

**Esko Niinimäki**

**Aerobisen ja anaerobisen kynnyksen määrittäminen  
laskennallisesti juoksumattotestidatasta**

Tietotekniikan pro gradu -tutkielma

19. joulukuuta 2017

Jyväskylän yliopisto

Informaatioteknologian tiedekunta

**Tekijä:** Esko Niinimäki

**Yhteystiedot:** eskaniin@student.jyu.fi

**Ohjaajat:** Sami Äyrämö, Juha Ahtiainen ja Ari Nummela

**Työn nimi:** Aerobisen ja anaerobisen kynnyksen määrittäminen laskennallisesti juoksumat-totestidatasta

**Title in English:** Determining Aerobic and anaerobic threshold computationally from tread-mill test data

**Työ:** Pro gradu -tutkielma

**Suuntautumisvaihtoehto:** Data-analyysi/laskennalliset tieteet

**Sivumäärä:** 90+0

**Tiivistelmä:** Kunto- ja urheilutestauksessa halutaan usein selvittää henkilön aerobinen ja anaerobinen kynnyksen. Kynnykset voidaan jakaa määrittämisessä käytettyjen muuttujien mukaan ventilaatio- ja laktaattikynnyksiin. Kynnykset ilmiönä ovat kiistanalaisia ja haasteellisia. Täs-sä tutkimuksessa tarkasteltiin kirjallisuudesta löytyviä aerobisen ja anaerobisen kynnyksen määrittämenetelmiä ja niiden soveltuvuutta suomalaisen kuntotestausprotokollaan. Tutki-muksessa testattiin 12 kynnysmäärittämenetelmää, joista yksi oli kirjallisuudesta löytynyt, kahdeksan oli löytyneistä jatkokehitettyjä ja kolme uusia menetelmiä. Parhaat menetelmät saivat parempia tuloksia kuin kirjallisuudesta löytyneet tulokset.

**Avainsanat:** aerobinen kynnyksen, anaerobinen kynnyksen, data-analyysi, laskennalliset menetel-mät

**Abstract:** In sports and recreational exercise testing it is often desirable to find out one's aerobic and anaerobic threshold. The thresholds can be divided into ventilation and lactate thresholds by variables used in determination. Thresholds as phenomena are controversial and challenging. In this thesis I examined methods found in literature for detecting aerobic and anaerobic thresholds and the method's applicability for the Finnish protocol of exercise testing. In the study I tested 12 threshold methods of which one was found in the literature,

eight were further developed and three were new methods. The best methods achieved better results than the results that were found in the literature.

**Keywords:** L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X, gradu3, Master's Theses, Bachelor's Theses, user's guide

## Termiluettelo

$O_2$	Happi
$CO_2$	Hiilidioksidi
$VO_2$	Hapenotto: hapen kulutus aikayksikköä kohden. Mitataan litroina minuutissa.
$VCO_2$	Hiilidioksin tuotto aikayksikköä kohden. Mitataan litroina minuutissa.
$VO_{2max}$	Maksimaalinen hapenottokyky. Mitataan litroina minuutissa.
$PET_{O_2}$	<i>End-tidal tensions of oxygen</i> , hapen osapaine uloshengityksen lopussa
$PET_{CO_2}$	<i>End-tidal tensions of carbon dioxide</i> , hiilidioksidin osapaine uloshengityksen lopussa
$True_{O_2}$	hengityssyklin aikainen hapenkulutuksen osuus
VE	Ventilaatio, keuhkotuuletus: yhden minuutin aikana hengityselimissä käyneen ilman tilavuus
RER	<i>Respiratory exchange ratio</i> , tuotetun hiilidioksidin ja kulutetun hapen suhde: $VCO_2/VO_2$
$EQ_{O_2}$	Ventilaation ja hapenkulutuksen suhde: $VE/CO_2$
$EQ_{CO_2}$	Ventilaation ja hiilidioksidintuoton suhde: $VE/VCO_2$
Aerobinen	Hapen avulla tapahtuva. Esimerkiksi aerobinen energiantuottotapa.
Anaerobinen	Ilman happea tapahtuva. Esimerkiksi anaerobinen energiantuottotapa.
laktaatti	Anaerobisen energiantuoton lopputuote
MLSS	<i>Maximal lactate steady state</i> , suurin raskustaso, jolla veren laktaattitaso ei jatkuvasti nouse raskuuden aikana.
Glukoosi	Anaerobisen energiantuoton alkutuote
Glykogeeni	Glukoosista rakentuva hiilihydraatin varastomuoto lihaksissa
$\ f\ $	Euklidinen normi (etäisyys)
Datapilvi	Havaintopisteiden muodostama yhtenäinen joukko koordinaa-

tistossa

## Kuviot

Kuvio 1. Energiantuottoreitit.....	4
Kuvio 2. V-slope-menetelmä .....	16
Kuvio 3. Breakpoint-menetelmä .....	17
Kuvio 4. $D_{max}$ -menetelmä hengityskaasudatalle .....	19
Kuvio 5. Esimerkki aerobisen laktaattikynnyksen määrittämisestä .....	25
Kuvio 6. Log-log-menetelmä .....	26
Kuvio 7. LT4-menetelmä .....	27
Kuvio 8. $D_{max}$ ja $D_{mod}$ menetelmät laktaattimittauksille .....	29
Kuvio 9. $D^2L_{max}$ -menetelmä .....	30
Kuvio 10. $\frac{VCO_2}{VO_2}$ :n muutos testin aikana .....	35
Kuvio 11. Ensimmäisen minuutin poiston vaikutus ( $VO_2, VCO_2$ )-datapilveen .....	36
Kuvio 12. Muuttujien keskiarvoistuksen vaikutus ( $VO_2, VCO_2$ )-datapilveen.....	37
Kuvio 13. Ventilaation muutokset testin aikana.....	38
Kuvio 14. Kynnysten siirto koordinaatistoa toiseen .....	39
Kuvio 15. S:n muotoinen datapilvi .....	40
Kuvio 16. V-slope ei aina toimi tarkoituksenmukaisesti .....	41
Kuvio 17. Kolmannen asteen polynomisovite laktaattimittauksiin .....	43
Kuvio 18. EkspONENTTIFUNKTIOSOVITE laktaattimittauksiin .....	44
Kuvio 19. EkspONENTTIFUNKTIOSOVITE laktaattimittauksiin .....	45
Kuvio 20. $D^2l_{max}$ ei aina toimi tarkoituksenmukaisesti .....	57
Kuvio 21. Epälineaarisia sovitteita yhdistettyihin laktaattimittauksiin .....	58
Kuvio 22. Klab-ohjelman laktaattikynnykset .....	59
Kuvio 23. Klab-ohjelman aerobinen kynnys hengityskaasumuuttujista .....	60
Kuvio 24. Klab-ohjelman anaerobinen kynnys hengityskaasumuuttujista .....	60
Kuvio 25. $D_{mod}$ yliarvioi KlabAnKia vähemmän kuin $D_{exp}$ .....	63
Kuvio 26. Vaikea VT1:n määrittäminen .....	66
Kuvio 27. Vaikea VT2:n määrittäminen .....	67
Kuvio 28. Rajatun Vsplinin VT2-määrittäminen .....	68
Kuvio 29. Polynomisovite ( $VCO_2, VE$ )-pilveen .....	69
Kuvio 30. Keskiarvoistus muokkaa pilven ulkoasua .....	70
Kuvio 31. RER-arvo testin edetessä eri koehenkilöillä .....	72

## Taulukot

Taulukko 1. AerK:ksi luokitellut laktaattikynnykset (Faude, Kindermann ja Meyer 2009)	24
Taulukko 2. AnK:ksi luokitellut laktaattikynnykset (Faude, Kindermann ja Meyer 2009)	28
Taulukko 3. Arvojen poistomäärän vaikutus Vsplinin AnK:een .....	50
Taulukko 4. Arvojen poistomäärän vaikutus VslopeMaxin AnK:een.....	52
Taulukko 5. Arvojen poistomäärän vaikutus Vsplinin AerK:een .....	52
Taulukko 6. Arvojen poistomäärän vaikutus VslopeMaxin AerK:een .....	52

Taulukko 7. Epäonnistuneet ventilaatiokynnysmääritykset .....	52
Taulukko 8. Ventilaatiomenetelmien anaerobisen kynnyksen korrelaatiot .....	53
Taulukko 9. Ventilaatiomenetelmien anaerobisen kynnyksen korrelaatiot 2 .....	53
Taulukko 10. Ventilaatiomenetelmien aerobisen kynnyksen korrelaatiot.....	54
Taulukko 11. Ventilaatiomenetelmien aerobisen kynnyksen korrelaatiot 2.....	54
Taulukko 12. T-testin tulokset anaerobiselle ventilaatiokynnykselle.....	55
Taulukko 13. T-testin tulokset aerobiselle ventilaatiokynnykselle .....	57
Taulukko 14. Laktaattimenetelmien anaerobisen kynnyksen korrelaatiot .....	58
Taulukko 15. T-testin tulokset anaerobiselle laktaattikynnykselle .....	59
Taulukko 16. Laktaattimenetelmien anaerobisen kynnyksen laktaattitason korrelaatiot....	59

# Sisältö

1	JOHDANTO .....	1
2	KYNNYKSET JA NIIDEN MÄÄRITTÄMINEN .....	3
2.1	Aerobinen ja anaerobinen kynnys, laktaatti- ja ventilaatiokynnys .....	3
2.2	Kynnysten fysiologiaa .....	6
2.3	Kynnysten määrittäminen – tai arvioiminen .....	10
3	LASKENNALLISISTA MÄÄRITYSMENETELMISTÄ .....	13
3.1	Ventilaatiokynnysmenetelmät .....	14
3.2	Ventilaatiokynnysmenetelmien tuloksia .....	20
3.3	Laktaattikynnysmenetelmät .....	23
4	LASKENNALLISTEN MENETELMIEN TESTAAMINEN SUOMALAISEL- LA KUNTOTESTIAINEISTOLLA .....	32
4.1	Aineisto .....	32
4.2	Aineiston ominaispiirteet .....	33
4.3	Nykyisten menetelmien ongelmia ja mahdollisia ratkaisuja .....	35
4.4	Verrokkimenetelmät .....	46
4.5	Testatut menetelmät .....	46
4.5.1	Ventilaatiokynnysmenetelmät .....	47
4.5.2	Laktaattikynnysmenetelmät .....	48
4.6	Tulokset .....	50
4.6.1	Ventilaatiokynnykset .....	50
4.6.2	Laktaattikynnykset .....	56
5	POHDINTA .....	61
5.1	Menetelmien tarkkuudet .....	62
5.2	Pienimpien ja suurimpien havaintopisteiden poistomäärä .....	64
5.3	Haastavat kynnysmääritystestidatat .....	65
5.4	Pilvet ja sovitteet .....	68
5.5	RER-arvon potentiaalista .....	71
5.6	Verrokkimenetelmät ja menetelmien validointi .....	72
6	YHTEENVETO .....	75
	LÄHTEET .....	76



# 1 Johdanto

Tässä tutkimuksessa tarkastellaan kirjallisuudesta löytyviä aerobisen ja anaerobisen kynnyksen määrittämenetelmiä ja niiden soveltuvuutta suomalaiseen kuntotestausprotokollaan. Löydettyjä menetelmiä jatkokehitetään erityisesti suomalainen testausprotokolla silmällä pitäen. Lisäksi menetelmien tarkkuuksia verrataan suhteessa asiantuntijan määrittämiin kynnysarvoihin.

Kunto- ja urheilutestauksessa halutaan usein selvittää henkilön pitkäaikaista kestävyyttä kuvaavat aerobinen ja anaerobinen kynnys, sillä niitä käytetään valmennuksessa sopivan kuormitustehon arvioimiseen ja määräämiseen. Suomessa aerobisen kynnyksen alapuolista tehoaluetta kutsutaan peruskestävyysalueeksi, aerobisen ja anaerobisen kynnyksen välistä tehoaluetta vauhtikestävyysalueeksi ja anaerobisen kynnyksen sekä maksimimaalista hapenottokykyä vastaavan tehon välistä tehoaluetta maksimikestävyysalueeksi. Kestävyysharjoituksen rasitus pyritään yleensä pitämään tietyllä tehoalueella tai -kynnyksellä halutun harjoitusvaikutuksen aikaansaamiseksi. Kynnysmäärittämiä käytetään myös kliinisessä työssä potilaan aerobisen suorituskyvyn arvioimiseen. (Kari L. Keskinen 2010, ss. 51–52; 76–77; 116–117; Hopker, Jobson ja Pandit 2011)

Kynnysten luotettava määrittäminen on epäkäytännöllisen työlästä, joten ne yleensä määritetään nousevan kuorman testillä (Leti ym. 2012). Kynnykset määrittää (ainakin) Suomessa yleensä testaaja eri kriteerien täyttymisen silmämääräisen arvion pohjalta (Kari L. Keskinen 2010, ss. 65–67), ja tämän subjektiivisen luonteensa vuoksi testin luotettavuus ja toistettavuus kärsii. Erityisesti eri testaajat saattavat määrittää kynnyksen eri paikkaan (esim. Beaver, Wasserman ja Whipp 1986), joten eri määrittämisjärjestelmien ja -paikkojen tuloksia on vaikea verrata. Koska muutokset kuntotekijöissä ovat testikertojen välillä etenkin urheilijoilla usein pieniä (Kari L. Keskinen 2010, s. 65), ei eri testaajien määrittämiä kynnyksiä kannata verrata välttämättä ollenkaan.

Toistettavuusongelma ja eri testaajien välisen vaihtelun ongelma voidaan poistaa laskennallisella määrittämisellä, sillä se on objektiivista. Haasteena on kehittää mahdollisimman luotettava ja tarkka määrittämenetelmä, sillä kynnyksiin liittyy useita fysiologisia ilmiöitä, joi-

den mekanismit eivät välttämättä kaikilta osin ole selviä (Myers ja Ashley 1997; Svedahl ja MacIntosh 2003; Péronnet ja Aguilaniu 2006; Whipp 2007). Toinen ongelma on testausprotokollan vaikutus mitattaviin muuttujiin, eli esimerkiksi kuormitusportaan pituuden vaikutus sitä vastaavaan laktaattitasoon (Bentley, Newell ja Bishop 2007).

Määrittymenetelmissä on myös muita ongelmia. Kynnyksiä voidaan määrittää nousevan kuorman testin aikaisista laktaatti- ja hengityskaasumittauksista, mutta eri muuttujien käyttö saattaa johtaa eri tuloksiin (Meyer ym. 2005; Whipp 2007; Wisén ja Wohlfart 2004). Kynnys ilmiönä on kiistanalainen, ja kuvaavampi termi saattaisikin olla siirtymä (Faude, Kindermann ja Meyer 2009; Meyer ym. 2005). Testimenetelmien määritelmät saattavat olla tulkinnanvaraisia ja vaihdella jonkin verran, eikä esimerkiksi anaerobisen kynnyksen kultaisen standardin mukaisessa testissäkään – tasavauhtisessa pitkäkestoisessa rasituksessa eri kuormituksilla – käytettävä kynnyskriteeri välttämättä ole aina sama (Aunola ja Rusko 1992; Svedahl ja MacIntosh 2003; Faude, Kindermann ja Meyer 2009). Determinististen laskennallisten menetelmien kehittämisessä myös menetelmän käyttämät kriteerit tulee (ja voidaan) asettaa täsmällisesti.

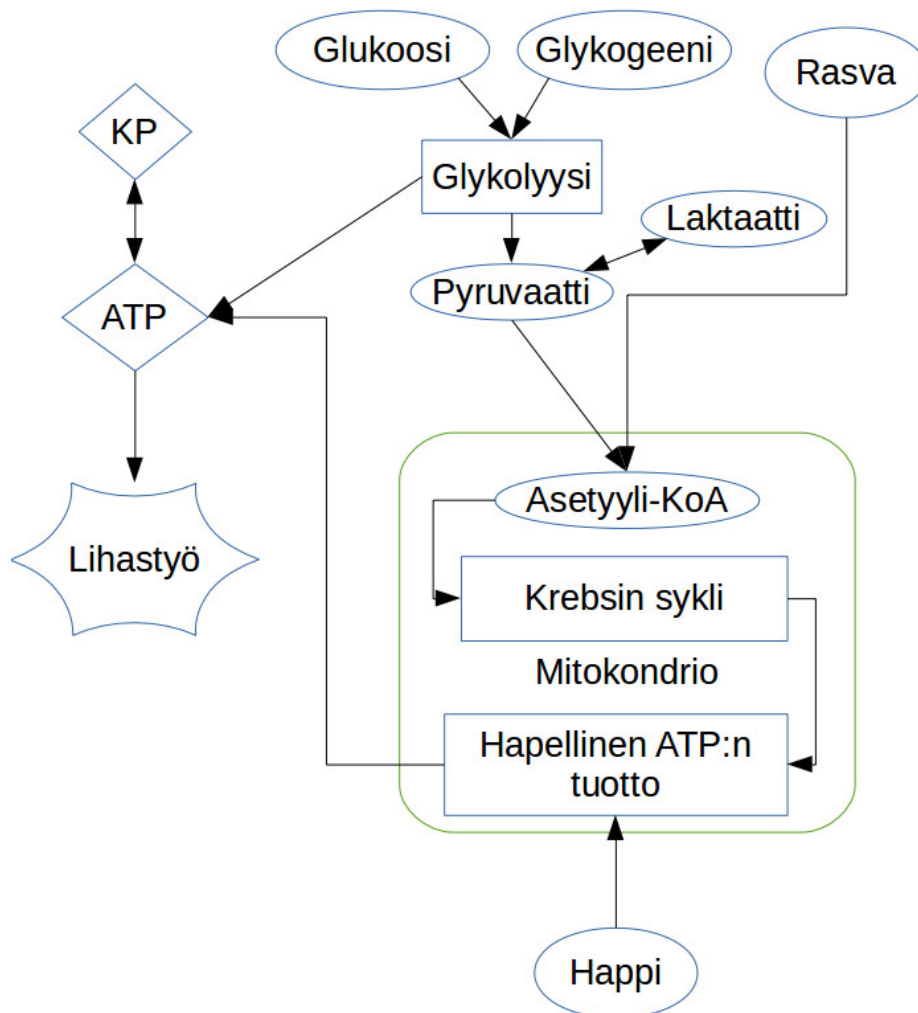
Luvussa 2 avataan, mitä aerobinen ja anaerobinen kynnys termeinä ja ilmiöinä pitävät sisällään. Lisäksi kuvataan, millaisiin elimistön tilan muutoksiin yleisimmät kynnysmäärittymenetelmät perustuvat, ja miten kynnykset voidaan näiden ilmiöiden mittaamisen avulla määrittää. Luvussa 3 kuvataan kirjallisuudesta löytyneitä laskennallisia määrittymenetelmiä. Menetelmien kuvauksissa keskitytään algoritmien toimintaan, mutta tarvittavilta osin on viitattu myös menetelmien fysiologisiin perusteisiin tai kuvattu niitä lyhyesti. Luvussa 4 tarkastellaan kirjallisuudesta löydettyjen menetelmien soveltuvuutta suomalaiseen kuntotestausprotokollaan, ja testataan valittuja menetelmiä suhteessa asiantuntijaan.

## 2 Kynnykset ja niiden määrittäminen

Ihminen voi tuottaa energiaa liikkumiseen aerobisesti (hapen avulla) tai anaerobisesti (ilman happea) (kuvio 1). Käytännössä lähes kaikki energia tuotetaan hiilihydraateista ja rasvoista. Vaikka lihas voi tuottaa energiaa myös valkuaisaineista, niiden merkitys on niin vähäinen, ettei sitä yleensä kuntotestauksen yhteydessä huomioida. Rasvojen käyttö vaatii happea, ja sen suhteellinen osuus on sitä vähäisempää, mitä kovemmalla teholla lihakset työskentelevät. Rasvojen absoluuttinen energiantuottonoteho on korkeimmillaan, kun kuormitusteho on noin 65 %  $VO_{2max}$ :sta. Hiilihydraateista, siis lihaksen glykogeenista ja veren glukoosista, energiaa voidaan tuottaa sekä aerobisesti että anaerobisesti. Aerobista energiantuottoa rajoittaa erityisesti hapen saatavuus. Jos lihaksen energiankulutus ylittää (sen hetkisen) aerobisen energiantuottokapasiteetin, on loppuenergia tuotettava anaerobisesti. Anaerobisvaltaisen energiantuoton ja -käytön yhteydessä syntyy muun muassa laktaattia ja happamuuden aiheuttavia vetyioneja (protoneja). Anaerobisvaltaista energiantuottoa voi ylläpitää vain ver-raten lyhyen ajan. Anaerobisen energiantuoton lopputuote pyruvaatti on käytännössä aerobisen hiilihydraattien energiantuottojärjestelmän alkutuote. Aerobista energiantuottoa varten sekä rasvahapot että pyruvaatti muutetaan Asetyylikoentsyymi-Aksi, joka siirtyy Krebsin sykliksi nimettyyn reaktiosarjaan. Ylimääräinen pyruvaatti on laktaatin alkutuote. (Achten, Gleeson ja Jeukendrup 2002; Kari L. Keskinen 2010; McArdle, Katch ja Katch 2010)

### 2.1 Aerobinen ja anaerobinen kynnys, laktaatti- ja ventilaatiokynnys

Aerobinen kynnys (AerK) määritellään Suomessa suurimmaksi kuormitustehoksi, jolla veren laktaattikonsentraatio ei nouse yli lepotason (Kari L. Keskinen 2010, s. 52). Verinäyt-teestä voi mitata laktaattikonsentraation, mutta tiedetään myös, että kudosten happamuuden nousussa uloshengitysilman hiilidioksidipitoisuus kasvaa veren ja keuhkojen puskurointi-mekanismin myötä (Péronnet ja Aguilaniu 2006; Whipp 2007). Harjoittelussa yleisesti käytetyn ns. peruskestävyysalueen yläraja on aerobinen kynnys. Valtaosa kestävyysharjoittelusta suositellaan yleisesti tehtäväksi peruskestävyysalueella sekä kestävyysurheilijoille että kun-toilijoille.



Kuvio 1. Yksinkertaistettu kuvio energiantuottoreiteistä. Nuoli on kaksisuuntainen, jos reaktiota tapahtuu merkittävästi molempiin suuntiin. Mitokondrio on isompi pyöreäkulmainen laatikko (rajattu vihreällä). Soikiot = lähtöaineita ja välituotteita, Suorakulmiot = reaktioita; Asetyyli-KoA = Asetyylikoentsyymi-A, ATP = (lihas)solun varsinainen energianlähde, KP = Kreatiinifosfaatti, jota voidaan ajatella puskurina energiantuoton ja -kulutuksen lyhyissä epätasapainotilanteissa. KP ei ole oleellinen tekijä kestävyysuorituskyvyssä.

Anaerobinen kynnys määritellään suurimmaksi tehoksi, jota ylläpidettäessä elimistöön ei kasaudu laktaattia, eli laktaatin tuotto ja poisto ovat tasapainossa (Svedahl ja MacIntosh 2003). Elimistöstä voidaan mitata anaerobista kynnystä käytännössä vastaava maksimaalinen tasainen laktaattiarvo (MLSS, *maximal lactate steady state*), joka on suurin teho, jota ylläpidettäessä *vereen* ei kasaudu laktaattia. MLSS:n kanssa yhtenevän kuormitustason pitäisi olla respiratorinen (hengityksellinen) kompensatiopiste (Kari L. Keskinen 2010, s. 52). Se on suurin raskustaso, jolla hengitys ei kiihdy hiilidioksidin tuottoon verrattuna (Meyer ym. 2005). Niinpä MLSS:n voi mitata laktaattikonsentraatiosta tai hengityskaasumuuttujista (Aunola ja Rusko 1992). Anaerobista kynnystä suuremmilla kuormilla ihminen jaksaa tehdä työtä yleensä joitain minutteja tai kymmeniä minutteja, ja anaerobista kynnystä vastaava raskustaso onkin kestävyysurheilussa tärkeä menestystä selittävä tekijä (Billat ym. 2003; Kari L. Keskinen 2010, s. 76). Anaerobinen kynnysteho voi henkilöstä riippuen olla esimerkiksi 65–90 % urheilijan  $VO_{2max}$ :sta (Kari L. Keskinen 2010, s. 76).

Tarkalleen ottaen anaerobinen kynnys ei välttämättä aina ole sama kuin MLSS, vaikka niitä käytetäänkin synonyymeinä (Svedahl ja MacIntosh 2003; Faude, Kindermann ja Meyer 2009; Kari L. Keskinen 2010, s. 52). Mikäli laktaattia kasautuu lihaksiin (ts. muualle kuin vereen), AnK ja MLSS eivät tällöin ole yhteneviä, mutta käytännössä tällaista tilannetta ei pitäisi syntyä. (Svedahl ja MacIntosh 2003)

Kuten luvussa 2.2 nähdään, saattaa kuitenkin olla tarpeen erottaa laktaatti- ja ventilaatiokynnykset toisistaan (Myers ja Ashley 1997; Hopker, Jobson ja Pandit 2011). Erikseen kynnyksistä puhuttaessa laktaattikynnyksillä (LT) viitataan laktaattiarvoista määritettyihin aerobiseen (LT1) sekä anaerobiseen kynnykseen (LT2) ja ventilaatiokynnyksillä (VT) hengityskaasumittausten avulla määritettyihin aerobiseen (VT1) ja anaerobiseen kynnykseen (VT2) (esim. Kari L. Keskinen 2010, s. 52; ks. myös Meyer ym. 2005, ja; Faude, Kindermann ja Meyer 2009). Pääosin käytän kuitenkin tässä työssä termejä aerobinen ja anaerobinen kynnys, sillä suomalaisessa urheiluvalmennuksessa ja -testauksessa ne ovat vielä toistaiseksi hengitys- ja laktaattikynnysten yhdistelmiä (ks. suomalaiset määrittämissä luvusta 2.3) (Kari L. Keskinen 2010, s. 52).

Englanninkielisessä kirjallisuudessa aerobista kynnystä, tai lähinnä sitä vastaavaa kynnystä, voidaan kutsua ainakin termeillä 'aerobic threshold' (AerT), 'anaerobic threshold' (AnT)

ja 'lactate threshold' (LT) (Faude, Kindermann ja Meyer 2009). Anaerobista kynnystä vastaavaa kynnystä puolestaan voidaan kutsua ainakin termeillä 'anaerobic threshold' (AnT), 'maximal lactate steady state' (MLSS) ja 'onset of blood lactate accumulation' (OBLA) (Faude, Kindermann ja Meyer 2009; Bentley, Newell ja Bishop 2007). Hengityskaasuista määritetyille kynnyksille on osittain omat nimet: aerobiseen kynnukseen saatetaan viitata termillä 'ventilatory threshold' (VT) tai 'ventilatory threshold 1' (VT1) ja anaerobiseen kynnukseen termillä 'respiratory compensation point' (RC tai RCP) tai 'ventilatory threshold 2' (VT2) (Meyer ym. 2005). Nimeämiskäytäntö on siis varsin kirjavaa, ja etenkin termin 'anaerobic threshold' kohdalla tulee olla tarkkana, sillä sen merkitys on selvitettävä kontekstista.

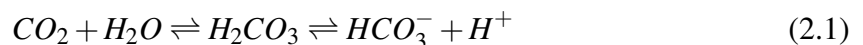
## **2.2 Kynnysten fysiologiaa**

Laktaatti syntyy suoraan anaerobisessa glykolyysissa, jossa pyruvaatti ei jatka mitokondrioon, vaan se muutetaan laktaatiksi. Ylimääräinen laktaatti siirtyy lihassolusta vereen, josta sen voi ottaa käyttöön muut (erityisesti viereiset) lihassolut tai muut elimet kuten sydän, ja muuttaa takaisin pyruvaatiksi aerobisen energiantuottojärjestelmän lähtöaineeksi. Näin ollen veren laktaattipitoisuuteen vaikuttaa sinne tulevan ja sieltä poistuvan laktaatin määrä. Veressä on myös mm. punasolujen energiantuotosta johtuen jatkuvasti jonkin verran laktaattia. (McArdle, Katch ja Katch 2010)

Lihassolun laktaatin tuotto suhteessa pyruvaatin tuottoon riippuu puolestaan suoraan anaerobisen ja aerobisen glykolyysin välisestä suhteesta, mutta tähän suhteeseen vaikuttavat tekijät eivät ole välttämättä selviä. Perinteisen selityksen mukaan (paikallinen) hapenpuute selittää anaerobisen energiantuoton määrän: energiankulutuksen ja aerobisen energiantuoton välinen erotus korvataan anaerobisella glykolyysillä. Nykyään kuitenkin tiedetään radioaktiivisen hiili-isotoopin seurantamenetelmän ansiosta, että laktaattia tuotetaan ja poistetaan jatkuvasti sekä levossa että rasituksessa. Teorian mukaan tämä laktaatin kiertonopeus voi vaihdella yksilöillä. Myös lihassolutyypillä saattaa olla vaikutusta: niin sanotut nopeat lihassolut, joiden käyttöosuus kasvaa kuormituksen kasvaessa, eivät välttämättä kykene tuottamaan suurta osaa energiasta aerobisesti, mutta hitaat lihassolut pystyvät. Nopeiden ja hitaiden lihassolujen suhteellinen lukumäärä ja koko vaihtelevat yksilöittäin ja lihasryhmittäin. Lisäksi adrenaliinin, noradrenaliinin ja katekoliamiinien on havaittu olevan yhteydessä lak-

taattitasoon. Joka tapauksessa, nykykäsityksen mukaan energiantuottoon ja -käyttöön liittyvät biokemiallisten reaktioiden (väli)tuotteet aktivoivat ja estävät biokemiallisia reaktioita katalysoivia entsyymejä eri kohdissa reaktiosarjoja, ja energiantuottojärjestelmien absoluuttiset ja suhteelliset osuudet riippuvat tästä vuorovaikutusten verkostosta. (McArdle, Katch ja Katch 2010; Myers ja Ashley 1997; Svedahl ja MacIntosh 2003; Hopker, Jobson ja Pandit 2011)

Vaikka laktaatintuotto liittyynkin vahvasti veren hiilidioksidi- ja happamuustasoon, ei laktaatin ja hengityskaasujen väliset suhteet välttämättä ole niin suoraviivaisia, että ne kuvastaisivat samoja elimistön ilmiöitä. Hengityskaasuista mitattu aerobinen kynnyks (VT1) perustuu usein näkemykseen, jossa veren bikarbonaatti ( $HCO_3^-$ ) puskuroi anaerobisen glykolyysin tuottaman happamuuden (protonit), minkä vuoksi vereen kertyy hiilidioksidia seuraavan tasapainoreaktion mukaisesti (Wasserman, Beaver ja Whipp 1990; McArdle, Katch ja Katch 2010):



Tasapainoreaktiossa yhdisteiden suhteelliset osuudet pyrkivät tasapainoon, eli esimerkiksi  $H^+$ :n lisääminen vähentää  $HCO_3^-$ :n määrää ja lisää  $H_2CO_3$ :n  $CO_2$ :n ja  $H_2O$ :n määrää. Näkemyksen mukaan hiilidioksidi ja protonit stimuloivat (voimistavat) keuhkotuuletusta, mikä vapauttaa ylimääräisen hiilidioksidin uloshengitysilmaan. Tämän seurauksena  $\frac{VE}{VO_2}$ -suhde kasvaa, mutta  $\frac{VE}{VCO_2}$ -suhde pysyy vakiona. Sittenmin on kuitenkin havaittu, että ventilaatio rasituksessa reagoi herkästi moniin muihinkin tekijöihin: jänteistä ja lihaksista tuleviin hermosignaaleihin, aivojen rasitukseen liittyviin toimintoihin ja keuhkoreseptoreihin (McArdle, Katch ja Katch 2010; Hopker, Jobson ja Pandit 2011). Näiden veren happamuuteen suoraan liittymättömien ventilaation muutosten vuoksi VT1:n havaitsemiseen käytetään nykyään usein mieluummin hiilidioksidin tuoton ja hapenkulutuksen välistä suhdetta ( $\frac{VCO_2}{VO_2}$ ) (Beaver, Wasserman ja Whipp 1986; Wasserman, Beaver ja Whipp 1990; Meyer ym. 2005). Elimistössä on kuitenkin muitakin happamuuden puskurointimekanismeja, minkä vuoksi VT1 ei välttämättä asetu samalle tasolle aerobisen laktaattikynnyksen kanssa (Whipp 2007). Hengityskaasuista mitatun anaerobisen kynnyksen (VT2) pitäisi asettua tasolle, jossa elimistön happamoitumisen vuoksi ventilaatio kiihtyy siinä määrin, että (valtimo)veren hiilidioksidiosapaine laskee aiempaa alemmalle tasolle, mikä vähentää protonien (ja  $HCO_3^-$ :n) määrää

veressä (Beaver, Wasserman ja Whipp 1986; Wasserman, Beaver ja Whipp 1990). Tämän vuoksi räsitus-tasoa nimitetään myös respiratoriseksi kompensatiopisteeksi (eng. *respiratory compensation point* eli RC) ja se näkyy  $\frac{VE}{VCO_2}$ -suhteen kasvamisena (Meyer ym. 2005).

Edellä esitetty näkemys on kuitenkin kohdannut kritiikkiä (Péronnet ja Aguilaniu 2006). Anaerobiseen glykolyysiin liittyvän happamoitumisen on esitetty myös johtuvan ATP:n käytöstä energiaksi – anaerobinen glykolyysi itsessään olisikin käytännössä neutraali reaktio (Robergs, Ghiasvand ja Parker 2004). Laktaatti siirtyy vereen eri tavalla kuin  $\frac{VCO_2}{VO_2}$ -suhdetta käyttävät (ensimmäiset) kynnysmääritysmenetelmien kehittäjät uskoivat (Péronnet ja Aguilaniu 2006). Eri puskurointimekanismien keskinäisestä merkittävyyydestä on esitetty eri näkemyksiä, eikä veren bikarbonaattitaso näin ollen ole välttämättä laktaattitason peilikuva, kuten Wasserman, Beaver ja Whipp (1990) on väittänyt, vaan  $HCO_3^-$  saattaa olla huomattavasti pienemmässä puskurointiroolissa (Sahlin 1980; Péronnet ja Aguilaniu 2006). Veren happamuustason ja ventilaation syy-seuraussuhteesta ei myöskään ole päästy yksimielisyyteen etenkin kynnysten tyypillisissä testiolosuhteissa (Péronnet ja Aguilaniu 2006; McArdle, Katch ja Katch 2010). Keskustelua aiheesta on käyty melko runsaasti (Wasserman ja Koike 1992; Myers ja Ashley 1997; Hopker, Jobson ja Pandit 2011; Whipp ja Ward 2011).

Vaikka käsitykset kynnyksiin liittyvistä fysiologisista ilmiöistä ovat muuttuneet ja niistä on edelleen kiistaa, saattavat hengityskaasumenetelmät silti mitata fysiologisen tilan muuttumista kuntotestauksen näkökulmasta mielekkäästi. Péronnet ja Aguilaniu (2006) kirjoittavat, että pH:n laskun ja hyperventilaation aiheuttaman  $VCO_2$ :n kasvun mekanismi VT1:n yläpuolisella räsitus-tasolla ymmärretään hyvin, ja se käsittää kaksi samanaikaista ilmiötä:

1. Anaerobiseen energiantuottoon ja -käyttöön liittyvä happamuus siirtyy vereen laktaatin kanssa samaan tahtiin.  $HCO_3^-$  osallistuu kohonneen veren happamuustason puskurointiin ja reaktiossa syntyvä  $CO_2$  vapautuu uloshengitysilmaan.
2. Keuhkotuuletus kiihtyy, ja kiihtynyt ventilaatio tehostaa hiilidioksidin siirtymistä verestä hengitysilmaan.

VT2:n osalta puolestaan Péronnet ja Aguilaniu (2006) esittävät, että kynnysmäärityksen yhteydessä havaittava  $\frac{VE}{VCO_2}$ -suhteen kasvu heijastaa elimistön hiilidioksidivarastojen (jotka eivät riipu räsituksen aikaisesta energiantuotosta) ehtymistä ja elimistön kykenemättömyyttä



vapauttaa hiilidioksidia bikarbonaatista, huolimatta alhaisesta pH:sta ja keuhkorakkuloiden hiilidioksidiosapaineesta.

Meyer ym. (2005) ovat tarkastelleet kynnyksen välisiä suhteita ja heidän mukaansa vaikuttaa siltä, että VT2 saattaa yliarvioida MLSS:ää. Sen sijaan VT1 ja veren laktaattista määritetty AerK eivät tarkastelun mukaan eroa toisistaan. Tietyissä sairauksissa tai erikoistilanteissa (McArdlen tauti, keuhkojen vajaatoiminta) kynnykset voivat käyttäytyä eri tavalla, mutta tässä tutkielmassa keskitytään vain terveiden määrittelyyn (Wasserman, Beaver ja Whipp 1990; Myers ja Ashley 1997).

Itse asiassa myös kynnys terminä on jossain määrin kyseenalainen (Myers ja Ashley 1997; Noakes 2004, ss. 158–159; Hopker, Jobson ja Pandit 2011), ja jotkut tutkijat puhuvatkin mieluummin siirtymästä (Faude, Kindermann ja Meyer 2009; Meyer ym. 2005). Esimerkiksi yksittäisen lihaksen tasolla eri energiamuotojen käyttösuhteet ovat liukuvat, ja toisaalta osa lihaksista saattaa samaan aikaan tuottaa laktaattia vereen, kun toiset kuluttavat sitä (Svedahl ja MacIntosh 2003; McArdle, Katch ja Katch 2010; Hopker, Jobson ja Pandit 2011). Riittävän matalilla kuormilla laktaattipitoisuus ei kuitenkaan vaikuttaisi kohoavan lepotasoa korkeammalle ja saattaa jopa laskea hieman sitä alemmalle tasolle, joten ainakin teknisesti voidaan määritellä rasiustasolle laktaattiin perustuva kynnyisarvo ja nimetä se aerobiseksi (laktaatti)kynnykseksi (Wasserman, Beaver ja Whipp 1990; Wasserman ja Koike 1992). Myös tämän luvun alkuosassa mainitun määritelmän mukainen anaerobinen kynnys on välttämättä olemassa (Myers ja Ashley 1997), sillä määritelmä itsessään ei ota kantaa esimerkiksi kynnyksen löytämisen haasteisiin tai sen mahdolliseen tilannekohtaisuuteen. Joka tapauksessa oikeanlaisesta termistä on käyty vilkastakin keskustelua (Myers ja Ashley 1997; Hopker, Jobson ja Pandit 2011).

Pureutumatta näihin ongelmiin tarkemmin käytän kuitenkin jatkossakin termiä kynnys ja oletan, että käytännön tarkkuudella sellaiseksi mielletävät fysiologiset reaktiot ovat olemassa. Edelleen, oletan aerobisen ja anaerobisen kynnyksen eri määritelmien olevan ristiriidattomia silloin, kun näitä termejä käytän, tai kun tutkimusartikkelissa on käytetty näitä termejä.

## 2.3 Kynnysten määrittäminen – tai arvioiminen

Aerobinen kynnys voidaan määrittää työskentelemällä usealla erisuuruisella tasaisella kuormituksella ja mittaamalla laktaattinäyte. Kun löytyy sellainen nopeus, että laktaattitaso asettuu perustasoa suuremmalle tasolle, kynnys on löytynyt. Perustasolle ei kirjallisuudesta löytynyt vakiintunutta määritelmää, mutta yleensä sillä tarkoitetaan testin kevyen kuormituksen aikaista laktaattitasoa. (Kari L. Keskinen 2010; Faude, Kindermann ja Meyer 2009)

Anaerobinen kynnys voidaan määrittää työskentelemällä tasaisella kuormituksella noin puoli tuntia ja mittaamalla veren laktaattikonsentraatio esimerkiksi viiden minuutin välein, ja toistamalla tämä niin monella eri kuormalla, että löytyy suurin kuormitustaso, jolla laktaattikonsentraatio ei kohoa jatkuvasti (Aunola ja Rusko 1992). Sallittuna laktaattikonsentraation vaihteluvälinä voidaan pitää esimerkiksi 1 mmol/l:ssa, mutta vaihteluvälin käytännön tulkinta on vaihdellut (Aunola ja Rusko 1992; Svedahl ja MacIntosh 2003; Faude, Kindermann ja Meyer 2009). Määrittämisen tarkkuus riippuu luonnollisesti myös käytettyjen kuormien suurueroista.

Erityisesti anaerobisen kynnysten luotettava määrittäminen edellä kuvatulla tavalla vaatisi monta testipäivää ja on siksi epäkäytännöllistä (Leti ym. 2012; ks. myös Aunola ja Rusko 1992; ja Kari L. Keskinen 2010, s. 114). Aerobinen ja anaerobinen kynnys arvioidaankin usein nousevan kuorman testimenetelmällä, joka voidaan toteuttaa esimerkiksi juosten, pyöräillen tai uiden; kenttätestinä (esim. yleisurheilukentällä) tai laboratoriossa (esim. juoksumatolla) (Kari L. Keskinen 2010, ss. 59–113–116; Leti ym. 2012). Testimenetelmässä kuormaa nostetaan tasaisin väliajoin, ja kynnys määritetään laktaattinäytteistä, jotka otetaan kuormien noston yhteydessä (tai tasaisin aikavälein, jos kuormaa nostetaan hyvin usein), tai hengityskaasudatasta, joka kerätään koko kuormituksen ajalta yleensä henkäys henkäykseltä (Kari L. Keskinen 2010, ss. 64–65). Kynnysten määrittämiseen on laktaattinäytteiden ja hengityskaasukeräyksen kalleuden vuoksi pyritty kehittämään myös halvempia vaihtoehtoja, kuten sydämen sykkeeseen (Marques-Neto ym. 2012), EMG-aktiivisuuden mittaukseen (Lucia ym. 1999) ja lihaksen lähi-infrapunaspektrometrimittaukseen (Karatzanos ym. 2010) perustuva nousevan kuorman testi.

Kynnysten määrittämiseen liittyy lukuisia pienempiä tai suurempia mittaustuloksiin vaikut-

tavia epävarmuuslähteitä, kuten juoksumaton todellinen nopeus, hengityskaasuanalysointin mittausarvot, laktaattianalysointin toimintatapa ja merkki/malli, laitteiden kalibrointi, laktaatin näytteenottopiste (korvannipukka, sormenpää) koehenkilön epätasainen liike tai hengitykseen vaikuttavat ylimääräiset toiminnot (puhuminen, yskiminen), päiväkohtainen suorituskykyvaihtelu, ravitsemustila jne. (Kari L. Keskinen 2010, ss. 60–65; Yoshida 1984). Kynnystestit eivät siis ole täysin toistettavia (esim. Aunola ja Rusko 1984; Weston ja Gabbett 2001), mutta se, ovatko ne tarpeeksi toistettavia, saattaa riippua käyttötarkoituksesta (Kari L. Keskinen 2010, s. 65). Esimerkiksi urheilijoille tehtävien testien tarkkuus tulee olla vähintään 1–3 % (Kari L. Keskinen 2010, s. 65). Testiprotokollalla on suuri merkitys (Zuniga ym. 2014; Bentley, Newell ja Bishop 2007), joten eri protokollan mukaisia testejä ei välttämättä kannata verrata keskenään.

Suomalaiset kynnysten määrittämisessä käytettävät uudet kriteerit julkaistaan vuonna 2018, mutta tämän tutkimuksen kirjoitushetkellä ne ovat seuraavat (Kari L. Keskinen 2010, s. 66):

#### Aerobinen kynnys, AerK:

1. Laktaattikonsentraation ensimmäinen nousukohta perustasosta (ei alin kohta)
2. Ventilaation ensimmäinen lineaarisuudesta poikkeava muutoskohta suhteessa hapenkulutukseen
3. Ventilaatioekvivalentin ( $\frac{VE}{VO_2}$ ) alin kohta

Jos kohdan 1. perusteella määritetty kynnys on eri kohdassa kuin kohtien 2. ja 3. perusteella määritetty kynnys, niin AerK määritetään em. kynnysten väliin kuitenkin niin, että kohta 1. on painotetussa asemassa. Apuna epäselvissä tilanteissa voidaan käyttää vielä  $\frac{La}{VO_2}$ -käyrän alinta kohtaa tai *TrueO<sub>2</sub>*:n korkeinta kohtaa.

#### Anaerobinen kynnys, AnK:

1. Laktaattikonsentraation toinen jyrkempi nousukohta
2. Ventilaation lineaarisuudesta poikkeava muutoskohta suhteessa hiilidioksidin tuottoon
3. Ventilaatioekvivalenttien ( $\frac{VE}{VO_2}$  ja  $\frac{VE}{VCO_2}$ ) lineaarisuudesta poikkeava muu-

toskohta.

Jos kohdan 1. perusteella määritetty kynnyks on eri kohdassa kuin kohtien 2. ja 3. perusteella määritetty kynnyks, niin AnK määritetään em. kynnyksien väliin kuitenkin niin, että kohta 1. on painotetussa asemassa. Apuna epäselvissä tilanteissa voidaan käyttää vielä  $TrueO_2$ :n jyrkkää laskukohtaa.

Kriteerit ovat selvästi tulkinnanvaraisia, mikä heikentää merkittävästi määrityksen luotettavuutta. Koska hapenkulutus kasvaa kuorman kasvaessa, kuvaavat aerobisen kynnyksen kohdat 2 ja 3 sekä anaerobisen kynnyksen kohta 2 ja kohdan 3  $\frac{VE}{VCO_2}$  käytännössä samaa asiaa hieman eri esitystavalla. Kynnyksen sijaintia visuaalisesti arvioitaessa jompikumpi esitystapa voi kuitenkin olla toista helpompi.

Kynnyksien määrittämiseen on käytetty kuitenkin monia erilaisia kriteerejä, joista ovat tehneet katsauksen ainakin Faude, Kindermann ja Meyer (2009) (ks. luvun 3.3 taulukot). Monista kriteereistä on helppo osoittaa sellaisia ongelmakohtia, jotka ilmenevät, jos testaustapaa (esimerkiksi aloituskuormaa, kuormien pituutta tai korotusten suuruutta) vaihtaa. Esimerkiksi  $D_{max}$ -menetelmän tulokseen selvästi vaikuttaa aloituskuorman suuruus. Tangenttimenetelmiä puolestaan on listattu kaksi eri vakiokulman suuruudella, joten ainakin toinen on välttämättä ei-optimaalinen. Myös vakiolaktaattiarvojen käyttäminen on todettu huonoksi menetelmäksi (Aunola ja Rusko 1984). Tässä tutkielmassa keskitytään kuitenkin Suomessa yleisesti käytettyyn testausprotokollaan, jossa testi suoritetaan laboratorio-oloissa juoksumatolla juosten, kuorma pysäytetään laktaattinäytteenottoajaksi (käytännössä 20–40 sekunniksi), kuormaa nostetaan (vain) nopeutta lisäämällä, laktaattinäyte otetaan sormenpäältä ja hengityskaasut mitataan hengitys-hengitykseltä. Vaikka mittaamiseen ja menetelmiin liittyvien epävarmuustekijöiden vuoksi arvioiminen ehkä olisikin määrittämistä kuvaavampi termi, käytän jatkossa kuitenkin termejä määritys ja määrittää, sillä ne ovat yleisesti käytössä.

### 3 Laskennallisista määrittämenetelmistä

Sekä laktaatti- että hengityskaasudataan perustuvia subjektiivisia (visuaalisia) ja automaattisia (laskennallisia) määrittämenetelmiä on kehitetty koko joukko (Faude, Kindermann ja Meyer 2009; Ekkekakis ym. 2008). Yleensä sekä laskennalliset että visuaaliset menetelmät perustuvat enemmän tai vähemmän teoreettiseen pohdiskeluun elimistön toiminnasta rasiuksessa (esim. Beaver, Wasserman ja Whipp 1986; Zhou ja Weston 1997). Osa menetelmistä vaikuttaa kuitenkin yrityksen ja erehdyksen kautta löydetyiltä vailla syvällistä fysiologista perustetta, ja ne saattavat toimia vain juuri tietyllä testausprotokollalla (ks. esim. Faude, Kindermann ja Meyer 2009; Dickstein, Barvik, Aarsland, Snapinn ja Millerhagen 1990; Zhou ja Weston 1997). Osa laskennallisten menetelmien kuvauksista on puutteellisia (esim. Santos ja Giannella-Neto 2004).

Tyypillisesti laskennalliset menetelmät pyrkivät löytämään saman kuin visuaaliset menetelmätkin, eli muuttujien suhteesta merkityksellisen (esim. lineaarisuudesta poikkeavan) muutoksen, minkä ne toteuttavat sovittamalla mittausdataan regressiosuoria (esim. Ekkekakis ym. 2008). Jonkin verran käytetään myös korkeamman asteen polynomien sovitukseen perustuvia menetelmiä (Santos ja Giannella-Neto 2004; Zhou ja Weston 1997; Fabre ym. 2010). Kynnys määritetään esimerkiksi suorien leikkauspisteeseen (Ekkekakis ym. 2008) tai perustuen polynomien kasvuvauhtiin (Santos ja Giannella-Neto 2004).

Usein laskennallisia menetelmiä on verrattu yhden tai useamman asiantuntijan visuaalises- ti määrittämiin kynnyksiin – itse asiassa laskennallisia menetelmiä jopa validoidaan näin (Ekkekakis ym. 2008). Näin on tehty myös monissa tässä luvussa mainituissa artikkeleissa. Koska perinteinen visuaalinen määrittäminen voi mennä sekä ylä- tai alakanttiin, ei näin validoiduissa menetelmissä varmuudella päästä kuin kohtalaiseen, testaamisen tavoitteen näkökulmasta pahimmillaan hyvinkin heikkoon, tarkkuuteen (Ekkekakis ym. 2008; Kari L. Keskinen 2010, s. 65). Validointi tulisi tehdä esimerkiksi luvussa 2.3 selostetulla vakiovauhtisella kuormitustestillä (Aunola ja Rusko 1992).

Kynnystermistön kirjavuudesta johtuen eri henkilöt saattavat tarkoittaa samalla termillä eri asiaa ja sen vuoksi sekoittaa kynnykset keskenään, minkä takia osa julkaistuista tutkimuk-

sista antaa virheellisen kuvan menetelmien toimivuudesta (Myers ja Ashley 1997; Meyer ym. 2005; Faude, Kindermann ja Meyer 2009). Tässä tutkimuksessa on pyritty jokaisen tarkemmin esiteltävän menetelmän kohdalla tarkastamaan sen toimintaperiaatteen avulla, mitä kynnystä menetelmä etsii.

Kaikki tässä osiossa mainitut menetelmät on kehitetty testausprotokollaan, jossa kuormitusta ei pysäytetä nostojen välissä. Muuten menetelmien validoinnissa käytettävät testausprotokollat ovat vaihtelevia: on käytetty polkupyöräergometriä (Santos ja Giannella-Neto 2004) tai juoksumattoa juosten (Ekkekakis ym. 2008) tai hiihtäen (Fabre ym. 2010); kuormaa on nostettu jatkuvasti, joidenkin sekuntien, minuutin tai parin minuutin välein (Ekkekakis ym. 2008; Wisén ja Wohlfart 2004; Dickstein, Barvik, Aarsland, Snapinn ja Millerhagen 1990).

### 3.1 Ventilaatiokynnysmenetelmät

Laskennallisia määritysmenetelmiä hengityskaasudatasta on kehitetty ainakin 80-luvulta lähtien. Beaver, Wasserman ja Whipp (1986) kehittivät niin kutsutun v-slope-menetelmän (myös 'Vslope' tai ' $V_{slope}$ '), jossa ( $VO_2$ ,  $VCO_2$ )-datapilveen sovitetaan tietyin kriteerein kaksi regressiosuoraa, joiden leikkauspisteeseen määritetään aerobinen kynnys (kuvio 2). Lähes identtillä menetelmällä he määrittivät anaerobisen kynnyksen ( $VCO_2$ ,  $VE$ )-datapilveen. Aerobisen kynnyksen määrittämisessä anaerobisen kynnyksen ylittämisen jälkeen mitatut arvot poistetaan. Menetelmät perustuvat edellä kappaleessa 2.1 lyhyesti kuvattuun sittemmin osittain kyseenalaistettuun teoriaan kuormitusfysiologiasta. Menetelmiin kuuluu myös datan suodatus, joista osan saattaa joutua tekemään (ilmeisesti) manuaalisesti. V-slope-menetelmästä on kehitetty myös yksinkertaistettu versio (Schneider, Phillips ja Stoffolano 1993). Menetelmän nimi juontuu suoraan siinä käytettävistä muuttujista  $VO_2$  ja  $VCO_2$  ja niiden välisen sovitteen kulman vertaamisesta (Beaver, Wasserman ja Whipp 1986), minkä vuoksi saattaa olla vaikea tietää, viitataan termillä v-slope juuri alkuperäiseen menetelmään vai esimerkiksi joihinkin tässä työssä jäljempänä esiteltäviin variaatioihin.

V-slopessa koko datapilveen (määritettävästä kynnyksestä riippuen ( $VO_2$ ,  $VCO_2$ ) tai ( $VCO_2$ ,  $VE$ )) sovitetaan yksi regressiosuora, ja lisäksi kaksi regressiosuoraa siten, että maksimoidaan koko datapilven regressiosuorasta niiden leikkauspisteen etäisyyden suhde regressioi-

den keskineliövirheiden summaan. Menetelmä voidaan siis määritellä matemaattisesti seuraavasti:

$$\min \frac{d \left( a_1 VO_2 + b_1 VCO_2 + c_1 = 0, (VO_2^{lp}, VCO_2^{lp}) \right)}{MSE}, \quad (3.1)$$

missä  $d$  on etäisyys ja  $MSE$  keskineliövirhe,  $a_1 VO_2 + b_1 VCO_2 + c_1 = 0$  koko datapilven regressiosuoran yhtälö ja  $(VO_2^{lp}, VCO_2^{lp})$  vasemman ja oikean regressiosuoran leikkauspiste. Näin ollen tehtävä saadaan muotoon

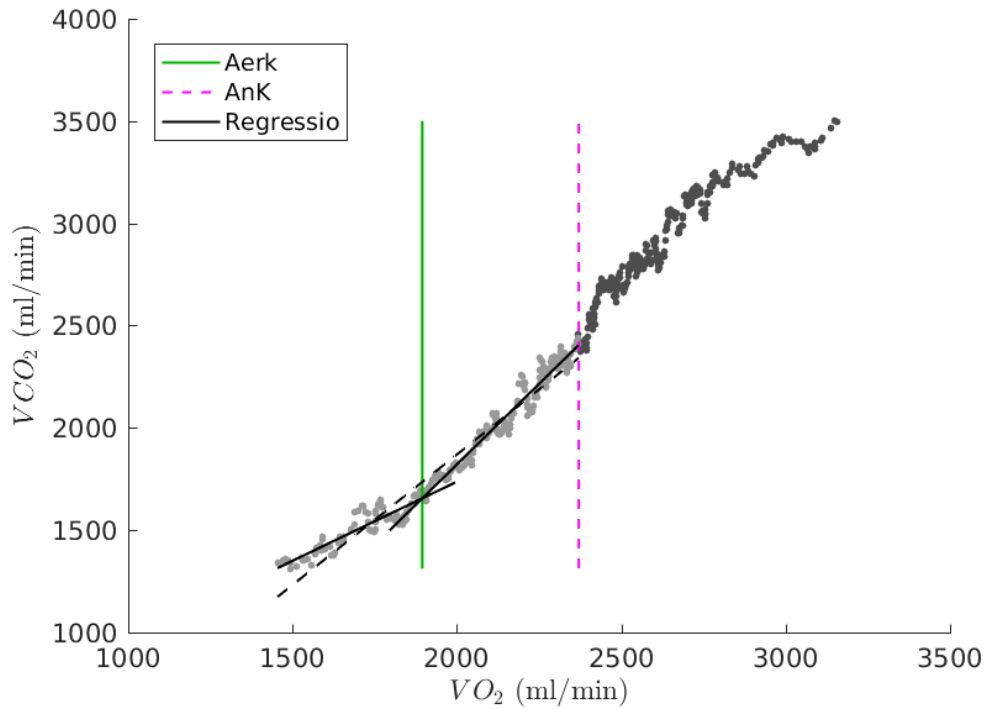
$$\min \frac{|a_1 VO_2^{lp} + b_1 VCO_2^{lp} + c|}{\sqrt{a^2 + b^2} \times \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^j (VCO_2^i - f_v(VO_2^i))^2 + \sum_{i=j}^n (VCO_2^i - f_o(VO_2^i))^2 \right)}, \quad (3.2)$$

missä  $f_v$  on vasen ja  $f_o$  oikea regressiosuora muotoa  $f(VO_2) = a + bVO_2$ .

Anaerobisen kynnyksen määrittämisessä käytettävät muuttujat ovat  $VCO_2$ :n tilalta  $VE$  ja  $VO_2$ :n  $VCO_2$ . Anaerobista kynnystä määriteltäessä vaaditaan lisäksi, että oikean regressiosuoran kulmakerroin on vähintään 15 % suurempi kuin vasemman. Aerobiselle kynnykselle vaaditaan vastaavasti vähintään 0,1 yksikön suuruuseroa.

Sekä v-slopen että yksinkertaistetun v-slopen ongelmana on, että osa kynnyksistä saattaa jäädä määrittelemättömiksi edellä mainittujen määrittämissä kriteerien vuoksi, toisin sanoen menetelmä ei löydä kriteerien mukaista kohtaa datasta (Ekkekakis ym. 2008). Ainakin osittain ongelma riippuu kuormien korotuksista, sillä  $(VO_2, VCO_2)$ -pilven toinen regressiosuora on sitä jyrkempi, mitä nopeammin kuormaa nostetaan (Wasserman, Beaver ja Whipp 1990). Toisaalta liian nopeat korotukset voivat saada menetelmän määrittämään aerobisen kynnyksen liian alhaiselle tasolle (Whipp 2007). Sopiva tahti kuormituksen nostolle vaikuttaisi olevan (ilman kuormien pysäytyksiä) sellainen, että uupuminen tapahtuu noin kymmenen minuutin jälkeen testin aloituksesta (Wasserman, Beaver ja Whipp 1990).

Meyer ym. (2005) suosittelevat aerobisen kynnyksen määrittämisessä v-slope-menetelmää, sillä ventilaation mukaanotto muuttujaksi lisää mitattavan ilmiön kannalta epäoleellista datan varianssia (kohinaa), koska lähellä aerobista kynnystä vastaavalla kuormituksella yksilöillä on eroja ventilaation käyttäytymisessä (vrt. luku 2.1). Myös Whipp (2007) pitää  $VE$ :n sijaan  $VCO_2$ :n vertaamista  $VO_2$ :een hyvänä menetelmänä happamoitumisen havaitsemiseen. Näitä muuttujia käyttäviä, edellä esitetyn v-slopen tapaisia menetelmiä on kuitenkin mui-



Kuvio 2. V-slope-menetelmä. Oikea pysty (purppura) katkoviiva on menetelmän antama AnK, joka rajaa AerK:n määrittämiseen mukaan otettavat (vaaleat) pisteet sen vasemmalle puolelle. Vaino musta katkoviiva on koko mukanaolevan pistejoukon regressiosuora. Yhtenäiset vinot mustat viivat ovat vasemman ja oikean puoleisen osan regressiosuorat. Vasen (vihreä) pystyviiva on vasemman ja oikeanpuoleisen suoran leikkauspiste eli menetelmän ilmoittama AerK. Kuva on otettu tässä tutkimuksessa käytettävästä VslopeMax-menetelmästä, jossa datan esikäsittely poikkeaa hieman alkuperäisestä (luku 3.1).

takin, esimerkiksi ”breakpoint” (”pysäytyspiste”) (kuvio 3) ja ”brute force” (”raa’an voiman”) -menetelmät, kuten Ekkekakis ym. (2008) niitä nimittävät. ”Breakpoint”-menetelmä sovittaa  $(VO_2, VCO_2)$ -pilveen ensimmäisen asteen splinin yhdellä solmulla ja ”brute force”-menetelmä kaksi regressiosuoraa, joiden yhteiskeskinneliöpoikkeama minimoidaan:

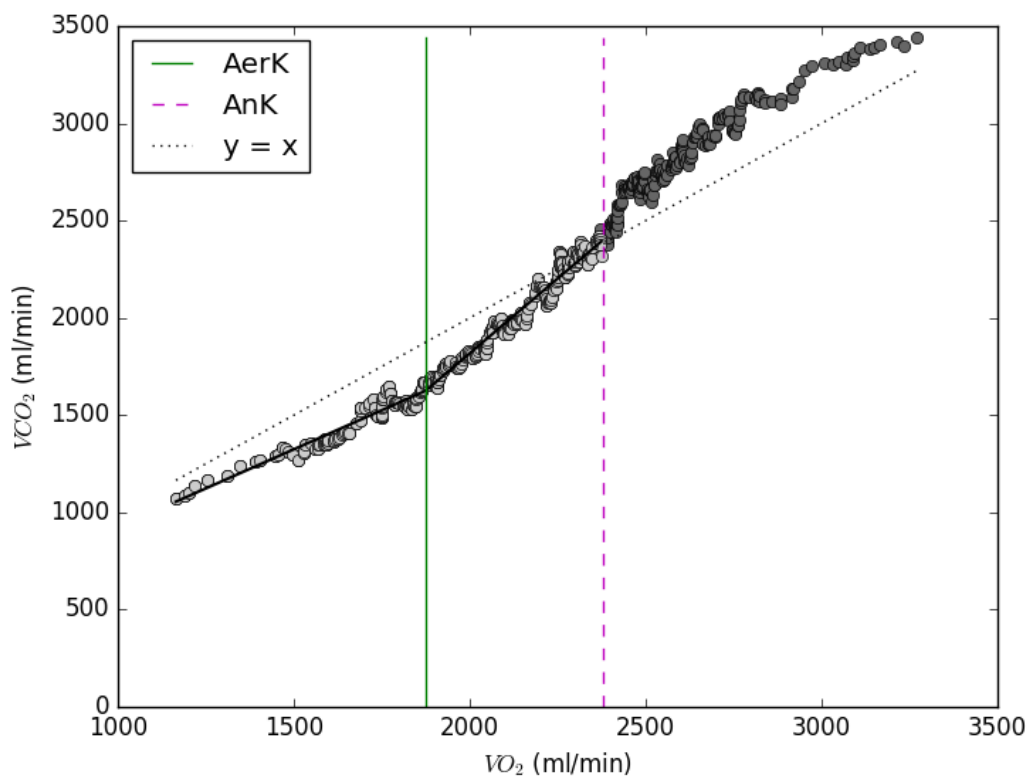
$$\min_{j \in [1, n]} (RSS) = \min_{j=1 \dots n} \left( \sum_{i=1}^j (VCO_2^i - f_1(VO_2^i))^2 + \sum_{i=j}^n (VCO_2^i - f_2(VO_2^i))^2 \right), \quad (3.3)$$

missä funktiot ovat regressiosuoria muotoa  $f_k(VO_2) = a_k + b_k VO_2$ , missä siis:

$$b = \frac{\sum_i (VO_2^i - \overline{VO_2}) y_i}{\sum_i (VO_2^i - \overline{VO_2})^2} \quad (3.4)$$



ja  $a = \overline{VCO_2} - b\overline{VO_2}$ , missä  $\bar{x}$  tarkoittaa muuttujan  $x$  keskiarvoa. ”Breakpoint”-menetelmässä on siis edellisen lisäksi regressiosuorissa rajoite  $f_1(VO_2^j) = f_2(VO_2^j)$  eli  $a_1 + b_1VO_2^j = a_2 + b_2VO_2^j$ . Aerobiseksi kynnykseksi määritetään ”brute force”-menetelmässä suorien leikkauspiste ja ”breakpoint”-menetelmässä vastaavasti splinin solmu eli piste, jossa osasuora vaihtuu. V-slopen tapaan myös nämä menetelmät ovat riippuvaisia anaerobisen kynnyksen määrittämisestä.



Kuvio 3. Breakpoint-menetelmä. Suora  $VCO_2 = VO_2$  ( $y = x$ ) on merkitty mustalla pisteiviivalla, tumma pistejoukko on AnK:n ylittävät mitaustulokset, vaalea pistejoukko AnK:n alittavat eli menetelmään mukaan otettavat mitaustulokset, oikea pysty (purppura) katkoviiva = AnK, vasen (vihreä) pystyviiva Breakpoint-menetelmän antama AerK ja yhtenäiset vinot suorot menetelmän osasuoria.

Melko samantyyppisiä lineaarisovitteita on käytetty aerobisen kynnyksen etsintään myös muiden muuttujien avulla. Tällaisia ovat esimerkiksi  $(VO_2, VE)$ ,  $(VO_2, \frac{VE}{VO_2})$  ja  $(aika, PET_{O_2})$ -datapilviin perustuvat menetelmät (Ekkekakis ym. 2008; Santos ja Giannella-Neto 2004).

Vastaavasti anaerobisen kynnyksen määrittämiseen on käytetty (aika, $PET_{CO_2}$ )-datapilveen sovitettavia regressiosuoria (Santos ja Giannella-Neto 2004). Eri muuttujien käytöstä huolimatta menetelmät saattavat olla käytännössä samat, sillä kaikki muuttujat perustuvat mitauksiin ventilaatiosta sekä hengitysilman hiilidioksidi- ja happipitoisuuden muutoksista, ja menetelmät niiden, tai niiden välisten suhteiden (lineaarisin) muutoksiin (Meyer ym. 2005).

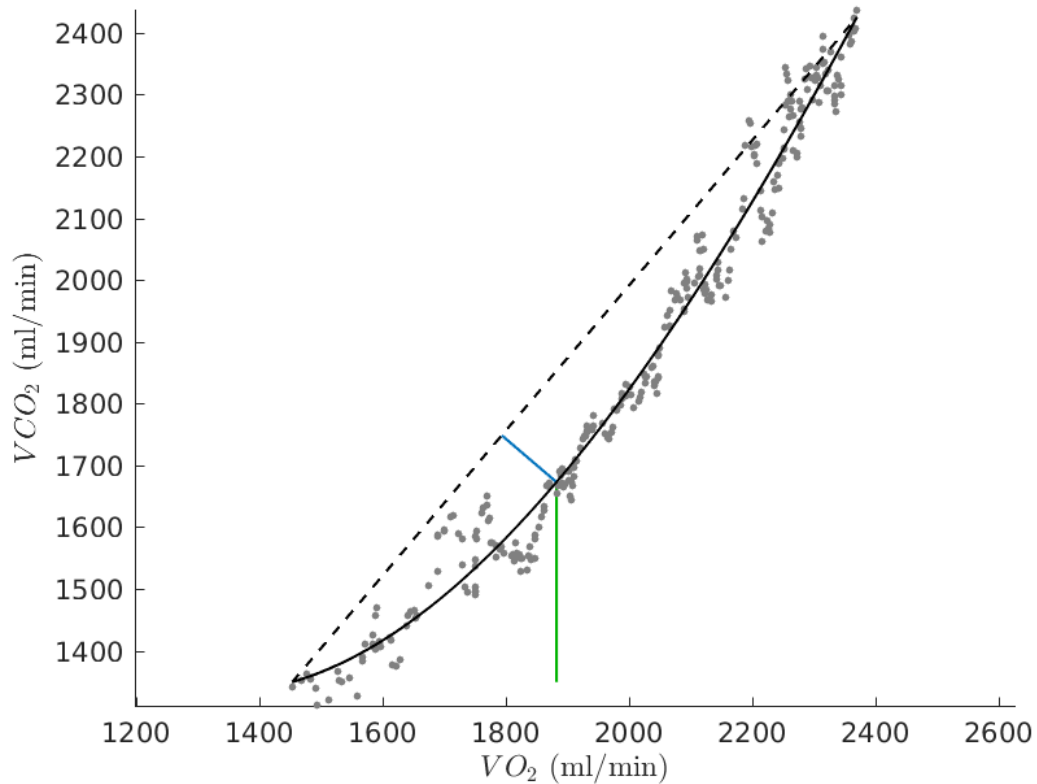
Yksinkertaisimmillaan automaattiset menetelmät perustuvat vakioraja-arvoon. Niin sanottu hengitysosamäärä (eng. *respiratory quotient*, RQ) määritellään seuraavasti:

$$RQ = \frac{CO_2^{\text{tuotettu}}}{O_2^{\text{kulutettu}}}, \quad (3.5)$$

ja se on glukoosin hapettamiselle 1 ja rasvan hapettamiselle noin 0,7 (McArdle, Katch ja Katch 2010, s. ). Kuntotestiolosuhteissa mitattua hiilidioksidintuoton ja hapenkulutuksen välistä suhdetta  $\frac{VCO_2}{VO_2}$  kutsutaan kuitenkin R- tai RER-arvoksi (eng. *respiratory exchange ratio*) (McArdle, Katch ja Katch 2010). RER olisi siis teoriassa yksi, jos rasitus olisi tasainen ja keho tuottaisi kaiken energian aerobisesti hiilihydraateista ja 0,7, jos ainut energianlähde olisi rasva. Yli yhden RER-arvo vastaavasti tarkoittaisi, että osa energiasta tuotetaan anaerobisesti. RER-menetelmä asettaakin kynnykseksi rasitustason, jolla RER ylittää yhden, tosin joskus saatetaan käyttää myös esimerkiksi arvoa 0,95 (Amann ym. 2004). Koska RER-arvo heittelee peräkkäisten henkäysten välillä, vaikuttaa menetelmän antamaan tulokseen luonnollisesti tulkinta, milloin RER saavuttaa tai ylittää halutun raja-arvon (vrt. Santos ja Giannella-Neto 2004; ja Wisén ja Wohlfart 2004). RER-menetelmän antama tulos vaikuttaisi vastaavan pikemmin anaerobista kuin aerobista kynnystä (Wisén ja Wohlfart 2004; Leti ym. 2012).

$D_{max}$ -menetelmässä esimerkiksi ( $VCO_2, VO_2$ )-datapilveen sovitetaan kolmannen asteen polynomi, jonka päätepisteiden kautta piirretään suora, ja kynnys määritetään (polynomin) pisteeseen, joka on kauimpana suorasta (Ekkekakis ym. 2008) (kuvio 4). Menetelmää on käytetty myös muilla muuttujilla (Karatzanos ym. 2010) sekä laktaattimitauksiin sovellettuna (ks. luku 3.3).

Myös korkeamman asteen polynomeihin perustuvia menetelmiä on kehitetty. Esimerkiksi Santos ja Giannella-Neto (2004) määrittivät aerobisen kynnyksen viidennen asteen polynomien derivaattojen avulla ( $VO_2, \frac{VE}{VO_2}$ )- ja ( $VO_2, VE$ )-datasta sekä anaerobisen kynnyksen



Kuvio 4.  $D_{max}$ -menetelmä hengityskaasudatalle. Kaari (musta, yhtenäinen viiva) on polynomisovite, jonka päätepisteiden kautta kulkee suora (musta katkoviiva). Vino laskeva sininen suora havainnollistaa kaaren maksimietäisyyttä  $D_{max}$ -suorasta. Kaaresta alaspäin lähtevä (vihreä) suora osoittaa menetelmän antaman kynnyksen.

$(VO_2, \frac{VE}{VCO_2})$ - ja  $(VCO_2, VE)$ -datasta.  $(VO_2, VE)$ - ja  $(VCO_2, VE)$ -pilvistä haluttu kynnyks määritettiin seuraavasti: pilveen sovitetään viidennen asteen sileä polynomisplini (eng. *polynomial smoothing spline*), ja kynnyks määritetään kohtaan, jossa funktion toinen derivaatta saa arvon nolla.  $(VO_2, \frac{VE}{VO_2})$ - ja  $(VO_2, \frac{VE}{VCO_2})$ -pilvistä haluttu kynnyks määritettiin puolestaan seuraavasti: pilveen sovitetään viidennen asteen sileä polynomisplini kuten edellä, ja kynnyks määritetään kohtaan, jossa funktion ensimmäinen derivaatta saavuttaa maksiminsa. Molemmat menetelmät siis etsivät polynomifunktion maksimikihtyvyyden kohdan.

Wisén ja Wohlfart (2004) puolestaan käyttivät kuudennen asteen polynomia omaan versioonsa v-slope-menetelmästä. DX-niminen menetelmä sovittaa aerobisen kynnyksen etsimistä varten kuudennen asteen polynomit  $p_{VCO_2}$  (*aika, VCO<sub>2</sub>*)-pilveen ja  $p_{VO_2}$  (*aika, VO<sub>2</sub>*)-

pilveen. Aerobinen kynnyks määritetään ajanhetkeen, jossa  $p_{VCO_2}$ :n derivaatta ylittää  $p_{VO_2}$ :n derivaatan, toisin sanoen

$$\frac{dp_{VCO_2}}{dt} > \frac{dp_{VO_2}}{dt}. \quad (3.6)$$

PQ-niminen menetelmä sovitaa anaerobista kynnystä varten kuudennen asteen polynomin  $p_{EQCO_2}$  (aika,  $EQCO_2$ )-pilveen, missä  $EQCO_2 = \frac{VE}{VCO_2}$ , ja asettaa pisteen (ajanhetken)

$$\frac{dp_{EQCO_2}}{dt} = 0 \quad (3.7)$$

vastaamaan AnK:stä. Tutkimuksessa vähälle huomiolle jäi edellisen kanssa identtisesti toimiva, mutta (aika,  $EQO_2$ )-pilveen sovitettava polynomimenetelmä (PQo), joka käsitteellisesti vastaa aerobista kynnystä.

Hieman eri tyyppinen lähestymistapa on kumulatiiviseen summaan perustuvassa menetelmässä:

$$\text{Cumsum}(x)_i = \sum_{n=1}^i (x_n - \bar{x}), \quad (3.8)$$

missä  $x = \frac{VE}{VCO_2}$  tai  $x = FEO_2$  (happikonsentraatio uloshengitysilmassa) tai  $x = FETO_2$  (happikonsentraatio uloshengitysilman lopussa (vrt.  $PETO_2$ )),  $i$  on (ajankukaisesti järjestetyn) muuttujan järjestynumero ja Cumsum:illa ei ole yksikköä. Aerobisen kynnksen ehdokas asetetaan kohtaan, jossa funktion tulos on kahden keskihajonnan verran keskiarvon yläpuolella ja kynnyks määritetään kolmella yllä listatulla muuttujalla saadun ehdokkaan keskiarvoksi. Tulos hyväksytään, jos  $\frac{VE}{VCO_2}$ -syötteellä Cumsum-funktion kasvu alkaa myöhemmällä ajanhetkellä. (Smith ja O'Donnell 1984)

### 3.2 Ventilaatiokynnysmenetelmien tuloksia

V-slope- ja RER-menetelmä lienevät yleisimmin testatut laskennalliset ventilaatiokynnysmenetelmät. V-slopen julkaisuartikkelissa se antoi aerobiselle kynnkselle tuloksen kaikille koehenkilöille, mihin ei pystynyt kuin yksi kuuden asiantuntijan verrokkijoukosta (Beaver, Wasserman ja Whipp 1986). Aerobinen kynnyks ei eronnut merkitsevästi asiantuntijoiden ja v-slopen välillä (20 ml/min,  $p > 0,5$ ). V-slopen määrittämä AerK ei myöskään eronnut merkitsevästi tutkimuksen yhteydessä verinäytteistä määritetystä  $HCO_3^-$ -kynnksestä, joka kuvastaa happamuuden muutosta verestä ja siten haluttua ilmiötä (ks. luku 2.1).

Dickstein, Barvik, Aarsland, Snapinn ja Karlsson (1990) vertasivat v-slope- ja RER-menetelmiä sekä visuaalista määrittystä. V-slopen ja visuaalisen menetelmän korrelaatio oli 0,83 ja keskihajonta 181 ml/min. Tulokset olivat samansuuntaiset muissakin vertailuissa: RER-menetelmän ja visuaalisen määrittelyn välinen korrelaatio oli 0,82 ja keskihajonta 150 ml/min ja RER- ja v-slopen välinen korrelaatio 0,87 ja keskihajonta 144 ml/min. Keskimäärin RER-menetelmä kuitenkin antoi selvästi suurempia tuloksia: ero oli noin 180 ml/min visuaaliseen määrittelyyn ja v-slopeen, kun taas niiden kahden keskinäinen ero oli alle 20 ml/min. Myös Santos ja Giannella-Neto (2004) vertasivat v-slopea ja RER:ä. RER- ja visuaalisen menetelmän (keskiarvon) välinen korrelaatio oli 0,91 ja v-slopen ja visuaalisen välinen 0,78. Loput tutkimuksissa käytetyt automaattiset menetelmät asettuivat näiden väliin. AnK-menetelmien ja visuaalisen määrittelyn väliset korrelaatiot olivat 0,83–0,89. Automaattisten menetelmien keskinäiset korrelaatiot aerobisten kynnysten osalta oli 0,88–0,96 ja anaerobisen kynnyksen osalta 0,88–0,94. Lukuunottamatta yhtä menetelmää erot visuaalisen ja automaattisten menetelmien välillä eivät kuitenkaan olleet tilastollisesti merkitseviä, toisin sanoen menetelmät eivät yli- tai aliarvioineet kynnystä visuaaliseen määrittelyyn verrattuna. Kaiken kaikkiaan laskennalliset menetelmät siis olivat jokseenkin yhtä hyviä keskenään ja toinen menetelmä saattoi olla toista tarkempi AnK:n määrittelyssä mutta epätarkempi AerK:n määrittelyssä.

Ekkekakis ym. (2008) vertasivat useaa eri automaattista regressioon perustuvaa menetelmää keskenään. He käyttivät kahta eri otosta, joiden mittaukset toteutettiin hieman toisistaan poikkeavilla testiprotokollilla. Menetelmien keskimääräinen korrelaatio otoksilla oli 0,76 (n = 12) ja 0,81 (n = 20). V-slope ja yksinkertaistettu v-slope eivät saaneet määritettyä joitain koehenkilöitä. Yksinkertaistettu v-slope korreloi heikosti muiden menetelmien kanssa. Jättämällä se huomiotta muiden menetelmien välinen keskimääräinen korrelaatio oli 0,81 ensimmäiselle ja 0,91 toiselle otokselle. Yksinkertaistettu v-slope antoi alhaisimpia tuloksia, mutta muiden menetelmien välillä ei ollut selviä säännönmukaisuuksia tulosten suuruusjärjestyksessä. Menetelmien antamien tulosten vaihtelun vuoksi tutkijat ehdottavat, ettei välttämättä kannata luottaa vain yhteen menetelmään.

Smith ja O'Donnell (1984) vertasivat Cumsum-menetelmää visuaaliseen määrittelyyn ja laktaattimittauksiin. Merkitsevää eroa menetelmän eri muuttujilla ( $\frac{VE}{VCO_2}$ ,  $FEO_2$ ,  $FETO_2$ ) saatujen tulosten välillä ei ollut, eikä myöskään tulosten keskiarvon (= tutkimuksen AerK)

ja visuaalisen määrittämisen välillä. 25:llä koehenkilöllä suoritettu uudelleentestaus tuotti korkean korrelaation ( $r = 0,95$ ).

Weston ja Gabbett (2001) testasivat uudelleentestattavuutta v-slopella ja siihen kuuluvalla AnK-määrittämisellä teettämällä koehenkilöjoukolla kaksi mittausa. V-slopen antama VT1 oli merkitsevästi korkeampi toisessa testissä, mutta muuten sen ja visuaalisen määrittämisen välillä ei ollut merkitsevää eroa. V-slopen ja visuaalisen määrittämisen välinen korrelaatio oli 0,84–0,95 VT2:lle ja 0,45–0,75 VT1:lle. Testien välinen korrelaatio oli 0,86–0,93 VT2:lle ja 0,67–0,80 VT1:lle. Visuaalisesti määritettyjen peräkkäisten testien kynnysten välisen korrelaation on raportoitu olevan 0,91–0,95 (Kari L. Keskinen 2010, s. 74)

Wisén ja Wohlfart (2004) saivat merkitsevästi suurempia tuloksia RER-menetelmällä kuin kehittämällään kuudennen asteen polynomisovitteen derivaattaan perustuvalla v-slopea mukailevalla DX-menetelmällä. RER-menetelmä antoi melko lailla samoja tuloksia kuin v-slopeen kuuluvaa AnK-menetelmää vastaava PQ-menetelmä. Myös tässä tutkimuksessa testattiin käytettyjen menetelmien toistettavuutta: uusintatestiin nähden kolmen menetelmän korrelaatiot järjestyksessä DX, RER, PQ olivat 0,77; 0,86 ja 0,65, ja keskihajonnat noin 200, 240 ja 350 ml/min tai vaihtoehtoisesti 2,5; 3,0 ja 4,9 ml/min/kg. Toistettavuus ei mahdu urheilijoiden testauksessa vaadittuun 1–3 % tarkkuuden sisään (Kari L. Keskinen 2010, s. 65).

Kahden peräkkäisen testin avulla tehtävää vertailua vaikeuttaa se, että myös esimerkiksi  $VO_{2max}$  vaihtelee testien välillä. Laskennallisten menetelmien testaamisen yhteydessä Smith ja O'Donnell (1984), Weston ja Gabbett (2001) ja Wisén ja Wohlfart (2004) ovat saaneet maksimihapenoton väliseksi korrelaatioksi 0,92–0,97, mikä on lähellä muualla raportoitua 0,95:ä (Kari L. Keskinen 2010). Wisén ja Wohlfart (2004) raportoivat myös testien välisen  $VO_{2max}$ :n keskihajonnan, 166 ml/min, mikä mahtunee niukasti ehdotetun 3 ml/min/kg:n tarkkuuden sisään (Kari L. Keskinen 2010, s. 74).

Kahden eri testiajan väliseksi suhteelliseksi eroiksi kynnysten määrittämisessä on raportoitu 1,8–20,3 %, ja korrelaatioksi 0,81–0,99 (Kari L. Keskinen 2010, s. 74). Tällaisia tuloksia ovat saaneet esimerkiksi Aunola ja Rusko (1984): Aerobiselle kynnykselle he saivat korrelaatioksi 0,94 ja anaerobiselle 0,96. Nousevan kuorman testistä määritetyn anaerobisen kynnyksen ja MLSS:n välinen korrelaatio sen sijaan vaikuttaa heikommalta: Aunola ja Rusko

(1992) saivat korrelaatioksi 0,83 tutkimuksessaan, jossa AnK määritettiin yhtä aikaa sekä laktaatti- että hengityskaasumittaustuloksia käyttäen (ks. suomalaiset määrittämissuhteet luvusta 2.3). Leti ym. (2012) havaitsivat puolestaan RER-menetelmän arvioivan tarkemmin MLSS:ää kuin visuaalisesti määritettyjen VT1:n (aliarvioi) ja VT2:n (yliarvioi), mutta toisaalta kaikkien menetelmien korrelaatio MLSS:n kanssa oli edellä esitettyä tutkimusta heikompi ( $r = 0,73-0,79$ ).

Ventilaatiomenetelmien keskinäinen korrelaatio ja asiantuntijoihin verrattu korrelaatio näyttäisi asettuvan yleensä noin 0,8–0,9:ään, mutta myös suurempia ja pienempiä korrelaatioita on havaittu. Menetelmien paremmuusjärjestys vaihtelee eri tutkimusten välillä. RER-menetelmä saattaa vaikuttaa joitain muita menetelmiä heikommalta, koska sitä on osassa tutkimuksia verrattu aerobisen ja osassa anaerobisen kynnyksen menetelmiin. V-slopen ongelmana on määrittelemättömät kynnykset, ja useimpia muita ei ole testattu kattavasti. Meyer ym. (2005) päätyivät eri tutkimusten pohjalta arvioon, että yleisesti ottaen hengityskaasuista määritetty anaerobinen kynnyks saattaa yliarvioida laktaattista määritettyä anaerobista kynnystä.

### **3.3 Laktaattikynnysmenetelmät**

Kattavan katsauksen laktaattikynnysten eri määrittämissuhteista ovat tehneet Faude, Kindermann ja Meyer (2009). Taulukossa 1 on listattu aerobisia ja taulukossa 2 anaerobisia laktaattikynnysmenetelmiä erottelematta onko kyseessä laskennallinen vai visuaalinen menetelmä. Menetelmien runsauden ja toisaalta samankaltaisuuden vuoksi tässä osiossa ei käydä läpi kaikkia listattuja menetelmiä, vaan keskitytään muutamaankin eri tyyppiseen kirjallisuudesta löytyneeseen laskennalliseen menetelmään.

Kuten taulukosta 1 nähdään, aerobisen kynnyksen tapauksessa laktaattitasoa verrataan yleensä lepotasoon tai niin sanottuun perustasoon, eli kevyen kuormituksen aikaiseen laktaattitasoon (kuvio 5). Tällainen määrittäminen vaatii käytännössä vähintään 0,2 mmol:n nousun laktaattitasossa mittauksen epätarkkuuden vuoksi. Aerobisen kynnyksen osalta menetelmän valintaan vaikuttaa luonnollisesti muun muassa perustason määrittäminen ja laktaattianalysointitapa.

---

Menetelmän numero ja kuvaus

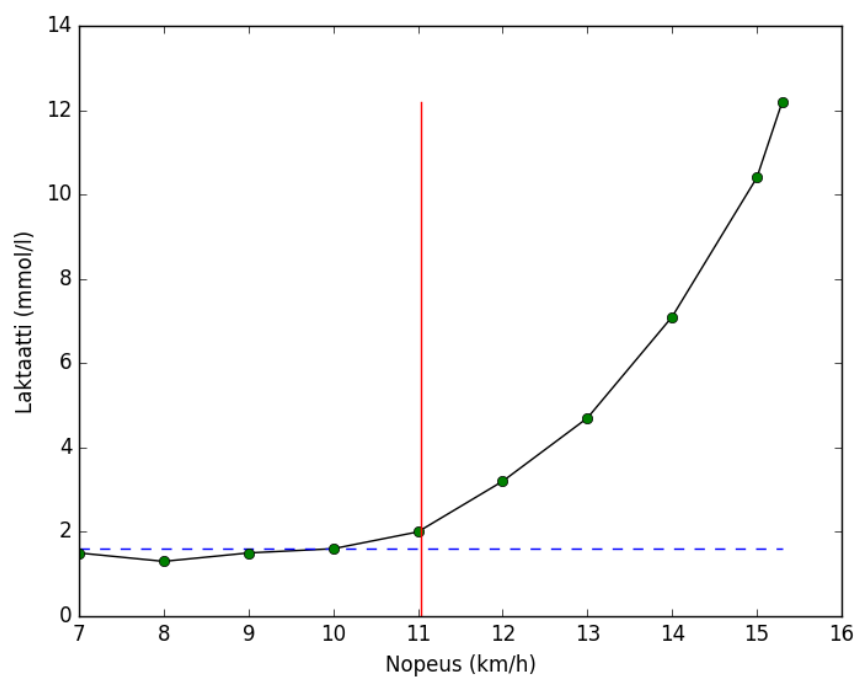
---

1. Laktaattikäyrän kohta/edeltävä kohta, jossa se nousee perustasosta
2. Kohta, jossa laktaatissa on selvä/systemaattinen/merkittävä/epälineaarinen/terävä/yhtäkkäinen nousu perustasosta
3. Ensimmäinen merkittävä laktaattitason nousu (n. 2 mmol/l)
4. Ennen laktaatin nousua yli perustason (väh. 0,2 mmol/l laktaattianalysointivirheen vuoksi)
5. Delta-laktaatin nousu (laktaatin kasautumisen alkamiskohta)
6. Laktaattiekvivalentin minimi (laktaatti jaettuna hapenkulutuksella tai kuormitustasolla)
7. Laktaattikonsentraation nousun alkamiskohta logaritmuunnossa koordinaatistossa
8. Kohta, jossa laktaattikonsentraatio nousee 0,5 mmol/l yli lepotason
9. Kohta, jossa laktaattikonsentraatio nousee 1 mmol/l yli perustason (eli laktaatti matalalla kuormitustasolla; n. 40–60 %  $VO_{2max}$ -tasosta)
10. Laktaatin 1 mmol/l:n nousua edeltävä kohta

---

Taulukko 1. AerK:ksi luokitellut laktaattikynnykset (Faude, Kindermann ja Meyer 2009)

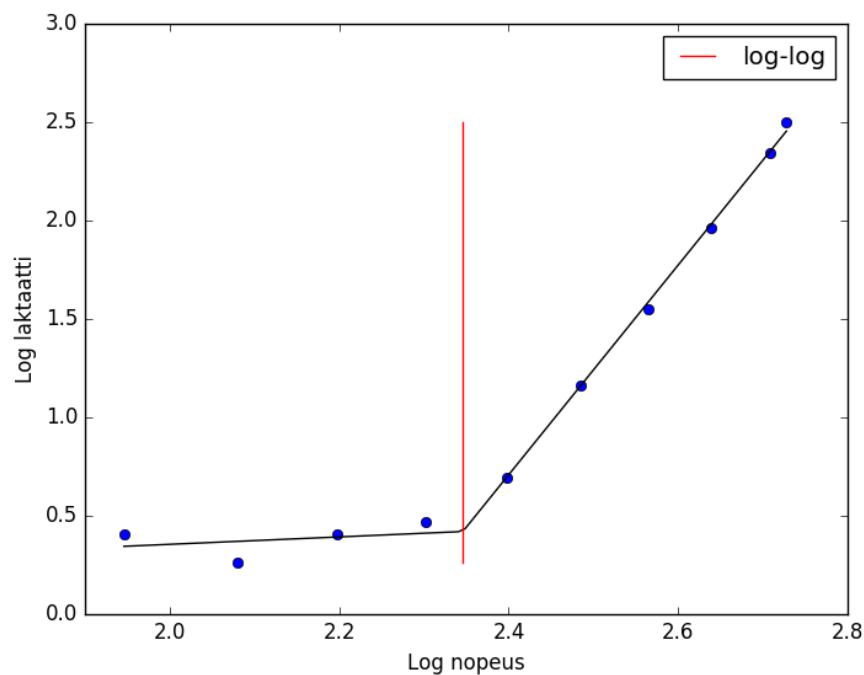




Kuvio 5. Esimerkki aerobisen laktaattikynnyksen määrittämisestä. Kynnyskriteerinä on 0,5 mmol/l:n nousu lepolaktaattitasosta. Sininen katkoviiva = lepolaktaattiarvo, punainen pystyviiva = menetelmän määrittämä AerK.

Logaritmimuunnosta käytävässä menetelmässä (log-log-menetelmä, 7. taulukossa 1) toisena muuttujana käytetään hapenottoa, työtehoa tai aikaa, ja toisena laktaattia. Molempiin arvoihin tehdään logaritmimuunnos ja näihin muutettuihin arvoihin sovitetaan kaksiosainen lineaarinen regressio (kuvio 6). Menetelmä perustuu hypoteesiin, jonka mukaan laktaattikäyrä noudattaisi pikemmin polynomiaalista kuin eksponentiaalista kasvua. (Dickstein, Barvik, Aarsland, Snapinn ja Karlsson 1990; Bishop, Jenkins ja Mackinnon 1998)

Log-log-menetelmä on kuitenkin kohdannut melko paljon kritiikkiä, sillä logaritmiuutos saattaa muun muassa saada aikaan visuaalisesti näkyvän kynnyksen, vaikka sellaista ei todellisuudessa olisikaan (Wasserman 1987; Campbell, Hughson ja Green 1989; Wasserman, Beaver ja Whipp 1990; Wasserman ja Koike 1992; Myers ja Ashley 1997). Kritiikki liittyykin läheisesti luvussa 2 mainittuun kiistaan kynnyksen olemassaolosta ja kynnyksestä terminä.

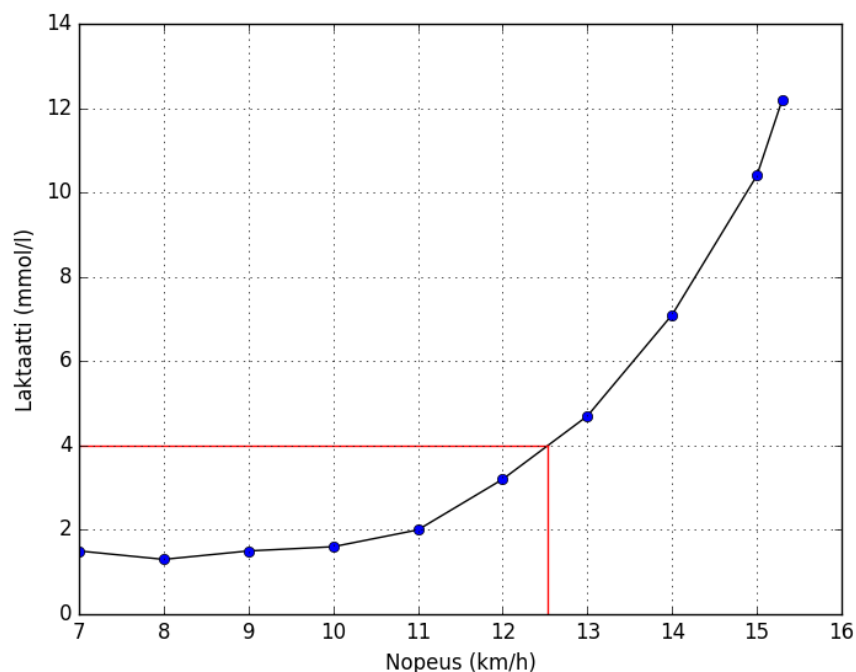


Kuvio 6. Log-log-menetelmä. Punainen pystyviiva = menetelmän määrittämä kynnys.

Dickstein, Barvik, Aarsland, Snapinn ja Karlsson (1990) vertasivat automatisoitua logaritminen menetelmää visuaaliseen määrittämiseen 30 sydäninfarktipotilaalla. Koehenkilöt suorittivat kuormituksen polkupyöräergometrillä, jonka kuorman kasvu tapahtui portaattomasti (15

W/min), ja analyysi suoritettiin sovittamalla kaksiosainen regressiosuora ( $\log La, \log VO_2$ )-dataan. Menetelmien välinen korrelaatio oli 0,84, keskiarvon ero 63,8 ml/min ja keskihajonta 135 ml/min.

Anaerobisen kynnyksen määrittämissä on enemmän vaihtelua (taulukko 2). Aiemmin käytettyä LT4- tai vastaavaa menetelmää, jossa kynnyksen yksinkertaisesti määrätään kuormitustasolle, jossa laktaattikonsentraatio ylittää 4 mmol/l (kuvio 7) tai jonkin muun vakioarvon, ei nykyään useinkaan suositella, sillä anaerobisen kynnyksen laktaattipitoisuus ei ole kaikilla sama (Aunola ja Rusko 1992; Faude, Kindermann ja Meyer 2009). Tangenttimenetelmässä anaerobinen kynnyksen määrätään puolestaan kohtaan, jossa laktaattiarvoihin sovitettuna käyrän tangenti saa ennalta määritetyn vakioarvon, kuten 45 tai 51 astetta, mutta LT4:n tapaan on kyseenalaista, sopiiko menetelmä eri yksilöille kiinteäkäyttöisen kulman vuoksi (Faude, Kindermann ja Meyer 2009). Näin ollen ohitetaan kyseisten menetelmien tulosten tarkemman esittelemisen, ja keskityn tässä osiossa yksilöllisyyden paremmin huomioon otaviin menetelmiin.

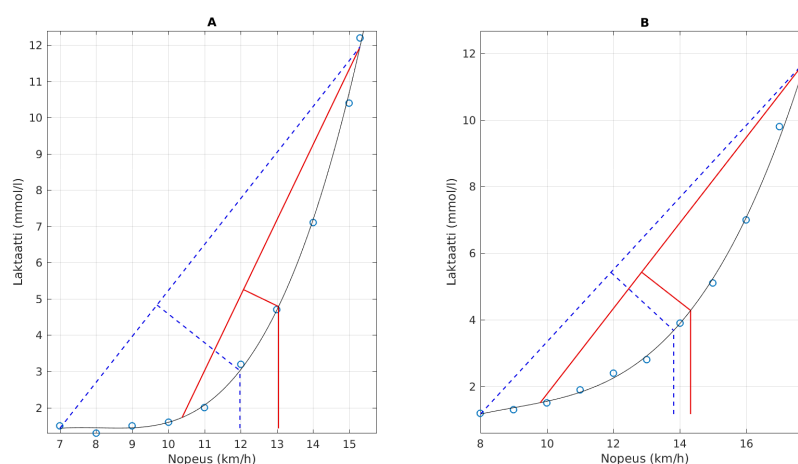


Kuvio 7. LT4-menetelmä. Punainen vaaka- ja pystyviiva osoittavat menetelmän määrittämän kynnyksen.

Kynnyskäsite	Menetelmä ja kuvaus
IAT	Laktaattikäyrän tangetti, joka leikkaa palautuksen aikaisen laktaattikäyrän kohdassa, jossa se on arvoltaan yhtä suuri kuin testin lopetusarvo
IAT	Laktaattikäyrän tangetti 51°
IAT	Laktaattikäyrän tangentti 45°
IAT	Laktaattiekvivalentin alimman kohdan tangentin ja viimeisen 90 sekunnin approksimoivan suoran leikkauspiste (nousevan kuorman testi)
IAT	Laktaattikäyrän eksponenttifunktiosovituksen ja ylemmän sekä alemman laktaattikäyrän tangenttien kulmanpuolittajan leikkauspiste
IAT	1,5 mmol/l yli pienimmän laktaattiekvivalentin
IAT	Toinen väh. 0,5 mmol/l laktaatin nousu edellisestä mitausarvosta
$D_{max}$	Suurin laktaattikäyrän etäisyys sen päätepisteiden kautta kulkevasta suorasta
$D_{mod}$	Suurin laktaattikäyrän etäisyys suorasta, joka kulkee käyrän ensimmäisen nousukohdan ja viimeisen kuorman mitaustuloksen kautta
Laktaatin käänköpiste	Viimeisin juoksunopeus ennen $AerK:n$ ja $VO_{2max}:n$ välisen yhtäkkisen ja pysyvän laktaattikonsentraation nousun havaintoa
Pienin laktaatinopeus	Pienin laktaattikonsentraatio nousevan kuorman testissä korkeaintensiteettisen kuormituksen jälkeen

Taulukko 2. AnK:ksi luokitellut laktaattikyynykset (Faude, Kindermann ja Meyer 2009). IAT = ”Individual anaerobic threshold” eli yksilöllinen anaerobinen kynnys.

$D_{max}$ -menetelmässä laktaattimittauksiin sovitetaan kolmannen asteen polynomi, ja anaerobinen kynnyks määritetään sitä käyrän pistettä, jossa käyrän etäisyys on suurin kuormituksen ensimmäisen ja viimeisen mittauspisteen kautta kulkevasta suorasta, vastaavalle kuormitus-tasolle (Zhou ja Weston 1997) (kuvio 8). Koska menetelmän antamaan tulokseen vaikuttaa aloituskuorman suuruus, on menetelmästä kehitetty  $D_{mod}$ -niminen (joskus  $D_{maxmod}$ ) muun-nelma, joka toimii muuten samoin kuin  $D_{max}$ , mutta suora kulkee aerobisen kynnyksen kautta (Bishop, Jenkins ja Mackinnon 1998)(kuvio 8).  $D_{mod}$ -menetelmän antama tulos on luonnol-lisesti riippuvainen aerobisen kynnyksen määritysmenetelmästä.



Kuvio 8.  $D_{max}$  ja  $D_{mod}$  menetelmät laktaattimittauksille kahdelle eri koehenkilölle. Siniset katkoviivat osoittavat  $D_{max}$ - ja punaiset yhtenäiset viivat  $D_{mod}$ -menetelmän (vrt. kuvio 4).

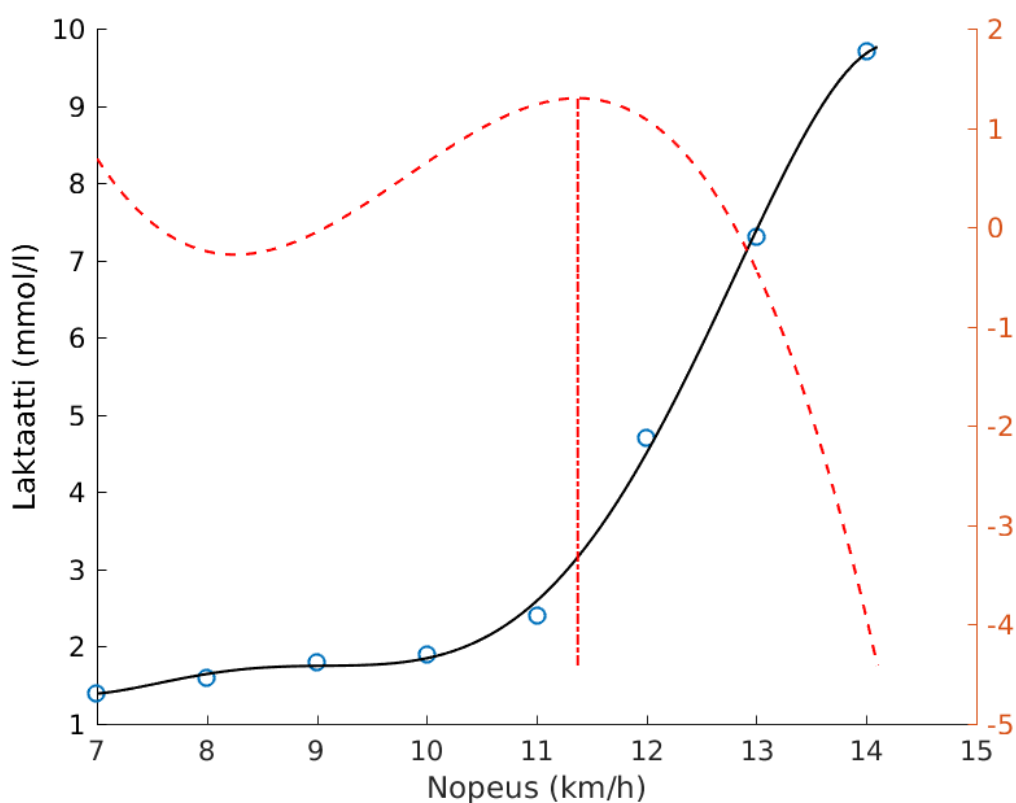
Fabre ym. (2010) vertasivat  $D_{max}$ - ja  $D_{mod}$ -menetelmiä visuaalisesti määritettyyn VT2-kynnykseen 23:lla kansainvälisen tason maastohiihtäjällä. Sekä  $D_{max}$  ( $r=0,97$ ), että  $D_{mod}$  ( $r=0,99$ ) korreloivat sykkeen osalta erittäin vahvasti VT2:n kanssa, mutta  $D_{max}$  antoi merkittävästi alhaisempia tuloksia kuin  $D_{mod}$  ja VT2, joiden välillä ei havaittu merkittävää eroa. Schuylenbergh, Eynde ja Hespel (2004) puolestaan vertasivat  $D_{mod}$ -menetelmää MLSS:ään kymmenellä valioluokan pyöräilijällä. He käyttivät  $D_{mod}$ :n aerobisena kynnyksenä laktaattikäyrän alinta kohtaa. Selitysaste  $D_{mod}$ :n ja MLSS:n välillä oli vahvaa ( $r^2 = 0,72$ ), mutta  $D_{mod}$  antoi merkittävästi MLSS:ää pienempiä tuloksia.  $D_{max}$  on ollut uinnin parissa suosittu menetelmä (Kari L. Keskinen 2010, s. 116). Kuten Zhou ja Weston (1997) huomauttavat,  $D_{max}$  on kuitenkin vain umpimähkäinen tapa löytää piste käyräsovitteesta, eikä mikään varsinaisesti

takaa, että se olisi sama kuin MLSS.

$D^2L_{max}$ -menetelmä on kehitetty voittamaan aloitus- ja lopetuskuorman aiheuttamat ongelmat. Menetelmässä laktaattimittauksiin sovitetaan sileä (eng. *smooth*) funktio, ja anaerobinen kynnyksen asetetaan kohtaan, jossa funktion kasvu kiihtyy nopeimmin, toisin sanoen funktion toisen derivaatan maksimiin:

$$D^2L_{max} = \max(D^2f(x)), \quad (3.9)$$

missä  $x$  on kuormitustaso,  $D^2$  toisen kertaluvun derivaattafunktio ja  $f$  on polynomi tai B-splini (vrt. luvussa 3.1 esitelty hengityskaasumenetelmä, jonka kehittivät Santos ja Giannella-Neto (2004)). (J. Newell ym. 2006; John Newell ym. 2007; Bentley, Newell ja Bishop 2007)



Kuvio 9.  $D^2L_{max}$ -menetelmä. Laktaattikäyrän polynomisovitteen (musta yhtenäinen, kasvava) arvoakseli on vasemmalla, polynomien toisen derivaatan (punainen katkoviiva) arvoakseli oikealla. Menetelmän antama kynnyksen on (punainen) pysty pistekatkoviiva.

Eri laktaattikynnyksimenetelmiä on verrattu lajinomaiseen suorituskykyyn melko laajasti. AerK-

menetelmät vaikuttaisivat ennustavan juoksukilpailutulosta hieman heikommin kuin AnK-menetelmät, mukaan lukien vakiolaktaattiarvoa käyttävät menetelmät. Tämä on arveltu johtuvan siitä, että AerK on yleensä selvästi kilpailukuormitusta alhaisempi. Yleisesti ottaen AerK- ja AnK-laktaattimenetelmien korrelaatio etenkin juoksusuorituskykyyn vaikuttaisi kuitenkin vahvalta. (Faude, Kindermann ja Meyer 2009)

## 4 Laskennallisten menetelmien testaaminen suomalaisella kuntotestiaineistolla

Tässä tutkimuksessa testataan eri laskennallisten menetelmien soveltuvuutta suomalaiseen kuntotestiaineistoon. Tämän osion alussa esitellään käytetty aineisto ja tarkastellaan sen eroavaisuuksia tyypillisiin kirjallisuudesta löytyneiden laskennallisten menetelmien testaamiseen käytettyihin aineistoihin. Lisäksi tässä osiossa tarkastellaan joitain esitellyistä menetelmistä löytyneitä ongelmia, joista osaan esitetään myös ratkaisuehdotuksia. Osion lopuksi testataan muutamaa erityyppistä ventilaatio- ja laktaattikynnysmenetelmää, joista osasta on testissä mukana eri muunnelmia.

### 4.1 Aineisto

Menetelmien testaamisessa käytetty aineisto koostui 27:stä 21–37-vuotiaille kestävyysliikuntalajeja harrastaville naisille ( $n = 15$ ) ja miehille ( $n = 12$ ) juoksumatolla suomalaisen käytännön mukaisesti suoritetusta suorasta hapenottotestistä. Aineisto kerättiin yhteistyössä Kilpa- ja huippu-urheilun tutkimuskeskuksen (KIHU) ja Jyväskylän yliopiston liikuntabiologian laitoksen kanssa. Kuormaa nostettiin kolmen minuutin välein nopeutta kasvattamalla. Mikäli koehenkilö ei jaksanut juosta viimeistä kuormaa kokonaan, kuorman nopeus merkittiin seuraavasti:

$$\text{nopeus}_{i-1} + \frac{\text{kuorman}_i \text{aika}}{3 \text{min}}, \quad (4.1)$$

missä  $\text{kuorma}_i$  on kesken jäänyt kuorma. Tarkempi kuvaus aineistosta ja testimenetelmistä on saatavilla Klab-ohjelman anaerobisen laktaattikynnyksen määrittämisen luotettavuutta testanneista töistä (Kainlauri 2017; Sampolahti 2017). Kyseisten töiden yhteydessä Klab-ohjelman anaerobisen kynnyksen laktaattimäärittämisen tulos validoitiin kahdesti tasavauhtisella juoksulla Klabin määrittämisen mukaisella rasiustasolla. Tasavauhtisten testien tuloksia ei ole tässä työssä käytetty, sillä validointitavasta johtuen niiden lisäarvo olisi parhaimmillaan suuntaa antava ja sekin vain osalla koehenkilöistä (ks. esim. Beneke, HÜtler ja LeithÄuser 2000; Smith ja Jones 2001).



Yleensä kuormitusten välisen tauon pituudelle kuntotestissä määrätään ennalta sovittu raja, jonka ylittyessä seuraavaan kuormitukseen lisätään minuutti, koska muuten kuormitus jäisi lyhytaikaiseksi. Tässä tutkimuksessa käytetyssä aineistossa kaikki tauot jäivät alle määrätyn 40 sekunnin rajan. Yleensä tauko kestää noin puoli minuuttia ja lyhenee testin loppua kohden, sillä verinäytteenotto on silloin kiihtyneen verenvirtauksen vuoksi nopeampaa. Taukojen tarkkoja pituuksia ei kuitenkaan ole tähän aineistoon kirjattu. Jatkossa termillä kuorma tarkoitetaan kolmen minuutin aikajaksoa, joka ensimmäistä lukuun ottamatta sisältää edellisen kuorman jälkeisen verinäytteenottotauon.

Tuloksista 15 hylättiin ventilaatiokynnysten määritysten osalta, sillä mittaustulosten todennukaisuutta ei voitu varmistaa testilaitteisto-ongelmien vuoksi. Näin ollen hengityskaasumäärittäisiin hyväksyttiin 12 koehenkilömittausta (seitsemän naista ja viisi miestä). Laktaattimittauksiin korjattiin kokeneen kuntotestauksen asiantuntijan näkemyksen mukaisesti selvästi virheelliset mittausarvot.

## 4.2 Aineiston ominaispiirteet

Laktaatinäytteiden vuoksi tehtävät kuormituksen pysäytykset vaikuttavat ventilaatioon, hapenottoon ja hiilidioksidintuottoon. Muutokset eivät kuitenkaan tapahdu samassa tahdissa, mikä on nähtävissä dataa tarkastelemalla, mutta kaasujen käyttäytymistä on myös tutkittu varsin perusteellisesti (Whipp 2007).

Jos rasitusta edeltää lepo, alle VT1:stä vastaavalla tasaisella rasitustasolla  $VO_2$  kasvaa monoeksponentiaalisesti jonkin verran nopeammin kuin  $VCO_2$ , joka puolestaan kasvaa hieman nopeammin kuin ventilaatio (Whipp 2007).  $VO_2$ :n on todettu saavuttavan tasannevaiheen noin kolmessa minuutissa, mutta myös selvästi lyhyempiä aikoja on havaittu (Brittain ym. 2001; A. M. Jones ym. 2011).  $\frac{VCO_2}{VO_2}$  kasvaa hetkeksi heti rasituksen loputtua (Whipp 2007). Jos kuormaa nostetaan suoraan edeltävästä kuormasta,  $VO_2$ :n kasvunopeus hieman hidastuu, mutta  $VCO_2$ :n sen sijaan nopeutuu (Brittain ym. 2001; Whipp 2007). Tämän tutkimuksen aineistossa lepoaika kuormien nostojen välissä on niin lyhyt, että hengityskaasumuuttujat eivät ehdi tasaantua tauon aikana.

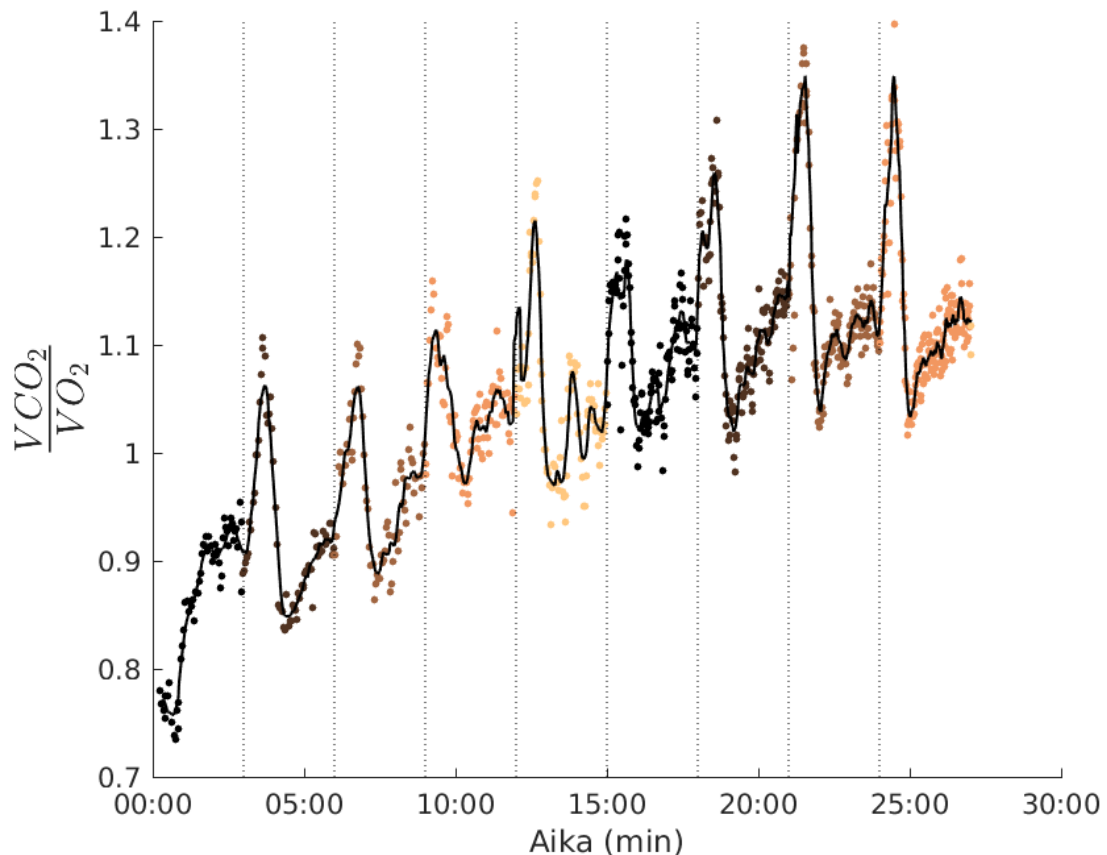
Lepotasosta VT1:n ylittäviin kuormiin siirryttäessä  $VCO_2$  käyttäytyy pääosin samaan tapaan

kuin kevyillä kuormilla. VT1:n ja VT2:n välisillä kuormilla se kuitenkin usein kasvaa hieman ”liikaa” ennen tasaantumistaan hieman huippuarvoa alemmalle tasolle. VT1:n ylittävällä tasolla  $VCO_2$ :n käyttäytymiseen vaikuttavat merkittävästi energiantuoton lisäksi veren puskurointimekanismi ja ventilaatio. VT1:n ylittävillä kuormilla  $VO_2$ :n kasvuun ilmaantuu niin sanottu hidaskasvuvaihe, toisin sanoen  $VO_2$ :lla kestää saavuttaa tasannevaihe kauemmin kuin kevyillä kuormilla.  $VO_{2max}$ :n ylittävillä kuormilla  $VO_2$ :n kasvuvauhti on kuitenkin sitä nopeampaa, mitä raskaampi kuorma on. (Brittain ym. 2001; Whipp 2007; A. Jones ym. 2008)

Kuormitusmallissa, jossa kuormaa nostetaan lyhyin väliajoin,  $VCO_2$  ja  $VO_2$  eivät ehdi saavuttaa tasannevaihetta, ja bikarbonaattipuskurointimekanismi on jatkuvasti samaan suuntaan epätasapainossa, minkä vuoksi  $\frac{VCO_2}{VO_2}$ -suhde on kuormitukseen nähden jatkuvasti ”koholla” (Whipp 2007). Sen sijaan tämän tutkimuksen aineistossa uloshengitysilman happi- ja hiilidioksidipitoisuuden eri tahtinen muutos kuormituksen keskeytyessä ja alkaessa aiheuttaa  $\frac{VCO_2}{VO_2}$ -suhteen heittelemistä (kuvio 10). Tämä näkyy myös  $(VO_2, VCO_2)$ -koordinaatistossa datapilven vinoumana (kuvio 11). Mikäli jokaisen kolmen minuutin kuorman ensimmäisen minuutin data poistetaan, vinoumasta (kuvion 11 vaaleanharmaat pisteet) häviää suurin osa. Tällöin myös datapilven origoa lähin osa katoaa.

Hengityskaasumuuttujien ja ventilaation jatkuvien satunnaisten heilahtelujen vuoksi on yleistä keskiarvoistaa muuttujat esimerkiksi kymmenen tai 20 sekunnin liukuvalla keskiarvolla (Beaver, Wasserman ja Whipp 1986; Ekkekakis ym. 2008; Wisén ja Wohlfart 2004). Jos tämän tutkimuksen datalle tehdään esimerkiksi yhdeksän peräkkäisen henkäyksen liukuva keskiarvoistus, kuormat erottuvat toisistaan  $(VO_2, VCO_2)$ -datapilvessä huomattavasti selkeämmin kuin ilman keskiarvoistusta, ja datapilven muoto epäsäännöllistyy (kuvio 12a). Mikäli keskiarvoistus puolestaan tehdään vain  $VCO_2$ -muuttujalle sen jälkeen, kun data on järjestetty  $VO_2$ :n mukaisesti, datapilvi säilyy yhtenäisempänä, mutta siihen voi muodostua visuaalisesti havaittavaa sahalaitakuviota (kuvio 12b). V-slope-menetelmässä datapilveä tasoitetaan sykkeeseen perustuvalla käsittelyllä, jonka tarkoitus on poistaa sellaisia  $VO_2$ :n heilahteluja, joiden perustana oleva fysiologinen ilmiö tunnetaan ja voidaan havaita (Beaver, Wasserman ja Whipp 1986). Normaalisti myös suomalaisessa kuntotestauksessa mitataan syke, mutta tämän tutkimuksen aineistossa sykearvoja ei ole käytössä.

Ventilaation käyttäytyminen testin aikana tämän tutkimuksen aineiston mukaisella koehen-

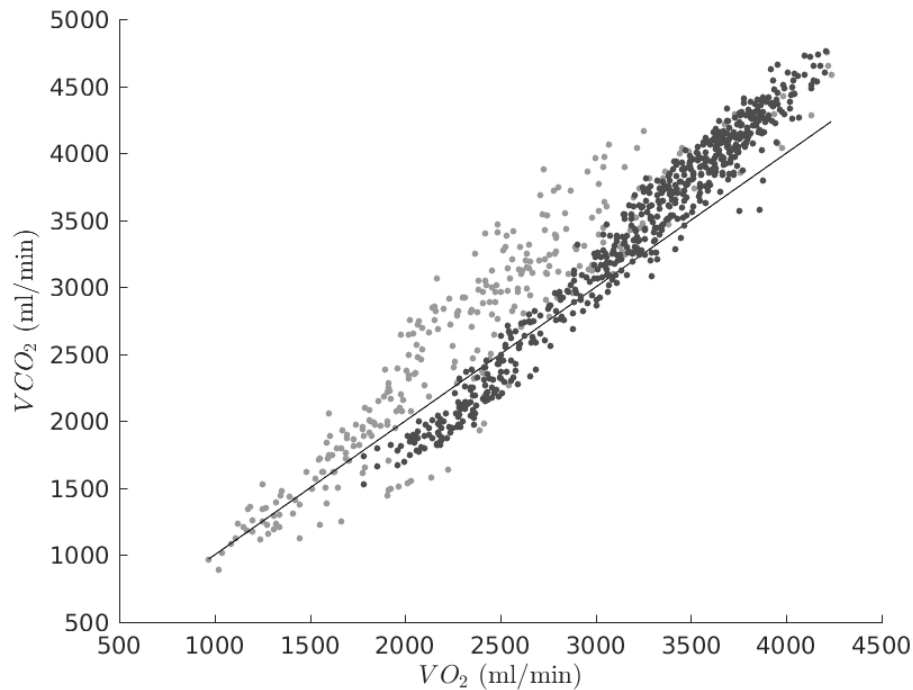


Kuvio 10. Hengitysilman hiilidioksidi- ja happipitoisuuden suhteen muutokset testin aikana. Kuormat on värikoodattu ja kuormien vaihtuminen (edellisen kuorman loppuminen) on merkitty pystyllä pisteviivalla. Yhdeksän henkäyksen liukuva keskiarvokäyrä kulkee datapisteiden keskellä.

kilöllä näkyy kuviossa 13. Kuorman loputtua ventilaatio alkaa laskea nopeasti. Uuden kuorman alkaessa ventilaatio myös nousee edelliselle tasolle nopeasti, mutta ei välttämättä yhtä nopeasti kuin se laskee kuorman loputtua.

### 4.3 Nykyisten menetelmien ongelmia ja mahdollisia ratkaisuja

Kirjallisuudesta löytyneiden ongelmien lisäksi joistain esitellyistä menetelmistä löytyi tämän tutkimuksen yhteydessä myös muita ongelmia. Osa ongelmista juontaa juurensa kuorman pysäytyksiin. Osa saattaa esiintyä yhtäläisenä tai lievempänä myös ilman pysähdyksiä

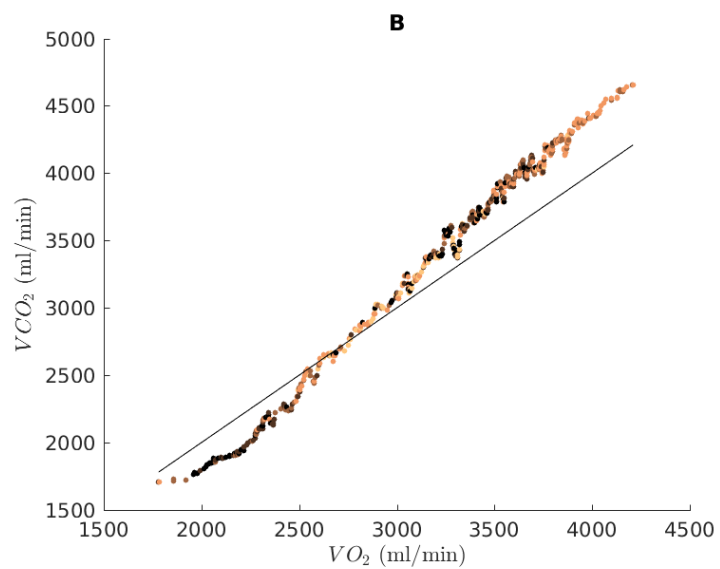
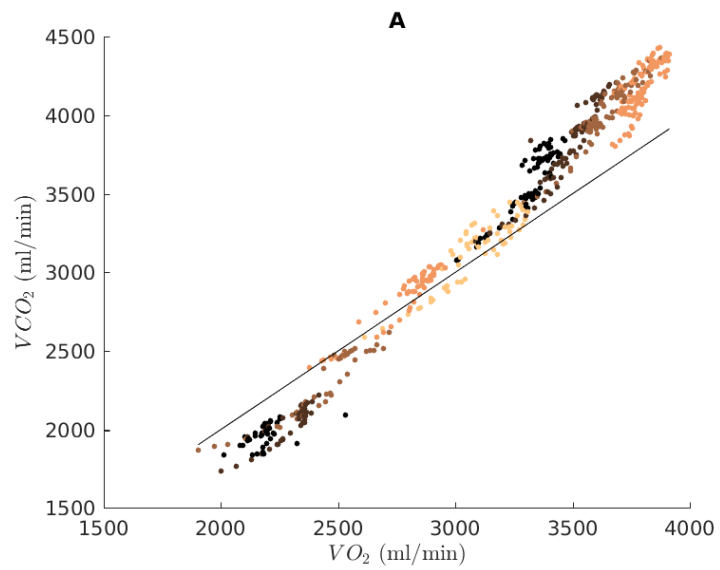


Kuvio 11. Ensimmäisen minuutin poiston vaikutus ( $VO_2, VCO_2$ )-datapilveen. Tummat pisteet jäävät jäljelle, jos datasta poistetaan jokaisen kolmen minuutin jakson ensimmäinen minuutti. Kuvioon on piirretty myös suora  $VCO_2 = VO_2$ .

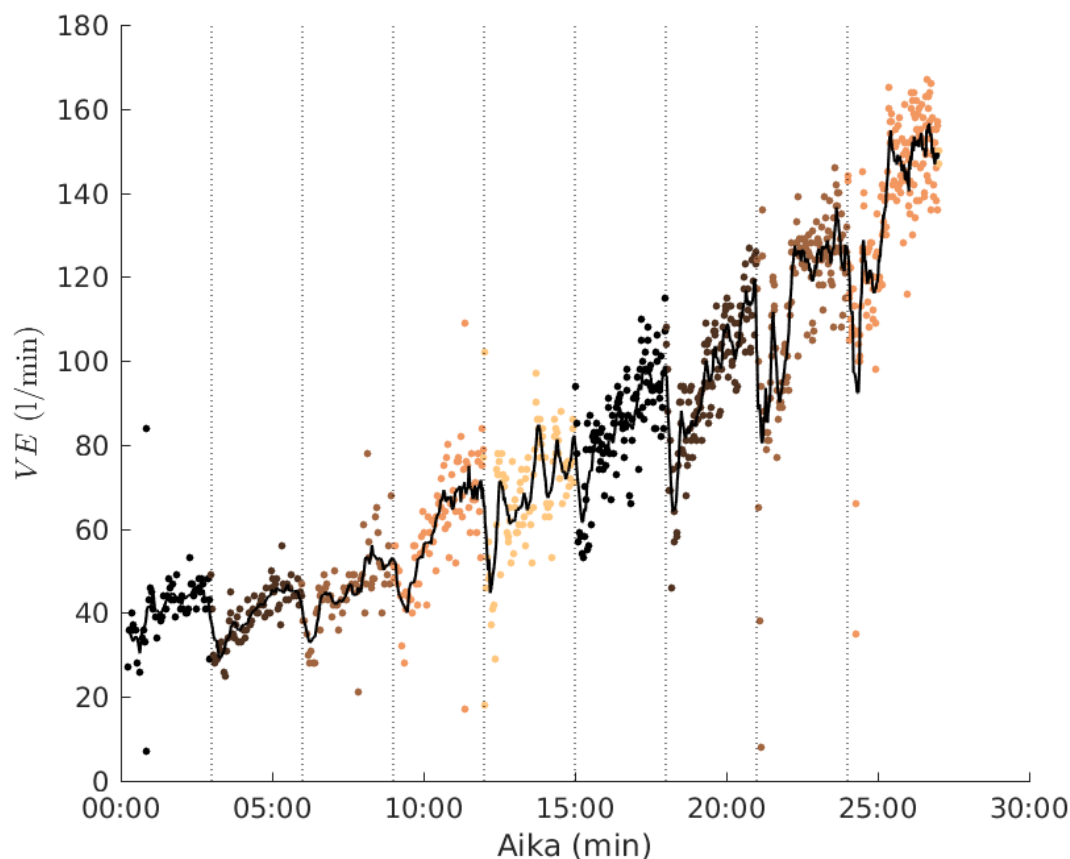
tehtävässä kuntotestausaineistossa, mutta siltä osin asiaa ei tässä tutkimuksessa tarkasteltu.

Esimerkiksi v-slope-menetelmään kuuluu anaerobisen kynnyksen määrittäminen osana aerobisen kynnyksen määrittästä. V-slopen AnK:n määrittäminen on lähes identtinen AerK:n määrittämiseen verrattuna, mutta se tehdään ( $VCO_2, VE$ )-datapilveen ( $VO_2, VCO_2$ ):n sijasta (ks. luku 3.1). AnK:n siirto koordinaatistosta toiseen ei kuitenkaan ole ongelmattomaa hiilidioksidintuoton ja hapenkulutuksen suhteen heittelemisen vuoksi (datapilvi on ”leveä”; kuvio 14). Ottamalla esimerkiksi yhdeksän (suuruusjärjestyksessä) peräkkäisen  $VCO_2$ -pisteen antaman vastaavan  $VO_2$ -pisteen keskiarvon saadaan siirto vakaammaksi. Tämä johtuu siitä, että todennäköisyys tapahtumalle  $VO_2^i > VO_2^{i+a}$ , missä  $VO_2^i$  on  $VCO_2$ :n mukaisesti järjestetyn pisteen arvo, pienenee, kun a kasvaa.

Kuormien ensimmäisten minuuttien poiston ja keskiarvoistuksen jälkeenkin muun muassa ( $VO_2, VCO_2$ )-datapilveen jää kuitenkin muutamia yksittäisiä ääripään arvoja. Näiden mu-



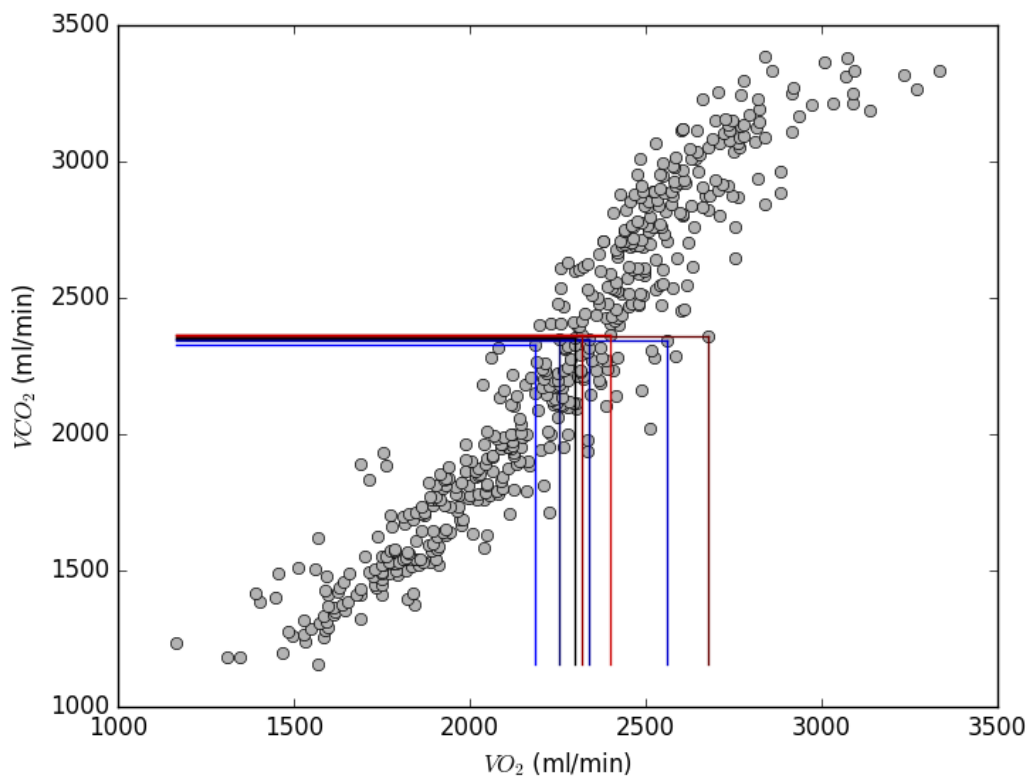
Kuvio 12. Muuttujien keskiarvoistuksen vaikutus ( $VO_2, VCO_2$ )-datapilveen. A: Molemmat muuttujat on keskiarvoistettu yhdeksän peräkkäisen henkätuntien liukuvalla ikkunalla kuormien ensimmäisten minuuttien poistoa ennen. B:  $VCO_2$  on keskiarvoistettu sen jälkeen, kun muuttujat on järjestetty  $VO_2$ :n mukaan ensimmäisten minuuttien poiston jälkeen. Kuormitustasot on värikoodattu.



Kuvio 13. Ventilaation muutokset testin aikana. Kuormat on värikoodattu ja kuorman vaihtuminen (edellisen kuorman loppuminen) on merkitty pisteiviivalla. Yhdeksän henkäyksen liukuva keskiarvokäyrä kulkee datapisteiden keskellä.

kaanotolla tai poisjätöllä voi olla menetelmien antamiin tuloksiin selvä vaikutus. Voi kuitenkin olla hankala vetää raja siihen, mitkä ovat tällaisia ei-haluttuja arvoja. Tässä työssä poistomäärän vaikutusta on lyhyesti testattu, ja lopullisissa menetelmissä päädyin ottamaan kymmenen pienintä ja suurinta mittauspistettä pois.

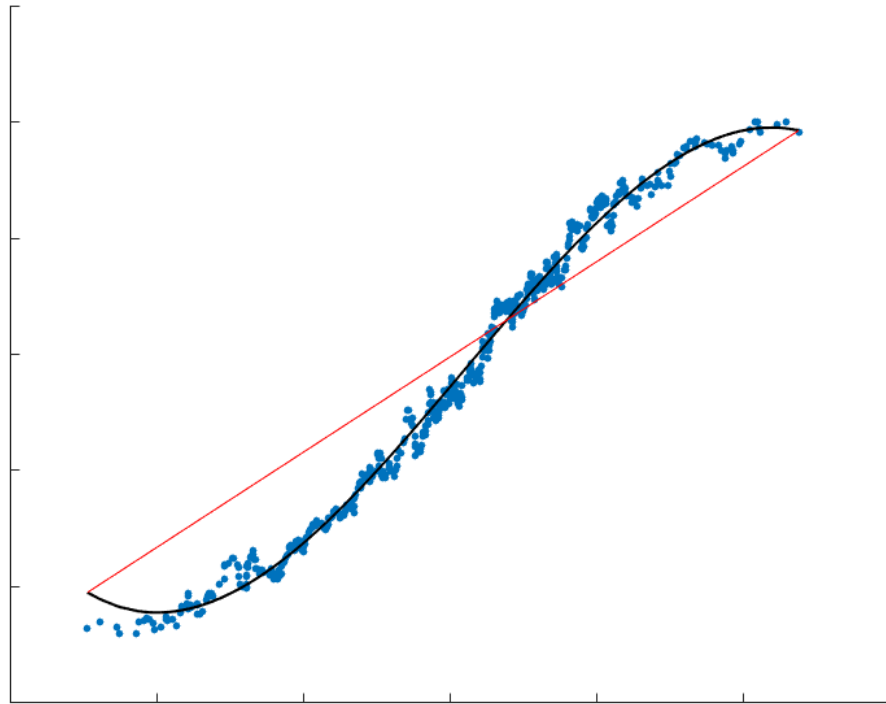
Wasserman, Beaver ja Whipp (1990) ehdottavat, että v-slope-menetelmässä voi aerobista kynnystä määritettäessä käyttää koko ( $VO_2, VCO_2$ )-datapilveä, sillä heidän mukaansa datapilven muoto on myös VT2:n jälkeen melko lineaarinen. Tämän tutkimuksen datalla joidenkin ventilaatiomenetelmien, mukaan lukien v-slopen, toimivuuden kannalta on kuitenkin tärkeää leikata anaerobisen kynnyksen yli menevät mittaustulokset pois ( $VO_2, VCO_2$ )-datapilveä



Kuvio 14. Kynnysten siirto koordinaatistoa toiseen ei ole ongelmattonta, jos x-akselin muuttuja vaihtuu. Jos hiilidioksidimuuttuja on järjestetty suuruusjärjestykseen, saattaa seuraava henkäys kuitenkin antaa selvästi eri suuren hapenkulutusarvon. Pystysuunnassa keskimäinen vaakaviiva on musta, sen alapuolella viivat ovat vaalenevasti sinertäviä ja yläpuolella vaalenevasti punertavia.

käytettäessä, sillä koko dataa käytettäessä datapilvi saattaa saada S:mäisen muodon (kuvio 15). Tällaisessa tilanteessa esimerkiksi sekä  $v$ -slope että  $D_{max}$  lakkaisivat luonnollisesti toimimasta tarkoituksenmukaisesti. AnK:n ylittävän datan poisjätöstä huolimatta  $v$ -slope saattaa kuitenkin edelleen antaa datapilven ulkopuolelle menevän tuloksen (kuvio 16).

Osa ihmisistä saavuttaa nousevan kuorman testissä hapenoton osalta tasannevaiheen, ja hapenotto saattaa käännyä laskuunkin, mutta kaikki eivät tasannevaihetta saavuta (Kari L. Keskinen 2010). Koska energiankulutus luonnollisesti edelleen lisääntyy kuorman kasvaessa maksimihapenoton saavuttamisen jälkeen, anaerobinen energiankulutus kasvattaa suhteellista osuuttaan yhä enemmän. Koska tämä saattaa aiheuttaa käytettävien muuttujien väliseen

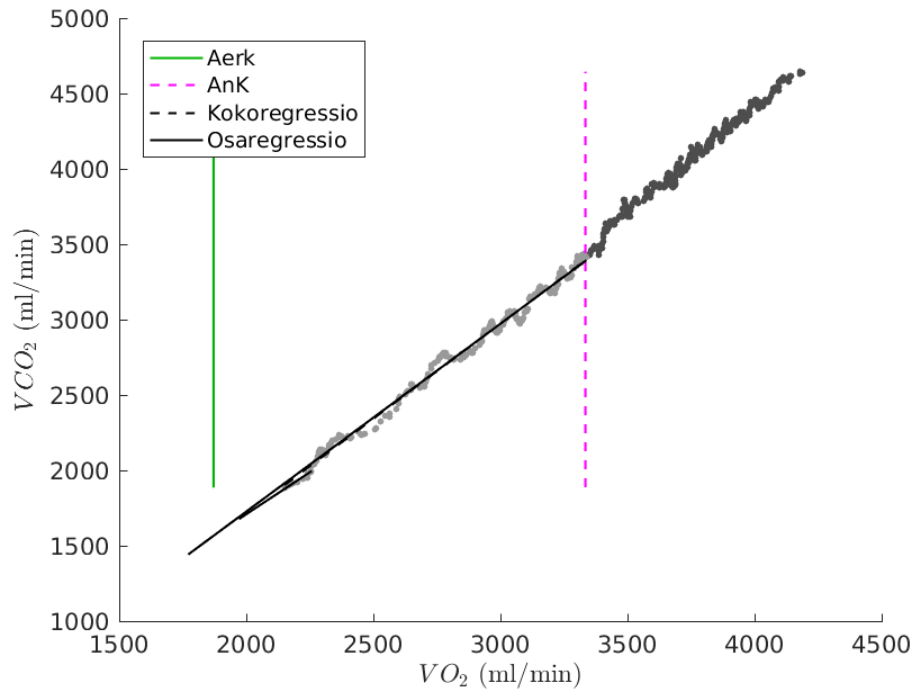


Kuvio 15. S:n muotoinen datapilvi muuttujilla  $VO_2$  ja  $VCO_2$ .  $D_{max}$ -menetelmä ei toimisi tarkoitetulla tavalla kyseisen kaltaisessa datapilvessä. Data on samalta koehenkilöltä kuin kuviossa 14.

suhteeseen epälineaarisuutta (esimerkiksi samalle hapenottoarvolle voi tulla kaksi selvästi eri suuruista hiilidioksidintuottoarvoa), voi se häiritä lineaariseen regressioon perustuvia menetelmiä siirtämällä esimerkiksi suorien leikkauspistettä (vrt. kuvio 24). Eliminoimalla kaikilta testattavilta  $VO_{2max}$ :n jälkeiset arvot voidaan varmistua, ettei tästä ilmiöstä johtuvaa epätoivottua epälineaarisuutta siirry kenenkään testattavan määrittämiseen mukaan otettavaan dataan.

Koska laktaattikonsentraation pitäisi aerobisen kynnyksen jälkeen olla sitä korkeampi, mitä suurempi kuorma on, voidaan (aidosti) monotonisesta kasvusta poikkeavat mittaustulokset ajatella esimerkiksi laktaattianalysoijan mittaustulokseksi.  $D_{max}$ - ja  $D_{mod}$ -menetelmissä käytettävä kolmannen asteen polynomisovite saattaa aaltoilla mittaustulosten mukaisesti, joten se ei välttämättä kuvaa laktaattikonsentraation käyttäytymistä tarkoituksenomaisesti (ku-





Kuvio 16. V-slope ei aina välttämättä toimi tarkoituksenmukaisesti, vaan saattaa määrittää kynnyksen datapilven ulkopuolelle. Kuvion mukainen tulos syntyi tämän tutkimuksen VslopeFit-menetelmällä. Tumma pistejoukko on AnK:n ylittävät mittaustulokset, vaalea pistejoukko AnK:n alittavat mittaustulokset, pysty katkoviiva (oikea, purppura) on menetelmän antama AnK, yhtenäinen pystyviiva (vasen, vihreä) on AerK, datapilven sisäinen musta katkoviiva koko mukaan otettavan datan regressiosuora ja mustat yhtenäiset viivat menetelmän regressiosuorat. Regressiosuorat ovat osittain päällekkäiset.

vio 17). Eksponenttifunktio muotoa  $f(x) = ae^{bx} + ce^{dx}$  sen sijaan ei kovin helposti aaltoile ja vaikuttaa myös sovittuvan mittauspisteisiin siten, kuin fysiologisen teorian pohjalta olettaisi (kuvio 18). Eksponenttifunktiosovitetta muotoa  $f(x) = a + be^{cx}$  ovat aiemmin testanneet muun muassa Wasserman, Beaver ja Whipp (1990), mutta se ei sovitettu kunnolla silloin, kun alimpien kuormien mittaustuloksissa on laskeva tai tasainen trendi. Edellä esitetty kahden eksponenttifunktion summafunktio sen sijaan sovituu hyvin myös tällaisissa tilanteissa (kuvio 19 a ja b) ja monimutkaisempina funktiona tavoittaa joitain muitakin muotoja paremmin (kuvio 19 c ja d).

Eksponenttifunktion käyttö ei kuitenkaan oikein sovellu  $D^2L_{max}$ -menetelmään, sillä koska eksponenttifunktion derivaatta on myös eksponenttifunktio, antaisi menetelmä usein tulokseksi viimeisen mittauspisteen, mikä on helppo todeta aineistoon kokeilemalla. Kolmannen asteen polynomisovituksen käytöllä menetelmä antaisi tulokseksi aina ensimmäisen tai viimeisen mittauspisteen (kolmannen asteen polynomin toinen derivaatta on suora). Tämän tutkimuksen aineistolla myös esimerkiksi viidennen asteen polynomin käyttö näyttäisi antavan tulokseksi usein viimeisen mittauspisteen (kuvio 20). Näin ollen  $D^2L_{max}$ -menetelmää ei testata tarkemmin tässä työssä.

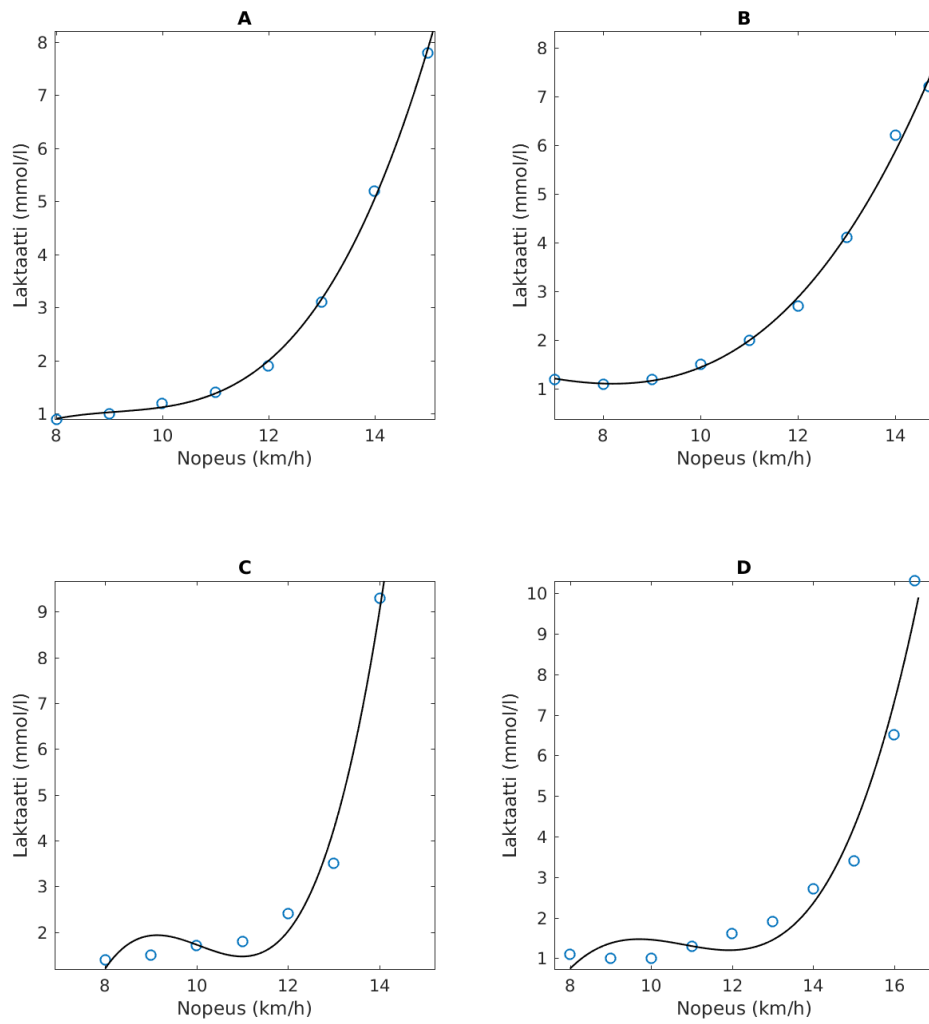
Laktaattimittauksen keskimääräistä muotoa voidaan yrittää tarkastella myös yhdistämällä mittaustulokset. Koska laktaattiarvot ja kuormien määrä vaihtelevat, täytyy arvot kuitenkin skaalata. Tarkastelua varten aineiston kaikkien koehenkilöiden laktaattiarvot skaalattiin välille 0 – 1:

$$La_s = \frac{La - \min(La)}{\max(La - \min(La))}, \quad (4.2)$$

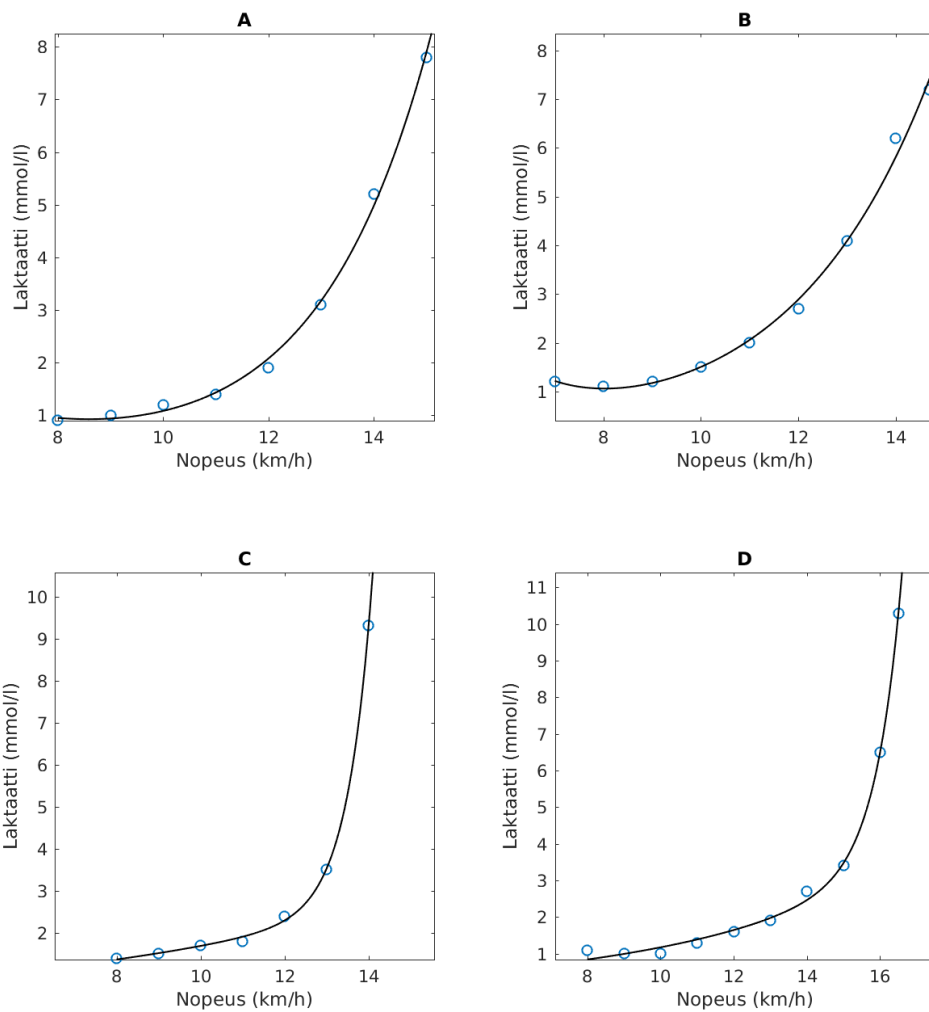
missä  $La_s$  on skaalattu laktaattivektori ja  $La$  alkuperäinen arvovektori. Laktaattiarvoja vastaavat nopeudet skaalattiin siten, että aerobinen kynnys asetettiin nollassa, ja maksiminopeus yhdeksi:

$$Nop_s = \frac{Nop - AerK}{\max(Nop - AerK)}, \quad (4.3)$$

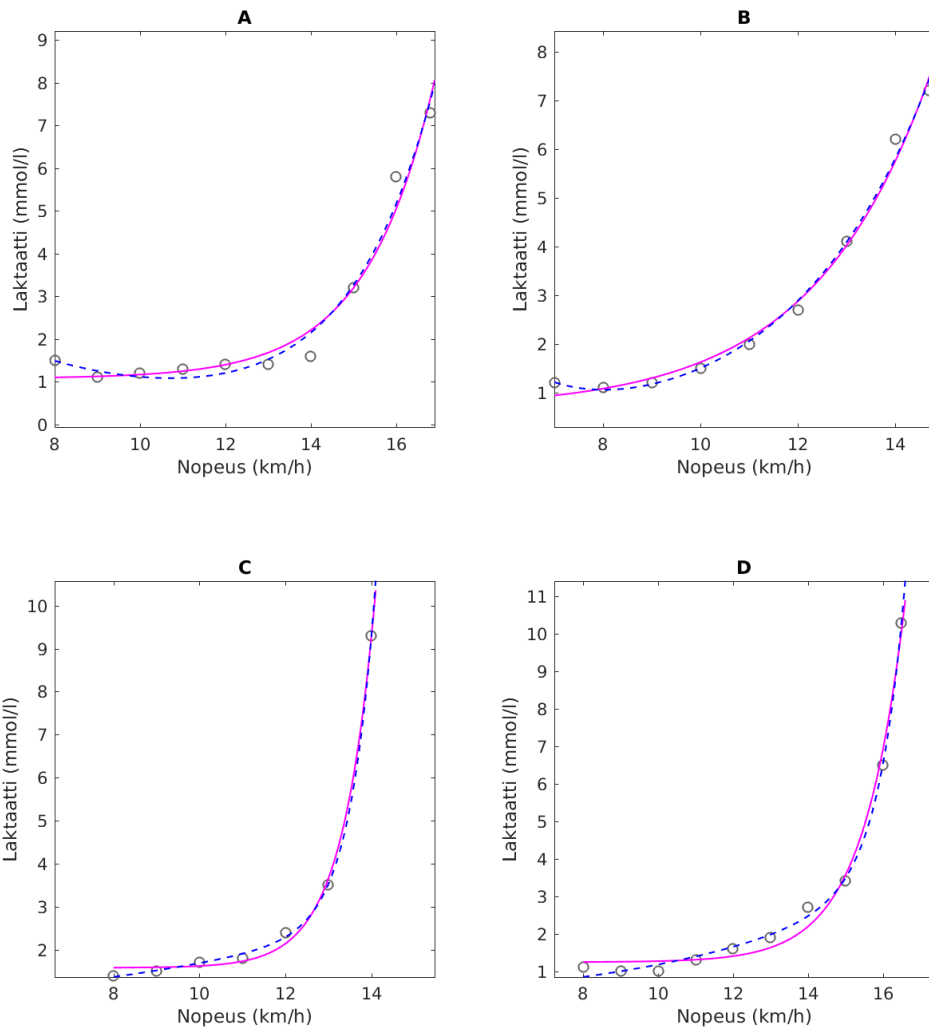
missä  $Nop_s$  on skaalattu nopeusvektori,  $Nop$  alkuperäinen nopeusvektori ja  $AerK$  määritetty AerK-nopeus. Aerobista kynnystä pienemmät nopeudet saavat siis negatiivisen arvon. Aerobinen kynnys laskettiin luvussa 4.5.2 esitellyllä menetelmällä. Yhdistettyihin mittaustuloksiin sovitettu kolmannen asteen polynomi aaltoilee, mutta eksponenttifunktiot muotoa  $f(x) = ae^{bx} + c$  ja  $f(x) = ae^{bx} + ce^{dx}$  sekä viidennen asteen polynomi sovituvat hyvin sa-



Kuvio 17. Kolmannen asteen polynomisovite laktaattimittauksiin. Välillä polynomi approksimoi mittauspisteitä hyvin (A ja B), toisinaan se aaltoilee selvästi (C ja D).



Kuvio 18. Eksponenttifunktiosovite muotoa  $f(x) = ae^{bx} + ce^{dx}$  laktaattimittauksiin. Funktion luonteesta johtuen se ei aaltoile, kuten kolmannen asteen polynomi saattaa tehdä. Tulokset ovat samoilta koehenkilöiltä kuin kuviossa 17.



Kuvio 19. Eksponenttifunktiosovitteet muotoa  $f(x) = ae^{bx} + c$  (purppura yhtenäinen viiva) ja  $g(x) = ae^{bx} + ce^{dx}$  (sininen katkoviiva) laktaattimittauksiin. Tulokset C ja D ovat samoilta koehenkilöiltä kuin kuvion 17 C ja D.

mantapaisesti (kuvio 21). Viidennen asteen polynomien toinen derivaatta saa maksimiarvonsa viimeisessä mittaupisteessä.

#### 4.4 Verrokkimenetelmät

Laktaattikynnysten vertailukohtana toimi kokoneen liikuntafysiologian ja kuntotestauksen asiantuntijan Klab-ohjelman avulla tehdyt kynnysmääritykset. Klab määrittää laktaattikynnykset seuraavanlaisesti (kuvio 22). Mittauspisteiden kautta piirretään paloittain lineaarinen funktio. Aerobinen kynnys on piste, jossa funktio saa 0,3 mmol/l:n korkeamman arvon kuin sen matalin arvo, toisin sanoen

$$AerK = \min(f) + 0,3, \quad (4.4)$$

missä  $f$  on laktaattifunktio ja 0,3 laktaattianalysaattorin mittausrvirheen vuoksi asetettu vakio. Anaerobista kynnystä varten Klab muodostaa AerK:n ja sitä seuraavan laktaattimittaus-tuloksen kautta kulkevan suoran, sekä lineaarisovitteiden kuormille, joissa laktaattipitoisuus nousee yli 0,8 mmol/l. Anaerobiseksi kynnukseksi Klab asettaa suorien leikkauspisteen.

Vertailukohtana käytetyt laktaattikynnysarvot asiantuntija määrittä Klabin tulosten pohjalta. Osan Klabin tuloksista asiantuntija muutti oman näkemyksensä mukaan vastaamaan paremmin haluttua kynnystä.

Ventilaatiokynnykset asiantuntija määrittä visuaalisesti Klab-ohjelman graafisen työkalun avulla (kuviot 23 ja 24). Työkalu piirtää haluttuun datapilveen kaksi lineaarisovitetta, joiden sovituspisteiden rajan käyttäjä saa valita. Testaaja hakee manuaalisesti rajaa siirtämällä kohdan, jossa AerK (lineaarisoitteiden leikkauspiste) näyttää olevan. Lineaarisoitteiden leikkauspisteen x- ja y-arvot näkyvät testaajalle.

#### 4.5 Testatut menetelmät

Tässä työssä testasin seitsemää ventilaatio- ja viittä laktaattimenetelmää. Ventilaatiomenetelmät kehitettiin kirjallisuudesta löytyneiden menetelmien pohjalta. Ventilaatiomenetelmistä yksi määrittää vain AerK:n, loput kuusi sekä AerK:n että AnK:n. Laktaattimenetelmistä yksi oli kirjallisuudesta ja neljä kehitettiin tässä työssä. Laktaattimenetelmistä yksi määrittää

AerK:n ja loput kolme AnK:n. Vertailukohtana käytin edellisessä luvussa esiteltyä visuaalista asiantuntijan määrittystä ventilaatiokynnyksille ja Klab-pohjaista asiantuntijan määrittystä laktaattikynnyksille. Menetelmät ohjelmin Python- ja Matlab-kielillä (Python 2.7.12; Matlab 9.1 (R2016b), MathWorks, Natick, Massachusetts, Yhdysvallat) testausta varten.

#### 4.5.1 Ventilaatiokynnysmenetelmät

Hengityskaasumuuttujia käyttävistä automaattisista menetelmistä mukana oli Ospliniksi (vain AerK) ja Vspliniksi nimeämäni uudet menetelmät sekä v-slope-menetelmästä viisi uutta variaatiota: VslopeFit, VslopeRaw, VslopeStrict, VslopeAll ja VslopeMax. Vslope-menetelmät eroavat toisistaan ja alkuperäisestä v-slopesta esikäsittelyn osalta, jotta sen vaikutusta voitaisiin tarkastella. Missään menetelmässä ei käytetä sykearvoja. Seuraavassa listassa on esitelty menetelmien erot.

- *VslopeStrict* on periaatteessa lähimpänä alkuperäistä v-slopea. Data suodatetaan yhdeksän peräkkäisen henkäyksen liukuvalla keskiarvoistuksella. Jokaisen kuorman ensimmäinen minuutti poistetaan. Kymmenen  $VCO_2$ :n mukaisesti suurinta arvoa poistetaan ( $VCO_2$ ,  $VE$ )-koordinaatistoon viennin jälkeen. Vastaavasti kymmenen  $VO_2$ :n mukaisesti suurinta arvoa poistetaan ( $VO_2$ ,  $VCO_2$ )-koordinaatistoon viennin jälkeen.
- *VslopeRaw* toimii kuten *VslopeStrict*, mutta ilman keskiarvoistusta.
- *VslopeFit*:ssä esikäsittelyn järjestys on eri kuin *VslopeStrict*:ssä: ensin jokaisen kuorman ensimmäinen minuutti poistetaan, sitten data vietään haluttuun koordinaatistoon ( $(VCO_2, VE)$ - ja  $(VO_2, VCO_2)$ ) x-akselin mukaisessa suuruusjärjestyksessä, jonka jälkeen menetelmä tekee kymmenen henkäyksen liukuvan keskiarvoistuksen. Kymmenen pienintä ja suurinta arvoa poistetaan viimeiseksi kuten *VslopeStrict*:ssä.
- *VslopeMax* toimii kuten *VslopeFit*, mutta mukaan otetaan vain data, joka on kerätty ennen  $VO_{2max}$ :n saavuttamista.  $VO_{2max}$ :ksi asetetaan kymmenen peräkkäisen henkäyksen keskiarvoistuksen jälkeen suurin hapenoton arvo.
- *VslopeAll* toimii kuten *VslopeFit*, mutta kuorman ensimmäisiä minutteja ei poisteta.
- *Vsplinissä* datan esikäsittely tehdään kuten *VslopeMax*:ssa, mutta kynnysten etsintäalgoritmina se käyttää ”breakpoint”-menetelmän tapaa (linearisplini yhdellä solmulla) v-slopen sijaan. Myös Vsplini määrittää AnK:n ( $VCO_2$ ,  $VE$ )- ja AerK:n ( $VO_2$ ,  $VCO_2$ )-

datasta.

- *Osplini* on AerK-menetelmä ja se toimii AerK:n määrittämisessä kuten *Vsplini*, mutta käyttää ( $VO_2$ ,  $VE$ )-dataa. Anaerobisena kynnyksenä *Osplini* käyttää *Vsplinin* määrittäystä.

Kuormista poistettavan datan määräksi valikoitui siis minuutti. Sitä suositteli kokenut kuntotestauksen ja liikuntafysiologian asiantuntija. Minuutti vaikuttaa olevan riittävä datapilven vinoumasta suurimman osan poistoon (kuvio 11). Myös Beaver, Wasserman ja Whipp (1986) käyttivät kuormituksen alkuosan poiston oletusarvona minuuttia, joskaan testi ei sisältänyt laktaattinäytteenottotaukoa ja datan poisto koski luonnollisesti vain testin ensimmäistä minuuttia.

Mikäli menetelmän AnK-määrittäminen osuu datapilven ulkopuolelle, menetelmä merkitsee AnK:n nollaksi, sillä koordinaatistomuutosta ei ole mielekäs tehdä datapilven ulkopuolisesta pisteestä. Tässä tapauksessa aerobista kynnystä ei voida määrittää.

Koordinaatistomuutoksen menetelmät tekevät yhdeksän henkäyksen keskiarvolla siten, että ne etsivät ensin suuruudeltaan anaerobista kynnystä lähimmän  $VCO_2$ -arvon, jonka jälkeen sen ja siitä neljän seuraavaksi suurempaa ja pienempää arvoa vastaavien  $VO_2$ -arvojen välinen keskiarvo merkitään anaerobiseksi kynnykseksi (vrt. kuvio 14). Koska keskiarvoistusta ei voi käyttää, jos menetelmä asettaa kynnyksen datapilven päähän, menetelmät käyttävät anaerobisen kynnyksen määrittämisessä soviteissaan vähintään 30 pistettä. 30 pistettä käytännössä takaa, että keskiarvoistusta voi käyttää.

Suurimpien ja pienimpien arvojen poistomäärän vaikutusta tarkasteltiin *Vsplini*- ja *VslopeMax*-menetelmillä. Testatut määrät olivat 5, 10, ja 15 suurinta ja pienintä arvoa.

#### 4.5.2 Laktaattikynnyksen menetelmät

Laktaattiarvoja käyttävistä menetelmistä testasin anaerobisen kynnyksen osalta  $D_{mod}$ -menetelmää sekä uusia  $D_{exp}$ -, lin-lin- ja puolivälimenetelmää, joita vertasin asiantuntijan Klab:n avulla määrittämään kynnyksen (jatkossa nimellä KlabAnK). Kaikki testatut AnK-menetelmät ovat riippuvaisia aerobisesta kynnyksestä, joten sen automaattinen määrittäminen kuuluu



myös menetelmiin. Automaattisten menetelmien käyttämä AerK:n määrittävän menetelmä on uusi ja nimesin kAerK:i. Sitä vertasin myös erikseen asiantuntijan Klab:n avulla määrittämään kynnykseen (jatkossa nimellä KlabAerK).

Aerobisen kynnyksen määritysmenetelmä kAerK etsii ensimmäisen mittauspisteen, joka täyttää ehdon

$$y_{i+1} - \frac{y_1 + \dots + y_i}{i} > 0.2, \quad (4.5)$$

missä  $y_i$  on kuorman  $x_i$  mittaustulos ja  $i$  kuorman järjestysnumero. Aerobinen kynnyks asetetaan kohtaan, jossa pisteiden  $(x_i, y_i)$  ja  $(x_{i+1}, y_{i+1})$  kautta kulkeva suora saa arvon  $y_i + 0.2$ . Keskiarvon käyttäminen vertailukohtana pienemmän arvon sijaan tekee menetelmän Klabia vähemmän alttiiksi yksittäisille laktaattiarvojen heilahduksille. Keskiarvo on minimiä suurempi, minkä kompensoimiseksi menetelmä käyttää kynnyskriteerinä arvoa 0,2 Klabin käyttämän arvon 0,3 sijaan.

Automaattiset anaerobisen kynnyksen laktaattimenetelmät on esitelty seuraavassa listassa. Kaikki listatut menetelmät käyttävät aerobisena kynnyksenä kAerK-menetelmää.

- $D_{mod}$  on esitelty aiemmin luvussa 3.3.  $D_{mod}$  laskee laktaattitason polynomisovitteesta.
- $D_{exp}$  on  $D_{mod}$  eksponenttifunktiosovitteella, joka on muotoa  $f(x) = ae^{bx} + ce^{dx}$ .  $D_{exp}$  laskee laktaattitason eksponenttifunktiosovitteesta.
- *Lin-lin* sovittaa havaintopisteisiin kaksiosaisen lineaarisplinin alkaen siitä mittauspisteestä, joka on lähinnä aerobista kynnystä, mutta korkeintaan yhtä suuri kuin AerK (vrt. Vsplini). Menetelmä asettaa AnK:n splinin solmuun. Lin-lin laskee laktaattitason funktiolla, joka on paloittain lineaarinen ja kulkee jokaisen mittaustulospisteen kautta. Laktaattiarvon laskutapa on siis sama kuin KlabAnK:lla.
- *Puoliväli* Asettaa kynnyksen AerK:n ja viimeisen kuormitustason puoleen väliin. Laktaattitason se laskee kuten Lin-lin. Puoliväli toimii eräänlaisena mittarina muille automaattisille menetelmille.

Laktaattiarvoissa (ja muissakin) oletetaan, ettei testiä ole aloitettu liian korkealta kuormalta, toisin sanoen koehenkilö on suorittanut vähintään kaksi alle aerobisen kynnyksen tasolla olevaa kuormaa. Mikäli ehto ei täyty, on kyseessä testajan aiheuttama harha tuloksessa, mikä ei ole laskennallisesti välttämättä korjattavissa. Tällaisten erikoistapauksien tunnistamista ja

korjaamista voidaan pitää eri tehtävänä kuin varsinaisten kynnyksenmenetelmien kehittämistä.

## 4.6 Tulokset

Koska ventilaatiomenetelmät tarvitsevat määritetyn AnK:n AerK:n määrittämiseen, tuloksissa esitetään tulokset tässä järjestyksessä. Molempien kynnyksen osalta tulos on hapenottoarvo. Laktaattimenetelmien tuloksista ensin esitetään AerK ja sitten AnK, sillä vertailtavat laktaattimenetelmät puolestaan tarvitsevat AnK:n määrittämiseen AerK:n määrittämisen. Laktaattimenetelmien tulokset ilmoitetaan juoksuopeutena, mutta myös laktaattitasoja tarkastellaan lyhyesti.

### 4.6.1 Ventilaatiokynnykset

Suurimpien ja pienimpien arvojen poistomäärän vaikutukset näkyvät anaerobisen kynnyksen osalta taulukoissa 3 ja 4. Molemmilla menetelmillä korrelaatio eri poistomäärien tulosten välillä oli erittäin vahvaa ( $r > 0,992$ ). Tulosten keskiarvojen erotus oli lähes nolla (1–29). VslopeMax määritti kuitenkin viiden arvon poisjätöllä yhden tuloksen datapilven ulkopuolelle (tulkittiin tässä tapauksessa määrittämättömäksi) ja viidentoista poisjätöllä epäonnistui yhdessä (eri) määrittämisessä.

	Vsplini15	Vsplini10	Vsplini5
Vsplini15	1	1	17
Vsplini10	0,997	1	16
Vsplini5	0,993	0,992	1

Taulukko 3. Suurimpien ja pienimpien arvojen poistomäärän vaikutus Vsplini-menetelmällä anaerobiseen kynnykseen. Nimen jäljessä oleva luku ilmoittaa poistomäärän. Vasen alakolmio ilmoittaa korrelaatiot, oikea yläkolmio keskiarvojen erotuksen.

Suurimpien ja pienimpien arvojen poistomäärän vaikutukset aerobisen kynnyksen osalta näkyvät puolestaan taulukoissa 5 ja 6. Vsplini antoi viiden suurimman ja pienimmän arvon poistolla jonkin verran erilaisia tuloksia kuin kymmenellä ja viidellätoista ( $r < 0,84$ ). Sen sijaan kymmenen ja viidentoista välillä ero oli vähäistä ( $r = 0,952$  ja keskiarvojen erotus 60). Myös VslopeMax:lla paras korrelaatio oli kymmenen ja viidentoista arvon poistolla ajetun

version välillä ( $r = 0,972$ ). VslopeMax:lla keskiarvojen erotus oli erittäin pieni (4–11). Kun poistettavat määrät olivat viisi ja viisitoista, VslopeMax ei voinut määrittää yksien koehenkilöiden tuloksia AnK-määrittysten epäonnistumisten vuoksi.

Epäonnistuneet määritykset anaerobiselle ja aerobiselle kynnykselle näkyvät taulukossa 7. Anaerobiselle kynnykselle VslopeFit ei antanut tulosta kahdessa, VslopeRaw neljässä ja VslopeAll yhdessä määrityksessä. Lisäksi VslopeFit ja VslopeStrict määrittivät kumpikin yhden kynnyksen (ID = 12) datapilven ulkopuolelle (ks. kuvio 16). Niillä koehenkilöillä, joille menetelmän anaerobisen kynnyksen määrittäminen epäonnistui, tulkittiin myös AerK automaattisesti epäonnistuneeksi. Lisäksi VslopeAll epäonnistui yhdessä aerobisen kynnyksen määrittämisessä, vaikka onnistuneesti määrittänyt koehenkilölle anaerobisen kynnyksen. VslopeMax, Vsplini ja Osplini antoivat tuloksen kaikissa määrityksissään.

Eri anaerobisten kynnysmenetelmien väliset korrelaatiot näkyvät taulukossa 8. VslopeRaw, VslopeMax ja Vsplini korreloivat erittäin vahvasti ja lähes yhtä hyvin asiantuntijan määrittämyksen kanssa ( $r = 0,97–0,98$ ) ja loput menetelmät selvästi huonommin ( $r = 0,54–0,67$ ).

Koska datapilven ulkopuolinen tulos kuitenkin heikentää tuloksia merkittävästi, korrelaatiot on laskettu myös vain niiden koehenkilöiden osalta, joille VslopeFit antoi tuloksen datapilven sisälle ( $n = 9$  paitsi VslopeRaw:lle ja VslopeAll:lle  $n = 8$ ; taulukko 9). Näillä koehenkilöillä myös VslopeFit ja VslopeStrict korreloivat erittäin vahvasti asiantuntijan kanssa, ja lukuun ottamatta VslopeAll-menetelmää, kaikkien menetelmien korrelaatiot olivat välillä  $0,97–0,99$ . Automaattisten menetelmien väliset korrelaatiot olivat pääosin hieman suurempia kuin 12 koehenkilöllä. Jos VslopeStrict:n osalta tarkastellaan niitä yhtätoista tulosta, jotka se määrittänyt datapilven sisälle, korrelaatio visuaaliseen menetelmään oli  $0,90$  (ei näy taulukoissa). VslopeAll-menetelmää lukuun ottamatta myös automaattisten menetelmien väliset korrelaatiot olivat erittäin suuria ( $r = 0,96–1$ ).

Aerobisten kynnysmenetelmien väliset korrelaatiot näkyvät vastaavalla tavalla kuin AnK:n osalta taulukoissa 10 ja 11. Kolmen koehenkilön poisjätön vaikutukset korrelaatioihin olivat jälleen vähäiset.

Korrelaatiot asiantuntijan määrittämiin kynnyksiin olivat selvästi heikompia kuin anaerobisen kynnyksen tapauksessa. Asiantuntijan määrittämykseen nähden Vsplinin korrelaatio oli  $0,92$

	VslopeMax15	VslopeMax10	VslopeMax5
VslopeMax15	1	2	29
VslopeMax10	0,998	1	26
VslopeMax5	0,995	0,993	1

Taulukko 4. Suurimpien ja pienimpien arvojen poistomäärän vaikutus VslopeMax-menetelmällä anaerobiseen kynnykseen. Nimen jäljessä oleva luku ilmoittaa poistomäärän. Vasen alakolmio ilmoittaa korrelaatiot, oikea yläkolmio keskiarvojen erotuksen.

	Vsplini15	Vsplini10	Vsplini5
Vsplini15	1	60	158
Vsplini10	0,952	1	99
Vsplini5	0,835	0,78	1

Taulukko 5. Suurimpien ja pienimpien arvojen poistomäärän vaikutus Vsplini-menetelmällä aerobiseen kynnykseen. Nimen jäljessä oleva luku ilmoittaa poistomäärän. Vasen alakolmio ilmoittaa korrelaatiot, oikea yläkolmio keskiarvojen erotuksen.

	VslopeMax15	VslopeMax10	VslopeMax5
VslopeMax15	1	-4	-4
VslopeMax10	0,972	1	11
VslopeMax5	0,9	0,874	1

Taulukko 6. Suurimpien ja pienimpien arvojen poistomäärän vaikutus VslopeMax-menetelmällä aerobiseen kynnykseen. Nimen jäljessä oleva luku ilmoittaa poistomäärän. Vasen alakolmio ilmoittaa korrelaatiot, oikea yläkolmio keskiarvojen erotuksen.

ID	VslopeFit	VslopeRaw	VslopeStrict	VslopeAll	VslopeMax	Vsplini	Osplini
AnK	4,5,12	4,5,6,12	12	12			-
AerK	4,5,12	4,5,6,12	12	3,12			

Taulukko 7. Epäonnistuneet ventilaatiokynnysmääritykset. Menetelmän alle on listattu epäonnistuneiden määritysten koehenkilöiden ID:t. Ospliniä käytettiin vain AerK:lle.

Korrelaatiot	Asiantuntija	VslopeFit	VslopeRaw	VslopeStrict	VslopeAll	VslopeMax	Vsplini
Asiantuntija	1						
VslopeFit	0,66	1					
VslopeRaw	0,97	0,99	1				
VslopeStrict	0,67	0,99	0,96	1			
VslopeAll	0,54	0,54	0,52	0,53	1		
VslopeMax	0,98	0,71	1,00	0,72	0,54	1	
Vsplini	0,98	0,71	0,99	0,73	0,56	0,99	1

Taulukko 8. Ventilaatiomenetelmien anaerobisen kynnyksen korrelaatiot

Korrelaatiot	Asiantuntija	VslopeFit	VslopeRaw	VslopeStrict	VslopeAll	VslopeMax	Vsplini
Asiantuntija	1						
VslopeFit	0,98	1					
VslopeRaw	0,97	0,99	1				
VslopeStrict	0,98	0,96	0,96	1			
VslopeAll	0,52	0,54	0,52	0,44	1		
VslopeMax	0,98	0,99	1,00	0,97	0,51	1	
Vsplini	0,99	0,98	0,99	0,98	0,52	1,00	1

Taulukko 9. Ventilaatiomenetelmien anaerobisen kynnyksen korrelaatiot, kun mukana olivat vain ne koehenkilöt (n = 9), joille VslopeFit antoi tuloksen datapilven sisälle.

riippumatta siitä, otettiin mukaan ne kolme koehenkilöä, joita VslopeFit ei voinut määrittää. VslopeMax:n korrelaatio oli toiseksi korkein ( $r = 0,87$ , kun  $n = 12$  ja  $n = 9$ ) ja Ospliniillä kolmanneksi korkein ( $r = 0,87$ , kun  $n = 12$  ja  $r = 0,85$ , kun  $n = 9$ ). VslopeRaw, joka epäonnistui samoilla koehenkilöillä kuin VslopeFit ja lisäksi vielä yhdellä, korreloi asiantuntijan kanssa paremmin ( $r = 0,73$ ) kuin VslopeFit ( $r = 0,65$ ). VslopeStrict ja VslopeAll korreloivat heikosti asiantuntijan määrityksen kanssa ( $r = 0,12-0,16$ ).

Automaattisten menetelmien väliset korrelaatiot olivat vaihtelevia ( $r = -0,29-0,97$ , kun  $n = 12$  ja  $r = -0,37-0,97$ , kun  $n = 9$ ). VslopeMax:n ja VslopeRaw:n välinen korrelaatio oli  $0,96$ , mutta VslopeFit:n ja VslopeRaw:n  $0,17$ . Korrelaatiot olivat suurimmat pääsääntöisesti niiden menetelmien välillä, jotka korreloivat hyvin myös asiantuntijan määrityksen kanssa.

Korrelaatiot	Asiantuntija	VslopeFit	VslopeRaw	VslopeStrict	VslopeAll	VslopeMax	Vsplini	Osplini
Asiantuntija	1							
VslopeFit	0,65	1						
VslopeRaw	0,73	0,17	1					
VslopeStrict	0,16	-0,18	0,38	1				
VslopeAll	0,16	0,34	0,16	-0,29	1			
VslopeMax	0,87	0,41	0,82	0,40	-0,10	1		
Vsplini	0,92	0,37	0,76	0,25	0,03	0,92	1	
Osplini	0,87	0,40	0,87	0,53	-0,02	0,97	0,88	1

Taulukko 10. Ventilaatiomenetelmien aerobisen kynnyksen korrelaatiot

Korrelaatiot	Asiantuntija	VslopeFit	VslopeRaw	VslopeStrict	VslopeAll	VslopeMax	Vsplini	Osplini
Asiantuntija	1							
VslopeFit	0,65	1						
VslopeRaw	0,73	0,17	1					
VslopeStrict	0,12	-0,18	0,38	1				
VslopeAll	0,15	0,34	0,16	-0,37	1			
VslopeMax	0,87	0,41	0,82	0,38	-0,06	1		
Vsplini	0,92	0,37	0,76	0,20	0,06	0,92	1	
Osplini	0,85	0,40	0,87	0,51	-0,02	0,97	0,86	1

Taulukko 11. Ventilaatiomenetelmien aerobisen kynnyksen korrelaatiot, kun mukana olivat vain ne koehenkilöt ( $n = 9$ ), joille VslopeFit antoi tuloksen.

Jatkotarkasteluun asiantuntijan määrityksen suhteen (t-testiin) otettiin mukaan VslopeFit, VslopeRaw, VslopeMax, Vsplini ja Osplini. VslopeAll jätettiin ulkopuolelle heikon molem-

pien kynnyksen korrelaation, ja VslopeStrict heikon aerobisen kynnyksen korrelaation vuoksi.

T-testin tulokset anaerobiselle kynnykselle näkyvät taulukossa 12. Kaikki menetelmät antoivat keskimäärin pienempiä tuloksia kuin asiantuntija, mutta mikään menetelmä ei kuitenkaan merkitsevästi aliarvioinut asiantuntijan määrittystä, kun käytössä olivat ne yhdeksän koehenkilöä, joille VslopeFit antoi tuloksen (VslopeRaw:n tapauksessa kahdeksan). Kahdellatoista koehenkilöllä Vsplini antoi merkitsevästi pienemmän tuloksen ( $p = 0,030$ ). VslopeMax sen sijaan jäi hieman  $0,05$ :n merkitsevyystason toiselle puolelle ( $p = 0,052$ ). Asiantuntijan ja menetelmän tulosten erotusten ( $X_i^a - X_i^k$ , missä  $X_i^a$  on asiantuntija määrittäminen koehenkilölle  $i$  ja  $X_i^k$  menetelmän  $k$  määrittäminen koehenkilölle  $i$ ) keskihajonta oli kaikilla menetelmillä noin  $100 \text{ ml/min}$  ( $91\text{--}122 \text{ ml/min}$ ).

	VslopeFit	VslopeRaw**	VslopeMax	Vsplini	VslopeMax*	Vsplini*
Keskiarvon ero	-53	-64	-53	-54	-72	-85
Erotusten keskihajonta	91	112	115	98	115	119
T-testi	0,116	0,152	0,201	0,136	0,052	0,030

Taulukko 12. T-testin tulokset anaerobiselle ventilaatiokynnykselle. Tähdellä merkityissä menetelmissä testi tehtiin kaikille koehenkilöille ( $n = 12$ ), ilman tähteä merkityissä niille, joille VslopeFit sai määritettyä kynnyksen ( $n = 9$ ). VslopeRaw sai määritettyä tuloksen kahdeksalle koehenkilölle. Luvut on laskettu asiantuntijan määrittäisiin verraten.

Kaikki menetelmät antoivat keskimäärin pienempiä tuloksia kuin asiantuntija, mutta mikään menetelmä ei kuitenkaan merkitsevästi aliarvioinut asiantuntijan määrittystä, kun käytössä olivat ne yhdeksän koehenkilöä, joille VslopeFit antoi tuloksen (VslopeRaw:n tapauksessa kahdeksan).

T-testin tulokset aerobiselle kynnykselle näkyvät taulukossa 13. Keskimäärin VslopeFit aliarvioi asiantuntijan määrittystä, VslopeMax antoi lähes saman tuloksen ja loput menetelmät yliarvioivat, mutta mikään ero ei ollut merkitsevä. Erotusten keskihajonta oli huomattavasti suurempaa kuin anaerobisen kynnyksen tapauksessa. Pienimmät erotusten keskihajonnat olivat Osplinillä ja Vsplinillä ( $227\text{--}292 \text{ ml/min}$ ), suurin VslopeFit:llä ( $441 \text{ ml/min}$ ), ja väliin asettuivat VslopeMax ja VslopeRaw ( $314\text{--}358$ ).

#### 4.6.2 Laktaattikynnykset

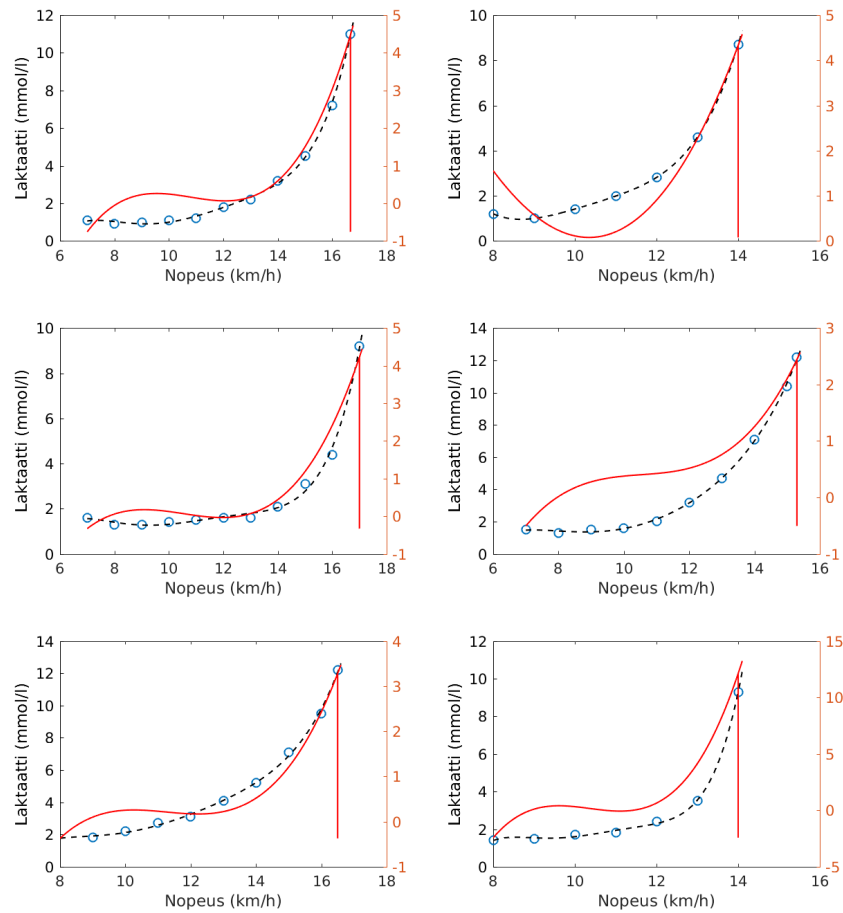
KlabAerK:n ja KAerk:n välinen korrelaatio nopeudelle oli 0,90. Keskiarvojen ero oli alle 0,1 km/h (0,09 km/h) ja erotusten keskihajonta 0,61 km/h. KlabAerK ja KAerk eivät poikenneet toisistaan merkitsevästi ( $p = 0,45$ ).

Eri anaerobisten kynnyksmenetelmien väliset korrelaatiot näkyvät taulukossa 14. Kaikki menetelmät korreloivat erittäin vahvasti KlabAnK:n kanssa ( $r = 0,91-0,95$ ). Automaattisten menetelmien välillä korrelaatio oli vahvinta  $D_{mod}$ :n ja  $D_{exp}$ :n välillä ( $r = 0,99$ ), mutta erityisen korkea myös  $D_{mod}$ :n ja puolivälin ( $r = 0,98$ ) sekä  $D_{exp}$ :n ja puolivälin kesken ( $r = 0,97$ ).

T-testin tulokset anaerobiselle kynnykselle (vertailukohtana KlabAnK) näkyvät taulukossa 15.  $D_{mod}$ ,  $D_{exp}$  ja lin-lin yliarvioivat KlabAnK:ta erittäin merkitsevästi ( $p < 0,001$ ). Puoliväli ei poikennut merkitsevästi KlabAnK:sta. Erotusten keskihajonta  $D_{mod}$ :n ja KlabAnK:n sekä  $D_{exp}$ :n ja KlabAnK:n välillä oli samaa luokkaa (0,44–0,45 km/h) ja hieman alempi kuin Puolivälin ja KlabAnK:n välillä (0,55 km/h), mutta  $D_{exp}$  antoi keskimäärin korkeampia tuloksia kuin  $D_{mod}$ . Lin-lin oli menetelmistä heikoin kaikilla mittareilla.

Laktaattitasoissa mitattuna korrelaatiot olivat heikompia (taulukko 16). KlabAnK:n ja automaattisten menetelmien kesken ne asettuivat välille 0,61–0,66.  $D_{mod}$ :n,  $D_{exp}$ :n ja puolivälin kesken korrelaatiot olivat jälleen selvästi muita korkeampia ja erittäin vahvoja ( $r = 93-0,95$ ).

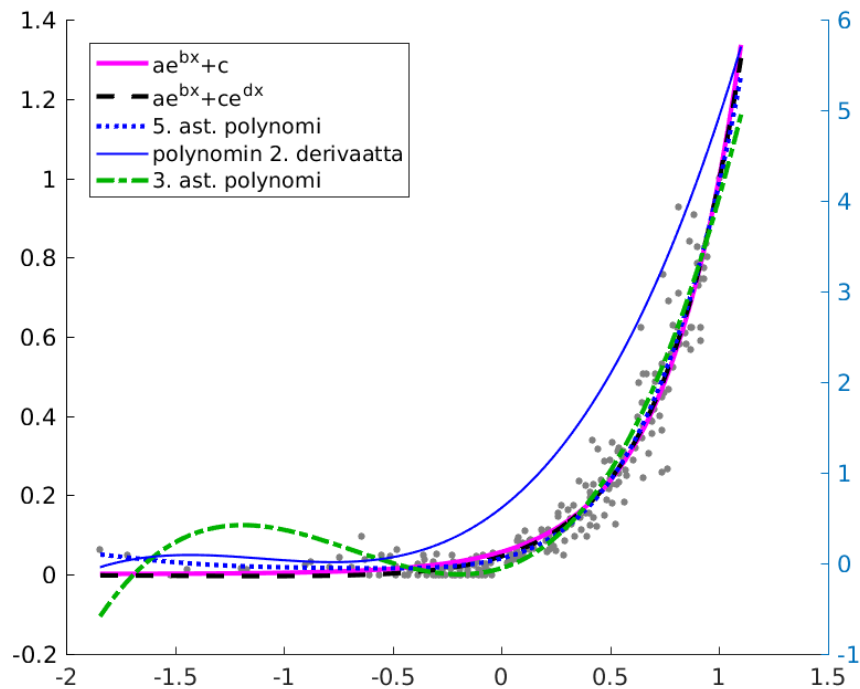




Kuvio 20.  $D^2l_{max}$  ei aina toimi tarkoituksenmukaisesti vaan antaa tulokseksi viimeisen mitauspisteen. Laktaattikäyrän viidennen asteen polynomisovitteen (musta katkoviiva) arvoakseli on vasemmalla, polynomien toisen derivaatan (punainen yhtenäinen viiva) arvoakseli oikealla. Menetelmän antama kynnyks on punainen pystyviiva.

	VslopeFit	VslopeRaw**	VslopeMax	Vsplini	Osplini	VslopeMax*	Vsplini*	Osplini*
Keskiarvon ero	-257	117	-14	126	100	-9	95	90
Erotusten keskihajonta	441	350	358	292	262	314	263	227
T-testi	0,119	0,376	0,911	0,231	0,285	0,925	0,237	0,198

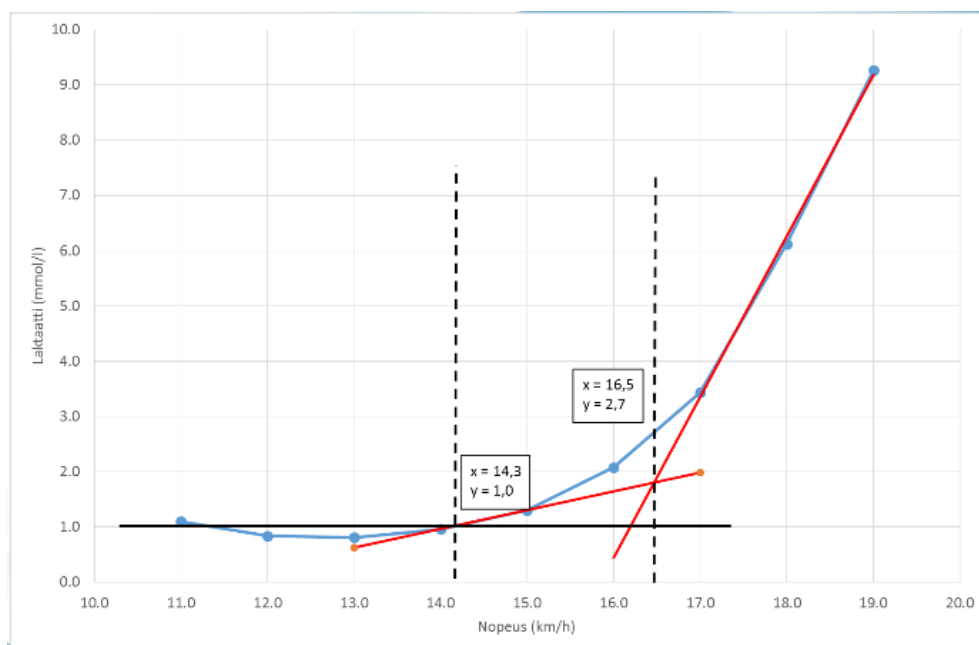
Taulukko 13. T-testin tulokset aerobiselle ventilaatiokynnykselle. Tähdellä merkityillä menetelmillä testi tehtiin kaikille koehenkiöille (n=12), ilman tähteä merkityillä niille, joille VslopeFit sai määritettyä kynnyksen (n=9). VslopeRaw sai määritettyä tuloksen kahdeksalle koehenkilölle. Luvut on laskettu asiantuntijan määrittämiin verraten.



Kuvio 21. Epälineaarisia sovitteita yhdistettyihin laktaattimittauksiin. Purppura yhtenäinen viiva:  $ae^{bx}+c$ , musta katkoviiva:  $ae^{bx}+ce^{dx}$ , sininen pisteiviiva: 5. asteen polynomi ja sininen yhtenäinen viiva: polynomin toinen derivaatta (arvoakseli oikealla), vihreä katkopisteiviiva: 3. asteen polynomi. Sovitteiden käyrät ovat osittain lähes päällekkäin.

Korrelaatiot	KlabAnK	Dmod	Dexp	Lin-lin	Puoliväli
KlabAnK	1				
Dmod	0,95	1			
Dexp	0,95	0,99	1		
Lin-lin	0,91	0,92	0,94	1	
Puoliväli	0,93	0,98	0,97	0,87	1

Taulukko 14. Laktaattimenetelmien anaerobisen kynnyksen korrelaatiot.



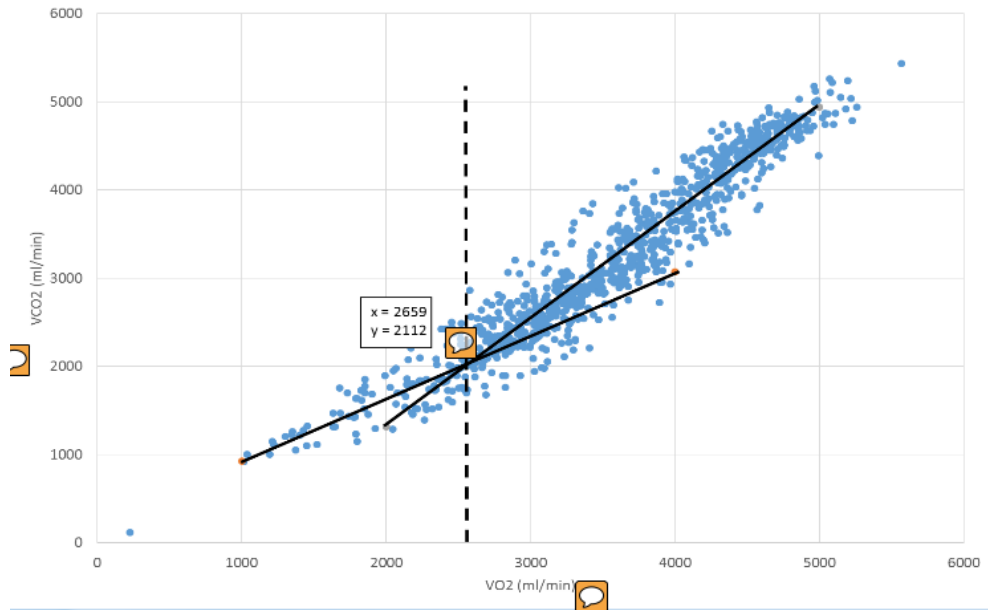
Kuvio 22. Klab-ohjelman laktaattikynnysten määrittymenetelmät. Musta vaakaviiva: matalin laktaattisovite + 0,3 mmol/l. Alempi punainen viiva: AerK:n ja sitä seuraavan laktaattimittauksen kautta kulkeva suora. Ylempi punainen viiva: yli 0,8 mmol/l nousevien havaintopisteiden kautta kulkeva lineaarisovite. (Nummela 2014)

	Dmod	Dexp	Lin-lin	Puoliväli
Keskiarvon ero	0,53	0,86	0,93	-0,06
Erotusten keskihajonta	0,45	0,44	0,73	0,55
T-testi	0,000	0,000	0,000	0,596

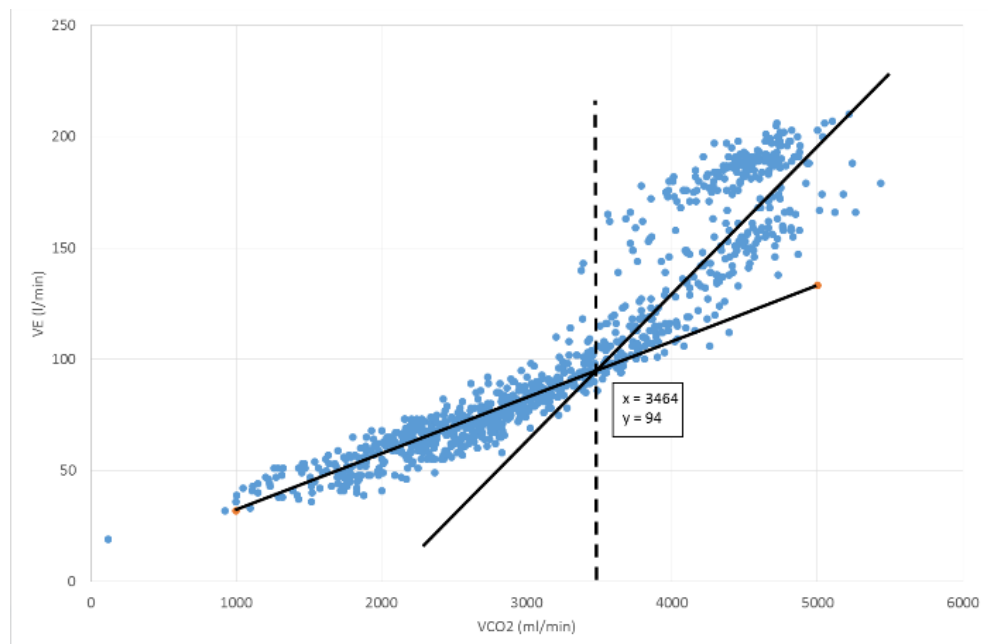
Taulukko 15. T-testin tulokset anaerobiselle laktaattikynnykselle. Luvut on laskettu KlabAnK:iin verraten.

Korrelaatiot	KlabAnK	Dmod	Dexp	Lin-lin	Puoliväli
KlabAnK	1				
Dmod	0,61	1			
Dexp	0,66	0,95	1		
Lin-lin	0,63	0,31	0,44	1	
Puoliväli	0,64	0,95	0,93	0,39	1

Taulukko 16. Laktaattimenetelmien anaerobisen kynnyksen laktaattitason korrelaatiot



Kuvio 23. Klab-ohjelman aerobinen kynnys hengityskaasumuuttujista  $VO_2$  ja  $VCO_2$ . Yhteinäiset suorat ovat lineaarisovitteita, katkoviiva on sovitteiden pisteiden rajakohta. (Nummela 2014)



Kuvio 24. Klab-ohjelman anaerobinen kynnys hengityskaasumuuttujista  $VO_2$  ja  $VE$ . Yhteinäiset suorat ovat lineaarisovitteita, katkoviiva on sovitteiden pisteiden rajakohta. (Nummela 2014)

## 5 Pohdinta

Tässä tutkimuksessa tarkasteltiin kirjallisuudesta löytyviä aerobisen ja anaerobisen kynnyksen määrittämenetelmiä ja niiden soveltuvuutta suomalaiseen kuntotestausprotokollaan. Löydettyjä menetelmiä kehitettiin erityisesti suomalainen testausprotokolla silmällä pitäen ja menetelmien tarkkuuksia verrattiin suhteessa asiantuntijan määrittämiin kynnyksarvoihin. Kehitettyjä ventilaatiomenetelmiä olivat Osplini, Vsplini, VslopeFit, VslopeRaw, VslopeStrict, VslopeAll sekä VslopeMax ja laktaattimenetelmiä  $D_{exp}$ -, lin-lin- sekä puolivälimenetelmä.

Parhaat ventilaatiomenetelmät olivat Vsplini, Osplini ja VslopeMax. Vsplini ja VslopeMax pääsivät anaerobisen kynnyksen osalta huomattavan korkeaan korrelaatioon asiantuntijan määrittämien kanssa, jos tuloksia peilaa kirjallisuudesta löytyviin vertailuihin. Aerobisen kynnyksen osalta minkään menetelmän tulokset eivät olleet yhtä hyviä kuin AnK:n osalta. Parhaat AerK-menetelmät Vsplini, Osplini ja VslopeMax olivat silti kirjallisuudesta löytyneisiin tuloksiin nähden hyvällä tasolla. Vsplini, Osplini ja VslopeMax pystyivät myös ainoina testatuista ventilaatiomenetelmistä määrittämään kynnykset kaikille koehenkilöille.

Laktaattimenetelmät yliarvioivat anaerobista kynnystä selvästi lukuun ottamatta puolivälimenetelmää, joten menetelmät eivät ole erityisen onnistuneita. Uusi aerobisen laktaattikynnyksen määrittämenetelmä kAerK ei poikennut merkittävästi asiantuntijan määrittämisestä, joten se tarjoaa vaihtoehdon Klab-ohjelman käyttämälle menetelmälle.

Erityisesti ventilaatiokynnyksen kohdalla koehenkilöjoukon vähyys tekee tulosten tulkinnasta epävarmaa. Myös menetelmien validoinnissa käytettyihin vertailumäärittämiin tulee suhtautua varauksella, sillä ne edustavat vain yhden asiantuntijan näkemystä. Yhden tai useamman asiantuntijan käyttö validoinnissa on kuitenkin yleistä tämän kaltaisissa tutkimuksissa. Laktaattimenetelmien tuloksia tarkasteltaessa tulee ottaa huomioon, että menetelmät ovat riippuvaisia aerobisen kynnyksen määrittämisestä. Ventilaatiomenetelmien tarkastelussa puolestaan tulee huomioida, että aerobisen kynnyksen määrittämiset ovat riippuvaisia menetelmien määrittämisestä anaerobisista kynnyksistä.

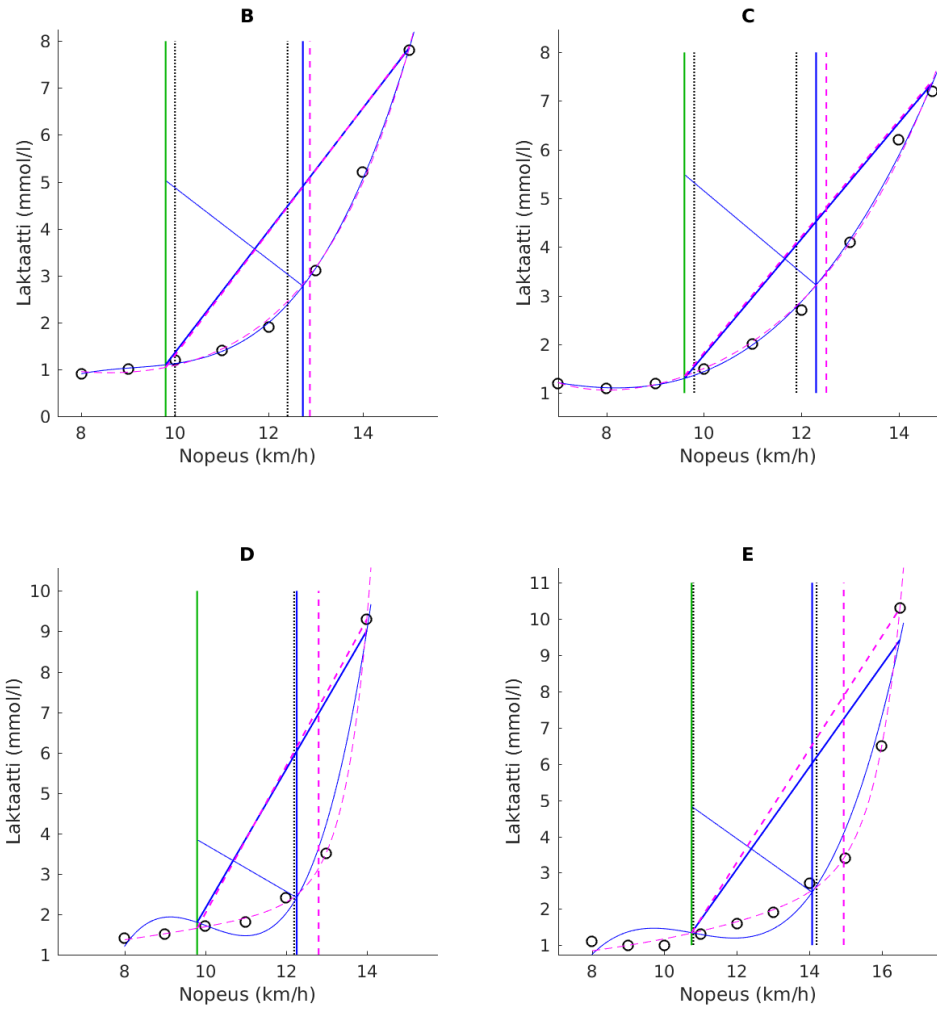
## 5.1 Menetelmien tarkkuudet

Vaikka lähes kaikkien menetelmien korrelaatiot asiantuntijan määrittämiseen nähden olivat anaerobisen ventilaatiokynnyksen osalta hyvin korkeita, paras menetelmä AnK:n määrittämiseen oli tässä tutkimuksessa Vsplini. Sen korrelaatio oli korkein ja toisaalta erotusten keskihajonta toiseksi matalin. VslopeFitillä oli matalampi erotusten keskihajonta, mutta se epäonnistui kolmessa määrittämisessä kahdestatoista. Vsplinin etuna onkin se, että se määrittää aina kynnyksen pilven sisälle. Vslope-menetelmistä VslopeMax pärjäsikin parhaiten, joten datan rajoittaminen  $VO_{2max}$ :iin vaikuttaa onnistuneelta ratkaisulta.

Aerobisen ventilaatiokynnyksen osalta parhaat menetelmät olivat Vsplini ja Osplini. Vspliniillä oli suurin korrelaatio asiantuntijan määrittämisen kanssa, mutta Osplini määrittänyt kynnykset keskimäärin hieman lähemmäs asiantuntijan määrittämistä, ja myös hieman pienemmällä keskihajonnalla. Koska systemaattista virhettä on kuitenkin mahdollista korjata, Vsplini suuremman korrelaation vuoksi saattaisi olla parempi käytössä. Vslope-menetelmistä VslopeMax oli selvästi paras, vaikka sen aerobisen kynnyksen määrittäminen on identtinen VslopeFit:n kanssa – ainoastaan VT2 eli datapilven yläraja on mahdollisesti eri kohdassa. Näiden kahden menetelmän tulosten eroavaisuus aerobiselle kynnykselle on mielenkiintoista, sillä menetelmien suorituskyky AnK:n osalta vaikuttaisi erittäin samankaltaiselta. VslopeFit:n ja VslopeMaxin välisen AerK-määrittämisen korrelaatio oli kuitenkin vain 0,41.

Sekä  $D_{mod}$  että  $D_{exp}$  yliarvioivat asiantuntijan Klabin määrittämisen pohjalta määrittämää anaerobista kynnystä, mutta  $D_{mod}$ :n yliarvio oli vähäisempää.  $D_{mod}$ :n käyttämien polynomien joidenkin koehenkilöiden kohdalla tapahtuvan aaltoilun vaikutus vaikuttaisikin olleen menetelmän tulokselle edullinen (kuvio 25). Polynomisovite näyttää aaltoilevan aina saamaan tapaan mutta vaihtelevan määrän suhteessa eksponenttifunktiosovitteeseen. Tämän vuoksi  $D_{mod}$  määrittää AnK:n matalammalle kuormalle kuin  $D_{exp}$  ja sitä matalammalle, mitä enemmän  $D_{mod}$  aaltoilee. Laktaattimenetelmien AnK-määrittämisessä eräs ongelma on se, etteivät niiden käyttämät AerK:t täysin vastaa asiantuntijan Klabin tuloksen pohjalta tekemiä AerK-määrittämiä. Toisaalta menetelmät yliarvioivat KlabAnKia usein silloinkin, kun niiden käyttämä AerK oli sama tai matalampi kuin KlabAerK (kuvio 25).

Kuinka tarkka menetelmän on oltava ollakseen tarkka? Kynnysten määrittäminen urheili-



Kuvio 25.  $D_{mod}$  yliarvioi KlabAnKia vähemmän kuin  $D_{exp}$ . Vasen (vihreä) pystyviiva = automaattisten menetelmien AerK, vasen musta pysty pisteviiva = KlabAerK, oikea musta pysty pisteviiva = KlabAnK, siniset yhtenäiset viivat ja käyrät =  $D_{mod}$ , purppurat katkoviivat ja -käyrät =  $D_{exp}$ .  $D_{exp}$ :n kynnyksiiviiva on joka kuviossa oikeanpuoleisin. Tulokset ovat samoilta koehenkilöiltä kuin kuviossa 17.

joille tulisi olla vähintään 1–3 % (Kari L. Keskinen 2010, s. 65). Jos oletetaan 60 kg painava juoksija, jonka  $VO_{2max}$  on 60 ml/min/kg eli 3600 ml/min, vastaisi 1–3 %:n väli  $VO_{2max}$ :sta laskien 36–108 ml/min:a. AnK:n osalta tässä tutkimuksessa asiantuntijan määrittystä lähimpänä olevien ventilaatiomenetelmien erotusten keskihajonnat pääsivät siis välin ylärajan tuntumaan, mutta parhaidenkin VT1-menetelmien keskihajonta oli yli kaksinkertainen (selvästi yli 200 ml/min). Nopeudessa mitattuna 1–3 % puolestaan vastaisi 0,2–0,6 km/h, jos juoksijan (maksimi)nopeus olisi 20 km/h, ja 0,15–0,45 km/h, jos nopeus olisi 15 km/h. Tämän tutkimuksen koehenkilöistä suurimmalla osalla viimeisen kuorman nopeus asettui välille 15–20 km/h.  $D_{mod}$  ja  $D_{exp}$  korreloivat hieman puoliväliä paremmin asiantuntijan kanssa, ja erotuksen keskihajonta oli niillä hieman pienempi, mutta kaiken kaikkiaan voinee todeta, etteivät tässä tutkimuksessa testatut laktaattikynnysmenetelmät anna tyydyttäviä tuloksia urheilutes-tauksen näkökulmasta.

## 5.2 Pienimpien ja suurimpien havaintopisteiden poistomäärä

Pienimpien ja suurimpien datapisteiden poistomäärällä oli jonkin verran vaikutusta ventilaatiomenetelmien tuloksiin. Koska tämän tutkimuksen menetelmät käyttävät kymmenen henkikäyksen keskiarvoitusta, voidaan minimimääränä pitää neljän suurimman ja pienimmän datapisteen poisjättöä. Vaikuttaisi kuitenkin siltä, että viisi pistettä ei riitä poistamaan kaikkia pilven ulkopuolisia tai sen ääripäitä ”vääntäviä” pisteitä. Myös kymmenen pistettä saattaa olla joissain tapauksissa liian vähän, sillä käytössä olleella pienellä koehenkilöjoukolla ei rajaa voi yleispätevästi etsiä.

Datapisteitä ei tule toki liikaakaan poistaa. Ensimmäiset kuormat saattavat kestää noin 50–60 henkäystä joillain koehenkilöillä, mutta havaintopisteiden määrä vähenee kolmasosalla ensimmäisen minuutin poiston myötä. AerK saattaa asettua toisen ja kolmannen kuorman väliin ja AnK puolesta kaksi kuormaa ennen testin loppua (Kari L. Keskinen 2010, s. 114), joten kynnystä ennen tai sen jälkeen pilveä saattaa olla ”jäljellä” esimerkiksi noin 70 havaintopistettä.

Tässä tutkimuksessa päädyttiin mahdollisimman pieneen poistomäärään, jotta koko pilvi saataisiin mukaan, ja menetelmiä voitaisiin testata sellaisena kuin ne on tarkoitettu. Datapis-



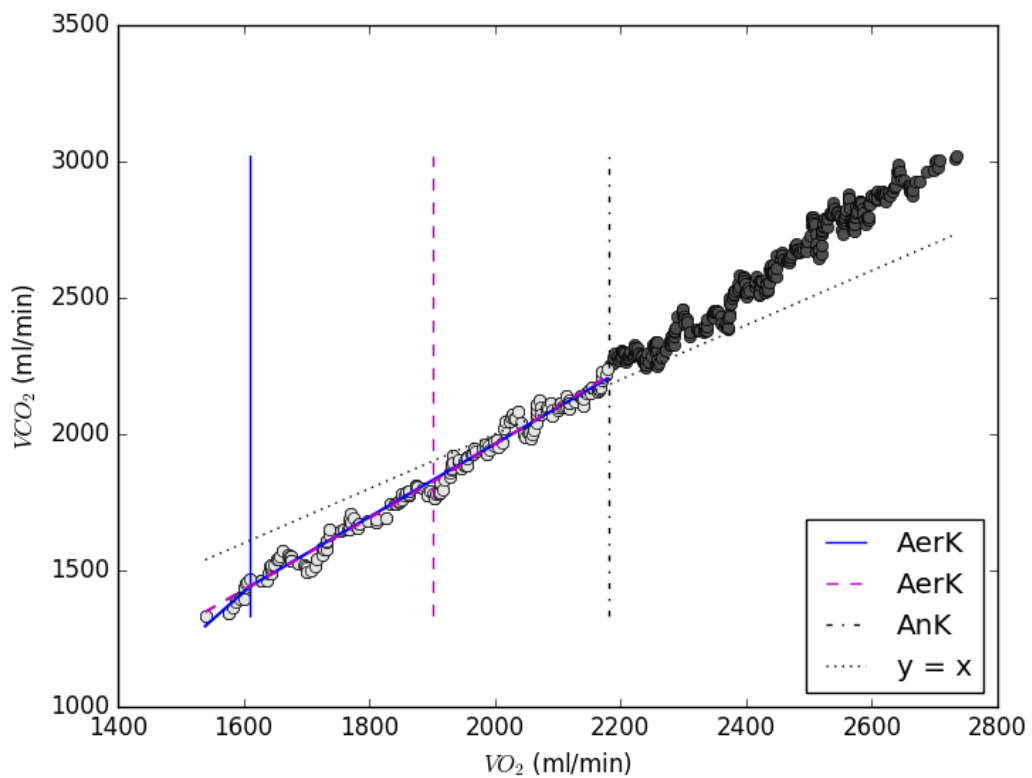
teiden poistomäärän valintaan voisi kuitenkin olla hyödyllisempää käyttää jotain älykkäämpää, esimerkiksi poikkeuksien tunnistamiseen kehitettyä, menetelmää kuin kiinteää arvoa.

VslopeMax epäonnistui yhdellä (eri) koehenkilöllä, jos poistettavan datan määrä oli viisi tai viisitoista molemmista päistä. Vaikka datan rajaaminen  $VO_{2max}$ :iin siis paransi menetelmän varmuutta, ei se kuitenkaan vaikuttaisi luotettavasti poistaneen sitä ongelmaa, että osa kynnyksistä jää määrittämättömäksi.

### 5.3 Haastavat kynnysmäärittäystestidatat

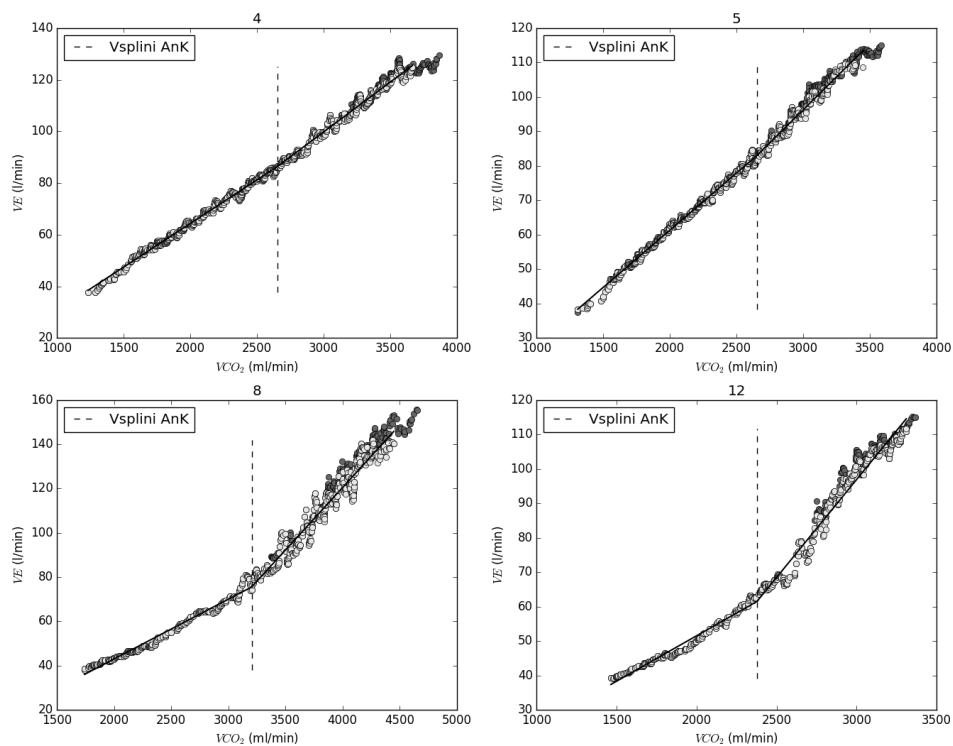
Kuten taulukosta 7 nähdään, joidenkin koehenkilöiden datat osoittautuivat toisia haastavammaksi. Testin kokonaispituus tämän tutkimuksen koehenkilöillä vaihteli 21 ja 33 minuutin välillä, joten testi kesti huomattavasti kauemmin kuin v-slopen käyttöön suositeltu kymmenen minuuttia. Mahdollisesti tämän vuoksi joihinkin datapilviin ei muodostunut niin selvää ”taitetta”, että v-slopen kriteerit regressiosuorien jyrkkyyseroille olisivat täyttyneet (kuvion 27 yläkuvaajat). Jos kuormat siis olisivat olleet lyhyempiä, tai niistä olisi otettu mukaan jokin muu osa kuin viimeiset kaksi minuuttia, pilven muoto (mutta myös sijainti, vrt. kuvio 11) olisi saattanut olla erilainen ja parempi v-slopelle. Erityisesti kuorman alku ja loppu saattavat olla sellaisia, joita vastaavaa tilannetta ei synny jatkuvakuormitteisessa testausprotokollassa, jossa kuormaa nostetaan tiheästi (vrt. luku 4.2).

Erityisen ongelmallisia visuaalisesti taitteettomat datapilvet ovat luonnollisesti visuaalisen määrittäytymisen kannalta, mutta Vsplini kykenee periaatteessa havaitsemaan taitoskohdan, oli se kuinka loiva tahansa. Ongelmatonta sekään ei kuitenkaan ole. Tällöin nimittäin yksittäiset sivussa olevat datapisteet tai pilven pään käyristyminen saattavat saada menetelmän määrittämään kynnyksen kohtaan, jossa todellisuudessa ei ole määrittelymateriaalin mukaista aerobista tai anaerobista kynnystä. Esimerkiksi koehenkilön numero 11 aerobisen kynnyksen Vsplini määrittäisi selvästi asiantuntijaa alemmalle tasolle (1611 vs. 2010 ml/min). Jos menetelmälle olisi annettu esimerkiksi rajoitus, että soviteen osasuoran on katettava vähintään 30 pistettä (mikä siis jää selvästi alle 70:n), kuten AnK:n määrittäytymisessä, Vsplini olisi antanut tuloksen 1902 ml/min (kuvio 26). Ilman rajoitusta sovite tällä koehenkilöllä myös kääntyy ”väärään” suuntaan, eli ensimmäisen osasuoran kulmakerroin on toista suurempi.



Kuvio 26. Vaikea VT1:n määrittäminen. Pisteviiva on suora  $VCO_2 = VO_2$  ( $y = x$ ), pistekatkoviiva (oikea, musta) = Vsplinin määrittämä AnK, yhtenäinen sininen pystyviiva ja paloittainen suora = AerK-määrittäminen, purppura katkoviiva ja paloittainen suora = AerK-määrittäminen, kun osasuorat sovitetaan vähintään 30 pisteelle.

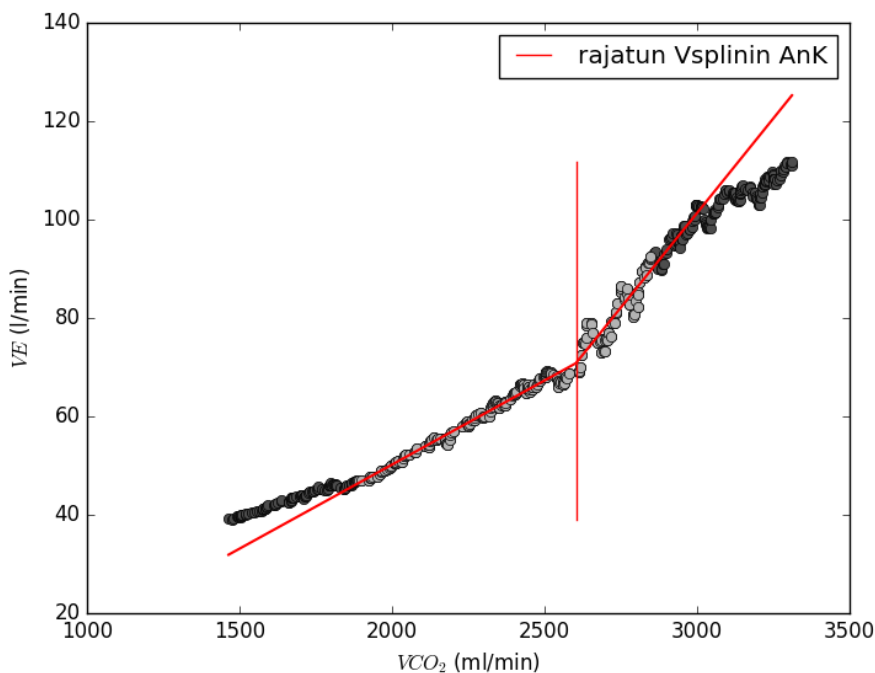
Kuvioon 27 on piirretty kolmen vaikeimman koehenkilön ja yhden tyypillisen koehenkilön ( $VCO_2$ ,  $VE$ )-data. Kuten kuvioista nähdään, rajaaminen  $VO_{2max}$ :iin tyypillisesti poisti arvoja pilven loppupäästä ja AnK:n jälkeisen osan yläreunasta (kuvion punaiset pisteet). Henkilöiden neljä ja viisi datapilvi on hyvin suora, mikä aiheutti VslopeFit:n epäonnistumisen. Kuvioon piirretyn Vsplinin osasuorien kulmakertoimet koehenkilölle neljä olivat 0,034 sekä 0,039 ja koehenkilölle viisi 0,33 sekä 0,38, eli kulmakertoimien erotus asettui v-slopen vaatiman 15 %:n minimin tuntumaan. Datan rajaaminen mahdollisti siis VslopeMax:lle määrittelyn, sillä se poisti ”väärään” suuntaan kaartavan pilven osan. Kuviossa 27 koehenkilö 12:n pilven oikea puoli kaartaa ensin lineaarisovitteen ylä- ja sitten alapuolelle. Tämä S:ää muistuttava muoto sai VslopeFit:n regressiosuorat leikkaamaan pilven ulkopuolella. Datan rajaaminen  $VO_{2max}$ :iin ”suoristi” pilveä sen verran, että VslopeMax:n sovittamat suorat leikkasivat pilven keskellä.



Kuvio 27. Vaikea VT2:n määrittely. Tummat pisteet ovat  $VO_{2max}$ :n jälkeisiä arvoja.

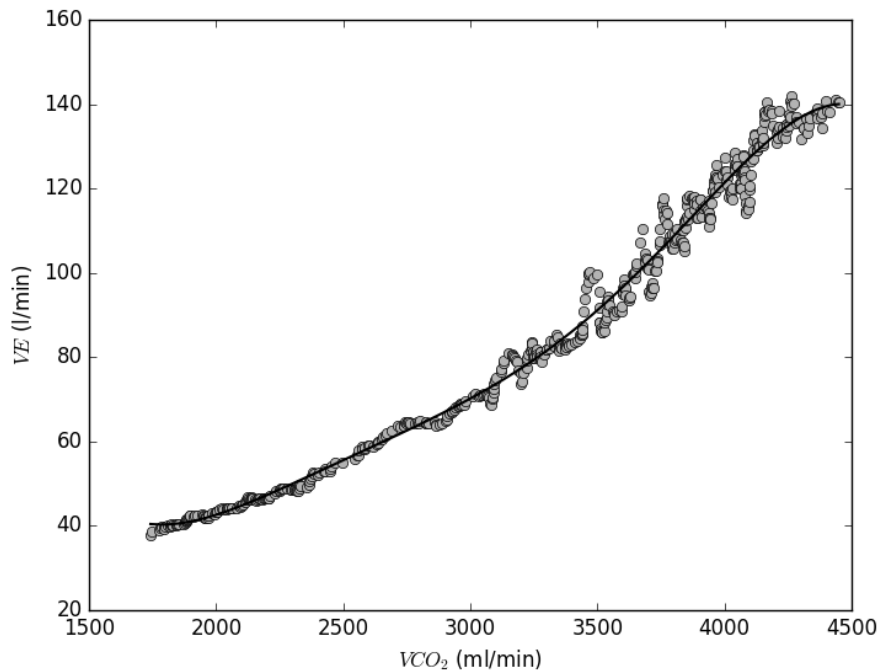
## 5.4 Pilvet ja sovitteet

Pilven käyristymisen suunnan muutos vaikuttaisi siirtävän kynnystä alemmas verrattuna tilanteeseen, jossa pilvestä leikataan loppuosa pois (vrt. kuvion 27 oikea alakuvaaja ja kuvio 28). On mahdollista, että visuaalisesti määrittäessään testaaja ei huomioi pilven päiden muotoa – ainakaan yhtä voimakkaasti kuin oletetun kynnyksen alueen. Tällaisessa tilanteessa lineaarisia sovitteita käyttävä automaattinen menetelmä saattaa siis määrittää kynnysalueen viinon keskimääräisestä visuaalisesta määrittämisestä. Kuvioon 28 on piirretty, miltä Vsplinin VT2-määrittäminen voisi näyttää esimerkiksi koehenkilöllä 12, jos datapilven alun ja lopun muoto jätetään huomiotta (rajataan pois). Kuvion rajaus on tehty polynomisovituksen avulla, ja se olisikin implementoitavissa Vspliniin. Toisaalta esimerkiksi koehenkilö 8:n ( $VCO_2, VE$ )-pilven voi sovittaa viidennen asteen polynomien avulla siten, että pilvestä on vaikea havaita visuaalisesti erottuvaa taitekohtaa (kuvio 29).



Kuvio 28. Rajatun Vsplinin VT2-määrittäminen. Datapilven vaalea osa Vspliniin annettu data.

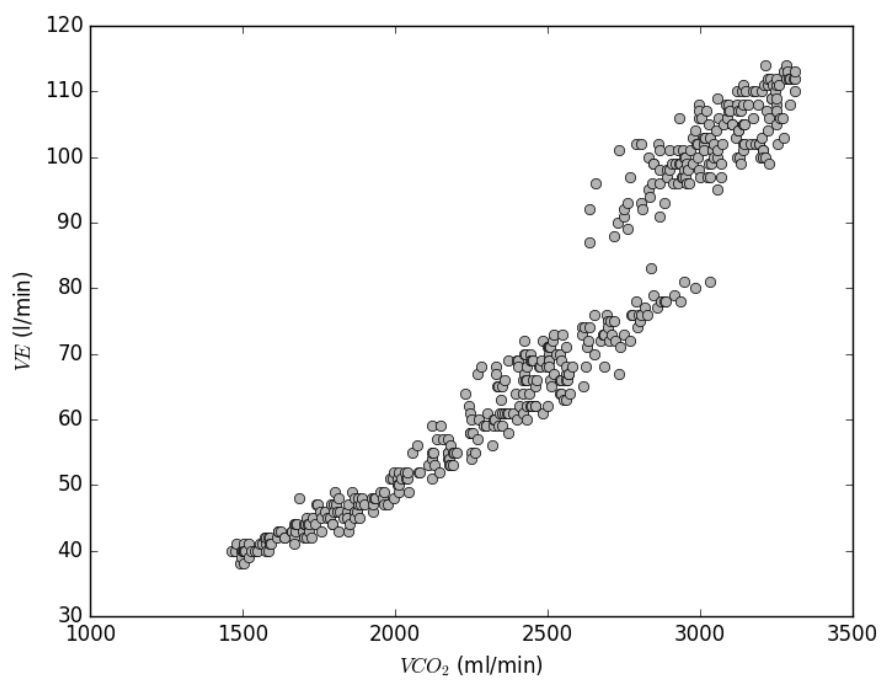
Osalla koehenkilöistä ( $VO_2, VCO_2$ )-pilvi sai S-mäisen muodon (kuviot 3, 14 ja 15).  $\frac{VCO_2}{VO_2}$ -suhteen tasoittuminen testin lopussa näkyy myös kuviossa 10. Mahdollinen selitys ilmiölle voisi olla luvussa 2.2 mainittu elimistön hiilidioksidivarastojen ja bikarbonaattipuskurointi-



Kuvio 29. Viidennen asteen polynomisovite koehenkilön nro 8 ( $VCO_2, VE$ )-pilveen.

mekanismin kapasiteetin ehtyminen. Koska tässä tutkimuksessa käytetyt menetelmät eivät VT1:stä määrittäessään huomioi VT2:n ylittävää dataa, ei ( $VO_2, VCO_2$ )-pilven S:ää muistutava muoto haittaa. Toisaalta muoto myös pakottaa rajaamaan datan VT2:een, mikä tekee VT1:n määrittämisen riippuvaiseksi VT2:n määrittämisestä.

Joissain tapauksissa pilven S:mäisen muodon vaikutti saavan aikaan menetelmien (pl. VslopeRaw ja VslopeStrict) käyttämä keskiarvoistus. Tällainen tilanne oli esimerkiksi koehenkilöllä 12 (kuvio 30). Keskiarvoistus ajan mukaan peräkkäisistä henkäyksistä (VslopeStrict) toimi huonosti aerobisen kynnyksen kohdalla. VslopeFit:n ja VslopeRaw:n välillä sen sijaan on vaikea löytää voittajaa: VslopeFit oli asiantuntijaan vertailtaessa parempi VT2:n määrittämisessä, mutta huonompi VT1:n määrittämisessä. VslopeFit epäonnistui kolmen koehenkilön määrittämisessä, mutta VslopeRaw neljän. Toisaalta Vsplini ilman keskiarvoistusta olisi luonnollisesti antanut tuloksen pilven sisälle kaikille koehenkilöille. Vaikka keskiarvoistus onkin laskennallisissa menetelmissä yleistä, vaikuttaisi siltä, että siitä ei välttämättä ole selvää hyötyä tai haittaa suomalaista kuntotestiaineistoa käytettäessä, jos kuorman ensimmäisen minuutin data karsitaan.



Kuvio 30. Keskiarvoistus muokkaa pilven ulkoasua. Kuvioon on piirretty koehenkilön 12 data ilman keskiarvoistusta Oikealla ylhäällä erottuva datapilvi koostuu lähinnä kahden viimeisen kuorman havainnoista.

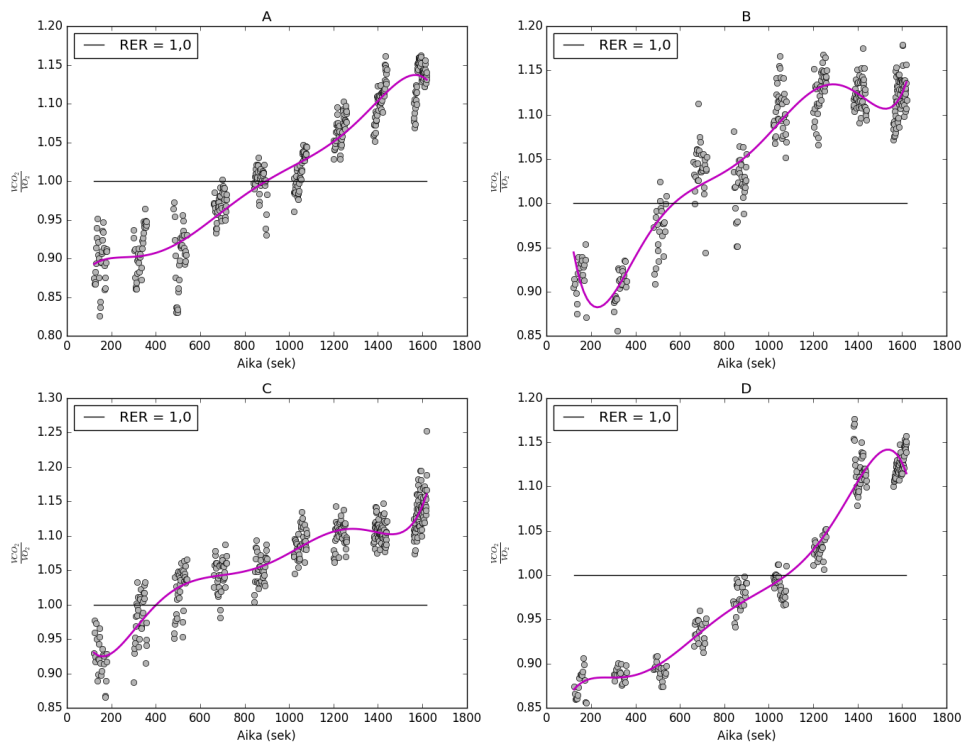
Kuten luvussa 3.1 todettiin RER-menetelmän yhteydessä, glukoosin ja glykokeenin hapettaminen vapauttaa eri määrän hiilidioksidia. Rasvasta tuotetaan energiaa vain hapen avulla (kuvio 1), joten glukoosista ja glykokeenista tuotettu energia kuluttaa vähemmän happea. Koska rasvojen suhteellinen osuus energiankäytöstä pienenee intensiteetin kasvaessa (Loon ym. 2001; Achten, Gleeson ja Jeukendrup 2002; Venables, Achten ja Jeukendrup 2005), vaikuttaa myös rasvojen käyttöosuus RER-arvoon ja ( $VO_2, VCO_2$ )-pilven muotoon. Jos ventilaatio riippuu matalilla kuormilla lähinnä hapenkulutuksesta, sen pitäisi vaikuttaa myös ( $VO_2, VE$ )- ja ( $VCO_2, VE$ )-pilviin. Rasvojen ja hiilihyaattien käyttösuhteessa kuormituksessa on myös yksilöllisiä eroja, ja keskimäärin naisten suhteellinen rasvan käyttöosuus on miehiä suurempi (Venables, Achten ja Jeukendrup 2005). Kirjallisuuskatsauksen perusteella vaikuttaa kuitenkin siltä, että rasvojen käyttöä energianlähteenä ei ole otettu huomioon ventilaatiomenetelmiä kehitettäessä. Tämä voi olla yksi menetelmien toimivuuteen vaikuttava tekijä.

## 5.5 RER-arvon potentiaalista

Koska rasvojen käyttö energianlähteenä lähellä MLSS:n tehoaluetta on olematonta (Achten, Gleeson ja Jeukendrup 2002; Venables, Achten ja Jeukendrup 2005), RER-arvo 1,0 tasaisen kuormituksen aikana vastaa teoriassa MLSS-tasoa, sillä tällöinhän hapenkulutus kattaa kaiken energiantuoton (Svedahl ja MacIntosh 2003). MLSS:n ylittävillä kuormilla vereen kerääntyy laktaatin myötä protoneja, minkä pitäisi siis ajaa RER-arvo yli yhden  $HCO_3^-$ -puskurointimekanismin kautta. Kuten luvussa 4.2 kerrottiin, kuorman alussa  $\frac{VCO_2}{VO_2}$ -suhde on kuitenkin koholla kuormaa vastaavaan hapenkäyttökapasiteettiin nähden. Tämän vuoksi RER-arvon 1,0 käyttö saattaa yliarvioida anaerobista kynnystä jatkuvakuormitteisessa protokollassa.

Luvussa 4.2 kerrottiin myös, että VT1:n ylittävillä kuormilla hapenkulutuksen tasaantumisen on havaittu kestävän yli kolme minuuttia. Näin ollen RER-arvo 1,0:n käytön tulisi yliarvioida MLSS:ää myös suomalaisen kuntotestausprotokollan mukaisessa testissä, jossa kuormituksen todellinen kesto on noin kaksi ja puoli minuuttia, vaikka arvoon otettaisiin mukaan esimerkiksi vain kuorman viimeisen puolen minuutin arvot. Jonkinlaisen arvion kuormitustasoa vastaavasta RER-arvosta saanee kuitenkin kuorman viimeisen minuutin arvoista.

Kuvioon 31 on piirretty neljän koehenkilön kuormien viimeisten minuuttien  $\frac{VCO_2}{VO_2}$ -arvot ja niihin sovitettu kuudennen asteen polynomi kuormitusaikaa vasten. Tämän tutkimuksen aineiston koehenkilöillä RER-arvon käyttäytyminen vaihteli hyvin selvästi. Kuvion 31 henkilöllä b ja c  $\frac{VCO_2}{VO_2}$ -ylitti yhden jo ensimmäisillä kuormilla. Henkilöllä b RER-arvo oli hyvin samansuuruinen neljällä viimeisellä kuormalla. Henkilön b kohdalla kuudennen asteen polynomisovite ei myöskään näytä kuvaavan RER-arvon käyttäytymistä testin kuluessa erityisen onnistuneesti. Vaikuttaisi siis siltä, ettei RER-arvo ole käyttökelpoinen anaerobisen kynnyksen määrittämiseen kuntotestausprotokollan mukaisella aineistolla.



Kuvio 31. RER-arvo testin edetessä eri koehenkilöillä. Musta vaakaviiva on suora RER = 1. Purppura käyrä on pisteiden polynomisovite.

## 5.6 Verrokkimenetelmät ja menetelmien validointi

Menetelmien tuloksia verrattaessa tulee ottaa huomioon, että asiantuntijoille mitattu korrelaatio MLSS:ää saattaa jäädä esimerkiksi 0,83:een siitä huolimatta, että MLSS:n mittaamis-



sa on merkittävänä epätarkkuustekijänä toisaalta kuorman korotuksen suuruus (esim. 0,5–1 km/h) ja toisaalta käytettävä kriteeri (esim. 1 mmol/l:n nousu) (Aunola ja Rusko 1992; Smith ja Jones 2001; Leti ym. 2012). Laktaattitasoissa mitattuna anaerobinen kynnys yleensä asettuu välille 2–8 mmol/l, joten yhden mmol/l:n nousukriteeri saattaa olla hyvinkin suuri suhteessa MLSS:ään (Aunola ja Rusko 1992; Billat ym. 2003). Menetelmien todellinen tarkkuus siis jää jossain määrin arvailujen varaan.

Tämän tutkimuksen yhteydessä tehdyssä kahdessa muussa tutkimuksessa validoitiin Klab-ohjelman määrittämät anaerobiset kynnykset tasavauhtisella juokсутestillä (Kainlauri 2017; Sampolahti 2017). Käytetystä kriteeristä riippuen Klab määritti ensimmäisen validointikerran mukaan 29,2–50, ja toisen 50–66,7 prosentille koehenkilöistä oikean anaerobisen kynnyksen. Klab yliarvioi MLSS:ää 1 mmol/l:n nousukriteerillä mitattuna 41,7 prosentilla ensimmäisen ja 29,2 prosentilla toisen validointikerran mukaan. Jälkimmäisen kerran parempi tulos saattoi johtua tottumisesta juoksuympäristöön (erityisesti juoksumattoon), mutta toisaalta ympäristö oli sama kuin edeltävässä kynnysmäärittäystestissä. Tämän tutkimuksen kannalta huomionarvoista on, että asiantuntijan määrittämät kynnykset poikkesivat vain hieman Klab-ohjelman määrittämisestä, toisin sanoen asiantuntija ei nähnyt korjaustarvetta suurimpaan osaan kynnysistä.

Näin ollen tässä tutkimuksessa asiantuntijan määrittäminen käytössä automaattisten menetelmien määrittämisessä validointiin on kaksi ongelmaa. Ensimmäisen validointitestin perusteella asiantuntijan tarkkuus asettaa huomattavan rajoituksen uusien (automaattisten) laktaattimenetelmien kehittämiseksi. Laktaattimenetelmien osalta on siitä huolimatta pääteltävissä, että ne pääosin yliarvioivat MLSS:ää. Toisaalta toisen validointitestin tuloksen perusteella itse validointitestin luotettavuus asettuu jossain määrin kyseenalaiseksi.

On kuitenkin mahdollista, että mikäli henkilö on tottunut juoksemaan testiympäristön kaltaisissa oloissa (juoksumatto ym. eroavaisuudet), MLSS-testien toistettavuus paranisi ja tällöin myös kynnysmäärittäystestin luotettavuus paranisi, koska mitatut laktaattiarvot vastaisivat paremmin ”todellisuutta”. Mikäli kuitenkin juoksumattotestiä varten tulee totutella huomattavan runsaasti, sen käyttö rata- maantie- tai muun ”normaalin” juoksuolosuhteiden kynnystason määrittämiseen saattaa olla toivottua epätarkempaa, jos siirtovaikutuksen suuruutta ei tunneta. Jos taas testiympäristössä juokseminen ei vaadi erityistä totuttautumista, saattaa se tarkoittaa

taa sitä, että MLSS-validointitesti itsessään olisi toivottua epäluotettavampi, kun muistetaan sen sallima vaihteluväli laktaattiarvoissa. Jos taas validointitestien erot tässä tutkimuksessa johtuivatkin koehenkilön suorituskyvyn päiväkohtaisesta vaihtelusta, herää kysymys, onko anaerobisen kynnyksen määrittäminen esimerkiksi urheilijalle edes mielekäästä.

Anaerobista kynnystä ilmiönä käsiteltiin luvussa 2.2, ja siellä todettiin kynnukseen liittyvän monia erilaisia liukuvasti muuttuvia ilmiöitä, joita kaikkia ei vielä tunneta täysin. Luvussa 2.3 lueteltiin laktaattiarvoihin vaikuttavia testiympäristöstä johtuvia tekijöitä, ja luvussa 4.3 tarkasteltiin testimittauksista muodostetun laktaattikäyrän muotoa. Jos ottaa huomioon nousevassa testissä mitatun laktaattiarvoista muodostetun käyrän muodon ja siihen vaikuttavat moninaiset tekijät (testiprotokolla, koehenkilön ominaisuudet), vaikuttaisi itse asiassa siltä, ettei ole mitään takeita, että nousevan kuorman testin aikana kerätystä laktaattikäyrästä pystyisi määrittämään anaerobista kynnystä juuri puolivälimenetelmää tai valistunutta arvausta paremmin.

Vaikka asiantuntija, Klab tai muut automaattiset menetelmät eivät MLSS-kuormaa löytäisikään luotettavasti, ne eivät silti välttämättä ole hyödyttömiä suorituskykymittareita. Voihan olla, että ne (tai jokin niistä) vastaavat MLSS:ää paremmin esimerkiksi 10 km:n suorituskykyä. MLSS:ää vastaavan rasituksen sieto-aika saattaa nimittäin olla melko vakio (noin tunti), ja sietomatka vaihdella kestävyyskunnan mukaan siten, että kovempikuntoiset pystyvät juoksemaan MLSS:ää vastaavalla rasitustasolla pidemmän matkan ja esimerkiksi maratonin lähempänä MLSS-tasoa kuin heikompikuntoiset (Billat ym. 2003). Toisaalta anaerobinen kynnys kertoo elimistön hapenkäyttökyvystä enemmän, tai ainakin toisella tavalla, kuin pelkkä aika- ja matkaperustainen suorituskyky.

Esimerkiksi urheilijoiden kehittymisen seurannassa kynnysarvon muutoksen havaitseminen voi olla tärkeämpää kuin oikea kynnysarvo. Tässä tutkimuksessa muutoksen havaitsemisen luotettavuutta eri menetelmillä ei kuitenkaan voitu testata. Ongelmaksi muodostuisi tosin muutoksen havaitsemisessakin MLSS-määritelmän epätarkkuus. Vaikuttaisikin siltä, että urheilijoille ehdotettu 1–3 %:n tarkkuusvaatimus saattaa olla jopa mahdoton saavuttaa.

## 6 Yhteenveto

Suomalaisella kunto- ja urheilutestausprotokollalla kerättyyn dataan voi sopivalla datan esikäsittelyllä soveltaa automaattisia ventilaatiomenetelmiä onnistuneesti. Objektiivisuutensa ansiosta automaattisten menetelmien pitäisi soveltua asiantuntijan määrittystä paremmin kehittymisen seurantaan. Tässä tutkimuksessa anaerobisen ventilaatiokynnyksen määrittämiseen soveltui parhaiten Vsplini ja aerobisen ventilaatiokynnyksen määrittämiseen Vsplini ja Osplini. Parhaat ventilaatiomenetelmät pääsivät AnK:n osalta erittäin hyvään ja AerK:n osalta hyvään tulokseen, jos niitä verrataan kirjallisuudesta löytyneisiin tuloksiin. Sen sijaan testatut anaerobisen kynnyksen laktaattimenetelmät yliarvioivat asiantuntijan määrittystä, eikä laktaattimenetelmien tarkkuuskaan ollut erityisen hyvä. kAerK tarjoaa vaihtoehdon Klab-ohjelman käyttämälle AerK-menetelmälle.

Testattuja menetelmiä saattaa pystyä kehittämään edelleen paremmiksi. Toisaalta ei ole varmaa, millä tarkkuudella aerobista ja anaerobista kynnystä voi ja kannattaa yrittää määrittää, sillä kynnyksilmiöt ovat kiistanalaisia. Ventilaatio- ja laktaattikynnyksiä kannattaa kuitenkin ehkä käsitellä erillisinä ilmiöinä.

## Lähteet

Achten, Juul, Michael Gleeson ja Asker E. Jeukendrup. 2002. “Determination of the exercise intensity that elicits maximal fat oxidation”. *Medicine and science in sports and exercise* 34 (1): 92–97.

Amann, Markus, Andrew W. Subudhi, Jim Walker, Patricia Eisenman, Barry Shultz ja Carl Foster. 2004. “An evaluation of the predictive validity and reliability of ventilatory threshold”. *Medicine and science in sports and exercise* 36:1716–1722.

Aunola, S., ja H. Rusko. 1984. “Reproducibility of aerobic and anaerobic thresholds in 20–50 year old men”. *European journal of applied physiology and occupational physiology* 53 (3): 260–266.

———. 1992. “Does anaerobic threshold correlate with maximal lactate steady state?” *Journal of sports sciences* 10 (4): 309–323.

Beaver, W. L., K. Wasserman ja B. J. Whipp. 1986. “A new method for detecting anaerobic threshold by gas exchange” [kielellä eng]. LR: 20131121; GR: HL-11907/HL/NHLBI NIH HHS/United States; JID: 8502536; 0 (Bicarbonates); 0 (Lactates); 142M471B3J (Carbon Dioxide); ppublish, *Journal of applied physiology (Bethesda, Md.: 1985)* 60, numero 6 (kesäkuu): 2020–2027.

Beneke, Ralph, Matthias Hütler ja Renate M. Leithäuser. 2000. “Maximal lactate-steady state independent of performance”. *Medicine Science in Sports Exercise* 32 (6): 1135–1139.

Bentley, David J., John Newell ja David Bishop. 2007. “Incremental exercise test design and analysis”. *Sports medicine* 37 (7): 575–586.

Billat, Véronique L., Pascal Sirvent, Guillaume Py, Jean-Pierre Koralsztejn ja Jacques Mercier. 2003. “The concept of maximal lactate steady state”. *Sports Medicine* 33 (6): 407–426.

Bishop, D., D. G. Jenkins ja L. T. Mackinnon. 1998. “The relationship between plasma lactate parameters, W<sub>peak</sub> and 1-h cycling performance in women” [kielellä eng]. LR: 20131121; JID: 8005433; 33X04XA5AT (Lactic Acid); ppublish, *Medicine and science in sports and exercise* 30, numero 8 (elokuu): 1270–1275.

- Brittain, C., H. Rossiter, J. Kowalchuk ja B. Whipp. 2001. "Effect of prior metabolic rate on the kinetics of oxygen uptake during moderate-intensity exercise". *European journal of applied physiology* 86 (2): 125–134.
- Campbell, M. E., R. L. Hughson ja H. J. Green. 1989. "Continuous increase in blood lactate concentration during different ramp exercise protocols" [kielellä eng]. LR: 20171213; JID: 8502536; 0 (Lactates); 1989/03/01 00:00 [pubmed]; 1989/03/01 00:01 [medline]; 1989/03/01 00:00 [entrez]; ppublish, *Journal of applied physiology (Bethesda, Md.: 1985)* 66, numero 3 (maaliskuu): 1104–1107. doi:10.1152/jappl.1989.66.3.1104 [doi].
- Dickstein, K., S. Barvik, T. Aarsland, S. Snapinn ja J. Karlsson. 1990. "A comparison of methodologies in detection of the anaerobic threshold" [kielellä eng]. LR: 20131121; JID: 0147763; 0 (Lactates); 33X04XA5AT (Lactic Acid); ppublish, *Circulation* 81, numero 1 Suppl (tammikuu): II38–46.
- Dickstein, K., S. Barvik, T. Aarsland, S. Snapinn ja J. Millerhagen. 1990. "Validation of a computerized technique for detection of the gas exchange anaerobic threshold in cardiac disease" [kielellä eng]. LR: 20131121; JID: 0207277; 0 (Lactates); 142M471B3J (Carbon Dioxide); ppublish, *The American Journal of Cardiology* 66, numero 19 (joulukuu): 1363–1367. doi:0002-9149(90)91169-7 [pii].
- Ekkekakis, Panteleimon, Erik Lind, Eric E. Hall ja Steven J. Petruzzello. 2008. "Do regression-based computer algorithms for determining the ventilatory threshold agree?" *Journal of sports sciences* 26 (9): 967–976.
- Fabre, N., F. Balestreri, B. Pellegrini ja F. Schena. 2010. "The modified Dmax method is reliable to predict the second ventilatory threshold in elite cross-country skiers" [kielellä eng]. LR: 20161018; JID: 9415084; 33X04XA5AT (Lactic Acid); ppublish, *Journal of strength and conditioning research* 24, numero 6 (kesäkuu): 1546–1552. doi:10.1519/JSC.0b013e3181dc450a [doi].
- Faude, Oliver, Wilfried Kindermann ja Tim Meyer. 2009. "Lactate threshold concepts". *Sports medicine* 39 (6): 469–490.

- Hopker, James G., Simon A. Jobson ja JJ Pandit. 2011. “Controversies in the physiological basis of the ‘anaerobic threshold’ and their implications for clinical cardiopulmonary exercise testing”. *Anaesthesia* 66 (2): 111–123.
- Jones, A. M., B. Grassi, P. M. Christensen, P. Krstrup, J. Bangsbo ja D. C. Poole. 2011. “Slow component of VO<sub>2</sub> kinetics: mechanistic bases and practical applications” [kielellä eng]. LR: 20131121; JID: 8005433; ppublish, *Medicine and science in sports and exercise* 43, numero 11 (marraskuu): 2046–2062. doi:10.1249/MSS.0b013e31821fcfc1 [doi].
- Jones, AM, DP Wilkerson, A. Vanhatalo ja M. Burnley. 2008. “Influence of pacing strategy on O<sub>2</sub> uptake and exercise tolerance”. *Scandinavian Journal of Medicine Science in Sports* 18 (5): 615–626.
- Kainlauri, Viivi. 2017. *Anaerobisen kynnysharjoituksen päiväkohtainen vaihtelu ja kuntotason vaikutus vaihtelun määrään* [kielellä fin].
- Karatzanos, Eleftherios, Georgios Paradisis, Elias Zacharogiannis, Stavros Tziortzis ja Serafim Nanas. 2010. “Assessment of ventilatory threshold using near-infrared spectroscopy on the gastrocnemius muscle during treadmill running”. *International Journal of Industrial Ergonomics* 40 (2): 206–211.
- Kari L. Keskinen Keijo Häkkinen, Mauri Kallinen. 2010. *Kuntotestauksen käsikirja*. Baltimore: Lippincott Williams et Wilkins.
- Leti, Thomas, Monique Mendelson, David Laplaud ja Patrice Flore. 2012. “Prediction of maximal lactate steady state in runners with an incremental test on the field”. *Journal of sports sciences* 30 (6): 609–616.
- Loon, L. J. van, P. L. Greenhaff, D. Constantin-Teodosiu, W. H. Saris ja A. J. Wagenmakers. 2001. “The effects of increasing exercise intensity on muscle fuel utilisation in humans” [kielellä eng]. LR: 20151119; JID: 0266262; 0 (Carbon Isotopes); 0 (Fatty Acids, Nonesterified); 0 (Palmitates); 33X04XA5AT (Lactic Acid); 6DH1W9VH8Q (Acetylcarnitine); AR09D82C7G (Deuterium); IY9XDZ35W2 (Glucose); PDC6A3C0OX (Glycerol); S7UI8SM58A (Carnitine); OID: NLM: PMC2278845; 2001/10/02 10:00 [pubmed]; 2002/01/05 10:01 [medline]; 2001/10/02 10:00 [entrez]; ppublish, *The Journal of physiology* 536, numero Pt 1 (lokakuu): 295–304. doi:PHY\_12382 [pii].

- Lucia, A., O. Sanchez, A. Carvajal ja J. L. Chicharro. 1999. "Analysis of the aerobic-anaerobic transition in elite cyclists during incremental exercise with the use of electromyography" [kielellä eng]. LR: 20140615; JID: 0432520; OID: NLM: PMC1756168; ppublish, *British journal of sports medicine* 33, numero 3 (kesäkuu): 178–185.
- Marques-Neto, S. R., A. S. Maior, G. A. Maranhao Neto ja E. L. Santos. 2012. "Analysis of heart rate deflection points to predict the anaerobic threshold by a computerized method" [kielellä eng]. LR: 20161018; JID: 9415084; 33X04XA5AT (Lactic Acid); ppublish, *Journal of strength and conditioning research* 26, numero 7 (heinäkuu): 1967–1974. doi:10.1519/JSC.0b013e318234eb5d[doi].
- McArdle, William D., Frank I. Katch ja Victor L. Katch. 2010. *Exercise Physiology, Energy, Nutrition and Human Performance*. Baltimore: Lippincott Williams et Wilkins.
- Meyer, T., A. Lucia, Conrad P. Earnest ja W. Kindermann. 2005. "A conceptual framework for performance diagnosis and training prescription from submaximal gas exchange parameters - theory and application". *International Journal of Sports Medicine* 26 (S 1): S38–S48.
- Myers, Jonathan, ja Euan Ashley. 1997. "Dangerous curves: a perspective on exercise, lactate, and the anaerobic threshold". *Chest* 111 (3): 787–795.
- Newell, J., K. McMillan, S. Grant ja G. McCabe. 2006. "Using functional data analysis to summarise and interpret lactate curves". *Computers in biology and medicine* 36 (3): 262–275.
- Newell, John, David Higgins, Niall Madden, James Cruickshank, Jochen Einbeck, Kenny McMillan ja Roddy McDonald. 2007. "Software for calculating blood lactate endurance markers". *Journal of sports sciences* 25 (12): 1403–1409.
- Noakes, Timothy. 2004. *Lore of Running*. Human Kinetics.
- Nummela, Ari. 2014. *Klab – suora maksimitesti* [kielellä fin].
- Péronnet, François, ja Bernard Aguilaniu. 2006. "Lactic acid buffering, nonmetabolic CO<sub>2</sub> and exercise hyperventilation: a critical reappraisal". *Respiratory physiology neurobiology* 150 (1): 4–18.

- Robergs, R. A., F. Ghiasvand ja D. Parker. 2004. "Biochemistry of exercise-induced metabolic acidosis" [kielellä eng]. LR: 20131121; JID: 100901230; 0 (Buffers); 0 (Protons); 33X04XA5AT (Lactic Acid); CIN: Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol. 2006 Jul;291(1):R235-7; author reply R238-9. PMID: 16760335; CIN: Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol. 2005 Sep;289(3):R902-3; author reply R904-910. PMID: 16105825; CIN: Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol. 2005 Sep;289(3):R895-901; author reply R904-910. PMID: 16105824; CIN: Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol. 2005 Sep;289(3):R891-4; author reply R904-910. PMID: 16105823; RF: 63; PS: Scheele CW; PS: Hill AV; PS: Meyerhof O; ppublish, *American journal of physiology.Regulatory, integrative and comparative physiology* 287, numero 3 (syyskuu): R502–16. doi:10.1152/ajpregu.00114.2004[doi].
- Sahlin, Eric Hultman Kent. 1980. "Acid-base balance during exercise." *Exercise and sport sciences reviews* 8 (1): 41–128.
- Sampolahti, Ville. 2017. *Klab-ohjelmalla määritetyn, laktaattiin perustuvan teoreettisen anaerobisen kynnyksen validiteetti* [kielellä fin].
- Santos, Edil Luis, ja Antonio Giannella-Neto. 2004. "Comparison of computerized methods for detecting the ventilatory thresholds". *European journal of applied physiology* 93 (3): 315–324.
- Schneider, D. A., S. E. Phillips ja S. Stoffolano. 1993. "The simplified V-slope method of detecting the gas exchange threshold" [kielellä eng]. LR: 20081121; JID: 8005433; 0 (Lactates); ppublish, *Medicine and science in sports and exercise* 25, numero 10 (lokakuu): 1180–1184.
- Schuylenbergh, Reinout Van, B. Vanden Eynde ja Peter Hespel. 2004. "Correlations between lactate and ventilatory thresholds and the maximal lactate steady state in elite cyclists". *International Journal of Sports Medicine* 25 (06): 403–408.
- Smith, Clare G., ja Andrew M. Jones. 2001. "The relationship between critical velocity, maximal lactate steady-state velocity and lactate turnpoint velocity in runners". *European journal of applied physiology* 85 (1): 19–26.



- Smith, D. A., ja T. V. O'Donnell. 1984. "The time course during 36 weeks' endurance training of changes in Vo<sub>2</sub> max. and anaerobic threshold as determined with a new computerized method" [kielellä eng]. LR: 20131121; JID: 7905731; 0 (Lactates); 33X04XA5AT (Lactic Acid); S88TT14065 (Oxygen); ppublish, *Clinical science (London, England : 1979)* 67, numero 2 (elokuu): 229–236.
- Svedahl, Krista, ja Brian R. MacIntosh. 2003. "Anaerobic threshold: the concept and methods of measurement". *Canadian Journal of Applied Physiology* 28 (2): 299–323.
- Wasserman, K. 1987. "Determinants and detection of anaerobic threshold and consequences of exercise above it" [kielellä eng]. LR: 20081121; GR: HL-11907/HL/NHLBI NIH HHS/United States; JID: 0147763; 0 (Lactates); RF: 57; OID: NASA: 88053266; ppublish, *Circulation* 76, numero 6 Pt 2 (joulukuu): VI29–39.
- Wasserman, K., W. L. Beaver ja B. J. Whipp. 1990. "Gas exchange theory and the lactic acidosis (anaerobic) threshold" [kielellä eng]. LR: 20131121; GR: HL-11907/HL/NHLBI NIH HHS/United States; JID: 0147763; 0 (Pyruvates); 8558G7RUTR (Pyruvic Acid); RF: 78; ppublish, *Circulation* 81, numero 1 Suppl (tammikuu): II14–30.
- Wasserman, Karlman, ja Akira Koike. 1992. "Is the anaerobic threshold truly anaerobic?" *Chest* 101 (5): 211S–218S.
- Venables, M. C., J. Achten ja A. E. Jeukendrup. 2005. "Determinants of fat oxidation during exercise in healthy men and women: a cross-sectional study" [kielellä eng]. LR: 20130926; JID: 8502536; 2004/08/31 05:00 [pubmed]; 2005/05/12 09:00 [medline]; 2004/08/31 05:00 [entrez]; ppublish, *Journal of applied physiology (Bethesda, Md.: 1985)* 98, numero 1 (tammikuu): 160–167. doi:10.1152/jappphysiol.00662.2003[doi].
- Weston, Shane B., ja Tim J. Gabbett. 2001. "Reproducibility of ventilation of thresholds in trained cyclists during ramp cycle exercise". *Journal of Science and Medicine in Sport* 4 (3): 357–366.
- Whipp, BJ, ja SA Ward. 2011. "The physiological basis of the 'anaerobic threshold' and implications for clinical cardiopulmonary exercise testing". *Anaesthesia* 66 (11): 1048–1049.

- Whipp, Brian J. 2007. "Physiological mechanisms dissociating pulmonary CO<sub>2</sub> and O<sub>2</sub> exchange dynamics during exercise in humans". *Experimental physiology* 92 (2): 347–355.
- Wisén, Anita GM, ja Björn Wohlfart. 2004. "A refined technique for determining the respiratory gas exchange responses to anaerobic metabolism during progressive exercise – repeatability in a group of healthy men". *Clinical physiology and functional imaging* 24 (1): 1–9.
- Yoshida, Takayoshi. 1984. "Effect of dietary modifications on lactate threshold and onset of blood lactate accumulation during incremental exercise". *European journal of applied physiology and occupational physiology* 53 (3): 200–205.
- Zhou, Shi, ja Shane B. Weston. 1997. "Reliability of using the D-max method to define physiological responses to incremental exercise testing". *Physiological Measurement* 18 (2): 145.
- Zuniga, J. M., T. J. Housh, C. L. Camic, H. C. Bergstrom, R. J. Schmidt ja G. O. Johnson. 2014. "The effect of different exercise protocols and regression-based algorithms on the assessment of the anaerobic threshold" [kielellä eng]. LR: 20161018; JID: 9415084; ppublish, *Journal of strength and conditioning research* 28, numero 9 (syyskuu): 2507–2512. doi:10.1519/JSC.0000000000000440 [doi].