

PYÖRÄILYN HYÖTYSUHTEIDEN YHTEYKSIÄ

Pekka Matomäki

Valmennus- ja testausopin pro gradu tutkielma

Kesä 2017

Liikuntatieteellinen tiedekunta

Jyväskylän yliopisto

Ohjaajat: Heikki Kyröläinen

Vesa Linnamo

TIIVISTELMÄ

Pekka Matomäki, 2017. Pyöräilyn hyötysuhteiden yhteyksiä. Liikuntatieteellinen tiedekunta, Jyväskylän yliopisto, Valmennus- ja testausopin pro gradu, 113 s.

Pyöräilytyössä hyötysuhdetta (ulkoisen polkemistyön suhdetta kokonaisenergiankulutukseen) on helppo tutkia ja tällaiseen metaboliseen tehokkuuteen onkin määritelty monia erilaisia mittareita. Fysiologisten ja biomekaanisten muuttujien vaikutuksia näihin eri tavoin määritettyihin hyötysuhteisiin tunnetaan hyvinkin, mutta tätä ennen ei olla juurikaan tutkittu mitkä ovat eri tavoin määriteltyjen hyötysuhteiden keskinäiset suhteet.

Tutkimukseen osallistui 14 perustervettä fyysisesti aktiivista 31 ± 6 vuotiasta mies- ($n = 12$) ja naistutkittavaa ($n = 2$). Tutkittaville laskettiin kuusi erilaista metabolisen tehokkuuden arvoa: vakioteholla (150 W) kokonais- ja nettohyötysuhde, kaksi työhyötysuhdetta sekä taloudellisuus ja lisäksi deltahyötysuhde työ–energiankulutus regressiosuoran kulmakertoimen käänteislukuna.

Kävi ilmi, että kuusi tutkittua metabolisen tehokkuuden mittaria voidaan jakaa kolmeen ryhmään järjestyskorrelaatioiden ja faktorianalyysin mukaan. Ensimmäisessä ryhmässä ovat taloudellisuus sekä kokonais- ja nettohyötysuhde. Toisessa ovat deltahyötysuhde ja työhyötysuhde, jossa tyhjän kuorman polkemiseen käytetty energia on määritetty ekstrapoloimalla työ–energiankulutus regressiosuoraa. Kolmannessa on työhyötysuhde, jossa tyhjän kuorman polkemiseen käytetty energia on mitattu suoraan. Ryhmät eroavat toisistaan paitsi järjestyskorrelaatiolla mitattuna, myös tavoistaan reagoida fysiologiin muuttujiin. Ensimmäisen ryhmän mittarit olivat alttiimpia mitattujen fysiologisten muuttujien vaikutuksille kuin toisen tai kolmannen ryhmän hyötysuhteet: paino ($r = -0,68$, $p = 0,02$) ja maksimaalinen hapenottokyky (ml/kg/min, $r = 0,75$, $p = 0,005$) korreloivat merkitsevästi kokonaisyhyötysuhteen kanssa, mutta ei muiden hyötysuhteiden. Työssä myös todistetaan, että teoreettisesti kaikki hyötysuhteet lähestyvät deltahyötysuhdetta poljettavan tehon kasvaessa rajatta; teoreettisesti kokonaisyhyötysuhde olisi tutkittavilla 0,5 %-yksikön päässä deltahyötysuhteesta 1350 ± 750 W teholla. Lisäksi deltahyötysuhteen tarkkuudelle annetaan kaksi keskenään hyvin korreloivaa kelpoisuuden mittaria: luottamusväli sekä lokaalin deltahyötysuhteen hajonta. Näillä mittareilla deltahyötysuhteen kelpoisuus on suhteellisen heikko (esimerkiksi 95 %:n luottamusvälin pituus oli $6,9 \pm 5,2$ %-yksikköä). Tutkimuksessa tarkastellaan myös kirjallisuudessa käytettyä kahta eri tapaa mitata tyhjän kuorman polkemisen energiankulutusta ja huomataan molemmista löytyvän vastaamattomia ongelmia niiden perusteista.

Tämän tutkimuksen perusteella näyttäisi, että eri hyötysuhteet voidaan jaotella kolmeen eri ryhmään ja ne mittaavat toisistaan eriävällä tavalla mekaanista hyötysuhdetta. Näin ollen esimerkiksi deltahyötysuhteelle tehtyjen tutkimuksien tuloksia ei siis voitaisi suoraan laajentaa koskemaan muita hyötysuhteita. Lisäksi muiden hyötysuhteiden määrittysten ongelmien ja epätarkkuuksien takia näyttäisi, että Ryhmä I voisi konsistenttisuudessaan ja yksiselitteisyydessään olla paras ryhmä edustamaan yksilön hyötysuhdetta. Siitäkin huolimatta, että se ei välttämättä riittävällä tarkkuudella kuvaa luurankolihasen mekaanista hyötysuhdetta. Edelleen, tutkimus selittää aiemmin kirjallisuudessa havaitun deltahyötysuhteen heikohkon toistettavuudelle tilastollisesti teho–energiankulutus regressiosuoran epävarmuudella, minkä aiheuttaa todennäköisesti havaintopisteiden — tavallisesti 3–6 — niukka määrä.

Avainsanat: Hyötysuhde, pyöräily, taloudellisuus, teho–energiankulutus kuvaaja

ABSTRACT

Pekka Matomäki, 2017. Connections between cycling efficiencies. Faculty of Sport and Health Sciences, University of Jyväskylä, Master's thesis of Science of Sport Coaching and Fitness Testing , 113 pages

Because of its easiness, mechanical efficiency of cycling (the ratio between mechanical work and the expended energy) is widely studied and there are many differently defined indicators for this kind of metabolic effectiveness of body. Much is known about the effects of different physiological and biomechanical factors to these differently defined mechanical efficiencies. However, it has not been investigated before how these differently defined mechanical efficiencies interact with each other.

Fourteen physically active men ($n = 12$) and women ($n = 2$), aged 31 ± 6 years, participated in this study. For each subject, we calculated six different metabolic effectiveness values for cycling work: At a given load (150 W) gross- and net efficiencies, two work efficiencies and economy and in addition we calculated delta efficiency from linear work–consumed energy regression line.

We found that the studied six measurements of metabolic effectiveness can be divided into three groups based on rank correlation and factor analysis. Economy together with gross- and net efficiency belonged to Group I. In Group II there were delta efficiency and work efficiency, where the consumed energy of a zero load was extrapolated from work–consumed energy regression line. Finally, in Group III there was only work efficiency, where the consumed energy of a zero load was directly measured. Groups differed from each other not only by the rank correlation but also how they responded to physiological factors. Measures from Group I were more influenced by the investigated physiological factors than the measures from Groups II or III: For example, weight ($r = -0.68$, $p = 0.02$) and maximal oxygen consumption (ml/kg/min, $r = 0.75$, $p = 0.005$) correlated significantly with gross efficiency from Group I but not with any efficiencies from other groups. We also prove that theoretically every efficiencies asymptotically approaches delta efficiency as pedalled load increases to infinity; Theoretically gross efficiency was at 0.5 %-point neighbourhood of delta efficiency at 1350 ± 750 W load. In addition, we give two different well correlated measurements of fitness for delta efficiency: a confidence interval and a standard deviation of a local delta efficiency. Measured by these values, the fitness of a delta efficiency is relatively poor (for example, the length of a 95 % confidence interval was 6.9 ± 5.2 %-points). Lastly, we investigate two different ways to measure the energy consumption of a zero load used in the literature, and we conclude that the foundation of them both contain unanswered problems.

Based on this study, it seems that cycling efficiencies can be divided into three separated groups and they measure differently mechanical efficiency. Straight conclusion from this is that results from, say, delta efficiency cannot be straightforwardly applied to other efficiencies. In addition, based on problems and imprecisions with other efficiencies, it seems that Group I could be the best indicator for mechanical efficiency because of its consistency and unambiguity. Moreover, this study explains previously noticed poor repeatability of a delta efficiency via uncertainty of a work–consumed energy regression line. This uncertainty in turn arises, presumably, because of using too few observation points (typically 3–6).

Key words: Efficiency, cycling, economy, work–consumed energy regression line

KIITOKSET

Haluaisin kiittää ohjaajiani professoreita Heikki Kyröläistä ja Vesa Linnamoa kaikista keskusteluista ja ehdotuksista tutkimusaiheeseeni liittyen sekä tarkkasilmäisistä kommentteista lopputyön eri versioista. Kiitän myös professori Luis Alvarezia, joka alunperin kasvatti minusta tieteenekijän. Olen ilokseni huomannut, että hänen oppinsa stokastiikan parista ovat sovellettavissa suurelta osin myös liikuntatieteen tutkimukseen. Lisäksi haluaisin kiittää kaikki niitä opiskelutovereitani, jotka työpanoksellaan ovat auttaneet minua tutkimukseni: mittauksissa ja laitteiston käytöissä minua auttoivat Elias Lehtonen, Ville Malila, Leena Pirkola, Elina Virkki ja erityisesti Reetta Tenhu, joka oli niin monessa mittauksessa mukana niin aktiivisesti että minusta alkoi jo tuntua ettei minua olisi paikan päällä tarvittukaan. Haluan myös kiittää Jaakko Matomäkeä ilmaisesta, tosin toisinaan kryptisestä, tilastotiedekonsultaatiosta. Lisäksi kiittäisin kaikkia testattavaksi tulleita. Ilman teitä tutkimukseni ei olisi voinut onnistua. Erityisesti kiittäisin niitä testattuja, jotka jaksoivat tulla tekemään testini jopa kolmeen kertaan hengityskaasuanalysointorien epäluotettavuuksien takia. Lopuksi kiittäisin perhettäni, lapsiani Toukoa ja Lottaa sekä aivan erityisesti rakasta vaimonani Kaisaa, jotka jaksoivat ja kannustivat minua koko opiskeluni ajan. Ilman teitä matkani olisi ollut paljon harmaampi, kiitos kun olette tuoneet väriä ja tunnetta elämääni.

Pekka Matomäki

Liedossa 13.9.2017

”There is much pleasure to be gained from
useless knowledge”

– Bertrand Russell –

KÄYTETYT LYHENTEET

ATP	Adenosiinitrifosfaatti
$E_{0,a}$	$W_{\text{ulk}}-E_{\text{tot}}$ regressiosuorasta ekstrapoloitu arvio nollakuorman energiankulutuksesta (kJ/min)
$E_{0,m}$	Suoraan mitattu nollakuorman energiankulutus (kJ/min)
E_{lepo}	Lepoenergiankulutus (kJ/min)
E_{tot}	Kokonaisenergiankulutus (kJ/min)
EMG	Elektromyografia
η_{Δ}	Deltahyötysuhde, $= \frac{\Delta W_{\text{ulk}}}{\Delta E_{\text{tot}}}$
η_{netto}	Nettohyötysuhde, $= \frac{W_{\text{ulk}}}{E_{\text{tot}}-E_{\text{lepo}}}$
η_{tot}	Kokonaishyötysuhde, $= \frac{W_{\text{ulk}}}{E_{\text{tot}}}$
$\eta_{\text{työ}}$	Työhyötysuhde, $= \frac{W_{\text{ulk}}}{E_{\text{tot}}-E_0}$
$\eta_{\text{työ},a}$	Työhyötysuhde, kun nollakuorman polkeminen on arvioitu $W_{\text{ulk}}-E_{\text{tot}}$ regressiosuorasta, $= \frac{W_{\text{ulk}}}{E_{\text{tot}}-E_{0,a}}$
$\eta_{\text{työ},m}$	Työhyötysuhde, kun nollakuorman polkeminen on mitattu suoraan, $= \frac{W_{\text{ulk}}}{E_{\text{tot}}-E_{0,m}}$
P_{ulk}	Ulkoinen teho polkupyöräergometriyössä (W)
RER	Hengitysosamäärä (Respiratory exchange ratio)
RQ	Soluhengityksen osamäärä (Respiratory quotient)
VO_2	Hapenkulutus (l/min tai ml/min)
VCO_2	Hiilidioksidintuotto (l/min tai ml/min)
$\text{VO}_{2\text{max}}$	Maksimaalinen hapenkulutus (l/min tai ml/min/kg)
VT	Voimatehokkuus, polkemistehon tasaisuuden jakaantumisen mittari poljinkierroksessa
W_{ulk}	Ulkoinen työ polkupyöräergometriyössä (kJ/min)

Sisällys

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

KIITOKSET

1 JOHDANTO	1
2 PYÖRÄILYN LYHYT LAJIANALYYSI	2
2.1 Biomekaniikka	2
2.1.1 Voimia	2
2.1.2 Voimatehokkuus	5
2.1.3 Lihasaktivaatio	7
2.2 Pyöräilyn fysiologiaa	9
2.2.1 Maksimaalinen hapenottokyky (VO_{2max})	10
2.2.2 Kynnysarvoja	11
3 HYÖTYSUHDE	13
3.1 Eri hyötysuhteiden määritelmät	14
3.2 Työmäärien ja energiankulutuksien arviointi	23
3.2.1 Ulkoisen työn W_{ulk} arvioiminen	23
3.2.2 Soluhengityksen osamäärä ja hengityksen osamäärä	24
3.2.3 Kokonaisenergiankulutuksen E_{tot} arvioiminen	25
3.2.4 Anaerobisen energiantuoton huomioimien kokonaisenergiankulutuksessa	27
3.2.5 Lepoenergiankulutuksen E_{lepo} mittaaminen	28
3.2.6 Nollatyöenergiakulutuksen E_0 mittaaminen ja arvioiminen	28
3.2.7 Hidas VO_2 komponentti ja väsymisen vaikutus	29
3.3 Hyötysuhteen mittaamistapahtuma	33
4 HYÖTYSUHTEESEEN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT	35
4.1 Perustekijät: teho ja kadenssi	36
4.2 Kadenssiparadoksi	38
4.3 Hyötysuhde ja lihassolusuhde	39
4.4 Voima	40

4.5	Tekniikan muuttaminen	40
4.6	Hyötysuhde ja kokemus	42
4.7	Ulkoiset tekijät	44
4.8	Hyötysuhde ja sen paikka käytännössä	45
5	TUTKIMUSKYSYMYKSET	47
6	MENETELMÄT	49
6.1	Tutkittavat	49
6.2	Koeasetelma	49
6.3	Aineiston keruu	51
6.4	Validointi	52
6.5	Tilastollinen analysointi	52
6.6	Perustelut valinnoille	53
7	TULOKSET	54
7.1	Hyötysuhteiden teoreettinen samankaltaisuus deltahyötysuhteen kanssa	54
7.2	Hyötysuhteiden relaatiot	55
7.3	Tyhjän kuorman ja levon energiankulutus	58
7.4	Korrelaatiot	59
8	POHDINTA	61
8.1	Hyötysuhteiden ryhmittely	61
8.2	Ryhmät ja eroavaisuudet	63
8.2.1	Ryhmä I	63
8.2.2	Ryhmä II	64
8.2.3	Ryhmä III ja työhyötysuhteiden eroavaisuus	65
8.2.4	Ryhmän I eroavaisuus ryhmistä II ja III	69
8.3	Maksimikokonaishyötysuhde	71
8.3.1	Maksimikokonaishyötysuhde ja aerobinen kynnys	71
8.3.2	Erotus $\eta_{\Delta} - \eta_{tot}(\max)$	72
8.4	Hyötysuhteiden määrittämisen vaikeus	73
8.5	Kokemus	81

8.6 Korrelaatiot fysiologisten muuttujien kanssa	82
8.7 Parannuksia tutkimukseen	86
8.8 Johtopäätökset ja käytännön sovellukset	88
LÄHTEET	90

1 JOHDANTO

Eräs syy mikä tekee pyöräilystä mielenkiintoisen tutkittavan on sen tehokkuus. Kaikista maalla omalla voimalla tapahtuvista liikkumisen muodoista, on pyöräily edettyä kilometriä kohden tehokkain tapa liikkua (Too 1990): kun kävely kuluttaa noin 0,75 cal/painogramma/km, niin pyöräilyn energiankulutus on vain noin viidesosa tästä. Toinen seikka, mikä tekee pyöräilystä vetovoimaisen tutkimuskohteen, on sen tutkimisen helppous: polkupyöräergometria vastaan tehty ulkoinen työ on helppo mitata, samoin polkimiin tuotettu voima, jolloin päästään suhteellisen vaivattomasti käsiksi syvällisinkin tutkimuskysymyksiin. Erityisesti polkemistyön metabolinen tehokkuus, tai kokonaishyötysuhde ($= \frac{\text{ulkoinen työ}}{\text{energiankulutus}}$), on helppo määrittää, kun energiankulutus saadaan epäsuoralla kalorimetrin avulla hyvinkin tarkasti mitattua (Jeukendrup & Wallis 2005).

Liikkumisen hyötysuhdetta halutaan kahdestakin syystä tutkia. Ensinnäkin hyötysuhde — tai taloudellisuus tai metabolinen tehokkuus — on tyypillisesti nähty yhtenä tärkeimmistä komponenteista kestävyysuorituskyvyssä maksimaalisen hapenottokyvyn ja anaerobisen kynnyksen ohella (Coyle 1999; Foss & Hallén 2005; Joyner & Coyle 2008). Toisekseen, yksittäisten lihassolujen hyötysuhteita on tutkittu (Reggiani ym. 1997; He ym. 2000), jolloin tutkijoita myös kiinnostaisi tietää kuinka lähelle yksittäisen lihassolun hyötysuhdetta voi koko kehon mittakaavassa päästä (Gaesser & Brooks 1975; Ettema & Loras 2009). Tätä nimenomaista tarkoitusta varten on haluttu eristää ainoastaan liikettä edistävät komponentit ihmisessä ja päästä käsiksi niiden energiankulutukseen ja siten ainoastaan liikuttavien lihasten mekaaniseen hyötysuhteeseen. Siksi helposti ymmärrettävän kokonaishyötysuhteen lisäksi on kehitetty ja otettu käyttöön muitakin hyötysuhteita kuten (myöhemmin aliluvussa 3.1 määriteltävät) nettohyötysuhde, työhyötysuhde ja deltahyötysuhde. Näiden hyötysuhteiden teoreettisia eroja ja arveluja niiden läheisyydestä eristetyn luurankolihasen mekaaniseen hyötysuhteeseen on monissa artikkeleissa tutkittu ja sivuttu (Gaesser & Brooks 1975; Coyle ym. 1992; Horowitz ym. 1994; Chavarren & Calbet 1999; Moseley & Jeukendrup 2001; Moseley ym. 2004; Hintzy ym. 2005; Hopker ym. 2009; Ettema & Loras 2009; Hopker ym. 2016; Saunders 2016). Tämän tutkielman tarkoitus on lähestyä hyötysuhteita hieman eri kantilta ja tutkia eri hyötysuhteita enemmän käytännön tasolla ja paljastaa niiden ryhmittelyjä. Tutkielman pääteesi on osoittaa kuinka eri hyötysuhteet ovat liitoksissa toisiinsa ja miten samankaltaisesti eri hyötysuhteet toimivat. Toisin sanoen, halutaan selvittää ovatko hyötysuhteeltaan hyvät polkijat hyviä kaikissa eri hyötysuhteissa ja vaikuttavatko fysiologiset muuttujat voimakkaammin joihinkin hyötysuhteisiin.

2 PYÖRÄILYN LYHYT LAJIANALYYSI

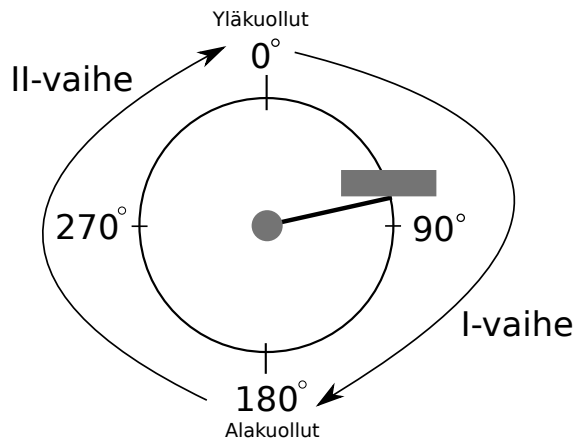
Tämän lyhyen lajiansalyysin tarkoitus on tuoda esiin biomekaniikan ja fysiologian näkökulmista pyöräilylle ominaisia seikkoja ja osoittaa näin mitkä seikat erottavat sen lajina ja suoritukseltaan muista kestävyyslajeista. Tätä aihetta lähestytään lähinnä pitkäkestoisen maantiepyöräilyn näkökulmasta ja muut pyöräilyn lajit — kuten ratapyöräily ja maastopyöräily — jätetään enemmän tai vähemmän analysoimatta. Tämä siitä syystä, että tämän tutkielman varsinainen tutkimusaihe — pyöräilyn hyötysuhde — mitataan tyypillisesti taseisella aerobisella suorituksella, mitä kaikista pyöräilyn tutkituista alalajeista sisältyy ehkä eniten juuri maantiepyöräilyyn. Tämän luvun lyhyt lajiansalyysi perustuu vahvasti valmentajaseminaarityöhön Matomäki (2016b).

2.1 Biomekaniikka

2.1.1 Voimia

Pyöräilyn eräs huomattavimpia eroavaisuuksia juoksuun on, että polkemisliike on lähes yksinomaan konsentrinen, jolloin pyöräilyssä ei voida hyödyntää juoksussa olennaisesti auttavaa venymis-lyhenemissykliä. Asmussen & Bonde-Petersen (1974) osoittivat, että kun juoksussa noin 35 – 53 % askeleen vastaanottamisesta tapahtuvasta negatiivisesta eksentrisestä työstä tulee uudelleen käyttöön juoksun ponnistusvaiheessa, on vastaava luku pyöräilyssä hyvin lähellä 0 %, johtuen siitä, että pyöräilyssä aktiivista lyhenemistä (alaspolkaisuvaihe) seuraa rentoutusvaihe (ylönosto) kun taas juoksussa venytystä (askeleen vastaanottaminen) seuraa välittömästi aktiivinen lyheneminen (ponnistus), jolloin kuminauhamaisesti venyneet jänteet voivat palauttaa osan energiasta liikkumiseen. Myöhemmin on tosin huomattu, että pohkeen lihaksissa näyttäisi pyöräillessäkin tapahtuvan pientä venymislyhenemissykliä etenkin suurella kadenssilla, eli pyöritysnopeudella (Abbiss & Laursen 2005). On huomattu, että puhdas konsentrinen työ aiheuttaa huomattavasti vähemmän mekaanista lihasvauriota kuin eksentrisen työ (esimerkiksi Jamurtas ym. 2000). Kun lisäksi alustaan tuotetut voimat ovat pyöräillessä huomattavasti pienempiä kuin esimerkiksi juoksussa (Cavanagh & Lafortune 1980; Gregor ym. 1991), on ymmärrettävää, että pyöräilystä johtuvat lihasrasitukset ja -vauriot on pieniä verrattuna juurikin esimerkiksi juoksuun. Tämä taas mahdollistaa huomattavan suuren harjoitteluvolumin pyöräilyssä: Yli 1200 tunnin harjoittelumäärät vuosittain eivät ole tavattomia ammattipyöräilijöillä (Faria ym. 2005b).

Pyöräilyn voimantuottoa tarkastellaan useimmiten yhden kampikierroksen ajalta, ja kampikierros voidaan jakaa kuvan 1 tavoin kahteen vaiheeseen: alaspainamisen I-vaihe ja polkimen ylöstuomisen II-vaihe. Voimantuotossa esiintyy pientä vaihtelua kampikierroksesta toiseen ja

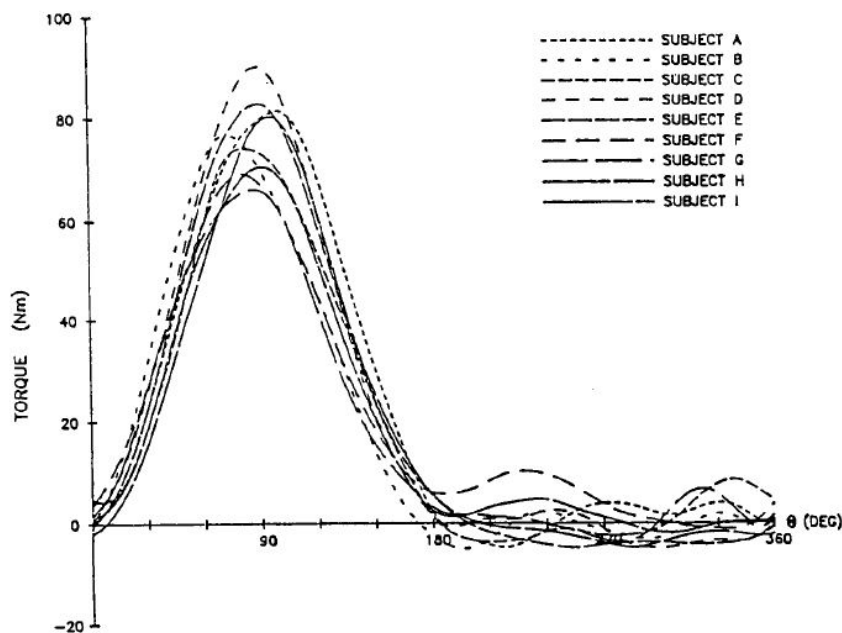


KUVA 1: Poljinkierros (kuvassa oikea poljin sivulta katsottuna) jaetaan I- ja II-vaiheisiin. Näiden välillä on yläkuollut ja alakuollut alue (noin 10–20 asteen kokoiset), joissa voimantuotto on hyvin minimaalista.

lisäksi voimantuotossa on variaatiota ihmisten välillä (Gregor ym. 1991), mutta pääsääntöisesti voimantuotto muistuttaa kuvan 2 käyriä. Suurin voima tuotetaan 90 – 110 ° kulmalla poljinkierroksen I-vaiheessa ja II-vaiheessa positiivista voimaa ei juuri tuoteta normaalissa matka-ajossa. Tyypillisesti poljinta nostetaan aktiivisesti II-vaiheessa vain ylimääräisen tehontuoton tarpeessa (kuten sprintatessa), mutta yksilökohtainen tekniikkavariaatio on jälleen suurta.

Kadenssi, eli poljinfrekvenssi, vaikuttaa myös voimantuoton profilliin; kadenssin nostamisen seurauksena yhden poljinkierroksen aikainen voimantarve vähenee ja siten maksimivoima-
piikki madaltuu. Lisäksi maksimivoima-
piikki siirtyy kadenssin kasvaessa hieman eteenpäin, minkä voisi ajatella johtuvan lihasaktivaation ja lihastyön ajallisesta viiveestä (Bertucci ym. 2005).

Juoksusta poiketen pyöräilyssä kehon omalla painolla ei ole juurikaan merkitystä voimantuoton tarpeeseen tasamaalla liikkuessa, mikä tekee siitä pehmeän harjoittelumuodon nivelille ja siten hyvän harjoittelumuodon myös ylipainoisille ja kuntoutuville (Fonda & Sarabon 2010). Suurilla tehoilla polkimiin kohdistuva maksimivoima istuen polkien on noin $0,8 \times$ kehon paino (~ 600 N, 430 W, 90 rpm) ja seisaalteen $1,6 \times$ kehon paino (~ 1100 N, 370 W, 83 rpm) (Gregor ym. 1991). Ylämäkeen tehtävässä maksimaalisessa kiihdytyksessä voi hetkellinen voima olla $3,1 \times$ kehon paino (~ 2200 N, Gregor ym. 1991). Vertailuna, kestä-



KUVA 2: Tyypillinen kampeen kohdistuva vääntökuvaajia (eli efektiivisen voimantuoton kuvaajia) yhdeksällä ammattipyöräilijällä. Huomaa II-vaiheen (180° – 360°) huomattavasti vähäisempi voimantuotto I-vaiheeseen (asteet 0° – 180°) verrattuna. Kuva: Coyle ym. (1991).

vyysjuoksussa maksimivertikaalivoima 16 km/h nopeudella on jokaisella askeleella noin $3\times$ kehon paino (Cavanagh & Lafortune 1980).

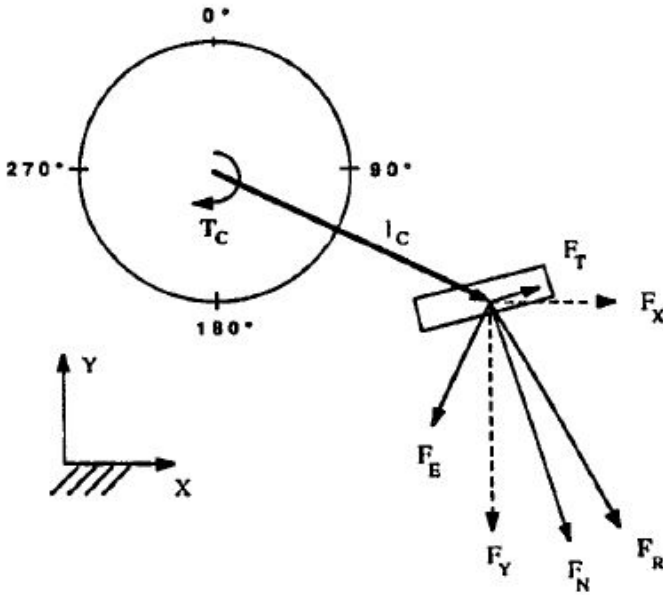
Liikettä vastustavista voimista ylivoimaisesti suurin on ilmanvastus: yli 30 km/h nopeuksilla ilmanvastuksen voittamiseen kaikista vastustavista voimista menee $> 80\%$ käytetystä energiasta (Kyle 1979; Too 1990; Faria ym. 2005a). Suurin ilmanvastusta pienentävä seikka maantiepyöräkilpailuissa on muiden pyöräilijöiden peesaaminen, tarkoittaen ajamista toisen takana niin, että etummainen joutuu halkomaan ilmaa takana tulevan saadessa polkea ilmanvastukselta osittain suojattuna. Hapenkulutuksella ja tehoissa mitattuna peesauksen etu on noin 20 – 40 % riippuen paljolti ylläpidettävästä nopeudesta ja peesauksen laajuudesta. Jonossa peesauksen etu 32 km/h vauhdilla on noin 18 %, 40 km/h nopeudella 25 – 30 %, 45 km/h nopeudella 30 – 35 % ja 60 km/h nopeudella 30 – 36 %. Pääjoukkoa mallintaen, kahdeksan pyöräilijän peesaaminen 40 km/h nopeudella tuo noin 40 % energiansäästön (Kyle 1979; McCole ym. 1990; Broker ym. 1999; Jeukendrup ym. 2000; Edwards & Byrnes 2007).

2.1.2 Voimatehokkuus

Tyypillisin tapa mitata polkemistekniikan tehokkuutta on metaboliseen energiankulutukseen perustuva hyötysuhde (josta tarkemmin luvussa 3). Seuraavaksi yleisin tapa on mitata polkimiin tuotettua voimaa ja johtaa siitä jokin suure kuvaamaan polkemisen tasaisuutta, ts. kuinka hyvin polkija saa voimantuoton tasattua koko poljinkierroksen aikana tapahtuvaksi eikä vain yksittäiseksi voimapiikiksi (esimerkiksi Coyle ym. 1991; Korff ym. 2007; Edwards ym. 2009; Leirdal & Ettema 2011b,a). Usein tällaisilla voiman tasaisuuden mittareilla yritetään kuvata pyöräilijän teknistä osaamista (Sanderson 1991; Korff ym. 2007). Eräs tällainen on *voimatehokkuus* VT (index of force effectiveness), joka lasketaan kaavalla

$$VT = \frac{\int_0^{2\pi} F_e(\theta) d\theta}{\int_0^{2\pi} F_{tot}(\theta) d\theta},$$

missä F_{tot} on resultanttivoima, F_e on efektiivinen voima (ts. polkemista edistävä voima) ja θ kammien kulma poljinkierroksen aikana (katso kuva 3).



KUVA 3: Polkemisessä polkimeen kohdistetut merkittävimmät voimat. F_X , F_Y = akselien suuntaiset voimat; F_T = polkimen tangentiaalinen voima; F_N = polkimen normaalivoima; F_E = efektiivinen voima, kammien suhteen 90° kulmassa; F_R = resultanttivoima (eli kokonaisvoima); T_C = kampeen kohdistuva vääntö; I_C = kammien pituus. Käytännössä polkimeen sijoitettu voimalevy mittaa F_T ja F_N , joista voi laskea polkimen asteen tuntiessa väännön ja loput voimat. Polkupyöriin sijoitettavat SRM voimamittauskammet mittaavat käytännössä vääntöä. Väännöstä saadaan edelleen kammien pituuden kanssa tulona teho ($P = T_C \times I_C$). Kuva: Coyle ym. (1991).

Muita mahdollisia mittareita ovat väännön tasaisuus (evenness of torque), joka voidaan määrittellä esimerkiksi kampikierroksen keskimääräisen ja maksimaalisen väännön suhteena (katso Korff ym. 2007) tai vaihtoehtoisesti minimiväännön suhde maksimivääntöön (Edwards ym. 2009). Hieman samantyylinen mittari on myös kuolleen alueen koko (dead center size), jossa minimipoljinvoimaa verrataan keskimääräiseen poljinvoimaan (Leirdal & Ettema 2011b,a). Nimitys tulee siitä, että pyöräilijä ei tuota juurikaan voimaa (minimipoljinvoima) polkimien ylä- ja ala-asennoissa, joita kutsutaan kuolleiksi alueiksi.

Intuitiivisesti ajatellen mitä suurempi voimatehokkuus on, sitä vähemmän voimaa menee hukkaan polkiessa ja sitä parempi on polkijan tekniikka. Tyypillinen valmennuskirjallisuus suosiikin pyöritystekniikassa koko poljinkierroksen aikaista voimantuottoa, keskittyen jalan ylösnostoon ja kuolleiden kohtien (poljinkierroksen ylä- ja alakohdan) aktivoimiseen. Tästä huolimatta, hieman yllättäen, tutkimukset voimatehokkuudesta eivät ole mitenkään yksiselitteisiä eikä ole kovinkaan selvää miten voimatehokkuutta tulisi käyttää tekniikan parantamisen apuna. (Bini ym. 2013.)

Voimatehokkuuden ja suorituksen (tehontuoton) välillä vallitsee toispuolinen suhde. VT :n kasvaminen nostaa tehontuottoa, mutta toisaalta tehontuoton nostaminen ei välttämättä paranna voimatehokkuutta (esimerkiksi keskittyen jalan alaspainamiseen alaspainamisvaiheessa nostaa tehoa mutta pienentää VT :tä). Myös hyötysuhteella on epäselvä suhde voimatehokkuuteen. Hyvä hyötysuhde ei nimittäin edellytä korkeaa VT :tä, mutta korkea VT (ylös nostamisen tehostaminen) usein heikentää taloudellisuutta (Korff ym. 2007; Bini ym. 2013), lähinnä koska tällöin ylösnostovaiheessa työskennellään aktiivisesti polven ja lantion koukistajilla, jotka eivät ole niin voimakkaita ja tehokkaita kuin vahvat ojentajalihakset (Korff ym. 2007; Mornieux ym. 2008). Vaikka VT :n nostaminen saattaa heikentää taloudellisuutta, myös sen laskeminen — esimerkiksi väsymisen vaikutuksesta — johtaa helposti pienempään hyötysuhteeseen (Castronovo ym. 2013). Näin ollen voimatehokkuutta ja hyötysuhdetta voisikin käyttää rinnakkain toisiaan tukien, mutta on syytä pitää mielessä, että ne mittaavat eri asioita. Syytä voimatehokkuuden ja metabolisen hyötysuhteen heikkoon yhteyteen selitetään ainakin kolmella tavalla. Ensimmäkin on esitetty, että suurella voimatehokkuudella (eli panostamalla koko poljinkierroksen aikaiseen voimantuottoon) nostetaan samalla huomattavasti sisäisten voimien tarvetta (Leirdal & Ettema 2011a), mikä heikentäisi hyötysuhdetta. Toisekseen voimatehokkuus riippuu paljolti alaspolkaisun aikana tuotetusta voimasta, koska polkiessa ei jalkojen nostaminen tuo juurikaan lisävoimaa (Leirdal & Ettema 2011a). Kolmanneksi nostovaihetta korostettaessa käytetään enemmän harjaantumattomia ja siten hyötysuhteeltaan heikompia koukistajalihaksia, mikä laskee metabolista

hyötysuhdetta vaikka nostaakin voimatehokkuutta (Korff ym. 2007; Mornieux ym. 2008). Lisää epäselvyyttä kokonaiskuvaan tuovat Theurel ym. (2012), jotka antoivat polkemisen aikana välitöntä voimantuottopalautetta kuvamuodossa (pyrkimyksenä tasainen voimantuotto). Näin saatu tasaisempi voimantuotto aiheutti pienemmän väsymyksen kuin polkijoiden itsensä suosima tekniikka 45 minuutin polkemisen jälkeiseen 5 sekunnin maksimitestiin.

Verrattaessa kokemuksen vaikutusta on löydetty tuloksia, joissa eliittipyöräilijöillä on parempi voimatehokkuus (Takaishi ym. 1998; García-López ym. 2016), samanlainen voimatehokkuus (Sanderson 1991) ja huonompi voimatehokkuus (Coyle ym. 1991) kuin harrastelijoilla/amatööreillä. Yleissääntönä onkin, että pyöräilijöillä on parempi voimatehokkuus kuin ei-pyöräilijöillä, mutta kilpailijoiden ja harrastelijoiden välillä eroa ei ole helppo löytää (Bini & Carpes 2014, Luku 5). Voimatehokkuutta onkin kritisoitu tekniikan mittarina (Korff ym. 2007; Bini & Diefenthaler 2010), sillä tekniikan muutoksen vaikutus esimerkiksi ylösnostovaiheen polven ja lantion koukistuksen aikasiin nivelien momentteihin eivät välity voimatehokkuudesta (Bini & Diefenthaler 2010). Lisäksi voimatehokkuudessa näyttäisi olevan suurta vaihtelua yksilöitten välillä: Toiset tuottavat positiivista efektiivistä voimaa ylösnoston aikana (Zameziati ym. 2006; Hug ym. 2008), toisilla voimat ovat hyvin olemattomat (Coyle ym. 1991; Sanderson 1991) ja toiset osoittavat negatiivista efektiivistä voimaa ylösnostovaiheessa (Coyle ym. 1991; Zameziati ym. 2006). Lisäksi jotkut yksilöt saattavat vaihdella ylösnostovaiheen voimantuottoa tehontuoton kasvaessa (Sanderson 1991).

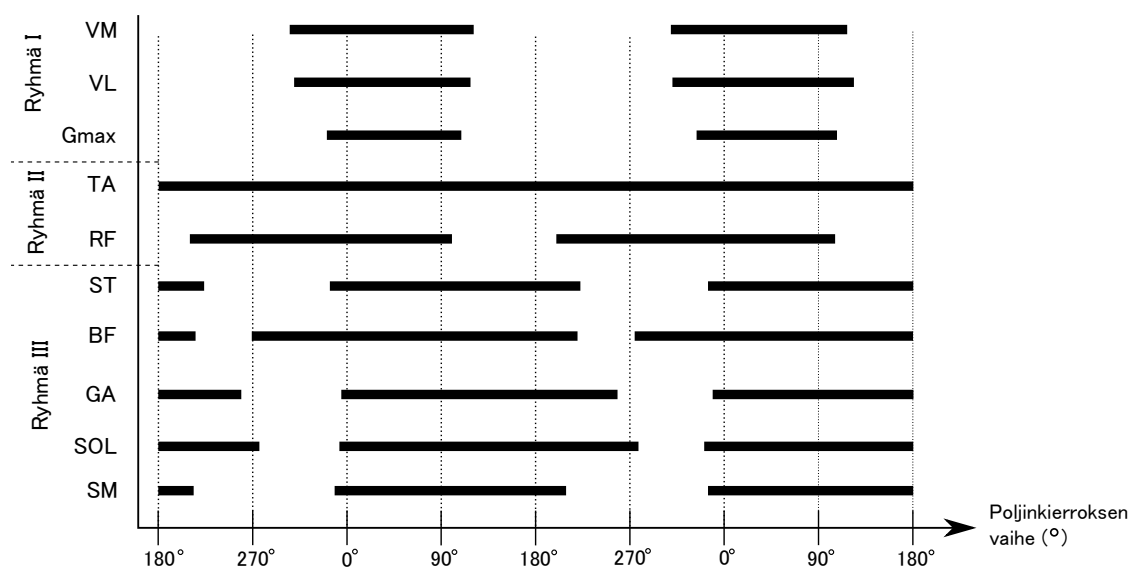
Yleissääntönä voisi sanoa, että lyhytaikaisen tehon maksimoimiseksi (esimerkiksi sprinttiin tai ylämäkeen polkemiseen) VT :n maksimoiminen tuottaa parhaimman tuloksen energiankulutuksen kustannuksella, mutta matkapolkemisessa, jossa hyötysuhteen maksimoiminen olisi olennainen, suhde on epäselvempi (Blake ym. 2012). Voisikin siis olla, että pyöräilijöillä on oman anatomian, lihassolusuhteen, harjoittelun, pyörän säätöjen, maastonmuodon ja kilpailutilanteen määräämä ”paras” tekniikka, eikä voimatehokkuus yksinään välttämättä parhaiten pysty sitä kuvaamaan.

2.1.3 Lihasktivaatio

Huomattava ero pyöräilyssä moniin muihin liikkumismuotoihin verrattuna on liikkumiseen käytettyjen raajojen ennakkoon määrätty ympyräinen etenemisrata. Ajoasennon (satulan korkeuden, satulan paikka suhteessa polkimiin, ohjaustangon etäisyys satulasta, poljinkampien pituuden valinta) kiinnittämisen jälkeen suurimmat tekniikkaan vaikuttamiskeinot pyö-

räilijällä ovat kadenssin muuttaminen, polkeminen seisaaltaan tai istuma-asennossa sekä tiedostamattomampi lihasaktivaatioiden ajoitusten ja suuruuksien muuttaminen. Käytännössä pyöräilyn tekniikkaa analysoitaessa mitataan joko tuotettuja voimia ja voimatehokkuutta tai mitataan lihasten aktivaatioita hyödyntäen EMG-mittausta (Bini ym. 2013).

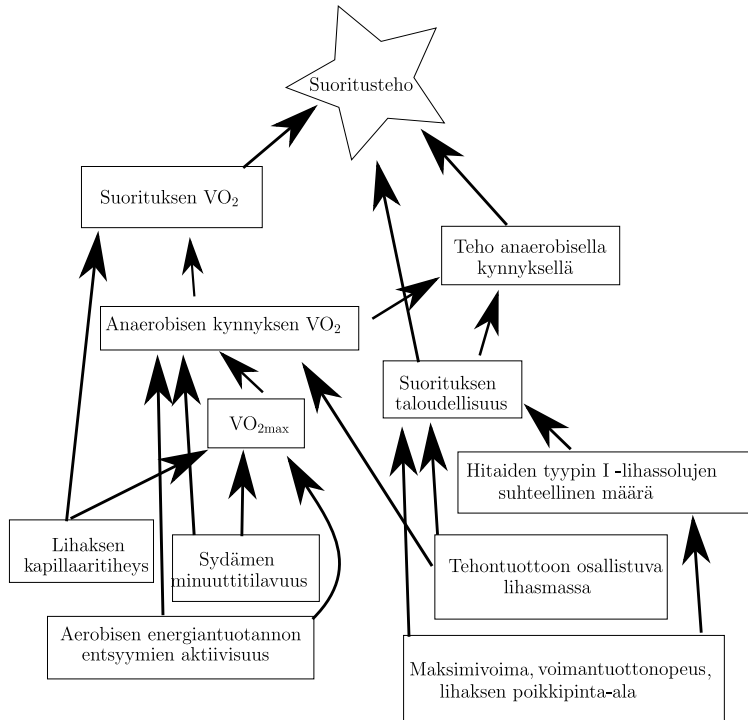
Lihasktivaatioissa on suuria yksilöllisiä eroja ja jopa samalla yksilöllä on eroa poljinkierroksesta toiseen (Gregor ym. 1991). Näistä vaihteluista huolimatta lihasaktivaatioissa on huomattu myös paljon yhteneväisyyksiä, ja tyypilliset lihasaktivaatiot päälihaskryhmiltä on piirretty kuvaan 4. Raasch & Zajac (1999) esittivät polkemistekniikan jakamalla lihakset kolmeen ryhmään niiden tarkoituksen mukaan (lyhenteet kuvan 4 kuvateksistä): *Ryhmä 1*: yhden nivelen yli menevät polven sekä lantion ojentajat ja koukistajat (Etureisi: VM, VL; takareisi: BF:n lyhyt pää; lantio: GMax, Iliopsoas); *Ryhmä 2*: jalan etuosan muut suuret lihakset: TA sekä kahden nivelen yli menevä RF; *Ryhmä 3*: Jalan takapuolella olevat kahden nivelen yli menevät hamstring-lihakset (ST, SM, BF:n pitkä pää) sekä pohkeen lihakset (SOL, GL, GM). Ryhmän 1 tehtävä on tuottaa polkemiseen tarvittava voima, kun taas ryhmien 2 ja 3 pääasiallinen tarkoitus on suunnata ja välittää voimaa. Ryhmä 2 auttaa siirtymisestä I-vaiheesta II-vaiheeseen ja ryhmä 3 auttaa II-vaiheesta uuden I-vaiheen aloittamiseen.



KUVA 4: Hetket jolloin pyöräilyn päävaikuttajalihakset ovat aktiivisia kahden poljinkierroksen aikana EMG:n mukaan, ryhmitettynä Raasch & Zajac 1999 mukaisesti ryhmiin 1, 2 ja 3. Lihakset: Rectus femoris (RF), Vastus lateralis (VL), Vastus medialis (VM), Semimembranosus (SM), Semitendinosus (ST), Biceps femoris (BF), Gluteus maximus (GMax), Gastrocnemius (GA), Soleus (SOL) ja Tibialis anterior (TA). Aktiivisuuden aste ei luonnollisestikaan ole koko ajan sama. Data saatu Gregor ym. (1991); Fonda & Sarabon (2010).

2.2 Pyöräilyn fysiologiaa

Fysiologisesti pyöräily ei eroa juurikaan muista kestävyyslajeista. Eräs näkemys yleisesti kestävyysurheiluun vaikuttavista fysiologisista ominaisuuksista on koottu kuvaan 5. Suurimmat erot muihin suosittuihin lajeihin (uinti, juoksu ja soutu) ovat hyvin pitkien kilpailujen takia rasva-aineenvaihdunnan tärkeys sekä yllättävän pieni ero liikkumisen taloudellisuudessa eri polkijoiden välillä.



KUVA 5: Kestävyysuorituskykyyn vaikuttavia päätekijöitä ovat anaerobinen kynnyks ja liikkumisen taloudellisuus. Huomataan, että VO_{2max} on tärkeä lähinnä koska se määrää kuinka korkea anaerobinen kynnyks voi olla. Kuvasta nähdään karkeasti mitkä tekijät vaikuttavat näihin ominaisuuksiin. Kuva muokattu Rønnestad (2015).

Toisaalta voidaan ajatella (Foss & Hallén 2005), että kestävyysuorituskin on yksinkertaisesti sama kuin liikkumisnopeus (yksikkönä m/s). Edelleen nopeus voidaan — lähes lajissa kuin lajissa — nähdä kaavana

$$\text{Nopeus } (m/s) = \text{Energiantuottovauhti } (J/s) \times \text{Taloudellisuus}(m/J), \quad (1)$$

missä energiantuottovauhti kuvaa sitä paljonko keho pystyy tuottamaan energiaa sekunnissa ja taloudellisuus sitä montako metriä henkilö etenee yhtä kulutettua joulea kohden. Tämä on hyvin yksinkertainen ja yleinen malli, mutta periaatteessa se toimii niin pikajuoksussa, kestävyysjuoksussa, soudussa, pyöräilyssä, jne. Tämän mallin mukaisesti on kaksi

tapaa nostaa vauhtia: joko kasvattaa energiantuottovauhtia (pitäen taloudellisuuden vähintään samana) tai vaihtoehtoisesti parantaa taloudellisuutta (pitäen energiantuottovauhdin vähintään samana). Ajateltuna tätä kaavaa kestävyysuorituksen valossa, kuvasta 5 voidaan tulkita, että pyöräilyssä — kuten kestävyysurheilussa yleisestikin — VO_{2max} ja anaerobinen kynnyks määrittävät suorituksen energiantuottovauhdin ja taloudellisuus määrittää varsinaisen suoritusnopeuden. Huomioitavaa on tosin, että suorituksen aikana on lisäksi mahdollisesta anaerobisesta työskentelystä lihaksiin kertyviä kuona-aineita kyettävä sietämään ja puskuroimaan, ja myös kevyempien vaiheiden aikana poistamaan.

2.2.1 Maksimaalinen hapenottokyky (VO_{2max})

Aerobinen energiantuottosysteemi on kestävyysurheilussa usein määräävin tekijä suoritukselle, ja VO_{2max} kuvaa henkilön maksimaalista kykyä hyödyntää aerobista energiantuottosysteemiä. Yksikkönä tälle suurelle on hapenkulutus minuutissa (l/min) tai hapenkulutus minuutissa painokiloa kohti (ml/kg/min). Maksimaaliseen hapenottokykyyn vaikuttavat mm. sydämen minuuttitilavuus (veren virtaavuus), veren kokonaihemoglobiini (kuljetuskapasiteetti), verenvirtaus lihaksessa ja lihaksen kyky hyödyntää happea (hapen käyttöönotto) (Joyner & Coyle 2008). Kirjallisuudessa toisinaan pohditaan onko suurin rajoite maksimaaliselle hapenottokyvyille periferinen (lihakset eivät kykene hyödyntämään tulevaa happea) vai sentraalinen (sydän ei pysty pumppaamaan ja kuljettamaan riittävästi happea lihaksille) (Joyner & Coyle 2008). Se, että veridoping (verimäärän lisääminen) parantaa maksimaalista hapenkulutusta, antaisi ymmärtää, että sentraalinen syy olisi rajoite (Abbiss & Laursen 2005). Tätä tukee myös se fakta, että sydämen minuuttitilavuus korreloi vahvasti maksimaalisen hapenottokyvyn kanssa (McArdle ym. 2007, sivut 484–485). Toisaalta on huomattu, ettei veren läpivirtaus muutu kun lihaksen aktivaatio kasvaa 64 %:sta 100 %:iin, mikä antaisi viitteitä, että verenvirtaus periferisesti lihaksessa olisi rajoittava (Abbiss & Laursen 2005). Niinpä voitaisiinkin päätyä johtopäätökseen, että sentraalinen syy olisi enemmän rajoittava, mutta myös periferinen syy olisi jossain määrin rajoitteena.

Maksimaalisen hapenottokyvyn arvoista arvellaan, että huippulahjakkailta kestävyysurheilujamiehillä VO_{2max} lähtötaso olisi noin 60 ml/kg/min ilman harjoittelua (vrt. Coyle 2005), kun kansainvälisellä tasolla pärjävillä kestävyysurheilijoilla se on usein 70 – 80 ml/kg/min (Padilla ym. 1999). Urheilijanaissilla VO_{2max} on yleensä noin 10 % matalampi pienemmän hemoglobiinimassan ja suuremman kehon rasvaprosentin takia (Joyner & Coyle 2008).

2.2.2 Kynnysarvoja

On näytetty, vaikka $VO_{2\max}$ olisikin samalla tasolla, niin korkea laktaattikynnys¹ (hapenkulutus kynnyksellä 81,5 % vs. 65 % $VO_{2\max}$) auttaa jaksamaan tuplasti kauemmin korkealla intensiteetillä (88 % $VO_{2\max}$). Hieman samaan päädyttiin myös tutkimuksessa Coyle ym. (1991), jossa eliittipyöräilijöitä verrattiin hyviin kansallisiin (yhdysvaltalaisiin) pyöräilijöihin, ja eliittipyöräilijät kykenivät ylläpitämään 1h aika-ajossa suurempaa intensiteettiä (90 % vs. 86 % $VO_{2\max}$) vaikka maksimaalisella hapenottokyvyllä ei ryhmien välillä ollut eroavaisuutta. Jälleen, ryhmien välillä oli laktaattikynnyksellä havaittava ero (79 % vs. 75 % $VO_{2\max}$).

Vaikka traditionaalisesti $VO_{2\max}$:ia pidetään yhtenä tärkeimpänä kestävyysuoritusta kuvaavana parametrina (Coyle ym. 1988), sen merkitys urheilu suorituksen kannalta on enemmin erottaa harrastajat huipuista; kansainvälisellä tasolla $VO_{2\max}$ ei juurikaan pysty erottelemaan eritasoisia urheilijoita (Conley & Krahenbuhl 1980). Kuvaavaa on Persson & Persson (2012) huomautus, että pyöräily suorituksen ennustetekijöitä ovat tehontuotto laktaattikynnyksellä (so. lepolaktaatti + 1 mmol/l), korkea anaerobinen kynnys, $P_{\max} > 5,5W/kg$, suuri prosentuaalinen määrä hitaita I-lihassoluja ja takypneaattisen siirtymän puuttuminen². Huomataan, että $VO_{2\max}$ ei ollut ennustelistalla eksplisiittisesti; tokikin riittävän korkea $VO_{2\max}$ tarvitaan, jotta voidaan saavuttaa korkea anaerobinen kynnys, mutta matalahkoa $VO_{2\max}$ arvoa voi kompensoida muilla avuilla. Konkreettisempänä esimerkkinä voidaan mainita Conley & Krahenbuhl (1980), jotka huomasivat, että 10km juoksukilpailun loppuajat 30:30 – 33:30 eivät korreloineet lainkaan $VO_{2\max}$ arvon kanssa ($r = -0,12$).

Etsittäessä syitä miksi joillain yksilöillä laktaatti- ja anaerobinen kynnys on suhteessa suurempi maksimaaliseen hapenottokykyyn verrattuna on löydetty muun muassa seuraavia fysiologisia vaikuttimia: lihasten suurempi kapillaaritiheys (Coyle ym. 1988, 1991), metabolisten entsyymien erilaisuus (laktaattidehydrogenosia vähemmän ja aerobisen energiantuottosysteemin entsyymejä enemmän, Coyle ym. 1991) ja hitaiden I-lihassolujen suurempi suhteellinen osuus (Coyle ym. 1988) kaikista lihaksista. Kaikkien näiden on epäilty olevan

¹Laktaattikynnys on tässä veren laktaattipitoisuuden nousu 1 mmol/l perustason yläpuolelle, joka käytännössä on hieman Suomessa käytetyn aerobisen kynnyksen yläpuolella.

²Kun suoritustehoa kasvatetaan kevyestä lähtien tasaisesti, ventilaatio kasvaa yleensä ensin hengitystilavuutta kasvattamalla. Tietyin vaiheen jälkeen ventilaatiota kasvatetaan sekä hengitystilavuutta että hengitystiheyttä kasvattamalla. Normaalisti riittävän suurilla suoritustehoilla tapahtuu takypneaattinen siirtymä, mikä tarkoittaa, että ventilaatiota kasvatetaan vain hengitystiheyttä kasvattamalla. Takypneaattinen siirtymän puuttuminen siis tarkoittaa, että eliittipyöräilijät voivat jostain syystä nostaa hengitystilavuuttaankin koko ajan tehon kasvaessa.

ainakin jossain mielessä harjoitusadaptaatioille alttiita tapahtumia, vaikkakin lihassolujen muuntuminen II \rightarrow I on hyvin pitkä ja hidas prosessi, jos sitä tapahtuu (Henriksson 2000).

3 HYÖTYSUHDE

Kuten aikaisemmin mainittua, kuvan 5 ja yhtälön (1) mukaisesti taloudellisuus voidaan nähdä kestävyysuorituksessa tärkeänä elementtinä. Koska ergometria vastaan tehty ulkoinen, eli mekaaninen, työ saadaan tarkasti tehon avulla laskettua ja hengityskaasuista saadaan helposti mitattua epäsuoran kalorimetrin avulla energiankulutus submaksimaalisilla kuormilla, voidaan ergometryössä vaivattomasti laskea polkijan mekaaninen *hyötysuhde* tehdyn työn ja työhön kuluneen energian suhteena.

Tutkimisen helppouden takia pyöräilyn hyötysuhteen tarkastelusta on kehittynyt hyvin laaja tieteenala. Hyötysuhde on puhdas prosenttiluku, ja sellaisena sen voisi intuitiivisesti kuvitella olevan suhteellisen muuttumaton, riippumaton, vertailukelpoinen ja yleisesti osoitus polkijan metabolisesta tehokkuudesta. Asia ei ole kuitenkaan näin yksioikoinen kuten myöhemmin tässä luvussa käy ilmi; jo Gaesser & Brooks (1975) osoittivat hyötysuhteen riippuvuuden niin määritelmästä, tehosta kuin poljettavasta kadenssista. Myöhemmin on löydetty monia muitakin tehokkuuteen vaikuttavia tekijöitä, joista tärkeimpiä tarkastellaan hieman yksityiskohtaisemmin tässä luvussa. Karkeasti hyötysuhteeseen vaikuttavat tekijät voidaan jakaa sisäisiin ja ulkoiisiin tekijöihin. Ulkoisiksi tekijöiksi tässä työssä ymmärretään pyöräilijään ulkopuolelta vaikuttavat tekijät joita ovat mm. pyörään tehdyt muutokset, asentoon tehdyt muutokset ja ympäristöön tehdyt muutokset. Näitä edustavat mm. poljinkammen pituuden (Morris & Londeree 1997), satulan korkeuden (Peveler & Green 2011), korkean ilmanalan (Green ym. 2000), painovoiman (Bonjour ym. 2010) ja ylämäkeen ajamisen (Leirdal & Ettema 2011b) vaikutus hyötysuhteeseen. Sisäisiksi tekijöiksi taasen tässä opinnäytetyössä ymmärretään pyöräilijään sisältä vaikuttavat tekijät, joita ovat mm. fysiologiset ominaisuudet, poljettava kadenssi, kokemus ja poljettava teho. Näitä voisi kirjallisuudesta edustaa lihassolujakauman (Coyle ym. 1992), kadenssin muuttamisen (Ansley & Cangle 2009), monen vuoden harjoitteluadaptaation (Nickleberry & Brooks 1996; Marsh ym. 2000) ja tehon kasvattamisen (de Koning ym. 2012) vaikutus hyötysuhteeseen. Kirjallisuudessa sisäisiä tekijöitä on tutkittu huomattavasti enemmän ja tässäkin työssä pääpaino on juuri sisäisten tekijöiden tarkastelussa. Vaikka ulkoiset tekijätkin ovat tärkeitä — etenkin huippu-urheilussa kaiken muun jo ollessa korkealle tasolle viimeisteltynä — ne ovat kuitenkin loppujen lopuksi enimmäkseen yksittäisiä teknisiä tekijöitä. Tässä työssä halutaan painottaa eri hyötysuhteiden ominaisuuksia ja yhteyksiä ja näiden ominaisuuksien ja yhteyksien tutkimiseen sisäiset tekijät antavat suuremman mahdollisuuden.

Tämän luvun tarkoituksena on esitellä kirjallisuudessa useimmiten tavattavat hyötysuhteet, pohtia mitä ne yrittävät kuvata sekä näyttää miten näiden hyötysuhteiden sisältämiä energiankulutuksia voidaan käytännössä mitata ja arvioida. Varsinaisia hyötysuhteiden ominaisuuksia ja riippuvuuksia sisäisistä tekijöistä käsitellään seuraavassa luvussa.

3.1 Eri hyötysuhteiden määritelmät

Kirjallisuudessa tavataan hyvin monta erilaista hyötysuhdetta, joista käytetyimpiä ovat

$$\eta_{\text{tot}} = \frac{W_{\text{ulk}}}{E_{\text{tot}}} \quad (\textit{kokonaisyhyötysuhde}, \text{ esimerkiksi Gaesser \& Brooks 1975}),$$

missä W_{ulk} polkupyöräergometria vastaan tehty ulkoinen työ (kJ/min) ja E_{tot} kehon kokonaisenergiankulutus (kJ/min);

$$\eta_{\text{netto}} = \frac{W_{\text{ulk}}}{E_{\text{tot}} - E_{\text{lepo}}} \quad (\textit{nettohyötysuhde}, \text{ esimerkiksi Gaesser \& Brooks 1975}),$$

missä E_{lepo} on lepoenergiankulutus (kJ/min);

$$\eta_{\text{työ}} = \frac{W_{\text{ulk}}}{E_{\text{tot}} - E_0} \quad (\textit{työhyötysuhde}, \text{ esimerkiksi Gaesser \& Brooks 1975}),$$

missä E_0 on nollavastuksella polkemisen energiankulutus (kJ/min);

$$\eta_{\Delta} = \frac{\Delta W_{\text{ulk}}}{\Delta E_{\text{tot}}} \quad (\textit{deltahyötysuhde}, \text{ esimerkiksi Gaesser \& Brooks 1975}),$$

missä ΔW_{ulk} on ulkoisen työn muutos ja ΔE_{tot} kokonaisenergiankulutuksen muutos (vrt. kuva 8);

$$T \text{ (l/min/W)} = \frac{VO_2}{P_{\text{ulk}}} \quad (\textit{taloudellisuus}, \text{ esimerkiksi Rønnestad ym. 2011}),$$

missä VO_2 on hapenkulutus (l/min) ja P_{ulk} ulkoinen poljettava teho (W).

Sekä formaaliset että informaaliset pääpiirteet näistä metabolisten tehokkuuksien mittareista on esitetty taulukossa 1. Huomautettakoon, että $\eta_{\text{työ}}$ voidaan jakaa vielä mitattuun työhyötysuhteeseen $\eta_{\text{työ,m}}$ ja arvioituun työhyötysuhteeseen $\eta_{\text{työ,a}}$, missä edellisessä E_0 on

mitattu suoraan — merkitään tätä $E_{0,m}$ — ja jälkimmäisessä E_0 on arvioitu $W_{\text{ulk}}-E_{\text{tot}}$ regressiosuorasta — merkitään tätä $E_{0,a}$.

TAULUKKO 1: Viisi eri hyötysuhdetta ja taloudellisuus sekä niiden päätarkoitukset.

Hyötysuhde	Tarkoitus	Väljä määrittely
η_{tot}	Koko kehon hyötysuhde	”Kertoo kuinka metabolisesti tehokas polkija on kokonaisuudessaan”
η_{netto}	Lepohomeostaasin päälle tapahtuvan pyöräilyn hyötysuhde	”Hyötysuhde kaikelle, mille voi tapahtua harjoitteluadaptatiota”
$\eta_{\text{työ}}$	Pyöräilyn hyötysuhde ilman homeostaasin & jalkojen pyörittämisen energiankulutusta	”Luurankolihaksien mekaaninen hyötysuhde pyöräilyssä”
η_{Δ}	Pyöräilyn hyötysuhde ilman homeostaasin & jalkojen pyörittämisen energiankulutusta	”Keskiarvoistettu luurankolihaksien mekaaninen hyötysuhde pyöräilyssä”
T	Paljonko happea (\approx energiaa) kuluu poljettua tehoa kohden	”Karkea mittari kokonaishyötysuhteelle”

Puhuttaessa hyötysuhteesta, ei ole niin selvää mitä sillä varsinaisesti tarkoitetaan. Otetaan esimerkiksi kokonaishyötysuhde. Useimmiten se mielletään ulkoisen tehdyn työn ja kehon kemiallisesti ruoasta saadun energiankulutuksen suhteeksi. Mutta tätä tulkintaa käytettäessä voitaisiin nostaa kysymys tulisiko kulutettuun kokonaisenergiaan laskea mukaan myös se energiankulutus, joka on kulunut kun ruoka on pureskeltu, nielty, pilkottu glukoosiksi ja rasvoiksi ja kuljetettu varastoihin? Ilman näitä toimenpiteitä ei mekaanista työtäkään voida tehdä. Entä tulisiko kokonaisenergiaan ottaa mukaan myös potentiaalisesti hyvinkin kuormittavan ulkoisen työn jälkeinen ylimääräinen, lepotilan homeostaasiin pääsemiseen tarvittava energiankulutus (ns. EPOC, excess postexercise oxygen consumption)? (vrt. Ettema & Loras 2009.) Nähdään hyvin nopeasti, ettei niinkään selkeän kuuloinen asia kuin kokonaishyötysuhde olekaan loppujen lopuksi niin yksiselitteinen, koska ihmiskeho ei ole suljettu systeemi vaan sen energiakierto on riippuvainen niin menneisyydestä kuin tulevaisuudesta. Kuitenkin, niin tässä työssä kuin useimmissa muissakin tieteellisissä töissä, hyötysuhdetta laskettaessa energiankulutukseksi lasketaan vain akuutti nykytilan energiankulutus.

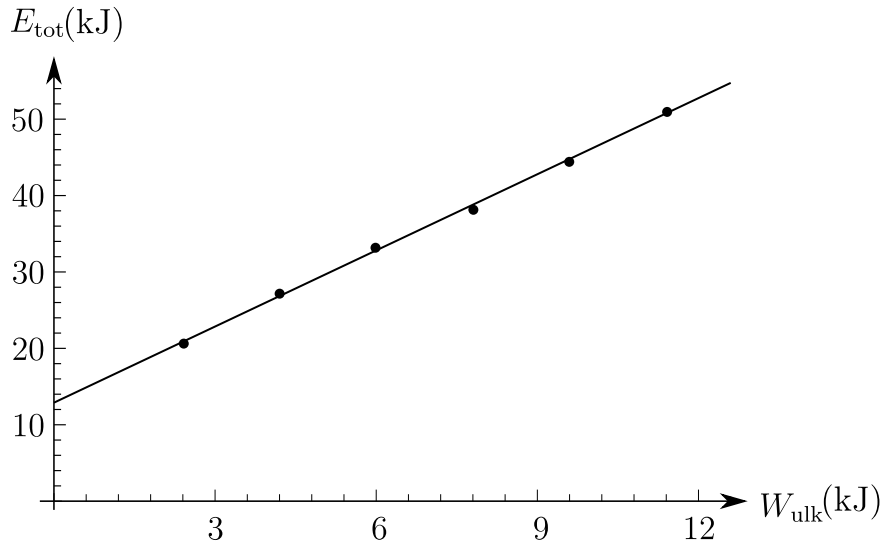
Eri hyötysuhteita käytetään toisinaan hieman leväperäisesti johtuen arvatenkin lähinnä tarkemman tutustumisen puutteesta; tutkijat eivät jokaisessa tilanteessa ole tietoisia mitä he tarkkaan ottaen haluaisivat mitata, mitä erilaisia hyötysuhteita olisi tarjolla ja mitkä ovat eri hyötysuhteiden ominaisuuksia. Niinpä seuraavaksi esitellään yksityiskohtaisemmin eri hyötysuhteet ja esitellään niiden eri puolia yleisellä teoreettisella tasolla.

Kokonaishyötysuhde (η_{tot})

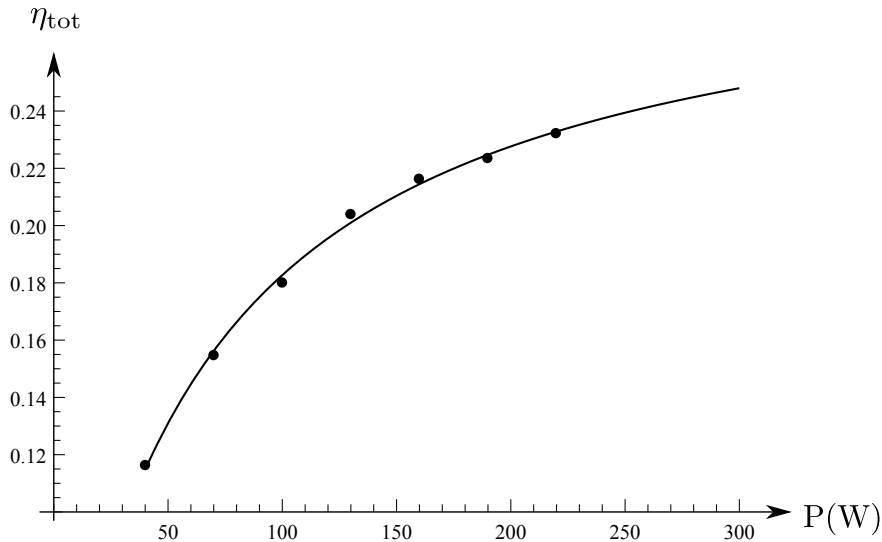
Kokonaishyötysuhde η_{tot} on ulkoisen tehdyn mekaanisen työn suhde koko kehon energiankulukseen (vrt. Gaesser & Brooks 1975; Moseley & Jeukendrup 2001; Ettema & Loras 2009). Eräs hyvä puoli on sen yksinkertaisuus. Ensinnäkin sen laskemiseen tarvitaan ainoastaan polkupyöräergometrin antama vastus (teho) sekä E_{tot} . Toisekseen se kuvaa yksinkertaisesti koko kehon hyötysuhdetta polkupyöräilytyössä. Tämä on enemmän tai vähemmän juuri se, mitä käytännössä myös pyöräilijä haluaisi tietää; kuinka tehokas hän on kokonaisuudessaan pyöräillessään. Toisaalta kokonaishyötysuhteen laaja-alaisuus voidaan nähdä myös sen huonona puolena. Jos ollaan kiinnostuneita kuinka hyvä ja tehokas pyöräilijä yksilö on, lepotilan homeostaasin ylläpitämisestä koituvaa lepoenergiankulutusta voidaan pitää irrelevanttina. Toisinaan tutkijat olisivat kiinnostuneita pelkän luurankolihasysteemin hyötysuhteesta, ja tällaisen systeemin hyötysuhdetta laskettaessa tulisi energiankulutuksesta vähentää kaikki se mikä ei suoraan auta työn tekemisessä.

Hieman pintaa syvemmälle mennessä voidaan kokonaishyötysuhdetta kritisoida siitä, että η_{tot} vääristää tehon ja hyötysuhteen välistä riippuvuutta. Nimittäin, kuten kuvasta 6 nähdään, on teho – energiankulutus kuvaaja hyvin lineaarinen, mutta nyt kokonaisenergiankulutus vääristää tätä huomiota antaen harhakuvan, että polkijan hyötysuhde kasvaisi tehon noustessa (vrt. kuva 7). Tosiasiassa tehon kasvaessa homeostaasin ylläpitoon kuluvan energiankulutuksen suhde kokonaisenergiankulutukseen vähenee kasvattaen kokonaishyötysuhdetta. Tämä kokonaishyötysuhteen kasvaminen tehon suhteen on kuitenkin ilmiö, jota jotkut pitävät merkinä kokonaishyötysuhteen kelpaamattomuudesta hyväksi mekaanisen hyötysuhteen karakterisoijaksi (Gaesser & Brooks 1975; Moseley & Jeukendrup 2001).

Koska kuitenkin yhtään selkeää ja kaikkien yhteisesti hyväksymää hyötysuhdetta luurankolihasysteemille ei ole olemassa, on kokonaishyötysuhdetta käytetty hyvin usein sen helpoudenkin vuoksi. Lisäksi, kuten alla tullaan näkemään, muut hyötysuhteet saavat paljonkin kritiikkiä osakseen, jolloin paremman puutteessa monet pitävät kokonaishyötysuhdetta parhaimpana olemassa olevista hyötysuhteista (Ettema & Loras 2009; Noordhof ym. 2015; Hopker ym. 2016).



KUVA 6: Energiankulutuksen ja poljettavan kuorman välinen suhde alle anaerobisen kynnyksen. Kuvaan on piirretty lineaarinen sovite. Data lähteestä Matomäki (2016a)



KUVA 7: η_{tot} muuttuminen tehon funktiona alle anaerobisen kynnyksen. Kuvaan on piirretty sovite $\eta_{\text{tot}} = \frac{P_{\text{ulk}}}{3,3126P_{\text{ulk}} + 216,051}$. Data lähteestä Matomäki (2016a).

Nettohyötysuhde (η_{netto})

Jotta tutkijat saisivat eristettyä luurankolihashyötysuhteen, tulisi energiankulutuksesta vähentää kaikki mikä ei koske juuri tarkasteltavan lihaksen liikuttamista — ongelmana vain on löytää oikea *vakiotasoinen vähentäminen* (baseline subtraction). Nettohyötysuhde on eräs yritys saada luurankolihashyötysuhde lasketuksi vähentämällä kokonaisenergiankulutuksesta levon metabolinen perusenergiankulutus. Päätelmä tähän on, että lepoenergiankulutus on se energiankulutus, joka pitää homeostaasia yllä riippumatta siitä onko keho räsitusstilassa vai ei (Ettema & Loras 2009). Nettohyötysuhteen kritisoijat argumentoi-

vat tämän olevan huono hyötysuhde, sillä se ei ota huomioon, että rasiustasoa nostettaessa myös homeostaasin ylläpitoon kuluu enemmän energiaa. Toisin sanoen, kehon sisäisten toimintojen ylläpitäminen ei ole vakiomääräistä vaan muuttuu rasiustilan myötä (Moseley & Jeukendrup 2001; Ettema & Loras 2009). Esimerkiksi ruoansulatusjärjestelmässä, verenvirtaamisessa, sisäelinten prosesseissa, sydämen minuuttitulavuudessa ja ventilaatiossa tapahtuu rasiuksessa muutoksia (Moseley & Jeukendrup 2001). Kritisoiijat siis huomauttavat, että nettohyötysuhteessa energiankulutuksen jakaantuminen ”ulkoinen työ + homeostaasin ylläpito” ei toteudu. Lisäksi nettohyötysuhteen toistettavuus näyttäisi olevan huonompi kuin kokonaishyötysuhteen (Saunders 2016, Luku 7).

Toisaalta voitaisiin argumentoida, että nettohyötysuhde ei itse asiassa edes yritä kuvata lihasluurankosysteemin eristettyä mekaanista hyötysuhdetta. Periaatteessa — riittävän ajan kuluttua ruokailusta — pyöräillessä kaikki perusaineenvaihdunnan yläpuolella oleva energiankulutus aiheutuu enemmän tai vähemmän juuri pyöräilyn takia ja on siten myös alttiina mahdollisille harjoittelun adaptaatiovaikutuksille. Onhan esimerkiksi näyttöä, että harjoitteleilla ihmisillä verenkierto ohjautuu harjoituksen aikana tehokkaammin (McArdle ym. 2007, sivut 485–486), ja että kestävyysharjoitteleilla urheilijoilla hengityselinlihakset toimivat tehokkaammin kuin harjoittelemattomilla (McArdle ym. 2007, sivut 486–487). Niinpä voitaisiin nähdä, että nettohyötysuhteessa energiankulutus yritetäänkin jaotella ennemminkin ”perusaineenvaihdunta + kaikki liikkuminen”, jolloin η_{netto} kuvaisikin kuinka hyvällä hyötysuhteella oman lepoenergiankulutuksensa päälle ihminen on adaptoitunut liikkumiseen.

Työhyötysuhde ($\eta_{\text{työ}}$)

Luurankolihasen eristetty mekaaninen hyötysuhde saataisiin jakamalla ulkoinen mekaaninen työ ulkoiseen työntekoon käytetyllä energiankulutuksella E_{ulkoinen} . Seuraava yritys lähemmäs tällaista hyötysuhdetta on valita kokonaisenergiankulutukseen vakiotasoiseksi vähennykseksi tyhjää kuormaa vastaan tehty energiankulutus E_0 olettaen, että yhtälö $E_{\text{ulkoinen}} = E_{\text{tot}} - E_0$ olisi tosi, missä E_0 siis kuvaa sisäistä energiankulutusta ulkoisen kuorman ollessa nolla. Käytännössä sisäinen energiankulutus E_0 pitää sisällään lepoenergiankulutuksen, kehon segmenttien liikuttamisen (eli jalkojen pyörittäminen nollakuormaa vastaan) sekä myös tästä jalkojen pyörittämisestä hieman kohonneen metabolisen energia-aineenvaihdunnan pitämisen homeostaasissa (Minetti 2011).

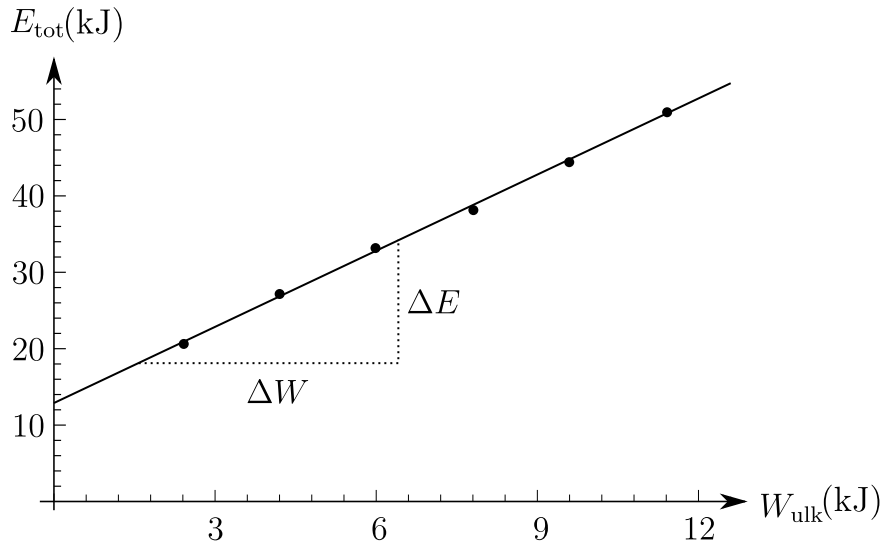
Tämä jaottelu ei kuitenkaan toteudu ongelmitta monestakaan syystä. Ensinnäkin kohdataan sama ongelma kuin nettohyötysuhteen η_{netto} kanssa: tämä jaottelu ei ota huomioon sitä, että homeostaasin ylläpitoon kuluu enemmän energiaa tehon kasvaessa. Toisekseen on hieman epäilyttävää olettaa, että kuorman kasvaessa myös sisäinen energiankulutus kokonaisuutena, kuten homeostaasin ylläpito, pysyisi vakiona ja samana kuin nollakuormalla; esimerkiksi Hansen ym. (2004) tutkimusten mukaan ulkoisen tehon vaikutus sisäiseen tehoon olisi noin 8 %. Kolmas ongelma on se, että on hieman rohkeaa tehdä olettamus, jonka mukaan energiankulutus voidaan jakaa kahteen itsenäiseen osaan; sisäiseen ja ulkoiseen. Polkemalla tyhjää kuormaa kaikki sisäinen energia tulee pakosti kulumaan lämmön tuottamiseen, koska ei ole mitään ulkoista työtä tehtäväksi. Se ei kuitenkaan tarkoita etteikö ulkoista kuormaa polkiessa osa sisäisestä energiankulutuksesta kuluisi myös ulkoisen työn tekemiseen (Ettema & Loras 2009). Esimerkiksi osa sisäisestä energiankulutuksesta voi kuluu elastisten osien venyttämiseen, joka taas tuo ulkoiseen työhön venymis-lyhenemis-syklin kautta energiaa osallistuen täten myös ulkoiseen energiankulutukseen (vrt. Ettema & Loras 2009). Tämä seikka antaisi myös ymmärtää, että ulkoiseen työhön kuluva energiankulutusta E_{ulkoinen} ei voida mitenkään laskea, sillä on lähes mahdotonta arvioida paljonko sisäisestä energiankulutuksesta auttaisi elastisten osien kautta ulkoiseen työntekoon. Toisaalta on arvioitu, että pyöräilyssä elastisten osien käyttö on hyvin minimaalista (Asmussen & Bonde-Petersen 1974).

Eräs lisäongelma on myös nollakuorman energiankulutuksen arviointi, josta lisää aliluvussa 3.2. Tiivistetysti, nollatyöenergiankulutus voidaan arvioida kahdella eri tavalla: joko suoraan mittaamalla tai epäsuorasti teho – energiankulutussuorasta ekstrapoloimalla. Yllättäen nämä menetelmät antavat huomattavasti toisistaan eroavat arviot. Tätä varten tässä työssä $\eta_{\text{työ}}$ jaetaan kahteen eri hyötysuhteeseen: mitattuun ($\eta_{\text{työ,m}}$) ja arvioituun ($\eta_{\text{työ,a}}$) työhyötysuhteeseen.

Lopuksi, Hintzy ym. (2005) ovat ehdottaneet, että suurin osa pyöräilyn adaptaatiosta tapahtuisi juuri paremmin opitun jalkojen liikeradan kautta koordinaation paranemisen (so. lihasten aktivaatiojärjestys sekä agonistien ja antagonistien aktivaatioiden suuruudet) ja turhien liikkeiden karsiutumisen (kuten polven ylimääräinen lateraaliheilunta) kautta. Niinpä poistaessa nollakuorman sisäinen energiankulutus kokonaisenergiankulutuksesta voidaan argumentoida, että samalla poistetaan hyötysuhdetarkastelusta suurin osa mahdollisista harjoittelun tuomista adaptaatioista. Kaiken kaikkiaan on siis hyvin vaikea mennä tarkasti sanomaan mitä $\eta_{\text{työ}}$ varsinaisesti kuvaa. Sitä onkin käytetty suhteellisen säästelyn kirjallisuudessa.

Deltahyötysuhde (η_{Δ})

Deltahyötysuhteessa perustason vähennystä ei tarvita ja se onkin hyvin suosittu yritys kuvata eristetyn luurankolihasiston hyötysuhdetta. Yleisesti hyväksytty tapa laskea η_{Δ} on kuvata teho–energiankulutus - havaintopisteet regressiosuorana ja ottaa η_{Δ} sen kulmakertoimesta (katso kuva 8) — tarkkaan ottaen η_{Δ} on kuvan 8 suoran kulmakertoimen käänteisluku. Deltahyötysuhde kuvaa paljonko energiankulutusta on nostettava nykyisestä tasosta, jotta pystytään polkemaan kasvaneella tasolla. Huomionarvoista on, että näin laskettuna η_{Δ} olettaa implisiittisesti, että deltahyötysuhde olisi riippumaton poljetusta tehosta (de Koning ym. 2012). Paitsi suoran kulmakertoimesta, deltahyötysuhde voidaan myös laskea kuorma kerrallaan, kuten Gaesser & Brooks (1975) tekivät. Tämä tapa ei ole hyötysuhteen riippumattomuutta poljetusta tehosta. Itse asiassa, jos kuormia olisi hyvin lähekkäin, kuvaisi yksittäin lasketut deltahyötysuhteet teho–energiankulutus -käyrän derivaattafunktiota.

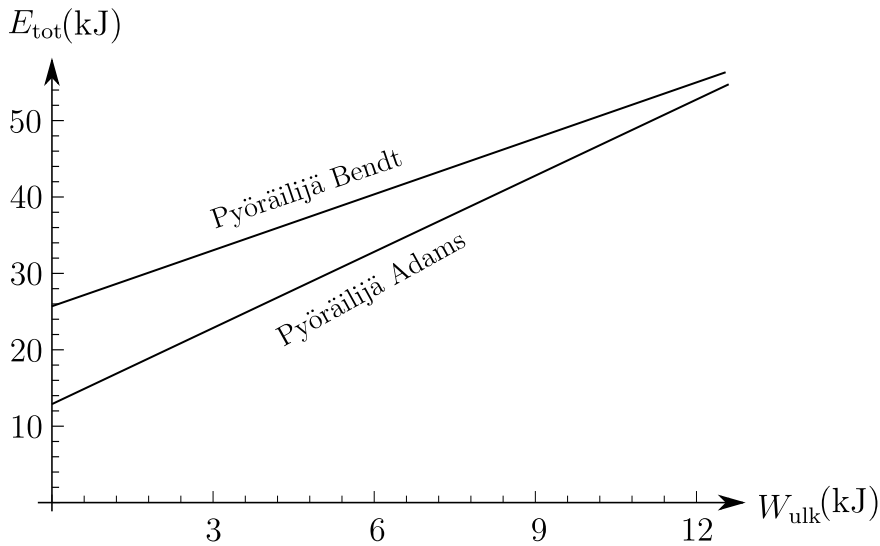


KUVA 8: Energiankulutuksen ja poljettavan kuorman välinen suhde alle anaerobisen kynnyksen. Tässä tapauksessa regressiosuora on muotoa $3,32 \times W_{ulk} + 12,9$. Tällöin regressiosuoran arvo pisteessä 0 on 12,9 kJ/min, joka on ekstrapoloitu energiankulutus $E_{0,a}$. Edelleen $\eta_{\Delta} = \frac{\Delta W}{\Delta E} = 3,32^{-1} = 30,1$ %. (Data lähteestä Matomäki 2016a)

Tätä hyötysuhdetta voidaan kritisoida hieman samalla argumentilla kuin työhyötysuhdetakin; se olettaa implisiittisesti, että energiankulutus tehon muutokselle (Δ Teho) on riippumaton aikaisemman tehon energiankulutuksesta. Tämä on hieman sama kuin sanoisi, että lisäämällä tehoa, keho vain ottaisi uusia motorisia yksiköitä käyttöön jotka toimisivat itsenäisesti ja riippumattomasti muista motorisista yksiköistä (Ettema & Loras 2009). Toisekseen se olettaa, että teho–kokonaisenergiankulutus -käyrä on lineaarinen, mitä se hyvin tarkasti näyttäisi olevan (esimerkiksi Gaesser & Brooks 1975), mutta epälinearisellekin

sovitteelle löytyy kannatusta (Francescato ym. 1995; Hintzy-Cloutier ym. 2003). Epälineaarisuuden suurin peruste on suuremmilla tehoilla esiintyvä ns. hitaan VO₂ komponentin mukaantulo, jota käsitellään tarkemmin aliluvussa 3.2.7.

Kolmas huono puoli on sama kuin sen hyvä puoli: η_{Δ} ei ota huomioon regressiosuoran kokonaisenergiakulutuksen lähtötasoa $E_{0,a}$ eikä tällöin siis erota absoluuttista ja relatiivista energiankulutusta toisistaan. Toisin sanottuna, nollakuorman pyöräily voi maksaa energiankulutuksellisesti paljon (absoluuttinen energiankulutus), mutta energiankulutuksen nousu suhteessa tehon nousuun voikin samaan aikaan olla loivaa (relatiivinen energiankulutus). Tästä taas saadaan kuvan 9 tapainen paradoksi: jos kaksi pyöräilijää pystyvät polkemaan tismalleen samat kuormat ja toisen hapenkulutus on koko ajan suurempi, olisi oletettavaa, että hänen hyötysuhteensa olisi huonompi. Vaan itse asiassa hänen η_{Δ} voi olla parempi! Jos nimittäin hänen lähtötasonsa E_0 on korkeampi ja kulmakerroin pienempi (vrt. Ansley & Cangle 2009). Neljänneksi, näyttäisi, että deltahyötysuhteen toistettavuus olisi heikompi kuin kokonaisyötysuhteella (Moseley & Jeukendrup 2001), mikä saattaisi johtua $W_{\text{ulk}}-E_{\text{tot}}$ kuvaajan regressiosuoran sovittamisen vaikeudesta (esimerkiksi onko se todellisuuudessa lineaarinen, mitä muun muassa Hintzy-Cloutier ym. (2003) pohtivat). Tähän kysymykseen tässä opinnäytetyössä otetaan kantaa myöhemmin luvussa 8.



KUVA 9: Ylemmän viivan pyöräilleen Bendtin suora on loivempi, joten hänen η_{Δ} on parempi, mutta kuitenkin hän kuluttaa enemmän energiaa jokaisella kuormalla.

Kaikista huonoista puolista huolimatta deltahyötysuhteesta ollaan sitä mieltä, että koska parempaakaan mallia ei ole, niin η_{Δ} kuvaa parhaiten luurankolihasen mekaanista hyötysuhdetta — tai tarkemmin aktiinin ja myosiinin poikittaissiltojen muodostussykliin hyötysuhdetta aktiivisessa lihaksessa (Coyle ym. 1992; Chavarren & Calbet 1999; Coyle 2005)

— koska se minimoi niin nollakuorman energiankulutuksen vaikutukset, kuin myös hengityksen, ruoansulatuksen ja kaikkien niiden metabolisten prosessien, jotka eivät suoraan liity luurankolihasen voimantuottoon (Sidossis ym. 1992; Coyle 2005). Lisäksi deltahyötysuhteen hyväksi puoleksi voidaan laskea sen riippumattomuus poljetusta tehosta, jolloin voidaan esimerkiksi verrata kahta huomattavan eritasoista pyöräilijää keskenään, vaikkakin kuvan 9 osoittama paradoksi on silloin mahdollinen.

Taloudellisuus (T)

Taloudellisuuden yksikkönä on esimerkiksi $W/l/min$ (Jeukendrup ym. 2000), eli poljettu ulkoinen teho (tai maantiellä edetyt metrit) hapenkulutusta minuutissa kohti. Periaatteessa se on kuitenkin sama kuin kokonaishyötysuhde, sillä hapenkulutuksella pyritään kuitenkin loppujen lopuksi arvioimaan energiankulutusta. Ja onhan $\eta_{tot}/1 \text{ min} = \frac{W_{ulkoinen}}{E_{tot} \times 1 \text{ min}} = \frac{P_{ulkoinen}}{E_{tot}}$, jonka yksikkö on $W/J/min$. Taloudellisuus on siis loppujen lopuksi epätarkempi kuvaus kokonaishyötysuhteesta, sillä se ei ota huomioon varsinaista energiankulutusta (tarkemmin asiasta aliluvussa 3.2); kahdella samanpainoisella polkijalla voi olla sama hapenkulutus, mutta toisella voi olla selkeästi pienempi energiankulutus ollen näin metabolisesti taloudellisempi liikkuja, mitä pelkkä hapenkulutukseen perustuva taloudellisuuden vertaaminen ei paljastaisi. Koska epäsuoran kalorimetrin avulla energiankulutus saadaan mitattua yhtä helposti kuin hapenkulutuskkin, ei taloudellisuuden käyttöä voida perustella edes sen helpommalla mitattavuudella. Näin ollen taloudellisuudelle ei ole juurikaan tarvetta, ja lähinnä sitä näkee käytettävän toisinaan interventiotutkimuksien taloudellisuusmittauksissa (esimerkiksi Jackson ym. 2007; Rønnestad ym. 2011; Heggelund ym. 2013). Toisaalta esimerkiksi juoksussa hapenkulutukseen perustuva taloudellisuus on laajassa käytössä (katso esimerkiksi Keskinen ym. 2004, sivut 55–56 ja 69), vaikka juoksussakin voisi olla perustellumpaa käyttää tarkempaa energiankulutusta hapenkulutuksen sijaan taloudellisuuden mittarina. Kaiken kaikkiaan taloudellisuuden käyttö jätetään tässä työssä hyvin pienelle tarkastelulle.

Paras hyötysuhde

Voidaankin sanoa, että pelkän eristetyn luurankolihasen hyötysuhteen laskeminen koko kehon liikkeissä näyttäisi olevan hyvin haastavaa jo yllä mainitun $E_{ulkoinen}$ laskemisen mahdottomuudesta. Lisäksi yksikään ehdotettu hyötysuhde ei ole aivan virheetön, joten jonkinlaiseen kompromissiin on päädyttävä. Yleensä parhaimmiksi on valikoitunut kokonais-

hyötysuhde η_{tot} kuvaamaan koko kehon hyötysuhdetta (Ettema & Loras 2009; Hopker ym. 2016) tai deltahyötysuhde η_{Δ} kuvaamaan parhaimmalla mahdollisella tavalla luurankolihas-ten mekaanista hyötysuhdetta (Gaesser & Brooks 1975; Coyle ym. 1992; Horowitz ym. 1994). Jotkut ehdottavat, että molemmat olisi hyvä laskea ja ilmoittaa tutkimuksessa (Moseley & Jeukendrup 2001).

Tämän opinnäytetyön tarkoitus on tutkia miten läheisestä nämäkin kaksi hyötysuhdetta — η_{tot} ja η_{Δ} — voidaan linkittää keskenään. Lisäksi tässä työssä halutaan myös korostaa, että usein hieman väheksytty nettohyötysuhde η_{netto} voidaan nähdä myös kuvaavan kaikkea sitä energiankulutusta, jolle on mahdollista tapahtua harjoitusadaptaatiota.

3.2 Työmäärien ja energiankulutuksien arviointi

Tämän aliluvun tarkoituksena on selvittää tarkemmin kuinka hyötysuhteiden kaavoissa esiintyvät suureet lasketaan käytännössä.

3.2.1 Ulkoisen työn W_{ulk} arvioiminen

Ulkoinen työ W_{ulk} on polkupyöräergometriyössä helppo mitata ja laskea; sähkövastuksisissa polkupyöräergometreissa sähkövastus kertoo poljettavan vastuksen tehona P , yksikkönä watti (W). Sähkövastukselliset ergometrit usein kalibroidaan kerran vuodessa usealle eri teholla ja kadenssin arvolla ja virheet todelliseen ovat normaalisti maksimissaan $\sim 1\text{--}2\%$ (Kapanen 2016). Punnuksellisissa polkupyöräergometreissa poljettava teho voidaan laskea kaavalla

$$P_{\text{ulk}}(\text{W}) = \frac{msgf}{60},$$

missä $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ on maan vetovoimakiihtyvyys, f kadenssi (rpm), m vastukseen laitettu punnus (kg) ja s vauhtipyörää pyörittävän narun pituus (m).

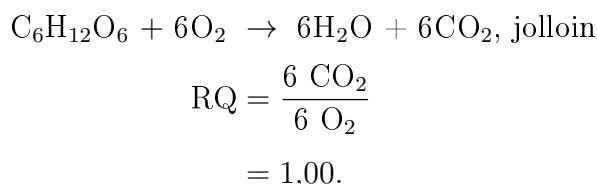
Punnusergometrissa suurin virhe tulee pyöräilijän kadenssin vakioimisessa, ja sitä usein helpotetaan metronomilla. Voisi arvioida, että metronomin avulla kadenssi pysyy noin $1\text{--}2\%$ virhemarginaalilla oikeassa, jolloin sekä punnuskellinen että sähköinen ergometri olisivat yhtä tarkkoja. Maantiellä teho voidaan laskea hyvinkin tarkasti SRM-tehomittarilla, joka mittaa kampeen tuotetun väännön suuruuden riittävällä tarkkuudella vakiotehoissa ajossa (Gardner ym. 2004; McDaniel ym. 2005; Abbiss ym. 2009). Kun teho on saatu mitattua, tä-

tä tehoa vastaan polkija tekee ulkoista työtä, jonka määrä saadaan minuuttia kohti laskettua helposti:

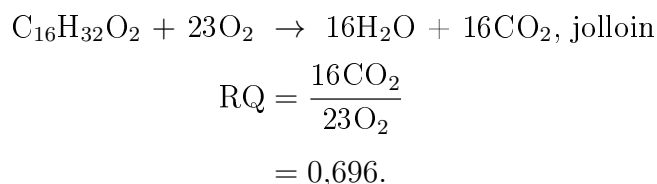
$$W_{\text{ulk}}(\text{kJ}/\text{min}) = \frac{P}{1000} \times 60.$$

3.2.2 Soluhengityksen osamäärä ja hengityksen osamäärä

Soluhengityksen osamäärä (Respiratory quotient, RQ) on solussa tuotetun hiilidioksidin ja solussa käytetyn hapen suhde. Tiedetään, että yhden glukoosimolekyylin hapettaminen energiaksi tarvitsee 6 happimolekyyliä tuottaen kuusi hiilidioksidimolekyyliä (McArdle ym. 2007, sivu 191):



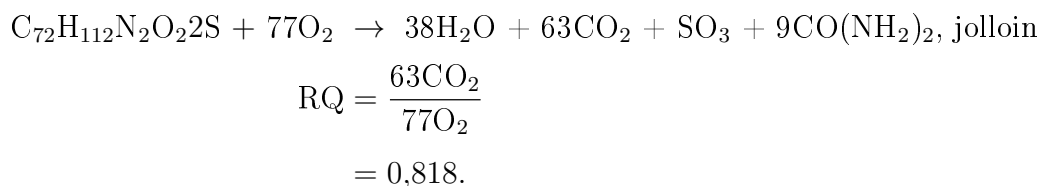
Toinen kehon paljon käyttämä energianlähde, rasva, sisältää enemmän vetyä ja hiiltä kuin happea ja tarvitsee siksi enemmän ulkopuolista happea hapetusreaktiossa energiaksi. Esimerkiksi palmitiinihappomolekyylin, kehossa yleisen rasvan, hapettaminen energiaksi tarvitsee 23 happimolekyyliä tuottaen 16 hiilidioksidimolekyyliä (McArdle ym. 2007, sivu 191):



Tarkka RQ luku vaihtelee hieman hapetettavan rasvahapon hiiliketjun mukaan. Yleensä rasvoille käytetään yleisarvoa $\text{RQ} = 0,70$, vaikka todellisuudessa arvo vaihtelee välillä $0,69 - 0,73$ (McArdle ym. 2007, sivu 191).

Kolmanneksi keho voi käyttää proteiinia energiantuottoonsa, mikä on hieman mutkikkaampi reitti, sillä maksan on pilkottava ensin hapetettavaksi aiotusta proteiinista typpiosat pois. Näin irrotetut tyypet keho poistaa virtsan, ulosteen ja hien mukana ulos kehosta. Jäljelle jääneet deaminoidut proteiiniketjut voidaan hapettaa energiaksi. Esimerkiksi albumiinin

hapetus (McArdle ym. 2007, sivu 191):



Jälleen tarkka RQ lukema vaihtelee hieman hapetettavan proteiinin mukaan. Yleisarvona proteiineille käytetään arvoa 0,82 (McArdle ym. 2007, sivu 191).

Solutason RQ -lukuun perustuen voitaisiin suhteellisen tarkasti määrittää paljonko käytetystä energiasta saadaan hiilihydraatista ja rasvasta kun proteiinin osuus arvioidaan mitättömäksi. Valitettavasti solutason RQ -lukua ei voida mitata mitenkään suoraviivaisesti, joten sitä arvioidaan yleisesti *hengitysosamäärällä* (Respiratory exchange ratio, RER), joka on koko kehon käyttämän hapen ja koko kehon tuottaman hiilidioksidin suhde.

3.2.3 Kokonaisenergiankulutuksen E_{tot} arvioiminen

Energiantuottoa arvioitaessa tehdään yleensä kaksi olettamusta (alempana annetaan perustelut):

1. Energia hapetetaan joko hiilihydraateista tai rasvasta ja proteiinin osuus arvioidaan mitättömäksi;
2. RER lukema vastaa RQ lukemaa submaksimaalisilla kuormilla.

Tällöin mitatusta RER-lukemasta saadaan laskettua hiilihydraatin ja rasvan määrä energiantuotossa seuraavalla tavalla. Olkoon p rasvan osuus energiasta ja $1 - p$ hiilihydraatin osuus. Tällöin

$$\text{RER} = 0,70 \times p + 1,00 \times (1 - p) \quad \implies \quad p = \frac{1 - \text{RER}}{0,3} \quad (2)$$

Lisäksi metabolisista yhtälöistä tiedetään, että ainoastaan rasvaa käyttämällä energiaa saadaan 19,7 kJ kulutettua happilitraa kohti, kun taas pelkkää hiilihydraattia metaboloimalla saadaan 21,2 kJ kulutettua happilitraa kohti (Blaxter 1989, sivu 17). Näin ollen kulutettu

energia saadaan laskettua kaavalla

$$\begin{aligned} E_{\text{tot}}(\text{kJ}/\text{min}) &= (p \times 19,7 + (1 - p) \times 21,2) \times \text{VO}_2 \\ \implies E_{\text{tot}}(\text{kJ}/\text{min}) &= (21,2 - 1,5p) \times \text{VO}_2 \\ \implies E_{\text{tot}}(\text{kJ}/\text{min}) &= (5 \times \text{RER} + 16,2) \times \text{VO}_2, \end{aligned} \quad (3)$$

missä viimeiseen kaavaan on sijoitettu yhtälö (2), ja VO_2 on muodossa l/min.³

Olettamuksien perusteluista sanottakoon, että ensimmäinen olettamus — proteiinin mitätön osuus energiantuotossa — motivoidaan kahdella argumentilla: ensinnäkin proteiinien käyttö energiaksi on hyvin pientä (monien tuntien urheilu ilman lisäravinteita saattaa nostaa proteiinin käytön 10 %:iin kokonaisenergiantuotosta, Wagenmakers 1998 lähteen Jeukendrup & Wallis 2005 mukaan). Toisekseen, proteiinin RQ lukema (0,82) on aika tarkkaan puolessa välissä rasvan (0,70) ja hiilidioksidin (1,00) RQ-lukemia. Proteiinista saadaan energiaa 19,2 kJ/ happilitra (Blaxter 1989, sivu 17). Näin ollen, jos proteiinin osuus olisi korkeintaan 10 %, tulisi suurimmaksi virheeksi energiankulutukselle $\pm 0,2$ kJ/ kulutettu happilitra ($\approx 1\%$).

Toinen olettamus — että $\text{RER} = \text{RQ}$ submaksimaalisilla kuormilla — perustellaan sillä, että lähes kaikki tuotettu hiilidioksidi tulee riittävän alhaisilla intensiteeteillä ainoastaan metabolista reittiä (McArdle ym. 2007, sivut 193–194). Kuormituksen intensiteetin noustessa anaerobisen energiantuoton sivutuotteena syntyvää happamuutta tarvitsee puskuroida ja puskuroinnin seurauksena hiilidioksidin tuotto kasvaa. On argumentoitu, että kun $\text{RER} < 1,00$ hengityskaasuihin perustuva energiankulutuksen arviointi on riittävä (Moseley ym. 2004; Noordhof ym. 2010; de Koning ym. 2012). Huomioitavaa on, että $\text{RER} = 1,00$ arvoa käytetään toisinaan anaerobisen kynnyksen määrittämisen apuna (Kapanen 2016).

Todettakoon, että proteiinikin voidaan ottaa mukaan energiankulutuslaskuihin, jos kerätään talteen virtsan tyypeä ja lasketaan siitä energiaksi käytetyn proteiinin määrää. Munuaiset tuottavat ureaan noin 1 g tyypeä jokaista 5,57 g energiaksi metabolisoitua proteiinia kohden, jolloin voidaan arvioida, että jokaista virtsan tyypigrammaa kohden proteiinimetaboliaan kuluu 6,0 litraa happea ja tuotetaan 4,8 litraa hiilidioksidia. (McArdle ym. 2007, sivu 191).

³Koska arviot metabolisten prosessien energiantuotoista vaihtelevat hieman, on kirjallisuudessa esimerkiksi johdettu kaava

$$E_{\text{tot}}(\text{kJ}/\text{min}) = (4,904 \times \text{RER} + 16,04) \times \text{VO}_2.$$

(Garby & Astrup 1987); lisäksi Keskinen ym. (2004) (Liite 3.11) on päätynyt kaavaan

$$E_{\text{tot}}(\text{kJ}/\text{min}) = (5,05 \times \text{RER} + 16,1) \times \text{VO}_2.$$

3.2.4 Anaerobisen energiantuoton huomioimien kokonaisenergiankulutuksessa

Tehon kasvaessa, jo aerobisen kynnyksen (aerobisella kynnyksellä RER -lukema on luokkaa 0,92, Paavo Nurmi keskus, $n = 15$) jälkeen energiaa tuotetaan enenevissä määrin anaerobisesti. Aerobisen ja anaerobisen kynnyksen välillä energiaa tuotetaan anaerobisesti, mutta sen verran hitaasti, että keho pystyy samaa tahtia poistamaan anaerobisen energiantuoton kuona-aineita ja pitämään homeostaasia yllä. Kuitenkin, anaerobisen osuuden huomiotta jättäminen muuttaa kokonaisenergiankulutuksen arviointia ja siten hyötysuhde tulee yliarvioitua, etenkin lähestyttäessä — ja ylitettäessä — anaerobinen kynnyks.

Voidaan arvioida, että 1 mmol/l muutos veren laktaatissa vastaa noin 3 ml/kg hapenkulutusta vastaavaa energiantuotantoa (di Prampero & Ferretti 1999), missä yleensä oletetaan, että kulutettu happi käytetään hiilihydraatteihin (jolloin RER= 1,00 ja energiantuotto on $\sim 21,2$ kJ/kulutettu happilitra). Tällöin verestä mitattua laktaatin muutosta voi hyödyntää sijoittamalla saatua laktaattia vastaava hapenkulutus — $VO_2(l/min) = 0,003 \times (\text{kehon paino}) \times \Delta[La]/t$, missä $\Delta[La]$ (mmol/l) on laktaatin muutos ja t (min) aika mikä on kulunut laktaatin muutokseen — kaavaan (3).

Hyötysuhdetta laskettaessa kirjallisuudessa yleinen toimintatapa on, että esimerkiksi 10 minuutin vakiokuorman aikana syntynyt laktaattierotus ($\sim 1\text{--}3$ mmol/l) sijoitetaan suoraan energiantuoton kaavaan yllä mainitulla tavalla. Tällöin ei oteta lainkaan huomioon sitä, että 10 minuutin kuormassa keho ehtii myös poistamaan laktaattia. Laktaattia käytetään koko ajan energiaksi mm. sydämessä (McArdle ym. 2007, sivut 331–332) sekä muunnetaan glukosiksi maksassa Corin sykklissä (McArdle ym. (2007), sivu 150). Näin ollen, vaikka energiankulutus tuleekin paremmin huomioitua, kun anaerobinen energiantuotto arvioidaan laktaatin avulla, tuudittaudutaan ehkä hieman liian helposti käsitykseen, että energiankulutus on saatu tarkasti laskettua. Vastaavanlaista kritiikkiä ovat esittäneet myös esimerkiksi de Koning ym. (2012). Huomioitavaa on myös, että niin sanottu hidas VO_2 -komponentti (tarkemmin aliluvussa 3.2.7) alkaa esiintymään intensiteetin ylittäessä aerobisen kynnyksen, mikä vaikeuttaa osaltaan hyötysuhdetarkastelua. Niinpä anaerobisen energiantuotannon arvioimisen hankaluuden takia tässä työssä on pyritty käyttämään aerobisia kuormia.

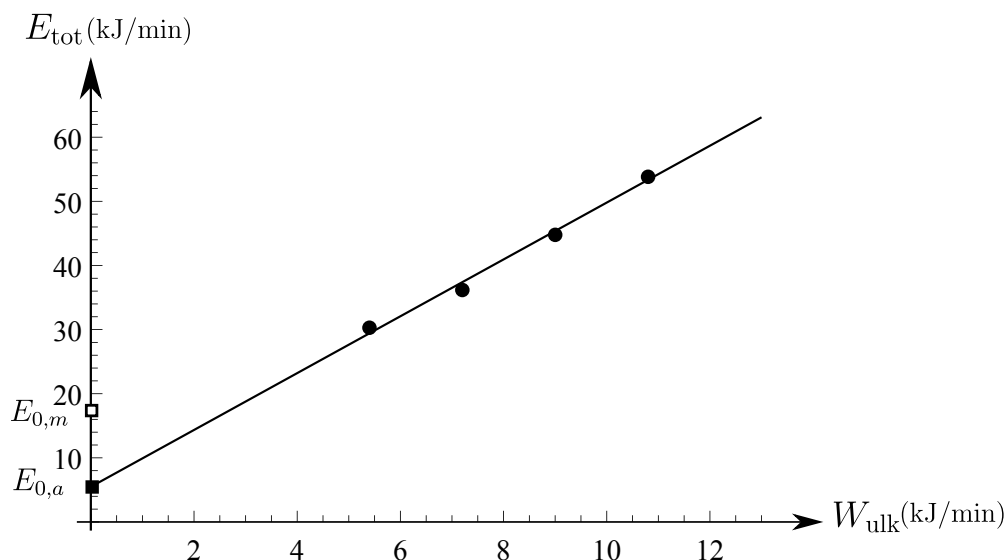
3.2.5 Lepoenergiankulutuksen E_{lepo} mittaaminen

Lepoenergiankulutusta tarvitaan nettoenergiankulutuksen $E_{\text{tot}} - E_{\text{lepo}}$ laskemiseen nettohyötysuhteessa. Ehkä hieman yllättäen, lepoenergiankulutuksen E_{lepo} arviointi vaihtelee hieman sen mukaan mitä sen halutaan kuvaavan. Täsmällisesti ottaen, se useimmiten määritetään siksi energiankulutukseksi, joka ylläpitää elintoimintoja totaalisessa levossa pitkän paaston ($> 10h$) jälkeen (ns. metabolinen energiantuotto, katso McArdle ym. 2007 sivu 196). Hyötysuhteen mittauksissa se usein kuitenkin mitataan satulan päällä istuessa ennen ensimmäistä kuormitusta (esim. Gaesser & Brooks 1975; Duc ym. 2015, poikkeuksina mm. Broskey ym. 2015; Saunders 2016, joissa E_{lepo} mitataan makuuasennossa). Tämä on perusteltavissa silloin, jos tällainen mittaustapa on hyötysuhdemittauksissa alan standardi, mittausta tehdään riittävästi ruokailun jälkeen ruoansulatuksen vaikutuksen minimoimiseksi ja testattavat eivät jännitä tilannetta. Voitaisiin kuitenkin ajatella, että lepoenergiankulutusta mitattaessa istuma-asennossa jo satulassa istuminen voisi tuoda joitain eroja tutkittavien kesken; toiset voivat istuessaankin huojua ja käyttää tasapainon säilyttämiseen enemmän energiaa, jolloin mahdollinen istumisesta johtuva vähäinen energiankulutuksen erotus jää tällaisesta nettohyötysuhteesta huomioimatta. Tästä huolimatta lepomittauksen tekeminen satulassa istuen on lähes ainoa käytetty tapa hyötysuhteen yhteydessä, varmastikin käytännön syistä.

Joissain artikkeleissa — ehkä hieman epäilyttävästi — perusaineenvaihduntaa ei ole mitattu vaan se on arvioitu sukupuoleen ja painoon perustuvilla laskentakaavoilla (esimerkiksi Sunde ym. 2010; Heggelund ym. 2013). Tällöin perustellumpi tapa tarkastella hyötysuhdetta voisi olla kokonaisyhyötysuhde.

3.2.6 Nollatyöenergiakulutuksen E_0 mittaaminen ja arvioiminen

Nollaenergiakulutusta tarvitaan työhyötysuhteen laskemisessa ja kirjallisuudessa on kaksi tapaa mitata E_0 (kuva 10). Ensimmäinen tapa on mitata suoraan tyhjää kuormaa vastaan tehdyn polkemisen energiankulutus, merkitään tätä $E_{0,m}$. Toinen tapa on piirtää ulkoisen työn ja kokonaisenergiankulutuksen välinen suhde (katso kuva 10) ja ekstrapoloida siitä arvio nollakuorman energiankulutukseksi, merkitään tämä $E_{0,a}$. Ongelmia tulee siitä, että $E_{0,m}$ antaa huomattavasti korkeamman tuloksen energiankulutuksesta kuin $E_{0,a}$ (katso kuva 10), eron ollessa lähteestä riippuen pienimmillään $\sim 20\%$ (Hintzy-Cloutier ym. 2003) ja suurimmillaan jopa $\sim 350\%$ (Hopker ym. 2010).



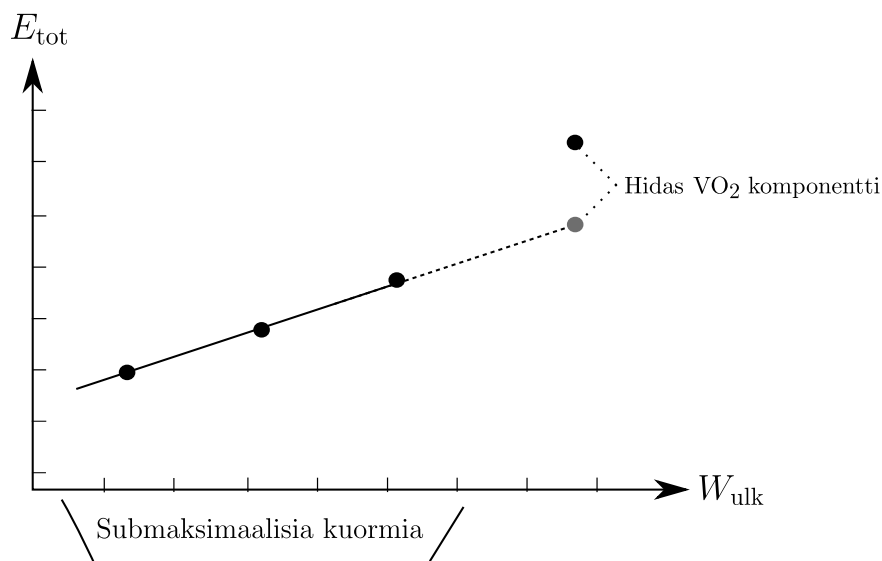
KUVA 10: Nollakuorman energiankulutuksien $E_{0,m}$ ja $E_{0,a}$ eroavaisuus yhdessä tapausesimerkissä. Suora viiva: $W_{\text{ulk}}-E_{\text{tot}}$ kuvaajan regressiosuora; musta neliö: regressiosuoralla ekstrapolointi nollakuorman energiankulutus $E_{0,a} = 5,5$ kJ/min; tyhjä neliö: suoraan mitattu nollakuorman energiankulutus $E_{0,m} = 17,2$ kJ/min. Data lähteestä Matomäki (2016a)

On esitetty ainakin kolme seikkaa, jotka kohottavat suoraan mitattua E_0 lukemaa. Ensimmäkin sitä on vaikea mitata, sillä on hyvin vaikea saada todellista nollakuormaa aikaiseksi, koska ergometrissa esiintyy aina jotain pientä vastusta. Tämän lisäksi voidaan argumentoida, että nollakuormaa suoraan mitattaessa ei mitata pelkkää jalkojen pyörittämiseen kuluva sisäistä energiaa, vaan myös lisäenergiaa, jota tarvitaan kehon stabilisointiin. Lopuksi tyhjää kuormaa vastaan polkeminen on niin epänormaali tilanne, etteivät lihasten aktivoinnit ole siihen tottuneet ja niinpä rekrytointikuviot ovat erilaiset tyhjää kuormaa polkiessa kuin todellista vastusta vastaan polkiessa. (Hintzy-Cloutier ym. 2003). Näistä seikoista huolimatta, toiset suosivat suoraan mitattua nollakuormatilannetta (Berry ym. 1993; Hintzy ym. 2005) ja toiset arvioitua (Gaesser & Brooks 1975; Mogensen ym. 2006), eikä kirjallisuudessa ole esitettyä lopullista argumenttia kummankaan tavan puolesta.

3.2.7 Hidas VO_2 komponentti ja väsymisen vaikutus

Kehon turvautuessa suuremmilla intensiteeteillä anaerobiseen energiantuottoon, tapahtuu samalla myös ns. hidas VO_2 komponentti (Krustrup ym. 2004), joka käytännössä tarkoittaa lineaarisuudesta poikkeavaa kasvanutta hapenkulutusta, eli energiankulutusta (kuva 11). On arvioitu, että suuremmilla kuin 50 % $\text{VO}_{2\text{max}}$ intensiteeteillä jonkinasteinen hidas komponentti olisi nähtävissä (Pedersen ym. 2002). Niinpä esimerkiksi hidas VO_2 komponentti

esiintyy selvästi 75 – 80 % $\text{VO}_{2\text{max}}$ kuormilla (Krustrup ym. 2004; Sahlin ym. 2005), hie-
man 60 % $P_{\text{VO}_{2\text{max}}}$ kuormilla (Hopker ym. 2016), mutta ei vielä 50 % $\text{VO}_{2\text{max}}$ kuormilla
(Krustrup ym. 2004). Sen ilmaantuminen tapahtuu siis suomalaisen terminologian mukai-
sesti karkeasti arvioiden aerobisen kynnyksen kohdalla (aerobinen kynnyks on välillä 45 – 65
% $\text{VO}_{2\text{max}}$ 90 %:lla testatuista, Paavo Nurmi keskus). Niin 30 minuutin aika-ajon simulaa-
tiossa (Foss & Hallèn 2005) kuin 75 % $\text{VO}_{2\text{max}}$ tasaisella kuormituksella (Sahlin ym. 2005)
hitaan komponentin arvoksi on saatu noin 200 ml/min , joka saattaa vastata noin 1 – 2
%-yksikön eroa kokonaishyötysuhteessa η_{tot} ⁴



KUVA 11: Esimerkki hitaasta VO_2 komponentista. Mustat pallot ovat mitattuja arvoja ja harmaa pallo on lineaarisesti ekstrapoloimalla saatu energiankulutuksen arvio. Submaksimaalisilla kuormilla saadaan kuvan 8 mukainen lineaarinen regressio, mutta suurilla kuormilla mukaan tulee hidaskomponentti rikkoen lineaarisuuden. (Muunneltu Foss & Hallèn 2004).

Ventilaation kasvu, anaerobisen energiantuottosysteemin tehostuminen, sydämen sykkeen kasvaminen ja hormonitoiminnon muuttuminen eivät riitä selitykseksi hitaalle VO_2 komponentille (Lucía ym. 2000), ja onkin ehdotettu, että työskentelevien lihasten heikentynyt supistumiskyky ja sen seurauksena lisämotoristen yksiköiden rekrytointi olisi pääsyy havaitulle VO_2 kasvulle (Whipp 1994; Sahlin ym. 2005). Kasvanut happamuus ei suoranaisesti aiheuta hidasta VO_2 komponenttia, joka saattaa esiintyä vaikka lihaksen pH pysyisi vakiona (Sahlin ym. 2005).

Koska kuvan 11 mukaisesti hidaskomponentti tulee normaalin hapenkulutuksen lisäksi —

⁴Laskettu hyödyntäen Sahlin ym. (2005) tuloksia: ~ 240 W tehontuotto, $\text{RER} = 0,97$, hapenkulutus 3,23 l/min vs. hitaan komponentin kanssa 3,48 l/min. Näillä arvoilla η_{tot} saa arvot 21,3 % ilman hidaskomponenttia ja 19,8 % hitaan komponentin kanssa. Huomautettakoon, että tämä lasku on vain suuntaa antava ja anaerobista työtä ei tässä otettu huomioon ($\Delta[\text{La}]$ ollessa noin 4mmol/l).

rikkoen teho – energiankulutus käyrän lineaarisuuden — voidaan kiistellä kuuluuko hyötysuhteen mittauksia tehdä niillä tehoilla joilla tämä hidas VO_2 komponentti esiintyy. Tämän puolesta voidaan argumentoida sanomalla, että hidas VO_2 komponentti on polkijalle kuuluva ominaisuus, jossa riittävän korkeilla tehoilla hänen kokonaishyötysuhteensa tulee laskemaan koska hänen kehonsa homeostaasin ylläpito alkaa tarvitsemaan enenevissä määrin energiaa. Näin ollen suuriakin tehoja voisi ottaa hyötysuhdetarkasteluun mukaan kunhan kuorman pituus on riittävä hitaan komponentin asettumiselle ja energiankulutukseen otetaan anaerobisen energiantuottosysteemin vaikutus huomioon. Toisaalta näin suurien kuormien käyttöä vastaan hyötysuhdetarkasteluissa voi sanoa, että on vaikea tietää milloin hidas VO_2 komponentti saavuttaa vakiotilan, sillä se saattaa koko mittausajan tasaisesti nousta (Whipp 1994). Anaerobisen kynnyksen ylittävillä tehoilla hidas komponentti saattaa kasvaa aina $\text{VO}_{2\text{max}}$ -arvoon saakka (vrt. Turnes ym. 2015). Näin ollen hitaan VO_2 komponentin alueella hyötysuhteeseen saattaa tulla suuriakin laskentavirheitä — etenkin deltahyötysuhteeseen, joka nojautuu vahvasti $W_{\text{ulk}}-E_{\text{tot}}$ kuvaajan lineaarisuuteen — kun lisäksi anaerobisen energiantuoton laskeminen pitkäkestoisessa suorituksessa ei ole mitenkään suoraviivaista. Kaiken kaikkiaan tässä opinnäytetyössä on otettu kanta, että kannattaisi välttää liian suurien kuormien käyttöä hyötysuhdetta laskettaessa.

Yllä käsiteltiin hitaan VO_2 komponentin esiintymistä intensiteetin kasvaessa. Mutta on olemassa toinenkin syy hitaan VO_2 komponentin esiintymiselle ja se on väsyminen. Näiden kahden eri VO_2 komponentin hajottaminen erillisiksi on hieman keinotekoisia, sillä niiden voidaan ajatella esiintyvän usein samanaikaisesti. Käytännössä väsymisestä johtuva hidas VO_2 komponentti tarkoittaa, että pitempään jatkuneessa (>1 h) tasavauhtisessa kuormituksessa väsymyksen vaikutuksesta energiankulutus kasvaa ja siten hyötysuhde laskee (Passfield & Doust 2000; Rønnestad ym. 2011; Hopker ym. 2016) silloinkin kun intensiteetti on ollut sen verran kevyt ($\sim 50 - 60$ % $\text{VO}_{2\text{max}}$) etteivät kasvaneet rasvametabolialla, ventilaatio, kehon lämpötila ja laktaattimetabolialla ole riittäneet selittämään havaittua energiankulutuksen kasvua (Passfield & Doust 2000; Hopker ym. 2016). Tällainen kohtuullisen kuorman hidasta väsymisestä johtuvaa VO_2 komponentin esiintymistä ei ole kyetty selittämään tyhjentävästi. Erääksi syyksi on ehdotettu esimerkiksi uusien lihassolujen rekrytointi (Passfield & Doust 2000; Sahlin ym. 2005; Vanhatalo ym. 2010). Tosin kaikki tutkimukset eivät ole varmentaneet EMG-signaalin kasvua väsymyksen aikana (Vanhatalo ym. 2010; Noordhof ym. 2015). Muita ehdotettuja syitä ovat mm. lihasten mitokondrioiden heikentynyt P/O -hyötysuhde ja kasvava P/W-suhde (ts. ATP:n tuotto suhteessa tehoon heikkenee) (Cannon ym. 2014). Hyvin pitkäkestoisessa kuormituksessa metabolian siirtyminen hiilihydraateista

rasva-aineenvaihdunnan puolelle (ts. RER:n laskeminen) voi aiheuttaa osan hitaasta VO_2 komponentista, sillä rasvan hapettuminen energiaksi ei ole niin tehokasta kuin hiilihydraatien. Kolmen tunnin kuormituksessa tämä on selkeästi havaittavissa (Rønnestad ym. 2011). Myös laktaatin käyttö energiaksi on tehottomampaa kuin hiilihydraatin, sillä laktaatin metaboliassa ei glykolyysistä saada enää ATP:tä, ja niinpä laktaatista saatava energia happilitraa kohti on noin 10 % matalampi kuin hiilihydraatista (vrt. Sahlin ym. 2005). Tämä osaltaan vaikuttanee hitaan VO_2 komponentin nousuun pitkäkestoisessa aerobisen kynnyksen ylittävässä kuormituksessa, jossa veren laktaattipitoisuus nousee. Lisäksi neuraalinen ohjaus vaikeutuu, mikä havaitaan pienentyneenä M-aaltona (Black ym. 2016), ja tämä saattaisi osaltaan vaikuttaa kasvavaan hapenkulutukseen.

Luonnollisesti myös maksimaalinen suoritus, kuten aika-ajotyypiset suoritukset, nostavat hapenkulutusta (Passfield & Doust 2000; Vanhatalo ym. 2010; de Koning ym. 2013; Noordhof ym. 2015). Vieläpä niin, että mitä pidempi maksimaalinen väsytyks on ollut, sitä enemmän η_{tot} laskee (Noordhof ym. 2015). Syyksi tällaiselle hapenkulutuksen nousulle on esitetty yllä esiteltyjen selitysten lisäksi homeostaasiin tähtäävän palautusprosessin energiaa kulluttavat tehtävät (EPOC), kuten laktaatin käsittely, happamuuden poisto, lämmönsäätely, ATP:n ja PCr:n uudismuodostus, myoglobiinivarastojen täydennys, hormonitoiminnan kasvamisesta syntyvä ylimääräinen energiantuotanto ja yleisesti nousseiden fysiologisten prosessien (ventilaatio, sydämen syke, jne.) hoito (McArdle ym. 2007, sivu 177; de Koning ym. 2013; Noordhof ym. 2015). Loppupäätelmänä siis väsytyksen jälkeen kokonaishyötysuhde on madaltunut kasvaneen hapenkulutuksen takia, mutta tarkkaa syytä hapenkulutuksen nousulle ei tiedetä. Voi olla, että kaikki yllä mainitut seikat vaikuttavat, eikä yksittäistä syytä pystytäkään poimimaan. Niinpä hyötysuhdetta mitattaessa tulisi välttää myös liian pitkää testausaikaa, jottei väsymisestä johtuva hidaskomponentti pääse vaikuttamaan hyötysuhteeseen.

Paitsi että kokonaishyötysuhde laskee välittömästi väsytyksen jälkeen, niin myös kovasta rasituksesta seuraava akuutti ylikunto heikentää hyötysuhdetta. Akuutti, 3–4 päivän kuormituksesta (sotaharjoitus) johtuva ylikunto voi vähentää kokonaishyötysuhdetta jopa 3,7 %-yksikköä (24,6 → 20,9 %, Bahr ym. 1991). Akuutti ylikunto laskee hyötysuhdetta osittain samoilla syillä kuin aikaisemminkin, mm. EPOC ja lihassolujen degeneraatiota on ehdotettu näissä tapauksissa hyötysuhteen laskun syyksi (Burt ym. 2014).

Näin ollen, vaikka hidaskomponentti ja väsyminen eivät ensinäkemältä näyttäisi liittyvän suoraan energiankulutuksen arviointeihin, nähtiin, että ne ovat nivoutuneet näihin

arviointiprosesseihin hyvinkin oleellisella tavalla. Mittauksissa on otettava huomioon, että kehon energiankulutus kasvaa intensiteetin ja keston ylittäessä tietyn tason ja tätä hidasta komponenttia on hyvin vaikea arvioida, joten tarkkoja tuloksia haluttaessa, se tulisi osata eliminoida jo testisuunnittelussa.

3.3 Hyötysuhteen mittaamistapahtuma

Hopker ym. (2009) ovat koonneet koontiartikkeliinsa tavan miten hyötysuhde kannattaa mitata. Ensinnäkin poljettavan kuorman tulisi päästä tasannevaiheeseen (ns. ”steady state”), jotta mitatut hengityskaasut vastaavat solutason tapahtumia (ja että RER lukema vastaisi RQ lukemaa). Maltillisilla kuormilla VO_2 pääsee noin 2 – 3 minuutissa tasannevaiheeseen, mutta hiilidioksidintuotolla (VCO_2) kestää vähintään 4 minuuttia, mikä toisinaan jää huomioimatta mittauksissa. Esimerkiksi voidaan laskea kaavaa (3) käyttäen, että RER lukeman vääristyminen 0,05 verran aiheuttaa kokonaishyötysuhteeseen η_{tot} vääristymää $\sim 0,4$ %-yksikköä. Niinpä vähintään 5 minuutin portaat mittauksissa olisi suositeltavia. Tosin kokonaishyötysuhteella ei ole paljoakaan eroa 3 minuutin ja 6 minuutin kuormien välillä (de Koning ym. 2012).

Liian pienillä kuormilla sisäinen energiankulutus — kuten polkimien pyörittäminen ja homeostaasin ylläpito — vievät suhteessa paljon energiaa, jolloin varsinaista polkemisen hyötysuhdetta ei pääse välttämättä riittäväällä tarkkuudella mittaamaan. Erityisen ongelmallista tämä on heikkokuntoisilla (tai hyvin pienikokoisilla) polkijoilla, joilla anaerobinen kynnyksaattaa tulla vastaan jo $\sim 100 - 130$ W tehoilla. Siksi hyötysuhdetta itsessään tutkiessa olisi hyvä saada tarpeeksi hyväkuntoisia testattavia. On raportoitu, että kilpapyöräilijöillä tapahtuu nettohyötysuhteessa tasanne > 240 W tehoilla (vrt. Ettema & Loras 2009). Jotta näin suurien tehojen energiankulutuksia voitaisiin suhteellisen luotettavasti mitata, tulisi aerobinen kynnyksen olla > 220 W, jotta hidas VO_2 -komponentti ja anaerobinen energiantuottojärjestelmä eivät vaikeuttaisi energiankulutuksen mittaamista. Käytännössä 220 W aerobinen kynnyks tarkoittaisi, että kynnystestin (2 minuutin portaat) maksimitehot olisivat > 400 W (vrt. Paavo Nurmi keskus).

Kolmas hyvin vahvasti hyötysuhteeseen vaikuttava tekijä on kadenssi. Näin ollen tutkimuksissa kadenssi tulisi vakioda. Toisaalta voidaan argumentoida, että haluttaessa verrata eri polkijoita keskenään, voitaisiin antaa testattavien valita vapaasti oma kadenssinsa. Kuitenkin, tämän vapaasti valittavan kadenssin tulisi jokaisessa myöhemmässä mittauksessa

samalla henkilöllä olla aina sama. Myös biomekaaniset seikat (satulan korkeus, satulaputken kulma, jne) vaikuttavat hyötysuhteeseen, joten nekin olisi vakioitava eri mittauksissa samalle testattavalle. Myös muut ulkopuoliset seikat kuten ilmankosteus ja lämpötila saattavat vaikuttaa hyötysuhteeseen, koska kehon lämpökuorman hoitamiseen tarvitaan energiaa. Niinpä myös testipaikan ilma tulisi vakioida. (Hopker ym. 2009). Lopuksi on viitteitä, että kovan harjoituksen aiheuttamat lihasvauriot saattavat akuutisti laskea hyötysuhdetta (vrt. aliluku 3.2). Niinpä myös hyötysuhdemittauksia edeltävien päivien harjoitukset tulisi pitää maltillisina. Lisäksi luonnollisesti ruoansulatus vie energiaa, joten ruokailu ennen hyötysuhdemittauksia tulisi vakioida.

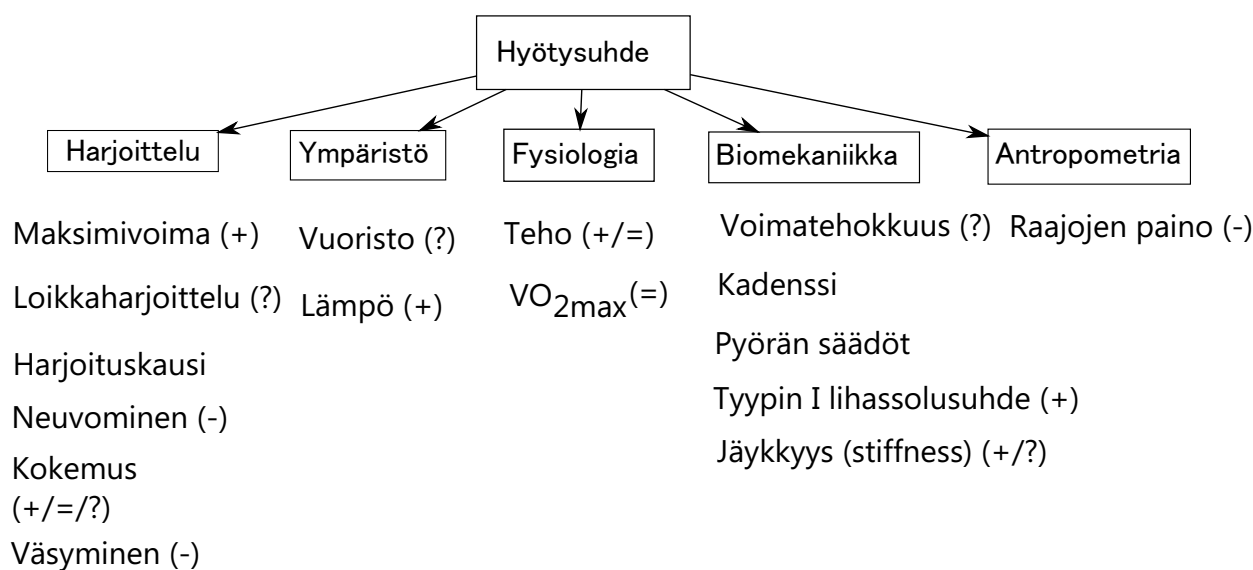
Edellä mainitut seikat voidaan koota yhteen ja kirjoittaa hyötysuhteen mittaajan muistilista.

Pyöräilyn hyötysuhteen mittaajan muistilista

1. Mieti mitä hyötysuhdetta halutaan mitata ja mitä sen halutaan kuvata; η_{tot} ja η_{Δ} ovat käytetyimmät.
2. Valitse riittävän pitkä kuorman kesto (vähintään 5 minuuttia). Kokonaistestin kesto ei saisi olla liian pitkä, ettei väsyminen ala vaikuttaa tuloksiin (paitsi jos halutaankin mitata ylipitkän rasituksen vaikutusta hyötysuhteeseen).
3. Valitse poljettavat tehot, yleensä väliltä 100 – 300 W.
 - Kevyillä kuormilla sisäinen energiankulutus saattaa dominoida liikaa
 - Suurilla kuormilla on otettava huomioon vaikeasti mitattava anaerobisen energian osuus ja tuloksia vääristävä hidas VO_2 -komponentti.
4. Mieti määrätäänkö poljettava kadenssin kaikille testattaville samaksi vai annetaanko sen olla testattavan vapaasti valittavissa (mutta vakio jokaisella kuormalla).
5. Toistettavuuden takia jokaisessa testissä ilmankosteus ja lämpötila tulisi olla sama. Lisäksi jokaisella polkijalla pyörän säädöt ja poljettava kadenssi tulisi pysyä ensimmäisen mittauksen jälkeen vakiona.

4 HYÖTYSUHTEESEEN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT

Edellisessä luvussa käytiin läpi käytetyimmät hyötysuhteet, niiden yleisiä ominaisuuksia sekä teoreettisia perusteluja ja kritiikkejä eri hyötysuhteille. Tämän luvun tarkoituksena on nostaa sisäiset tekijät — pyöräilijään sisältä vaikuttavat tekijät — tarkasteluun ja antaa yleiskuva kuinka ne vaikuttavat hyötysuhteeseen. Ulkoiset tekijät käydään läpi hyvin lyhyesti luvun lopussa. Kuvaan 12 on koottu yhteen tässä luvussa mainittujen ulkoisten ja sisäisten tekijöiden vaikutuksia (kokonais)hyötysuhteeseen.



KUVA 12: Eri tekijöiden vaikutuksia pyöräilyn hyötysuhteeseen. + → positiivinen vaikutus, - → negatiivinen vaikutus, = → ei vaikutusta, ? → vaikutuksesta ei ole selkeää kuvaa. Tekijät, joilla ei ole merkitty mitään vaikutusta, vaikuttavat niin positiivisesti kuin negatiivisesti.

Oleellista hyötysuhteeseen muutoksien mittaamisessa on myös hyötysuhteen toistettavuus. Varsinaisia toistettavuustutkimuksia ei hyötysuhteille ole moniakaan tehty. Kuitenkin, näyttäisi, että kokonaishyötysuhteen ja taloudellisuuden variaatiokerroin (coefficient of variation) olisi ~3–4 % (Moseley & Jeukendrup 2001; Noordhof ym. 2010; Waldron ym. 2016), kun taas nettohyötysuhteella se on ~ 2 %-yksikköä suurempi (Saunders 2016, luku 7) ja suurin deltahyötysuhteelle (~7 %, Moseley & Jeukendrup 2001). Tämä tarkoittaisi, että vasta η_{tot} muutos esimerkiksi 20,6 → 20,0 % olisi havaittavissa oleva todellinen muutos. Hämmäntävästi Hopker ym. (2009) havaitsivat kilpapyöräilijöiden hyötysuhteen oskilloivan kilpailukauden aikana jopa 1 %-yksikön verran (välillä ~ 19,6 – 20,6 %) huomiona, että eniten kovaintensiteettistä harjoitusta tehneillä oskillaatio oli pienintä. Näin ollen voisi siis olla, että myös testiajankohdan valinta suhteessa harjoituskauteen saattaisi vaikuttaa huomattavalla tavalla hyötysuhteeseen.

4.1 Perustekijät: teho ja kadenssi

Kaksi parhaiten tiedostettua tekijää hyötysuhteeseen ovat kadenssi ja poljettu teho, joiden vaikutuksia on tutkittu lähinnä kokonais- ja deltahyötysuhteeseen. Näiden tutkimusten tulokset on koottu taulukkoon 2.

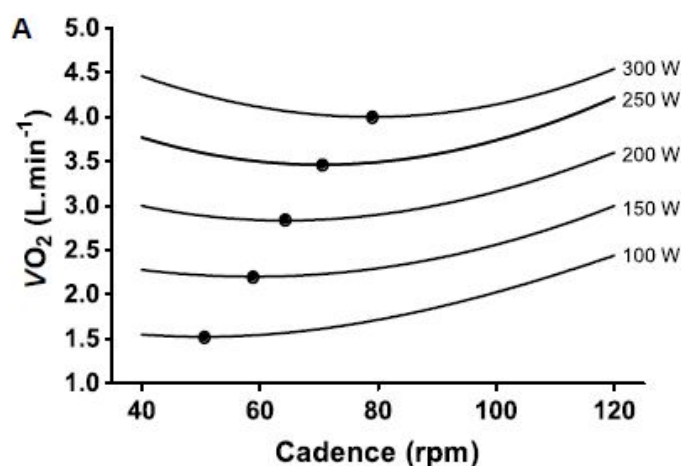
TAULUKKO 2: Lyhyt kuvaus tehon ja kadenssin vaikutuksista hyötysuhteisiin η_{tot} ja η_{Δ} . (Ansley & Cangley 2009)

	η_{tot}	η_{Δ}
Teho kasvaa	η_{tot} kasvaa, koska homeostaasin pitäminen vie suhteessa vähemmän energiaa	η_{Δ} vähenee, koska joudutaan rekrytoimaan tehottomampia II-lihassoluja
Kadenssi kasvaa	η_{tot} vähenee, koska nopeamman liikkeeseen joudutaan rekrytoimaan tehottomampia II-lihassoluja	η_{Δ} kasvaa, koska osutaan lähemmäs optimaalisia lihassupistusnopeuksia
		TAI: η_{Δ} vähenee toistaiseksi tuntemattomasta syystä.

Taulukosta 2 nähdään, että teho vaikuttaa kokonaishyötysuhdetta kasvattavasti, kuten kuvan 7 tapausesimerkkikäyrä näyttää, koska suuremmilla tehoilla homeostaasin ylläpitoon kuluvan energiankulutuksen suhde kokonaisenergiankulutukseen vähenee kasvattaen kokonaishyötysuhdetta (vrt. Gaesser & Brooks 1975; Ansley & Cangley 2009; Ettema & Loras 2009). Vastaavasti deltahyötysuhteen määrittämisessä usein implisiittisesti oletetaan, että teho – energiankulutus -käyrä on suora, jonka kulmakertoimesta deltahyötysuhde määritetään. Näin ollen tehon kasvattaminen ei vaikuta suoraan deltahyötysuhteeseen. Tosin on argumentoitu, että hitaan VO_2 -komponentin mukaantulo aiheuttaa teho – energiankulutuskäyrän kaartumista suurilla tehoilla (Hintzy-Cloutier ym. 2003; Ettema & Loras 2009), jolloin deltahyötysuhde heikkenisi suuremmilla tehoilla kuten taulukossa 2 mainitaan.

Kadenssista tiedetään, että jokaiselle polkijalle saadaan määritettyä metabolisesti optimaalisin kadenssi, f_{met} , joka minimoi kokonaisenergiankulutuksen (eli maksimoi kokonaishyötysuhteen η_{tot} , Samozino ym. 2006; Foss & Hallèn 2004; Ansley & Cangley 2009), katso kuva 13. Tämä f_{met} on hyvin yksilökohtainen ja kasvaa poljettavan tehon funktiona (katso kuva 13 ja Foss & Hallèn 2004). Tällaisen hyötysuhteen maksimoivan kadenssin f_{met} olemassaolo on pienoinen yllätys, sillä teoriassa voitaisiin ajatella, että kadenssin kasvaessa tulisi energiankulutuksen yksiselitteisesti aina vain nousta, koska, yksinkertaistaen, suuremmalla kadenssilla tapahtuu samassa ajassa enemmän lihassupistuksia. Tarkemmin perusteltuna

tämä väite sanoo, että ensinnäkin jalkojen liikuttamiseen (ilman vastusta) kuluvalla energialla tehdään työtä painovoimaa vastaan ja kiihdytetään (ja jarrutetaan) jalkoja, jolloin nopeammalla kadenssilla tulee samassa ajassa enemmän kiihdytyksiä (tosin teoriassa potentiaalienergian muutos ei riipu kadenssista). Lisäksi jalkojen kineettinen energia kasvaa suhteessa v^2 , jolloin myös tämän kineettisen energian määrä kasvaa suhteessa v^2 kadenssin kasvaessa. Niinpä tasaisella kuormituksella energiantarpeen tulisi vain nousta kadenssin kasvaessa. (Foss & Hallén 2004). Näin ei kuitenkaan käy, vaan kuten mainittua jokaisella teholla on olemassa yksilökohtainen f_{met} joka minimoi energiankulutuksen.



KUVA 13: Kokonaishyötysuhteen minimoiva kadenssi ja tehon vaikutus optimaaliseen kadenssiin. Kokonaisenergiankulutuksen minimoiva kadenssi f_{met} on merkitty mustalla pisteellä. Kuva lähtees-tä Coast & Welch (1985) lähteen Ansley & Cangle (2009) mukaan.

Tätä hienoista paradoksia voidaan selittää seuraavasti. Ensinnäkin, kun kadenssia madel-letaan pienemmäksi kuin f_{met} , energiankulutus kasvaa koska yksittäisen polkaisun voiman-tarve kasvaa ja kehon tulee rekrytoida enemmän lihaksia käyttöönsä (Samozino ym. 2006). Toisekseen, jos kadenssia nostetaan optimikadenssia f_{met} korkeammaksi energiankulutuksen kasvulle on ehdotettu ainakin neljä syytä (Samozino ym. 2006):

1. Lihassyiden supistusnopeus ylittää niiden optimaalisen supistusnopeuden;
2. Nopeamman supistuksen takia rekrytoidaan enemmän tyypin II lihassoluja, jotka eivät ole hyötysuhteeltaan niin tehokkaita kuin tyypin I lihassolut;
3. Sisäinen energiankulutus (\approx nollakuorman polkemiseen käytettävä energia) kasvaa huomattavasti kadenssin mukana (vertaa myös Tokui & Hirakoba 2007);
4. Ylävartalon stabilointiin kuluu enemmän energiaa (myös Hansen ym. 2004).

4.2 Kadenssiparadoksi

Kadenssiparadoksi ei liity suoraan hyötysuhdetutkimukseen, vaan ennemminkin kadenssitutkimukseen. Mutta koska kadenssiparadoksi on historiallisesti ollut suhteellisen suuri kiistanaihe, on sen esittäminen perusteltua myös hyötysuhdetutkimuksen kohdalla. On hyvin selvästi osoitettu, että annetulla teholla energiankulutuksen minimoiva metabolisesti taloudellisin kadenssi on yleensä $\sim 50 - 70$ rpm (Ansley & Cangle 2009). Tämä eroaa huomattavasti ammattipyöräilijöiden — joiden oletetaan luonnollisen evolutoituvan prosessin takia ajautuvan kohti parasta tekniikkaa — suosimasta $90 - 100$ rpm kadenssista. Tätä ristiriitaa — miksi ammattilaiset käyttävät energianäkökulmasta liian suurta kadenssia — on pyritty pitkään selittämään. Eräs selitys on se, että energiantuotannon minimoiva kadenssi suurenee tehon funktiona, jolloin eliittipyöräilijöiden korkeilla tehoilla ($> 300W$) hyötysuhteen minimoiva kadenssi on 80 rpm, vrt kuva 13. (Foss & Hallén 2004, 2005). Tämä on edelleen matalampi kuin eliittien suosima kadenssi, mutta saattaa olla osaselityksenä. Toinen — ja laajasti kannatusta saanut — selitys on se, että paradoksaalisesti energiantuotannon minimoiva kadenssi ei ole sama, joka minimoi neurolihasjärjestelmän väsymyksen (Ansley & Cangle 2009). Tietsuo ym. (1996) näyttivät, että $80 - 90$ rpm kadenssi minimoi lihasaktivaation, ja näin ollen lihasväsymyksen.

Energiasysteemin — eli kokonaishyötysuhteen — minimoivaa kadenssia suurempi kadenssi johtaa pienempään väsymiseen ainakin kolmesta syystä: ensinnäkin verenvirtaus on parempaa kun nopeammalla kadenssilla lihas on supistuneena (tukkien kapillaarit) vähemmän ajan kerrallaan verrattuna hitaaseen kadenssiin. Toisekseen, nopeammalla kadenssilla laskimoiden lihaspumppu toimii paremmin nopeuttaen veren virtaamista takaisin sydämeen kiihdyttämällä verenkiertoa. Kolmanneksi, käytettävä voima poljinkierrosta kohti on pienempää suuremmalla kadenssilla, jolloin lihasväsymystä (ja mekaanista lihasvauriota) syntyy vähemmän. (Tietsuo ym. 1996; Ansley & Cangle 2009).

Eräs mielenkiintoinen huomio on myös, että useasti toistettujen 5 sekunnin maksimitoistojen tehot ovat kadenssilla ~ 116 huomattavasti suuremmat kuin kadenssilla ~ 60 rpm (Dorel ym. 2003), johtaen käsitykseen, että korkeampi kadenssi antaisi valmiuden reagoida nopeammin ja voimakkaammin maantiepyöräilyssä tapahtuviin useasti toistuviin kiihdytyksiin. Harjoittelu voi vaikuttaa neurolihasjärjestelmän minimoivaan kadenssiin. Näyttäisi, että harjoittelemattomilla ~ 70 rpm kadenssi voi minimoida neurolihasjärjestelmän väsymyksen, ja tämä väsymyksen minimoiva kadenssi kasvaisi harjoittelun myötä polkemistekniikan biomekaanisen kehittymisen myötä (Takaishi ym. 1998; Abbiss & Laursen 2005).

4.3 Hyötysuhde ja lihassolusuhde

Coyle ym. (1992) huomasivat, ettei pyöräilyn taloudellisuudella ja voimantuotolla ole korrelaatiota. Tämä johti päätelmään, että tekniikkaerot eivät niinkään selitä taloudellisuuseroa pyöräilyssä vaan tätä eroa selittäisi paremmin lihaksen sisäiset syyt. Paras tällainen yhteys näyttäisi olevan hyötysuhteen ja lihassolusuhteen välillä (Coyle ym. 1992; Horowitz ym. 1994; Mogensen ym. 2006, vertaa myös Faria ym. 2005b): mitä enemmän suhteessa tyypin I lihassoluja yksilöllä on, sitä parempi hyötysuhde (η_{tot} ja η_{Δ}) hänellä on. Syyksi tähän on esitetty esimerkiksi lihassupistusnopeutta. On tunnettua, että lihas toimii hyötysuhteeltaan parhaiten supistusnopeudella, joka on noin 1/3 sen maksimisupistusnopeudesta (Kusmerick 1983 lähteen Coyle ym. 1992 mukaan). Toisaalta I-tyypin lihassolun hyötysuhteeltaan paras supistusnopeus on noin 1 lihassolupituus/s (Goldspink 1978 lähteen Coyle ym. 1992 mukaan). Edelleen, on arvioitu, että keskimääräisen lihassolun pituus vastus lateraliksessa on noin 72 mm ja että 200°/s lihassupistus polvenojentajissa tarkoittaisi vastus lateraloksen lyhentymistä noin 90 mm/s, jolloin 160°/s polvenojennus vastaisi vastus lateraloksen lihassolujen lyhentymistä ~72 mm/s vastaten noin yhden lihassolupituuden muutosta sekunnissa (Coyle ym. 1992). Pyöräillessä 160°/s polvenojennus vastaa noin 64 rpm kadenssia (vrt. Coyle ym. 1992) — riippuen jonkin verran kammien pituudesta ja polkijan anatomiasta. Kun hyötysuhteeltaan paras kadenssi on useimmiten löydetty väliltä 50–70 rpm, nähdään, että se täsmää erinomaisesti tyypin I-lihassolun hyötysuhteeltaan tehokkaimman supistusnopeuden kanssa. Vastaavasti tyypin II lihassolut ovat kestävyysurheilijoilla tehokkaimmillaan supistusnopeuden ollessa noin 3 lihassolun pituutta sekunnissa ja harjoittelemattomilla sekä teholajin harrastajilla noin 5 lihassolun pituutta sekunnissa (Coyle ym. 1992). Jo tästä voidaan nähdä, että tyypin I lihassolut olisivat määräävämmät hyötysuhdetta optimoitaessa. Mainittakoon, että tätä näkemystä on myös haastettu, kun kaikki tutkimusryhmät eivät ole löytäneet selkeää yhteyttä tyypin I suhteellisen osuuden ja hyötysuhteen välillä (Pedersen ym. 2002; Medbø 2008; Hopker ym. 2013). Toisaalta, yksikään tutkijaryhmä ei ole ilmoittanut löytäneensä negatiivista korrelaatiota.

Huomautettakoon, että paitsi lihassolusuhde, myös muut biomekaaniset lihasten sisäiset ominaisuudet saattavat vaikuttaa hyötysuhteeseen. Esposito ym. (2011) tutkimuksessa akuutti venyttely laski hyötysuhdetta, mikä antaisi ymmärtää että muista lihaksen sisäisistä ominaisuuksista myös jäykkyydellä (stiffness), voi olla vaikutusta hyötysuhteeseen. Mainittakoon, että venysmis-lyhenemissyklin suoraa vaikutusta hyötysuhteeseen ei olla juurikaan tutkittu.

4.4 Voima

Monien pitkittäistutkimuksien kautta on saatu hyvinkin selkeä näyttö siitä, että voimaharjoittelu — erityisesti maksimivoimaharjoittelu — parantaa hyötysuhdetta (Sunde ym. 2010; Rønnestad ym. 2011; Louis ym. 2012; Heggelund ym. 2013; Vikmoen ym. 2016). Aina tätä parannusta ei tosin ole saatu näkyviin (Rønnestad ym. 2015, 2016). Lisäksi on viitteitä, että voimaharjoittelu vähentäisi pitkäkestoisessa pyöräilyssä väsymyksestä johtuvaa hitaan VO_2 komponentin esiintymistä (Rønnestad ym. 2011).

Syiksi on ehdotettu mm. sitä, että voiman kasvaessa, tarvitaan vähemmän lihaksia tekemään sama työ (Sunde ym. 2010). Lisäksi RFD:n (voimantuottonopeus) kasvaminen auttaa nopeampaan supistukseen, mikä pidentää veren vaihtuvuusaikaa lihaksessa (Loveless ym. 2005; Sunde ym. 2010; Louis ym. 2012). Voimatason kasvaminen saattaa vaikuttaa myös lihasten koaktiivisuuteen, tehokkaampaan rekrytointiin ja parempaan koordinointiin (Loveless ym. 2005). Epäillään, että toisin kuin juoksussa, voiman lisäys vaikuttaisi pyöräilyn biomekaniikkaan sillä lihajännekompleksin supistusnopeus ja liike ovat rajoitetumpia ennalta annetun ympyräliikkeen takia (Loveless ym. 2005).

Onkin ehdotettu, että voimatasoltaan vahvat pyöräilijät työskentelevät suhteessa pienemmällä osuudella maksimivoimastaan jokaisella poljinkierroksella, mikä vähentää heidän riippuvuuttaan tehottomammista II-tyyppin lihassoluista johtaen parempaan taloudellisuuteen, vähentäen lihasväsymystä ja auttaen pyöräilijää polkemaan kauemmin ennalta määrätyllä teholla (Coyle ym. 1992; Bieuzen ym. 2007; Rønnestad ym. 2011; Vikmoen ym. 2016). Lisäksi voimaharjoittelun on hypotesoitu altistavan suoranaiselle lihastyypimuutokselle IIB solutyypistä kestävämmäksi ja aerobiseen suoritukseen tehokkaammaksi IIA tyypiksi, mikä myös omalta osaltaan auttaisi hyötysuhteen paranemiseen (Coyle 2005; Vikmoen ym. 2016).

4.5 Tekniikan muuttaminen

Tekniikan parantamisen apuvälineenä käytetään usein polkimeen asennettua voima-anturia tai kampeen asennettua vääntöä mittaavaa anturia (SRM-mittari) ja näin saadusta voimadatasta johdetaan tehokkuuden mittareita, kuten aliluvussa 2.1.2 esitelty voimatehokkuus, väännön tasaisuus tai kuolleen alueen koko. Näitä mittareita käytetään usein pyöräilytekniikan parantamiseen ja polkemisen tehokkuuden mittarilla on varmistettu tekniikan muutos. Toistaiseksi ei ole yksiselitteisesti pystytty osoittamaan, että pyöräilytekniikan opettelu

— näitä tehokkuuden mittareita käyttäen — vaikuttaisi positiivisesti kokonaisyötysuhteeseen. Korff ym. (2007) näyttivät, että keskittyessä poljinkierroksen ylösnostovaiheeseen nostaan aktiivisesti jalkaa, pyöräilijät saivat voimatehokkuuden nousemaan huomasti verrattuna normaaliin tekniikkaansa ($48,1 \pm 5,1$ vs. $62,4 \pm 9,8$ %), mutta samalla heidän η_{tot} laski merkittävästi ($20,2 \pm 0,6$ vs. $19,0 \pm 0,7$ %). Eli voimatehokkuuden kasvaessa, myös lihastyö ja siten energiankulutus kasvaa ja näistä energiankulutus kasvaa enemmän kuin voimatehokkuus (Mornieux ym. 2008).

Toisenlaisessa koeasetelmassa Theurel ym. (2012) antoivat pyöräilijöille reaaliaikaista tietoa voiman tasaisuudesta kuvamuodossa. Kävi ilmi, että η_{tot} pysyi jotakuinkin muuttumattomana, mutta 45 minuutin polkemisen jälkeen pyöräilijät olivat vähemmän väsyneitä jos heille annettiin reaaliaikaista voimajakautumisdataa, mikä näkyi parempana maksimipyöräilytehona. Edelleen, Schücker ym. (2016) pyysivät polkijoita keskittymään vuorollaan johonkin neljästä kohteesta: pään asentoon, polkimien ympyräiseen pyörittämiseen, videokuvan katsomiseen tai alas- ja ylösvaiheen polkemiseen. Pyörittäminen tuotti negatiivisen tuloksen taloudellisuuteen, muiden keskittymiskohteiden pitäessä taloudellisuuden suhteellisen vakiona. Myös erityistä ”Pose”-metodia, joka on yhdistelmä ajoasennon ja poljintekniikan muuttamista, on käytetty lyhyenä interventiona hyötysuhdetutkimuksessa. Sen on huomattu vaikuttaneen hieman poljintehokkuutta parantavasti mutta vaikutusta hyötysuhteeseen ei ole löytynyt (Korff ym. 2011). Tosin on pidettävä mielessä, että yllä olevissa tutkimuksissa on hyötysuhdetta tarkasteltu hyvin lyhyessä mittauksena tapahtumassa. Periaatteessa voisi olla, että parantunut voimatehokkuus säästäisi voimia pitkissä, $> 2\text{h}$, kestävässä kohtuutehoisissa kuormituksissa, mutta tällaisia tutkimuksia ei ole johdettu.

Edelleen, Korff ym. (2007) muistuttavat, että riittävän pitkä adaptaatio uuteen tekniikkaa saattaisi muuttaa hyötysuhdetta. Kaikkiaan kuitenkin vaikuttaisi, että se mikä voiman tuottamollisesti tuntuisi ”järkevältä” tekniikalta (ts. tasainen pyöritys) näyttäisi vaikuttavan negatiivisesti hyötysuhteeseen vaikka jotkut ovat saaneet voimatehokkuudelle ja metaboliselle hyötysuhteelle positiivisiakin korrelaatiota (esim. Leirdal & Ettema 2011b).

Lopuksi huomautettakoon, että jalat eivät ole ainoa energiaa kuluttava osa pyöräilijällä. On osoitettu, että torson stabilointi selkänöjan kanssa nostaa pyöräilyn hyötysuhdetta matalalla (40 – 60 rpm) kadenssilla (McDaniel ym. 2005). Tästä voisi tehdä rohkean päätelmän, että yksilöillä, jotka liiallisesti jännittävät keski- tai ylävartaloa, saataisiin hyötysuhdetta parannettua tekniikalla, jossa torsoa ja/tai ylävartaloa rentoutettaisiin.

4.6 Hyötysuhde ja kokemus

Poikkileikkaustutkimusasetelma on eräs suosittu tapa tarkastella miten lajin keskikastin harrastajat eroavat terävimmästä kärjestä. Tällöin ensimmäinen seikka on määritellä milloin urheilija on harrastaja-, kokenut- tai eliittuurheilija. Pyöräilyssä tällaiseen luokitteluun on kiinnitetty huomiota esimerkiksi artikkeleissa Jeukendrup ym. (2000) ja Ansley & Cangle (2009), joissa annetaan esimerkkiluokittelut harrastelijoista ammattipyöräilijöihin sisältäen harjoittelumäärät, kilpailumäärät ja maksimitehot porrastestissä. Taulukkoon 3 on otettu Ansley & Cangle (2009) kategorisointi. Tällaisissa luokitteluissa on otettava huomioon ero suorituskyvyn ja kokemuksen välillä (vrt. Jeukendrup ym. 2000); hyvällä juoksijalla voi olla hyvä taso pyöräilijänäkin, mutta monen tuhannen tunnin tuomaa mahdollisuutta pyöräilyspesifiin adaptaatioihin hänellä ei ole. Niinpä kokemuksen vaikutusta hyötysuhteeseen tutkittaessa tärkeintä olisikin selvittää testattavien pyöräilytuntimäärät ja tavoitteelliset pyöräilyharjoittelutunnit eikä testattavien suoritustaso. Laajassa perspektiivissä pitkään ja tavoitteellisesti harjoittelevilla pyöräilijöillä suoritustasosta kertova VO_{2max} on tokikin korkeampi kuin harrastelijoilla. Niinpä tässä suhteessa VO_{2max} kertoisi myös pyöräilyn kokemuksesta.

TAULUKKO 3: Kategorisointi pyöräilykokemukselle (miehet). (Ansley & Cangle 2009).

Kategoria	Kuvaus	VO_{2max} (ml/kg/min)	P_{max}	Harjoitus- kilometrit (‘000)	16 km aika- ajo (min)	40 km aika- ajo (min)
1	Ammattilainen	70+	450+	30+	< 20	< 50
2	Eliitti	60–70	375–450	15–30	20–22	50–55
3	Seurataso	50–60	275–375	5–15	22+	55+
4	Harrastelija	45–50	200–275	< 5	–	–
5	Urheilija (ei pyöräilijä)	–	–	0	–	–
6	Harjoittelematon	< 45	< 200	0	–	–

Erityisesti juoksussa taloudellisuus on eräs merkittävimmistä suorituskäkyä määräävistä seikoista ja juoksun puolella onkin vahvaa näyttöä kokeneiden juoksijoiden olevan huomattavasti taloudellisempia harrastelijoihin verrattuna (vrt. Joyner & Coyle 2008). Asia ei ole niin selvä pyöräilyn puolella. Yleinen ajatus ja teoria on, että hyötysuhde paranisi harjoittelun myötä (esimerkiksi Coyle 2005; Hopker ym. 2009), paremman lihasaktivaation ja liikkeen oppimisen myötä. Muita syitä hyötysuhteen paranemiselle on esitetty olevan mm. lihassolusuhteen muuttuminen hyötysuhteeltaan parempien hitaiden lihassolujen suuntaan, aerobisten entsyymien aktiivisuuden lisääntyminen sekä protonien mitokondrioiden hukka-
vuodon väheneminen. (Hopker ym. 2009). Valitettavasti pyöräilyssä on tehty kovin harvoja

pitkittäistutkimuksia hyötysuhteeseen liittyen. Poikittaistutkimukset antaisivat ymmärtää, että hyötysuhteen ero harrastajien ja eliittikuskien välillä ei olisi kovin suuri: Toiset eivät ole löytäneet eroja (η_{Δ} : Nickleberry & Brooks 1996; Marsh ym. 2000, η_{tot} : Nickleberry & Brooks 1996; Moseley ym. 2004) kun taas toiset ovat (Takaishi ym. 1998; Sallet ym. 2006; Hopker ym. 2007, 2013). Edelleen, yllä mainituissa eroja löytäneissä tutkimuksissa Sallet ym. (2006) ja Hopker ym. (2013) koejärjestelyt eivät täytä kaikin osin aliluvussa 3.3 lueteltuja hyötysuhdemittausten suosituksia (vrt. Böning & Pries 2013). Toisaalta, on huomioitavaa, että yksikään tutkimus ei esitä kokeneilla olevan heikompaa hyötysuhdetta kuin kokemattomilla.

On kuitenkin viitteitä siitä, että pidemmällä tarkasteluvälillä ($> 2h$) hyvin harjoitelleiden taloudellisuus voisi olla selkeämmin parempi: pitkään jatkuneessa aerobisessa työssä käytetyt lihassolut väsyvät ja niiden tilalle joudutaan rekrytoimaan uusia, tehottomampia lihassoluja (joko nopeita II-tyypin lihaksia tai alkuperäistä päävaikuttajalihasta hieman fyysisesti kauempana olevia liikettä taitamattomampia lihassoluja), mikä aiheuttaa hitaan VO_2 komponentin ilmaantumisen laskien hyötysuhdetta. Hyvin harjoitelleilla tätä uusien lihasten käyttöönottoa ei esiinny niin voimakkaana tarkoittaen, että he sietävät väsymistä paremmin ja että heillä hidaskomponentti on huomattavasti pienempi kuin amatööreillä (Lucía ym. 2002; Rønnestad ym. 2011). Valitettavasti hyvin pitkiä kuormia käyttäviä taloudellisuus- tai hyötysuhdemittaustutkimuksia on tehty niukasti. Edelleen, voidaan argumentoida, että kokeneiden yli 2h kestävä suorituksen parempi hyötysuhde verrattuna harrastelijoihin ei tarkoittaisi, että heillä olisi sinänsä *per se* parempi hyötysuhde, vaan että he yksinkertaisesti kestävät väsymistä paremmin.

Erääksi syyksi, että hyötysuhteen välisiä eroja ei ole löytynyt on esitetty mm. sitä, että vertailtaessa samalla absoluuttisella kuormalla amatööri- ja eliittipyöräilijöitä, on suhteellinen kuorma amatööreillä suurempi. Koska kuorman suuruus vaikuttaa olennaisesti kokonaishyötysuhteeseen (katso aliluku 4.1), voisi suhteellisen kuorman suuruus vaikuttaa eroa kaventavasti. Toinen syy voi olla puhtaasti tilastollinen: yleensä otannat hyötysuhdetutkimuksissa ovat pieniä, jolloin suuri hajonta ryhmien välillä estää tilastollisen merkitsevyyden muodostumisen. Myös puhtaasti metodologista syytä on esitetty: toisinaan tutkimuksissa käytetään 3 min kuormia, jotka ovat riittämättömiä VCO_2 tasaantumiselle. (Hopker ym. 2007, 2009).

Kestävyysharjoittelun vaikutuksesta hyötysuhteeseen on julkaistu vain harvoja positiivisia pitkittäistutkimuksia. Hintzy ym. (2005) totesivat ennestään pyöräilyyn tottumattomien naisten kokonais- ja nettohyötysuhteen kasvavan kuuden viikon harjoittelun jälkeen huomattavasti työhyötysuhteen pysyessä lähes vakiona. Tämäkin tukee päätelmää, että ainoastaan

tehostunut lihasaktivaatio saattaa muuttaa hyötysuhdetta, koska metabolismin itsessään ei ole koskaan todistettu parantuvan harjoittelulla (Böning 2012) ja että suurin osa tekniikka-adaptaatiosta tapahtuisi siis sisäisessä energiankulutuksessa (so. jalkojen koordinoinnissa tyhjää kuormaa vastaan) ja että polkemisen kerran opittua, se ei juurikaan paranisi ylimääräisellä harjoittelulla. Coyle (2005) näytti miten moninkertaisen mestariapyöräilijän (Lance Armstrong) hyötysuhde nousi $\sim 8\%$ ($21,2\% \rightarrow 23,1\%$) seitsemän vuoden seurannan aikana antaen käsityksen harjoituksen merkityksestä hyötysuhteelle. Tälle tapaustutkimukselle on tosin löytynyt kritiikkiä, jossa eräs argumentti on, että syöpähoidon seurauksena laskenut massa (ja erityisesti jalkojen massa) olisi vastuussa hyötysuhteen paranemisessa (Martin ym. 2005). Vaikka olisikin hyväksyttävää, että tekniikka ei sinänsä olisi erilaisia eliitti- ja harrastelijapyöräilijöillä, on jokseenkin yllättävää etteivät mahdolliset ventilaatio- ja sydänadaptaatiotkaan tuo hyötysuhteeseen eroavaisuutta.

Kaikkiaan, pyöräily vaikuttaisi teknisesti sen verran ”helpolta” lajilta, että suuria eroja ei harrastelijoiden ja eliittien välille löydetä, toisin kuin esimerkiksi juoksussa (vrt. Joyner & Coyle 2008). Meta-analyysin perusteella (Montero & Lundby 2015) näyttäisi siltä kuin voimaharjoittelu voisi parantaa taloudellisuutta, mutta kestävyysharjoittelu vain aiemmin harjoittelemattomilla. Voitaisiinkin spekuloida, että jalkojen kiinnittäminen ennalta määrättyä ympyrärataa eteneviin polkimiin pakottavat polkijat yhteneväiseen tekniikkaan eikä salli suuria henkilökohtaisia vaihteluita tekniikassa. Lisäksi juoksussa olennainen elastisen energian osuus on pyöräilyssä hyvin minimaalisessa roolissa, jolloin erot passiivisen energian hyödyntämisessä yksilöiden välillä ei vaikuta juurikaan hyötysuhteeseen. Voidaankin sanoa, että jos hyötysuhteen ero eliittien ja harrastelijoiden välillä on todellinen, se ei liene kovin suuri.

4.7 Ulkoiset tekijät

Ulkoisia tekijöitä käsitellään tässä hyvin suppeasti, sillä niiden ei ajatella olevan olennaisia hyötysuhteeseen tutustumisen kannalta.

Painovoiman merkitystä tutkittiin sentrifuugilla (Bonjour ym. 2010) ja lopputoteamus oli, että painovoimaa lisätessä η_{Δ} ei juurikaan muutu, mutta sisäisen energiankulutuksen arvo nollakuormalla kasvaa huomattavasti heikentäen kokonaishyötysuhdetta η_{tot} . Muista ulkoisista tekijöistä klossin paikka (ts. jalan sijainta polkimella) ei vaikuta taloudellisuuteen (Van Sickle Jr & Hul 2007); kompressiohousut saattavat parantaa taloudellisuutta tunnin aika-

ajossa (Scanlan ym. 2008); satulan korkeus vaikuttaa taloudellisuuteen ja 25° polvikulma antaisi paremman taloudellisuuden kuin 35° tai 109 % jalan sisämittasääntö (Peveler 2008; Peveler & Green 2011); kammen pituus vaikuttaa taloudellisuuteen, mutta sopivinta pituutta ei voi ennustaa jalan pituudesta (Morris & Londeree 1997); fyysisesti lämpöhoidolla lämmitetyillä lihaksilla hyötysuhde kasvaa ja hyötysuhteeltaan paras kadenssi on suurempi (Ferguson ym. 2002); korkeanpaikanharjoittelulla ei ole (Lundby ym. 2007) tai on (Green ym. 2000) positiivista vaikutusta taloudellisuuteen.

4.8 Hyötysuhde ja sen paikka käytännössä

Ongelmana suorituskykyä tutkittaessa on, että jotta suorituskykyyn vaikuttavasta osaluueesta saataisiin tietoa, sitä joudutaan usein tutkimaan eristettynä muusta suorituksesta. Sellaisten tekijöiden kuin hyötysuhde, VO_{2max} , voimatehokkuus, EMG-aktiivisuus, väsyminen, maksimiteho porrastestissä, jne. vaikutukset suorituskykyyn ovat jotakuinkin selvillä, mutta näiden kaikkien vaikuttavien tekijöiden väliset suhteet eivät ole mitenkään yksioikoisia. Niinpä on tärkeää pitää mielessä, että erityisesti suorituskykyä maksimoitaessa on jonkin yksittäisen osa-alueen maksimointi toisarvoista, mikä joskus saattaa unohtua tieteen tekijöiltä (vrt. Castronovo ym. 2013). Niinpä esimerkiksi hyötysuhteen merkitys on tärkeä ja se on ymmärrettävästi monimuotoinen tutkimuksen aihe pyöräilyssäkin, mutta siitä ei saisi tulla itsessään ylikorostunut aihe.

Nyt käydystä kirjallisuuskatsauksesta on esimerkiksi käynyt ilmi, että hyötysuhde maksimoidaan selkeästi matalammalla kadenssilla kuin mikä suorituskyvyn kannalta voisi olla parasta (katso kadenssiparadoksi aliluvussa 4.2). Lisäksi suurin osa hyötysuhteen tutkimuksesta tehdään polkupyöräergometrillä, mikä eroaa huomattavasti maantieajosta, jossa poljettu teho ei koskaan pysy pitkiä aikoja vakiona maastonmuotojen, tuulen, tienmuodon, asennon vaihtamisen ja mahdollisten muiden pyöräilijöiden vaikutuksesta. Tähän on toisinaan kiinnitetty huomiota tutkimalla pyöräilyä juoksumatolla (esim. Arkesteijn ym. 2013) tai rullilla (esim. Miller ym. 2013), ja on todettu, että tasapainon ylläpitäminen voisi kuluttaa ylimääräistä energiaa ja lihasaktivaatiot ovat erilaisia juoksumatolla verrattuna kiinteästi pystyssä pysyvään pyörään (Arkesteijn ym. 2013). Toisaalta täytyy muistaa, että rullat tai juoksumatto eivät nekään vastaa aivan maantieolosuhteita.

Monissa tutkimuksissa argumentoidaan niin empiriaan (Passfield & Doust 2000; Joyner & Coyle 2008; Korff ym. 2011; Noordhof ym. 2015) kuin malleihin perustuen (vrt. kaava (1))

hyötysuhteen olevan suorituskyvylle arvokas seikka, maksimaalisen hapenottokyvyn ja anaerobisen kynnyksen ohella. Toisaalta kirjallisuudessa ei olla aivan yksimielisiä hyötysuhteen tärkeydestä suorituskykyyn, mikä nähtiin esimerkiksi kokemuksen yhteydessä; jos hyötysuhde olisi hyvinkin tärkeä suorituskyvylle, voisi kuvitella ammattipyöräilijöiden olevan ylivertaisia hyötysuhteeltaan. Koska tällaista ei kuitenkaan yksiselitteisesti olla kirjallisuudessa raportoitu, voisi hyötysuhde pyöräilysuorituksessa olla ehkä toisarvoinen tekijä maksimaalisen hapenottokyvyn ja anaerobisen kynnyksen jälkeen. Toisaalta kirjallisuudessa ei olla kovin syvällisesti tutkittu pitkässä kuormituksessa havaittua hidasta VO_2 komponenttia ja sen yhteyttä hyötysuhteeseen, jolloin hyötysuhteen suurin merkitys pyöräilyssä voisikin piillä pitkässä suorituksessa.

5 TUTKIMUSKYSYMYKSET

Tutkimuksen tarkoituksena on selvittää eri hyötysuhteiden välisiä yhteyksiä ja niiden keskinäisiä suhteita käyttäen järjestyskorrelaatiota ja fysiologisten muuttujien vaikutuksia työkaluina. Tarkemmin, opinnäytetyössä on kolme tutkimushypoteesia:

1. Kun $P_{\text{ulk}} \rightarrow \infty$, niin laskennallisesti $\eta_{\text{tot}} \rightarrow \eta_{\Delta}$.
2. Riittävän suurilla tehoilla, laitettaessa testattavia järjestykseen eri hyötysuhteiden mukaan, järjestys ei muutu.
3. Tarkastellaan (isometrisen) maksimivoiman, räjähtävän voiman sekä maksimihapenotokyvyn vaikutuksia eri hyötysuhteisiin ja erityisesti kokonaishyötysuhteeseen. Oletus olisi, että $\text{VO}_{2\text{max}}$ ei vaikuta kokonaishyötysuhteeseen. Voimassa on kaksi komponenttia, joista toinen madaltaa kokonaishyötysuhdetta ja toinen parantaa, joten niiden suhteen lopputulos ei ole niin selvä.

Seuraavassa esitellään lyhyet perustelut tutkimushypoteeseille.

Hypoteesi 1: $\eta_{\text{tot}} \rightarrow \eta_{\Delta}$

Jos oletetaan, että sisäinen energia pysyisi hyvin rajattuna, tarkoittaisi se, että tehon kasvaessa rajatta, sisäisen energian rooli kokonaisenergiankulutuksessa muuttuisi olemattomaksi jolloin $\eta_{\text{tot}} \rightarrow \eta_{\Delta}$.

Hypoteesia tukee havainto, jonka mukaan η_{tot} ei juurikaan muutu eliittipyöräilijöillä tehoilla 180 – 300 W (Coyle ym. 1992). Lisäksi tapaustutkimus huippupyöräilijän hyötysuhteista paljastaa, että η_{tot} ja η_{Δ} eroavat toisistaan seitsemän vuoden seurannan aikana ainoastaan 0,2 %-yksikköä (Coyle 2005).

Lisäksi tässä työssä tutkitaan kuinka lähelle η_{tot} ja η_{Δ} pääsevät toisiaan aerobisesti poljetavilla tehoilla. Oletuksena olisi, että ne jäisivät suhteellisen kauas toisistaan, sillä sisäisen työn osuus (tyhjän polkeminen) on arvioitu olevan suuruusluokaltaan noin 50 – 100 W (Luh-tanen ym. 1987; Hansen ym. 2004), paljolti kadenssista riippuen. Laskennallisesti, olettaen η_{Δ} :n olevan 25 % ja tyhjän polkemisen olevan 50 W, saadaan, että η_{tot} on 0,5 %-yksikön päässä deltahyötysuhteesta vasta kun $P_{\text{ulk}} > 600$ W.

Hypoteesi 2: Hyötysuhteiden järjestykset ovat samat

Eri tutkimukset antavat erilaisen arvion nollakuorman energiankulutuksesta, mutta suuruusluokka on noin 50 – 100 W (Luhtanen ym. 1987; Hansen ym. 2004), riippuen paljolti poljettavasta kadenssista. Lisäksi on havaittu, että yleensä yli 200 W kuormilla kokonaishyötysuhde η_{tot} ei enää juurikaan muutu (vrt. Ettema & Loras 2009, kuva 2b). Laajasti tulkiten Hypoteesi 1 yllä olennaisesti sanoo, että ulkoista työtä kasvattamalla kaikki neljä käytettyä hyötysuhdetta η_{tot} , η_{netto} , $\eta_{\text{työ}}$ ja η_{Δ} lähestyvät toisiaan, koska sisäisen energian määrä muuttuu mitättömäksi. Niinpä toinen tutkimushypoteesi sanoo, että jo käytännössä mitattavilla työmäärillä ($P_{\text{ulk}} > 150$ W) nollakuorman energiankulutus olisi suhteessa niin pieni, että laitettaessa tällaisilla intensiteeteillä polkijat paremmuusjärjestykseen eri hyötysuhteilla, ei järjestys juurikaan muuttuisi.

Hypoteesi 3: Fysiologisten ominaisuuksien vaikutus hyötysuhteeseen

Aiemmin kirjallisuudessa on huomattu, että kokemus tai $\text{VO}_{2\text{max}}$ ei juurikaan korreloisi kokonaishyötysuhteen kanssa (vrt. aliluku 4.6), ja tätä havaintoa pyritään tutkimuksessa myös tukemaan. Voimatasossa on kaksi hyötysuhteeseen eri tavoin vaikuttavaa komponenttia. Tyypillisesti pitkittäistutkimuksissa kasvanut maksimivoima on vaikuttanut positiivisesti hyötysuhteeseen (esim. Sunde ym. 2010; Vikmoen ym. 2016). Toisaalta taas suuri II-tyypin lihasten osuus vaikuttaa negatiivisesti hyötysuhteeseen (Horowitz ym. 1994), mutta toisaalta positiivisesti voimantuottokykyyn (McArdle ym. 2007, Luku 18). Niinpä tässä tutkimuksessa tehtävässä poikittaisvertailussa voidaan vertailla kumpi painaa vaakakupissa enemmän; maksimivoiman positiivinen vai II-tyypin lihassolujen suhteellisen osuuden negatiivinen vaikutus hyötysuhteeseen.

Lisäksi tutkimuksessa selvitetään mitkä ovat fysiologisten muuttujien vaikutuksien suuruudet eri hyötysuhteisiin, sillä kirjallisuudessa ei ole selkeää tutkimusta aiheeseen liittyen.

6 MENETELMÄT

6.1 Tutkittavat

Tutkimukseen hyväksyttiin 14 tutkittavaa (12 miestä + 2 naista), monilta eri lajitaustoilta. Rekrytointi suoritettiin jakamalla tutkimuskutsua pyöräilyseuroille sekä liikuntatieteen opiskelijoille. Poljinteho 150 W oli valittu siksi tehoksi, jolla polkijoiden hyötysuhteita verrattaisiin keskenään, koska tällöin tyhjän kuorman polkemisen energiankulutus ei enää vaikuta niin suurelta osin lopputulokseen. Siksi vaatimuksena tutkimukseen mukaanotolle oli, että polkupyöräergometrillä intensiteetillä 150 W testatun RER ei kahden desimaalin tarkkuudella saavuttanut arvoa 1,01 ja poljettu 150 W kuorma ei ollut yli testatun aerobisen kynnyksen. Tällöin voidaan sanoa, että kyseinen kuorma on poljettu lähes yksinomaan aerobisesti ja hyötysuhteet kyseiseen kuormaan voidaan laskea suhteellisen varmasti epäsuoralla kalorimetrillä. Näiden vaatimusten perusteella kolme tutkittava jouduttiin testatuista 17:stä hylkäämään. Mukaan otettujen tutkittavien perustiedot on koottu taulukkoon 4. Alkukyselyssä testattaviksi haluavilta kysyttiin harjoitustausta sekä kestävyysuorituskykyä jollain mittarilla. Tutkimukseen oli Jyväskylän yliopiston eettisen toimikunnan hyväksyntä.

TAULUKKO 4: Tutkittavien perustiedot.

	Miehet	Naiset	Kaikki
Määrä	12	2	14
Ikä (v)	32 ± 5	24 ± 4	31 ± 6
Pituus (cm)	181 ± 6	173 ± 5	180 ± 6
Paino (kg)	77,4 ± 10,6	66,0 ± 1,8	75,8 ± 10,6
VO _{2max} (ml/kg/min)	54,0 ± 6,2	48,7 ± 3,8	53,3 ± 6,0
Aerobisen kynnyksen teho (W)	180 ± 26	150 ± 0	176 ± 27

6.2 Koeasetelma

Pääasiallisena tarkoituksena oli selvittää eri hyötysuhteiden välisiä yhteyksiä, ja tätä varten koeasetelma rakennettiin vastaamaan pyöräilyn hyötysuhteen mittaajan muistilistaa aliluvusta 3.3. Testitapahtumaan otettiin yksi testattava kerrallaan. Aluksi tutkittavilta mitattiin pituus ja paino. Paino punnittiin ilman kenkiä pyöräilyvaatteissa, ja siitä vähennettiin 300 g vaatteiden painoa. Tämän jälkeen heiltä kerättiin lepoahpenkulutusta (MasterScreen CPX laitteisto, CareFusion, San Diego, USA) 10 minuuttia testissä käytettävän polkupyöräergometrin (Monark Ergomedic 839E) päällä istuen. Tämä on kirjallisuudessa vakioitunut

tapa mitata se lepoahapenkulutus hyötysuhdetta mitattaessa (Gaesser & Brooks 1975; Duc ym. 2015). Tämän jälkeen tutkittavat polkivat 5 minuuttia tyhjää vastusta vastaan. Tyhjän kuorman jälkeen tutkittaville annettiin mahdollisuus pieneen juomataukoon. Varsinaisen porrastestin aloituskuorma oli tutkittavan kunnosta riippuen 90–150 W ja kuormaa korotettiin aina 30 W (miehet) tai 25 W (naiset) kerrallaan viiden minuutin välein, kuitenkin siten, että jokainen tutkittava polki kuorman 150 W. Jokaisella portaalla mitattiin hengityskaasuja breath-by-breath -menetelmällä ja tietoja analysoitiin Lab Manager V5.32.0 -tietokoneohjelmalla (Laboratory Systems Group Pty. Ltd, Melbourne, Australia). Jokaisen portaan loputtua tutkittavilta otettiin sormenpästä laktaattiverinäyte, ja näyte analysoitiin Biosen C_line Sport 2 -laktaattianalysointilaitteella (EKF Diagnostic laktaatti/glukoosi, Cardiff, Iso-Britannia). Kuormitusta jatkettiin näin, kunnes laktaatti oli kohonnut lepota- sosta vähintään 1 mmol/l, jonka jälkeen porrastusmallia vaihdettiin siten, että tehon nostot tapahtuivat kahden minuutin välein tutkittavan uupumiseen saakka maksimaalisen hapen- kulutuksen selville saamiseksi. Testi keskeytettiin, mikäli tutkittavan kadenssi laski alle 60 rpm peruuttamattomasti (so. yli 15 sekunnin ajaksi). Kadenssi oli testattavan vapaasti va- littaavissa, mutta kadenssin tuli olla vakio viiden minuutin kuormien aikana. Viiden minuutin kuormien ajan testatun tuli istua satulassa ja pitää samasta kohtaa ohjaustangosta kiinni jotta eri ajoasentojen mahdolliset vaikutukset hyötysuhteeseen saataisiin minimoitua.

Maksimitestin jälkeen tutkittavien annettiin jäähdyttellä noin kymmenen minuuttia kevyel- lä vastuksella polkien, jonka jälkeen mitattiin esikevennyshyppy kädet lanteilla kontaktima- tolla. Ennen ensimmäistä hyppyä testattavat punnittiin hyppyvarusteissaan. Tutkittavilla näytettiin mallisuoritus ja he saivat kokeilla vertikaalihyppyä ennen testiä. Vertikaalihyppy- testissä tutkittavien annettiin tehdä omaan tahtiin 3 maksimaalista suoritusta, joiden jäl- keen pidettiin noin 2 minuutin tauko ennen uutta hyppysarjaa. Hyppyjä tehtiin vähintään 6 ja lopulliseksi tulokseksi otettiin toiseksi ja kolmanneksi parhaimman tuloksen keskiarvo. Tekniikkaa valvottiin jokaisessa hypyssä. Vertikaalihypyn tulos laskettiin ilmaisaoloaikaa hyödyntäen kaavan

$$h = \frac{1}{8}gt^2$$

mukaan, missä t on ilmaisaoloaika ja $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ maan vetovoiman kiihtyvyyssvakio. Tästä laskettiin konsentrisen vaiheen huipputeho Sayersin kaava käyttäen (Sayers ym. 1999, validointia ovat tehneet myös Canavan & Vescovi 2004):

$$P(W) = 51,9 \times \text{hypyn korkeus (cm)} + 48,9 \times \text{kehon paino} - 2007. \quad (4)$$

Esikevennyshyppy on todettu toistettavaksi ja luotettavaksi tavaksi testata alaraajojen räjähtävää voimantuottokykyä (Markovic ym. 2004), ja kontaktimatolla mitatun hyppykorkeuden on raportoitu olevan tarkka tapa mitata hyppykorkeutta kun vertailukohtana on käytetty 3D-liikeanalyysistä saatua hyppykorkeutta (Leard ym. 2007). Yllämainittu Sayersin kaavan huipputehon on ilmoitettu liioittelevan todellista tehoa $\sim 2\text{--}20\%$ (Sayers ym. 1999; Canavan & Vescovi 2004). Lopuksi, noin 5 minuutin lepotauon jälkeen, tutkittavilta mitattiin vielä isometrinen maksimaalinen jalkojen ojennusvoima (isometrinen prässä) 107 asteen polvikulmalla. Isometrinen jalkojen ojennusvoimatesti on suhteellisen toistettava tapa mitata alaraajojen maksimivoimantuottokykyä (Sleivert & Wenger 1994; Ivanović & Dopsaj 2013). Tutkittaville annettiin kolmesta viiteen yritystä 1–2 minuutin palautuksilla kunnes maksimitulos ei enää parantunut. Tässä testissä maksimivoiman tulokset kerättiin talteen ja analysoitiin Signal 4.1 ohjelmistolla.

6.3 Aineiston keruu

Hengityskaasumuuttujat otettiin jokaisen kuorman viimeisen minuutin keskiarvona. Jos hengityskaasumuuttujissa näkyi merkkejä poikkeuksellisen suuresta vaihtelusta (vaihtelu $\sim 15\%$ tai enemmän) yskimisen, puhumisen, hyperventiloimisen, asennon korjaamisen, tms. takia, otettiin hengityskaasumuuttujat viimeisen kahden minuutin keskiarvona. Aerobinen energiantuotto laskettiin hengityskaasumuuttujista epäsuoraa kalorimetria hyödyntäen käyttäen kaavaa kirjasta Keskinen ym. (2004) (Liite 3.11):

$$E_{\text{tot}}(\text{kJ}/\text{min}) = (5,05 \times \text{RER} + 16,1) \times \text{VO}_2.$$

Lisäksi laktaatin tuottoa käytettiin arvioimaan anaerobisen energiankulutuksen määrää aliluvun 3.2 osoittamalla tavalla:

$$\begin{aligned} \text{Anaerobisen energiankulutus 5 min kuormalla (kJ}/\text{min}) = \\ 0,003 \text{ l}/\text{kg} \times \text{Paino (kg)} \times 21,15 \text{ kJ}/\text{l}/\text{min} \times \Delta\text{La}(\text{mmol}/\text{l})/5 \text{ min}. \end{aligned}$$

Tässä laktaatin nousu $\Delta\text{La}(\text{mmol}/\text{l})$ määrättiin suhteessa edelliseen kuormaan ja saatu energiankulutus jaettiin vakiolla 5 min, jotta saadaan energiankulutus minuuttia kohden. Testipaikan lämpötila ($20\text{--}22\text{ }^\circ\text{C}$) ja kosteus ($25\text{--}30\%$) olivat suhteellisen vakiot jokaisella testatulla.

Jokaiselle testatulle määrättiin henkilökohtainen $W_{\text{ulk}}-E_{\text{tot}}$ regressiosuora käyttäen pisteitä ensimmäisestä kuormasta aerobiseen kynnykseen saakka. Kaksi koulutettua testajaa määrittivät aerobiset kynnykset toisistaan riippumattomasti käyttäen Suomessa vallalla olevaa laktaattiin perustuvaa määrittystapaa (aerobinen kynnyks on laktaatin ensimmäinen selkeä nousukohta perustasosta, Keskinen ym. (2004), sivu 66 ja kuva 3.9), jonka lisäksi kynnysten määrittämisessä hyödynnettiin apukriteereinä hengityskaasumuuttujia. Koska kuormien nostot olivat 30 W (naisilla 25 W), kynnyks määritettiin 15W (naisilla 12,5W) tarkkuudella. Käytännössä testatuille tuli 3–5 mittauspistettä, joiden avulla regressiosuora määritettiin.

6.4 Validointi

Jeukendrup & Wallis (2005) argumentoivat, että epäsuora kalorimetrin käyttö yli 75% $VO_{2\text{max}}$ intensiteeteillä ei ole enää luotettava anaerobisen energiantuoton kasvavan osuuden takia. Sitä vastoin kohtuullisilla intensiteeteillä epäsuoran kalorimetrin lähtöolettamukset ovat hyvin perusteltuja ja näillä intensiteeteillä metodi toimii hyvin (Jeukendrup & Wallis 2005).

Tässä opinnäytetyössä käytettyä MasterScreen CPX laitteiston toimintaa ei ole ilmeisesti tutkittu kirjallisuudessa systemaattisella tavalla. Kuitenkin, laite saattaa hyvinkin sisältää systemaattista virhettä; hengityskaasuanalysointilaitteen maahantuoja on ilmoittanut laitteita huoltavalle henkilölle 5 % mittausvirheen olevan hyväksytty virheraja laitteelle (Tukiainen 2016).⁵ Samaa 5 %:n virherajaa laitteen hapenkulutuksessa ilmoitetaan myös esimerkiksi artikkelissa Fritz ym. (2013). Laitteen mittauksien toistettavuudesta ei valitettavasti ole tietoa. Jotta systemaattinen virhe vaikuttaisi mahdollisimman vähäisesti lopputulokseen, kaikki testattavat mitattiin samalla hengityskaasuanalysointilaitteella. Hengityskaasuanalysointilaitteelle tehtiin ennen jokaista mittausta sekä tilavuus- että kaasukalibraatio.

6.5 Tilastollinen analysointi

Hyötysuhteiden välisiä relaatioita tarkasteltiin Spearmanin järjestyskorrelaatiolla ja Somersin D funktiolla. Fysiologisten muuttujien relaatioita hyötysuhteisiin tarkasteltiin Pearssoinin korrelaatiolla. Tilastollisen merkitsevyyden rajaksi asetettiin $p \leq 0,05$, ja käytössä oli

⁵Opinnäytetyömittausten jälkeen laitteelle tehtiin huolto, jonka jälkeen sen mittaus tarkkuus tarkastettiin. Tuolloin laite aliarvioi hapenkulutusta $\sim 8\%$ ja hiilidioksidintuottoa $\sim 5\%$.

2-häntäinen testisuure. Ryhmien välisiä eroja tarkasteltiin 2-häntäisellä t-testillä. Muuttujien normaalisuudet tarkastettiin Shapiro Wilk -testin perusteella. Tilastotiedelaskut suoritettiin pääsääntöisesti Apache Open Office taulukko-ohjelmalla (Open Office 4, Apache Foundation, USA), Excel taulukko-ohjelmalla (Office 2013, Microsoft, USA) ja Mathematica matematiikkaohjelmistolla (Mathematica 7, Wolfram Research, USA). Tulokset ilmoitettiin keskiarvo \pm hajonta muodossa, jos ei muuta mainita.

6.6 Perustelut valinnoille

Hyötysuhteiden välisien suhteiden selvittämiseen käytettiin järjestyskorrelaatiota, sillä työssä oltiin ennemminkin kiinnostuneita siitä pysyykö testattavien keskinäinen järjestys samana hyötysuhteesta toiseen. Toisin sanoen, haluttiin selvittää pärjääkö yhdessä hyötysuhteen vertailussa menestyvä paremmin myös toisen hyötysuhteen vertailussa.

Hyötysuhdetarkastelussa analysoitiin miehet ja naiset samassa ryhmässä, sillä päätarkoituksena oli verrata hyötysuhteiden välisiä suhteita, eikä sukupuoli juurikaan vaikuta tähän. Edelleen, analysoitaessa mitattujen fysiologisten muuttujien korrelaatioita suhteessa hyötysuhteisiin tahdottiin varmistaa ettei mahdollisesti havaitut erot hyötysuhteissa johdu sukupuolen roolista ja siksi tähän tarkasteluun otettiin ainoastaan miestutkittavat (sukupuoli vaikuttaa esimerkiksi maksimaaliseen hapenottokykyyn, Joyner & Coyle 2008). Valittavasti tutkimukseen osallistuvia naisia oli niin vähän ettei sukupuolten välisistä eroista hyötysuhteeseen voitu tehdä analyysia.

7 TULOKSET

7.1 Hyötysuhteiden teoreettinen samankaltaisuus deltahyötysuhteen kanssa

Hyötysuhteet lähestyvät deltahyötysuhdetta, kun W_{ulk} kasvaa rajatta

Tehdään yksi oletamus:

Oletus 7.1. Oletetaan, että $W_{\text{ulk}}-E_{\text{tot}}$ kuvaaja on suora, ts. että $E_{\text{tot}} = aW_{\text{ulk}} + b$ joillain vakioilla $a, b \in \mathbb{R}_+$ (vrt. kuva 8).

Deltahyötysuhde lasketaan määritelmällisesti (olettamuksen 7.1 ollessa voimassa) suoran $E_{\text{tot}} = aW_{\text{ulk}} + b$ kulmakertoimen a käänteislukuna, jolloin $\eta_{\Delta} = \frac{1}{a}$,

Edelleen, määritelmän nojalla

$$\eta_{\text{tot}} = \frac{W_{\text{ulk}}}{E_{\text{tot}}}.$$

Nyt olettamuksen 7.1 mukaan

$$\eta_{\text{tot}} = \frac{W_{\text{ulk}}}{aW_{\text{ulk}} + b} = \frac{1}{a + \frac{b}{W_{\text{ulk}}}} \xrightarrow{W_{\text{ulk}} \rightarrow \infty} \frac{1}{a} = \eta_{\Delta}$$

antaen ja todistaen, että $\eta_{\text{tot}} \rightarrow \eta_{\Delta}$, kun $W_{\text{ulk}} \rightarrow \infty$. Edellisen laskelman mukaisesti voidaan näyttää vastaavanlaisesti, että teoreettisesti myös $\eta_{\text{netto}}, \eta_{\text{työ}} \rightarrow \eta_{\Delta}$, kun $W_{\text{ulk}} \rightarrow \infty$.

Kokonaishyötysuhteen läheisyys deltahyötysuhteeseen

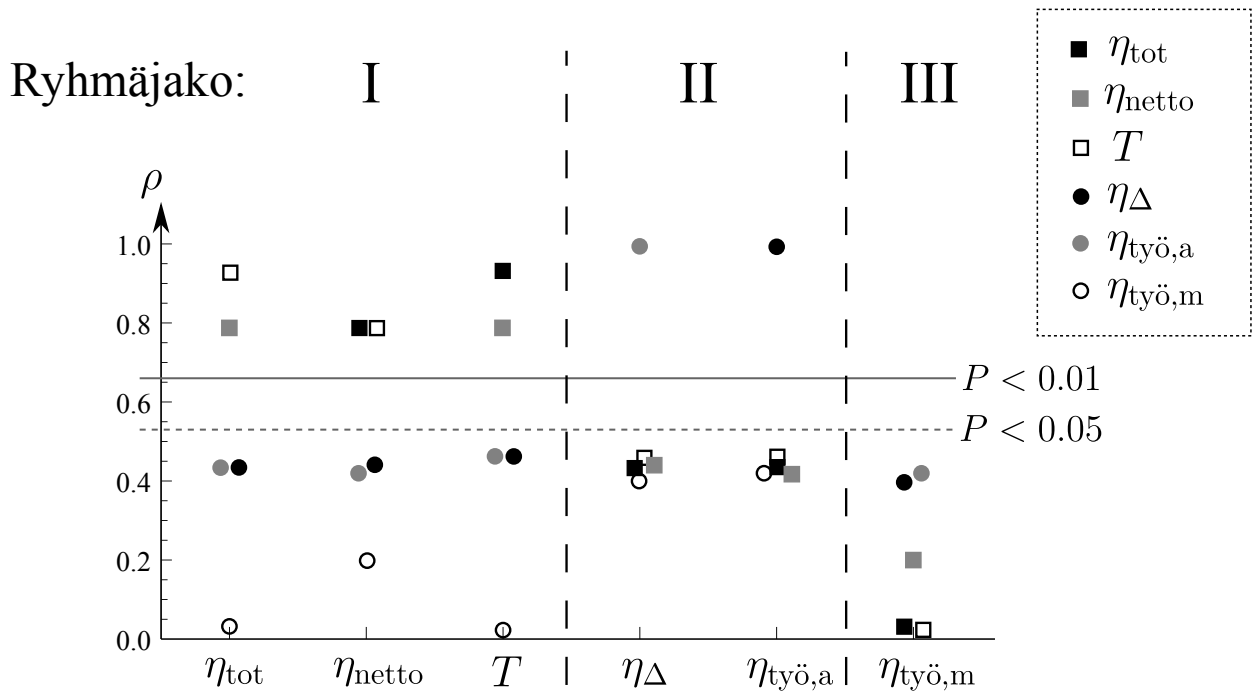
Kun jokaiselle testatulle määrätään oma regressiosuora $E_{\text{tot}} = aW_{\text{ulk}} + b$ ja sijoitetaan se kokonaishyötysuhdekaavaan $\frac{W_{\text{ulk}}}{E_{\text{tot}}}$ voidaan teoreettisesti arvioida kuinka suurilla ulkoisen työn kuormilla η_{tot} olisi lähellä deltahyötysuhdetta jos polkija voisi polkea koko ajan aerobisesti ilman hitaan komponentin ja anaerobisen energiankulutuksen ilmaantumista. Tämä on tehty taulukkoon 5.

TAULUKKO 5: Mitattu pienin erotus deltahyötysuhteen ja kokonaisyötysuhteen välillä, sekä teoreettiset arvot, jolloin η_{tot} on 0,5 ja 0,3 %-yksikön päässä deltahyötysuhteesta. $\eta_{\text{tot}}(\text{max})$ = suurin mitattu η_{tot} arvo. Huomautettakoon, että 10/14 tutkituista saavuttivat maksimaalisen η_{tot} arvonsa vertailuna käytettyä 150 W (= 9 kJ/min) kuormaa suuremmilla intensiteeteillä.

	Mitattu $\eta_{\Delta} - \eta_{\text{tot}}(\text{max})$	W_{ulk} , jolla $\eta_{\Delta} - \eta_{\text{tot}} < \dots$	
		0,5 %	0,3 %
Keskiarvo \pm hajonta (min – max)	3,39 \pm 1,66 % (0,65 – 7,18 %)	1350 \pm 750 W (320 – 2930 W)	2270 \pm 1260 W (544 – 4900 W)

7.2 Hyötysuhteiden relaatiot

Kuvaan 14 on koottu viiden eri hyötysuhteen ja lisäksi taloudellisuuden suhteet toisiinsa Spearmanin järjestyskorrelaation ρ mukaisesti. Lisäksi taulukkoon 6 on samaisten hyötysuhteiden ja taloudellisuuden Somersin D-funktiot. Taulukkoon 7 on tehty pääkomponenttianalyysillä faktorianalyysi tarkastellun kuuden metabolisen tehokkuuden mittarin kanssa.



KUVA 14: Viiden hyötysuhteen (η_{tot} , η_{netto} , $\eta_{\text{työ,a}}$, $\eta_{\text{työ,m}}$, η_{Δ}) ja taloudellisuuden (T) Spearmanin järjestyskorrelaatiot ρ . Kahdella poikkiviivalla on piirretty tilastollisten merkitsevyyksien rajat 0,05 ja 0,01. Metaboliset tehokkuuden mittarit nähdään jakaantuvan kolmeen ryhmään: Ryhmiin I, II ja III.

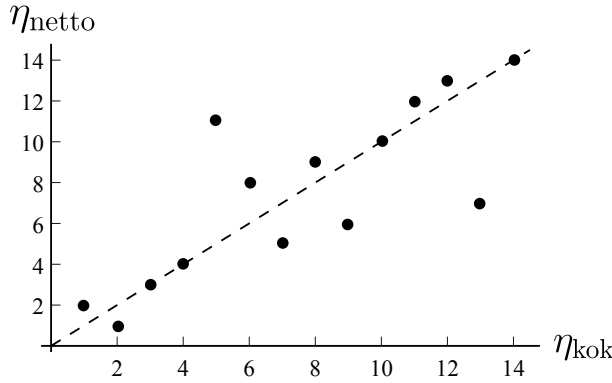
Nähdään, että järjestyskorrelaatioiden mukaan muodostuu kolme erillistä ryhmää, joissa korrelaatio ryhmien sisällä on vahvasti merkitsevää: ensimmäisessä ryhmässä ovat hyötysuhteet η_{tot} , η_{netto} ja T . Toisessa ryhmässä ovat η_{Δ} ja $\eta_{\text{työ,a}}$. Ja kolmannen ryhmän muodostaa yksi-

TAULUKKO 6: Viiden hyötysuhteen (η_{tot} , η_{netto} , $\eta_{\text{työ,a}}$, $\eta_{\text{työ,m}}$, η_{Δ}) ja taloudellisuuden (T) Somersin D -funktio D (p-arvo), joka yhtyy Kendellin τ_a -funktioon tässä tapauksessa. * =merkitsevyys 0,05-tasolla; ** =merkitsevyys 0,01-tasolla.

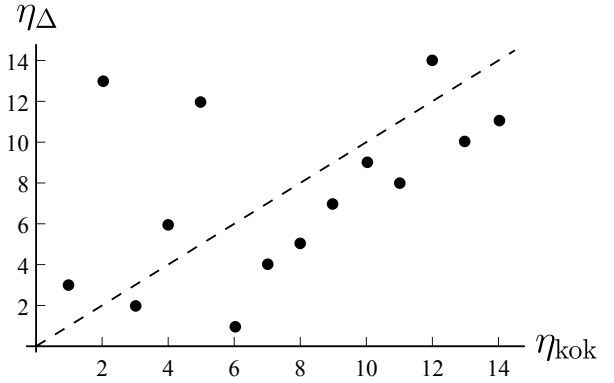
	η_{kok}	η_{netto}	$\eta_{\text{työ,a}}$	$\eta_{\text{työ,m}}$	η_{Δ}
η_{netto}	0,67** (0,0008)	–	0,34 (0,09)	0,14 (0,48)	0,36 (0,07)
$\eta_{\text{työ,a}}$	0,36 (0,07)	0,34 (0,09)	–	0,32 (0,11)	0,98** (1×10^{-6})
$\eta_{\text{työ,m}}$	0,03 (0,9)	0,14 (0,48)	0,32 (0,11)	–	0,30 (0,14)
η_{Δ}	0,38 (0,055)	0,36 (0,07)	0,98** (1×10^{-6})	0,30 (0,14)	–
T	0,82** (0,00002)	0,63** (0,002)	0,36 (0,07)	0,03 (0,9)	0,38 (0,055)

nään $\eta_{\text{työ,m}}$. Kuvaan 15 on havainnollistettu neljä eri kuvaa parittaisista pistekaavioista eri hyötysuhteille. Taulukkoon 8 on koottu kaikkien testattujen lajitaustat, eri hyötysuhteiden arvot keskiarvoineen ja hajontoineen.

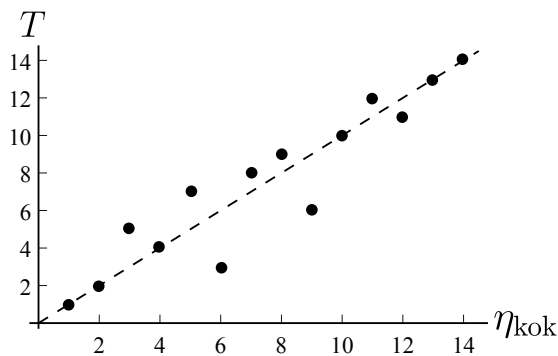
(a) $\rho = 0.79^{**}$ $D = 0.67^{**}$



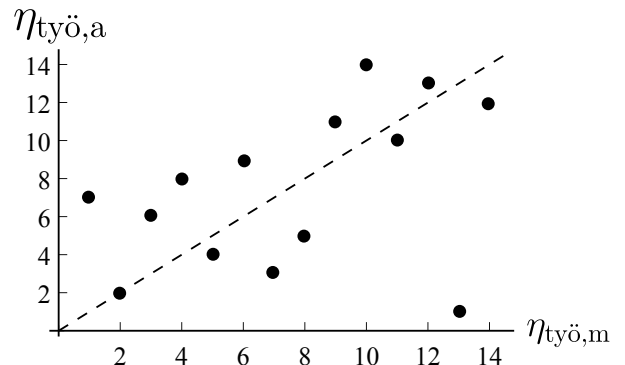
(b) $\rho = 0.43$ $D = 0.38$



(c) $\rho = 0.93^{**}$ $D = 0.82^{**}$



(d) $\rho = 0.42$ $D = 0.32$



KUVA 15: Neljä eri järjestyskorrelaatiokuvaa parittaisina pistekaavioina. Vaaka- ja pystyriiville on laitettu kyseisen hyötysuhteen mukainen järjestys parhaimmasta (14) huonoimpaan (1). (a) η_{tot} vs. η_{netto} ; (b) η_{tot} vs. η_{Δ} ; (c) η_{tot} vs. T ja (d) $\eta_{\text{työ,a}}$ vs. $\eta_{\text{työ,m}}$. Kuviin on merkitty Spearmanin järjestyskorrelaation ρ sekä Somersin D -funktion arvo. * =merkitsevyys 0,05-tasolla; ** =merkitsevyys 0,01-tasolla.

TAULUKKO 7: Hyötysuhteista tehty faktorianalyysi pääkomponenttianalyysillä. Muuttujat muunnettiin standardiksi normaalijakaumaksi ja faktorit etsittiin näiden Pearsonin korrelaatiomatriisien kertoimista. Kolme ensimmäistä pääkomponenttifaktoria selittävät 96 % havaitusta varianssista. Itseisarvoltaan yli 0,5 korrelaatiot on tummennettu taulukkoon.

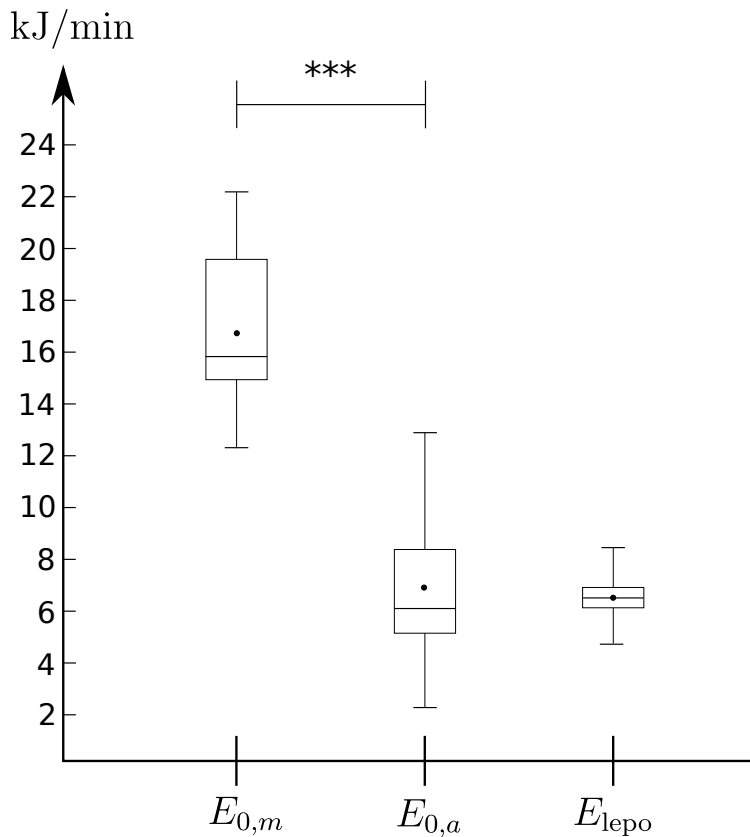
		Korrelaatiokertoimet		
	Muuttuja	Faktori 1	Faktori 2	Faktori 3
Ryhmä I	η_{tot}	-0,93	0,68	0,06
	η_{netto}	-0,82	0,51	-0,16
	T	-0,95	0,72	0,06
Ryhmä II	$\eta_{\text{työ,a}}$	-0,61	-0,31	0,12
	η_{Δ}	-0,63	-0,30	0,08
Ryhmä III	$\eta_{\text{työ,m}}$	-0,12	-0,63	-0,86

TAULUKKO 8: Kaikkien testattujen lajitausta, luokittelu kokeneeksi pyöräilijäksi (X) tai ei, eri hyötysuhteet prosentteina sekä hyötysuhteiden keskiarvot ja hajonnat prosentteina. Kaksi tutkijaa jakoivat testattavat pyöräilijöihin ja ei-pyöräilijöihin harjoitustaustan ja harjoittelumäärän mukaan. * =naistestattava. Deltahyötysuhdetta lukuun ottamatta kaikki muut hyötysuhteet on mitattu 150 W intensiteetillä. Tutkittavat on järjestetty kokonaishyötysuhteen mukaan nousevasti.

Testattava	Lajitausta	Kokenut?	η_{tot}	η_{netto}	$\eta_{\text{työ,a}}$	$\eta_{\text{työ,m}}$	η_{Δ}
A	Cross-Fit		18,4	21,7	22,4	32,1	22,3
B	Pyöräily, triathlon	X	19,1	21,5	26,3	33,8	26,4
C	Lentopallo, kuntopyöräily		19,4	22,6	21,6	29,0	21,8
D	Kuntopyöräily, kuntosali	X	19,7	22,8	22,8	29,2	22,7
E	Soutu		19,7	24,2	25,6	38,3	26,0
F	Soutu		19,7	23,4	20,8	35,8	20,9
G	Maastopyöräily	X	20,0	23,2	22,8	32,4	22,6
H	Pyöräily, triathlon	X	20,1	23,6	22,6	30,0	22,6
I*	Hiihto		20,2	23,4	22,8	28,0	22,8
J	Hiihto, suunnistus, juoksu		20,3	24,1	24,0	30,8	24,2
K	Kuntojuoksu		20,7	24,4	23,7	29,4	24,0
L	Maasto- ja maantiepyöräily	X	20,8	24,4	27,4	33,3	27,3
M	Kuntopyöräily ja -juoksu	X	20,8	23,4	24,2	33,8	24,5
N*	Rugby		21,4	25,1	25,5	32,4	25,6
	Keskiarvo (%)		20,0	23,4	23,8	32,0	23,8
	\pm hajonta (%)		0,8	1,0	1,9	2,9	1,9

7.3 Tyhjän kuorman ja levon energiankulutus

Kuvaan 16 on piirretty laatikkodiagrammi mitatusta ($E_{0,m}$) sekä regressiosuorasta arvioidusta ($E_{0,a}$) nollakuorman energiankulutuksesta ja lepoenergiankulutuksesta. Mitattu $E_{0,m}$ on keskimäärin 142 % suurempi kuin $E_{0,a}$ ja ne eroavat toisistaan merkitsevästi ($p = 4 \times 10^{-9}$). Edelleen, $E_{0,a}$ ja E_{lepo} eivät eroa toisistaan merkitsevästi ($p = 0,6$). Edelleen, $E_{0,a}$ ja $E_{0,m}$ korreloivat keskenään välttävästi ($r = 0,45$ $P = 0,11$). Kadenssin nähdään korreloivan vahvasti $E_{0,m}$:n ($r = 0,71$, $p < 0,05$), mutta ei $E_{0,a}$:n ($r = 0,37$, $p = 0,26$) kanssa. Lopuksi, taulukkoon 9 on koottu 95 %:n luottamusvälien pituudet deltahyötysuhteelle ja $E_{0,a}$:lle.



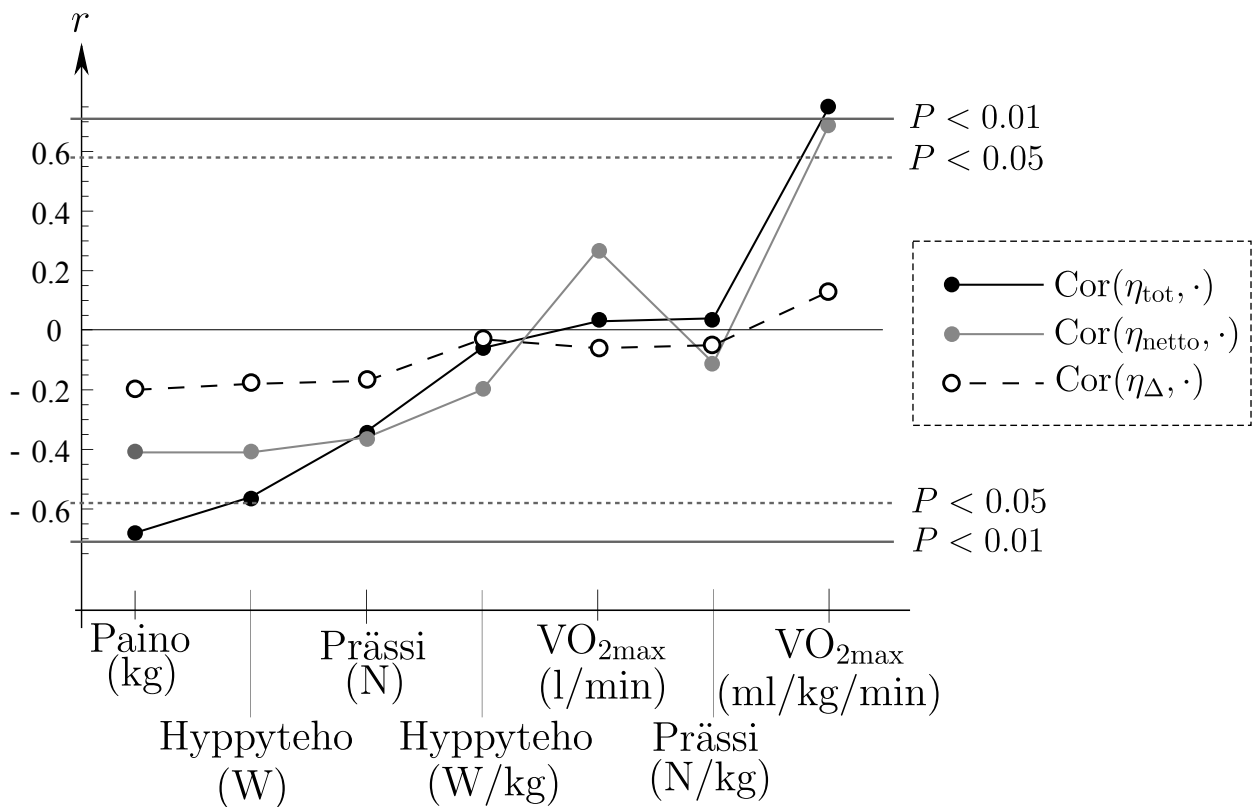
KUVA 16: Laatikkodiagrammi: $E_{0,m}$, $E_{0,a}$ ja E_{lepo} . *** =merkitsevyys 0,0001 tasolla.

TAULUKKO 9: Deltahyötysuhteen ja arvioidun nollakuorman energiankulutuksen ($E_{0,a}$) keskiarvot sekä 95 % luottamusvälien pituuksien keskiarvot keskihajontoineen.

Suure	Keskiarvo	95 % luottamusvälin pituus
η_{Δ} (%)	23,8	$6,9 \pm 5,2$
$E_{0,a}$ (kJ/min)	6,9	47 ± 32

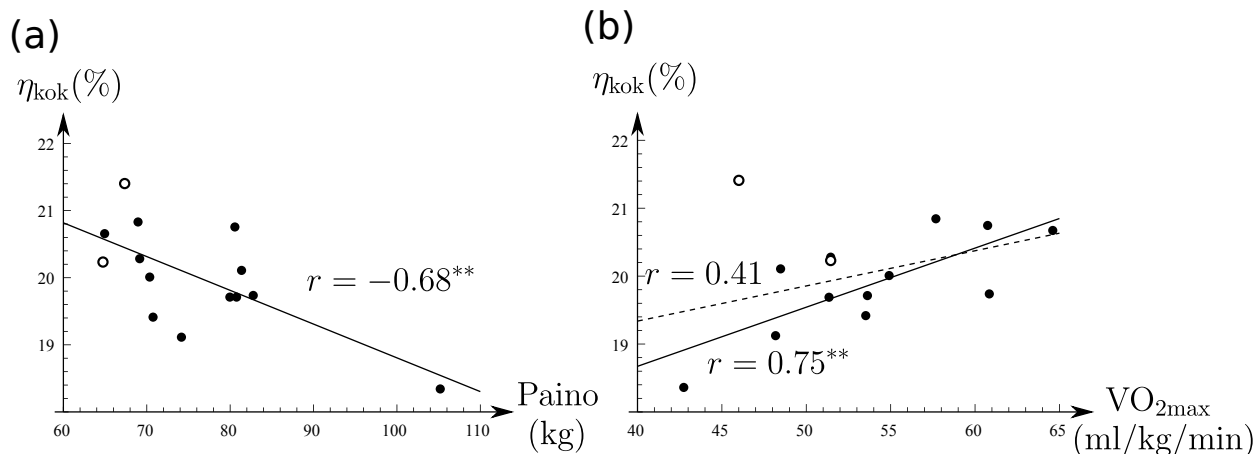
7.4 Korrelaatiot

Kuvaan 17 on piirretty eri fysiologisten muuttujien korrelaatioita hyötysuhteiden η_{tot} , η_{netto} ja η_{Δ} suhteen miestutkittavilla. Erityisesti nähdään, että mitatut muuttujat vaikuttaisivat voimakkaimmin kokonaishyötysuhteeseen ja vähiten voimakkaasti deltahyötysuhteeseen. Mitatuista muuttujista painolla on suurin yksittäinen merkitys hyötysuhteisiin; painon ja maksimaalisen hapenottokyvyn (ml/kg/min) välinen korrelaatio on $r = -0,57$ ($p = 0,052$). Kuvaan 18 on piirretty painon ja painoon suhteutetun maksimaalisen hapenottokyvyn parittaiset pistekaaviot kokonaishyötysuhteen kanssa.

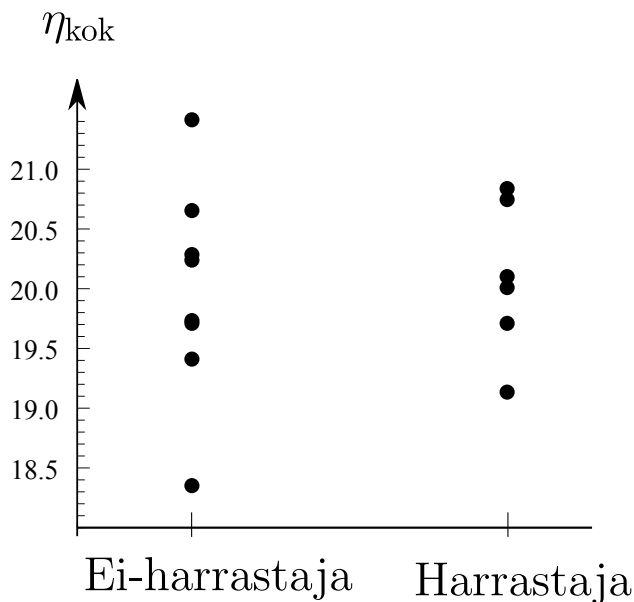


KUVA 17: Pearsonin korrelaatiokerroin r kolmen hyötysuhteen kanssa: η_{tot} , η_{netto} ja η_{Δ} . Kuvaan on poikkiviivoilla piirretty korrelaation 0 sekä tilastollisten merkitsevyyksien 0,05 ja 0,01 rajat.

Muista mitatuista muuttujista, kaikkien tutkittavien joukossa kadenssin rooli useimmiten käytettyihin hyötysuhteisiin oli vähäinen: η_{tot} : $r = -0,03$; η_{netto} : $r = -0,34$ ($p = 0,3$); η_{Δ} : $r = 0,30$ ($p = 0,4$). Kadenssin vaikutus työhyötysuhteeseen $\eta_{\text{työ,m}}$ oli suuri: $r = 0,74^{**}$ ($p < 0,01$). Muita merkitseviä korrelaatioita ei liity mitattuun työhyötysuhteen $\eta_{\text{työ,m}}$. Lopuksi, kuvaan 19 on tutkittavat jaoteltu pyöräily harrastajiin ja ei-harrastajiin. Kokemus ei anna ryhmien välille merkitsevää eroavaisuutta ($p = 0,8$).



KUVA 18: (a) Painon (kg) ja (b) maksimaalisen hapenottoyvyn (ml/kg/min) korrelaatiot kokonaishyötysuhteen kanssa. Avoimet pallot: naistutkittavat; suljetut pallot: miestutkittavat. Kuviin on merkitty Pearsonin korrelaatiokerroin r . Lisäksi kuvassa (b) on piirretty regressiosuora kaikkien tutkittavien kanssa (katkoviiva) ja ainoastaan miestutkittaville (yhtenäinen viiva). Painon korrelaatio $r = -0,68$ on sama niin kaikkien kuin vain miestutkittavienkin otannassa. * =merkitsevyys 0,05-tasolla; ** =merkitsevyys 0,01-tasolla.



KUVA 19: Kaksi testajaa jakoivat riippumattomasti testatut pyöräilyn harrastajiin ($n = 6$) ja ei-harrastajiin ($n = 8$), katso Taulukko 8. Ryhmien välillä ei ole eroa kokonaishyötysuhteessa ($p = 0,8$) (eikä deltahyötysuhteessa $p = 0,4$) eikä variaatiossa ($p = 0,5$).

8 POHDINTA

Tutkielmassa tarkasteltiin pyöräilyn hyötysuhteiden välisiä suhteita. Erityisesti, työssä käytettiin Spearmanin järjestyskorrelaatiota apuna tutkittaessa kuinka hyvin järjestys säilyisi hyötysuhteesta toiseen. Tutkielman päätulos on, että vaikka teoriassa kaikki hyötysuhteet lähestyvät deltahyötysuhdetta ulkoisen työn kasvaessa rajatta, ollen osoituksena hyötysuhteiden samankaltaisuuksista, niin käytännössä kuusi tarkasteltua polkemisen metabolisen tehokkuuden mittaria (viisi hyötysuhdetta ja taloudellisuus) voidaan jakaa kolmeen toisistaan eriävään ryhmään järjestyskorrelaatioidensa mukaan. Edelleen, tutkielmassa tarkasteltiin myös fysiologisten muuttujien merkitystä hyötysuhteeseen ja nähtiin, että paino on vaikuttavin yksittäinen tekijä hyötysuhteelle. Lisävakuutusta ryhmien eriäväisyyksistä saatiin huomiosta, että η_{tot} (tai yleisemmin Ryhmä I) näyttäisi olevan alttiimpi mitattujen fysiologisten muuttujien vaikutuksille kuin η_{Δ} tai $\eta_{\text{ty},\text{m}}$ (tai yleisemmin Ryhmät II ja III).

8.1 Hyötysuhteiden ryhmittely

Hyötysuhteiden välisiä suhteita tarkasteltiin Spearmanin järjestyskorrelaatiolla ja Somersin D-funktiolla. Näistä Spearmanin järjestyskorrelaatio ρ mittaa kahden muuttujan havaintoarvojen suuruusjärjestyksien yhteensopivuutta ja sen ominaisuudet ovat samantapaiset kuin Pearsonin korrelaatiokertoimella (Mellin 2006, Luku 13). Somersin D -funktio on yhteneväisyyden mitta (measure of agreement) järjestäytyneiden muuttujien välillä ja senkin ominaisuudet ovat samantapaiset kuin Pearsonin korrelaatiokertoimella (Mellin 2006, Luku 13). Se vertaa kahta järjestyksiin järjestettyä hyötysuhdetta keskenään ja kertoo kuinka hyvin järjestykset muuttuvat samaan suuntaan. Periaatteessa sen voitaisi tulkita kertovan millä todennäköisyydellä voidaan odottaa järjestyksen nousevan/laskevan toisessa hyötysuhteessa jos sen tiedetään ensimmäisessä nousevan/laskevan. Jos muuttujien järjestykset ovat täysin satunnaisia, niin $\rho \approx 0 \approx D$.

Nyt hieman yllättäen nähdään kuvasta 14, että kuusi tarkasteltua tehokkuuden mittaria (η_{tot} , η_{netto} , $\eta_{\text{ty},\text{a}}$, $\eta_{\text{ty},\text{m}}$, η_{Δ} , taloudellisuus) eivät käyttäydykään järjestyskorrelaation valossa samalla tavalla, vaan ne jakaantuvat kolmeen ryhmittymään: Ryhmässä I ovat η_{tot} , η_{netto} ja taloudellisuus; Ryhmässä II ovat $\eta_{\text{ty},\text{a}}$ ja η_{Δ} ; Ryhmässä III on ainoastaan $\eta_{\text{ty},\text{m}}$. Tätä luokittelua kolmeen eriävään ryhmään tukee myös taulukon 7 pääkomponenttiansalyysilla tehty faktoriansalyysi. Nähdään, että siinä faktoriin 1 liittyy vahvasti korrelaatioilla

(|korrelaatio| > 0,5) kaikki muut muuttujat paitsi $\eta_{ty\ddot{o},m}$ (eli Ryhmä III). Edelleen, faktoriin 2 liittyy Ryhmän I muuttujat positiivisin korrelaatioin ja Ryhmän II muuttujat negatiivisin korrelaatioin. Lopuksi, faktoriin 3 liittyy vahvasti ainoastaan Ryhmän III muuttuja.

Ensimmäisen ryhmän jäsenten voidaan laajasti kuvattuna nähdä kuvaavan koko kehon metabolista tehoa polkupyörätyössä. Toinen ja kolmas ryhmä taas kuvaavat enemmänkin luurankolihasen hyötysuhdetta polkupyörätyössä. Erotus Ryhmien II ja III välillä muodostuu tavasta vähentää nollakuorman aiheuttama sisäinen energiankulutus kokonaisenergiankulutuksesta. Lisäksi tarkasteltaessa järjestyskorrelaatioita, voitaisiin kuvasta 14 vetää se johtopäätös, että Ryhmä III on kauempana Ryhmästä I kuin Ryhmä II, koska $\eta_{ty\ddot{o},m}$:n järjestyskorrelaatio Ryhmän I jäsenten kanssa on huomattavasti pienempää kuin Ryhmän II jäsenten kanssa. Samaa logiikkaa päätelleen voitaisiin sanoa, että Ryhmät I ja III ovat yhtä kaukana Ryhmästä II.

Tämä eroaa hypoteesista hyötysuhteiden samankaltaisuuksista, mikä perustui ajatukseen, että ulkoisen työmäärän kasvaessa rajatta, lepoenergiankulutuksen ja sisäisen työn merkitys muuttuu olemattomaksi. Pääsyynä sille, ettei järjestys säily hyötysuhteesta toiseen voitaisiin pitää sitä, että vaikka teoriassa lepoenergiankulutus ja tyhjän kuorman polkemiseen käytetty energia E_0 menettävätkin merkityksensä suurilla tehoilla, ei tällaisia tehoalueita päästä käytännössä polkemaan puhtaan aerobisesti kuten taulukosta 5 nähdään: η_{tot} ja η_{Δ} ovat 0,5%-yksikön päässä toisistaan vasta keskimäärin 1350 (± 750 W) teholla. Näin ollen, jos tyhjän kuorman polkemisessa yksilöillä on hyötysuhdetta selittäviä yksilöllisiä eroja, kuten Hintzy ym. (2005) otaksuivat, aiheuttaa sen poisto luonnollisesti eroja niihin hyötysuhteisiin, joissa sen rooli on pyritty poistamaan (so. $\eta_{ty\ddot{o}}$ ja η_{Δ}). Toinen syy havaittuun ryhmien eroavaisuuksiin voi olla delta- ja työhyötysuhteiden määrittämisen vaikeus ja pienoinen epävarmuus, johon paneudutaan myöhemmin syvemmin.

Kirjallisuudesta tälle ryhmitykselle saadaan tukea. Ensinnäkin Moseley & Jeukendrup (2001) ehdottavat, että hyötysuhdetarkasteluissa olisi hyvä ilmoittaa sekä η_{tot} (Ryhmästä I) että η_{Δ} (Ryhmästä II), koska η_{tot} kuvaa paremmin koko kehon hyötysuhdetta ja η_{Δ} luurankolihasen hyötysuhdetta. Edelleen, tutkittaessa eri fysiologisten muuttujien korrelaatioita hyötysuhteisiin on havaittu muun muassa, että ihon lämpötila korreloi kokonais- ja nettohyötysuhteen (Ryhmä I) kanssa mutta ei deltahyötysuhteen (Ryhmä II) kanssa (Duc ym. 2015); että maksimaalinen hapenottokyky korreloi merkitsevästi kokonaishyötysuhteen (Ryhmä I) mutta ei deltahyötysuhteen (Ryhmä II) kanssa (Moseley & Jeukendrup 2001); että kadenssi vaikuttaa merkitsevästi deltahyötysuhteeseen (Ryhmä II) mutta ei kokonais-

hyötysuhteeseen (Ryhmä I) (Chavarren & Calbet 1999) ja että paino korreloi merkitsevästi kokonaishyötysuhteen kanssa mutta ei hyötysuhteiden η_{Δ} ja $\eta_{ty\ddot{o}}$ (Berry ym. 1993).

8.2 Ryhmät ja eroavaisuudet

8.2.1 Ryhmä I

Ensimmäisessä ryhmässä olevat η_{tot} ja taloudellisuus korreloivat järjestyksen osalta hyvin vahvasti ($\rho = 0,93$), mikä ennakoitiin jo johdantoluvussa 3.1: käytännössä taloudellisuus on karkea mittari kokonaishyötysuhteelle. Siinä ei vain oteta huomioon hiilidioksidin tuottoa hapenkulutuksen ohella kuten kokonaishyötysuhteessa. Kokonaishyötysuhde on sinänsä parempi mittari polkemisen tehokkuudelle kuin taloudellisuus, että tyypillisesti paljon harjoitelleet nojaavat enemmän rasvametaboliaan energiantuotossaan kevyillä kuormilla kuin harjoittelemattomat (Abbiss & Laursen 2005), mitä pelkkä taloudellisuuden mittaaminen ei huomioi. Lisäksi taloudellisuuskäsitteeseen ei yleensä sisällytetä anaerobisen energiantuoton osuutta, mikä edelleen arvottaa kokonaishyötysuhdetta paremmaksi mittariksi polkemistyön energiatehokkuudelle taloudellisuuteen verrattuna. Tosin nyt kerätyn aineiston perusteella järjestyskorrelaatio taloudellisuuden ja kokonaishyötysuhteen välillä alle aerobisen kynnyksen on niin huomattava ($\rho = 0,93$), että on perusteltua käyttää kumpaa tahansa. Huomauttakaan, että tässä tutkimuksessa käytetty taloudellisuuden mittari VO_2 (l/min) vastaa kirjallisuudessa tavattua yleisempää W/l/min (esimerkiksi Jeukendrup ym. 2000; Rønnestad ym. 2011), koska vertailut tehtiin vakioteholla 150 W, jolloin VO_2 (l/min) on vakiokerrointa vailla sama kuin kirjallisuudessa käytetyt W/l/min taloudellisuudet.

Se, että η_{netto} kuuluu samaan ryhmään kuin η_{tot} tarkoittaa käytännössä, että testattavilla ei ollut paljontakaan eroja lepoenergiankulutuksissaan, koska E_{lepo} vähentäminen kokonaishyötysuhteesta ei juuri vaikuttanut hyötysuhteiden järjestyksiin. Tässä tutkimuksessa lepoenergiankulutus mitattiin kirjallisuudessa vakiintuneella tavalla (esimerkiksi Gaesser & Brooks 1975; Duc ym. 2015) testiympäristössä pyörän päällä istuen juuri ennen maksimitestiä minkä voisi olettaa vaikuttavan lepoenergiankulutukseen toisten sietäessä paremmin stressitilannetta ja pystyen rauhoittumaan oudommassa ympäristössä. Tämän taas voisi kuvitella näkyvän suuremmissa lepoenergiankulutuksen hajonnassa verrattuna makuulla tehtäviin lepoenergiankulutusmittauksiin. Tulokset eivät kuitenkaan tue tätä ajatusta; nyt havaittu lepoenergiankulutus oli $6,49 \pm 0,93$ kJ/min. Makuuasennossa se on ollut $5,08 \pm$

0,92 kJ/min (Segal 1987) ja $4,84 \pm 0,97$ kJ/min (Zurlo ym. 1990). Niinpä havaitaan, että nyt tehdyssä tutkimuksessa keskiarvo on luonnollisesti suurempaa kuin makuulla tehdyissä tutkimuksissa, mutta hajonta on saman suuruinen antaen ymmärtää, että istuma-asennossa tehty lepoenergiankulutusmittaus voisi olla suhteellisen luotettava tapa mitata lepoenergiankulutusta. Tätä tukee myös Saunders (2016), Luku 7, jossa nettohyötysuhteen toistettavuus oli suhteellisen korkealla tasolla.

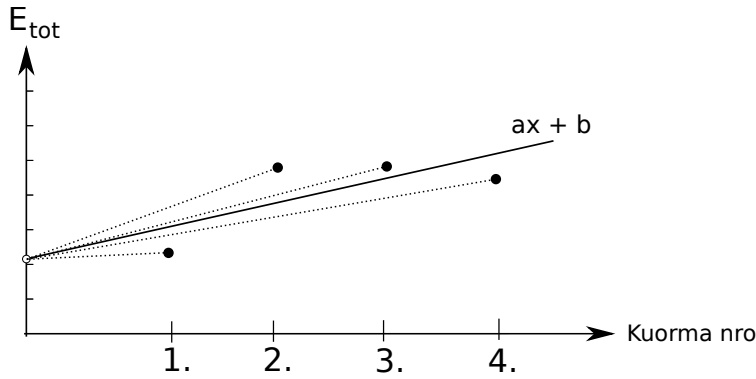
Kuten kuvasta 17 nähdään, η_{netto} ei ole niin herkkä muutoksille kuin η_{tot} , eli korrelaatiot mitattujen fysiologisten suureiden kanssa on pienempää. Tämä johtuu siitä, että suurin kokonaishyötysuhteeseen vaikuttavista muuttujista on paino, ja samaten paino korreloi vahvasti lepoenergiankulutuksen kanssa (McArdle ym. 2007, sivu 197). Niinpä vähennettäessä kokonaisenergiankulutuksesta nettohyötysuhdetta varten painosta riippuva lepoenergiankulutuksen osuus pois, jäljelle jäävä osa ei reagoi niin vahvasti painon muutoksiin.

8.2.2 Ryhmä II

Ryhmä II koostuu hyötysuhteista $\eta_{\text{työ,a}}$ ja η_{Δ} . Työhyötysuhteen $\eta_{\text{työ,a}}$ määritelmässä nolla-kuorman energiankulutus ekstrapoloidaan samasta regressiosuorasta kuin mistä η_{Δ} määrätään. Näin ollen vahva järjestykskorrelaatio Ryhmän II hyötysuhteiden välillä ($\rho = 0,996$) selittyy yhteisellä selittäväällä tekijällä. Lisäksi $\eta_{\text{työ,a}}$ vastaa *kuormittain* deltahyötysuhdetta. Eli jokaiselle yksittäiselle mittauspisteelle arvioitu työhyötysuhde $\eta_{\text{työ,a}}$ vastaa kyseisen suoran kulmakertoimen käänteislukua (katso kuva 20). Edelleen, jos kaikki mittauspisteet $W_{\text{ulk}}-E_{\text{tot}}$ kuvaajalla olisivat tarkalleen samalla suoralla — kuten teoria ennustaa — olisi η_{Δ} ja $\eta_{\text{työ,a}}$ yhtenevät jokaisessa mittauspisteessä. Kuten taulukosta 8 kuitenkin nähdään, useimmissa tapauksissa $\eta_{\text{työ,a}}$ eroaa vain hyvin vähän η_{Δ} :sta; tässä tutkimuksessa itseisarvoinen erotus näiden hyötysuhteiden välillä oli $0,17 \pm 0,11$ %-yksikköä.

Käytännössä useamman mittauspisteen kanssa näitä kahta hyötysuhdetta ei saa yhtymään samaksi, sillä pienet vaihtelut takaavat sen, ettei $W_{\text{ulk}}-E_{\text{tot}}$ kuvaajan mittauspisteet käytännössä ole koskaan tismalleen samalla suoralla. Kuva 20 selkiyttää tilannetta. Deltahyötysuhde saadaan mitattujen pisteiden kautta — yleensä pienimmän neliösumman menetelmällä — piirretyn suoran kulmakertoimesta. Tätä samaista kulmakerrointa ei voi replikoida työhyötysuhteiden $\eta_{\text{työ,a}}$ — eli yksittäisiin mittauspisteisiin piirrettyjen suorien kulmakertoimien — avulla millään yksinkertaisella keskiarvoistuksella tai siloituksella. Käytännössä tämän voi ajatella johtuvan siitä, että regressiosuora saadaan minimoimalla neliösumma, eli se on

epälineaarinen toimenpide, kun taas odotusarvo tai muu yksinkertainen silote $\eta_{ty\ddot{o},a}$ arvoista on lineaarinen toimenpide.



KUVA 20: Havainnollistava kuva hyötysuhteista η_{Δ} ja $\eta_{ty\ddot{o},a}$. Mustalla viivalla on piirretty neljän pisteen kautta kulkeva regressiosuora. Tämän suoran kulmakertoimen käänteislukuna saadaan η_{Δ} . Katkoviivoilla on piirretty jokaiseen neljään pisteeseen suora, joka leikkaa y-akselin samassa pisteessä kuin regressiosuora $ax + b$. Näiden katkoviivasuorien kulmakertoimien käänteislukuna saadaan $\eta_{ty\ddot{o},a}$ jokaiselle yksittäiselle kuormalle.

Yleensä mitatut $W_{ulk} - E_{tot}$ pisteparit sijoittuvat niin lähelle lineaarista suoraa, että käytännössä $\eta_{ty\ddot{o},a}$ ja η_{Δ} lähes vastaavat toisiaan. Näistä kahdesta η_{Δ} voisi olla kuitenkin kuvaavampi hyötysuhde, sillä vaikka molemmissa hyötysuhteissa käytetään samaa regressiosuoraa apuna, antaa η_{Δ} tuloksen perustuen useampaan mittauspisteeseen, jolloin yksittäisen pisteen mittausvirheen painoarvo pienenee.

8.2.3 Ryhmä III ja työhyötysuhteiden eroavaisuus

Ryhmä III koostuu yksistään työhyötysuhteesta $\eta_{ty\ddot{o},m}$. Teoriassa eri ryhmiin kuuluvat $\eta_{ty\ddot{o},m}$ ja $\eta_{ty\ddot{o},a}$ tekevät kokonaisenergiankulutuksesta saman vähennyksen: tyhjän kuorman polkemiseen käytetty energia, eli teoriassa sisäinen energiankulutus polkemistyössä. Käytännössä on jo useasti huomattu, että mitattu $E_{0,m}$ ja regressiosuorasta ekstrapoloitu $E_{0,a}$ eroavat toisistaan huomattavasti (Gaesser & Brooks (1975); Moseley ym. (2001); Hintzy-Cloutier ym. (2003); Hopker ym. (2010)). Raportoituja eroja ovat mm. 20 – 30 % (Hintzy-Cloutier ym. 2003), ~ 40 % (Moseley ym. 2001), ~ 60 % (Hopker ym. 2010) ja ~ 350 % (Hopker ym. 2010). Tässä tutkimuksessa $E_{0,m}$ oli keskimäärin ~ 140 % suurempi kuin $E_{0,a}$ ($16,7 \pm 3,1$ kJ vs. $6,9 \pm 2,8$ kJ, katso kuva 16). Tässä tutkimuksessa mitattu hapenkulutus nollakuorman polkemisessä (805 ± 146 ml/min) vastaa myös kirjallisuuden lukemia (esimerkiksi Hopker ym. 2010; Moseley ym. 2001 saivat ~ 1000 ml/min). Kuten johdantoluvussa 3.2 mainittiin,

on erotuksen $E_{0,m} - E_{0,a}$ suuruudelle annettu useampi teoreettinen selitys: on hyvin vaikea saada aikaiseksi todellista nollakuormaa aikaiseksi, koska ergometrissa esiintyy aina jotain pientä vastusta; nollakuormaa mitattaessa ei mitata pelkkää jalkojen pyörittämiseen kuuluvaa sisäistä energiaa, vaan myös lisäenergiaa, jota tarvitaan kehon stabilisointiin; tyhjää kuormaa vastaan polkeminen on niin epänormaali tilanne, etteivät lihasten aktivoinnit ole siihen tottuneet ja niinpä rekrytointikuviot ovat erilaiset tyhjää kuormaa polkiessa kuin todellista vastusta vastaan polkiessa. (Hintzy-Cloutier ym. 2003). Kirjallisuudessa kumpikaan työhyötysuhteista ei ole niin suosittu kuin delta- tai kokonaishyötysuhde, mutta molempia toisinaan käytetään ($\eta_{ty\ddot{o},a}$ on käytössä esimerkiksi artikkelissa Mogensen ym. 2006 ja $\eta_{ty\ddot{o},m}$ artikkeleissa Berry ym. 1993; Hintzy ym. 2005).

Työhyötyshteet $\eta_{ty\ddot{o},a}$ ja $\eta_{ty\ddot{o},m}$ antavat kovin eriäviä tuloksia, ne luokitellaan tämän tutkimuksen mukaan järjestyskorrelaation mukaan eri ryhmiin ja lisäksi aliluvusta 7.3 nähdään, että $E_{0,a}$ ja $E_{0,m}$ korreloivat vain heikosti keskenään ($r = 0,45$). Niinpä on selvää, etteivät $\eta_{ty\ddot{o},a}$ ja $\eta_{ty\ddot{o},m}$ voi käytännössä kuvata samaa asiaa ja toisen on siis oltava lähempänä sitä luurankolihasmekaanista hyötysuhdetta, jota työhyötysuhteella halutaan kuvata. Tässä ei nyt oteta kantaa työhyötysuhteen varsinaisen teoreettisen määritelmän oikeellisuuteen, vaikka työhyötysuhteen teoreettinen pohja onkin saanut kritiikkiä (katso johdantoluku 3.1). Sen sijaan tarkoitus on analysoida nollakuorman energiankulutuksia — $E_{0,a}$ ja $E_{0,m}$ — kriittisesti ja katsoa voidaanko sanoa toisen niistä olevan selkeästi väärä. Huomautettakoon heti aluksi, että tämän tutkimuksen aineistossa kadenssin suhteen molemmat energiankulutukset kuvaavat yhtä hyvin tyhjän kuorman tilannetta: korrelaatiot $E_{0,a}$ ja $E_{0,m}$ kadenssin suhteen ovat saman suuruiset ($r = 0,59$ edelliselle ja $r = 0,46$ jälkimmäiselle), mikä kuulostaa järkevältä, sillä onhan osoitettu tyhjän kuorman polkemisen energiankulutuksen riippuvan paljon kadenssin suuruudesta (Wells ym. 1986; Hansen ym. 2004; Tokui & Hirakoba 2007).

Gaesser & Brooks (1975) hylkäsivät $E_{0,m}$:n (ja samalla $\eta_{ty\ddot{o},m}$:n) sillä perusteella, että heidän tutkimuksessaan $E_{0,m}$ oli yhtä suuri kuin ~ 33 W kuormalla poljettu kokonaisenergiankulutus E_{tot} . Tämän hylkäysperusteen oikeutus tulee siitä, että olisi odotettavissa, että ulkoisen työn kasvaessa myös kokonaisenergiankulutus kasvaisi, mitä ei käynyt heidän tutkimuksessaan. Toisen mitattuihin arvoihin perustuvan hylkäysperusteen $E_{0,m}$:lle antoivat Ettema & Loras (2009), jotka perustelivat $\eta_{ty\ddot{o},m}$:n virheellisyyttä sillä, että näin mitattuna saadaan toisinaan jopa 40 % hyötysuhteita (tämän tutkielman aineistossa suurin $\eta_{ty\ddot{o},m} = 38,4\%$), minkä Ettema & Loras (2009) perustelivat olevan liian korkea lihaksen mekaaniseksi hyötysuhteeksi pyöräilytyössä, jossa ei ole mahdollista käyttää juurikaan elastista energiaa hyödyksi (Asmussen & Bonde-Petersen 1974). Lisäksi ylempänä (ja johdantoluvussa 3.2) jo

annettiin monia teoreettisia syitä sille miksi juuri $E_{0,m}$ olisi vääristynyt ja siksi suurempi kuin $E_{0,a}$.

Toisaalta, voidaan väittää ettei myöskään $E_{0,a}$ olisi kelvollinen arvio nollakuorman energiankulutukseksi, sillä se on aivan liian lähellä lepoenergiankulutuksen E_{lepo} arvoa. Kuulostaa kovin epänormaailta, että lepoenergiankulutus ja nollakuorman energiankulutus olisivat saman suuruisia. Asia vaatii tarkempaa tarkastelua myös siksi, että jos $E_{0,a}$ on virheellinen arvio nollakuorman energiankulutukseksi, voisi se tarkoittaa samalla, että paljon käytetty oletus $W_{\text{ulk}}-E_{\text{tot}}$ kuvaajan lineaarisuudesta on virheellinen. Tästä taas seuraisi, että tätä lineaarisuutta hyödyntävien teorioiden tulokset olisivat osittain hataralla pohjalla. Tällaisia johdannaisteorioita käytetään mm. deltahyötysuhdetta määritettäessä (Ettema & Loras 2009) ja anaerobisen työn tarvitseman teoreettisen hapenkulutuksen arvioimisessa (Medbø ym. 1988; Gastin 2001). Yllättäen, kirjallisuudessa ei olla juurikaan puututtu regressiosuoran antaman $E_{0,a}$ arvion oikeellisuuteen, vaikka esimerkiksi Hintzy-Cloutier ym. (2003) huomauttaakin $E_{0,a}$:n olevan lähellä E_{lepo} :n arvoja.

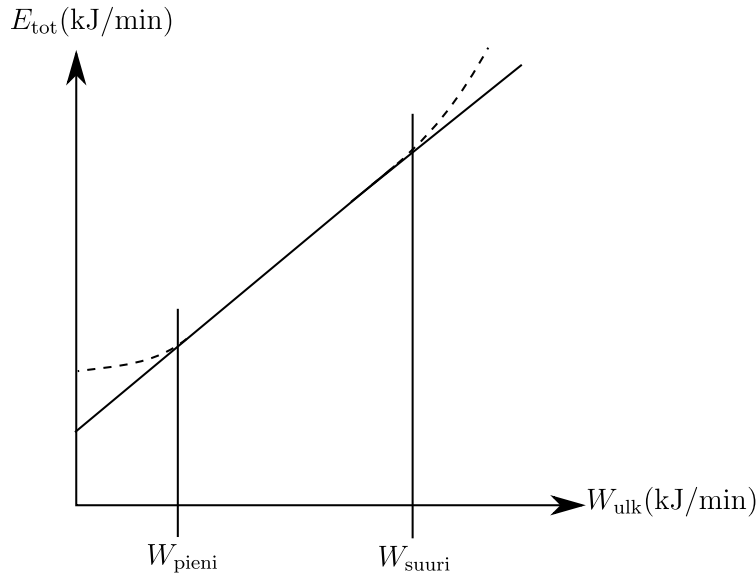
Nyt tehdyssä tutkimuksessa huomattiin, että energiankulutuksien $E_{0,a}$ ja E_{lepo} ero ei ollut merkitsevää ($p = 0,6$), erotuksen ollessa $0,41 \pm 2,9$ kJ/min, ja puolella tutkituista $E_{0,a}$ oli *pienempi* kuin E_{lepo} . Kirjallisuudesta löytyy vastaavia esimerkkejä. Esimerkiksi Mogensen ym. (2006) tutkimuksessa lepo-*hapenkulutus* oli huomattavasti suurempi kuin nollakuorman ekstrapoloitu *hapenkulutus* (≈ 320 ml/min vs. ≈ 190 ml/min). Eräs selitys tälle ilmiölle voisi olla virheellinen lepoenergiankulutuksen mittaaminen; mitataanhan E_{lepo} juuri ennen maksimitestiä ja istuma-asennossa, jolloin paitsi asennon stabilointi niin myös testin jännittäminen voivat hyvinkin nostaa energiankulutusta. Hajontaan perustuva vertailu ylempanä antoi kuitenkin arvion, että E_{lepo} olisi suhteellisen hyvä mittari satulassa istumisen todelliseksi lepoenergiankulutukseksi. Mainittakoon, että suurempiakin satulassa istumisen lepoenergiankulutuksia kuin tässä työssä mitattuja on saatu. Esimerkiksi Moseley & Jeukendrup (2001) saivat $8,9 \pm 1,0$ kJ/min. Se ei kuitenkaan poista sitä tosiseikkaa, että hyvin säännönmukaisesti $E_{0,a}$ ja E_{lepo} ovat liian lähellä toisiaan.

Jos päädytään tulokseen, että E_{lepo} kuvaa riittävällä tarkkuudella lepoenergiankulutusta, tarkoittaisi se, että $E_{0,a}$ ei kuvaa riittävällä tarkkuudella nollakuorman energiankulutusta. Eräs syy tähän saattaa olla vaikeudesta määrittää testattujen $W_{\text{ulk}}-E_{\text{tot}}$ kuvaajan regressiosuoraa, mistä myöhemmin enemmän analyysia. Käytännössä tämä tarkoittaa, että yksittäisten mittauspisteiden epätarkkuuksien takia regressiosuora ei ole riittävän tarkka kuvaamaan $W_{\text{ulk}}-E_{\text{tot}}$ kuvaajan muotoa mitatuilla pisteillä, kun mittauspisteitä on ainoastaan 3–5 kap-

paletta. Kuvasta 23 tullaan näkemään kuinka $E_{0,a}$ voi yhdellä testatulla vaihdella välillä 1,1 – 7,7 kJ/min riippuen mitkä pisteet sattuvat määräämään regressiosuoran. Edelleen, taulukosta 9 nähdään kuinka arvioidun energiankulutuksen $E_{0,a}$ suoraan kaavasta laskettu luottamusväli on todella suuri: luottamusvälin pituus on keskimäärin 47 ± 32 kJ/min. Tähän tosin vaikuttaa suuresti havaintopisteiden vähyys (vain 3–5 havaintopistettä). Voi olla, että kuvaajalle tarvittaisiin > 10 pistettä (kuten Medbø ym. 1988 ehdottavat) ennen kuin riittävän tarkka regressiosuora saataisiin aikaiseksi.

Seuraava vaihtoehto on, että $E_{0,a}$ ei kuvaakaan nollakuorman energiankulutusta, mitä sen on kuviteltu tähän saakka kuvaavan. Esimerkiksi Kautz & Neptune (2002) näyttävät, että sisäinen työ ei pysy vakiona ja riippumattomana ulkoisesta työstä, sillä esimerkiksi voiman välittäminen pedaaliin voi viedä enemmän energiaa eri ulkoisen intensiteetin arvoilla. Niinpä heidän työnsä voisi antaa aiheutta esittää, että vaikka $W_{\text{ulk}}-E_{\text{tot}}$ kuvaaja muodostaisikin suoran viivan, ei sen leikkauskohdasta y -akselin kanssa löydykään nollakuorman energiankulutuksen arvio, koska emme voi tietää miten sisäinen työ jakaantuu suhteessa kokonaisenergiaan eri intensiteeteillä. Jos tämä otaksoma pitäisi paikkaansa, tarkoittaisi se todennäköisesti sitä, että $E_{0,a}$ ei oikeastaan kuvaisi mitään fysiologisesti järkevää, vaan se olisi ainoastaan matemaattinen vakiokerroin lineaariselle $W_{\text{ulk}}-E_{\text{tot}}$ kuvaajalle.

Viimeinen vaihtoehto on, että $W_{\text{ulk}}-E_{\text{tot}}$ kuvaaja ei käyttäytyisi lineaarisesti. Tiedetään, että suurilla intensiteeteillä kasvavan hitaan VO_2 komponentin takia kuvaajan lineaarisuus rikkoutuu (Passfield & Doust 2000, vertaa myös kuva 11). Mutta periaatteessa voisi olla mahdollisuus, että myös pienillä intensiteeteillä lineaarisuus rikkoutuisi, esimerkiksi yllä esitetyn sisäisen työn muuttumisen seurauksena kuvan 21 tapaisesti. Tällöin voi olla, että suuremmilla intensiteeteillä, mutta alle aerobisen kynnyksen, (esimerkiksi 50 – 200 W), $W_{\text{ulk}}-E_{\text{tot}}$ kuvaaja näyttäytyisi suorana, mutta pienillä kuormilla (< 30 W) kuvaaja tasoituisikin syystä tai toisesta: esimerkiksi juurikin sisäisen työn muuttumisen takia, lihasten rekrytointikuvioiden muuttumisten seurauksena tai kehon stabilointiin käytettävän energian lisääntyneen merkityksen takia. Tällöin usein tehty ekstrapolointi kuvaisikaan todellista tilannetta (kuva 21 havainnollistaa tätä hypoteettista tilannetta). Myös esimerkiksi Hintzy-Cloutier ym. (2003) ovat hypotesoineet tätä seikkaa ja he antavat regressiosuoralle $W_{\text{ulk}}-E_{\text{tot}}$ myös epälineaarisen sovitteen. Tosin tätä teoriaa vastaan Fares ym. (2017) mittasivat 5 W intensiteetistä lähtien energiankulutusta, ja ainakin heidän aineistossaan $W_{\text{ulk}}-E_{\text{tot}}$ kuvaaja näyttäisi tasoittuvan vasta alle 5 W teholla, antaen ymmärtää ettei tällaista tasannetta juurikaan syntyisi. Mutta ylipätään tätä teoriaa ei kirjallisuudessa olla juurikaan pohdittu tai tutkittu.



KUVA 21: Vaihtoehtoinen näkemys $W_{\text{ulk}}-E_{\text{tot}}$ kuvaajan käyttäytymisestä. Kuvaajan tiedetään käyttäytyvän jotakuinkin lineaarisesti välillä $W_{\text{pieni}}-W_{\text{suuri}}$ ja sen tiedetään kääntyvän ylöspäin hitaan VO_2 komponentin takia riittävän suurella intensiteetillä. Ei olla kuitenkaan tutkittu onko kuvaaja lineaarinen riittävän pienillä intensiteetin arvoilla. Yleisesti lineaarisuudella perustellen tehdään ekstrapolaatio y-akselille, mutta tämän lineaarisuuden perustasta ei olla tehty tutkimusta. Saattaa olla, että kuvaaja tasoittuu katkoviivan osoittamalla tavalla riittävän pienillä intensiteeteillä.

Valitettavasti ilman lisätutkimusta ei energiankulutuksien $E_{0,a}$ ja $E_{0,m}$ eroista voida muuta kuin spekuloida eikä mihinkään lopulliseen päätelmään kyetä pääsemään. Varmaa vain on, että $E_{0,a}$ ja $E_{0,m}$ ovat erisuuruisia, eivätkä ne edes korreloi kunnolla keskenään (tässä tutkimuksessa $r = 0,45$, $p = 0,11$), ja molempia vastaan voidaan esittää kritiikkiä.

8.2.4 Ryhmän I eroavaisuus ryhmistä II ja III

Kuten mainittua, pääsyynä Ryhmien I ja II väliselle erolle voidaan sanoa olevan se, että aerobisesti ei päästä polkemaan niin suuria tehoja, että nollakuorman polkemiseen käytetty energia supistuisi mitättömäksi ja hyötysuhteet näyttäytyisivät yhtä suurina deltahyötysuhteen kanssa. Tämä tarkoittaa käytännössä, että yksilöillä on tyhjän kuorman polkemisessa hyötysuhdetta selittäviä yksilöllisiä eroja, mutta ei juurikaan lepoenergiankulutuksissa. Tätä seikkaa tukevat Hintzy ym. (2005), joiden tutkimuksessa $\eta_{\text{työ},m}$ ei ollut niin sensitiivinen harjoittelun vaikutuksille kuin η_{tot} , kun aiemmin pyöräilyä harrastamattomien naisten $E_{0,m}$ laski harjoittelun seurauksena. Vaikkakin tuossa tutkimuksessa verrattiin keskenään hyötysuhteita $\eta_{\text{työ},m}$ ja η_{tot} , voitaisiin siitä vetää johtopäätös, että Hintzy ym. (2005) tutkimuk-

sen mukaan yksilöiden tyhjän kuorman polkemisessa voi tapahtua havaittavia muutoksia helpommin kuin vaikeammin mitattavissa ja ehkä jopa hieman abstraktimmassa luurankolihasysteemin hyötysuhteessa, jota $\eta_{\text{työ,m}}$ yritti heidän työssään mitata. Hintzy ym. (2005) ehdottivatkin, että suurin osa pyöräilyn adaptaatioista tapahtuisikin juuri paremmin opitun jalkojen liikeradan kautta koordinaation paranemisen ja turhien liikkeiden karsiutumisen kautta.

Tällöin herää luonnollisesti kysymys mikä varsinaisesti aiheuttaa niin suuret erot nollakuorman polkemisessa, että sen takia hyötysuhteet käyttäytyvät havaittavasti eri tavoin, siitäkin huolimatta että ne teoriassa lähestyvät toisiaan tehon kasvaessa ollen siis läheisessä liitoksissa keskenään. On viitteitä, että nollakuorman polkemisessa kaksi asiaa vaikuttavat ratkaisevasti energiankulutukseen: jalkojen paino (Francescato ym. 1995; Hansen ym. 2004; Hopker ym. 2010; Minetti 2011) ja kadenssi (Wells ym. 1986; Hansen ym. 2004). Jalkojen liike voidaan jakaa kineettiseen mekaaniseen työhön ja sisäiseen viskositeettityöhön (Minetti 2011). Tässä kineettinen mekaaninen työ tarkoittaa sitä lineaarisesta ja oskilloivasta jalkojen segmenttien liikkeestä johtuvaa työtä, jota polkemisessa tapahtuu. Edelleen, viskositeettityöhön kuuluvat lihaksen ja jänteen sisäiset jarruttavat kitkavoimat, samanaikainen agonisti-antagonisti -parin aktivointi sekä lihaksen ominaisuus tuottaa vähemmän voimaa suuremmalla supistusnopeudella (ns. Hillin yhtälö, Hill 1910 lähteen Weiss 1997 mukaan). Näistä ympyräradalla tapahtuva kineettinen mekaaninen työ ei välttämättä aiheuta juurikaan ylimääräistä energiankulutusta polkemistyössä, jolloin viskositeettityö vastaa lähes kaikkea nollakuorman energiankulutuksesta, ja erityisesti kasvava kadenssi kasvattaa myös jarruttavia kitkavoimat ja Hillin yhtälöstä seuraavaa energianhukkaa. (Minetti 2011.) Lihasaktivaation kannalta tarkasteltuna taas voidaan sanoa, että yksilöillä on suuria eroja polkemistyön lihasaktivaatioissa (Gregor ym. 1991), jolloin voisi ajatella, että joillain yksilöillä anatomia ja motoriikka mahdollistaisi tehokkaamman tavan pyörittää jalkoja pyöräilytyössä toisiin yksilöihin verrattuna. Pyöräilyä harjoittelemattomien on ilmeisesti myös mahdollista saada jonkinasteista harjaannusta nollakuorman polkemiseen (Hintzy ym. 2005), vaikkakin harjoitettavuuden potentiaali nollakuorman polkemiseen näyttäisi olevan aika pieni erityisesti pelkällä kestävyysharjoittelulla (Montero & Lundby 2015).

Eräs selittävä tekijä ryhmien eroille voi olla myös $W_{\text{ulk}}-E_{\text{tot}}$ regressiosuoran estimoinnin vaikeus, jota pohdintaan alempana tarkemmin. Pääasiana siinä on, että hyötysuhteen η_{Δ} (ja siten myös $\eta_{\text{työ,a}}$) määrittämisessä on suurehko virheen mahdollisuus, jolloin Ryhmien I ja II havaittu ero voisi kummuta luonnollisesta mittausepä tarkkuudesta, joka 14 hengen otannalla vaikuttaa vielä suhteellisen suurena. Tähän suuntaan vihjaavat myös Moseley & Jeukendrup

(2001), jotka raportoivat deltahyötysuhteen mittaamisen toistettavuuden epäluotettavuutta, vaikeivat sitä pystyneetkään selittämään.

Ryhmän I ja III ero selittyy pääosin samoin kuin Ryhmien I ja II eroavaisuudet. Ainoana erona on, että nollakuorman polkeminen Ryhmässä III määrätään eri tavoin kuin Ryhmässä II. Lisäksi kuvasta 14 voidaan vetää johtopäätös, että Ryhmä III olisi kauempana (järjestyskorrelaatiolla mitattuna) Ryhmästä I kuin Ryhmä II. Tämä taas voinee selittyä tehdystä vähennyksestä. Kuten aliluvussa 8.2.3 nähtiin, mitattua nollakuorman polkemisen energiankulutusta $E_{0,m}$ vastaan on esitetty paljon kritiikkiä, eikä se siten välttämättä kuvaa lainkaan sitä mitä sen pitäisi, esimerkiksi kun toiset polkijat osaavat nollakuormalla polkea energiatehokkaammin ja stabiloida kehoaan paremmin kuin toiset polkijat. Tämä tarkoittaisi, että $E_{0,m}$ ei suuremmilla intensiteeteillä kuvaisi mitään järkevää fysiologista muuttujaa, jolloin enemmän tai vähemmän satunnaisen luvun vähentäminen kokonaisenergiankulutuksesta ymmärrettävästi vaikuttaa yhteyksiä katkovasti.

8.3 Maksimikokonaishyötysuhde

8.3.1 Maksimikokonaishyötysuhde ja aerobinen kynnyks

Luhtanen ym. (1987) huomasivat, että η_{tot} maksimoituu aerobisen kynnyksen ympäristössä, jonka jälkeen tekniikan muutoksen, nopeiden lihassolujen mukaantulo, anaerobisen energiantuoton lisääntynyt määrä ja hitaan komponentin esiintyminen vaikuttavat energiankulutusta nostavasti. Nyt tehdyssä tutkimuksessa kaksi koulutettua testaaja määrittivät riippumattomasti testatuille aerobisen kynnyksen. Koska kuormien nostot olivat 30 W (naisilla 25 W), kynnyks määritettiin 15 W (naisilla 12,5 W) tarkkuudella. Testatuista neljästätoista henkilöstä kuudella η_{tot} maksimoitui tismalleen aerobisella kynnyksellä. Muilla aerobinen kynnyks osui korkeintaan yhden kuorman päähän erotuksen keskiarvon ollessa -2 ± 15 W. Tämänkin tutkimuksen perusteella voitaisiin siis tehdä aerobisen kynnyksen määrittämiseen uusi kriteeri helpottamaan aerobisen kynnyksen löytämistä polkupyöräergometritestissä: Aerobisella kynnyksellä kokonaishyötysuhde maksimoituu.

Joissain pyöräilijöitä luokittelevissa taulukoinneissa on polkijan taloudellisuus (W/l/min) asetettu yhdeksi arvosteltavaksi kriteeriksi (esim. Jeukendrup ym. 2000). Mutta koska taloudellisuuskin pitää sisällään lepoenergiankulutuksen ja sisäisen energiankulutuksen tyhjää kuormaa vastaan tehdyssä työssä, tulisi näissä taulukoinneissa vakioda teho, jolla taloudel-

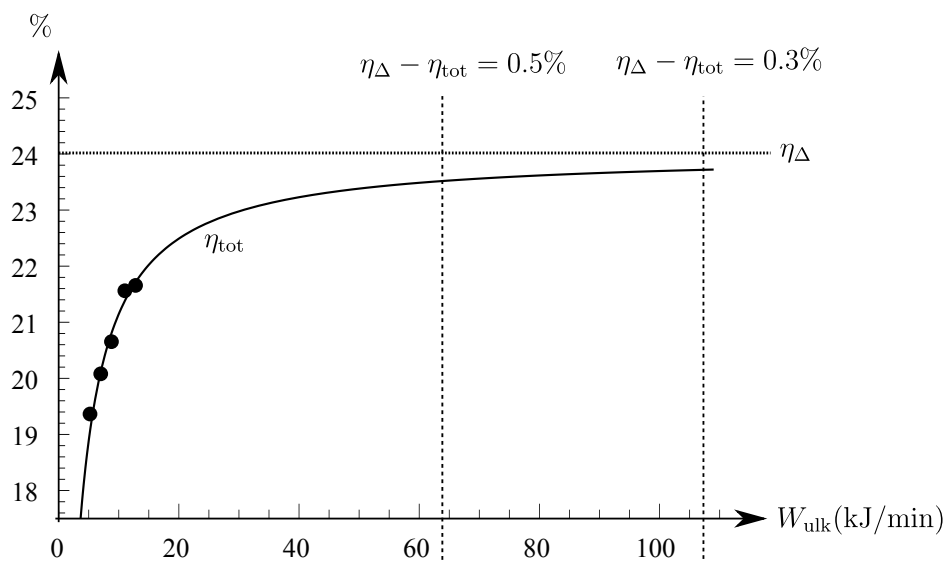
lisuus (tai hyötysuhde) mitataan. Nyt tehdyssä tutkimuksessa ne joilla aerobinen kynnys oli 180 W tai enemmän oli myös maksimaalinen kokonaishyötysuhde suurempi (pelkillä miestutkittavilla ryhmien välinen merkitsevyys $p = 0,024$). Kuitenkaan, suurempi aerobinen kynnys ei korreloi 150 W intensiteetillä mitatun hyötysuhteen kanssa ($p = 0,55$). Eli näyttäisi, että myös käytännössä ne polkijat, jotka saavat aerobista kynnystään kohotettua, saavat samalla maksimikokonaishyötysuhdettaan nostettua, koska suurempaa ulkoista kuormaa vastaan polkiessa sisäisen energiankulutuksen merkitys vähenee, kuten kirjallisuudessa on usein toistettu (Luhtanen ym. 1987; Ettema & Loras 2009).

8.3.2 Erotus $\eta_{\Delta} - \eta_{\text{tot}}$ (max)

Kun jokaiselle polkijalle määrätään yksilöllinen regressiosuora $E_{\text{tot}} = aW_{\text{ulk}} + b$ ja sijoitetaan se kokonaishyötysuhteen $\frac{W_{\text{ulk}}}{E_{\text{tot}}}$ kaavaan, voidaan tarkastella kokonaishyötysuhteen teoreettista lähestymistä deltahyötysuhteeseen. Tässä tutkimuksessa ainoastaan yhdessä tapauksessa η_{tot} oli 0,5%-yksikön päässä deltahyötysuhteesta sellaisella teholla (324 W), jota eliittipyöräilijät voisivat polkea suhteellisen aerobisesti (Bell ym. 2017). Muissa tutkituissa tapauksissa ne teoreettiset tehot, joilla η_{tot} saavuttivat deltahyötysuhteen ympäristön olivat aivan liian korkeita käytäntöön; taulukosta 5 nähdään, että teoreettisesti η_{tot} pääsee 0,5 %-yksikön päähän deltahyötysuhteesta keskimäärin tehoilla 1350 ± 750 W. Eräässä tapaustutkimuksessa (Coyle 2005) eliittipyöräilijän η_{tot} ja η_{Δ} olivat seitsemän vuoden seurannassa konsistentisti 0,2 %-yksikön etäisyydellä toisistaan. Nyt tehdyn tutkimuksen perusteella tällainen näyttäisi olevan poikkeustapaus.

Kuvassa 22 nähdään tapausesimerkki kuinka hitaasti η_{tot} lähestyy teoreettisesti deltahyötysuhdetta. Nähdään, että hyötysuhteet ovat tässä tapauksessa alle 0,5 %-yksikön päässä toisistaan vasta ~ 64 kJ/min (≈ 1060 W) intensiteetillä. Ero hyötysuhteiden η_{tot} ja η_{Δ} välillä johtuu suurimmaksi osaksi tyhjänpolkemisesta koituvasta sisäisestä energiankulutuksesta, mikä on laskettu mukaan kokonaishyötysuhteeseen, mutta mikä on yritetty poistaa deltahyötysuhteesta.

Nostetaan esille vielä huomautus kokonaishyötysuhteen estimaatista. Toisinaan kirjallisuudessa sovitetaan parabolista käyrää sovitteeksi η_{tot} kuvaajalle (esimerkiksi Chavarren & Calbet 1999). Tämä on kuitenkin hieman kummallinen lähestymistapa, sillä parempi olisi miettiä miten kuvaajaa $W_{\text{ulk}} - E_{\text{tot}}$ tulisi estimoida, jonka jälkeen tämä estimaatti siirretään $\eta_{\text{tot}} = \frac{W_{\text{ulk}}}{E_{\text{tot}}}$ nimittäjään estimaatiksi. Esimerkiksi η_{tot} estimointi paraabeliksi tarkoittai-



KUVA 22: Tapausesimerkki kokonaishyötysuhteen teoreettisesta lähestymisestä deltahyötysuhteeseen. Kuvan tapauksessa $W_{\text{ulk}}-E_{\text{tot}}$ kuvaajan regressiosuora on muotoa $4,16W_{\text{ulk}} + 5,65$, jolloin kokonaishyötysuhde saa sovitteen $\eta_{\text{tot}} = \frac{W_{\text{ulk}}}{4,16W_{\text{ulk}} + 5,65} \cdot \eta_{\text{tot}}(\text{max}) = 21,7\%$ ja $\eta_{\Delta} = 24,0\%$, missä deltahyötysuhteen 95 % luottamusväli oli testatulle 23,7 – 24,4 %. Teoreettisesti kuvan testattavalle kokonaishyötysuhde olisi 0,5 %-yksikön päässä deltahyötysuhteesta 64 kJ/min (≈ 1060 W) intensiteetillä ja 0,3 %-yksikön päässä 107 kJ/min (≈ 1790 W) intensiteetillä.

si toisin sanottuna kokonaisenergiankulutuksen E_{tot} estimoimista $\frac{W_{\text{ulk}}}{aW_{\text{ulk}}^2 + bW_{\text{ulk}} + c}$ tyyppisellä kuvaajalla, mikä ei ole kovin intuitiivinen tapa kuvata tuota relaatiota.

8.4 Hyötysuhteiden määrittämisen vaikeus

Tässä osiossa analysoidaan hyötysuhteiden määrittämisen mahdollisia ongelmia käyttäen tutkimuksen aineistoa esimerkkinä. Erityisesti paneudutaan siihen epäkohtaan, että vaikka deltahyötysuhteen teoreettinen pohja olisikin suhteellisen hyvä (esimerkiksi Gaesser & Brooks 1975; Coyle ym. 1992), makaa sen käytännön määrittäminen usein suhteellisen hataralla pohjalla, kun regressiosuoraa määritetään usein vain 3–5 havaintopisteen avulla. Tästä voitaisiin otaksua johtuvan muun muassa deltahyötysuhteen huonohko toistettavuus.

Anaerobisen energiantuotannon estimoinnin rooli

Tässä tutkimuksessa tarkasteltiin 150 W intensiteetillä hyötysuhdetta niiltä testattavilta, joilla se oli alle aerobisen kynnyksen. Kuitenkin, veren laktaattipitoisuus oli joillakin jo

noussut alimmasta tasosta tätä kuormaa polkiessa. Kysymykseksi voikin nostaa, pitäisikö hyötysuhteiden laskuissa ottaa anaerobinen energiantuotto huomioon jo näinkin puhtaasti aerobisesti poljettavilla kuormilla. Kirjallisuudessa ei tätä kysymystä ole suoranaisesti testattu, mutta johtavana ajatuksena on, ettei anaerobista energiantuottoa tarvitsisi ottaa laskuissa huomioon (esimerkiksi Gaesser & Brooks 1975; Chavarren & Calbet 1999; Moseley ym. 2001; Coyle 2005; Mogensen ym. 2006; Hopker ym. 2010; Lundby ym. 2017). Teoriassa deltahyötysuhde kokisi suurimman muutoksen jos anaerobinen työ otetaan huomioon, sillä tehon noustessa anaerobisen energiantuotannon käynnistys nostaisi kokonaisenergiankulutusta tavalla jota pelkän epäsuoran kalorimetrin menetelmällä ei voida havaita. Lisäksi jos anaerobinen työ otettaisiin huomioon, kasvattaisi se ainoastaan laktaattia synnyttävien suurempien intensiteettien energia-arviota. Nämä seikat vääristäisivät $W_{\text{ulk}}-E_{\text{tot}}$ regressiosuoran kulmakerrointa. Vaikka artikkelin di Prampero & Ferretti (1999) laskukaavalla anaerobinen energiantuotto otettaisiinkin huomioon laktaatin avulla, se pakostikin hieman vielä aliarvioi anaerobisen energiantuoton määrää, koska laktaattia käytetään koko ajan energiaksi mm. sydämessä (McArdle ym. 2007, sivut 331–332) sekä muunnetaan glukoosiksi maksassa Corin sykklissä (McArdle ym. (2007), sivu 150).

Tässä tutkimuksessa anaerobisen työn rooli otettiin huomioon käyttäen di Prampero & Ferretti (1999) esittämää tapaa, ja laktaatit olivat nousseet matalimmasta arvosta aerobiseen kynnykseen mennessä keskimäärin $0,44 \pm 0,29$ mmol/l. Näin saatuja tuloksia verrataan seuraavassa hyötysuhteisiin, jotka laskettiin ilman tätä anaerobisen työn osuutta. Ensinnäkin η_{tot} pysyi muuttumattomana 3/14 testatuista ja η_{Δ} muuttui kaikilla. Muutoksen suuruudet olivat pienehköjä: kokonaishyötysuhteen muutos oli keskimäärin $0,11 \pm 0,08\%$ -yksikköä ja deltahyötysuhteen $0,3 \pm 0,2\%$ -yksikköä. Lisäksi Pearsonin korrelaatiokerroin kahdella eri tavalla lasketulle kokonaishyötysuhteelle oli korkea ($r = 0,995$, $p = 2 \times 10^{-13}$) samoin kuin deltahyötysuhteelle ($r = 0,995$, $p = 2 \times 10^{-13}$). Samaten myös Spearmanin järjestyskorrelaatiokertoimet olivat hyvin korkeat (sekä η_{tot} että η_{Δ} tapauksissa ainoastaan kahden testatun järjestykset vaihtuivat). Loppupäätelmänä voisi siis sanoa kirjallisuutta tukien, että alle aerobisen kynnyksen tehdyissä mittauksissa ei ole suurta väliä ottaako anaerobisen energiantuoton laskuissa huomioon vai ei, kunhan sen tekee konsistentisti. Tässä tutkimuksessa ei hyötysuhteita mitattu anaerobiselle kynnykselle saakka, joten sille intensiteettitasolle ei voida tämän tutkimuksen puitteissa ottaa kantaa.

Deltahyötysuhteen kolme määrittystä

Ensimmäinen ongelma deltahyötysuhdetta laskettaessa tulee hitaan VO_2 komponentin esiintymisestä. Tarkemmin, kirjallisuudessa ei ole vakiintunutta tapaa sille millä tehoalueella olevat havaintopisteet $W_{\text{ulk}}-E_{\text{tot}}$ kuvaajasta tulisi huomioida regressiosuoraa estimoidessa. Selvää on, että riittävän suurilla intensiteeteillä hidasta VO_2 komponentti alkaa vääristämään $W_{\text{ulk}}-E_{\text{tot}}$ kuvaajan lineaarisuutta johdantoluvussa 3.2.7 esitetetyn kuvan 11 mukaisesti, mutta selvää ei ole kuinka suurilla intensiteeteillä vääristymä alkaa vaikuttamaan liian vahvasti lopputulokseen. Tässä tutkimuksessa on otettu kanta, että ainoastaan aerobiselle kynnykselle saakka otetut intensiteetit lasketaan mukaan lineaariselle sovittelulle, sillä intensiteetin kasvaessa suuremmaksi kuin 50 % $\text{VO}_{2\text{max}}$ hidasta VO_2 komponenttia alkaa näkyämään jossain muodossa (Pedersen ym. 2002; Krstrup ym. 2004). Lisäksi aerobinen kynnys asettuu suurella osalla testattavia samoille intensiteeteille (suuressa datassa, $n = 86$, noin puolilla testatuista aerobinen kynnys asettuu välille 50–60 % $\text{VO}_{2\text{max}}$ ja 90 %:lla testatuista aerobinen kynnys on välillä 45–65 % $\text{VO}_{2\text{max}}$, Paavo Nurmi keskus), jolloin lineaarisen sovituksen tekeminen aerobiselle kynnykselle saakka tuntuu luonnontevalta tavalta tehdä estimointi. Toisissa tutkimuksissa on otettu intensiteettejä $\text{RER}=1,00$ tasolle saakka (esimerkiksi Moseley & Jeukendrup 2001; de Koning ym. 2012; Duc ym. 2015), joka on yleensä hyvin lähellä anaerobisen kynnyksen tasoa (Kapanen 2016).

Seuraavassa tarkastellaan paljonko deltahyötysuhde muuttuu jo pienestä määrittelyn vaihdosta. Sitä varten lasketaan $W_{\text{ulk}}-E_{\text{tot}}$ kuvaajan regressiosuora kolmella eri tavalla ja tarkastellaan niiden konsistenttiutta deltahyötysuhdetta laskettaessa:

- 1. tapa AerK-metodi:** Otetaan jokaiselta tutkittavalta kuormia aerobisen kynnyksen tehoon saakka ja lasketaan regressiosuora niiden kautta. Tätä metodia käytettiin tässä tutkimuksessa.
- 2. tapa 3 pisteen metodi:** Otetaan jokaiselta tutkittavalta kolme ensimmäistä mitattua kuormaa ja lasketaan regressiosuora niiden kautta.
- 3. tapa 1mmol-metodi:** Otetaan jokaiselta tutkittavalta kuormia kunnes laktaatti on nousut yli 1mmol/l alimmasta tasosta ja lasketaan regressiosuora niiden kautta.

Kaikki nämä menetilat antavat hyvin samankaltaiset tulokset 1mmol-metodin korreloidesa hieman huonommin AerK-metodin antamien deltahyötysuhteiden kanssa kuin 3 pis-

teen -metodi⁶. Deltahyötysuhteet muuttuivat keskimäärin 1mmol-metodilla $0,6 \pm 1,0$ %-yksikköä verrattuna AerK-metodiin, kun taas 3-pisteen metodilla muutokset olivat $0,1 \pm 0,6$ %-yksikköä AerK-metodiin verrattuna. Metodit eroavat siinä, että 1mmol-metodilla hidas komponentti (ks. aliluku 3.2.7) alkaa jo vaikuttaa joillain testatuilla viimeisillä regressioon mukaan otettavilla intensiteeteillä vääristäen hieman suoran kulmakerrointa. Niinpä nähdään, että jo pieni muutos regressiosuoraan mukaan otettavissa pisteissä aiheuttaa suurehkon (0,6 %-yksikön) muutoksen deltahyötysuhteeseen. Tämä nopea analyysi antaisi siis suosituksen, että $W_{\text{ulk}}-E_{\text{tot}}$ regressiosuoraan otettaisiin mukaan ainoastaan alle aerobisen kynnyksen intensiteettejä jotta voitaisiin taata jokaiselle testatulle yksilöllinen kohtelu tutkimuksissa.

Deltahyötysuhteen tarkkuuden ongelma

Vaikka käytettäisiin vain alle aerobisen kynnyksen olevia kuormia, voi regressiosuoran $W_{\text{ulk}}-E_{\text{tot}}$ — ja siten deltahyötysuhteen — määrittämisessä edelleen piillä valtava virhemarginaali. Moseley & Jeukendrup (2001) tutkivat kokonais- ja deltahyötysuhteen toistettavuutta ja tulivat lopputulokseen, että kokonaishyötysuhde olisi kaksi kertaa tarkempi toistettavuudeltaan. Syytä deltahyötysuhteen heikompaan toistettavuuteen he eivät osanneet antaa. Edelleen, he argumentoivat, että koska regressiosuoran selitysaste oli hyvin korkea ($R^2 = 0,993$), voidaan päätellä, että tehty regressio oli tarkka kuvaus $W_{\text{ulk}}-E_{\text{tot}}$ suhteesta. Vaan regressiosuora voi siltikin olla epätarkka estimaatti siinä mielessä, että vaikka saatu lineaarinen regressio antaisikin todella tarkan estimaatin havaituista mittauspisteistä, on havaintopisteiden lukumäärä niin pieni (tyypillisesti 3–5, Marsh ym. 2000; Straw & Kram 2016; Fares ym. 2017), että yksittäiset pienetkin mittausepätarkkuudet jollain kuormalla vinouttavat suoraa helposti suuntaa tai toiseen. Tällöin tavallisista tilastollisista testeistä luottamusväli antaisi paremman arvion regressiosuoran — ja samalla deltahyötysuhteen — kelpoisuudesta näin minimalistisesta aineistosta. Vaihtoehtoinen testi on tässä työssä määriteltävä lokaali deltahyötysuhteen hajonta, jonka nähdään korreloivan hyvin luottamusvälin kanssa. Nämä kelpoisuuden mittarit tulevat myös osoittamaan selkeästi miksi deltahyötysuhteen toistettavuus ei ole paras mahdollinen.

⁶ $r(1\text{mmol},\text{AerK})=0,85$, $p=1 \times 10^{-4}$ ja $r(3\text{-piste},\text{AerK})=0,95$, $p=1 \times 10^{-7}$

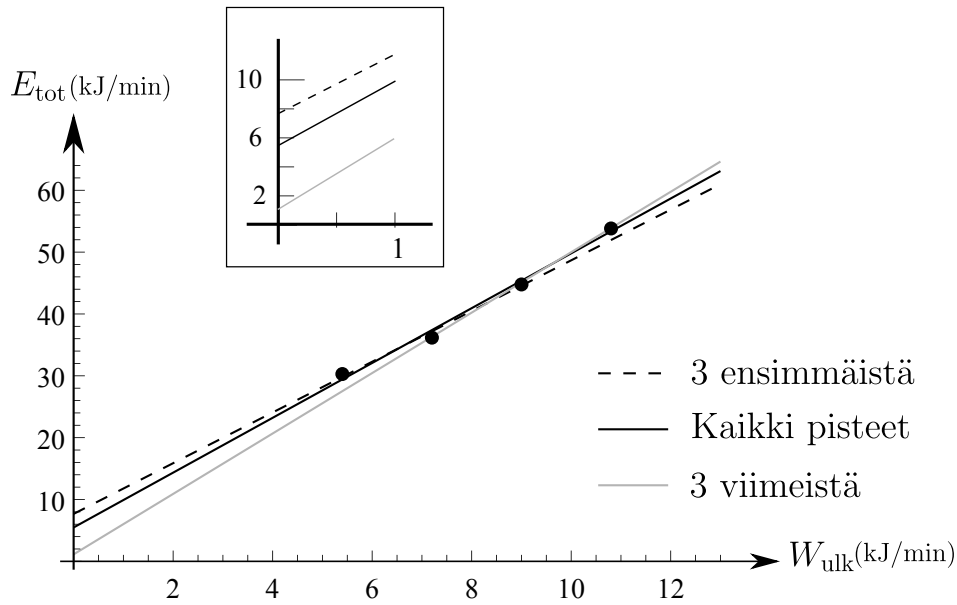
Tapausesimerkki G: Deltahyötysuhteen vaikeus

Teoriassa hyötysuhteen määrittäminen on yksinkertaista puuhaa, mutta käytännössä hyötysuhteet eivät ole lainkaan yksiselitteisiä. Kuvassa 23 nähdään $W_{\text{ulk}}-E_{\text{tot}}$ regressiosuoran — ja siis deltahyötysuhteen — määrittämisen ongelma yhdelle testatulle. Teoriassa energiankulutus kasvaa lineaarisesti työn mukana, mutta kuten tästä kuvasta nähdään, yksilökohtaisia eroja esiintyy. Kuvaan laitetut kuormat on kaikki poljettu aerobisesti viimeisen — neljännen — ollessa aerobinen kynnyks ja siinä laktaatti on noussut $\sim 0,6\text{mmol/l}$ alimmasta tasosta. Ajatellaan kolme eri skenaariota: yhdessä olisi mitattu kaikki neljä pistettä, toisessa vain kolme ensimmäistä ja kolmannessa kolme viimeistä. Teoriassa tämän ei tulisi vaikuttaa deltahyötysuhteeseen. Kuvassa yhtenäinen musta viiva kuvaa lineaarista estimaattia kaikkien neljän pisteen kautta, katkoviiva kolmen ensimmäisen pisteen kautta ja harmaa viiva kolmen viimeisen pisteen kautta. Vastaavat estimaatit ovat $4,43W_{\text{ulk}} + 5,48$ ja $4,10W_{\text{ulk}} + 7,67$ ja $4,89W_{\text{ulk}} + 1,13$. Tällöin deltahyötysuhteilla on valtavat erot estimaattien välillä: 22,6% vs. 24,4% vs. 20,5 %. Estimaattien välillä esiintyy siis 3,9 %-yksikön ero deltahyötysuhteessa. Edelleen, arvioitu tyhjää kuormaa vastaan tehty nollatyö $E_{0,a}$ eroaa valtavasti riippuen mitä estimaattia käyttää: 5,48 vs. 7,67 vs. 1,13 kJ/min. Suurimman ja pienimmän erotuksen ollessa $\sim 6,5\text{kJ/min}$ ($\sim 575\%$ eroavaisuus). Tällöin myös tätä nollakuorman energiankultusarviota käyttävään työhyötysuhteeseen tulee erittäin suuri mahdollinen virhe.

Selitysasteet kaikille estimaateille ovat korkeat: neljälle pisteelle $R^2 = 0,993$, kolmelle ensimmäiselle $R^2 = 0,991$, kolmelle viimeiselle $R^2 = 0,9999$. Eli yksinkertaisella tilastollisella selitystestillä ei deltahyötysuhteen tarkkuutta pystytä arvioimaan. Huomautettakoon, että tässä tapausesimerkissä η_{tot} pysyi kuitenkin hyvin vakiona noustuaan ensin omalle tasolleen: neljässä mitatussa kuormassa ne ovat 17,9, 19,8, 20,0, 20,0 %. Tämä tapausesimerkki antaisi viitteitä, että kokonaishyötysuhteen määrittäminen olisi luotettavampaa jo pelkkään annettuun aineistoon liitettynä ilman toistomittauksia tukien näin Moseley & Jeukendrup (2001) loppupäätelmää kokonaishyötysuhteen paremmasta toistettavuudesta deltahyötysuhteeseen verrattuna.

Regressiosuoran kelpoisuus

Esitetään kaksi tapaa arvioida regressiosuoran kelpoisuutta paremmin kuin selitysaste R^2 . Tämä on olennainen tieto deltahyötysuhtetta laskiessa, sillä se suoraan kertoo kuinka tarkka deltahyötysuhteen määrittäminen on annetulla aineistolla ollut. Kuten edellä nähtiin, selitysaste



KUVA 23: Deltahyötysuhteen laskemisen epävarmuus kumpuaa siitä etteivät poljetut kuormat asetu aivan lineaarisesti $W_{\text{ulk}}-E_{\text{tot}}$ viivastolla. Yhtenäisessä viivassa on lineaariseen estimaattiin käytetty kaikkia neljää pistettä, katkoviivaan kolmea ensimmäistä ja harmaaseen viivaan kolmea viimeistä. Suorien yhtälöt ovat: musta viiva $4,43W_{\text{ulk}} + 5,48$, katkoviiva: $4,10W_{\text{ulk}} + 7,67$; harmaa viiva $4,89W_{\text{ulk}} + 1,13$. Pienessä kuvassa on suurennettu suorien leikkauskohta y-akselin kanssa, ja siis arvioidun $E_{0,a}$ suuruus: mustalle viivalle 5,48, katkoviivalle 7,67 ja harmaalle viivalle 1,13 kJ/min.

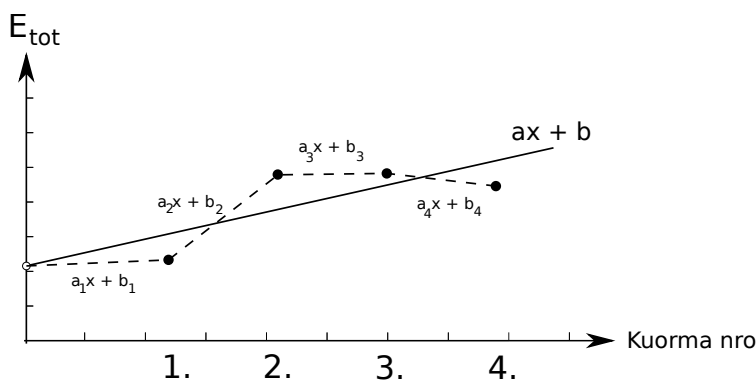
R^2 ei ole riittävä kelpoisuuden mittari kun havaintopisteitä on liian vähän. Onhan selvää, että esimerkiksi kahden havaintopisteen kanssa selityssaste olisi aina $R^2 = 1,00$, vaikka kyseisessä estimaatti sisältää valtavan virhemahdollisuuden.

Ensimmäinen vaihtoehtoinen tapa määrittellä deltahyötysuhteen kelpoisuutta on luottamusväli. Esimerkiksi Mellin (2006), luku 15, antaa regressiosuoran kertoimien luottamusvälien kaavat, kunhan regressiomallia koskevat oletukset ovat voimassa⁷. Ylipäätään tilastolistien testien tekeminen 3–5 mittauspisteen regressiosuoralle ei ole välttämättä kovin luotettavaa, mutta laskettu luottamusväli kertoo kuitenkin jotain regressiosuoran kelpoisuudesta: taulukon 9 mukaan 95 %:n luottamusvälien pituuksien keskiarvo deltahyötysuhteelle (regressiosuoran kulmakertoimen käänteisluku) koko tutkimusaineistossa oli $6,9 \pm 5,2$ % ja $E_{0,a}$:lle (regressiosuoran vakioerroin) jopa 47 ± 32 kJ/min.

Toinen vaihtoehtoinen tapa määrittellä deltahyötysuhteen kelpoisuutta on *lokaalin deltahyötysuhteen* hajonnan avulla. Deltahyötysuhdetta voidaan nimittäin määrittellä myös lokaalisti — tai kuormittain — kuvan 24 ja Gaesser & Brooks (1975) artikkelin mukaisesti: kirjoitetaan

⁷Regressiomallia koskevat oletukset sanovat, että jäännöstermeillä on odotusarvona 0, ne ovat korreloimattomia ja normaalisti jakautuneita.

peräkkäisille mitatuille havaintopisteille suoran yhtälö, josta kulmakertoimen käänteislukuna saadaan kuormalle lokaali deltahyötysuhde. Tämä kertoo lokaalisti kuinka paljon poljettu teho muuttuu suhteessa kokonaisenergiankulutuksen muutokseen. Jos pisteet asettuisivat regressiosuoralle $aW_{\text{ulk}} + b$:lle täsmällisesti, yhtyisi lokaali deltahyötysuhde deltahyötysuhteeseen jokaisella kuormalla. Käytännössä kuormien mittauksissa tulee kuitenkin pakosti luonnollista vaihtelua mittaustuloksissa, jolloin lokaalit deltahyötysuhteet vaihtelevat niin paljon kuormien välillä, että itsenäisesti niitä ei voi juurikaan käyttää mittaamaan polkijan hyötysuhdetta. Edelleen, samoin kuin $\eta_{\text{työ,a}}$ tapauksessa, lokaalien deltahyötysuhteiden keskiarvona ei saada deltahyötysuhdetta.



KUVA 24: Esimerkkikuva lokaalin deltahyötysuhteen määrittämisestä. Suora laskukaava lokaalille deltahyötysuhteelle on kuormien välisen työmäärän erotus jaettuna kuormien energiankulutuksien erotuksella. Esimerkiksi 2. kuormalle: $\frac{W_2 - W_1}{E_{\text{tot},2} - E_{\text{tot},1}}$, kun W_1 ja W_2 ovat kuormia 1 ja 2 vastaavat ulkoisen työn määrät ja $E_{\text{tot},1}$, $E_{\text{tot},2}$ vastaavien kuormien mitatut kokonaisenergiankulutukset. Graafisesti tämä tarkoittaa sitä, että peräkkäisten mitattujen kuormien välille piirretään suora ja kulmakertoimen käänteisluku $-\frac{1}{a_i}$, $i = 1, 2, 3, 4$ — on kuorman i lokaali deltahyötysuhde. Ensimmäistä kuormaa vastaava suora valitaan kulkemaan saman $(0, b)$ -pisteen kautta kuin regressiosuora $aW_{\text{ulk}} + b$.

Lokaalien deltahyötysuhteiden hajontaa voitaisiin kuitenkin käyttää η_{Δ} :n, ja siten myös regressiosuoran kulmakertoimen, kelpoisuuden mittarina. Jos hajonta on lähellä arvoa 0, tarkoittaisi se, että kaikki mitatut pisteet ovat hyvin lähellä regressiosuoraa. Nyt mitatussa aineistossa lokaalien deltahyötysuhteiden hajontojen keskiarvo oli $2,6 \pm 1,3$ %. Sanottakoon lisäksi, että nämä kaksi kelpoisuuden mittaria, luottamusvälin pituus ja lokaalin deltahyötysuhteiden hajonnat, korreloivat keskenään ($r = 0,62$, $p = 0,02$), eli sen suhteen molemmat selittävät ja kuvaavat samaa asiaa.

Tapausesimerkkiä G jatkaaksemme, taulukkoon 10 on annettu kahden eri testatun (testatut G ja H) η_{Δ} , deltahyötysuhteiden 95 %:n luottamusvälit ja lokaalit deltahyötysuhteet hajontoineen. Nähdään, että vaikka molemmille testatuille $\eta_{\Delta} = 22,6$ %, molemmilla mit-

tareilla — sekä luottamusvälillä ja lokaalien deltahyötysuhteiden hajontana — testatulla G oli epävarmempi deltahyötysuhteen määrittäminen kuin testatulla H.

TAULUKKO 10: Testattujen G ja H η_{Δ} , sen 95 %:n luottamusväli sekä lokaalit deltahyötysuhteet aerobiseen kynnykseen saakka (10,8 kJ/min=180 W molemmilla) keskiarvoineen ja hajontoineen.

		G	H
η_{Δ} (%)		22,6	22,6
η_{Δ} :n 95 %:n luottamusväli (%)		21,3 – 23,9	22,5 – 22,7
Lokaali deltahyötysuhde (%)	90 W	21,8	22,5
	120 W	29,4	22,8
	150 W	20,9	22,7
	180 W	20,1	22,2
	Keskiarvo	23,03	22,55
	Hajonta	4,3	0,25

Molemmille kelpoisuuden mittarille voidaan myös esittää kritiikkiä. Ensimmäkin tilastollisten suureiden, kuten luottamusvälin laskeminen tai hajonnan laskeminen, vain kolmesta viiteen pisteen perusteella on itsessään jo tilastollisesti hyvin epävarmaa. Toiseksi, kumpikin kelpoisuusmittari tarvitsisi jonkinlaiset erinomaisen ja hyvän kelpoisuuden rajat, jotka pitäisi jollain perusteella määrätä. Yksinkertaisena peukalosääntönä voisi sanoa, että alle 1,0 % hajonta on erinomainen (nyt tehdyssä aineistossa 1/14 testatuista) ja alle 2,0 % hajonta hyvä (4/14 pääsi tämän alle). Vastaavanlaiset peukalosäännöt luottamusväleille voisi olla: erinomaisen luottamusvälin pituus < 0,5 % (1/14 tutkituista) ja hyvän < 1,0 % (3/14 tutkituista).

Loppupäätelmänä voidaan sanoa deltahyötysuhteen olevan hyvin herkkä niin regressiosuoraan mukaan otettavien pisteiden suhteen, anaerobisen energiankulutuksen huomioimiselle kuin myös yleiselle mittausepä-tarkkuudelle. Niinpä tutkijoiden Moseley & Jeukendrup (2001) havaitseman deltahyötysuhteen huonohko toistettavuus näyttäisi yllä olevan analyysin perusteella johtua ainoastaan regressiosuoran määrittämisestä johtuvasta epätarkkuudesta. Medbø ym. (1988) ehdottavat $W_{\text{ulk}}-E_{\text{tot}}$ regressiosuoralle vähintään 10 mittauspisteen aineistoa. Deltahyötysuhdetta määrittäessä näin harvemmin menetellään. Kirjallisuudessa käytetään kuutta pistettä (esimerkiksi Chavarren & Calbet 1999; Duc ym. 2015), 4 pistettä (Fares ym. 2017) ja 3 pistettä (Marsh ym. 2000; Straw & Kram 2016). Näistä kuuden mittauspisteen tutkimuksissa viimeisillä kuormilla oli jo mahdollisesti anaerobisen työn osuutta hyvin suuressa osin mukana (tutkimuksessa Chavarren & Calbet 1999 naistutkittavilla viimeinen kuorma oli ~ 270 W ja tutkimuksen Duc ym. 2015 miestutkittavilla 300 W).

Yhteenvedona voisi siis sanoa, että mitä ilmeisimmin deltahyötysuhteen määrittämisessä käytetään huomattavan paljon vähemmän mittauspisteitä kuin olisi tarkoituksenmukaista. Olisi-kin mielenkiintoista tietää kuinka toistettava deltahyötysuhteesta tulisi, jos $W_{\text{ulk}}-E_{\text{tot}}$ regressiosuoraa estimoitaisiin esimerkiksi 8 W intensiteetin nousuilla siten, että lopulliseen havaintoaineistoon tulisi > 10 havaintopistettä. Hyvin todennäköisesti tällöin deltahyötysuhteenkin toistettavuus saataisiin ainakin lähemmäs kokonaishyötysuhteen toistettavuutta, kun yksittäisten kuormien mittauseräpätarkkuuksien vaikutus lopputulokseen pienenee.

8.5 Kokemus

Testattavia ei voinut suoraan luokitella Ansley & Cangle (2009) antaman taulukon (taulukko 3) mukaan; monet testatuista olivat jonkin muun urheilulajin harrastajia, mutta käyttivät pyöräilyä oheisharjoittelunaan. Niinpä kaksi testajaa jakoivat toisistaan riippumattomasti ryhmän noin puoliksi enemmän ja vähemmän pyöräilyä harrastaviin. Pyöräilyryhmään tuli 6 ja ei-pyöräilijöiden ryhmään 8 testattua (katso taulukko 8). Ryhmien välillä ei ollut eroa η_{tot} , η_{netto} , η_{Δ} eikä $\eta_{\text{työ,m}}$ suhteen (p -arvot: 0,8, 0,41, 0,44, 0,72). Testien ajaminen vain miestutkittavien kanssa ei vaikuttanut lopputuloksiin. Kuvassa 19 kuvattiin kokonaishyötysuhteen jakautumiset ryhmien välillä.

Tämäkään tutkimus ei siis tukenut näkemystä, että paljon harjoittelevilla olisi huomattavasti parempi hyötysuhde kuin vähemmän pyöräilevillä verrokeilla. Samaan tulokseen ovat päätyneet Sidossis ym. (1992); Nickleberry & Brooks (1996); Marsh ym. (2000); Moseley ym. (2001). Päinvastaista ovat ehdottaneet mm. Takaishi ym. (1998); Sallet ym. (2006); Hopker ym. (2007, 2013). Edelleen, meta-analyysin perusteella (Montero & Lundby 2015) voimaharjoittelu voisi parantaa taloudellisuutta, mutta kestävyysharjoittelu vain aiemmin harjoittelemissa. Huomautettakoon, että nyt tehdyn tutkimuksen ryhmäkoot olivat erittäin pienet ($n = 6$ ja 8) ja lisäksi tutkittavien kesken ei ollut kirkkaan selkeää jakoa vähän ja paljon pyöräileviin jolloin ryhmät olivat verrattain lähellä toisiaan. Saattaisi olla, että hyvin suuria määriä polkevilla ammattilaisilla ($>25000\text{km/vuosi}$) olisi mitattavissa oleva hyötysuhde-etu vähän pyöräileviin verrattuna. Toisaalta, kuten kuvasta 17 nähdään, paino korreloi huomattavasti kokonaishyötysuhteen kanssa, jolloin ammattipyöräilijöiden parempi hyötysuhde saattaisi johtua heidän keveydestä painostaan (esimerkiksi Santalla ym. 2012 raportoivat etappiajoihin erikoistuneiden ammattipyöräilijöiden painavan 65–70 kg, ja rasvaprosentti heillä on 8–10 %, Lucía ym. 2001).

8.6 Korrelaatiot fysiologisten muuttujien kanssa

Tässä tutkimuksessa η_{Δ} , η_{tot} ja $\eta_{\text{työ,m}}$ havaittiin kuuluvaksi eri ryhmiin, mikä havaittiin myös fysiologisten muuttujien korrelaatioista (vrt. aliluku 7.4): kun η_{tot} korreloi monien muuttujien kohdalla suuremmalla kuin 0,4 korrelaatiolla (paino, hyppyteho, P_{max} (W/kg), $\text{VO}_{2\text{max}}$ (ml/kg/min)), ei tällaisia korrelaatioita havaittu lainkaan deltahyötysuhteen tai työhyötysuhteen $\eta_{\text{työ,m}}$ kohdalla. Kaikkiaan siis Ryhmä I tuntuisi olevan alttiimpi muutoksille kuin Ryhmät II tai III. Tämä on myös kirjallisuudessa nähty, missä mm. $\text{VO}_{2\text{max}}$ (Moseley & Jeukendrup 2001), paino (Berry ym. 1993) ja ihon lämpötila (Duc ym. 2015) vaikuttavat Ryhmään I mutta ei Ryhmään II tai III. Tämä saattaisi kieliä vaikeudesta vaikuttaa luurankolihasen mekaaniseen hyötysuhteeseen, mitä η_{Δ} ja $\eta_{\text{työ}}$ yrittävät kuvata. Toisaalta, polkijan koko kehon kokonaishyötysuhteeseen voisi olla helpompi vaikuttaa, sillä esimerkiksi sisäisissä energiankulutuksissa lienee eroja yksilöiden kesken väsymistilan kautta ja toisaalta homeostaasin ylläpitämiseen kuluvan energian voisi hyvin kuvitella muuttuvan niin sisäisten (esimerkiksi lihassmassan) kuin ulkoisten (esimerkiksi lämpötilan) syiden takia.

Paino korreloi vahvasti kokonaishyötysuhteen ($r = -0,68$) kanssa, heikommin nettohyötysuhteen ($r = -0,41$) kanssa, muttei lainkaan hyötysuhteiden η_{Δ} ($r = -0,20$) tai $\eta_{\text{työ,m}}$ ($r = 0,20$) kanssa. Tämä on sopuoinnussa kirjallisuuden kanssa; paitsi teoriassa (Hansen ym. 2004), myös käytännössä (Hopker ym. 2010) on näytetty kuinka pieni jalkojen absoluuttinen massa vähentää sisäistä energiankulutusta nollakuormalla. Toisin sanoen, on näytetty, että painavimmat jalat vaikuttavat nollakuorman energiankulutusta nostavasti, koska painavampien jalkojen liikuttaminen vie enemmän metabolista energiaa heikentäen kokonaishyötysuhdetta (Berry ym. 1993; Francescato ym. 1995; Hansen ym. 2004; Hopker ym. 2010; Minetti 2011). Edelleen, syvällisen tutkimuksen pyöräilyn (ja juoksun) kokonaishyötysuhteen vaihtelun selityksistä tehneiden Lundby ym. (2017) mukaan mitatuista muuttujista ainoastaan painon voidaan varmuudella sanoa selittävän pyöräilyn taloudellisuutta vaihtelua yksilöiden välillä ($\sim 50\%$) lopun vaihtelun jäävän selittämättä millään yksittäisellä tekijällä. Koska η_{Δ} ja $\eta_{\text{työ}}$ yrittävät kuvata hyötysuhdetta ilman nollakuorman energiankulutusta, painon merkitys näihin ei ole niin korostuneena esillä. Edelleen, suorissa painon lisäys/pudotus tutkimuksissa on osoitettu, että painon muutos vaikuttaa hyötysuhteeseen vieläpä siten, että painonpudotuksen kokonaishyötysuhteen positiivinen vaikutus näyttäisi olevan pienempi kuin painonlisäyksen negatiivinen vaikutus (Goldsmith ym. 2009; Saunders 2016). Huomautettakoon tosin, että paino on ainoa nyt tehdyn tutkimuksen muuttujista, joka ei Wilk Shapiro testin perusteella olisi normaalijakautunut, johtuen yhdestä vieraas-

ta havainnosta (outlier) aineistossa (so. painavin testattava). Ilman painavinta testattavaa Wilk Shapiron testi normaaliudesta menee läpi myös painon kanssa.

Ansley & Cangley (2009) kuvasivat, että kadenssi vaikuttaa eri tavoin kokonaishyötysuhteeseen ja deltahyötysuhteeseen: nostavasti kokonaishyötysuhteeseen, mutta laskevasti deltahyötysuhteeseen. Syyksi kadenssin kokonaishyötysuhdetta laskevaan vaikutukseen annettiin nopeiden lihassolujen rekrytointi ja deltahyötysuhdetta nostavaan vaikutukseen osuminen paremmin optimaaliseen lihassupistusnopeuteen (katso myös taulukko 2). Nyt tehty tutkimus tukee osittain tätä havainto, sillä kadenssin nähtiin korreloivan välttävästi deltahyötysuhteen kanssa ($r = 0,30$), mutta ei lainkaan kokonaishyötysuhteen kanssa ($r = -0,03$). Koska monien tutkimusten mukaan kadenssin muuttaminen vaikuttaa oleellisesti kokonaishyötysuhteeseen (Gaesser & Brooks 1975; Foss & Hallèn 2004; Ansley & Cangley 2009; Graham ym. 2017), voitaisiin tästä tutkimuksesta tehdä päätelmä, että kadenssin vaikutus kokonaishyötysuhteeseen on kuitenkin pienempi kuin painosta ja tekniikasta johtuva yksilöiden välinen vaihtelu. Edelleen, kadenssilla oli vahva korrelaatio mitatun työhyötysuhteen $\eta_{ty\ddot{o},m}$ kanssa ($r = 0,74$). Tähän saadaan kaksi vaihtoehtoista selitystä. Ensinnäkin, koska työhyötysuhde yrittää kuvata enemmän tai vähemmän samaa luurankolihasen mekaanista hyötysuhdetta kuin deltahyötysuhde, niin tutkijoiden Ansley & Cangley (2009) ehdottama selitys osuminen paremmin optimaaliseen lihassupistusnopeuteen voisi selittää näin vahvan korrelaation. Toinen selitys voi olla tilastollinen harha; vain 14 tutkittavan otannalla on suuri mahdollisuus löytää vääriä (tai liioiteltuja) korrelaatiota riittävän monen korrelaatiolaskun joukosta (ns. tyypin II virhe).

Hyppyteho korreloi myös vahvasti ($r = -0,56$) kokonaishyötysuhteen kanssa, mutta ei muiden kanssa. Hyppytehon laskentaan on käytetty hyppääjän massaa, mikä selittänee suurelta osin tämän korrelaation, yhteisen nimittäjän kautta. Lisäksi laskettaessa hyppyteho painokiloa kohti koko korrelaatio häviää (korrelaatio kokonaishyötysuhteen kanssa $-0,24$, $p = 0,4$) korostaen tässäkin suhteessa painon merkitystä kokonaishyötysuhteeseen.

Tutkimuksen eräs tarkoitus oli myös tutkia voimantuoton vaikutusta hyötysuhteeseen poikittaistutkimuksella. Lyhyesti, maksimivoiman kasvattaminen on tutkimuksissa vaikuttanut positiivisesti hyötysuhteeseen (esimerkiksi Sunde ym. 2010; Vikmoen ym. 2016), otaksuttujen vaikutusmekanismien ollessa kehittyneessä neurolihaskoordinaatiossa ja motorista yksikköä kohden kasvaneessa voimantuotossa (Montero & Lundby 2015). Sitä vastoin suuri II-tyypin lihasten osuus vaikuttaa negatiivisesti hyötysuhteeseen (Horowitz ym. 1994). Tarkoitus oli selvittää vaikuttaako maksimivoiman (jalkojen maksimaalinen ojennusvoima) positiiv-

vinen vaikutus enemmän kuin II-tyypin lihassolujen suhteellisen osuuden negatiivinen vaikutus (hyppy). Asian tekee vaikeaksi poikittaistutkimuksella selvitettäväksi se, että II-tyypin lihassolujen suhteellinen osuus vaikuttaa myös maksimivoimaan positiivisesti (McArdle ym. 2007, Luku 18). Nyt vertikaalihypyn arvioitu teho vaikuttaisi suurimmalla korrelaatiolla kokonaishyötysuhteeseen ($r = -0,56$), mutta kun se suhtautetaan painoon, niin teho/paino (W/kg) suhde ei enää korreloikaan lainkaan kokonaishyötysuhteen kanssa. Samoin kävi jalkojen ojennusvoiman kanssa: lievä korrelaatio ($r = -0,34$) kokonaishyötysuhteen kanssa hävisi kokonaan kun voima suhteutettiin painokiloon. Niinpä, ehkä hieman odotetustikin, nyt tehdyllä tutkimuksella ei voida ottaa kantaa voimakysymykseen. Korkeintaan voidaan arvella, että maksimivoiman positiivinen ja II-lihassolujen negatiivinen vaikutus itsessään näyttäisivät kumoavan toistensa vaikutukset suhteellisesti (painokiloa kohti) tarkasteltuna. Jos taas absoluuttisesti tarkastellaan, niin näyttäisi, että suurempaan voimaan liittyvä suurempi lihasmassa (McArdle ym. 2007, sivu 515) heikentää kokonaishyötysuhdetta enemmän kuin mitä parempi maksimivoimatase sitä parantaa.

Maksimaalinen hapenottokyky

Omana alilukunaan tarkastellaan maksimaalisen hapenottokyvyn korrelaatiota kokonaishyötysuhteen kanssa, mikä tässä tutkimuksessa oli suhteellisen vahva ($r = 0,75$, $p < 0,01$). Tämä ei kuitenkaan tarkoita, että kokoneiden pyöräilijöiden hyötysuhde olisi parempi, sillä maksimaaliseen hapenottokykyyn vaikuttaa harjoittelun ohella myös geneettinen tausta kuten myös esimerkiksi Moseley & Jeukendrup (2001) mainitsevat. Tämä tulos kuitenkin eroaa yleisestä kirjallisuuden linjasta, jossa VO_{2max} tai kokemus ei ole korreloinut kokonaishyötysuhteen kanssa (esim. Sidossis ym. 1992; Nickleberry & Brooks 1996; Marsh ym. 2000; Moseley ym. 2001; Moseley & Jeukendrup 2001; de Koning ym. 2012) ja vaatii siksi oman selvityksensä. Muitakin vastaesimerkkejä näille yleisille tuloksille on toki löytynyt, kuten Moseley & Jeukendrup (2001), joilla VO_{2max} korreloi heikosti kokonaishyötysuhteen ($r = 0,49$, $p < 0,05$), mutta ei deltahyötysuhteen kanssa. Heti alkuun voisi mainita, että nyt tehdyn tutkimuksen maksimaalisen hapenottokyvyn korrelaatio kokonaishyötysuhteen kanssa ei kuitenkaan voi johtua kokemuksesta; esimerkiksi maksimaalisen hapenottokyvyn mukaan järjestettynä kuuden parhaimman joukosta löytyi vain kolme pyöräilijäksi luokiteltua testattua. Lisäksi erikseen tehtynä testinä huomattiin yllä, että kokemus ei näyttäisi korreloivan kokonaishyötysuhteen kanssa (katso kuva 19).

Eräs syy havaitulle korrelaatiolla saattaa löytyä hitaista lihassoluista. Kuten Coyle ym. (1992) ja Mogensen ym. (2006) ovat raportoineet, hitaiden lihassolujen määrä vaikuttaa positiivisesti hyötysuhteeseen (niin kokonais- kuin deltahyötysuhteeseen). Kuitenkin, impliittisesti tämä tarkoittaa prosenttiosuutta rekrytoituista lihassoluista. Niinpä, jos 150 W intensiteetillä parempikuntoinen ei ole joutunut rekrytoimaan lainkaan nopeita lihassoluja, on hänellä paremmat mahdollisuudet hyvään hyötysuhteeseen kuin verrokilla, joka on jo joutunut rekrytoimaan nopeita lihassoluja. Tämä saattaa osaltaan selittää VO_{2max} :n vaikutuksen hyötysuhteeseen. On viitteitä, että 52% VO_{2max} tehon jälkeen pyöräilytyössä kaikki lihassolut olisivat jo rekrytoitu (Ivy ym. 1987 lähteen Coyle ym. (1992) mukaan)⁸. Nyt tehdyssä tutkimuksessa 150 W oli kolmelle tutkittavalle alle 50 % VO_{2max} (korkea VO_{2max}), kun taas kolmelle se oli yli 60 % VO_{2max} (matala VO_{2max}). Tämä voi olla osaselitys, mutta koko selitys se ei ole, sillä hitaat lihassolut vaikuttavat myös deltahyötysuhdetta nostavasti (Coyle ym. 1992), mutta tässä tutkimuksessa VO_{2max} ei korreloinut deltahyötysuhteen kanssa merkitsevästi.

Toinen mahdollinen syy havaitulle korrelaatiolle on yhteinen selittäjä: ajajan paino. Aiemmin jo todettiin painon korreloivan vahvasti kokonaishyötysuhteen kanssa. Tämän lisäksi, nyt tehdyssä tutkimuksessa suhteellinen VO_{2max} (ml/kg/min) korreloi painon kanssa $p = 0,052$ -tasolla ($r = 0,57$). Suuremmalla aineistolla nähdään, että korrelaatio on todellinen: Paavo Nurmi keskus miesaineistolla korrelaatio painon ja maksimaalisen hapenotto-kyvyn (ml/kg/min) välillä oli $r = -0,55$, $p < 0,00001$, $n = 58$. Tätä yhteisen selittäjän teoriaa maksimaalisen hapenotto-kyvyn ja kokonaishyötysuhteen välillä tukee se, että maksimaalinen hapenotto-kyky ei korreloinut tässä tutkimuksessa merkitsevästi deltahyötysuhteen kanssa ($r = 0,13$, $p = 0,7$), mikä on sopusoinnussa sen kanssa, että deltahyötysuhteesta on poistettu — enemmän tai vähemmän tarkasti — nollakuorman energiankulutus ja näin ollen pitkälti painon merkitys. Myös kirjallisuudessa on nähty, että niissä harvoissa tapauksissa joissa VO_{2max} on nähty korreloivat kokonaishyötysuhteen kanssa, se ei korreloi yleensä merkitsevästi deltahyötysuhteen kanssa (Moseley & Jeukendrup 2001). Niinpä havaittu korrelaatio maksimaalisen hapenotto-kyvyn ja kokonaishyötysuhteen välillä välittyikin todennäköisesti painon kautta.

Painon merkitystä maksimaaliseen hapenotto-kykyyn on pohdittu myös kirjallisuudessa. Esimerkiksi, on huomautettu, että jos suhteutetaan maksimaalinen hapenotto-kyky työskente-

⁸Reunahuomautuksena, että myös aerobinen kynnys asettuu useimmiten juuri 50-60% VO_{2max} arvoille. Herää siis kysymys, voisiko aerobisen kynnyksen määrittää siksi intensiteetiksi jolloin kaikki lihassolut on ensimmäistä kertaa rekrytoitu.

levien lihasten massa (McArdle ym. 2007, sivut 245–246), tai rasvattomaan kehon massa (Goran ym. 2000; Krachler ym. 2014, 2015; Lolli ym. 2017) saataisiin painon merkitys minimoitua. Toisin sanottuna, jos $VO_{2\max}$ suhteutetaan koko kehon painoon, siinä ei oteta huomioon eri yksilöiden kehojen rasvaprosenttien vaihtelua eikä yläruumiin lihasmassan määrää. Nyt tehdyssä tutkimuksessa testatut olivat lajitaustoiltaan ja kuntotasoiltaan suhteellisen heterogeeninen joukko, jolloin ylävartalon lihasmassan ja koko kehon rasvaprosentin variaatio yksilöstä toiseen vaihtelivat suurestikin ja tätä varten koko kehon painoon suhteutettu maksimaalisen hapenottokyky (ml/kg/min) nähtiin korreloivan suhteellisen selkeästi painon kanssa. Huomautettakoon, että vaikka paino vaikuttaa vahvasti myös absoluuttiseen (l/min) maksimaaliseen hapenottokykyyn (vrt. Goran ym. 2000; Krachler ym. 2014), sen vaikutus siihen on positiivinen (nyt tehdyssä tutkimuksessa $r = 0,51$) suuremman painon tarkoittaessa myös suurempaa työskentelevien lihasten massaa. Vastaavasti painon merkitys kokonaishyötysuhteeseen on negatiivinen (nyt tehdyssä tutkimuksessa $r = -0,68$), jolloin yhteisvaikutuksena absoluuttisen maksimaalisen hapenottokyvyn korrelaatio kokonaishyötysuhteeseen kompensoituu olemattomaksi (tässä tutkimuksessa $r = 0,03$).

8.7 Parannuksia tutkimukseen

Luonnollisesti löytyisi tapoja parannella nyt tehtyä tutkimusta. Ensinnäkin aineistona tässä tutkimuksessa oli vain 14 tutkittavaa, jolloin paras tapa saada tarkempia tilastollisia päätelmiä olisi kasvattaa otoskokoa. Esimerkiksi faktorianalyysiin neuvotaan ottamaan yleensä vähintään 300 havainnon otanta tai ainakin 5–10 havaintoa tutkittavaa muuttujaa kohti (Comrey & Lee 1992 lähteen Yong & Pearce 2013 mukaan). Nyt tehdyssä tutkimuksessa tehtiin kuudelle muuttujalle ryhmittelyä, jolloin 1:5 suhteella vähintään 30 havaintoa olisi oikeutetumpi havaintojen määrä ryhmittelyn tekemiselle. Niinpä nyt havaitut tulokset selkeästi tarvitsisivat lisävarmennuksen uuden tutkijaryhmän tekemänä.

Garcia-Tabar ym. (2015) mukaan maksimihengityskaasutesteissä esiintyy pientä systemaattista ajautumaa mitatuissa arvoissa ja siksi olisi syytä kalibroida hengityskaasuanalysaattori myös testin jälkeen, etenkin jos tarkoitus olisi mitata testin lopussa saatava maksimaalinen hapenottokyky tarkasti. Nyt tehdyssä tutkimuksessa tätä kalibraatiota ei tehty, mutta tosin maksimihapenottokyky ei myöskään ollut ensisijainen tutkimuskohde vaan mittauksen keskellä olleet submaksimaaliset kuormat.

Tutkimuksessa hyödynnettiin hengityskaasuja viiden minuutin kuormien viimeisen minuutin ajalta. Tämä keskiarvoistus saattoi olla liian lyhyeltä ajanjaksolta, sillä vaikkapa otettaessa keskiarvoistus kuormien viimeisen 1,5 minuutin ajalta muuttaa jonkin verran hyötysuhteita (η_{Δ} : muutos $0,31 \pm 1,49$ %-yksikköä, η_{tot} : muutos $0,07 \pm 0,27$ %-yksikköä, $\eta_{\text{työ,m}}$: muutos $0,15 \pm 0,77$ %-yksikköä), kokonaishyötysuhteen pysyessä stabiileimpana tässäkin vertailussa.⁹ Kaikkiaan hieman pidemmät kuormat pidemmällä keskiarvoistuksella (esimerkiksi 7 minuutin kuormat, joiden 3 viimeiseltä minuutilta mitataan hengityskaasut) olisivat voineet olla mielekkäämpiä. Kirjallisuudessa hyötysuhdemittauksissa on käytetty keskiarvoistuksia vaihtelevasti: 30 sekuntia (2 min kuormat, Broskey ym. 2015; 3 ja 6 min kuormat, de Koning ym. 2012), 1 minuuttia (2 min kuormat, Schumann ym. 2015; 4 min kuormat, Goldsmith ym. 2009; Bell ym. 2017), 1,5 minuuttia (5 min kuormat, Mogensen ym. 2006), 2 minuuttia (5 min kuormat, Fares ym. 2017), 3 minuuttia (6 min kuormat, Noordhof ym. 2010), 5 minuuttia (10 min kuormat, Cole ym. 2014).

Tässä tutkimuksessa hyötysuhteita tutkittiin niin miehiltä kuin naisilta. Kuitenkin, on tiedossa, että naisilla lepoenergiankulutus on 5–10 % pienempi kuin miehillä (Ravussin ym. 1986 lähteen Hopker ym. 2010 mukaan). Tällöin, etenkin pienillä intensiteeteillä, tämä erotus voi vaikuttaa tarkasteluihin hyötysuhteiden järjestyksiin. Nyt tarkastellulla 150 W intensiteeteillä 10 % ero lepoenergiankulutuksessa tarkoittaa noin 0,2–0,3 %-yksikön eroa kokonaishyötysuhteeseen. Lisäksi tämä vaikuttaa miesten ja naisten $W_{\text{ulk}}-E_{\text{tot}}$ regressiosuoran kulmakertoimeen. Pienillä intensiteeteillä naisilla on suhteessa pienempi kokonaisenergiankulutus pienemmän lepoenergiankulutuksen takia, jolloin regressiosuoran kulmakerroin näyttää jyrkempänä kuin miehillä ja vastaavasti naisten deltahyötysuhde voi siksi näyttää teoriassa hieman matalampana kuin metabolisesti yhtä tehokkaasti polkevan miehen. Niinpä aivan tarkkoja tuloksia etsittäessä, voisi olla perusteltua tutkia ainoastaan yhtä sukupuolta kerrallaan.

Sekundaarisena tutkimuskohteena ollut voimantuottokyvyn yhteys hyötysuhteeseen tutkittiin tässä tapauksessa vertikaalihypyllä kontaktimattoa käyttäen, josta hyppypainoa ja ilmalennon aikaa käyttäen laskettiin hypyn huipputeho Sayersin kaavalla (Sayers ym. 1999). Vaikka alkuperäisessä tutkimuksessa Sayersin kaavan ilmoitettiin yliarvioivan tehoa vain 2,7 % (Sayers ym. 1999), voi yliarvio olla pienemmällä otannalla jopa 20 % (Canavan & Vescovi 2004). Niinpä tarkempaan tulokseen huipputehon osalta oltaisiin päästy mittaamalla hyppy

⁹Johtopäätöksiin keskiarvoistuksen muuttaminen minuutista 1,5 minuuttiin ei vaikuta; Ryhmät I, II ja III pysyvät kaikesta huolimatta ennallaan järjestyskorrelaatioin tarkasteluna ja paino korreloi edelleen parhaiten fysiologisten muuttujien joukosta.

voimalevyllä, josta tuotettu huipputehon olisi voinut laskea suoraan. Hyppykorkeus itsessään saadaan suhteellisen luotettavasti kontaktimatolla kun vertailuna on käytetty 3D-kameraa ($\Delta h=0,5\text{cm}$, $r = 0,974$, Leard ym. 2007).

8.8 Johtopäätökset ja käytännön sovellukset

Kaiken kaikkiaan tutkimus siis osoittaisi, että hyötysuhteet voidaan jakaa kolmeen eri ryhmään, Ryhmä I (η_{tot} , η_{netto} , taloudellisuus), Ryhmä II ($\eta_{\text{työ,a}}$, η_{Δ}) ja Ryhmä III ($\eta_{\text{työ,m}}$), siitäkin huolimatta, että teoriassa kaikki hyötysuhteet lähestyvät toisiaan tehon kasvaessa rajatta. Näistä ryhmistä η_{tot} , η_{Δ} ja $\eta_{\text{työ,m}}$ olisivat parhaimmat edustajat ryhmilleen. Tyhjän kuorman energiakulutuksien $E_{0,a}$ ja $E_{0,m}$ välinen ero — ja siis Ryhmien II ja III välinen ero — olisi selvitettävä perusteellisemmin ennen kuin voidaan tarkemmin ottaa kantaa mitä $\eta_{\text{työ,a}}$ ja $\eta_{\text{työ,m}}$ tarkalleen mittaavat ja kumpi mittaa paremmin sitä työhyötysuhdetta jota sen ajatellaan mittaavan. Ryhmät I ja II vaikuttavat olevan suhteellisen lähellä toisiaan ja mitattu työhyötysuhde $\eta_{\text{työ,m}}$, eli Ryhmä III, tuntuisi olevan kauimpana muista ryhmistä. Deltahyötysuhteen ja työhyötysuhteen $\eta_{\text{työ,a}}$ määrittämisessä näyttäisi tutkielman analyysin nojalla olevan paljonkin epävarmuutta. Tutkielmassa ehdotetaan luottamusvälin tai lokaalien deltahyötysuhteiden hajontaa deltahyötysuhteen η_{Δ} kelpoisuuden mittariksi. Erinomaisen rajaksi ehdotettiin 95 %:n luottamusvälin pituutta 0,50 % ja lokaalien deltahyötysuhteiden hajonnan arvoa 1,00 %. Deltahyötysuhteen ja työhyötysuhteiden määrittämisongelmien ja epätarkkuuksien takia näyttäisi, että Ryhmä I voisi konsistenttisuudessaan ja yksiselitteisyydessään olla paras ryhmä edustamaan yksilön hyötysuhdetta vaikkakaan se ei välttämättä riittävällä tarkkuudella kuvaisikaan luurankolihasmekaanista hyötysuhdetta.

Ajajan paino näyttäisi olevan suurin vaikuttava tekijä hyötysuhteeseen. Niinpä painon minimointi näyttäisi maksimoivan (kokonais)hyötysuhdetta. Tässä tutkimuksessa ei kuitenkaan oteta kantaa painon vaikutuksesta suorituskyykyyn, minkä maksimointi on huomattavasti olennaisempaa kuin yksittäisenä suureena mitattavan hyötysuhteen maksimointi. Tutkimus ei antanut tukea näkemykselle, että kokeneilla pyöräilijöillä olisi ainakaan huomattavasti parempi hyötysuhde verrattuna vähemmän pyöräileviin verrokkeihin.

Kokonaishyötysuhde näyttäisi maksimoituvan aerobisen kynnyksen tuntumassa ja tätä voisi käyttää lisäapuna aerobisen kynnyksen määrittämisessä.

Regressiosuoran $W_{\text{ulk}}-E_{\text{tot}}$ estimoinnissa voisi olla hyväksyttävää käyttää ainoastaan alle aerobisen kynnyksen kuormia, sillä jo 1 mmol/l laktaatin nousu aiheuttaa joillekin huomattavia muutoksia regressiosuoran yhtälöön hitaan VO_2 komponentin ilmaantuessa. Lisäksi 3–5 havaintopistettä on liian pieni luotettavan regressiosuoran piirtämiseen; erityisesti vakio-kertoimen 95 %:n luottamusvälin pituus on näin pienellä havaintomäärällä huolestuttavan suuri.

Anaerobisen energiantuoton määrä alle aerobisen kynnyksen tapahtuvissa hyötysuhdemittauksissa on pieni, mutta havaittava. Sen vaikutus hyötysuhteiden välisiin suhteisiin näyttäisi olevan kuitenkin niin pieni, että anaerobisen energiankulutuksen huomioon jättämistä alle aerobisen kynnyksen tehdyissä hyötysuhdetarkasteluissa voidaan pitää hyväksyttävänä. Vaikkakin, jos laktaattilukemat ovat saatavilla, on anaerobisen energiankulutuksen huomioiminen hyvin suositeltavaa.

LÄHTEET

- Abbiss, C. & Laursen, P. 2005 Models to explain fatigue during prolonged endurance cycling. *Sports Medicine*, 35, 865–898.
- Abbiss, C., Quod, M., Levin, G., Martin, D. & Laursen, P. 2009 Accuracy of the velotron ergometer and SRM power meter. *International Journal of Sports Medicine*, 30 (02), 107–112, URL <https://doi.org/10.1055/s-0028-1103285>.
- Ansley, L. & Cangley, P. 2009 Determinants of "optimal" cadence during cycling. *European Journal of Sport Science*, 9 (2), 61–85.
- Arkesteijn, M., Hopker, J., Jobson, S. & Passfield, L. 2013 The effect of turbo trainer cycling on pedalling technique and cycling efficiency. *International Journal of Sports Medicine*, 34 (6), 520–525.
- Asmussen, E. & Bonde-Petersen, F. 1974 Apparent efficiency and storage of elastic energy in human during exercise. *Acta Physiologica Scandinavica*, 92, 537–545.
- Bahr, R., Opstad, P., Medbø, J. & Sejersted, O. 1991 Strenuous prolonged exercise elevates resting metabolic rate and causes reduced mechanical efficiency. *Acta Physiologica Scandinavica*, 141 (4), 555–563.
- Bell, P., Furber, M., van Someren, K., Antón-Solanas, A. & Swart, J. 2017 The physiological profile of a multiple tour de france winning cyclist. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 49 (1), 115–123, URL <https://doi.org/10.1249/mss.0000000000001068>.
- Berry, M., Storsteen, J. & Woodard, C. 1993 Effects of body mass on exercise efficiency and vo₂ during steady-state cycling. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 25 (9), 1031–1037.
- Bertucci, W., Grappe, F., Girard, A., Betik, A. & Rouillon, J. 2005 Effects on the crank torque profile when changing pedalling cadence in level ground and uphill road cycling. *Journal of Biomechanics*, 38, 1003–1010.
- Bieuzen, F., Vercruyssen, F., Hausswirth, C. & Brisswalter, J. 2007 Relationship between strength level and pedal rate. *International Journal of Sports Medicine*, 28 (7), 585–589.
- Bini, R. & Carpes, F. (eds.) 2014 *Biomechanics of Cycling*. Springer International Publishing Switzerland.

- Bini, R. & Diefenthaler, F. 2010 Kinetics and kinematics analysis of incremental cycling to exhaustion. *Sports Biomechanics*, 9 (4), 223–235.
- Bini, R., Hume, P., Croft, J. & Kilding, A. 2013 Pedal force effectiveness in cycling: A review of constraints and training effects. *Journal of Science and Cycling*, 2 (1), 11–24.
- Black, M., Jones, A., Blackwell, J., Bailey, S., Wylie, L., McDonagh, S. J., Thompson, C., Kelly, J., Sumners, P., Mileva, K., Bowtell, J. & Vanhatalo, A. 2016 Muscle metabolic and neuromuscular determinants of fatigue during cycling in different exercise intensity domains. *Journal of Applied Physiology*, 122 (3), 446–459, URL <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00942.2016>.
- Blake, O., Champoux, Y. & Wakeling, J. 2012 Muscle coordination patterns for efficient cycling. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 44 (5), 926–938.
- Blaxter, K. 1989 *Energy metabolism in animals and man*. Cambridge University Press.
- Böning, D. 2012 "Biodoping" with beetroot? speculations about improved efficiency. *Dtsch Z Sportmed*, 63, 337–339.
- Böning, D. & Pries, A. 2013 Pitfalls of efficiency determination in cycling ergometry. *Journal of Applied Physiology*, 115 (12), 1862.
- Bonjour, J., Capelli, C., Antonutto, G., and E. Tam, S. C., Linnarsson, D. & Ferretti, G. 2010 Determinants of oxygen consumption during exercise on cycle ergometer: The effects of gravity acceleration. *Respiratory Physiology & Neurobiology*, 171, 128–134.
- Broker, J., Kyle, C. & Burke, E. 1999 Racing cyclist power requirements in the 4000-m individual and team pursuit. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 31, 1677–1685.
- Broskey, N. T., Boss, A., Fares, E.-J., Greggio, C., Gremion, G., Schluter, L., Hans, D., Kreis, R., Boesch, C. & Amati, F. 2015 Exercise efficiency relates with mitochondrial content and function in older adults. *Physiological Reports*, 3 (6), e12418–e12418, URL <https://doi.org/10.14814/phy2.12418>.
- Burt, D., Lamb, K., Nicholas, C. & Twist, C. 2014 Effects of exercise-induced muscle damage on resting metabolic rate, sub-maximal running and post-exercise oxygen consumption. *European Journal of Sport Science*, 14 (4), 337–344, URL <https://doi.org/10.1080/17461391.2013.783628>.

- Canavan, P. & Vescovi, J. 2004 Evaluation of power prediction equations: Peak vertical jumping power in women. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 36, 1589–1593.
- Cannon, D., Bimson, W., Hampson, S., Bowen, T., Murgatroyd, S., Marwood, S., Kemp, G. & Rossiter, H. 2014 Skeletal muscle ATP turnover by ³¹P magnetic resonance spectroscopy during moderate and heavy bilateral knee extension. *The Journal of Physiology*, 592 (23), 5287–5300, URL <https://doi.org/10.1113/jphysiol.2014.279174>.
- Castronovo, A., Conforto, S., Schmid, M., Bibbo, D. & D'Alessio, T. 2013 How to assess performance in cycling: The multivariate nature of influencing factors and related indicators. *Frontiers in Physiology*, 4, Article 116.
- Cavanagh, P. R. & LaFortune, M. A. 1980 Ground reaction forces in distance running. *Journal of Biomechanics*, 13 (5), 397–406.
- Chavarren, J. & Calbet, J. 1999 Cycling efficiency and pedalling frequency in road cyclists. *European Journal of Applied Physiology*, 80, 555–563.
- Coast, J. & Welch, H. 1985 Linear increase in optimal pedal rate with increased power output in cycle ergometry. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 53, 339–342.
- Cole, M., Coleman, D., Hopker, J. & Wiles, J. 2014 Improved gross efficiency during long duration submaximal cycling following a short-term high carbohydrate diet. *International Journal of Sports Medicine*, 35 (03), 265–269, URL <https://doi.org/10.1055/s-0033-1348254>.
- Comrey, L. & Lee, H. 1992 *A first course in factor analysis*. Hillside, NJ: Lawrence Erlbaum Associates, 2. painos.
- Conley, D. & Krahenbuhl, G. 1980 Running economy and distance running performance of highly trained athletes. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 12 (5), 357–360.
- Coyle, E. 1999 Physiological determinants of endurance exercise performance. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 2 (3), 181–189.
- Coyle, E. 2005 Improved muscular efficiency displayed as Tour de France champion matures. *Journal of Applied Physiology*, 98, 2191–2196.
- Coyle, E., Coggan, A., Hopper, M. & Walters, T. 1988 Determinants of endurance in well-trained cyclists. *Journal of Applied Physiology*, 64 (6), 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. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 23 (1), 93–107.
- Coyle, E., Sidossis, L., Horowitz, J. & Beltz, J. 1992 Cycling efficiency is related to percentage of type I muscle fibers. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 24 (7), 782–788.
- Dorel, S., Bourdin, M., Praagh, E. V., Lacour, J.-R. & Hautier, C. A. 2003 Influence of two pedalling rate conditions on mechanical output and physiological responses during all-out intermittent exercise. *European Journal of Applied Physiology*, 89, 157–165.
- Duc, S., Arfaoui, A., Polidori, G. & Bertucci, W. 2015 Efficiency and thermography in cycling during a graded exercise test. *Journal of Exercise, Sports & Orthopedics*, 2 (2), 1–8.
- Edwards, A. & Byrnes, W. 2007 Aerodynamic characteristics as determinants of the drafting effect in cycling. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 39 (1), 170–176.
- Edwards, L., Jobson, S., George, S., Day, S. & Nevill, A. 2009 Whole-body efficiency is negatively correlated with minimum torque per duty cycle in trained cyclists. *Journal of Sports Sciences*, 27 (4), 319–325.
- Esposito, F., Cé, E. & Limonta, E. 2011 Cycling efficiency and time to exhaustion are reduced after acute passive stretching administration. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 22 (6), 737–745.
- Ettema, G. & Loras, H. 2009 Efficiency in cycling: a review. *European Journal of Applied Physiology*, 106, 1–14.
- Fares, E.-J., Isacco, L., Monnard, C. R., Miles-Chan, J. L., Montani, J.-P., Schutz, Y. & Dulloo, A. G. 2017 Reliability of low-power cycling efficiency in energy expenditure phenotyping of inactive men and women. *Physiological Reports*, 5 (9), e13233, URL <https://doi.org/10.14814/phy2.13233>.
- Faria, E., Parker, D. L. & Faria, I. 2005a The science of cycling: Factors affecting performance — part 2. *Sports Medicine*, 35 (4), 313–337.
- Faria, E., Parker, D. L. & Faria, I. 2005b The science of cycling: Physiology and training — part 1. *Sports Medicine*, 35 (4), 285–312.

- Ferguson, R., Ball, D. & Sargeant, A. 2002 Effect of muscle temperature on rate of oxygen uptake during exercise in humans at different contraction frequencies. *The Journal of Experimental Biology*, 205, 981–987.
- Fonda, B. & Sarabon, N. 2010 Biomechanics of cycling. *Sport Science Review*, XIX (1–2), 187–210.
- Foss, O. & Hallèn, J. 2004 The most economical cadence increases with increasing workload. *European Journal of Applied Physiology*, 92, 443 – 451.
- Foss, O. & Hallèn, J. 2005 Cadence and performance in elite cyclists. *European Journal of Applied Physiology*, 93, 453 – 462.
- Francescato, M., Girardis, M. & Prampero, P. D. 1995 Oxygen cost of internal work during cycling. *European Journal of Applied Physiology*, 72, 51–57.
- Fritz, T. H., Hardikar, S., Demoucron, M., Niessen, M., Demey, M., Giot, O., Li, Y., Haynes, J.-D., Villringer, A. & Leman, M. 2013 Musical agency reduces perceived exertion during strenuous physical performance. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110 (44), 17784–17789, URL <https://doi.org/10.1073/pnas.1217252110>.
- Gaesser, G. & Brooks, G. 1975 Muscular efficiency during steady-rate exercise: effects of speed and work rate. *Journal of Applied Probability*, 38 (6), 1132–1139.
- Garby, L. & Astrup, A. 1987 The relationship between the respiratory quotient and the energy equivalent of oxygen during simultaneous glucose and lipid oxidation and lipogenesis. *Acta Physiologica Scandinavica*, 129, 443–444.
- García-López, J., Díez-Leal, S., Ogueta-Alday, A., Larrazabal, J. & Rodríguez-Marroyo, J. 2016 Differences in pedalling technique between road cyclists of different competitive levels. *Journal of Sports and Sciences*, 34, 1619 – 1626.
- García-Tabar, I., Eclache, J., Aramendi, J. & Gorostiaga, E. 2015 Gas analyzer’s drift leads to systematic error in maximal oxygen uptake and maximal respiratory exchange ratio determination. *Frontiers in Physiology*, 6, URL <https://doi.org/10.3389/fphys.2015.00308>.
- Gardner, A., Stephens, S., Martin, D., Lawton, E., Lee, H. & Jenkins 2004 Accuracy of srm and power tap power monitoring systems for bicycling. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 36 (7), 1252–1258.

- Gastin, P. 2001 Energy system interaction and relative contribution during maximal exercise. *Sports Medicine*, 31, 725–741.
- Goldsmith, R., Joanisse, D. R., Gallagher, D., Pavlovich, K., Shamoan, E., Leibel, R. L. & Rosenbaum, M. 2009 Effects of experimental weight perturbation on skeletal muscle work efficiency, fuel utilization, and biochemistry in human subjects. *AJP: Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, 298 (1), R79–R88, URL <https://doi.org/10.1152/ajpregu.00053.2009>.
- Goldspink, G. 1978 Energy turnover during contraction of different types of muscle. 27–39, Baltimore: University Park Press.
- Goran, M., Fields, D., Hunter, G., Herd, S. & Weinsier, R. 2000 Total body fat does not influence maximal aerobic capacity. *International Journal of Obesity*, 24, 841–848.
- Graham, P. L., Zoeller, R. F., Jacobs, P. L. & Whitehurst, M. A. 2017 The effect of cadence on time trial performance in recreational female cyclists. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 1, URL <https://doi.org/10.1519/jsc.0000000000002044>.
- Green, H., Roy, B., Grant, S., Hughson, R., Burnett, M., Otto, C., Pipe, A., McKenzie, D. & Johnson, M. 2000 Increases in submaximal cycling efficiency mediated by altitude acclimatization. *Journal of Applied Physiology*, 89, 1189–1197.
- Gregor, R., Broker, J. & M.M., R. 1991 The biomechanics of cycling. *Exercise and Sport Sciences Reviews*, 19, 127–169.
- Hansen, E. A., Jørgensen, L. V. & Sjøgaard, G. 2004 A physiological counterpoint to mechanistic estimates of "internal power" during cycling at different pedal rates. *European Journal of Applied Physiology*, 91, 435–442.
- He, Z.-H., Bottinelli, R., Pellegrino, M. A., Ferenczi, M. A. & Reggiani, C. 2000 ATP consumption and efficiency of human single muscle fibers with different myosin isoform composition. *Biophysical Journal*, 79 (2), 945–961, URL [https://doi.org/10.1016/s0006-3495\(00\)76349-1](https://doi.org/10.1016/s0006-3495(00)76349-1).
- Heggelund, J., Fimland, M., Helgerud, J. & Hoff, J. 2013 Maximal strength training improves work economy, rate of force development and maximal strength more than conventional strength training. *European Journal of Applied Physiology*, 113, 1565–1573.
- Henriksson, J. 2000 Cellular metabolism and endurance. In *Endurance in Sport*, eds. R. Shephard & P.-O. Åstrand, Blackwell Science, 2. painos.

- Hill, A. 1910 The combinations of haemoglobin with oxygen and with carbon monoxide. *The Journal of Physiology*, 40, iv–vii.
- Hintzy, F., Mourot, F., Perrey, S. & Tordi, N. 2005 Effect of endurance training on different mechanical efficiency indices during submaximal cycling in subjects unaccustomed to cycling. *Canadian Journal of Applied Physiology*, 30 (5), 520–528.
- Hintzy-Cloutier, F., Zameziati, K. & Belli, A. 2003 Influence of the base-line determination on work efficiency during submaximal cycling. *Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, 43 (1), 51–56.
- Hopker, J., Coleman, D., Gregson, H., Jobson, S., der Haar, T. V., Wiles, J. & Passfield, L. 2013 The influence of training status, age, and muscle fiber type on cycling efficiency and endurance performance. *Journal of Applied Physiology*, 115, 723–729.
- Hopker, J., Coleman, D. & Wiles, J. 2007 Differences in efficiency between trained and recreational cyclists. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism*, 32, 1036–1042.
- Hopker, J., Jobson, S., Carter, H. & Passfield, L. 2010 Cycling efficiency in trained male and female competitive cyclists. *Journal of Sports Science and Medicine*, 9, 332–337.
- Hopker, J., O’Grady, C. & Pageaux, B. 2016 Prolonged constant load cycling exercise is associated with reduced gross efficiency and increased muscle oxygen uptake. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*.
- Hopker, J., Passfield, L., Coleman, D., Jobson, S., Edwards, L. & Carter, H. 2009 The effects of training on gross efficiency in cycling: A review. *International Journal of Sports Medicine*, 30, 845–850.
- Horowitz, J., Sidossis, L. & Coyle, E. 1994 High efficiency of type I muscle fibers improves performance. *International Journal of Sports Medicine*, 15 (3), 152–157.
- Hug, F., Drouet, J., Champoux, Y., Couturier, A. & Dorel, S. 2008 Interindividual variability of electromyographic patterns and pedal force profiles in trained cyclists. *European Journal of Applied Physiology*, 104 (4), 667–678.
- Ivanović, J. & Dopsaj, M. 2013 Reliability of force–time curve characteristics during maximal isometric leg press in differently trained high-level athletes. *Measurement*, 46 (7), 2146–2154, URL <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2013.03.008>.

- Ivy, J., CHI, M.-Y., Hintz, C., Sherman, W., Hellendal, R. & Lowry, O. 1987 Progressive metabolite changes in individual human muscle fibers with increasing work rates. *American Journal of Physiology, (Cell Physiology 21)*, C630–C639.
- Jackson, N., Hickey, M. & II, R. R. 2007 High resistance/low repetition vs. low resistance/high repetition training: Effects on performance of trained cyclists. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 21 (1), 289–295.
- Jamurtas, A., Fatouros, I., Buckenmeyer, P., Kokkinidis, E., Taxildaris, K., Kambas, A. & Kyriazis, G. 2000 Effects of plyometric exercise on muscle soreness and plasma creatine kinase levels and its comparison with eccentric and concentric exercise. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 14 (1), 68–74.
- Jeukendrup, A. & Wallis, G. 2005 Measurement of substrate oxidation during exercise by means of gas exchange measurements. *International Journal of Sports Medicine*, 26, S28–S37.
- Jeukendrup, A. E., Craig, N. P. & Hawley, J. A. 2000 The bioenergetics of world class cycling. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 3 (4), 414 – 433.
- Joyner, M. J. & Coyle, E. F. 2008 Endurance exercise performance: the physiology of champions. *Journal of Physiology*, 586 (1), 35–44.
- Kapanen, J. 2016 Paavo nurmi keskuksen testiaseman johtaja. Suullinen tiedonanto.
- Kautz, S. & Neptune, R. 2002 Biomechanical determinants of pedaling energetics: Internal and external work are not independent. *Exercise and Sport Sciences Reviews*, 30 (4), 159–165.
- Keskinen, K., Häkkinen, K. & Kallinen, M. (eds.) 2004 *Kuntotestauksen käsikirja*. Liikuntatieteellinen seura.
- de Koning, J., Noordhof, D., Lucia, A. & Foster, C. 2012 Factors affecting gross efficiency in cycling. *International Journal of Sports Medicine*, 33 (11), 880–885.
- de Koning, J., Noordhof, D., Uitslag, T., Galiart, R., Dodge, C. & Foster, C. 2013 An approach to estimating gross efficiency during high intensity exercise. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 8, 682–684.
- Korff, T., Fletcher, G., Brown, D. & Romer, L. 2011 Effect of "pose" cycling on efficiency and pedaling mechanics. *European Journal of Applied Physiology*, 111, 1177–1186.

- Korff, T., Romer, L. M., Mayhew, I. & Martin, J. C. 2007 Effect of pedaling technique on mechanical effectiveness and efficiency in cyclists. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 39 (6), 991–995.
- Krachler, B., Savonen, K., Komulainen, P., Hassinen, M., Lakka, T. & Rauramaa, R. 2014 Cardiopulmonary fitness is a function of lean mass, not total body weight: The DR's EXTRA study. *European Journal of Preventive Cardiology*, 22 (9), 1171–1179, URL <https://doi.org/10.1177/2047487314557962>.
- Krachler, B., Savonen, K. & Lakka, T. 2015 Obesity is an important source of bias in the assessment of cardiorespiratory fitness. *American Heart Journal*, 170 (5), e7–e8, URL <https://doi.org/10.1016/j.ahj.2015.08.016>.
- Krustrup, P., Söderlund, K., Mohr, M. & Bangsbo, J. 2004 The slow component of oxygen uptake during intense sub-maximal exercise in man is associated with additional fibre recruitment. *Pflügers Arch - Eur J Physiol*, 447, 855–866.
- Kusmerick, M. 1983 Energetics of muscle contraction, section 10: Skeletal muscle. In *Handbook of Physiology*, eds. L. Peachey, R. Adrian & S. Geiger, Bethesda, MD: American Physiological Society.
- Kyle, C. 1979 Reduction of wind resistance and power output of racing cyclists and runners traveling in groups. *Ergonomics*, 22 (4), 387–397.
- Leard, J. S., Cirillo, M. A., Katsnelson, E., Kimiatek, D. A., Miller, T. W., Trebincevic, K. & Carbalosa, J. C. 2007 Validity of two alternative systems for measuring vertical jump height. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 21 (4), 1296–1299.
- Leirdal, S. & Ettema, G. 2011a Pedaling technique and energy cost in cycling. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 43 (4), 701–705.
- Leirdal, S. & Ettema, G. 2011b The relationship between cadence, pedalling technique and gross efficiency in cycling. *European Journal of Applied Physiology*, 111, 2885–2893.
- Lolli, L., Batterham, A., Weston, K. & Atkinson, G. 2017 Size exponents for scaling maximal oxygen uptake in over 6500 humans: A systematic review and meta-analysis. *Sports Medicine*, 47 (7), 1405–1419, URL <https://doi.org/10.1007/s40279-016-0655-1>.
- Louis, J., Hausswirth, C., Easthope, C. & Brisswalter, J. 2012 Strength training improves cycling efficiency in master endurance athletes. *European Journal of Applied Physiology*, 112, 631–640.

- Loveless, D., Weber, C., Haseler, L. & Schneider, F. 2005 Maximal leg-strength training improves cycling economy in previously untrained men. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 37 (7), 1231–1236.
- Lucía, A., Hoyos, J. & Chicharro, J. 2000 The slow component of vo_2 in professional cyclists. *British Journal of Sports Medicine*, 34, 367–374.
- Lucía, A., Hoyos, J. & Chicharro, J. 2001 Physiology of professional road cycling. *Sports Medicine*, 31 (5), 325–337.
- Lucía, A., Hoyos, J., Santalla, A., Pérez, M. P. & Chicharro, J. 2002 Kinetics of vo_2 in professional cyclists. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 34 (2), 320 – 325.
- Luhtanen, P., P-Rahkila, Rusko, H. & Viitasalo, J. 1987 Mechanical work and efficiency in ergometer bicycling at aerobic and anaerobic thresholds. *Acta Physiologica*, 131 (3), 331–337.
- Lundby, C., Calbet, J., Sander, M., van Hall, G., Mazzeo, R., Stray-Gundersen, J., Stager, J., Chapman, R., Saltin, B. & Levine, B. 2007 Exercise economy does not change after acclimatization to moderate to very high altitude. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 17, 281–291.
- Lundby, C., Montero, D., Gehrig, S., Hall, U. A., Kaiser, P., Boushel, R., Lundby, A.-K. M., Kirk, N., Valdivieso, P., Flück, M., Secher, N. H., Edin, F., Hein, T. & Madsen, K. 2017 Physiological, biochemical, anthropometric, and biomechanical influences on exercise economy in humans. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, URL <https://doi.org/10.1111/sms.12849>.
- Markovic, G., Dizdar, D., Jukic, I. & Cardinale, M. 2004 Reliability and factorical validity of squat and countermovement jump tests. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 18 (3), 551–555.
- Marsh, A., Martin, P. & Foley, K. 2000 Effect of cadence, cycling experience, and aerobic power on delta efficiency during cycling. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 32 (9), 1630–1634.
- Martin, D., Quod, M. & Gore, C. 2005 Has Armstrong's cycle efficiency improved? *Journal of Applied Physiology*, 99 (4), 1628–1629.
- Matomäki, P. 2016a Henkilökohtainen data, ei julkaistu.

- Matomäki, P. 2016b *Maantiopyöräilyn lajiansalyysi ja valmennuksen ohjelmointi*. Valmentajaseminaarityö, Jyväskylän yliopisto, Liikuntabiologian laitos.
- McArdle, W., Katch, F. & Katch, V. 2007 *Exercise Physiology: Energy, Nutrition, & Human Performance*. Lippincott Williams & Wilkins, 6. painos.
- McCole, S., Clancy, K., Conte, J., Anderson, R. & Hagberg, J. 1990 Energy expenditure during bicycling. *Journal of Applied Physiology*, 68 (2), 748–753.
- McDaniel, J., Subudhi, A., & Martin, J. 2005 Torso stabilization reduces the metabolic cost of producing cycling power. *Canadian Journal of Applied Physiology*, 30 (4), 433–441.
- Medbø, J. 2008 No effect of muscle fiber type on mechanical efficiency during cycle exercise at 1.5 Hz. *Acta Kinesiologiae Universitatis Tartuensis*, 13, 51–75.
- Medbø, J., Mohn, A., Tabata, I., Bahr, R., Vaage, O. & Sejersted, O. 1988 Anaerobic capacity determined by maximal accumulated O₂ deficit. *Journal of Applied Physiology*, 64 (1), 50–60.
- Mellin, I. 2006 *Tilastolliset menetelmät*. TKK opintomoniste.
- Miller, A. I., Heath, E. M., Bressel, E. & Smith, G. A. 2013 The metabolic cost of balance in cycling. *Journal of Science and Cycling*, 2 (2), 20–26.
- Minetti, A. 2011 Bioenergetics and biomechanics of cycling: the role of internal work. *European Journal of Applied Physiology*, 111, 323–329.
- Mogensen, M., Bagger, M., Pedersen, P. K., Fernström, M. & Sahlin, K. 2006 Cycling efficiency in humans is related to low UCP3 content and to type I fibres but not to mitochondrial efficiency. *The Journal of Physiology*, 571 (3), 669–681, URL <https://doi.org/10.1113/jphysiol.2005.101691>.
- Montero, D. & Lundby, C. 2015 The effect of exercise training on the energetic cost of cycling. *Sports Medicine*, 45 (11), 1603–1618, URL <https://doi.org/10.1007/s40279-015-0380-1>.
- Mornieux, G., Stapelfeldt, B., Gollhofer, A. & Belli, A. 2008 Effects of pedal type and pull-up action during cycling. *International Journal of Sports Medicine*, 29, 817–822.
- Morris, D. & Londree, B. 1997 The effects of bicycle crank arm length on oxygen consumption. *Canadian Journal of Applied Physiology*, 22 (5), 429–438.

- Moseley, L., Achten, J. & Jeukendrup, A. 2001 No differences in gross efficiency between subjects with varying aerobic capacities. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 33 Supplement 1 (5), S87.
- Moseley, L., Achten, J., Martin, J. & Jeukendrup, A. 2004 No differences in cycling efficiency between world-class and recreational cyclists. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 25, 374–379.
- Moseley, L. & Jeukendrup, A. 2001 The reliability of cycling efficiency. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 33 (4), 621–627.
- Nickleberry, B. & Brooks, G. 1996 No effect of cycling experience on leg cycle ergometer efficiency. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 28 (11), 1396–1401.
- Noordhof, D., de Koning, J., van Erp, T., van Keimpema, B., de Ridder, D., Otter, R. & Foster, C. 2010 The between and within day variation in gross efficiency. *European Journal of Applied Physiology*, 109 (6), 1209–1218, URL <https://doi.org/10.1007/s00421-010-1497-4>.
- Noordhof, D., Mulder, R., Malterer, K., Foster, C. & de Koning, J. 2015 The decline in gross efficiency in relation to cycling time-trial length. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 10, 64–70.
- Padilla, S., Mujika, I., Cuesta, G. & Goiriena, J. 1999 Level ground and uphill cycling ability in professional road cycling. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 31, 878–885.
- Passfield, L. & Doust, J. 2000 Changes in cycling efficiency and performance after endurance exercise. *Medicine & Science in Sports & Exercise*.
- Pedersen, P., Sørensen, J., Jensen, K., Johansen, L. & Levin, K. 2002 Muscle fiber type distribution and nonlinear $\dot{V}O_2$ -power output relationship in cycling. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 34 (4), 655–661.
- Persson, A. & Persson, P. 2012 Cycling in physiology. *Acta Physiologica*, 206, 1–3.
- Peveler, W. 2008 Effects of saddle height on economy in cycling. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 22, 1355–1359.
- Peveler, W. & Green, J. 2011 Effects of saddle height on economy and anaerobic power in well-trained cyclists. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 25 (3), 629–633.

- di Prampero, P. & Ferretti, G. 1999 The energetics of anaerobic muscle metabolism: a reappraisal of older and recent concepts. *Respiration Physiology*, 118, 103–115.
- Raasch, C. & Zajac, F. 1999 Locomotor strategy for pedaling: Muscle groups and biomechanical functions. *Journal of Neurophysiology*, 82, 515–525.
- Ravussin, E., Lillioja, S., Anderson, T., Christin, L. & Bogardus, C. 1986 Determinants of 24-hour energy expenditure in man. *Journal of Clinical Investigations*, 78, 1568–1578.
- Reggiani, C., Potma, E., Bottinelli, R., Canepari, M., Pellegrino, M. & Stienen, G. 1997 Chemo-mechanical energy transduction in relation to myosin isoform composition in skeletal muscle fibres of the rat. *The Journal of Physiology*, 502 (Pt 2), 449–460.
- Rønnestad, B. 2015 Scientific evidence for strength training-induced benefits in endurance runners and cyclists. Talk at 16th International Symposium: Combined Endurance and Strength Training for Physical Fitness and Sports Performance: From Science to Practice, Jyväskylä, September 23 – 25.
- Rønnestad, B., Hansen, E. & Raastad, T. 2011 Strength training improves 5-min all-out performance following 185 min of cycling. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 21, 250–259.
- Rønnestad, B., Hansen, J., Hollan, I. & Ellefsen, S. 2015 Strength training improves performance and pedaling characteristics in elite cyclists. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 25, e89–e98.
- Rønnestad, B., Hansen, J. & Nygaard, H. 2016 10 weeks of heavy strength training improves performance-related measurements in elite cyclists. *Journal of Sports Sciences*.
- Sahlin, K., Sørensen, J. B., Gladden, L., Rossiter, H. & Pedersen, P. 2005 Prior heavy exercise eliminates vo₂ slow component and reduces efficiency during submaximal exercise in humans. *Journal on Physiology*, 564 (3), 765–773.
- Sallet, P., Mathieu, R., Fenech, G. & Baverel, G. 2006 Physiological differences of elite and professional road cyclists related to competition level and rider specialization. *Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, 46, 361–365.
- Samozino, P., Horvais, N. & Hintzy, F. 2006 Interactions between cadence and power output effects on mechanical efficiency during sub maximal cycling exercises. *European Journal of Applied Physiology*, 97, 133–139.

- Sanderson, D. 1991 The influence of cadence and power output on the biomechanics of force application during steady-rate cycling in competitive and recreational cyclists. *Journal of Sports Sciences*, 9, 191–203.
- Santalla, A., Earnest, C. P., Marroyo, J. & Lucia, A. 2012 The tour de france: An updated physiological review. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 7, 200–209.
- Saunders, S. 2016 *The Effect of Body Mass Change on Cycling Efficiency*. Ph.D. thesis, Canterbury Christ Church University.
- Sayers, S., Harackiewicz, D., Harman, E., Frykman, P. & Rosenstein, M. 1999 Cross-validation of three jump power equations. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 31 (4), 572–577.
- Scanlan, A., Dascombe, B., Reaburn, P. & Osborne, M. 2008 The effects of wearing lower-body compression garments during endurance cycling. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 3, 424–438.
- Schücker, L., Fleddermann, M., de Lussanet, M., Elischer, J., Böhmer, C. & Zentgraf, K. 2016 Focusing attention on circular pedaling reduces movement economy in cycling. *Psychology of Sport and Exercise*, 27, 9–17.
- Schumann, M., Yli-Peltola, K., Abbiss, C. R. & Häkkinen, K. 2015 Cardiorespiratory adaptations during concurrent aerobic and strength training in men and women. *PLOS ONE*, 10 (9), e0139279, URL <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0139279>.
- Segal, K. 1987 Comparison of indirect calorimetric measurements of resting energy expenditure with a ventilated hood, face mask, and mouthpiece. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 45 (6), 1420–1423.
- Sidossis, L., Horowitz, J. & Coyle, E. 1992 Load and velocity of contraction influence gross and delta mechanical efficiency. *International Journal of Sports Medicine*, 13, 407–411.
- Sleivert, G. & Wenger, H. 1994 Reliability of measuring isometric and isokinetic peak torque, rate of torque development, integrated electromyography, and tibial nerve conduction velocity. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 75 (12), 1315–1321.
- Straw, A. H. & Kram, R. 2016 Effects of shoe type and shoe–pedal interface on the metabolic cost of bicycling. *Footwear Science*, 8 (1), 19–22, URL <https://doi.org/10.1080/19424280.2016.1140817>.

- Sunde, A., Støren, O., Bjerkaas, M., Larsen, M., Hoff, J. & Helgerud, J. 2010 Maximal strength training improves cycling economy in competitive cyclists. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 24 (8), 2157–2165.
- Takaishi, T., Yamamoto, T., Ono, T., Ito, T. & Moritani, T. 1998 Neuromuscular, metabolic, and kinetic adaptations for skilled pedaling performance in cyclists. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 30 (3), 442–449.
- Paavo Nurmi keskus Maksimikynnystestidatataa vuosilta 2000 – 2016, n=126. Ei julkaistu.
- Theurel, J., Crepin, M., Foissac, M. & Temprado, J. 2012 Effects of different pedalling techniques on muscle fatigue and mechanical efficiency during prolonged cycling. *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports*, 22, 714–721.
- Tietsuo, T., Yoshifumi, Y., Takaishi, O. & Toshio, M. 1996 Optimal pedaling rate estimated from neuromuscular fatigue for cyclists. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 28 (12), 1492–1497.
- Tokui, M. & Hirakoba, K. 2007 Effect of internal power on muscular efficiency during cycling exercise. *European Journal of Applied Physiology*, 101, 565–570.
- Too, D. 1990 Biomechanics of cycling and factors affecting performance. *Kinesiology, Sport Studies and Physical Education Faculty Publications*, Paper 94.
- Tukiainen, J. 2016 Suullinen tiedonanto.
- Turnes, T., de Aguiar, R. A., de Oliveira Cruz, R. S. & Caputo, F. 2015 Interval training in the boundaries of severe domain: effects on aerobic parameters. *European Journal of Applied Physiology*, 116 (1), 161–169, URL <https://doi.org/10.1007/s00421-015-3263-0>.
- Van Sickle Jr, J. & Hul, M. 2007 Is economy of competitive cyclists affected by the anterior–posterior foot position on the pedal? *Journal of Biomechanics*, 40, 1262–1267.
- Vanhatalo, A., Poole, D., DiMenna, F., Bailey, S. & Jones, A. 2010 Muscle fiber recruitment and the slow component of o₂ uptake: constant work rate vs. all-out sprint exercise. *AJP: Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, 300 (3), R700–R707, URL <https://doi.org/10.1152/ajpregu.00761.2010>.
- Vikmoen, O., Ellefsen, S., Ø. Trøen, I. H., Hanestadhaugen, M. & T. Raastad, B. R. 2016 Strength training improves cycling performance, fractional utilization of vo₂max and

- cycling economy in female cyclists. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 26, 384–396.
- Wagenmakers, A. 1998 Protein and amino acid metabolism in human muscle. *Advances in Experimental Medicine and Biology*, 441, 307–319.
- Waldron, M., Highton, J. & Gray, A. 2016 Effects of familiarization on reliability of muscle-activation and gross efficiency in adolescents and adults. *Cogent Medicine*, 3 (1), URL <https://doi.org/10.1080/2331205x.2016.1237606>.
- Weiss, J. 1997 The hill equation revisited: uses and misuses. *The FASEB Journal*, 11, 835–841.
- Wells, R., Morrissey, M. & Hughson, R. 1986 Internal work and physiological responses during concentric and eccentric cycle ergometry. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 55, 295–301.
- Whipp, B. 1994 The slow component of o₂ uptake kinetics during heavy exercise. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 26 (11), 1319–1326.
- Yong, A. G. & Pearce, S. 2013 A beginner's guide to factor analysis: Focusing on exploratory factor analysis. *Tutorials in Quantitative Methods for Psychology*, 9 (2), 79–94, URL <https://doi.org/10.20982/tqmp.09.2.p079>.
- Zameziati, K., Mornieux, G., Rouffet, D. & Belli, A. 2006 Relationship between the increase of effectiveness indexes and the increase of muscular efficiency with cycling power. *European Journal of Applied Physiology*, 96, 274–281.
- Zurlo, F., Larson, K., Bogardus, C. & Ravussin, E. 1990 Skeletal muscle metabolism is a major determinant of resting energy expenditure. *The Journal of Clinical Investigation*, 86, 1423–1427.