessa. Täten erityisesti yli kahden nivelen toimivien lonkan koukistajiin ja ojentajiin vaaditaan huomattavaa aktivointia suuremman refleksiaktiivisuuden ja tehokkaamman lihasjäykkyyden säätelyn takaamiseksi. (Kyröläinen ym. 2005.)



KUVA 9. A. lihasten sähköisen aktiivisuuden kasvu (iEMG) juoksunopeuden kasvun seurauksena. Ga = Gastrocnemius, VL = Vastus Lateralis, RF-f = Rectus Femoris lentovaiheen aikana ja BF-c = Biceps Femoris kontaktivaiheen aikana (Hanon ym. 2005). B. Lihaskivon kasvun juoksussa hitaasta maksimaaliseen juoksunopeuteen Biceps Femoris – lihaksessa (Kyröläinen ym. 2005)

3 JUOKSUN TALOUDELLISUUS

Juoksun taloudellisuus kuvaa juoksemiseen tehdyn työn ja juoksuun käytetyn energiankulutuksen välistä hyötysuhdetta. Mitä vähemmän energiaa kuluu tietyssä vakioitehoisessa kuormituksessa, sitä parempi on juoksijan taloudellisuus. (Daniels ym. 1984.) Yksinkertaisimmillaan juoksun taloudellisuus voidaan ilmoittaa joko hapenkulutuksena painokiloa kohden minuutissa (ml/kg/min) tietyllä vauhdilla (Conley & Krahenbul 1980; Anderson 1996; Nummela ym. 2007) tai hapenkulutuksena painokiloa kilometriä kohden (ml/kg/km) (Bassett & Howley 2000), joista jälkimmäisen menetelmän avulla juoksijoiden taloudellisuutta voidaan vertailla eri nopeuksilla. Juoksun energiankulutus koostuu kuitenkin aina jossain määrin aerobisen energia-aineenvaihdunnan lisäksi anaerobisesta energia-aineenvaihdunnasta (Daniels 1985). Aerobinen tarve (VO_2 [ml/kg/min] tai [l/min]) tietyllä juoksuvauhdilla ei teoriassa siis ole yhtä kuin kokonaisenergiankulutus (Saunders ym. 2004a). Lisäksi mittauksarkkuuteen vaikuttaa, ettei hapenkulutusta mittaamalla saada tarkkaa tietoa rasvojen ja hiilihydraattien osuudesta energiantuotossa (Maughan ym. 1997, 148).

Veren laktaattipitoisuuden avulla voidaan arvioida anaerobisen energiantuoton vaikutusta energiankulutukseen. Matalilla veren laktaattipitoisuuksilla (< 2 mmol/l) voidaan anaerobisen energia-aineenvaihdunnan osuus jättää huomioimatta. Kun veren laktaattipitoisuus kohoaa yli 2 mmol/l, lisätään energiankulutukseen 60 J/kg/min (3 ml/kg/min) jokaista yli 2 mmol/l noussutta mmol yksikköä kohden. (di Prampero ym. 1993.) Jos hapenkulutuksen avulla tehdyissä mittauksissa halutaan energiankulutuksen tarkkuutta lisätä, voidaan hyödyntää energiaekvivalenttia, jonka mukaan yksi kulutettu happilitra vastaa 20202 joulea silloin, kun hengitysosamäärä on 0.82. Hengitysosamäärän vaihtelu ± 0.01 vaikuttaa energiaekvivalenttiin ± 50 J. (McArdle ym. 2001, 147.)

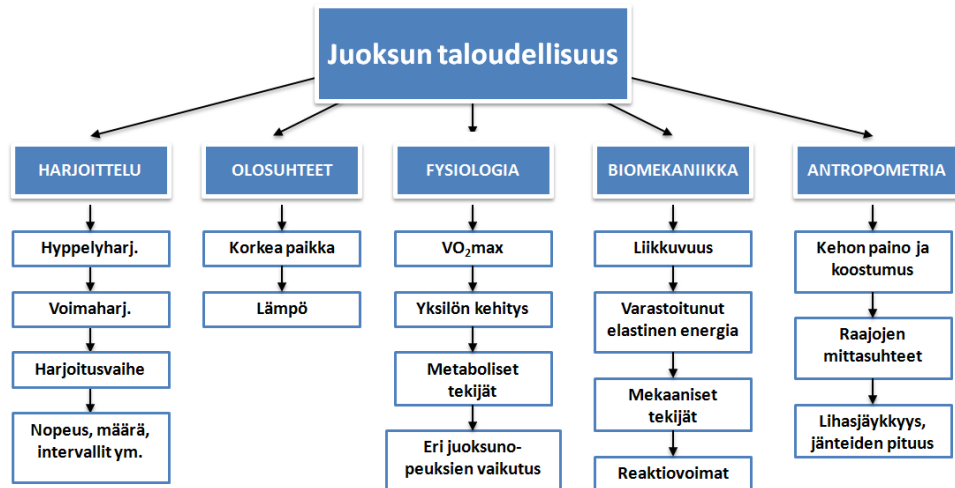
Hapenkulutusta mittaamalla saadaan kuitenkin hyvä kuva aerobisesta energiantuotosta, mikä kestävyysjuoksussa on ehdottomasti tärkein energiantuottomekanismi. Lisäksi johtuen hapenkulutuksen helposta mitattavuudesta, sitä käytetään taloudellisuuden mittarina. (Daniels 1985). Lineaarinen juoksuvauhdin ja hapenkulutuksen suhde näyttää

pitävän paikkansa submaksimaalisilla juoksuvauhdeilla ennen anaerobista kynnystä (n. 80 % VO_2max) (Daniels 1985). Jotta juoksun taloudellisuuden määrittäminen olisi mahdollisimman luotettavaa, tulee hapenkulutuksen mittaukset tehdä $\leq 85\%$ VO_2max tehoilla, paljon harjoitelleilla kestävyysjuoksijoilla (Saunders ym. 2004a). Fosterin & Lucian (2007) sekä Helgerudin (2010) tutkimukset vahvistavat juoksun taloudellisuuden mittauksen olevan luotettavinta ennen anaerobista kynnystä vaihdellen 80 – 90 % maksimaalisesta hapenottokyvystä. Anaerobisen aineenvaihdunnan lisääntyessä ja veren laktaattitason nousun myötä energiankulutus nousee eksponentiaalisesti, vaikka hapenkulutuksen ja juoksuvauhdin yhteys saattaakin säilyä lineaarisena myös tämän jälkeen. Anaerobisen energia-aineenvaihdunnan lisäyksen myötä hapenkulutuksen laskeminen ei ole enää luotettava tapa arvioida juoksun taloudellisuutta. (Daniels 1985.)

Jos vertaillaan hapenkulutusta eri painoisten koehenkilöiden välillä, voidaan saada aikaan virheellistä dataa, sillä hapenkulutus ei kasva samassa suhteessa painon kanssa (Bergh ym. 1991.) Tämän johdosta painoon suhteutettu hapenkulutus on korkeampi lapsilla kuin aikuisilla (Daniels 1985). Berghin ja kollegat (1991) havaitsivat lihasten ja sidekudosten elastisten ominaisuuksien vuoksi hapenkulutuksen kasvavan noin 0.75 kertaisesti suhteessa painoon. Tätä löydöstä tukevat myös useat tutkimukset myöhemmässä vaiheessa (Svedenhag & Sjodin 1994; Helgerud 1994; Stören ym. 2008).

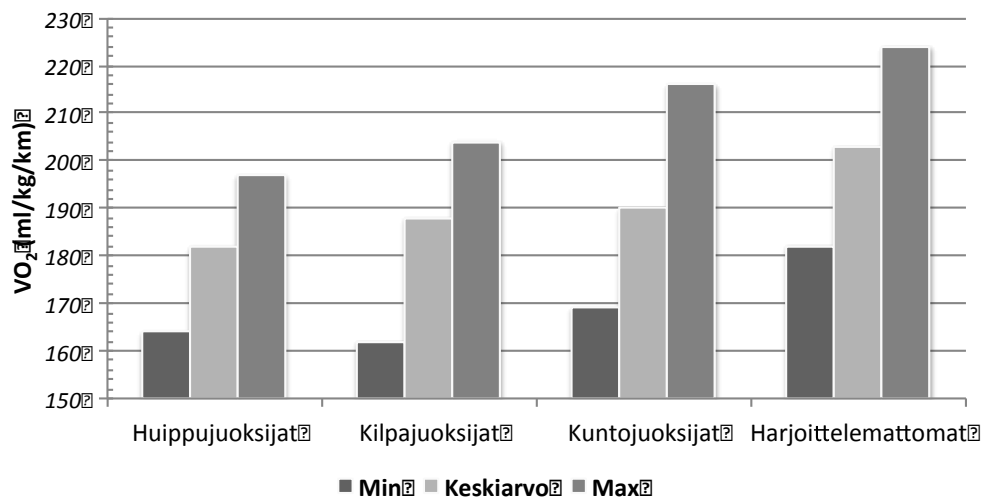
3.1 Juoksun taloudellisuuteen vaikuttavat tekijät

Useat fysiologiset, biomekaaniset ja antropometriset tekijät vaikuttavat juoksun taloudellisuuteen. Tämän lisäksi taloudellisuuteen vaikuttavat myös ulkoiset olosuhteet ja harjoittelu (kuva 10). (Saunders ym. 2004a.) Korkea lämpötila ja ilman happiosapaineen lasku heikentävät juoksun taloudellisuutta. (Nummela 2004, 108; Noakes 2001, 49). Kestävyysharjoittelun lisäksi voimaharjoittelun on todettu parantavan juoksun taloudellisuutta, ja monissa tutkimuksissa on löydetty harjoitusmäärien ja juoksun taloudellisuuden välillä yhteys. (Saunders ym. 2004a.) Aikuiset ovat lapsia taloudellisempia ja harjoittelun myötä taloudellisuuden tiedetään paranevan (Nummela 2004a, 108; Noakes 2001, 49).



KUVA 10. Juoksun taloudellisuuteen vaikuttavat tekijät (Saunders ym. 2004a).

Kuten edellä olevasta kuvasta 10 näkee, vaikuttaa moni tekijä juoksun taloudellisuuteen. Yksilöiden välillä on useasti suuria – jopa yli 20 % eroja hapenkulutuksessa samasta maksimaalisesta suorituskyvystä riippumatta, (kuva 11) (Bassett & Howley 2000; Daniels 1985). Myös Daniels ym. (1984) ja Williams & Cavanagh (1987) ovat raportoineet suuria vaihteluita (15 – 30 %) suorituskyvyltään samantasoisten juoksijoiden välillä. Pienimmillään yksilöiden väliset erot juoksun taloudellisuudessa on raportoitu olevan noin 8 – 10 % välillä pitkänmatkan juoksijoilla (Pereira & Freedson 1997). Myös di Prampero ym. (1986) ja Heise & Martin (2001) tutkimuksissa on saatu vastaavia variaatiokertoimia (7.4 – 9.5 %) keskimatkojen juoksijoilla.



KUVA 11. Juoksun taloudellisuus eritasoisilla juoksijoilla (mukaeltu Bassett & Howley 2000).

3.2 Voimaharjoittelun vaikutus juoksun taloudellisuuteen

Tutkimuksissa, joissa kestävyysharjoittelun ohkeen on lisätty voimaharjoittelua, tai osa kestävyysharjoittelusta on korvattu voimaharjoittelulla, on saatu positiivisia tuloksia juoksun taloudellisuuden tai kestävyysuorituskyvyn kannalta. Tutkimukset, joissa kestävyysharjoitteluun ohkeen on liitetty hermostollista voimaharjoittelua (Stören ym. 2008; Millet ym. 2000) ovat parantaneet juoksun taloudellisuutta, mutta ehkä vielä sitäkin parempia tuloksia on tullut harjoitusinterventiolla, jotka ovat sisältäneet räjähtävää voimaharjoittelua lisäpainoilla ja hyppelyharjoituksia (Paavolainen 1999a; Sedano ym. 2013; Saunders ym. 2006; Spurrs ym. 2003; Berryman ym. 2010). Taulukkoon 3 on tiivistetty tutkimuksia, jossa kestävyysharjoitteluun ohkeen lisätty voimaharjoittelu on kehittänyt juoksun taloudellisuutta ilman muutoksia VO_{2max} :ssa.

TAULUKKO 3. Yhteenveto tutkimuksista, joissa voimaharjoittelun lisäämisen kautta juoksun taloudellisuus (RE) ja suorituskykyisyys on parantunut ilman muutoksia VO_{2max} :ssa.

Tutkimus	Koehenkilöt	Volyyymi	Voimaharjoittelu	ΔVO_{2max}	ΔRE
Stören ym. 2008	17 mies-juoksijaa	4 sets * 4 reps	3 krt / vk * 8 vk	↔	↑ 5.0 %
Millet ym. 2000	15 triathlonistia	3 – 5 sets * 3 – 5 reps	2 krt / vk * 14 vk	↔	↑ 6.9 %
Paavolainen ym, 1999a	22 mies-suunnistaja	Nopeusvoimaa ja hyppelyitä	9 viikkoa (2 h viikossa)	↔	↑ 8.1 %
Sedano ym. 2013	6 huipputason miesjuoksijaa	3 sets * 7 reps / 70%	2 krt / vk * 14 vk	↔	↑ 3 – 4 %
Saunders ym. 2006	17 huippujuoksijaa	30 min hyppelyharjoitus	3 krt / vk * 9 vk	↔	↑ 4.1 %
Spurrs ym. 2003	17 juoksijaa	30 min hyppelyharjoitus	2 -3 krt / vk * 6 vk	↔	↑ 4.1 - 6.7 %
Berryman ym. 2010	11 mies-juoksijaa	pudotushyppyjä 20 / 40 / 60 cm	1 krt / vk * 8 vk	↔	↑ 7 %
	12 mies-juoksijaa	3 - 6 sets * 8 reps	1 krt / vk * 8 vk	↔	↑ 4 %

Berrymanin ym. (2010) tutkimusasetelamassa verrattiin juoksun taloudellisuuden kehittymistä kahdella eri harjoitusinterventiolla kestävyyskuntoilevilla miehillä. Taloudellisuus parani perinteisen voimaharjoittelun avulla 4% ja nopeusvoimaharjoittelun (hyppely- ja loikkaharjoittelu) avulla 7%. Harjoituskertoja oli vain yksi joka viikko, interventiojakson kestäessä kahdeksan viikkoa (ks. taulukko 3). Merkillepantavaa oli, että kaikki hyppely- ja loikkaharjoitteita tehneet paransivat juoksun taloudellisuutta. (Berryman ym. 2010.) Tämä luultavasti johtuu harjoittelun lajinomaisemmasta luonteesta, esimerkiksi voimantuottonopeuksien suhteen, juoksijalle verrattuna perinteiseen voimaharjoitteluun. Toisaalta, jos aiempaa harjoitustaustaa ei ole, tai voimaominaisuuksissa on selviä puutteita, voi myös perinteisestä voimaharjoittelusta olla apua kestävyys suorituskyvyn kehittämisessä. (Berg 2003.)

Perinteisesti kehittääkseen hermolihasjärjestelmää, voimaharjoittelun aikaansaamat muutokset hermolihasjärjestelmän suorituskyvyssä voidaan jakaa kehitykseen maksimaalisessa voimantuotossa tai räjähtävässä voimantuotossa kehittymisenä (Häkkinen 1985). Maksimivoiman kehittymisen tiedetään vaativan harjoittelua isoilla kuormilla 60 – 120 % yhden toiston maksimisuorituksesta (1RM) (mm. Narici 1989; Häkkinen 1985). Räjähtävän voimantuoton ylikuormitusperiaatteen mukaan tulee suoritettavan liikkeen olla nopeampi ja/tai maksimaalinen supistus-/liikenopeudeltaan (hyppelyharjoitteet) (Häkkinen 1994). Nopeusvoimaharjoittelu parantaa motoristen yksiköiden rekrytointia ja synkronisaatiota, joiden parantuminen voidaan sitten havaita voimantuoton ja juoksun hyötysuhteen paranemisena. On kuitenkin epäselvää, onko kestävyys suorituskyvyn parantumisen taustalla juoksuaskeleen taloudellistuminen voimaharjoittelun myötä, vai voiko hermolihasjärjestelmän voimantuottokyky olla muista tekijöistä riippumaton vaikuttaja, joka asettaa ylärajan kestävyys suorituskyvylle. (Nummela ym. 2006.)

4 AKUUTTI VÄSYMINEN KESTÄVYYSJUOKSUSSA

Väsymys on seurausta kuormituksesta, jolloin voima tai tehon tuotto laskee (Gandevia, 2001), mikä vaikeuttaa halutun submaksimaalisen tai maksimaalisen kuormituksen ylläpitoa (Edwards 1981; Gandevia, 2001; McArdle ym. 2001, 400). Väsyminen on aistienvaarainen havainto, joka perustuu fysiologiseen, biokemialliseen ja/tai sensorimotoriseen palautteeseen elimistöstä, mikä edeltää lihassupistuksen häiriintymistä tai kuormituksen keskeytystä (Lambert ym. 2001).

4.1 Väsymiseen vaikuttavat tekijät

Lihaksiston väsymismekanismeja ja väsymyksen aiheuttavia tekijöitä ei vielä tunneta tarkasti, vaikka ilmiötä on tutkittu jo yli sata vuotta. Lihäsväsymykseen vaikuttavat lihakset yksilölliset ominaisuudet, joten voimantuoton heikkeneminen kuormituksessa on erilaista eri lihaksilla. Lihäsväsymykseen vaikuttaa mm. lihaksen solujakauma, lihaksen hypertrofia, energiavarojen riittävyys (adenosiinitrifosfaatti- ja fosfokreatiiniavarastot; ATP, KP, sekä glukoosi että glykogeeni), häiriöt energiantuotossa (glykolyysi ja oksidaatio), lihaksen pH:n lasku (happamuuden lisäys), hermoston väsyminen ja häiriöt lihassupistuksessa (Nummela 2004, 116.)

4.1.1 Aineenvaihdunnallinen väsyminen

Väsymisen taustalla on eri energiantuottomekanismien rajoittuneisuus niiden koon ja toimintakyvyn suhteen eri kestoisissa kuormituksissa. Suoritus jakautuu aerobisen ja anaerobisen energiantuoton osalta puoliksi noin kahden minuutin kestoisessa suorituksessa kuten 800 m juoksu (kuva 2 ja taulukko 4). Taulukossa 4 on esitetty arvio energiantuoton jakautumisesta eri energiantuottoreittien suhteen eripituisissa maksimaalisissa juoksu suorituksissa. (McArdle ym. 2001, 164 – 165.) Seuraavassa tekstissä on eritelty väsymismekanismeja eripituisissa kestävyyskuormituksissa.

TAULUKKO 4. Välittömän energialähteen adenosinifosfaatin (ATP) tuottamiseen käytettävä energiantuottomekanismi (%) erilaisissa maksimaalisissa suorituksissa. Lukemat ovat suuntaa antavia. Mukaeltu (McArdle ym. 2001, 165).

Suoritus	Kreatiini-fosfaatti	Anaerobinen glykolyysi	Aerobinen glykolyysi	Veren glukoosi	Triglyseridit (Rasvahapot)
100 m	50	50	-	-	-
200 m	25	65	10	-	-
400 m	12.5	62.5	25	-	-
800 m	6	50	44	-	-
1.500 m	^a	25	75	-	-
5.000 m	^a	12.5	87.5	-	-
10.000 m	^a	3	97	-	-
Marathon	-	-	75	5	20
Ultramarathon	-	-	35	5	60
24-h kilpailu	-	-	10	2	88
Jalkapallopele	10	70	20	-	-

^a Suorituksissa kreatiinifosfaatti käytetään ensimmäisten sekuntien aikana ja resyntetisoinnin myötä myös loppukirissä

Välittömät energialähteet (ATP-KP). Alle 10 s maksimaalisessa suorituksessa tai lyhyessä rajussa, mutta palautuksen jälkeen toistuvassa voimasuorituksessa (esim. kolmiloikka tai keihäänheitto) energia tuotetaan puhtaasti välittömien energialähteiden eli korkeaenergisten fosfaattien (ATP-KP) varastojen avulla. Energiavarastojen koolla ei ole merkitystä, vaan energiantuoton vaatimukset kohdistuvat ensisijaisesti energiantuoton nopeuteen. (Nummela 2004a, 100.) Toistuvasti tehtynä esim. 10 x 5 s KP -varastot eivät välttämättä ehdi palautua, ja maksimitehot laskevat suorituksessa energiantuoton mennessä anaerobisen glykolyysin suuntaan. Alle 10 s suorituksessa KP- varastot palautuvat noin 85 % lähtötasosta kahden minuutin palautuksen aikana (Nummela 2004a, 110). Täydellinen palautuminen vaatii aikaa noin 10 – 15 minuuttia. KP -varastojen tyhjentyessä lihasten voimantuoton teho laskee noin 10 %, sillä glykolyysi ei pysty tuottamaan ATP samalla nopeudella kuin KP -varastot. (Nummela 2004a, 116.)

Anaerobinen glykolyysi ja happamuus. Lyhytkestoisissa suorituksissa anaerobinen glykolyysi on vallitseva energiantuottomekanismi yli 10 s kestoista useisiin minuutteihin, jolloin lihasten on saatava energiaa nopeasti (taulukko 4). Lihaksissa syntyy anaerobisen glykolyysin myötä maitohappoa, joka dissosioituu verenkiertoon vetyioneiksi ja laktaatiksi (Nummela 2004a, 98). Anaerobinen glykolyysi on vain tilapäinen apu suuren energiatarpeen tyydyttämiseen, sillä lihaksen pH:n lasku

(vetyionien kertymisen myötä) inhiboi glykolyysiä ja hidastaa lihasten supistumista. (Nummela 2004a, 116).

Aerobinen ja anaerobinen glykolyysi. Muutamista minuuteista noin 30 minuuttiin jatkuvassa maksimaalisessa kestävyysuorituksessa aerobinen glykolyysi nousee merkittävimmäksi energiantuottomekanismiksi (taulukko 4), mutta rinnalla toimii myös anaerobinen energiantuotto (laktaatti 3 – 15 mmol/l). Alle 30 minuuttiin asti energiavarastojen riittävyys ei ole usein kynnyksysymys vaan anaerobisen energiantuoton myötä lisääntyvän happamuuden vaikutus aerobisen ja anaerobisen energiantuottomekanismien toimintaan (Nummela 2004a, 116). Happamuus kasvaa suhteessa anaerobisen energiantuoton määrään, mutta puskurointikyvyn parantuessa anaerobista kapasiteettia voidaan lisätä ilman veren ja lihasten pH:n laskua. Puskurointikykyyn vaikuttaa paljon kuinka nopeasti protonit (H^+ -ionit) siirtyvät lihaksesta verenkiertoon. Täten parantamalla hapenottokykyä ja verenvirtausta lihaksessa parannetaan myös laktaatin ja vetyionien siirtymistä lihaksesta verenkiertoon. (Nummela 2004, 117 – 119.)

Aerobinen glykolyysi. Pitkäkestoisessa (yli 2 h) kestävyysuorituksessa kuten maratonin juokseminen, suoritus on puhtaasti aerobinen (laktaatti alle 2 mmol/l). Silloin suoritusta rajoittava ja väsymyksen syntyyn vaikuttava iso tekijä on hiilihydraattivarastojen riittävyys. Vaikka lihassolun sisällä tapahtuvat muutokset ovat osallisia väsymiseen, niin suorituksen heikkeneminen johtuu myös osin keskushermostosta, jotka pienentävät lihasten energiankulutusta alentuneen veren glukoositason perusteella. Samalla suorituksen teho laskee. (Nummela 2004a, 120.) Glykogeenivarastot tyhjenevät matalalla intensiteetillä (40 – 60 % VO_2max) nopeammin hitaista lihassoluista, ja suorituksen intensiteetin kasvaessa lähellä VO_2max nopeiden lihassolujen käyttö ja glykogeenin käyttöaste lisääntyvät. Glykogeenivarastojen tyhjenetään nopeammin suorituksen alussa kuin lopussa, ja uupumuksen tunne on yhteydessä glykogeenivarastojen tyhjenemiseen. Pitkäkestoisessa eksentrisessä lihastyössä (juoksun iskevä askel alustaan) voi aiheuta mikroaurioita ja tulehdusta lihaskudoksessa. Tämä lisää glykogeenin hajotusta ja hidastaa glykogeenisynteesiä. (Nummela 2004a, 120.)

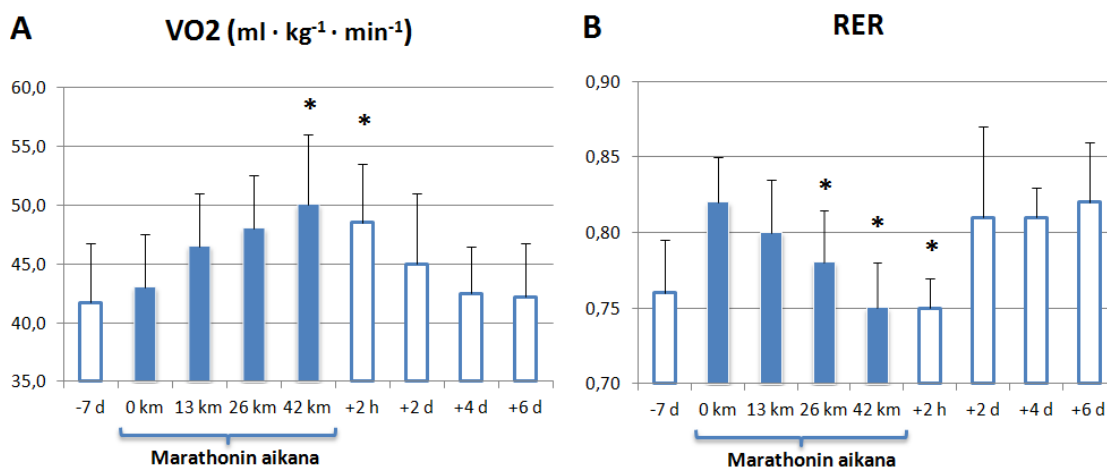
4.1.2 Hermolihasjärjestelmän väsyminen

Energiavarastojen riittävyyden ja metabolisen asidoosin vaikutusten lisäksi myös hermosto vaikuttaa väsymiseen, sillä hermosolujen läpi kulkeutuvat sähköiset käskyt lihaksille (Nummela 2004a, 122). Väsymisen ymmärtämisessä on osattava erottaa aineenvaihdunnallisten (asidoosi tärkeässä roolissa) ja hermostollisten tekijöiden syy-seuraus -suhteet. Hermolihasjärjestelmän väsymys voidaan jakaa sentraalisesta tai perifeerisestä hermostosta alkunsa saavaan häiriöön voimantuottokyvyssä (MacLaren ym. 1989). Väsymystä aiheuttava pitkittynyt tai lyhyt, mutta toistuva venymis-lyhenemissyklinen kuormitus heikentää akuutisti voimantuottokykyä laskeneen lihakseen kulkevan hermostollisen viestinvälityksen seurauksena ja/tai supistuvien elementtien heikentyneen tehokkuuden vuoksi (Avela ym. 1999). Syyt lihassupistuksen häiriintymiselle voivat teoriassa johtua tiedonvälityksen häiriöstä itse keskus- tai ääreishermostossa, hermolihaskliitoksessa tai lihassolussa (McArdle ym. 2001, 400). Motoristen yksiköiden väsyminen voi syntyä useiden tekijöiden yhteisvaikutuksesta, mikä riippuu kuormituksen intensiteetistä ja kestosta, kuten myös harjoitustaustasta. (McArdle ym. 2001, 400; Finni 2003.)

Kun lihaksen toiminta heikkenee pitkäkestoisen submaksimaalisen suorituksen aikana, vaaditaan uusien motoristen yksiköiden ja lihassolujen aktivointia halutun voimatason säilyttämiseksi (McArdle ym. 2001, 402). Lihaksen supistumiskyvyn heikkeneminen on prosessi, jota submaksimaalisessa suorituksessa pyritään kompensoimaan muuttamalla lihaksen voimantuottoa ja rekrytoimalla useampia lihassoluja (Nummela 2004a, 122). Lyhytkestoisessa maksimisuorituksessa, jossa aktivoidaan kaikki motoriset yksiköt, väsyminen ilmenee hermostollisen aktivaatiotason laskuna, mikä näkyy myös maksimaalisen lihasvoiman heikkenemisenä (McArdle ym. 2001, 402). Myös pitkäkestoisessa juoksusuorituksessa aiheutuu lihasväsymystä, mikä näkyy maksimaalisen voiman laskuna (Avela ym. 1999; Millet ym. 2003; Ross ym. 2010). Yhtenä perifeerisen väsymyksen syynä pitkittyneessä juoksukuormituksessa saattaa olla toistuvasta kuormituksesta koituvat lihasvauriot (Kyröläinen ym. 2000) tai häiriö lihassolun sisäisen Ca^{2+} -konsentraation lasku jatkuvan lihastyön seurauksena (McArdle ym. 2001, 402).

4.2 Väsymisen mittarit

Aineenvaihdunnallinen vaste. Kuten edellä olevassa juoksun taloudellisuuskappaleessa kuvattiin, on hapenkulutuksen mittaaminen hyvä tapa kuvata suorituksen aerobista energia-aineenvaihduntaa ja täten energiataloudellisuutta (Daniels. ym. 1984) Kokoneilla kestävyysurheilijoilla tasavauhtinen maratonkuormitus aiheutti selvän nousun hapenkulutuksessa (kuva 12.A.), mutta ero kasvoi tilastollisesti merkitseväksi vasta viimeisen kolmanneksen aikana suorituksesta. Taloudellisuuden voitiin nähdä heikkenevän hapenkulutuksen kasvaessa, vaikka laktaattipitoisuus ei muuttunutkaan suorituksen aikana. Hengitysosamäärä (kuva 12.B) laski merkitsevästi suorituksen aikana, mikä viittasi energia-aineenvaihdunnan kääntymisestä vahvemmin rasvojen metaboliaan hiilihydraattivarastojen ehtyessä pitkäkestoisessa kuormituksessa. (Kyröläinen ym. 2000.)



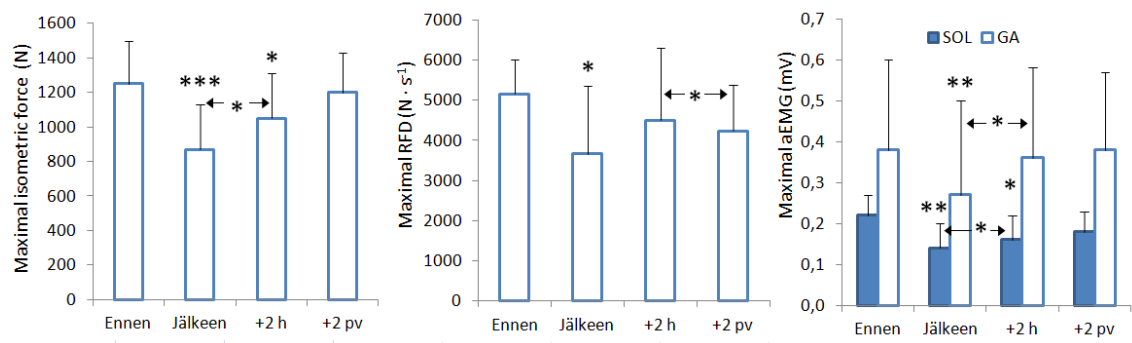
KUVA 12. Keskiarvoinen hapenkulutus (A) ja hengitysosamäärä (B) ennen (-7d = viikko ennen), aikana (tummennetut palkit; 0, 13, 26 ja 42 km) ja maratonin jälkeen (+2 h = 2 tuntia jälkeen, +2 d = 2 päivää jälkeen jne.) submaksimaalisessa juoksutestissä. (Kyröläinen ym. 2000).

Yhtenä väsymisen mittarina voidaan pitää myös laktaattitason nousuja vakiotehoisessa kuormituksessa. Finni tutkijaryhmineen (2003) mittasi laktaatin nousseen kokemattomilla kestävyysurheilijoilla arvosta 1.81 ± 1.31 arvoon 5.31 ± 180 mmol/l ($p < 0.01$) 10 km submaksimaalisen kestävyyskuormituksen seurauksena, mikä viittaa myös anaerobisen energia-aineenvaihdunnan kiihtymiseen suorituksen aikana. Suorituksen heikkenemistä ei havaittu hapenkulutuksen kasvuna submaksimaalisessa 10

km suorituksessa, mutta väsyminen oli havaittavissa suorituskyvyn laskuna hermolihasjärjestelmän maksimitesteissä (Finni ym. 2003).

Neuromuskulaarinen vaste. Lihasten sähköinen aktiivisuus lisääntyy submaksimaalisen tasavauhtisen juoksukuormituksen aikana jalkojen ojentajalihaksissa väsymyksen johdosta. Pitkän matkan juoksussa – kuten maratonjuoksussa – tarvitaan suorituksen loppuvaiheella suurempi neuraalinen aktivaatio lihakseen, jotta sama tasainen juoksunopeus voidaan säilyttää. (Komi ym. 1986; Kyröläinen ym. 2000.) Tämä kasvanut neuraalinen aktivaatiotaso on myös mitä luultavimmin kasvaneen hapenkulutuksen taustalla. (Kyröläinen ym. 2000).

Toistuva submaksimaalinen kuormittaminen juoksemalla saa aikaa yhä voimakkaamman venytyksen kautta ilmenevän vaikutuksen lihaksen jäykkyyden säätelyyn, joka ilmenee lopulta maksimaalisen isometrisen jalkojen ojennuksen heikentymisellä (Komi & Nicol, 2000, 399.) Avela ym. (1999) havaitsivat nilkan ojentajien isometrisen maksimivoiman laskevan 30 % maratonkuormituksen johdosta. Samoissa määrin heikkeni myös pohjelihasten (*Soleus* ja *Gastrocnemius*) keskiarvoinen maksimaalinen EMG (38.3 % ja 28.3 %, vastaavasti, kuva 13).

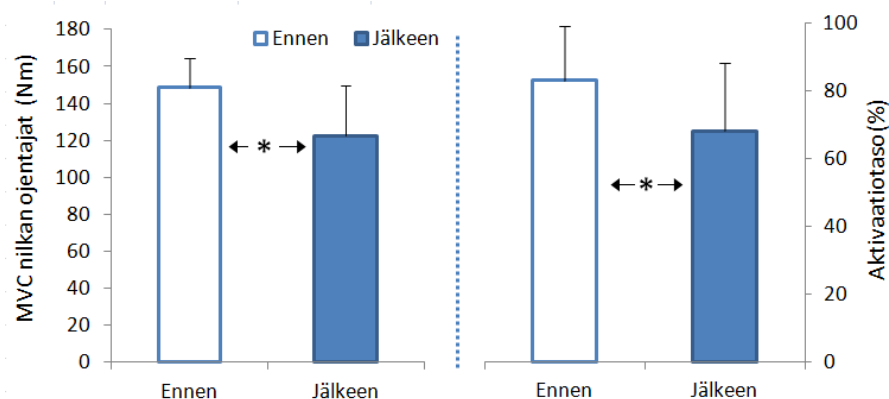


KUVA 13. Maksimaalinen isometrinen voima B) voimantuottonopeus ja C) aEMG-aktiivisuus jalkojen ojennuksessa ennen, heti, kaksi tuntia ja kaksi päivää jälkeen maratonin. Mukailtu (Avela ym. 1999).

Kokeneemmilla juoksijoilla maksimaalisen voimantuottokyky ei todennäköisesti laske vielä submaksimaalisen 10 km juoksun seurauksena, vaan kuormituksen on oltava joko maksimaalinen teholtaan tai pitempi kestoaltaan (Finni ym. 2003). Ross ym. (2010) havaitsi jalkojen ojentajien maksimaalisen isometrisen voimantuoton laskevan vasta 20

km juoksun seurauksena jälkeen 15 % ($p < 0.05$), ja myös lihaksen maksimiaktivaatio oli laskenut 18 % ($p < 0.01$) samassa vaiheessa. Syynä väsymiselle oli tahdonalaisen lihasaktivaation lasku. (Ross ym. 2010.) Samankaltaisia tuloksia löysi myös Saldanha ym. (2008), jotka havaitsivat maksimivoiman laskeneen samoissa määrin, noin 12 % 2 h juoksun jäljiltä.

Maksimivoima ja tahdonalainen aktivointi laskivat polven ojentajalihaksissa vasta 4 tunnin juoksun jälkeen (55 % vVO_{2max}) kestävyysurheilijoilla. 5 tunnin täytyttyä maksimivoima oli laskenut noin 28 % ($p < 0.001$) ja tahdonalainen aktivointi 16 % ($p < 0.01$) (Place ym. 2004). Hapenkulutus kasvoi kuormituksen aikana tasaisesti ja oli 5 h jälkeen noin 18 % korkeampi kuin kuormituksen alussa. Syke käyttäytyi samoin nousten 13 %. (Place ym. 2004.) Saldanha ym. (2008) tutkimus antoi näyttöä 2 h submaksimaalisen (75 % VO_{2max}) kestävyyskuormituksen aiheuttavan hermostollista väsymistä, mikä näkyi isometrisen voimantuoton (17 %) ja aktivaatiotason (19 %) laskuna (Kuva 14). Aktivaatiotason lasku kertoo sentraalisesta väsymyksestä, mikä myös oli vahvasti yhteydessä isometrisen voimantuoton heikkenemiseen ($r = 0.87$; $p < 0.05$). (Saldanha ym. 2008.) Kokemattomilla kestävyysjuoksijoilla tunnin kestävyysuoritus ei saanut aikaan yhtä suurta sentraalista väsymystä aktivaatiotason laskiessa suuntaa-antavasti 12 % (Finni ym. 2003).

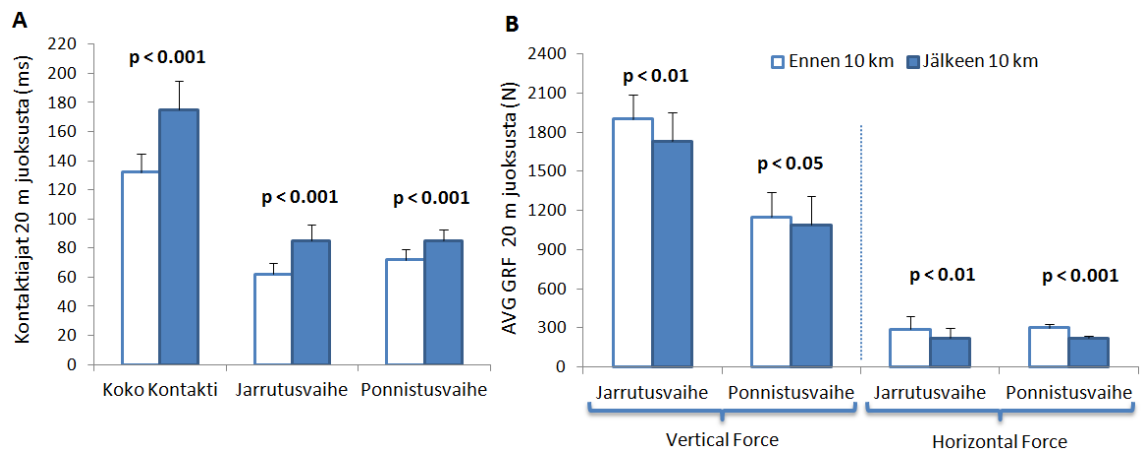


KUVA 14. A) Maksimaalinen isometrinen vääntövoima (MVC) ja B) aktivaatiotaso ennen ja jälkeen 2 h tasavauhtisen kuormituksen 13.4 km/h vauhdilla Saldanha ym. 2008.

Biomekaaninen vaste. Pitkäkestoisen juoksukuormituksen aikana hermolihasjärjestelmän heikentynyttä suorituskykyä pyritään kompensoimaan lievillä mekaanisilla muutoksilla. Kuitenkaan pienet muutokset askelpituudessa tai askelfrekvenssissä osoittavat, ettei heikentynyt taloudellisuus selity juoksun mekaniikan muutoksilla. Kuormittumisen kasvun taustalla on todennäköisesti rasvojen hyväksikäyttö hiilihydraattivarastojen ehtyessä, kasvanut tarve kehon lämpötilan säätelylle ja mahdolliset lihaskvauriot. Tämän lisäksi erot yksilöiden välillä saattavat olla suuria tasaisista ryhmäkeskiarvoista huolimatta. (Kyröläinen ym. 2000.) Kestävyysurheilijoiden on havaittu kompensoivan väsymystä rajoittamalla massakeskipisteen pystysuuntaista liikettä jarrutusvaiheen aikana, mutta kaiken kaikkiaan taloudellisuuden, väsymisen ja biomekaanisten tekijöiden muutosten yhteydet eivät ole läheskään yksityiskohtaisesti selviä. (Millett ym. 2000.)

Paavolainen ym. (1999b) tutkivat kilpatason suunnistajien askelmuuttajien (kontaktiajat/askelvoimat) muuttumista 10 km maksimaalisen juoksun aikana, muttei löytänyt merkitseviä eroja suorituksen loppu- ja alkuvaiheen välillä. Edellä mainittujen tutkimusten perusteella väsymystä tai heikentynyttä taloudellisuutta on vaikea selittää puhtaasti askelmuuttajien perusteella (Paavolainen 1999b; Kyröläinen 2000).

Suuremmat erot on havaittavissa maksimaalisissa mittauksissa nopeuden (Nicol ym. 1991) tai voiman ja lihaksen sähköisen aktiivisuuden (EMG) laskuna (Avela ym. 1999). Maksimaalisella suorituskykymittarilla saman koeryhmän maksiminopeus tippui noin 23 % ($p < 0.001$) 10 km juoksun jälkeen, jonka seurauksena kontaktiajat (kuva 15.A) ja -voimat (kuva 15.B) laskivat merkitsevästi. Kuvat 15.A ja 15.B viittaavat siihen, että nopea voimantuotto ja askeleesta aiheutuvien kontaktivoimien sietokyky heikkenevät toistuvien venytyskuormitusten (juoksu) seurauksena. Myös lihasten aktiivisuus 20 m juoksussa (VL, BF, GA) laski merkittävästi (28.5 – 57.2 %; $p < 0.001$) maksimaalisen 10 km seurauksena (Paavolainen (1999b.) Kyröläinen kollegoineen (2000) lisäsi väsymyksen taustalla olevien syiden joukkoon kuuluvan muun muassa seuraavat mekanismit: rasvojen lisääntynyt aineenvaihdunta, kiihtynyt lämmönsäätely ja mahdolliset lihassoluvauriot.



KUVA 15. A) Kontaktiajat jarrutus- ja ponnistusvaiheesta sekä B) keskiarvo kontaktivoimat vertikaali ja horisontaalisuunnassa 20 m maksimaalisesta juoksusta ennen ja jälkeen 10 km suorituksen (n =19) Paavolainen 1999b.

Kokemattomilla kestävyysurheilijoilla jo 10 km submaksimaalinen juoksu laski merkitsevästi maksimaalista juoksunopeutta ja lisäsi huomattavasti kontaktivaiheen kestoja kokemattomilla kestävyysjuoksijoilla (Finni ym. 2003) Tämä näkyi myös huomattavana lihasten aktiivisuustason (SOL, VM ja RF) laskuna konsentrisen ponnistusvaiheen aikana. 10 km juoksun aikana suurimmat muutokset tapahtuivat lihasten aktivaatiossa (BF ja GA) jarrutusvaiheen aikana ja juoksuaskeleen vertikaalisessa kontaktivoimassa ensimmäisen vajaan 2 km:n aikana. Samankaltaisesti suurin lisäys sykkeessä ja hapenkulutuksessa nähtiin ensimmäisen kahden kilometrin aikana, vaikka kyseessä olikin teholajien urheilijoita. Hapenkulutuksen ja mekaanisten muuttujien välille ei löydetty yhteyttä. (Finni ym. 2013.)

5 TUTKIMUSONGELMAT JA HYPOTEESEIT

Tämän tutkimuksen tarkoituksena oli selvittää, aiheuttaako 60 min submaksimaalinen juoksukuormitus väsymystä hengitys- ja verenkiertoelimistön ja/tai hermolihasjärjestelmän toimintaa kuvaavissa muuttujissa kestävyyskuntoilevilla miehillä ja naisilla.

Ongelma 1. Aiheuttaako tunnin kestävyysjuoksu taloudellisuuden heikkenemistä?

Hypoteesi 1: Tunnin submaksimaalinen kestävyysuoritus aiheuttaa juoksun taloudellisuuden heikkenemisen (Finni ym. 2003; Kyröläinen ym. 2000).

Ongelma 2. Laskeeko hermolihasjärjestelmän maksimaalinen suorituskyky tunnin kestävyysjuoksun seurauksena?

Hypoteesi 2: Pitkäkestoinen kestävyyskuormitus laskee maksimaalista voimantuottokykyä (Avela ym. 1999).

Ongelma 3. Tapahtuuko kontaktivoimissa ja/tai askelmuuttujissa muutosta kestävyysjuoksun seurauksena?

Hypoteesi 3: Askelmuuttujissa ja submaksimaalisissa kontaktivoimissa ei näy suurta muutosta kestävyyskuormituksesta johtuen (Paavolainen ym. 1999b; Kyröläinen ym. 2000).

Ongelma 4. Onko maksimivoiman muutos yhteydessä kontaktivoimien muutokseen?

Hypoteesi 4: Yksilöiden väliset erot ovat luultavasti niin suuria, ettei yhteyttä maksimivoiman ja kontaktivoimien välille löydy (Kyröläinen ym. 2000)

6 MENETELMÄT

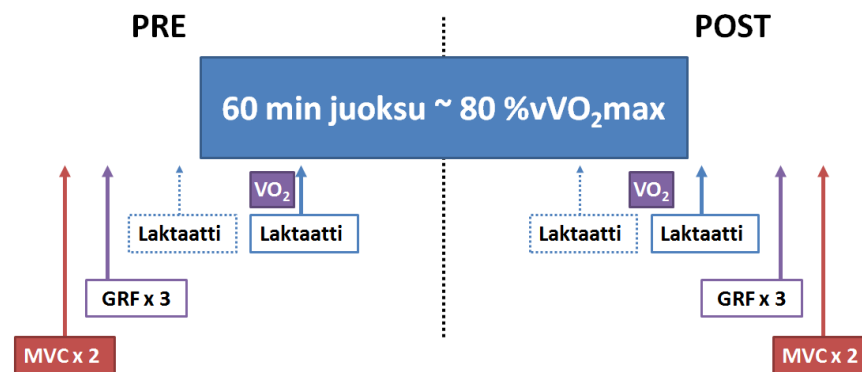
6.1 Koehenkilöt

Tutkimukseen valittiin 30 vapaaehtoista 21 – 45-vuotiaita kestävyyskuntoilijaa Jyväskylän alueelta. (n = 15 miehet ja n = 15 naiset). Koehenkilöt harrastivat vähintään kolme kertaa viikossa kestävyystyypistä liikuntaa, joka pääsääntöisesti oli juoksua. Tutkimuksen poissulkukriteereihin kuului: BMI > 28 kg/m², sairaus tai sairaana olo sekä tuloksiin vaikuttavan lääkityksen käyttäminen. Koehenkilöt saivat yksityiskohtaiset kirjalliset ja suulliset ohjeet tutkimussuunnitelmasta ja – menetelmistä. Tutkimukseen mahdollisesti liittyvät riskit ja hyödyt selvitettiin osallistujille ennen osallistumispäätöksen allekirjoittamista. Jokaiselle koehenkilölle suoritettiin lepo-EKG ja terveystietokysely, joiden perusteella tutkimuksen vastuullinen lääkäri hyväksyi koehenkilöt tutkimukseen. Jyväskylän yliopiston eettinen toimikunta hyväksyi tutkimussuunnitelman.

6.2 Tutkimusprotokolla

Koehenkilöt suorittivat maksimaalisen hapenottokyvyn testin, josta analysoitiin maksimaalisen aerobisen tehon lisäksi anaerobinen ja aerobinen kynnysteho. Aikaisintaan seitsemän vuorokauden kuluttua esimittauksesta, koehenkilöt saivat luvan suorittaa varsinaisen kestävyyskuormituksen. Kestävyyskuormitus suoritettiin samaan vuorokauden aikaan (\pm 1 h) kuin esimittaus. Ennen ja jälkeen kestävyyskuormituksen koehenkilöille suoritettiin hermolihasjärjestelmän toimintakykyä mittaavat testit: vakiovauhtinen submaksimaalinen juoksutesti (siinä kontaktivoimien mittaus GRF = *ground reaction force*) ja isometrinen tahdonalainen maksimaalinen jalkojen ojennus (MVC = *maximal voluntary contraction*). Kestävyyskuormituksen (60 min) ensimmäisen 10 min aikana (PRE) mitattiin hengityskaasuja (VO₂, RE, RER), ja sama keräys toistettiin kuormituksen viimeisen 10 min (POST) aikana. Sykettä kerättiin koko kuormituksen ajan, ja se raportoitiin samalta ajankohdalta kuin hengityskaasut. Lisäksi

laktaattia mitattiin ennen ja jälkeen kuormituksen ja telemetrisen hengityskaasuanalysointin koehenkilön päälle pukemisen yhteydessä (kuva 16).



KUVA 16. Tutkimussuunnitelma: akuutit vastemittaukset ennen ja jälkeen kestävyyskuormituksen. Pisteviivalla kuvattuja laktaattimittauksia ei tarkasteltu tilastoissa.

Kestävyyskuormitus oli tasavauhtinen, 60 min kestävä juoksu, joka suoritettiin 200 m pitkällä sisäradalla. Juoksukuormitus oli tasavauhtinen, ja vauhti (v) oli määritetty aikaisemmin esimittauksissa mitattujen henkilökohtaisten aerobisen (v_{AerK}) ja anaerobisen kynnysvauhtien (v_{AnK}) väliin seuraavalla kaavalla, $v = v_{\text{AerK}} + 2/3(v_{\text{AnK}} - v_{\text{AerK}})$. Keskimääräinen juoksuintensiteetti oli noin 80% $v\text{VO}_2\text{max}$ esimittausten maksimaalisiin aerobisen tehon vauhtiin perustuen.

6.3 Mittaukset

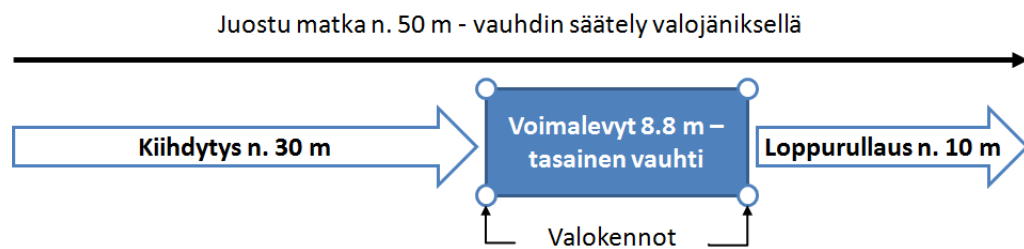
Maksimaalinen aerobinen teho - VO_2max . Mattotesti suoritettiin ns. pitkän kuormitusmallin mukaan, jossa juoksumaton kulma oli vakio, 0.5° koko testin ajan. Kuormitusportaissa pyrittiin 6 - 10:een ja testin kokonaiskestoksi tavoiteltiin 18 - 30 min. Aloituskouma naisilla oli $7 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ja miehillä $8 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. Tästä maton nopeutta lisättiin $1 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ joka 3. minuutti, aina koehenkilön uupumiseen tai vapaaehtoiseen keskeyttämiseen asti. Sykettä seurattiin ja kerättiin testin ajan jatkuvasti sykemittarilla (Suunto t6, Vantaa, Suomi). Jokaisen kuorman loppusykkeeksi määritettiin kunkin kuorman viimeisen minuutin keskiarvo. Testin ajan hengityskaasuja kerättiin kannettavan hengityskaasuanalysointin avulla *breath-by-breath* -menetelmällä (Oxycon Mobile, Jaeger, Hoechberg, Saksa). Ennen jokaista mittausta, tilavuus ja kaasuseoskalibrointi suoritettiin erikseen. VO_2max määritettiin korkeimmaksi

hapenkulutuksen keskiarvoksi 60 s jaksolta. Koehenkilöltä otettiin sormenpäáverinäyte ennen testin alkua, jokaisen 3 min kuorman päättyessä, sekä yksi, neljä ja 10 minuuttia testin jälkeen, veren laktaattipitoisuuden määrittämistä varten. Testin aikana juoksumatto pysäytettiin noin 15 – 20 s näytteen ottamista varten. Juoksunopeus anaerobisella ja aerobisella kynnyksellä määritettiin hengityskaasujen ja laktaattiarvojen perusteella samalla menetelmällä kuin Aunola & Rusko (1986).

Isometrinen tahdonalainen maksimivoima (MVC). Jalkojen isometrinen maksimiojennusvoima (MVC) mitattiin elektromekaanisella jalkadynamometrillä (suunniteltu ja valmistettu Jyväskylän liikuntabiologian laitoksella, Jyväskylän yliopisto, Suomi). Koehenkilöiden polvikulma asetettiin 107° ja heitä ohjeistettiin tuottamaan voimaa niin nopeasti kuin mahdollista noin 3 sekunnin ajan (Häkkinen ym. 1998). Koehenkilöt suorittivat ennen kestävyyskuormitusta kolme maksimaalista toistoa minuutin tauoin. Heti kestävyyskuormituksen jälkeen isometrisiä maksimitoistoja suoritettiin vain kaksi, jotka suoritettiin ilman taukoa. Paras tulos maksimivoimassa (N) pääsi mukaan tilastollisiin analyyseihin. Voimasignaali alipäästösuodatettiin (20 Hz) ja analysoitiin Signal-ohjelmalla (Signal Ver 4.04, Cambridge Electronic Design Ltd, Cambridge, UK).

Juoksun mekaniikka ja kontaktivoimat (GRF). Testissä juostiin 3 kertaa noin 50 m kontrolloidulla nopeudella, joka oli sama kuin kestävyyskuormituksen nopeus. Juoksijoiden nopeutta ohjattiin valojänisjärjestelmän (Protom, Naakka Ltd., Lappeenranta, Suomi) avulla, joka oli asetettu koko juostavalle matkalle. Voimalevyt oli asetettu 8.8 m matkalle ja samalta matkalta mitattiin myös nopeus valokennoilla (Ivar Ltd., Tallin, Viro). Juostun matkan jakautuminen kiihdytys-, mittaus- ja loppurullausvaiheisiin on esitetty kuvassa 17. Voimalevyjärjestelmä koostui viidestä kaksikulotteisesta ja kolmesta 3D voimalevystä (0.9 x 1.0 m jokainen, TR Test Ltd. Jyväskylä, Suomi, luontainen taajuus pystysuunnassa 170 Hz) ja yhdestä Kistlerin 3D voimalevystä (0.9 x 0.9 m, 400 Hz Honeycomb, Kistler, Sveitsi), jotka oli kytketty sarjaan ja päällystetty tartanilla. Jokainen levy mittasi pysty- (Fz) ja vaakasuuntaisia (Fy) kontaktivoimakomponentteja. Kontaktivoimat ja kontaktiajat (CT) kerättiin tietokoneen Signal-ohjelmaan (Signal Ver 4.04, Cambridge Electronic Design Ltd, Cambridge, UK) A/D Codacs A/D-muuntajaa (Dataq Instruments, Inc., Akron, Ohio,

USA). Askeltiheys (SR) laskettiin käyttämällä kontaktiaikoja (CT) ja lentoaikoja (FT) $[1/(CT + FT)]$ ja askelpituus (SL) käyttämällä nopeutta ja askeltiheyttä (v/SR). Jokainen yritys sisälsi kahdesta neljään oikean jalan kontaktia voimalevyillä (kuva 17). Vaakasuuntaista voima-aika käyrän avulla määritettiin kontaktiajat, ja F_z ja F_y komponenttien jarrutus- ja ponnistusvaiheet. Molempien voima-aika käyrien integraalit laskettiin ja jaettiin vastaavalla ajanjaksolla keskimääräisen voiman laskemiseen koko kontaktin ajalta ja myös jarrutus- ja ponnistusvaiheella erikseen.



KUVA 17. GRF-mittausasetelma ja juoksuvaiheiden jakautuminen kiihdytykseen, tasaiseen vauhtiin ja loppurullaukseen.

Laktaatti. Alkuperäisen VO₂max-mittauksen laktaattinäytteet kerättiin jokaiselta 3 min kuormalta. Myös kestävyyskuormituksen laktaattipitoisuudet mitattiin ennen, 10 min, 50, ja 60 min jälkeen aloituksen sormenpääverinäytteistä, josta analysoitiin veren laktaattipitoisuus Biosen S_line Lab+ laktaattianalysointilaitteella (EKF Diagnostic, Magdeburg, Saksa).

6.4 Tilastolliset menetelmät

Tämän työn tilastollisessa osuudessa käytettiin perinteisiä tilastomenetelmiä ryhmäkeskiarvojen ja keskihajontojen laskemiseen. Ryhmien sisäisiä muutoksia tarkasteltiin PRE – POST aikapisteissä parittaisella t-testillä. Muutoksien välisiä yhteyksiä tutkittiin Pearsonin korrelaation avulla. Merkitsevyyden rajaksi asetettiin kaikissa testeissä * = $p < 0.05$, ** = $p < 0.01$ ja *** $p < 0.001$. Tilastoanalyysit suoritettiin Microsoft Office Excel 2007 ja PASW 18.0 (SPSS Inc., Chicago, IL, USA) tilasto-ohjelman avulla.

7 TULOKSET

Kokonaan puuttuvan tai vajeellisen mittausaineiston vuoksi lopullisiin analyyseihin sisällytettiin 22 koehenkilöä (miehet $n = 12$, naiset $n = 10$). Miesten ja naisten taustamuuttujat ovat raportoitu taulukossa 5.

TAULUKKO 5. Koehenkilöiden taustatiedot miehillä ja naisilla

	Miehet ($n = 12$)	Naiset ($n = 10$)
Ikä (v)	38.8 ± 7.1	33.5 ± 8.3
Pituus (cm)	177.4 ± 6.4	165.9 ± 7.6
Paino (kg)	75.7 ± 3.6	59.8 ± 5.1
Rasva (%)	12.9 ± 3.6	22.0 ± 3.8
VO2max ($\text{ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$)	54.5 ± 4.0	48.5 ± 4.6

Koehenkilöt juoksivat kestävyyskuormituksen aikana keskimäärin 11.1 ± 1.1 km nopeudella 11.4 ± 1.2 km/h. Sukupuolten välillä oli merkitsevä ero ($p < 0.01$) juoksukuormituksen matkassa ja vauhdissa (taulukko 6).

TAULUKKO 6. Koko ryhmän, miesten ja naisten kestävyyskuormituksen aikana juostu matka ja nopeus (keskiarvo \pm SD).** = $p < 0.01$, ero sukupuolten välillä.

	Juoksumatka (km)	Juoksunopeus (km/h)
Kaikki ($n = 22$)	11.1 ± 1.1	11.4 ± 1.2
Miehet ($n = 12$)	11.7 ± 1.0	12.2 ± 1.0
Naiset ($n = 10$)	10.3 ± 0.8 **	10.7 ± 0.9 **

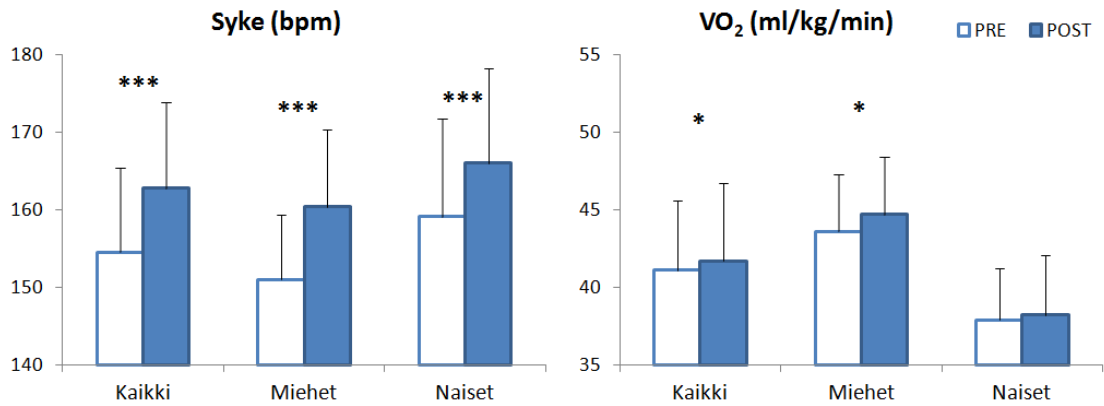
Juoksun aiheuttamat muutokset kardiovaskulaarisissa ja neuromuskulaarisissa muuttujissa ovat listattu taulukkoon 7. Tunnin kestävyyskuormitus nosti sekä miehillä että naisilla (6.2 ja 4.3 %, vastaavasti) sykettä, mutta hapenkulutus kasvoi merkitsevästi

ainoastaan miehillä $43.6 \pm 3.7 - 44.7 \pm 3.7$ ml/kg/min (2.5 %; $p < 0.05$) (Kuva 18). Matkaan suhteutettu hapenkulutus kasvoi miehillä 214 ± 10 ml/kg/km arvoon 219 ± 10 ml/kg/km (2.5 %, $p < 0.05$) naisten taloudellisuuden pysyessä samana kestävyysjuoksun aikana (kuva 19.A). Laktaatissa ei nähty tilastollista muutosta kummallakaan ryhmällä (kuva 19.B). Hapenkulutuksen kasvu oli yhteydessä juoksukuormituksen aikana juostuun matkaan ($R = 0.456$, $p < 0.05$) ja sykkeen kasvuun ($R = 0.498$, $p < 0.05$).

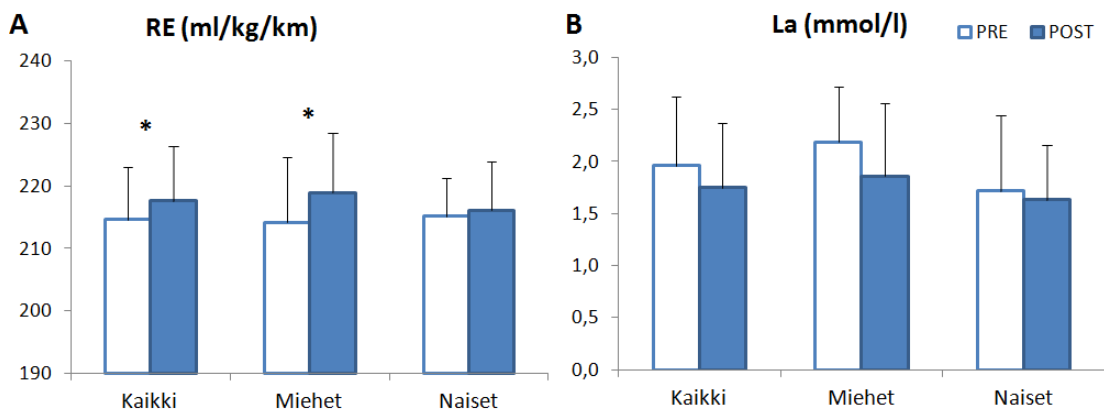
TAULUKKO 7. Koko ryhmän sekä miesten ja naisten akuutit vasteet kestävyyskuormitukseen.

Muuttuja	Kaikki (n = 22)		Miehet (n = 12)		Naiset (n = 10)	
	PRE	POST	PRE	POST	PRE	POST
HR (bpm)	155 ± 11	163 ± 11 ***	151 ± 8	160 ± 10 ***	159 ± 13	166 ± 12 ***
VO ₂ (ml/kg/min)	41.1 ± 4.5	41.7 ± 5.0 *	43.6 ± 3.7	44.7 ± 3.7 *	37.9 ± 3.3	38.2 ± 3.9
RE (ml/kg/km)	215 ± 9	218 ± 9 *	214 ± 10	219 ± 10 *	215 ± 6	216 ± 8
La (mmol/l)	2.0 ± 0.7	1.8 ± 0.6	2.2 ± 0.5	1.9 ± 0.7	1.7 ± 0.7	1.6 ± 0.5
MVC (N)	2311 ± 625	2148 ± 591 **	2757 ± 372	2531 ± 382 **	1776 ± 400	1686 ± 451
SF (1/s)	2.75 ± 0.17	2.79 ± 0.16 **	2.69 ± 0.13	2.74 ± 0.14 *	2.82 ± 0.19	2.85 ± 0.17 *
SL (m)	1.16 ± 0.15	1.15 ± 0.13	1.26 ± 0.10	1.23 ± 0.10	1.05 ± 0.11	1.05 ± 0.10
GRFz-b (N)	1657 ± 269	1611 ± 253 **	1851 ± 132	1796 ± 141 **	1423 ± 191	1388 ± 154
Fz-b (N/kg)	2.46 ± 0.20	2.40 ± 0.18 **	2.50 ± 0.14	2.43 ± 0.18	2.41 ± 0.25	2.36 ± 0.19
Fx-b (N/kg)	0.35 ± 0.10	0.35 ± 0.08	0.39 ± 0.07	0.37 ± 0.05	0.30 ± 0.11	0.32 ± 0.11

HR: Syke, VO₂: hapenkulutus, RE: juoksun taloudellisuus, La: laktaatti, MVC: isometrinen maksimivoima (jalkadynamometri), SF: askeltiheys, SL: askelpituus, GRFz-b: askelkontaktin jarrutusvaiheen vertikaalisuuntainen kontaktivoima, Fz-b: Kehoon painoon suhteutettu jarrutusvaiheen kontaktivoima pystysuunnassa ja Fx-b: Kehon painoon suhteutettu jarrutusvaiheen kontaktivoima vaakasuunnassa. * = $p < 0.05$; ** = $p < 0.01$ ja *** = $p < 0.001$.

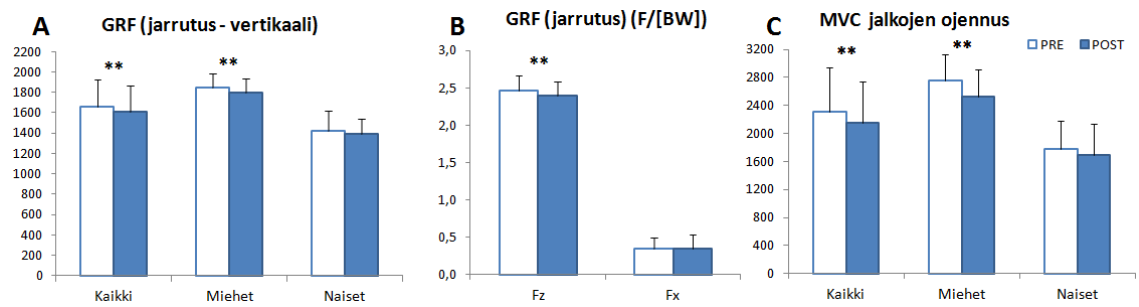


KUVA 18. Kestävyyskuormituksen alkuvaiheen (PRE) ja loppuvaiheen (POST) syke- ja hapenkulutus miehillä ja naisilla. * = $p < 0.05$ ja *** = $p < 0.0001$.



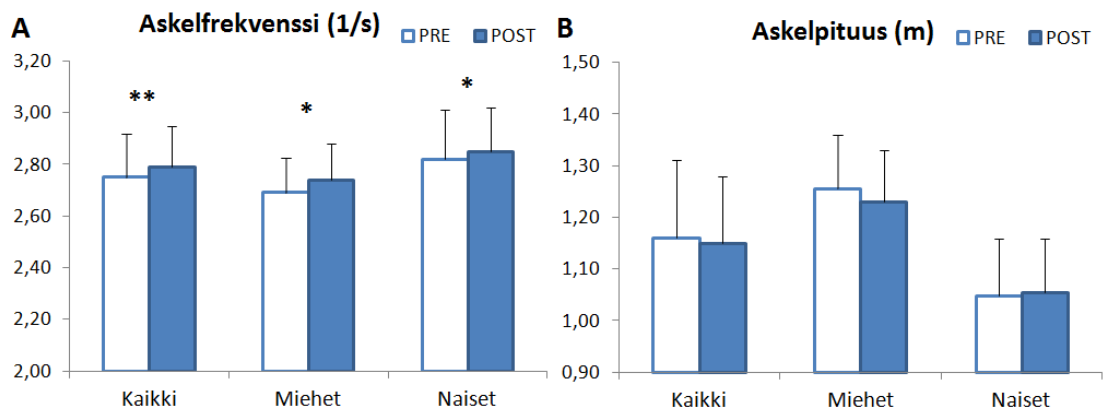
KUVA 19. Juoksun taloudellisuuden (A) ja laktaatin (B) muuttuminen kestävyyskuormituksen aikana. * = $p < 0.05$.

Neuromuskulaarisissa muuttujissa suurin muutos tapahtui miehillä isometrisen jalkojen ojennuksen heikkenemisenä (-8.2 %, $p < 0.01$) ja jarrutusvaiheen vertikaalisen kontaktivoiman laskuna (-2.9 %; $p < 0.01$). Naisilla hermolihasjärjestelmän väsymistä ei havaittu maksimivoiman, eikä juoksun kontaktivoimien osalta (kuva 20.A ja 20.C). Kehon painoon suhteutetut kontaktivoimat laskivat merkitsevästi vertikaalisessa suunnassa (-2.4 %, $p < 0.01$), mutta horisontaalisuunnassa muutoksia ei tapahtunut koko ryhmällä (Kuva 20.B) Maksimivoiman lasku oli yhteydessä sykkeen kasvuun miehillä ($R = -0.621$, $p < 0.05$) ja naisilla askelpituuden kasvamiseen ($R = -0.648$, $p < 0.05$) juoksun seurauksena, mutta voiman lasku ei ollut yhteydessä juoksun aikaisiin kontaktivoimien muutoksiin tai juoksun mekaniikkaan.



KUVA 20. Juoksun askelkontaktin jarrutusvaiheen aikaisen vertikaalivoiman (A) ja painoon suhteutetun pysty- (Fz) ja vaakavoiman (Fx) (B) ja isometrisen maksimivoiman (C) muuttuminen kestävyyskuormituksen seurauksena. ** = $p < 0.01$.

Askelmuuttujista ainoastaan askeltaiheys muuttui, kasvaen sekä miehillä että naisilla 1.8 ja 1.1 %, vastaavasti ($p < 0.05$) (kuva 21). Naisilla askelpituuden kasvu oli suoraan verrannollinen jarrutusvaiheen vertikaalisuunnan voimantuoton kasvuun ($R = 0.709$, $p < 0.032$).



KUVA 21. Juoksun askelfrekvenssin (A) ja askelpituuden (B) muutokset kestävyyskuormituksen seurauksena. * = $p < 0.05$ ** = $p < 0.01$.

8 POHDINTA

Tämän tutkimuksen tarkoituksena oli selvittää, miten väsymys submaksimaalisessa tunnin kestävyysjuoksussa ilmenee hengitys- ja verenkiertoelimistön ja/tai hermolihasjärjestelmän toimintaa kuvaavissa muuttujissa. Juoksu nosti merkittävästi sykettä molemmilla sukupuolilla. Hapenkulutus kasvoi painokiloa ja matkaa kohden merkittävästi vain miesten ryhmällä. Miehillä suorituskyvyn lasku oli myös voimakkaampaa hermolihasjärjestelmän toimintaa kuvaavissa muuttujissa, kuten isometrisessä maksimivoimassa ja submaksimaalisen juoksun kontaktivoimissa, joissa naisten ryhmällä ei tapahtunut vastaavia muutoksia. Juoksun askelmuuttujista askeltiheys laski miesten ryhmällä kestävyyskuormituksen seurauksena. Juoksun mekaniikan muutokset eivät olleet yhteydessä maksimivoiman muuttumiseen.

8.1 Kardiovaskulaariset muutokset

Tunnin kestävyyskuormitus noin 80 % vVO_2 max teholla sai aikaan molemmilla ryhmillä odotetusti selvän ($p < 0.001$) sydämen lyöntitiheyden kasvun kuormituksen aikana. Keskimäärin sykevaste kasvoi 7.2 % molemmilla ryhmillä ollen miesten ryhmässä 6.2 % ja naisten ryhmässä 4.3 %, vastaavasti. Kyröläisen ym. (2000) tutkimuksessa maratonkuormitus aiheutti progressiivisen sykkeen nousun läpi juoksun ollen lopussa 14 % korkeammalla lähtötilanteeseen verrattuna. Tässä tutkimuksessa mitattu pienempi sykevaste on linjassa tutkimusten erilaiseen kuormituskeston. Miesten ryhmässä sykkeen nousu oli yhteydessä isometrisen maksimivoiman laskuun. Muutenkin vasteet näyttivät olevan voimakkaampia miesten ryhmässä. Hapenkulutus aikaa (VO_2) tai matkaa (RE = running economy eli juoksun taloudellisuus) kohden mitattuna kasvoi 1.5 % ja 1.4 %, vastaavasti, ($p < 0.05$) ainoastaan miesten ryhmällä.

Laktaatin vähäinen muutos molemmilla ryhmillä oli pienoinen yllätys, jota osittain selittää koeasetelma. Laktaattiarvot mitattiin lyhyen tauon aikana, noin 10 min kestävyyskuormituksen aloituksen jälkeen. Ensimmäinen 10 min juostiin hengityskaasuanalysointorin kanssa, mikä saattoi johtaa anaerobisen energia-

aineenvaihdunnan lievään korostumiseen suorituksen alkupuolella ennen kuin energian tarve ja tuotto kohtasivat. Suoritus helpottuikin monien tutkittavien mielestä maskin riisumisen myötä. Viimeinen 10 min kuormituksesta juostiin myös maskin kanssa, mutta tässä vaiheessa ei nähty enää veren laktaattipitoisuuden kasvua kuormituksen alkuun verrattuna (kuva 19.B). Väsymisen heijastuminen laktaatin nousuna on pitkälti kiinni myös kuormitustyyppistä (kesto ja intensiteetti) ja koeryhmän harjoitustaustasta (Finni ym. 2003). Finnin tutkijaryhmä (2003) havaitsi laktaatin kasvavan kestävyysharjoittelemattomilla henkilöillä 1.8:sta 5.3:n mmol/l 10 km juoksun seurauksena. Suorituksen pituus oli tässä tutkimuksessa vastaava kuin Finnin ym. (2003), mutta tutkittavat olivat kestävyysharjoitelleita, ja intensiteetti oli vakioitu anaerobisen kynnyksen vauhdin alapuolelle. Kyröläisen ym. (2000) tutkimuksessa puolestaan oli selvästi pitempikestoinen maratonkuormitus, mutta yhtenevää tämän tutkimuksen kanssa oli laktaatin muuttumattomuus ja koehenkilöiden kestävyysjuoksutausta. On hyvin todennäköistä, ettei tässä tutkimuksessa käytetty kuormitusmalli ollut riittävän tehokas, jotta laktaatin tuotto kuormituksen alussa tai lopussa selittäisi kuormituksen aikana tapahtuvaa mahdollista väsymystä vetyionien pitoisuuden lisääntymisen myötä (McArdle ym. 2001, 302). Anaerobisen kynnyksen vauhdilla toteutettu kuormitus (laktaatti noin 3 – 5 mmol/l) olisi saattanut aiheuttaa suurempaa väsymystä lisäten metabolista asidoosia ja häiriten glykolyysin etenemistä. (Nummela 2004a, 116 – 117). Alun pH:n laskun jälkeen happamuus ei oletettavasti olisi juurikaan lisääntynyt, mutta venytys-supistus tyyppisessä juokskuormituksessa aiheutuvat lihasvauriot olisivat voineet osaltaan lisätä myös glykokeenin hajotusta ja näin aiheuttaa kuormituksen loppupuolella väsymystä glykokeenin ehtymisen vuoksi (Nummela 2004a, 120.)

Sukupuolten välillä oli pieniä eroja muutosten merkitsevyydessä kardiovaskulaaristen ja aineenvaihdunnallisten mittareiden osalta. Naiset eivät osoittaneet samanlaista väsymystä kardiovaskulaarisissa muuttujissa kuin miesten ryhmä. Osittain erot saattavat johtua miesten selvästi kovemmasta vauhdista kuormituksen aikana, vaikka suhteellinen kuorma anaerobisen ja aerobisen kynnyksen vauhteihin olikin sama. Hapenkulutuksen kasvun ja juoksumatkan pituuden välille löytyi korrelaatio ($r = 0.56$, $p < 0.05$) kaikkien koehenkilöiden kesken. Toisaalta sukupuolten välillä ei ollut eroja

kestävyyskuormituksen vauhdissa, viimeisen 10 min hapenkulutuksessa tai sykkeessä suhteessa VO₂max-testin maksimiarvoihin.

8.2 Neuromuskulaariset muutokset

Hermolihasjärjestelmän voimantuotto-kyky laski merkitsevästi (8.2 %, $p < 0.05$) miesten ryhmällä kestävyyskuormituksen seurauksena. Naisilla isometrinen jalkojen ojennus laski keskimäärin 5.0 %, mutta muutos ei ollut tilastollisesti merkitsevä. Miehillä maksimivoiman lasku oli yhteydessä sykkeen nousuun kestävyyskuormituksen aikana ($r = -0.62$, $p < 0.05$), jonka perusteella voi oonastella neuromuskulaarisen väsymyksen näkyvän myös kasvaneena sydämen työmääränä. Maksimivoiman lasku oli moniin aikaisempiin tutkimuksiin (Lepers ym. 2000; Saldanha ym. 2008; Ross ym. 2010) verrattuna pientä, sillä edellisissä tutkimuksissa on raportoitu noin 10 – 20 % lasku isometrisessä maksimivoimassa. Toisaalta suoritettu isometrinen maksimivoiman mittaustapa on vaihdellut eri tutkimuksissa kuten myös kuormituksen kesto.

Kontaktivoimissa tai juoksun mekaanisissa muuttujissa (kontaktiajat, askeltiheys ja kontaktivoimat) ei näkynyt suuria muutoksia kun niitä tarkasteltiin submaksimaalisessa, kestävyyskuormituksen kanssa samalla vauhdilla tehdyllä testillä. Molemmilla ryhmillä nähtiin kasvua askeltiheydessä ($p < 0.05$) kestävyyskuormituksen seurauksena. Testitulokset on linjassa aikaisempien tutkimusten kanssa, jossa pitkäkestoinen kestävyyskuormitus aiheutti lähinnä muutosta kasvattaen askeltiheyttä ja lyhentäen askelpituutta ($p < 0.05$) (Kyröläinen ym. 2000). Tässä tutkimuksessa askelpituuden hienoinen lasku ei ollut tilastollisesti merkitsevää. Yleisesti ottaen muutokset juoksun kinematiikassa ovat olleet vähäisiä submaksimaalisissa kuormitusmittauksissa (Paavolainen ym. 1999b; Kyröläinen ym. 2000) kuten myös tässä tutkimuksessa.

Askeltiheyden kasvamisen johdosta on mahdollista, että lisäävän lihasaktivaatiota lyhentämällä lihaksen relaksaatioaikaa. Täten, kasvanut askeltiheys saattaa heikentää juoksun taloudellisuutta. (Kyröläinen ym. 2000). Yksi syy heikentyneen hermolihasjärjestelmän toiminnan ja juoksun taloudellisuuden heikkenemisen välillä saattaa piillä myös juoksukuormituksen aiheuttamissa lihaskudoksen mikroaurioissa. Taipale ym. (2013) havaitsivat saman tutkimuksen eri julkaisussa, että miesten

kreatiinikinaasi-entsyymien (CK) pitoisuudessa, joka on yksi lihassoluvaurioiden mittareista, tapahtui merkittävää kasvua ($p < 0.001$) juoksun jälkeen, kun naisilla muutos ei ollut tilastollisesti merkitsevä. Tällöin saattaa olla, ettei heikentyneen hermolihasjärjestelmän suorituskyvyn johdosta ole välttämättä taloudellista säilyttää alkuperäistä askeltiheyttä ja -pituutta, jolloin muutokset edellisissä juoksun mekaanisissa muuttujissa saattavat olla elimistön oma kompensatiokeino heikentyneeseen hermolihasjärjestelmän suorituskykyyn. (Williams & Cavanagh 1987; Kyröläinen ym. 2000). Lihasväsymyksen ja pienten eksentrisestä kuormituksesta syntyvien mikrorepeämien seurauksena (Taipale ym. 2014) on todennäköistä että pienet muutokset juoksun mekaniikassa ovat nähtävissä lyhyempinä ja nopeampina askelina, jotta juoksun taloudellisuus säilyisi mahdollisimman hyvänä.

Kontaktivoimissa nähtiin pientä muutosta kuormituksen seurauksena. Jarrutusvaiheen pystysuuntainen voimantuotto laski koko ryhmällä (kuva 20.B) vaakasuuntaisten voimien pysyessä muuttumattomina. Jarrutusvaiheen pystysuuntainen voimakomponentti laski miesten ryhmällä merkitsevästi (2.8 %, $p < 0.01$), mutta naisilla ei muutosta nähty (kuva 20.A). Paavolaisen ym. (1999b) mukaan väsymys voi olla perifeeristä johtuen lihassolun sisäisestä toimintahäiriöistä tai johtua lihaksen sisäisistä mikroaurioista kuten edellä mainittiin. Maksimivoiman muutoksella ei ollut yhteyttä juoksun mekaanisten muuttujien muutokseen. Jatkotutkimuksia ajatellen juoksunaikainen lihasaktiivisuuden (EMG) muutosten mittaaminen olisi antanut mielenkiintoista tietoa lihasväsymyksen kehittymisestä.

8.3 Johtopäätökset

Tämän tutkimuksen tulosten perusteella väsymys tunnin kestävyysjuoksukuormituksessa näkyy juoksun taloudellisuuden heikkenemisenä vahvemmin miehillä kuin naisilla. Myös hermolihasjärjestelmän maksimaalinen suorituskyky voi heikentyä kestävyyskuormituksen seurauksena vahvemmin miehillä kuin naisilla. Kuitenkaan joitakin, miesten ja naisten välillä syntyneitä eroja, ei voida selittää tämän aineiston perusteella. Luultavasti hermolihasjärjestelmän väsyminen tunnin kestävässä, selvästi aerobisessa (laktaatti alle 2.2 mmol/l) submaksimaalisessa

juoksukuormituksessa tapahtuu joko lihassolutasolla tapahtuvien pienten mikrovaurioiden johdosta tai ääreishermoston ja hermolihaskuitoksen neuraalisessa aktivoinnissa tai mahdollisen lievästi kohonneen happamuuden takia. Syiden tarkkaa sijaintia on vaikea täsmentää tämän tutkimuksen perusteella. Tämänkaltaisen väsyminen aiheuttaa korkeintaan lieviä muutoksia juoksun mekaniikassa.

LÄHDELUETTELO

Anderson, T., 1996. Biomechanics and running economy. *Sports medicine*, 22, 76–89.

Aunola, S., and H. Rusko. 1986. Aerobic and anaerobic thresholds determined from venous lactate or from ventilation and gas exchange in relation to muscle fiber composition. *Int. J. Sports Med.* 7, 161 – 166.

Avela, J., Kyröläinen, H., Komi, P. V. & Rama, D. Reduced reflex sensitivity persists several days after long-lasting stretch-shortening cycle exercise. *Journal of Applied Physiology*. 86, 1292 – 1300.

Bassett, D. & Howley E. 1997. Maximal oxygen uptake: “classical” versus “contemporary” viewpoints. *Med. Sci. Sports Exerc.* 29:591–603, 1997.

Bassett, D. & Howley E. 2000. Limiting factors for maximum oxygen uptake and determinants of endurance performance. *Med Sci Sports Exerc* 32, 70 – 84.

Berg, K. 2003. *Endurance Training and Performance in Runners: Research Limitations and Unanswered Questions*. *Sports Medicine*. 33, 1, 59 – 73.

Bergh, U., Sjödin, B., Forsberg, A. & Svedenhag, J. 1991. The relationship between body mass and oxygen uptake during running in humans. *Med Sci Sports Exerc.* 23, 2, 205 – 11.

Berryman, N., Maurel, D. & Bosquet, L. 2010. Effect of plyometric vs. dynamic weight training on the energy cost of running. *J Strength Cond Res.* 24, 7, 1818 – 1825.

Cavanagh PR, Lafortune MA. Ground reaction forces in distance running. *J Biomech.* 1980;13(5):397-406.

Cavagna, G. A., Komarekko, L. & Mazzolen, S. 1971. The mechanics of sprint running. *Journal of Physiology*. 217, 709 – 721.

Conley, D. L. & Krahenbuhl, G. S. 1980. Running economy and distance running performance of highly trained athletes. *Med Sci Sports Exerc* 12, 357–360.

Coyle, E. Coggan, A., Hopper, M. & Walters T. 1988. Determinants of endurance in well-trained cyclists. *J. Appl. Physiol.* 64, 2622 – 2630.

Coyle, E., Feltner, M., Kautz, S., Hamilton, M., Montain, S., Baylor, A., Abraham, L., Petrek, G. 1991. Physiological and biomechanical factors associated with elite endurance cycling performance. *Med Sci Sports Exerc*, 23, 1, 93 – 107.

Daniels, J. T. 1985. A physiologist's view of running economy. *Med Sci Sports Exerc* 17, 332–338.

Daniels, J., Scardina, N. & Hayes, J. 1984. Variations in VO₂ submax during treadmill running [abstract]. *Med Sci Sports* 16, 108

Fallowfield, J. & Wilkinson, D. 1999. Improving sports performance in middle and long-distance running. A scientific approach to race preparation. John Wiley & Sons, Chichester, England.

Finni, T., Kyröläinen, H., Avela, J. & Komi, P. V. 2003. Maximal but not msubmaximal performance is reduced by constant-speed 10-km run. *Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*. 43, 4, 411 – 417.

Foster, C. & Lucia, A. 2007. Running economy: the forgotten factor in elite performance. *Sports Medicine*. 37, 4 – 5, 316 – 319.

Gandevia, S. C. 2001. Spinal and supraspinal factors in human muscle fatigue. *Physiol Rev.* 81, 4, 1725 – 1789

Hanon C., Thepaut-Mathieu C., Vandewalle H. 2005. Determination of muscular fatigue in elite runners. *European Journal of Applied Physiology* (94), 118 – 25.

Heise, G. D. & Martin, P. E. 2001. Are variations in running economy in humans associated with ground reaction force characteristics? *European Journal of Applied Physiology.* 84, 5, 438 – 442.

Helgerud, J. 1994. Maximal oxygen uptake, anaerobic threshold and running economy in women and men with similar performances level in marathons. *Eur J Appl Occup Physiol.* 68, 2, 155 -161.

Helgerud, J., Storen, O. & Hoff, J. 2010. Are there differences in running economy at different velocities for well-trained distance runners? *European Journal of Applied Physiology.* 108, 6, 1099 – 1105.

Häkkinen, K. 1985. Factors influencing trainability of muscular strength during short term and prolonged training. *National Strength and Conditioning Association Journal.* 7, 32 – 37.

Häkkinen, K. 1994 Neuromuscular fatigue in males and females during strenuous heavy resistance loading, *Electromyogr Clin Neurophysiol.* 34, 4, 205 – 214.

Häkkinen, K., Kallinen, M., Izquierdo, M., Jokelainen, K., Lassila, H., Mälkiä, E., Kraemer, W.J., Newton, R.U., & Alén, M., 1998. Changes in agonist-antagonist EMG, muscle CSA, and force during strength training in middle-aged and older people. *Journal of applied physiology,* 84, 1341 –1349.

Komi, P. V. 2003. Stretch-shortening cycle. Teoksessa Komi, P. V. (toim.) *Strength and power in sport.* Blackwell publishing company, Oxford. sivut 184 – 185.

Komi, P & Nicol, C. 2000. Stretch-Shortening Cycle Fatigue. Teoksessa Nigg B., MacIntosh B. & Mesters J. (toim.) Biomechanics and Biology of Movement. Human Kinetics, (385-408).

Komi, P., Hyvärinen, T., Gollhofer, A. & Mero, A. 1986. Man-shoe- surface: special problems during marathon running. Acta Univ Oul A 179, 69 – 72.

Kyröläinen H., Avela J., Komi P. V. 2005. Changes in muscle activity with increasing running speed. J Sports Sci. (23), 1101 – 1109.

Kyröläinen H., Belli A., Komi P. V. 2001. Biomechanical factors affecting running economy. Med Sci Sports Exerc. 33 (8) 1330 – 1337.

Kyröläinen, H., Pullinen, T., Candau, T., Avela, J., Huttunen, P. & Komi, P. 2000. Effects of marathon running on economy and kinematics. ? European Journal of Applied Physiology. 82, 297 – 304.

Lambert, C., Archer, R. & Evans, W. 2001. Muscle strength and fatigue during isokinetic exercise in individuals with multiple sclerosis. Med Sci Sports Exerc. 33, 10, 1613 – 1619.

Lepers, R., Pousson, M., Maffiuletti, N., Martin, A. & Van Hoecke, J. The Effects of a Prolonged Running Exercise on Strength Characteristics. International Journal of Sports Medicine. 21, 275 – 280.

Maclaren, D., Gibson, H., Parry-Billings, M. & Edwards, R. 1989. A review of metabolic and physiological factors in fatigue. Exerc Sport Sci Rev. 17, 29 – 66.

Maughan, R., Gleeson, M. & Greenhaff, P. 1997. Biochemistry of exercise & training. Oxford university press, New York. sivut 145 – 157.

McArdle, W.D., Katch, F.I., & Katch, V.L. 2001. Exercise physiology. Williams & Wilkins, Baltimore, sivut 147, 160, 223, 400 – 402,

Mero, A., Kyröläinen, H. & Häkkinen, K. 2004. Hermolihasjärjestelmän rakenne ja toiminta. Teoksessa Mero, A., Nummela, A., Keskinen, K. & Häkkinen, K (toim.) Urheilu valmennus. VK-Kustannus, Lahti, sivut 59,

Millet, G. P., Jaouen, B., Borrani, F. & Candau R. 2002. Effects of concurrent endurance and strength training on running economy and VO₂ kinetics. *Medicine and Science in sports and Exercise* 34, 1351 – 1359.

Millet, G. P., Millet, G. Y., Hofmann, M. D. & Candau, R. B. 2000. Alterations in running economy and mechanics after maximal cycling in triathletes: influence of performance level. *Int J Sports Med.* 21, 2, 127 – 132.

Narici, M. V., Roi, G. S., Landoni, L., Minetti, A. E. & Cerretelli, P. 1989. Changes in force, cross-sectional area and neural activation during strength training and detraining of human quadriceps. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology* 59, 310 – 319.

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.

Nicol, C., Komi, P. V. & Marconnet, P. 1991. Effects of marathon fatigue on running kinematics and economy. *Scand J Med Sci Sports.* 1, 195 – 204.

Nigg B. 2000. Forces acting on and in in the Human Body. Teoksessa Nigg B., MacIntosh B. & Mesters J. (toim.) *Biomechanics and Biology of Movement.* Human Kinetics, (253-269).

Nigg B. 1999. Measuring techniques. Teoksessa Nigg B. & Herzog W. (toim.) *Biomechanics of the Musculo-skeleta System,* John Wiley & Sons, Chichester, USA, (276 - 280).

Noakes T., 2001. Lore of running. 4th edition. Human Kinetics, Leeds, sivut 25, 48 – 50, 160 .

Noakes T., 2005. The limits of human performance. Julkaisematon luentomateriaali Helsingin MM-kisojen 2005 (11.8.2005) aikaan.

Nummela, A. 2004a. Kuormitusfysiologia. Teoksessa Mero, A., Nummela, A., Keskinen, K. & Häkkinen, K (toim.) Urheiluvallmennus. VK-Kustannus, Lahti, sivut 97, 101 – 108.

Nummela, A. 2004b. Testimenetelmien kuvaukset. Teoksessa Leskinen, K., Häkkinen, K. & Kallinen, M. (toim.) Kuntotestauksen käsikirja. Liikuntatieteellinen seura ry, Tampere, sivut 52 – 57.

Nummela, A., Keränen, T. & Mikkelsen, L. 2007. Factors Related to Top Running Speed and Economy. *International Journal of Sports Medicine*. 28, 655 – 661.

Nummela, A., Paavolainen, L., Sharwood, K., Lambert, M., Noakes, T., & 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.

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.

Paavolainen, L., Nummela, A. & Rusko, H. 1999c. Neuromuscular characteristics and muscle power as determinants of 5-km running performance 31, 1, 124 – 130.

Place, N., Lepers, R., Deley, G. & Millet, G. 2004. Time Course of Neuromuscular Alterations during a Prolonged Running Exercise. *Medicine & Science in Sports & Exercise*. 36, 8, 1347 – 1356.

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, 2318-2322

Ross, E. Z., Goodall, S., Stevens, A. & Harris, I. 2010. Time Course of Neuromuscular Changes during Running in Well-Trained Subjects. *Med Sci Sports Exerc*. 42, 6, 1184-1190.

Saldanha, A., Nordlund-Ekblom, M. & Thorstensson, A. 2008. Central fatigue affects plantar flexor strength after prolonged running. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*. 18, 383 – 388.

Saunders, P.U., Pyne, D.B., Telford, R.D. & Hawley J.A. 2004a. Factors Affecting Running Economy in Trained Distance Runners. 34, 7, 465 – 485.

Saunders, P.U., Telford, R.D., Pyne, D.B., Peltola, E. M., Cunningham, R.B., Gore, C.J. & Hawley J.A. 2006. Short-term plyometric training improves running economy in highly trained middle and long distance runners. *J Strength Cond Res*. 20, 4, 947 – 954.

Sedano, M. J. Canga, A., de Pablos, C. Polo J. M. 2013. Concurrent training in elite male runners: the influence of strength versus muscular endurance training on performance outcomes. *J Neurol*. 260, 6, 1624 – 1630.

Spurrs, R. W., Murphy, A. J. & Watsford, M. L. 2002. The effect of plyometric training on distance running performance. *Eur J Appl Physiol*. 89, 1 – 7.

Støren, Ø., Helgerud, J., Støa, E. M. & Hoff, J. 2008. Maximal strength training improves running economy in distance runners. *Med Sci Sports Exerc*. 40 (6), 1087-92.

Svedenhag, J. & Sjödín, B. 1994. Body-mass-modified running economy and step length in elite male middle- and long-distance runners. *Int J Sports Med.* 15, 6, 305 – 310.

Taipale, R., Schumann, M., Mikkola, J., Nyman, K., Kyröläinen, H., Nummela, A., Häkkinen, K. 2014. Acute neuromuscular and metabolic responses to combined strength and endurance loadings: the "order effect" in recreationally endurance trained runners. *J Sports Sci.* 32, 12, 1155 – 1164.

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. 271 – 305.

Williams, K. R. & Cavanagh, P. R. 1987. Relationship between distance running mechanics, running economy, and performance. *J Appl Physiol* 63, 1236 – 1245