

**SIMULOIDUN HYPOKSIAJAKSON VAIKUTUKSET AUTONOMISEN
HERMOSTON TOIMINTAAN JA ELIMISTÖN SUORITUSKYKYYN
KESTÄVYYSURHEILIJOILLA**

Merja Perätalo

Valmennus- ja testausopin pro gradu -tutkielma
Liikuntatieteellinen tiedekunta
Jyväskylän yliopisto
Kevät 2023

TIIVISTELMÄ

Perätalo, M. 2023. Simuloidun hypoksiajakson vaikutukset autonomisen hermoston toimintaan ja elimistön suorituskykyyn kestävyysurheilijoilla. Liikuntatieteellinen tiedekunta, Jyväskylän yliopisto, valmennus- ja testausopin pro gradu -tutkielma, 77 s.

Tämän pro gradu -tutkielman tarkoituksena oli selvittää, miten Live High – Train Low and High -mallin (LHTLH) mukainen hypoksiajakso vaikuttaa kestävyysurheilijoiden autonomisen hermoston palautuneisuuteen, räjähtävään voimantuottoon ja submaksimaaliseen kestävyysuorituskykyyn. Lisäksi haluttiin tutkia vaikuttavatko nämä muuttujat toisiinsa.

Tutkimukseen osallistui tutkittavina 16 vapaaehtoista kansallisen tai kansainvälisen tason maasto- tai ampumahiihtäjää (11 naista, 5 miestä). Urheilijat asuivat neljän viikon ajan alppimajassa 2500 metrin korkeutta vastaavassa ilman happipitoisuudessa. Harjoittelua suoritettiin sekä merenpinnan tasolla että simuloiduissa hypoksisissa olosuhteissa. Autonomisen hermoston palautuneisuutta arvioitiin leposykkeen, sykevälivaihtelun ja ortostaattisen sykkeen mittauksien avulla. Subjektiiivisia tuntemuksia analysoitiin harjoituspäiväkirjoista. Kestävyysuorituskykyä mitattiin maksimaalisen hapenottokyvyn testillä ja submaksimaalisella juoksumattotestillä. Räjähtävää voimantuottoa tutkittiin staattisella ja esikevennetyllä hyppytestillä sekä reaktiivisella pohjehyppelyllä. Suurin osa tutkimuksen mittauksista analysoitiin neljältä suorituskykytestipäivältä. Mittaukset suoritettiin viikkoa ennen hypoksiajaksoa sekä hypoksiajakson viikoilla 2, 3 ja 4. Vain alku- ja loppumittauksista analysoitiin maksimaalinen hapenottokyky, kehon paino sekä hemoglobiinimassa mitattuna hiilimonoksidin takaisinhengitysmenetelmällä.

Tutkimuksessa havaittiin tilastollisesti merkitsevä, noin neljän prosenttiyksikön lasku happisaturaatiossa ($p < 0,001$), $5,0 \pm 3,0$ %:n ($p < 0,001$) kasvu tutkittavien hemoglobiinimassassa sekä $1,8 \pm 1,7$ % ($p < 0,001$) kehonpainon lasku hypoksiajakson aikana. Maksimaalisessa hapenottokyvyssä ei havaittu muutoksia. Autonomisen hermoston tilaa arvioivissa mittauksissa vain ortostaattisessa sykkeessä havaittiin merkitsevä $15,3 \pm 13,5$ bpm ($p = 0,009$) kasvu hypoksiajakson aikana. Staattisen hyppytestin hyppyykorkeudessa havaittiin $6,2 \pm 8,6$ % ($p = 0,030$) kasvu ja reaktiivisen pohjehyppelyn maksimaalisessa tehossa $4,5 \pm 6,8$ % ($p = 0,031$) kasvu alkumittausten ja kolmannen hypoksiaviikon välillä. Submaksimaalisen juoksumattotestin muuttujista ainoastaan RPE:ssä havaittiin merkitsevää kasvua testikertojen välillä hypoksiajakson edetessä. Autonomisen hermoston palautuneisuutta arvioivien sykemuuttujien, suorituskykytestien ja subjektiivisten tuntemusten muutosten välillä ei havaittu korrelaatioita hypoksiajakson aikana. Tutkimuksessa vahvistettiin aiempien tutkimusten tuloksia hypoksian aiheuttaman happisaturaation ja hemoglobiinimassan muutosten osalta, sekä havaittiin räjähtävän voimantuoton kasvua hypoksian seurauksena. Eri muuttujien välisten korrelaatioiden osalta tutkimuksen tulokset jäivät odotettua heikommiksi, mihin pääsyyinä ovat todennäköisesti tutkimuksen pieni otanta ja siten tulosten suuri hajonta sekä erilaiset mittaustekniset asiat.

Asiasanat: kestävyysurheilu, hypoksiajakso, alppimaja, autonominen hermosto (ANS), palautuminen, suorituskyky

ABSTRACT

Perätalo, M. 2023. The effects of the simulated hypoxic period on the function of the autonomic nervous system and performance in endurance athletes. Faculty of Sport and Health Sciences, University of Jyväskylä, Master's thesis, 77 pp.

The main goal of this thesis was to investigate how a Live High – Train Low and High (LHTLH) period affects the autonomic nervous system's recovery, maximal force production and submaximal endurance performance in endurance athletes. The relationship of these variables was also examined.

A total of 16 subjects (11 females, 5 males) including national and international level cross-country skiers and biathletes were recruited to the study. Athletes lived in hypoxic apartments where the air's oxygen concentration was set equal to the altitude of 2500 meters for four weeks. The athletes trained at sea level and in simulated hypoxic conditions. Resting heart rate, heart rate variability and orthostatic heart rate measurements were completed to estimate autonomic nervous system recovery. The endurance performance of the subjects was assessed with a maximal oxygen uptake (VO_{2max}) test and submaximal running tests. Static, countermovement, and reactive jumping tests were used to measure explosive force production. In addition, subjective feelings were recorded during the LHTLH period. Most of the measurements were performed on four different performance testing days. The measurements were completed within one week before the LHTLH period and during the hypoxic weeks 2, 3 and 4. The VO_{2max} , body mass and hemoglobin mass measurement were completed only as a pre and post measurements.

A significant, approximately four percentage point decrease in oxygen saturation ($p < 0,001$), a $5,0 \pm 3,0$ % ($p < 0,001$) increase in the subjects' hemoglobin mass and a $1,8 \pm 1,7$ % ($p < 0,001$) decrease in body mass were noticed during the LHTLH period. Significant changes in VO_{2max} were not observed. There was a $15,3 \pm 13,5$ bpm ($p = 0,009$) increase in the orthostatic heart rate between the pre measurements and the fourth week of hypoxia. No other changes in the heart rate variables were observed. The height of the static jump test increased by an average of $6,2 \pm 8,6$ % ($p = 0,030$) and the maximal power of the reactive jumping test increased by $4,5 \pm 6,8$ % ($p = 0,031$) between the pre measurements and the third week of hypoxia. There was an increase in submaximal running tests RPEs between different workloads during the LHTLH period. There were not detected any correlations between the hypoxia induced changes in heart rate variables and performance testing. The results of the previous studies were confirmed in this study regarding to the changes in oxygen saturation and hemoglobin mass. There was also observed an increase in the explosive force production during the hypoxic period. The relationships between the changes in different variables were not as clear as expected. The small sample size of the study, a large standard deviation and different technical aspects of the measurements were probably the main reasons for these unexpected results.

Key words: endurance training, hypoxic period, hypoxic apartment, autonomic nervous system (ANS), recovery, performance

KÄYTETYT LYHENTEET

ANS	Autonominen hermosto (Autonomic Nervous System)
BMI	Painoindeksi (Body Mass Index)
Bpm	Sydämen syke, lyöntiä minuutissa (beats per minute)
CMJ	Esikevennyshyppy (Countermovement Jump)
CRP	C-reaktiivinen proteiini
EPO	Erytropoietiini
FIS	Kansainvälinen hiihtoliitto (International Skiing Federation)
HIT	Korkean intensiteetin harjoittelu (High Intensity Training)
HRV	Sykevälivaihtelu (Heart Rate Variability)
IHE	Ajoittainen hypoksia-altistus (Intermittent Hypoxic Exposure)
IHT	Ajoittainen hypoksiaharjoittelu (Intermittent Hypoxic Training)
LHTH	Korkeanpaikan harjoitusmalli (Live High – Train High)
LHTLH	Korkeanpaikan harjoitusmalli (Live High – Train Low and High)
LHTL	Korkeanpaikan harjoitusmalli (Live High – Train Low)
LIT	Matalan intensiteetin harjoittelu (Low Intensity Training)
LLTH	Korkeanpaikan harjoitusmalli (Live Low – Train High)
MART	Maksimaalinen anaerobinen juokсутesti (Maximal Anaerobic Running Test)
RFD	Voimantuotto nopeus (Rate of Force Development)
RMSSD	Sykevälivaihtelun neliöllinen keskiarvo (Root Mean Square of Successive Differences)
RPE	Rasitustuntemus (Rate of Perceived Exertion)
SJ	Staattinen hyppy (Static Jump / Squat Jump)
V_{MART}	Maksimaalisen anaerobisen juokсутestin huippunopeus
VO_{2max}	Maksimaalinen hapenottokyky
1 RM	Yhden toiston maksimi (One Repetition Maximum)
%HbCO	Hemoglobiiniin sitoutuneen hiilimonoksidin prosentuaalinen määrä

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

1 JOHDANTO.....	1
2 MAASTOHIIHTO	3
2.1 Olosuhteet ja kilpailumuodot	4
2.2 Lajin vaatimukset	5
2.2.1 Fyysiset ominaisuudet	5
2.2.2 Hermolihasjärjestelmä	7
2.2.3 Energia-aineenvaihdunta	8
2.3 Kestävyysharjoittelu	10
2.3.1 Hengitys- ja verenkiertoelimistön adaptaatiot.....	12
2.3.2 Autonomisen hermoston adaptaatiot	14
3 HYPOKSIAJAKSOT	16
3.1 Hypoksiajaksojen mallit	17
3.2 Hypoksiajaksojen aiheuttamat adaptaatiot	18
3.2.1 Hengitys- ja verenkiertoelimistön adaptaatiot.....	18
3.2.2 Autonomisen hermoston adaptaatiot	22
3.2.3 Muut adaptaatiot.....	23
3.3 Fysiologisten vasteiden suuruuksiin vaikuttavat tekijät	24
3.4 Hemoglobiinimassan mittaus	26
4 PALAUTUMISEN SEURANTA HYPOKSISISSA OLOSUHTEISSA.....	28
4.1 Palautumisen objektiiviset mittaukset	29
4.2 Palautumisen subjektiiviset mittaukset.....	30
5 TUTKIMUKSEN TARKOITUS.....	32

5.1	Tutkimuskysymykset.....	32
5.2	Hypoteesit.....	32
6	TUTKIMUSMENETELMÄT	34
6.1	Tutkittavat.....	34
6.2	Tutkimusprotokolla	35
6.3	Aamumittaukset.....	37
6.3.1	Autonomisen hermoston palautuneisuuden seuranta	37
6.3.2	Subjektiiiviset tuntemukset, happisaturaatio ja paino	38
6.4	Submaksimaalinen juoksumattotesti	38
6.5	Räjähävän voimantuoton testit	40
6.6	Suorituskykyyn vaikuttavat taustamuuttajat	42
6.6.1	Hemoglobiinimassan mittaus	42
6.6.2	Maksimaalisen hapenottokyvyn testi	43
6.7	Tilastolliset analyysit.....	43
7	TULOKSET	45
7.1	Aamumittaukset.....	45
7.1.1	Autonomisen hermoston palautuneisuus	45
7.1.2	Subjektiiiviset tuntemukset, happisaturaatio ja paino	45
7.2	Submaksimaalinen juoksumattotesti	48
7.3	Räjähävän voimantuoton testit	49
7.4	Autonomisen hermoston palautuneisuuden ja suorituskyvyn korrelaatiot.....	50
7.5	Suorituskykyyn vaikuttavat taustamuuttajat	52
8	POHDINTA.....	55
	LÄHTEET	67

1 JOHDANTO

Maastohiihto on kestävyysurheilulaji, joka vaatii muun muassa korkeaa aerobista ja anaerobista tehoa ja kapasiteettia, korkeaa hermolihasjärjestelmän voimantuottoa sekä hyvää väsymyksen sietokykyä. Useissa tutkimuksissa (Rusko, 2003; Sandbakk ym., 2011; Sandbakk & Holmberg, 2014) on havaittu, että yksi tärkeimmistä maastohiihtosuoritusta määrittävistä tekijöistä hiihtomatka riippumatta on maksimaalinen hapenottoa (VO_{2max}). Kestävyysurjoittelu aiheuttaa elimistössä paljon erilaisia akuutteja vasteita sekä kroonisia adaptaatioita, joiden suuruuteen vaikuttavat harjoittelun määrä, tiheys ja intensiteetti (McArdle ym., 2010, s. 453).

Optimaalisimpien harjoitusadaptaatioiden saavuttamiseksi vaaditaan superkompensaatioperiaatteen mukaisesti nämä edellä mainitut tekijät huomioonottava harjoittelun ohjelmointi, jolla myös varmistetaan elimistön palautuminen. Kehittyminen vaatii ajoittaista ja kontrolloitua ylikuormittumista, mutta liian pitkään jatkunut ylikuormittuminen voi johtaa ylläkirjittamiseen, joka heikentää suorituskykyä. (Rusko, 2003) Kestävyysurjoituskyvyn kannalta oleellisimpia harjoittelun aiheuttamia adaptaatioita ovat hengitys- ja verenkiertoelimistön adaptaatiot, joista esimerkkeinä sydämen isku- ja minuuttitilavuuden kasvu, verisuoniston angiogeneesi eli kapillaarisuoniston laajeneminen sekä veren punasolumassan ja hemoglobiinikonsentraation kasvu. Nämä ovat tärkeitä adaptaatioita, koska ne osaltaan mahdollistavat maksimaalisen hapenottoa kasvun ja siten kestävyysurjoituskyvyn paranemisen. (Rusko, 2003; Schmidt & Prommer, 2010)

Saavuttaakseen optimaalisimmat fysiologiset adaptaatiot, useat kestävyysurjoittajat – mukaan lukien maastohiihtäjät – käyttävät harjoittelumenetelmänä hypoksiajaksoja (Heikura ym., 2018). Hypoksiajaksoja voidaan toteuttaa joko perinteisesti vuoristossa korkeanpaikanharjoitteluna tai alppimajassa merenpinnan tasolla, jossa asuinhuoneiston ilman happipitoisuutta pienennetään keinotekoisesti (Rusko ym., 2004). Vähähappisessa ympäristössä oleskelulla ja harjoittelulla pyritään kiihdyttämään elimistön omaa erytropoietiini-hormonin (EPO) tuotantoa munuaisissa, joka saa aikaan erytropoiesin eli

uusien punasolujen muodostuksen kiihtymistä. Punasolujen sisältämä hemoglobiini sitoo happea, joten punasolujen ja hemoglobiinin määrän lisääntyminen veressä tehostavat hapenkuljetusta soluille. (McArdle ym., 2010, s. 596–602; Schmidt & Prommer, 2010) Hypoksiajakson optimaalisena kestona pidetään nykytiedolla yli kolmea viikkoa (Peltonen & Nummela, 2016) ja harjoittelukorkeutena 1800–2500 metrin korkeutta (Chapman ym., 2014; Garvican-Lewis ym., 2015). Hypoksiajaksoja voidaan toteuttaa eri malleja noudattaen, joista tehokkaimmiksi malleiksi ovat havaitut Live High – Train Low (LHTL) ja Live High – Train Low and High (LHTLH) (Chapman ym., 1998).

Harjoittelusta palautumisen seuranta on tärkeää etenkin urheilijoille kehittymisen optimoimiseksi. Erityisen tärkeää palautumisen seuranta on hypoksiajakson aikana, kun harjoittelun lisäksi hypoksiset olosuhteet kasvattavat elimistön kuormittuneisuutta. (Peltonen & Nummela, 2016) Täten kokonaiskuormitus hypoksiajakson aikana voi nousta hyvinkin suureksi, jos tilannetta ei kontrolloida tarpeeksi. Elimistön palautuneisuutta voidaan arvioida mittaamalla autonomisen hermoston tilaa erilaisten sykemuuttujien avulla. Autonomisen hermoston palautumisen arvioiminen perustuu sympaattisen ja parasympaattisen hermoston aktivaatiotasojen vaihteluun kuormittuneisuuden mukaan. Tätä vaihtelua voidaan havaita mittaamalla sykemuutoksia (Hainsworth ym., 2007), joiden mittaaminen onnistuu suhteellisen luotettavasti ja helposti sykemittareiden avulla kerättävän datan, kuten aamun leposykkeiden, ortostaattisen sykkeen ja sykevälivaihtelun (HRV) muodossa (Nummela & Peltonen, 2018; Seiler ym., 2007).

Tämän pro gradu -tutkielman tavoitteena oli selvittää autonomisen hermoston, räjähtävän voimantuottokyvyn ja submaksimaalisen kestävyysuorituskyvyn vasteita neljän viikon mittaisen LHTLH-hypoksiajakson aikana. Lisäksi haluttiin selvittää, onko autonomisen hermoston palautuneisuuden, räjähtävän voimantuottokyvyn, submaksimaalisen kestävyysuorituskyvyn, subjektiivisten tuntemusten ja happisaturaation välillä yhteyttä. Tarkoituksena oli lisätä tietoa etenkin kestävyysurheilijoiden hyödyntämästä simuloidusta hypoksisesta asuinympäristöstä (alppimaja) sekä sen yhteydessä suoritetusta yhdistetystä normoksia- ja hypoksiaharjoittelusta.

2 MAASTOHIIHTO

Maastohiihto on intervallityyppinen kestävyysurheilulaji, jossa kuormitus vaihtelee maaston mukaan. Ruskon (2003) mukaan tärkeimpiä hiihtosuoritukseen vaikuttavia ominaisuuksia ovat mm. korkea maksimaalinen hapenottookyky (VO_{2max}), hyvä väsymyksensietokyky, hiihdon taloudellisuus, maksimaalinen anaerobinen hiihtoteho, hiihtotekniikoiden hallinta ja yleinen terveyden tila sekä nopea voimantuottokyky. Näistä aerobista kapasiteettia kuvaava VO_{2max} on tärkein yksittäinen hiihtosuoritukseen vaikuttava tekijä (Ohtonen & Mikkola, 2016; Rusko, 2003), vaikka nykyisin hiihdon luonne on muuttunut uusien kilpailumuotojen, kuten sprinttihiihdon myötä. Tämän vuoksi kaikissa kilpailuissa VO_{2max} ei välttämättä ole lopputuloksen ratkaiseva tekijä. Onnistunut hiihtosuoritus kansainvälisellä tasolla vaatii hiihtäjältä hyviä fyysisiä, psyykkisiä ja sosiaalisia ominaisuuksia sekä varusteiden huippuluokkaisuutta. Hiihtäjältä vaaditaan myös yhteistyökykyisyyttä valmentajien, sponsoreiden, huoltohenkilöstön ja median edustajien kanssa. (Rusko, 2003)

Maastohiihdossa on kilpailtu olympialaisissa ensimmäisistä vuoden 1924 talviolympialaisista lähtien, jolloin hiihdettävänä matkoina olivat ainoastaan 18 km ja 50 km. Tämän jälkeen kilpailumatkoja ja -tapoja on lisätty merkittävästi. Aluksi käytössä oli vain perinteinen hiihtotapa, luisteluhiihto tuli osaksi olympiaohjelmaa ensimmäisen kerran vuonna 1988. (*Maastohiihto - Suomen Olympiakomitea*, 2022) Hiihtotekniikoiden lisäksi myös välineet ovat kehittyneet vuosien saatossa. Nämä tekijät ovat aiheuttaneet kilpailuvauhtien kasvamisen, joka on muuttanut lajin vaatimuksia urheilijoille. (Mikkola ym., 2012)

Maastohiihdon vaatimusten täyttämiseksi vaaditaan pitkäjänteistä harjoittelua (Ohtonen & Mikkola, 2016). Erityisesti kestävyysharjoittelun avulla voidaan saada aikaan hengitys- ja verenkiertoelimistön (mm. Schmidt & Prommer, 2010) sekä autonomisen hermoston adaptaatioita (mm. Seiler ym., 2007), jotka ovat hyödyksi kestävyysuorituskyvyn kannalta. Tavallisen kestävyysharjoittelun lisäksi kestävyysurheilijat käyttävät yleisesti harjoitusmuotona hypoksiajaksoja (Heikura ym., 2018), joista kerrotaan tarkemmin kappaleessa 3.

2.1 Olosuhteet ja kilpailumuodot

Maastohiihtokilpailut järjestetään talvisin, joten kilpailuiden ja ulkona tapahtuvan talviharjoittelun lämpötila vaihtelee noin -20:stä +10°C:een (Rusko, 2003). Kansainvälisen hiihtoliiton (FIS) sääntöjen mukaan kilpailuiden järjestämisen lämpötilan alaraja on -20°C:tta. Kylmyyden lisäksi esimerkiksi kova tuuli, lumimyrsky, korkea ilmankosteus ja korkea lämpötila voivat olla esteitä kilpailun järjestämiselle. Näissä tapauksissa FIS:in tuomaristo tekee päätöksen kilpailuiden järjestämisestä yhdessä osallistuvien maajoukkueiden kapteenien, lääkintäpäällikön ja vastuussa olevan pelastushenkilöstön kanssa. (International Ski Federation, 2018, s. 53)

Vallitseviin sääolosuhteisiin ei voida vaikuttaa, eivätkä urheilijat voi merkittävässä määrin sopeutua niihin. Korkealla järjestettävien kilpailuiden hypoksiin eli vähähappisiin olosuhteisiin kuitenkin voidaan sopeutua oleskelemalla ja harjoittelemalla hypoksissa olosuhteissa. Korkeimmalla järjestetyt kilpailut on järjestetty noin 1800 metrin korkeudella merenpinnasta. (Rusko, 2003) Kilpailuiden järjestämiskorkeutta merenpinnan tasolta ei ole FIS:in säännöissä rajoitettu. Hiihtäjät käyttävät hypoksiajaksoja korkeanpaikan kilpailuihin valmistautumisen lisäksi harjoitusmuotona, jonka avulla pyritään aikaansaamaan suorituskykyä parantavia fysiologisia adaptaatioita (McArdle ym., 2010, s. 597). Hypoksiajaksoja voidaan toteuttaa joko vuoristoharjoitteluna tai simuloituissa hypoksisissa olosuhteissa merenpinnan tasolla (Rusko ym., 2004).

Maastohiihdossa kilpaillaan kahdella eri hiihtotyylillä – perinteisellä ja vapaalla – joissa molemmissa on useita alatekniikoita (Smith, 2003). Kilpailuaikojen perusteella on laskettu, että etenemien luistelutekniikkaa käyttäen on noin 10–25 % nopeampaa kuin perinteistä tekniikkaa käyttäen. Kohtuullisen suuri vaihtelu tekniikoiden nopeuksissa johtuu maastonmuodoista: nopeuserot ovat pienempiä tekniikoiden välillä jyrkissä maastonkohdissa, mutta suurempia laskuvoittoisilla osuuksilla. (Ohtonen & Mikkola, 2016)

Maastohiihdon kilpailumatkat vaihtelevat sprintistä (1,0–1,8 km) maratonmatkoihin saakka, joiden kesto on useita tunteja. Suoritusten kestot vaihtelevat siten noin kolmesta minuutista

useisiin tunteihin. (International Ski Federation, 2018; Vesterinen ym., 2009; Ohtonen & Mikkola, 2016) Eri matkojen lisäksi maastohiihdossa käytetään eri kilpailumuotoja, joita ovat väliaikalähtö-, yhteislähtö-, viesti-, parisprintti-, yhdistelmä- ja takaa-ajokilpailut (International Ski Federation, 2018). Ohtosen (2019) mukaan eri kilpailumuotojen lisäksi vaihtelua kilpailuihin tuovat järjestämispaikkojen vaihtumiset, ja osittain tästä syystä olosuhteet, kuten lämpötila, lumen koostumus, korkeus merenpinnan tasolta ja rataprofiilit muuttuvat kilpailuiden välillä. Olosuhdemuutokset aiheuttavat muutoksia myös suksien liukuominaisuuksiin. Eri hiihtotyylit sekä kilpailumatkat ja -muodot luovat omat haasteensa hiihtäjille. (Ohtonen, 2019)

2.2 Lajin vaatimukset

2.2.1 Fyysiset ominaisuudet

Korkean aerobisen kapasiteetin lisäksi anaerobisen kapasiteetin merkitys on suuri, koska lähes kaikilla matkoilla kilpailtaessa maksimaalisen hapenoton teho voidaan hetkellisesti ylittää johtuen maaston palauttavista osuuksista. (Ohtonen & Mikkola, 2016) Koska kilpamaastohiihdossa sekä aerobisiin että anaerobisiin systeemeihin kohdistuu korkeita vaatimuksia, on nopea palautuminen happivajeesta tärkeää, jotta tarvittavan vauhtijakauman toteuttaminen onnistuu. Huippuhihtäjät saattavat ylittää maksimaalisen hapenoton rajan jopa 20–60 %:lla ylämäkiosuuksilla. Maksimaalinen happivajeen määrä yhdistettynä korkeampaan kehon massaan vaikuttaisi olevan sprinttihiihtoon erikoistuneiden hiihtäjien erottava tekijä normaalimatkojen hiihtäjistä. Kuitenkin sekä normaali- että sprinttimatkojen lajin vaatimuksena on kyky tuottaa happivelkaa ja palautua siitä kilpailuiden tai erien välillä. (Losnegard, 2019)

Mikkolan ym. (2012) mukaan hiihdon kilpailuvauhdit ovat kasvaneet johtuen hiihtotekniikoiden ja välineiden parantumisesta. Näiden muutosten vuoksi hermo- lihasjärjestelmän voimantuotto-ominaisuuksilla ja anaerobisilla ominaisuuksilla on entistä enemmän vaikutusta hiihtosuorituksiin. Sprinttihiihdossa hiihtonopeudet ovat suurempia ja voimantuottoajat lyhyempiä kuin pidemmällä matkoilla, ja siihen sisältyy paljon nopeita

rytminvaihdoksia. Lisäksi sprinttihiluokkiluokkailu sisältävät parhaiten menestyneille urheilijoille useita lyhyitä maksimaalisia suorituksia lyhyen ajan sisällä ja ovat siten intervallityyppisiä. Tämä asettaa erityisvaatimuksia hiihtäjän palautumiskyvylle verrattuna pidempien matkojen kilpailuihin. Nämä seikat huomioon ottaen voidaan sanoa, että sprinttihiluokkailu suoritukseseen vaikuttavat aerobisen kapasiteetin lisäksi anaerobinen kapasiteetti, lajinomaiset voima- ja nopeusominaisuudet, tekninen osaaminen kilpailuvauheissa, palautumiskyky suoritusten välillä sekä taktinen osaaminen. (Mikkola ym., 2012; Sandbakk & Holmberg, 2014) Ruskon (2003) mukaan sprinttihiluokkailu lisäksi myös loppukireissä ja lyhyissä nousuissa käytetään pääasiassa anaerobista energiantuottotapaa, joka korostaa maksimaalisen hapenotto- ja voimantuoton tärkeyttä.

Koska maksimaalista hapenotto- ja voimantuoton tasoa ei voida pitää yllä pitkiä aikoja, pitkäkestoisissa suorituksissa tuloksen kannalta ratkaisevaksi tekijäksi jäävät kyky hiihtää pitkään mahdollisimman lähellä maksimaalisen hapenotto- ja voimantuoton rajaa sekä korkea väsymyksen sietokyky. (Rusko, 2003; Ohtonen & Mikkola, 2016) Väsymys liitetään yleensä energiansaantiin ja etenkin hiilihydraattivarastojen loppumiseen (Rusko, 2003). Enokan & Stuartin (1992) määritelmän mukaan lihasväsymyksellä tai väsymyksellä tarkoitetaan välitöntä suorituskyvyn laskua, joka havaitaan sekä kasvaneena yrityksen määränä halutun voimantuoton saavuttamiseksi että lopulta kykenemättömyytenä tuottaa tavoiteltu voima.

Vaikka sprinttihiluokkailu ja pitkän matkan hiihdoissa maastohiihtäjän ominaisuusvaatimukset eroavat toisistaan joiltain osin, Sandbakkin & Holmbergin (2014) sekä Sandbakkin ym. (2011) mukaan eliittitason sprintti- ja pitkän matkan hiihtäjiltä mitatut absoluuttiset VO_{2max} -arvot eivät juurikaan eroa toisistaan. Sprinttihiluokkailu kehon massa suhteutettu VO_{2max} on yleensä hieman matalampi ja heillä on tyypillisesti hieman suurempi anaerobinen kapasiteetti kuin pidemmille matkoille erikoistuneilla hiihtäjillä. Matalampi suhteellinen VO_{2max} voidaan selittää sprinttihiluokkailu tyypillisesti suuremmalla kehon massalla. (Sandbakk ym., 2011)

Sandbakk ym. (2011) pyrkivät tutkimuksessaan selvittämään huippusprinttihiluokkailu vaaditut ominaisuudet vertailemalla sprinttihiluokkailu aerobisia kapasiteetteja, tehokkuutta, vauhtikapasiteetteja, kiihtyvyyttä ja maksimaalista voimaa. Tutkimuksessa todettiin, että

huippusprinttereillä on ylivoimainen aerobinen kapasiteetti, tehokkuus sekä vauhtikapasiteetti, ja että nämä tekijät määrittävät sprinttihilhtosuoritusta. He myös päättelivät, että VO_{2max} on tärkeä suoritusta määrittelevä muuttuja normaalimatkanhiihtäjien lisäksi myös sprinttihilhtäjillä, koska maastohiihdossa metabolisen energian muuttaminen tehokkaasti etenemisnopeudeksi on suorituskyvyn tärkein tekijä hiihtomatkaista riippumatta. (Sandbakk & Holmberg, 2014) Sandbakk & Holmberg (2014) arvelevat artikkelissaan, että edellä mainittu havainto on yhteydessä hiihdon tekniseen monimutkaisuuteen, johon liittyy mm. käsien ja jalkojen voimantuoton oikea-aikainen ajoittaminen eri hiihtotekniikoilla.

Hiihdon eri tekniikoiden hyvä osaaminen mahdollistaa taloudellisen etenemisen ladulla (Rusko, 2003). Tekniikan osuutta taloudellisuuteen maastohiihdossa on kuitenkin tutkittava lisää korkeammilla intensiteeteillä ja niitä on suhteutettava maastohiihdon biomekaanisiin muuttujiin. (Sandbakk ym., 2011) Ruskon (2003) mukaan tehokkaimman tekniikan valinta kuhunkin maastonkohtaan on myös taktista osaamista, ja näillä valinnoilla voidaan säästää energiaa kilpailuissa. Hiihdon taloudellisuus on yhteydessä hermolihaskäytännön toimintaan.

2.2.2 Hermolihaskäytännön

Hermolihaskäytännön tärkeä ominaisuus on mukautuvuus. Merkittäviä kroonisia morfologisia ja toiminnallisia adaptaatioita tapahtuu kohdennettaessa kroonista stimulaatiota hermolihaskäytännön esimerkiksi fyysisellä harjoittelulla. (Enoka & Stuart, 1992) Hermolihaskäytännön yhtenä tärkeänä tehtävänä on tuottaa voimaa, joka ilmenee lihasten voimantuotona. Lihasten voimantuotto-ominaisuudet jaetaan yleisesti kolmeen osa-alueeseen; kesto-, nopeus- ja maksimivoimaan. Tämä jako perustuu hermolihaskäytännön motoristen yksiköiden rekrytointimäärään ja -tapaan sekä energiantuottovaatimukseen voimantuottohetkellä. (Häkkinen, 2018) Voimantuotto-ominaisuuksien lisäksi hermolihaskäytännön vastaa mm. tasapainon, ketteryyden, koordinaation ja liikenopeuden säätelystä. Urheilussa lihasten voimantuotto tapahtuu lajista riippuen vaihtelevilla liikenopeuksilla ja voimantuottonopeuksilla sekä erilaisissa asennoissa. (Ahtiainen & Häkkinen, 2018)

Maastohiihdon suorituskykyyn vaikuttavat siis hapenoton ja -kuljetuksen lisäksi hermolihaskäytännön toiminta. Hermolihaskäytännön kyky tuottaa korkeita voimia ja tehoja, vastustaa väsymystä sekä keskushermoston kyky rekrytoida lihaksia ovat tärkeässä roolissa kestävyysuorituksissa. (Rusko, 2003) Maastohiihdossa tuotetut voimat ovat yleensä suhteellisen pieniä, mutta voimaa on kyettävä tuottamaan läpi pitkienkin suoritusten (Ohtonen & Mikkola, 2016). Täten voidaan Häkkisen (2018) perusteella todeta, että maastohiihdossa tärkeimpänä voimantuotto-ominaisuutena käytetään kesto-voimaa.

Hermolihaskäytännön osuus korostuu etenkin rytmivaihdoksissa ja loppukiritilanteissa, jolloin sen on toimittava tehokkaasti, vaikka elimistön happamuus on kasvanut ja hapenkulutus on korkea. Jotkin kilpailumuodot – etenkin sprinttihiihto – sisältävät paljon hermolihaskäytännön korkeaa voimantuotto-kykyä ja anaerobisia ominaisuuksia sisältäviä rytmivaihdoksia ja kirejä. Sprinttihiihdossa toisaalta aerobiset ominaisuudet eivät ole yhtä korostuneessa roolissa kuin pidempien matkojen suorituksissa. Hermolihaskäytännön voi vaikuttaa hiihtosuoritukseen sekä voimantuotollisesti että hiihtäjän teknisen osaamisen kautta etenemisen taloudellisuuteen. (Ohtonen & Mikkola, 2016)

Hermolihaskäytännön toiminta voi usein olla hiihtosuoritusta rajoittava tekijä. Voimantuotto maaston nopeilla osuuksilla sekä kiritilanteissa on esitetty olevan ongelma useilla hiihtäjillä, joiden aerobinen kapasiteetti on korkeampi kuin anaerobinen kapasiteetti. Tämä ilmiö viittaa lihassolujakauman olevan enemmän painottuneempi hitaisiin kuin nopeisiin lihassoluihin. Toinen hermolihaskäytännön liittyvä suoritusta rajoittava tekijä voi olla sen kyky tuottaa voimaa pitkiä aikoja väsymättä. Tämä hermolihaskäytännön väsyminen on puolestaan yleisempää hiihtäjillä, joiden lihassolujakauma on painottunut nopeampiin soluihin. (Ohtonen & Mikkola, 2016)

2.2.3 Energia-aineenvaihdunta

Maastohiihdossa kulloinkin ensisijaisena käytettävän energiantuottosysteemin käyttö on vahvasti riippuvainen kilpailun kestosta (Gastin, 2001) eli vaaditusta energiantuottonopeudesta. Energia-aineenvaihdunta voidaan jakaa karkeasti aerobisesti ja anaerobisesti tapahtuvaan

energiantuottoon. Näissä prosesseissa ravinnon kemiallinen energia siirretään adenosiinitrifosfaattiin (ATP), joka on solujen hyödynnettävissä oleva energiamuoto. (Nummela, 2016) Solujen aerobinen aineenvaihdunta pohjautuu ATP:n oksidatiiviseen fosforylaatioon, joka perustuu hiilihydraattien ja rasvojen hapettamiseen. Aerobinen aineenvaihdunta kykenee kuitenkin tuottamaan huomattavasti pienemmän maksimaalisen tehon kuin anaerobisesti tapahtuva aineenvaihdunta. (Gastin, 2001) Siksi matalan intensiteetin liikkumisessa aerobinen energiantuotto on hallitseva, mutta intensiteetin kasvaessa anaerobisen energiantuoton osuus kasvaa. Anaerobinen energiantuotto muuttuu hallitsevaksi lihasten energiantarpeen kasvaessa 10–40-kertaiseksi lepotilaan verrattuna (Nummela, 2016).

ATP:n tuottaminen anaerobisesti tapahtuu joko lihasten fosfokreatiinivarastoista pilkkomalla korkeaenergisiä fosfaatteja kreatiinifosfaatista (PCr) tai glykolyysillä hiilihydraattivarastoista (Nummela, 2016). Vaikka anaerobinen aineenvaihdunta kykenee tuottamaan korkeaa metabolista tehoa, niin sen energiakapasiteetti on huomattavasti matalampi kuin aerobisen aineenvaihdunnan. Yhtenä energianlähteenä elimistö hyödyntää veren glukoosia, jota käytetään levossa noin 0,5 g/min. Kuormituksessa, jonka intensiteetti on noin 70–90 %:a maksimaalisesta hapenottokyvystä, voi verestä käytetyn glukoosin määrä nousta arvoon 2 g/min. Veren glukoosin hyödyntäminen lihaksissa on riippuvaista lihasten glykogeenin hyödyntämisen määrästä. (Rusko, 2003) Glykogeenia on varastoituneena lihaksiin ja maksaan, josta sitä voidaan muuntaa glukoosiksi tarvittaessa (Iländer & Heikura, 2021).

Korkean intensiteetin harjoittelussa elimistö tuottaa energiaa pääsääntöisesti anaerobisesti, jolloin enemmän glukoosia tai glykogeeniä hapetetaan pyruvaatiksi, joka reagoi edelleen maitohapoksi. Maitohappo hajoaa hyvin nopeasti laktaatti- ja vetyioneiksi, joista vetyionit vaikuttavat elimistön happamuuden (pH) nousuun. (Nummela, 2016) pH-tason lasku inhiboi ATP:n tuotantoa ja heikentää lihasten supistuvuutta. Tästä huolimatta lihasten ATP-konsentraatio ei laske paljoa edes anaerobisen suorituksen aikana. (Rusko 2003)

Maastohiihdossa yli kahden minuutin suorituksissa elimistön energiantuotanto tapahtuu pääsääntöisesti aerobisesti, jolloin energiaa muodostuu ravinnosta saatavista hiilihydraateista ja pitkäkestoisissa suorituksissa rasvoista (Ohtonen & Mikkola, 2016). Voidaan siis todeta, että kokonaisuutena maastohiihdossa energiantuotanto tapahtuu pääsääntöisesti aerobisesti, vaikka

kaikki energiantuottosysteemit toimivatkin samanaikaisesti. Hiihtosuorituksen aikaisen energiantuotannon rajoittava tekijä on hapen kuljetus.

2.3 Kestävyysharjoittelu

Jotta urheilija saavuttaisi edellä mainitut lajin fysiologiset vaatimukset ja menestyisi kansainvälisellä tasolla, on hiihtäjän harjoiteltava suuria määriä laadukkaasti. Ohtosen & Mikkolan (2016) mukaan maastohiihdossa kansainväliselle tasolle nouseminen vie noin 10 vuotta ja 10 000 harjoitustuntia. Tämän lisäksi kansainvälisellä tasolla normaalimatkoilla menestymiseen tarvitaan noin 800–900 tuntia harjoittelua vuodessa ja vastaavasti sprinttimatkoilla menestymiseen noin 750–850 tuntia vuodessa. (Ohtonen & Mikkola, 2016)

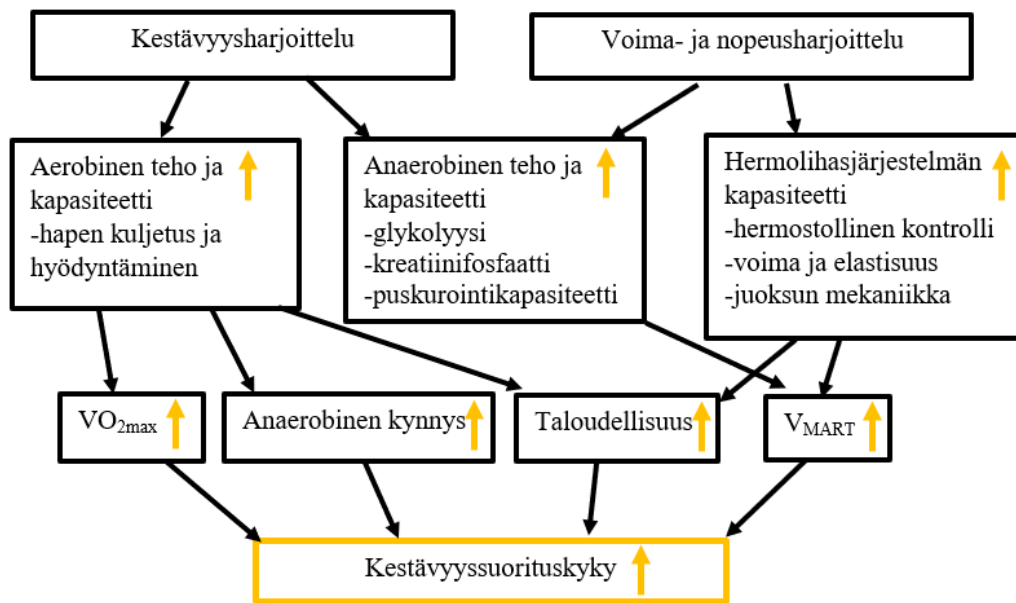
Kestävyyssuorituskyvyn ja muidenkin fyysisten ominaisuuksien kehittyminen perustuu alun perin Nikolai Yakovlevin määrittelemään superkompensaatio-periaatteeseen (Viru, 2002), jossa elimistöön aiheutetaan kontrolloitu ylikuormitustila sopivasti harjoittelun kestoja, intensiteettiä ja tiheyttä kasvattamalla. Kontrolloidusta ylikuormituksesta palautuessa kehossa tapahtuu adaptaatioita sopeutumaan muuttuneeseen kuormituksen tasoon, jotka oikein toteutetussa harjoittelussa näkyvät suorituskyvyn kasvuna. (McArdle ym., 2010, s. 453) Ylikuormitusperiaatteen mukaan kuormituksen aiheuttaman stressin on kyettävä häiritsemään elimistön homeostaasia eli tasapainotilaa. Jos näin ei tapahdu, ei myöskään synny harjoitusvaikutusta. (Hynynen ym., 2010)

Erilaiset stressitekijät, kuten tässä tapauksessa fyysinen kuormitus, aiheuttavat elimistössä Selyen (1936) stressiteorian mukaan alun hälytysreaktion sekä akuutin adaptoitumisen harjoituksen vaatimukseen, vastuksen tai kuormituksen kehitykseen ja väsymykseen. Hälytysreaktioita fyysiseen kuormitukseen ovat mm. lihasten rekrytointi, hormonien erittyminen, energiansaannin tehostuminen sekä puolustusmekanismien käyttöönotto. Hermostolliset ja hormonaaliset mekanismit välittävät nämä vasteet autonomisen hermoston toimintaan. Autonomisen hermoston toiminta urheilussa havaitaan hypotalamuksen, aivolisäkkeen ja sympaattisen hermoston aktivoitumisena sekä stressihormoneina tunnettujen katekoliamiinien ja kortisolin erittymisenä. Nämä toiminnot mahdollistavat elimistön akuutin

adaptoitumisen harjoittelun vaatimuksiin, ja siten auttavat vastustamaan harjoittelun aiheuttamaa homeostaasin häiriintymistä. (Rusko, 2003)

Maastohiihtäjien on raportoitu harjoittelevan polarisoidun kestävyysharjoittelumallin mukaan. Polarisoitu harjoittelumalli sisältää määrällisesti paljon matalan intensiteetin (LIT) ja vähän tai kohtalaisesti korkean intensiteetin harjoittelua (HIT). Paljon harjoitelleille urheilijoille polarisoitu harjoittelu voi mahdollistaa optimaalisen adaptoitumisen harjoitteluun samalla minimoiden autonomiset ja hormonaaliset stressivasteet (Seiler ym., 2007) sekä siten mahdollisesti vähentää ylikuormittumisen riskiä. On muistettava, että fyysinen rasitus ei ole ainut stressitekijä elimistölle, vaan esimerkiksi myös erilaiset ympäristötekijät aiheuttavat kuormitusta. Kaikki stressitekijät muodostavat elimistön kokonaiskuormituksen, joka koostuu henkilökohtaisista ja tilanteellisista stressitekijöistä. Harjoitusvasteet ovat yksilöllisiä samaan harjoitukseen, koska kokonaiskuormitus on ihmisillä erisuuruinen. Harjoittelun aiheuttaman stressin ollessa liian suuri, voi aiheutua joko akuutti tai krooninen väsymys- ja uupumustila. Tällöin vamma-, sairastumis- tai yliharjoitustilan riski kasvaa. (Rusko, 2003)

Paavolainen ym. (1999) esittivät tutkimuksessaan, että kestävyysuorituskykyyn vaikuttavat aerobisen tehon ja taloudellisuuden lisäksi hermolihasjärjestelmään ja anaerobiseen tehoon liittyvä lihasteho. Tutkimuksessa huomattiin, että 5 km:n juoksutestin ajan ja maksimaalisen hapenottokyvyn välinen korrelaatio oli yhteydessä myös juoksun taloudellisuuteen ja maksimaalisen anaerobisen juoksutestin (maximal anaerobic running test, MART) huippunopeuden kanssa (V_{MART}). Vaikka mitatut hermolihasjärjestelmän ominaisuudet eivät korreloineet 5 km:n juoksutestin tulosten kanssa, korreloivat ne kuitenkin V_{MART} :n kanssa, joka viittaa lihastehon vaikuttavan kestävyysuorituskykyyn. Täten kestävyysuorituskyvyn parantaminen voi onnistua yhdistämällä kestävyysharjoitteluun voimaharjoittelua lihastehon kasvattamiseksi. Kestävyysuorituskykyyn vaikuttavia tekijöitä on esitetty kuvassa 1.



KUVA 1. Yhdistetyn kestävyys- ja voimaharjoittelun vaikutukset kestävyysuorituskykyyn. (Mukaien Paavolainen et al., 1999)

2.3.1 Hengitys- ja verenkiertoelimistön adaptaatiot

Maastohiihtosuorituksen kannalta tärkeitä kestävyysharjoittelun aiheuttamia fysiologisia adaptaatioita ovat muun muassa hengitys- ja verenkiertoelimistön sekä lihaksiston adaptaatiot. Harjoitusadaptaatiot ovat kuormitusspesifejä, eli aikaansaadut adaptaatiot vaihtelevat harjoitusärsyksen keston, intensiteetin ja tiheyden mukaan. Lisäksi vaihtelua harjoitusvasteissa aiheuttavat suuresti yksilön itselleen asettamat suorituskyvyn ja kunnan tavoitteet. (McArdle ym., 2010, s. 453) Sopivan suuruinen ja toistuva harjoitusten aiheuttama stressi aiheuttaa adaptaatioita, joiden ansiosta elimistön kyky vastustaa homeostaasin häiriöitä paranee soluissa, kudoksissa ja elimissä. Tätä ilmiötä kutsutaan harjoitusvaikutukseksi. (Rusko, 2003)

Kestävyysharjoittelu voi kasvattaa VO_{2max} :ä (Schmidt & Prommer, 2010), jonka on havaittu olevan kestävyysuorituskyvyn kannalta ratkaiseva muuttuja (mm. Costill ym., 1973; Foster, 1983). VO_{2max} :llä kuvataan parantunutta keuhkojen hapenottoa ilmastasta vereen, tehostunutta veren punasolujen kykyä sitoa ja kuljettaa happea, sydämen kykyä pumpata verta, verenkiertoelimistön kykyä toimittaa happipitoinen veri lihaksille sekä solujen kykyä käyttää

happea. Maastohiihdossa korkean ventilaation ylläpito ja hengityslihaksisen väsymyksen sietokyky voivat siten olla tärkeää kilpailuissa suorituskyvyn säilymisen kannalta. (Rusko, 2003) VO_{2max} :ssä voidaan havaita kasvua kestävyysharjoittelun seurauksena johtuen hematologisista adaptaatioita eli veren koostumuksen muutoksista, kuten kokonaishemoglobiinimassan ja plasman määrän kasvusta. Plasman tilavuuden kasvu aiheuttaa myös sydämen minuuttitilavuuden kasvua. (Schmidt & Prommer, 2010) Yksilön maksimaalinen syke ei kuitenkaan yleensä muutu kovinkaan paljoa harjoittelun seurauksena (Rusko, 2003).

VO_{2max} :n on havaittu olevan suoraan verrannollinen maksimaaliseen minuuttitilavuuteen. Kestävyysharjoittelu kasvattaa kokonaishemoglobiinimassaa ja plasman tilavuutta, jolloin sydämen minuuttitilavuus kasvaa (Schmidt & Prommer, 2010). Minuuttitilavuuden arvellaan olevan tärkein yksittäinen tekijä, joka määrittää maksimaalista hapenottokykyä (Rusko, 2003). Kestävyysharjoittelun seurauksena tapahtuu aerobisen ja anaerobisen aineenvaihdunnan tehostumista ja siten hapenottokyvyn paranemista. Tämä johtuu osittain lihassolujen mitokondrioiden määrän lisääntymisestä eli mitokondrioiden biogeneesistä, joka saa aikaan hapen tehokkaamman hyödyntämisen. (McArdle ym., 2010, s. 459) Lihaksistossa tapahtuu kestävyysharjoittelun tuloksena myös kapillaarisuonien uudismuodostusta eli angiogeneesiä. Näiden lihaksissa tapahtuvien adaptaatioiden ansiosta hapenkuljetus ja käyttö energiantuotantoon tehostuu. Tämä auttaa lisäämään väsymyksen sietokykyä pitkäkestoisissa aerobisissa suorituksissa. (Denis ym., 1986)

Kestävyysharjoittelun aiheuttamia hematologisia adaptaatioita ovat esimerkiksi veren plasman määrän sekä punasolu- ja hemoglobiinimassan kasvu. Nämä kestävyys suorituskyvyn kannalta positiiviset adaptaatiot näkyvät muun muassa tehostuneena hapenkuljetuksena, laajentuneena hiussuoniverkostona, sydämen isku- ja minuuttitilavuuden nousuna, verenpaineen säätelyn parantumisena (Rusko, 2003), sydämen koon kasvuna ja sydämen sykkeen alentumisena vakioitehoisessa kuormituksessa. (Lamberts ym., 2004) Alentunut syke submaksimaalisen harjoittelun aikana viittaa sydämen iskutilavuuden kasvuun. Tästä syystä submaksimaalisen harjoituksen aikaisen sykkeen perusteella voidaan arvioida sydämen iskutilavuutta, sydämen kokoa ja maksimaalista hapenottokykyä. (Rusko, 2003) Puolestaan kohonnut syke

vakiotehoisessa kuormituksessa yhdistetään alentuneeseen kuntotasoon, nestehukkaan tai ylikuormitukseen. (Lamberts ym., 2004)

2.3.2 Autonomisen hermoston adaptaatiot

Kestävyysharjoittelu aiheuttaa adaptaatioita myös autonomisen hermoston toiminnassa. Sykevälivaihtelun (HRV) on havaittu laskevan kestävyysurheilijoilla toteutetuissa tutkimuksissa raskaan harjoittelun seurauksena sekä harjoitusjakson että yksittäisten päivien osalta (Hynynen ym., 2007, 2010; Pichot ym., 2000) ja puolestaan nousevan kevyemmän harjoitusjakson aikana (Pichot ym., 2000). Kasvanut HRV viittaa parasympaattisen hermoston aktiivisuuden kasvuun ja sympaattisen hermoston aktiivisuuden laskuun. Laskenut HRV puolestaan viittaa päinvastaiseen tapahtumaan. Täten matalammat HRV-lukemat viittaavat suurempaan kuormitukseen ja korkeammat lukemat kuormituksesta palautuneisuuteen. (Hainsworth ym., 2007)

Tutkimuksissa on havaittu suuremman harjoitusintensiteetin (Kaikkonen ym., 2008) ja heikomman fyysisen kunnon (Tulppo ym., 1998) hidastavan HRV:n palautumista harjoittelusta. Seilerin ym. (2007) tutkimuksessa havaittiin paljon harjoitteluiden kestävyysurheilijoiden autonomisen hermoston palautumisen olevan huomattavasti nopeampaa korkean intensiteetin harjoituksesta kuin noin seitsemän tuntia viikossa harjoittelevien aktiiviliikkujien palautuminen. Kyseisessä tutkimuksessa ei voitu todistaa kestävyysharjoittelun aiheuttavan nopeampaa palautumista kovatehoisesta harjoittelusta, koska ilmiössä voi olla kyse myös menestyneiden urheilijoiden luontaisesta ominaisuudesta. Fyysisen harjoittelun aiheuttaman HRV:n laskun on todettu Furlanin ym. (1993) mukaan palautuvan harjoitusta edeltävälle tasolle alle 24 tunnin kuluessa harjoittelusta normoksissa olosuhteissa.

Harjoittelemattomilla henkilöillä sympaattisen hermoston aktivaatio ja stressihormonien erityisesti aiheuttavat sydämen supistusvoiman eli iskutilavuuden kasvua kestävyysharjoituksen aikana. Pitkään jatkuneen kestävyysharjoittelun seurauksena sympaattisen hermoston aktiivisuus ja stressihormonien erityisesti laskevat. Kestävyysharjoittelun aiheuttaman sympaattisen hermoston aktivaation lasku ei kuitenkaan aiheuta sydämen iskutilavuuden pienenemistä takaisin

alkuperäiseen (Rusko, 2003). Tämä johtuu siitä, että kestävyysharjoittelun aiheuttaman veren tilavuuden kasvun (Schmidt & Prommer, 2010) vuoksi sydämen venytys ennen supistusvaihetta mahdollistuu. Tämä parantaa supistusvoimaa ja siten kasvattaa iskutilavuutta ilman sympaattisen hermoston aktiivisuuden ja stressihormonien erityksen kasvua. Tämän ansiosta sydämen toiminnasta tulee energiatehokkaampaa, jolloin myös sydämen minuuttitilavuuden kasvu mahdollistuu.

3 HYPOKSIAJAKSOT

Hypoksisissa olosuhteissa toteutettuja harjoitusjaksoja on yleisesti käytetty harjoittelumuotona etenkin kestävyysurheilijoiden keskuudessa (Heikura ym., 2018). Hypoksiajaksojen tarkoituksena on parantaa merenpinnan tason suorituskykyä sopeuttamalla elimistö hypoksiaan eli hengitysilman pienempään hapen määrään. (McArdle ym., 2010 s. 596–602) Hypoksiajakso voidaan Milletin ym. (2010) mukaan jakaa akklimatisaatio-, harjoittelu-, palautumis- ja merenpinnan tasolle paluuseen valmistavaan vaiheeseen sekä varsinaiseen paluuvaiheeseen. Optimaalinen akklimatisaatio eli sopeutuminen muuttuviin ympäristöolosuhteisiin tapahtuu hypoksiassa noin kahdeksan päivän kuluttua saapumisesta korkealle (Bernardi ym., 2001).

Peltosen & Nummelan (2016) mukaan hypoksiajaksoja voidaan yleisesti käyttää joko lisäämään hemoglobiinimassaa ja siten hapenkuljetuskapasiteettia, tai vain sopeutumiseen korkealla järjestettäviä kilpailuita varten. Kilpailuita varten on mielekästä matkustaa korkealle sopeutumisleirille, jos kilpailut järjestetään yli 1200 metrin korkeudessa. (Peltonen & Nummela, 2016) Hypoksiajakso voidaan toteuttaa joko perinteisesti korkeanpaikanharjoitteluna vuoristossa tai simuloituna hypoksiajaksona esimerkiksi alppimajassa (Rusko ym., 2004). Lisäksi hypoksiajaksot voidaan toteuttaa erilaisten mallien mukaan, jotka eroavat toistaan asumis- ja harjoittelukorkeuksien suhteen (Wilber, 2007).

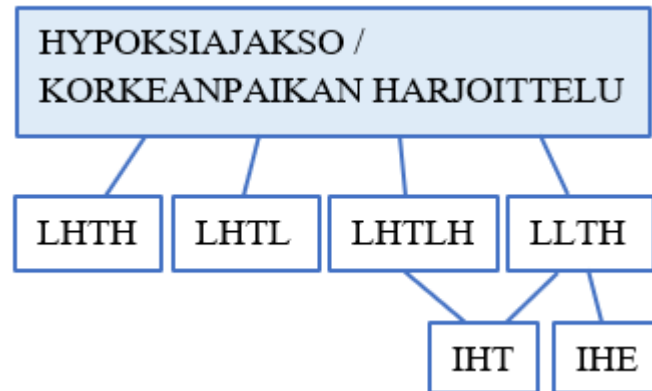
Ruskon (2003) mukaan korkealla järjestettyjen hiihdon maailman cupin osakilpailujen määrä on noussut, joka on todennäköisesti syynä hiihtäjien kasvaneelle korkealla järjestettävien lumileirien määrälle. Hänen mukaansa lisääntyneiden korkeanpaikanleirien ansiosta hiihtäjien veren punasolumassa, hemoglobiinikonsentraatio ja veren tilavuus ovat yleisesti nousseet. Onnistuneen hypoksiajakson aiheuttaman parantuneen hapenkuljetuksen seurauksena VO_{2max} nousee (Peltonen & Nummela, 2016), jonka on jo edellä todettu olevan yksi tärkeimmistä tekijöistä kestävyyslajien suorituskyvyn kannalta.

3.1 Hypoksiajaksojen mallit

Hypoksiajaksojen toteutukseen on käytössä useita erilaisia malleja. Päämallit ovat Wilberin (2007) ja Milletin ym. (2010) mukaan LHTH (Live High – Train High), LHTL (Live High – Train Low), LLTH (Live Low – Train High) sekä LHTLH (Live High – Train Low and High) -mallit. LHTH-mallissa urheilijat asuvat ja harjoittelevat korkealla, LHTL-mallissa urheilijat asuvat korkealla, mutta harjoittelevat matalammissa korkeuksissa ja LLTH-mallissa he asuvat matalalla, mutta harjoittelevat korkealla. LHTL-mallin etuna on harjoittelun tapahtuminen matalammilla korkeuksilla, joka mahdollistaa harjoittelun absoluuttisen korkean intensiteetin ylläpitämisen (Levine & Stray-Gundersen, 1992).

LLTH-malliin kuuluvat lyhytkestoisemmat hypoksia-altistukset, kuten ajoittainen hypoksia-altistus IHE (Intermittent Hypoxic Exposure) ja ajoittainen hypoksiaharjoittelu IHT (Intermittent Hypoxic Training) (Wilber, 2007). LHTLH-malli on yhdistelmä LHTL- ja LLTH-malleista, jossa urheilijat asuvat korkealla ja harjoittelevat sekä matalalla että korkealla. Simuloidussa hypoksiassa, kuten alppimajakajakson aikana, käytetään useimmiten LHTL- tai LHTLH-mallin mukaista harjoitusjaksoa. On todettu, että IHE ei ole tehokkain tapa parantaa suorituskykyä, ja että IHT ja LHTLH-mallien osalta tarvitaan vielä tarkempia tutkimuksia. (Millett ym., 2010) Edellä kuvatut hypoksiaharjoittelumallit on esitetty kuvassa 2.

Erilaisten hypoksiamallien lisäksi hypoksiajaksot voidaan toteuttaa joko normobaarisessa tai hypobaarisessa hypoksiassa. Hypobaarisessa hypoksiassa suhteellinen hapen osapaine on pienempi ja normobaarisessa hypoksiassa hengitetyn hapen osuus on puolestaan pienempi kuin normoksiassa merenpinnan tasolla. Molemmat hypoksian muodot aiheuttavat happisaturaation laskun. (Giles ym., 2016) Näiden hypoksiamuotojen aiheuttamien adaptaatioiden eroavaisuuksista ja adaptaatioiden suuruuksista ei ole tutkijoiden kesken vielä täydellistä yhteisymmärrystä. Tästä syystä tässä tutkielmassa molempia hypoksian muotoja käsitellään samankaltaisina ympäristöinä, vaikka niiden aiheuttamat fysiologiset vasteet voivat erota jonkin verran toisistaan (Millett ym., 2012; Mounier & Brugniaux, 2012).



KUVA 2. Hypoksiajaksojen toteutuksen mallit (mukaiillen Wilber, 2007).

LHTH-mallilla toteutetun korkeanpaikan leirin jälkeen paras aika kilpailemiselle on 3–4 viikon kuluttua leirin päättymisestä ja paluusta merenpinnan tasolle, mutta LHTLH- tai LHTL-mallilla toteutetun korkeanpaikan leirin jälkeen suorituskyky voi olla erittäin hyvä heti korkealta palatessa. Hemoglobiinimassa on suurimmillaan välittömästi merenpinnan tasolle paluun jälkeen, ja pienenee hitaasti ensimmäisten kahden viikon aikana. Kuitenkin hemoglobiinimassa palautuu ennen leiriä olevalle tasolle noin neljän viikon kuluessa leirin päättymisestä johtuen neosytolyysistä, jossa elimistö tuhoaa uusia punasoluja sopeutuakseen suurempaan happipitoisuuteen. (Peltonen & Nummela, 2016)

3.2 Hypoksiajaksojen aiheuttamat adaptaatiot

3.2.1 Hengitys- ja verenkiertoelimistön adaptaatiot

Hypoksian seurauksena veren happisaturaatio eli valtimoveren happikyllästeisyys laskee akuutisti, joka lisää munuaisten erytropoietiinin (EPO) eritystä, joka saa aikaan erythropoiesin eli punasolutuotannon stimulaation (McArdle ym., 2010, s. 596–602). Levossa mitatun happisaturaation on havaittu laskevan terveen ihmisen keskimääräisestä 97 %:sta (Collins ym., 2015) 92 %:iin kohtalaisessa alle 3000 metrin korkeudessa. Tätä suuremmissa korkeuksissa happisaturaatio laskee vielä alemmas. (Mazzeo, 2008)

Seerumin EPO-pitoisuus kasvaa muutamia päiviä korkealle saapumisen jälkeen (Witkowski ym., 2002). Tämän jälkeen EPO:n määrä laskee ja asettuu hieman vanhan perustason yläpuolelle (Schmidt & Prommer, 2010). Chapmanin ym. (2014) tutkimuksen mukaan neljän viikon mittaisen hypoksiajakson aikana EPO:n määrässä tapahtuu keskimäärin 150 %:n kasvu perustasoon nähden. Punasolumassa kasvaa samassa ajassa noin 1,5–2,0 ml/kg. Tutkijoiden mukaan korkeanpaikan harjoittelun aiheuttamat suorituskykyparannukset johtuvat suurimmaksi osaksi hematologisista akklimatisaatioista. Tärkeimmäksi adaptaatioksi on havaittu erytropoieesin kiihtyminen, jonka seurauksena hapenkuljetus ääreiskudoksiin tehostuu. (Chapman ym., 2014; Stray-Gundersen ym., 2001)

Veren hemoglobiinikonsentraatio (g/l) kasvaa korkeaan ilmanalaan mentäessä, koska hapen osapaineen optimoimiseksi veren plasman tilavuus pienenee muutaman tunnin tai viimeistään muutaman päivän sisällä korkealle saapumisesta (Schmidt & Prommer, 2010). Koko korkealla olon ajan plasman tilavuus pysyy matalana, mutta kokonaishemoglobiinimassa kasvaa, kunnes lopullinen veren tilavuus on saavutettu (Heinicke ym., 2003). Veren punasolu- ja hemoglobiinimassan kasvaessa veren hapenkuljetus tehostuu ja hapenottokyky paranee (McArdle ym., 2010, s. 596–602).

Tavallisissa harjoitusolosuhteissa merenpinnan tasolla VO_{2max} voi kasvaa kestävyysharjoittelun tuloksena, kun kokonaishemoglobiinimassa ja plasman tilavuus suurenevät aiheuttaen sydämen minuuttitilavuuden kasvua. Puolestaan hypoksisissa olosuhteissa kokonaishemoglobiinimassan kasvu yhdessä plasman määrän vähenemisen kanssa kasvattaa hemoglobiinikonsentraatiota ja VO_{2max} :ä (Schmidt & Prommer, 2010) Myös akuutihypoksian on havaittu aiheuttavan sydämen minuuttitilavuuden kasvua. Hypoksian akklimatisaatiovaiheen päätyttyä sydämen minuuttitilavuus laskee jättäen sykkeen normaalia korkeammaksi, samalla siis pienentäen iskutilavuutta (Hainsworth ym., 2007). Hypoksisissa olosuhteissa kokonaishemoglobiinimassan kasvulla ei ole havaittu yhtä suurta vaikutusta VO_{2max} -arvoon kuin normoksiassa (Heinicke ym., 2003). Tämä voi Wagnerin (2000) mukaan johtua lihasten ja keuhkojen diffuusiokapasiteetin sekä ventilaation riittämättömyydestä hypoksisissa olosuhteissa. Minuuttitilavuuden ja hemoglobiinikonsentraation kasvu eivät kuitenkaan ole rajoittavia tekijöitä VO_{2max} :n kasvun kannalta. (Wagner, 2000) VO_{2max} :n kasvu perustuu siis eri mekanismeihin normoksiassa ja hypoksiassa. Nämä molemmat mekanismit kuitenkin

vaikuttavat urheilijoihin, jotka hyödyntävät harjoittelujaksoja hypoksisissa olosuhteissa. (Schmidt & Prommer, 2010)

Kappaleessa 3.1 kuvatuista hypoksiamalleista LHTL-mallin mukaisen hypoksiajakson on todettu olevan toimivampi eliittikestävyysurheilijoiden suorituskyvyn parantamiseksi kuin merenpinnan tasolla toteutettava harjoittelu tai LHTH-mallin mukainen hypoksiajakso (Levine ym., 1997). Myös muut LHTL-malliin kohdistuneet tutkimukset ovat osoittaneet sen parantavan maksimaalista hapenottoa ja siten suorituskykyä (esim. (Robertson ym., 2010; Saunders ym., 2009; Stray-Gundersen ym., 2001) Kuitenkin Chapmanin ym. (1998) tutkimuksen mukaan yleisesti toimivimmiksi todettujen LHTL- ja LHTHL-mallien mukaisella harjoittelullakin vain noin 50 %:lle urheilijoista saatiin aikaan ryhmän keskiarvon ylittävät vasteet hypoksiaan: selkeä kasvu EPO-pitoisuudessa ja siten myös punasolumassassa. Yhteistä kaikilla urheilijoilla, joilla hypoksia aiheutti toivottuja vasteita, oli EPO:n määrän akuutti- ja pidempiaikainen nousu, joka voi aiheuttaa ketjureaktion ensin kasvattaen punasolumassaa, sitten VO_{2max} :a ja lopulta merkittävästi parantaen kestävyys suorituskykyä. (Chapman ym., 1998) On kuitenkin muistettava, että korkeanpaikan harjoittelun vaikutukset elimistöön ovat yksilöllisiä (mm. Nummela y., 2021; Stray-Gundersen ym., 2001; Wilber, 2007).

Useiden tutkimusten mukaan (mm. Garvican-Lewis ym., 2015; Wehrin ym., 2006; Garvican ym., 2012) kestävyysurheilijoiden saavuttama tyypillinen hemoglobiinimassan kasvu korkealla suoritettuna noin kolmen viikon mittaisen harjoittelujakson jälkeen on noin 2–5 %. Edellä mainituissa tutkimuksissa asumiskorkeudet vaihtelivat 1800–2760 metrin välillä ja niissä käytettiin eri hypoksiajaksojen malleja. Garvican-Lewisin ym. (2015) tutkimuksessa käytettiin LHTH-mallia ja Garvicanin ym. (2012) ja Wehrinin ym. (2006) tutkimuksessa LHTL-mallia.

Garvicanin ym. (2012) mukaan hemoglobiinimassa kasvaa keskimäärin yhden prosentin viikossa tai yhden prosentin jokaista 100 altistustuntia kohden LHTL-hypoksiajaksolla. Samanlaiseen lopputulokseen olivat päätyneet aiemmin myös Clark ym. (2009) ja Robertson ym. (2010) tutkimuksissaan simuloitusta LHTL-hypoksiajaksosta 3000 metrin korkeutta vastaavassa ilmanalassa, jossa päivittäinen hypoksia-altistus kesti noin 14 tuntia. Robertsonin ym. (2010) tutkimuksessa tutkittavien hemoglobiinimassa kasvoi noin kolme prosenttia kolmen viikon mittaisen simuloitun LHTL-hypoksiajakson aikana. Samassa tutkimuksessa havaittiin

VO_{2max} :n kasvu kahdella prosentilla, mutta nämä muutokset eivät kuitenkaan heijastuneet juoksusuorituskykyyn. (Robertson ym., 2010) Stray-Gundersenin & Levinen (1999) tutkimuksessa havaittiin 5 %:n kasvu VO_{2max} :ssä asumiskorkeuden ollessa 2500 m neljän viikon ajan. Schmidtin & Prommerin (2010) tutkimuksessa hemoglobiinimassan ja maksimaalisen hapenottokyvyn välillä on havaittu lineaarinen suhde; hemoglobiinimassan kasvaessa yhdellä grammalla, nousee hapenottokyky noin neljällä millilitralla.

Toisaalta joissakin tutkimuksissa (Nummela & Rusko, 2000; Saunders ym., 2004) simuloidun LHTL-hypoksiajakson jälkeen on havaittu noin yhden prosentin kasvua suorituskäytössä, mutta ei lainkaan hematologisia muutoksia. Myös (Gore ym., 1998; Pottgieser ym., 2008) eivät tutkimuksissaan havainneet merkitsevää kasvua pyöräilijöiden hemoglobiinimassoissa. Pottgieserin ym. (2008) tutkimus toteutettiin noin 1800 metrin korkeudessa kolmen viikon ajan. Goren ym. (1998) 2690 metrin korkeudessa 31 vuorokauden ajan toteutetun hypoksiajakson jälkeen ei havaittu merkittäviä muutoksia myöskään VO_{2max} :ssä. Vaikka hematologiset adaptaatiot jäisivät pieniksi, voi korkeanpaikan harjoittelulla olla muitakin hyötyjä, kuten juoksun taloudellisuuden parantuminen, lihasten happamuuden puskurointikyvyn kasvaminen (Robertson ym., 2010) ja angiogeneesin lisääntyminen (Heikura ym., 2018). Korkeanpaikan harjoittelun hematologisista ja suorituskäytöllisistä vaikutuksista ei kuitenkaan ole täydellistä yhteisymmärrystä tutkijoiden keskuudessa, johon pääsyyinä on todennäköisesti tutkimusmetodien laaja kirjo (Lundby & Robach, 2016). Tähän voivat osaltaan vaikuttaa myös tutkimuksen kohteena olevien urheilulajien erilaisuus sekä tutkittavien urheilijoiden taso.

Akuutihypoksian on havaittu kasvattavan vakioitehoisen kuormituksen aikaisia laktaattipitoisuuksia verrattuna normoksiassa suoritettuun vastaavanlaiseen kuormitukseen. Tämä johtuu siitä, että hypoksiassa suoritettujen harjoitusten suhteellinen intensiteetti on suurempi verrattuna normoksiassa suoritettuun teholtaan yhtä suureen kuormitukseen. Tämä on myös syy VO_{2max} :n akuuttiin laskuun hypoksisissa olosuhteissa ennen sopeutumista. (Mazzeo, 2008; Sumi ym., 2018) Hypoksiaan sopeutumisen jälkeen vakioitehoisen kuormituksen laktaattipitoisuuksien on kuitenkin havaittu laskevan verrattuna ennen sopeutumista toteutettuun harjoitukseen (Kayser, 1996).

3.2.2 Autonomisen hermoston adaptaatiot

Hypoksiset olosuhteet erityisesti yhdistettynä raskaaseen harjoitteluun aiheuttavat huomattavaa lisäkuormitusta elimistölle (Peltonen & Nummela, 2016). Hypoksia aiheuttaa muutoksia autonomisen hermoston toimintaan, jonka tärkeimpiä vaikutuksia kohdistuu urheilussa pääasiassa sydämen toimintaan. Muuttuvat ympäristöolosuhteet aiheuttavat normaalisti toimivassa autonomisessa hermostossa HRV:n muutoksia (Thayer ym., 2012). Suurin osa hypoksiaan sopeutumiseen liittyvistä muutoksista tapahtuu ensimmäisten päivien ja viikkojen aikana (Hainsworth ym., 2007).

Hypoksian suoria vaikutuksia sympaattisen hermoston toimintaan on hankala määrittää, mutta epäsuoria menetelmiä sen arvioimiseen on käytetty. Akuutihypoksian on havaittu aiheuttavan sydämen minuuttitilavuuden kasvua sekä levossa että kuormituksessa. Hypoksiaan sopeutumisen seurauksena minuuttitilavuus usein laskee, mutta syke voi jäädä normaalitilaa korkeammaksi pienemmällä iskutilavuudella. Tämän lisäksi akuutin hypobaarisen hypoksian on havaittu aiheuttavan myös verenpaineen nousua. (Hainsworth ym., 2007)

HRV:n on havaittu muuttuvan normoksiassa harjoituskuormituksen tason mukaan (Hynynen ym., 2007, 2010; Pichot ym., 2000), mutta myös hypoksian on havaittu vaikuttavan siihen samalla tavoin kuin harjoituskuormituksen (Giles ym., 2016). Vaikuttaa siltä, että akuutihypoksia-altistus laskee parasympaattista ja kasvattaa sympaattisen hermoston aktiivisuutta, mutta sopeutuminen hypoksiaan saa aikaan palautuneisuuden tehostumista ja siten parasympaattisen hermoston aktiivisuuden kasvamista. Tästä huolimatta sympaattisen hermoston aktiivisuus on hallitseva. (Hainsworth ym., 2007) Hypoksian vaikutuksen suuruus määräytyy hypoksisen annoksen suuruudesta (Giles ym., 2016). Hypoksisella annoksella eli hypoksisen altistuksen tasolla tarkoitetaan korkeutta merenpinnan tasolta ja siellä hypoksialle altistettuna vietettyä aikaa. Yksiköksi Garvican-Lewis ym. 2016) esittää käytettäväksi kilometrituntia (korkeus [km] x altistusaika [h]).

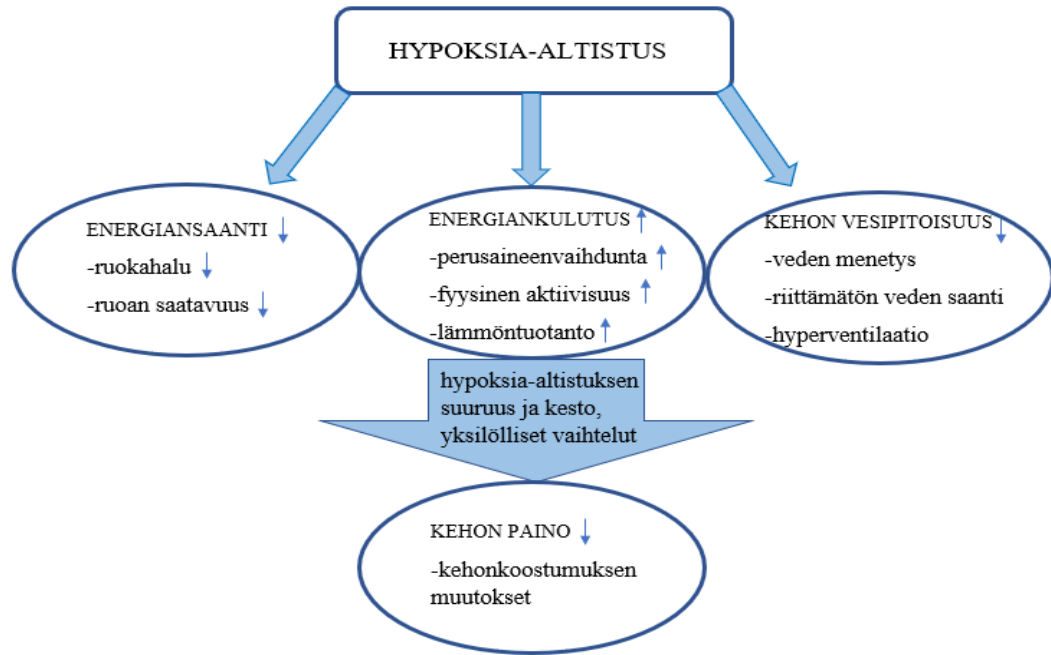
Kuormituksen kasvun aiheuttama sympaattisen hermoston aktivaatio havaitaan tyypillisesti laskeneena HRV-arvona, kun taas palautumisen eli parasympaattisen hermoston aktivaation lisääntymisen myötä HRV kasvaa (Hainsworth ym., 2007). HRV:n mittaamisesta onkin tullut

vakiintunut tapa tutkia autonomisen hermoston tasapainoa noninvasiivisesti (Task Force, 1996). Laskeneen HRV:n lisäksi autonomisen hermoston kuormittuneisuuden kasvu voidaan havaita kasvaneena leposykkeenä ja ortostaattisena sykkeenä. Nämä sykemuuttujat ovat yksilöllisiä, joten viitearvoja niiden tulkitsemiseen ei voida antaa, vaan niiden vertailun on perustuttava yksilön aiempiin mittaustuloksiin (Nummela & Peltonen, 2018; Uusitalo & Nummela, 2016).

3.2.3 Muut adaptaatiot

Hypoksia voi altistaa kehon painon laskulle. Kehon rasvamassan, lihasmassan ja rasvattoman massan on huomattu pienenevän kohtalaisen hypoksian (1500–3500 m) seurauksena useissa tutkimuksissa, joiden kesto on ollut 5–112 vuorokautta. Dünwald ym. (2019) analysoivat katsauksessaan 11 edellä määritellyllä kohtalaisella korkeudella toteutettua hypoksiatutkimusta, joihin sisältyi fyysistä aktiivisuutta. Näissä tutkimuksissa tapahtuneet painon muutokset vaihtelivat -4,2 kg:sta +0,1 kg:aan. (Dünwald ym., 2019) Kehon painon muutokset voivat johtua riittämättömästä energiansaannista yhdessä kasvaneen energiankulutuksen kanssa sekä kehon vesipitoisuuden pienenemisestä. (esim. Kayser & Verges, 2013) Hypoksian vaikutuksia kehon painoon on esitetty kuvassa 3.

Hypoksiajakso voi tehostaa myös lihasten palautumista. Ruggiero ym. (2020) tutkivat lihasten palautumista sähköisesti tuotettujen lihassupistusten aiheuttamasta lihasväsymyksestä kroonisessa hypoksiassa verrattuna merenpinnan tasolle ja akuuttihypoksiaan. Krooninen hypoksia-altistus kesti viidestä yhdeksään päivää 5050 metrin korkeudessa ja akuuttialtistus vähintään 30 minuuttia normobaarisessa hypoksiakammiossa, jossa hapen osapaine vastasi kroonisen altistuksen korkeutta. Heidän mukaansa kroonisessa hypoksiassa tapahtuvat lihasadaptaatiot vaikuttavat positiivisesti lihaksen supistuvuuteen hypoksian aikana sekä sen jälkeen. Perifeerinen väsymys oli suurempaa akuuttihypoksiassa verrattuna merenpinnan tasolle. Krooniseen hypoksiaan sopeutumisen jälkeen lihasten voimantuottonopeus (rate of force development, RFD) ja suurimmasta voimantuotosta palautumisnopeus olivat parantuneet sekä supistumisimpulssi oli nopeutunut verrattaessa merenpinnan tason mittauksiin. Lihasten hapettumisessa ei havaittu merkittäviä muutoksia eri olosuhteiden välillä. Krooninen altistus vaikutti positiivisesti lihasten väsymyksen sietokykyyn.



KUVA 3. Kehon painon laskun mahdollisia syitä hypoksiassa (mukaiillen Dünwald ym., 2019).

3.3 Fysiologisten vasteiden suuruuksiin vaikuttavat tekijät

Hypoksian avulla saavutetun hemoglobiinimassavasteen suuruuteen vaikuttavat tutkimusten mukaan useat tekijät, kuten lähtötilanteen hemoglobiinimassa, rautavarastojen suuruus, EPO-vasteen suuruus, hypoksiajakson malli, kesto ja altistuksen taso, terveydentila sekä mahdollisesti sukupuoli. Rautavarastojen suuruutta voidaan arvioida mittaamalla seerumin ferritiinipitoisuus. (Heikura ym., 2018; Nummela ym., 2021; Stellingwerff ym., 2019) Korkeanpaikan harjoittelun aiheuttamat adaptaatiot voivat jäädä pienemmiksi tai ne voidaan menettää kokonaan, jos korkealla vietetty aika on alle 3–4 viikkoa, tai jos asumiskorkeus on liian matala (alle 2000 m) (Rusko ym., 2004). Myös liian suuri hypoksia-annos – esimerkiksi liian korkealla toteutettu hypoksiajakso – voi vaikuttaa epäsuotuisasti fysiologisiin adaptaatioihin (Nummela ym., 2021). Hemoglobiinimassan ja siten hapenkuljetuskapasiteetin lisäämisen vuoksi toteutetun korkeanpaikan leirin vähimmäispituudeksi on yleisesti hyväksytty kolme viikkoa. Korkeanpaikan olosuhteisiin sopeutumiseen tarkoitettun vuoristoleirin kestoksi riittää 1–2 viikkoa. (Peltonen & Nummela, 2016)

Optimaalisiin toteutuskorkeus neljän viikon mittaiselle mukautetun LHTL-mallin korkeanpaikanleirille on Chapmanin ym. (2014) tutkimuksessa todettu olevan noin 2000–2500 m. Samaan tulokseen tutkimuksessaan ovat tulleet myös esimerkiksi Wilber ym. (2007). Toisaalta Garvican-Lewis ym. (2015) ovat todenneet tutkimuksessaan, että on myös mahdollista kasvattaa hemoglobiinimassaa noin 3 % kahden viikon mittaisen, vain 1800 metrin korkeudessa toteutetun LHTH-hypoksiajakson avulla. Alppimajassa yli 2000 metrin korkeutta vastaavalle happipitoisuudelle altistumisen tulisi Ruskon ym. (2004) mukaan kestää vähintään 12 tuntia päivässä, ja harjoitusjakson tulisi olla vähintään kolme viikkoa pitkä, jotta halutut adaptaatiot saadaan aikaan. Wilberin ym. (2007) mukaan simuloidun hypoksialeirin korkeuden tulisi puolestaan vastata jopa 2500–3000 metrin korkeutta, ja hypoksia-altistuksen tulisi kestää vähintään 12–16 tuntia päivässä.

Jotta toivottu hemoglobiinimassavaste hypoksiajaksioon saavutettaisiin, vaikuttaisi riittävä raudan saanti olevan tärkeä tekijä. (Stellingwerff ym., 2019) Raudan imeytyminen ja siten sen tarve voi kolminkertaistua hypoksisissa olosuhteissa harjoiteltaessa (Reynafabje ym., 1959) . Tarvittava rauta saadaan joko kehon rautavarastoista, ravinnosta tai rautalisistä (Koivisto-Mørk ym., 2021). Hemoglobiinimassavaste hypoksiaan saatetaan Okazakin ym. (2019) mukaan menettää, jos seerumin ferritiinipitoisuus on naisilla alle 20 µg ja miehillä alle 30 µg. Toisaalta, voi olla mahdollista saavuttaa hemoglobiinimassan kasvua myös matalammilla ferritiinipitoisuuksilla, jos käytössä on sopiva annostus rautalisää (Garvican-Lewis & Govus, 2016).

Edellä mainittujen tekijöiden lisäksi hypoksian avulla saavutettujen adaptaatioiden suuruuteen voi vaikuttaa, jos hermolihasjärjestelmän ja verenkiertoelimistön sopeutumisen varmistamiseksi harjoittelua joudutaan keventämään liikaa tai jos ylikuormittumisen oireita tai jatkuvaa sairastelua ilmenee korkealla harjoittelun aikana (Rusko ym., 2004). Heikura ym. (2018) totesivat tutkimuksessaan, että korkeanpaikanleirin ajan terveenä pysyneiden urheilijoiden hemoglobiinimassavaste hypoksiaan oli suurempi kuin leirin aikana sairastuneiden vaste (+5,4 % vs. -0,5 %). Samassa tutkimuksessa havaittiin, että naisten hemoglobiinimassa kasvoi leirin aikana 6,2 %, kun taas miesten vastaavasti 3,2 %. Nummelan ym. (2021) tutkimuksessa miesten hemoglobiinimassa kasvoi enemmän kuin naisten (+3,6 % vs. +0,7 %). Nummelan ym. (2021) mukaan kyseistä eroavaisuutta tuloksissa voisi selittää

Heikuran ym. (2018) tutkimuksen tutkittavien lähtötilanteen suuremmat hemoglobiinimassat. Sukupuolen vaikutusta hemoglobiinimassavasteeseen on tutkittava lisää. (Nummela ym., 2021)

Vaikuttaa siltä, että kuten merenpinnan tasolla normoksiassa toteutettu harjoittelu, myös hypoksiajakso kehittää niitä ominaisuuksia, joita sen aikana harjoitellaan. Esimerkiksi Álvarez-Herms ym. (2014) eivät havainneet tutkimuksessaan muutoksia staattisen hypyn tai kevennyshypyn nousukorkeuksissa neljän viikon mittaisessa hypobaarisessa hypoksiassa suoritettuna kestävyys- ja voimaharjoittelun aikana fyysisesti aktiivisilla tutkittavilla. Muutoksia ei tapahtunut myöskään normoksiassa merenpinnan tasolla harjoitelleilla tutkittavilla. Tutkijat arvelevat syyn olevan leirin kestävyysharjoittelupainotuksessa. Coškunin ym. (2022) tutkimuksessa puolestaan havaittiin parannuksia hyppy- ja sprinttiominaisuuksissa harjoittelemattomilla henkilöillä kahdeksan viikon mittaisen normobaarisen hypoksiajakson aikana, jossa tutkittavat suorittivat plyometrisiä harjoitteita sisältäviä harjoituksia kolme kertaa viikossa. Tutkimuksessa parannuksia tapahtui kyseisissä ominaisuuksissa todennäköisesti, koska näitä ominaisuuksia harjoiteltiin aktiivisesti.

3.4 Hemoglobiinimassan mittaaminen

Hiilimonoksidin (CO) takaisin hengitysmenetelmä on havaittu hyödylliseksi menetelmäksi etenkin kestävyysurheilijoiden hemoglobiinimassan hypoksiavasteiden mittaamiseksi. Yleensä mittaukset suoritetaan ennen hypoksiajaksoa, mahdollisesti sen aikana sekä sen jälkeen, koska hemoglobiinimassan muutoksen on havaittu olevan suhteellisen helposti mitattava objektiivinen mittari hypoksia-altistuksen vaikutuksiin. Koska tyypillisesti hemoglobiinimassan on havaittu kasvavan 2–5 % hypoksiajakson aikana (Garvican ym., 2012; Garvican-Lewis ym., 2015; Wehrlin ym., 2006), käytetään hiilimonoksidin (CO) takaisin hengitysmenetelmää (carbondioxide rebreathing method) määrittelemään harjoittelun ja korkeusaltistuksien vaikutuksia urheilijoihin (Schmidt & Prommer, 2005). Tämän menetelmän etu verrattuna laskimoverinäytteistä analysoituihin hemoglobiiniarvoihin on, että sen avulla saadaan mitattua koko veren hemoglobiinin määrä eli kokonaisyhemoglobiinimassa, eikä pelkästään hemoglobiinkonsentraatio (g/l). Koska hypoksiassa plasman määrä – ja siten

veren määrä – usein vähenee (Schmidt & Prommer, 2010), voisi pelkän hemoglobiinikonsentraation mittaaminen aiheuttaa vääristymää arvoihin.

CO-takaisinhengitysmenetelmä on kehittynyt vuosien saatossa aiempaa lyhytkestoisemmaksi ja mukavammaksi tutkittaville. Tämän myötä mittaustavasta on tullut käytännöllisempi toteuttaa suuremmalle määrälle urheilijoita. Sen vahvuutena on hyvä mittaustarkkuus verrattuna muihin hemoglobiinimassan määrittämis menetelmiin. Nykyään käytössä on aiemmasta 10–15 minuutin mittaisesta menetelmästä (mm. Burge & Skinner, 1995; Heinicke ym., 2001) mukailtu menetelmä, jossa hiilimonoksidia hengitetään kahden minuutin ajan (Schmidt & Prommer, 2005). Menetelmässä tutkittavat hengittävät hiilimonoksidiannoksen ja neljä litraa happea suljetun spirometrin avulla kahden minuutin ajan. Hiilimonoksidiannos on suhteutettu tutkittavan kehon massaansa siten, että naisille annos on tyypillisesti 0,6–0,7 ml/kg ja miehille 0,8–1,0 ml/kg. Systeemistä mahdollisesti tapahtuvien vuotojen estämiseksi ja havaitsemiseksi testin aikana tutkittava käyttää nenäklipsiä ja tutkimushenkilöstö tarkistaa systeemin liitoskohdat käyttäen CO-mittaria. Ennen hiilimonoksidin hengittämistä sekä sen jälkeen otetuista kapillaariverinäytteistä analysoidaan hemoglobiiniin sitoutuneen hiilimonoksidin prosentuaalinen määrä (%HbCO), jonka avulla koko veren hemoglobiinimassa saadaan määritettyä. (Heikura ym., 2018)

4 PALAUTUMISEN SEURANTA HYPOKISISISSA OLOSUHTEISSA

Seilerin ym. (2007) mukaan kestävyysurheilijat kestävät korkeita harjoituskuormia niin harjoitusten toistuvuuden, keston kuin intensiteetinkin osalta. Korkeat harjoituskuormat aiheuttavat elimistössä erilaisia adaptaatioita ja stressireaktioita. Sopiva harjoittelun tiheys eli frekvenssi varmistaa adaptaatioiden kumuloitumisen. Jos elimistön palautuminen harjoituksista on jatkuvasti vajavaista, voi liian suuri harjoittelun frekvenssi myös tehdä ei-toivotuista sivuvaikutuksista kumulatiivisia. (Uusitalo, 2001) Runsaassa ja kovatehoisessa harjoittelussa voikin olla riskinä liian pitkään jatkunut ylikuormitustila, jolloin kokonaiskuormitus ylittää elimistön adaptoitumiskyvyn. Tällaisessa yllirasitustilassa elimistön palautumis- ja suorituskky heikkenevät ja voi esiintyä erilaisia vaikeuksia harjoitteluun sopeutumisessa. (McArdle ym., 2010, s. 483) Suorituskkyyn kannalta elimistön palautuminen voidaan määrittellä suorituskkyyn palautumisena perustasolle (Markus ym., 2021). Palautuminen voidaan määrittellä myös autonomisen hermoston palautumisnopeutena kuormitusta edeltäneeseen tilaan, jota voidaan arvioida esimerkiksi HRV:n avulla (Valleala ym., 2016).

Harjoituksen kokonaiskuormitus koostuu harjoituksen intensiteetistä, kestosta, sarjojen tai vetojen välisistä palautumisajoista, harjoitustiheydestä sekä itsessään harjoiteltavasta lajista; eri lajit kuormittavat elimistöä eri tavoin. Harjoitusten kuormittavuutta voidaan seurata mittaamalla useita eri tekijöitä. Kestävyyslajeissa kokonaiskuormituksen arviointi suoritetaan pääsääntöisesti urheilijan tuntemusten, energiantuoton ja -kulutuksen sekä sydämen sykkeen ja HRV:n mittaamisen avulla. Lisäksi edellä mainituista tekijöistä voidaan laskea erilaisia indeksejä, joita voidaan käyttää kuormituksen tason arvioinnissa. (Nummela & Peltonen, 2018) Kuormituksen ja palautumisen arviointiin käytettävät menetelmät pohjautuvat suurimmaksi osin sykkeen ja etenkin HRV:n mittaamiseen. (Valleala ym., 2016)

Hypoksiset olosuhteet aiheuttavat elimistölle lisäkuormitusta verrattuna merenpinnan tasolla harjoitteluun, minkä vuoksi on erityisen tärkeää seurata tarkasti kuormituksen tasoa ja siitä palautumista hypoksiajaksoon valmistautuessa sekä sen aikana. Tällä tavoin toimiessa urheilijoilla on vertailudataa ajalta ennen lisääntyvää kuormituksen määrää. Myös hypoksia-altistuksen päätyttyä on tärkeää jatkaa kuormituksen ja palautumisen seuraamista erityisen

tarkasti useamman viikon ajan, jotta yksilölliset vasteet olosuhteiden muutoksiin havaitaan ja niihin voidaan reagoida (Peltonen & Nummela, 2016).

4.1 Palautumisen objektiiviset mittaukset

Fyysisten adaptaatioiden eli objektiivisten muuttujien, kuten suorituskyvyn ja veriarvojen mittaaminen on tärkeä osa urheilijoiden testaamista, jotta elimistön kuormittuneisuudesta saadaan tarkempi kuva. Peltonen & Nummela (2016) suosittelevat urheilijoita mittauttamaan ennen hypoksiajaksoa laboratoriotekoisin perusveren kuvan, hemoglobiinin, hematokriitin, ferritiinin, transferritiinin sekä tulehdusarvot (C-reaktiivinen proteiini, CRP). Lisäksi elimistön kuormitustasoa tulisi seurata jatkuvasti sykkeen avulla. Aamun leposyke on kenties yksinkertaisin tapa seurata autonomisen hermoston palautumista ja kuormitustasoa, sillä tavanomaisesta poikkeava leposyke voi kertoa liiallisesta kuormituksesta. Leposyke voi vaihdella kuitenkin myös muista syistä, eikä sen vaste aina kuvaa elimistön stressitilaa tarkasti. (Nummela & Peltonen, 2018)

Leposykkeen epätarkkuuden vuoksi urheilijat käyttävät sen lisäksi usein autonomisen hermoston kuormittuneisuuden mittaamiseen ortostaattista syketestiä, jonka tuloksen kasvu kertoo autonomisen hermoston palautuneisuuden tilan heikentymisestä. Ortostaattisessa syketestissä mitataan leposykkeen lisäksi sykkeen muutosta asennon muuttuessa makuuasennosta pystyasentoon. Makuuasennossa parasympaattinen hermosto on hallitseva, mutta pystyasennossa hallinnan ottaa sympaattinen hermosto. Testin pystyasennon sykkeen sekä makuu- ja pystyasennon sykkeen erotuksen nousu indikoivat elimistön kasvaneesta kuormittuneisuudesta. (Nummela & Peltonen, 2018) Useimmiten lepokeräyksen kesto on viisi minuuttia ja pystyasennon keräyksen kesto kolme minuuttia (Nummela & Peltonen, 2018; Uusitalo & Nummela, 2016). Ortostaattiselle syketestille on olemassa useita protokollia, joiden eroavaisuutena toisiinsa on sykedatan keräämisaajan vaihtelu.

HRV:n seuraamisen on todettu olevan hyvä tapa arvioida autonomisen hermoston aktiivisuutta (Seiler ym., 2007), minkä vuoksi kuormituksen ja siitä palautumisen mittaaminen onnistuu sen avulla (Task Force, 1996; Valleala ym., 2016). Tavanomaisesta laskenut HRV kertoo

kuormittuneisuuden kasvusta (Hainsworth ym., 2007). HRV analysoidaan tyypillisesti yön yli kerätystä sykedatasta (yösykeanalyysi), koska yömittaukset voidaan toteuttaa mahdollisimman vakioituissa olosuhteissa, ja ne ovat siten hyvin toistettavia. (Nummela ym., 2010) HRV voidaan mitata vuorokausimittauksena (24 h), lyhytkestoisena (noin 5 min) sekä hyvin lyhytkestoisena mittauksena (alle 5 min). Pidempiaikaiset keräysmittaukset tuovat lyhyitä mittauksia paremmin esiin elimistön toiminnassa esiintyvät hitaat vaihtelut sekä sydän- ja verenkiertoelimistön vasteet kuormitukseen, minkä vuoksi pitkä- ja lyhytkestoiset mittaukset eivät ole keskenään vertailukelpoisia. Mitatusta HRV:sta voidaan laskea neliöllinen keskiarvo (root mean square of successive differences, RMSSD), joka kuvastaa yksittäisten sydämen lyöntien välistä varianssia. Shafferin & Ginsbergin (2017) mukaan RMSSD:n lyhin keräysaika on tavallisesti 5 minuuttia, mutta myös keräysaikoja 30 sekunnista 60 sekuntiin on käytetty. (Shaffer & Ginsberg, 2017)

Urheilijoiden harjoittelun tilan seurantaan ja suorituskyvyn arviointiin käytetään yleisesti submaksimaalisia kestävyystestejä. Myös maksimaalisia testejä käytetään, mutta niiden käyttö jokapäiväisessä harjoittelussa ei ole järkevää niiden suuren kuormittavuuden vuoksi. (Lamberts ym., 2004) Submaksimaaliset kontrolliharjoitukset toteutetaan yleensä juosten, hiihtäen, sauvakävellessä tai pyöräillen riippuen testattavan henkilön lajitaustasta. Lisäksi esimerkiksi vertikaalisia hyppytestejä voidaan käyttää kuormitustilan seurantamenetelmänä. Niiden on todettu toimivan hyvänä voimantuottokyvyn mittarina ilman suurta ylimääräistä kuormittavuutta urheilijalle (Uusitalo & Nummela, 2016). Yleisesti käytettyjä hyppytestejä ovat esimerkiksi staattinen (static jump, SJ) ja esikevennetty hyppytesti (counter movement jump, CMJ) (Bobbert ym., 1996). Hyppytestistä voidaan tarkoituksen mukaan analysoida esimerkiksi hyppykorkeutta tai tehontuottoa.

4.2 Palautumisen subjektiiviset mittaukset

Elimistön palautuneisuuden arvioinnissa voidaan käyttää edellä esiteltyjen objektiivisten mittausten lisäksi henkilöiden subjektiivisten tuntemusten kyselyä. Harjoituspäiväkirja on yleisesti urheilijoiden keskuudessa käytetty tapa kerätä erilaisia harjoitteluun liittyviä tietoja, kuten harjoitus-, ravinto- ja unitietoja analysoitaviksi. Näiden tietojen tallentaminen tapahtuu

usein erilaisten sovellusten avulla. (Valleala ym., 2016) Harjoituspäiväkirjan olisi hyvä sisältää suoritettujen harjoitusten kuvaamisen lisäksi merkinnät subjektiivista tuntemuksista, jotta nämä tiedot voidaan yhdistää objektiivisten mittausten tulosten kanssa (Peltonen & Nummela, 2016). Harjoituspäiväkirjoista analysoitavia subjektiivisia tuntemuksia ovat esimerkiksi aamun palautuneisuuden tunne ja päivän harjoitusten kuormittavuuden tunne.

Harjoitusten ja testien aikana kuormituksen seurannassa voidaan käyttää subjektiivista räsitus-tuntemusta (RPE, rating of perceived exertion), jossa urheilijalta kysytään numeerista arviointia kokemastaan räsituksesta kuormituksen aikana. RPE:n käyttö kuormituksen seurannassa perustuu siihen, että urheilijan oletetaan tietävän itse harjoituksensa kuormittavuuden elimistölleen. (Nummela & Peltonen, 2018) Yleisimmin käytetty RPE-malli on Borgin skaala. Kuvassa 4 on esitetty Borgin skaalat asteikolla 6–20 (Borg, 1970) ja 0–10 (Borg, 1982) sekä numeeristen arvojen sanalliset selitykset. Vaikka Borgin skaalat ovat yleisesti hyväksi todettuja, eivät kuormituksen aikaisen hapenoton, sykkeen ja laktaattikonsentraation korrelaatiot RPE:n kanssa aina ole hyviä (Nummela & Peltonen, 2018).

RPE	Räsituksen kuvaus	RPE	Räsituksen kuvaus
6		0	Ei lainkaan
7	Erittäin kevyt	1	Hyvin heikko
8		2	Heikko
9	Hyvin kevyt	3	Kohtalainen
10		4	Melko voimakas
11	Melko kevyt	5	Voimakas
12		6	
13	Melko raskas	7	Hyvin voimakas
14		8	
15	Raskas	9	
16		10	Erittäin voimakas
17	Hyvin raskas		
18			
19	Erittäin raskas		
20			

KUVA 4. Borgin 6–20 (oikealla) ja 0–10 (vasemmalla) asteikot räsitus-tuntemuksen arviointiin (Mukaillen Borg, 1970, 1982).

5 TUTKIMUKSEN TARKOITUS

Tämän tutkimuksen tarkoituksena oli selvittää, kuinka kestävyysurheilijoiden autonomisen hermoston toiminta ja suorituskky reagoivat 28 päivän mittaiseen LHTLH-mallin mukaiseen hypoksiajaksoon. Tutkimusjakson ajan tutkittavat asuivat alppimajassa noin 2500 metrin korkeutta vastaavassa happipitoisuudessa. Harjoittelua suoritettiin sekä merenpinnan tasolla että hypoksiageneraattorin avulla simuloituissa hypoksisissa olosuhteissa juoksumatolla. Erityisesti haluttiin selvittää ovatko autonomisen hermoston palautuneisuus, submaksimaalinen kestävyysuorituskyky ja räjähtävä voimantuottokyky yhteydessä toisiinsa hypoksiajakson aikana.

5.1 Tutkimuskysymykset

1. Millä tavoin neljän viikon mittainen LHTLH-mallin mukainen harjoitusleiri vaikuttaa hypoksiajakson aikana kestävyysurheilijoiden aamun happisaturaatioon, ortostaattisen testin sykemuuttujiin, räjähtävään voimantuottokykyyn, submaksimaaliseen kestävyysuorituskykyyn ja subjektiivisiin tuntemuksiin?
2. Ovatko hypoksiajakson mahdollisesti aiheuttamat muutokset aamun happisaturaatiossa, ortostaattisen testin sykemuuttujissa, räjähtävässä voimantuottokyvyyssä, submaksimaalisessa kestävyysuorituskyvyssä ja subjektiivisissa tuntemuksissa yhteydessä toisiinsa?

5.2 Hypoteesit

1. Hypoksian aiheuttaman välittömän hapen puutteen odotetaan laskevan happisaturaatiota (Mazzeo, 2008). Hypoksian ja harjoittelun aiheuttaman kuormituksen kasvun odotetaan aluksi heikentävän autonomisen hermoston palautuneisuutta, joka ilmenee leposykkeen (Hainsworth ym., 2007) ja ortostaattisen sykkeen kasvuna (Nummela & Peltonen, 2018) sekä HRV:n laskuna (Sevre ym., 2001). Hypoksiaan ja harjoituskuormaan sopeutuminen vie noin viikon (Bernardi ym., 2001), jonka jälkeen oletetaan tehostuneen palautumisen

vaikutuksen näkyvän niin autonomisen hermoston, suorituskyvyn kuin subjektiivisten tuntemusten mittaustuloksissa. Hypoksiajaksoon sopeutuminen saattaa nopeuttaa lihasten voimantuottokyvyn palautumista kuormituksesta (Ruggiero ym., 2020), joka voidaan tässä tutkimuksessa havaita hyppytulosten parantumisena. Kaikissa hypoksiavasteissa odotetaan olevan yksilöllistä vaihtelua (mm. Nummela ym., 2021; Stray-Gundersen ym., 2001; Wilber, 2007).

2. Hypoksisten olosuhteiden ja harjoittelun oletetaan lisäävän elimistön kuormittuneisuutta (Peltonen & Nummela, 2016). Hypoksian aiheuttaman happisaturaation laskun (Mazzeo, 2008) sekä kokonaiskuormituksen kasvun aiheuttamien muutosten ortostaattisen testin sykemuuttujissa, suorituskykytestien tuloksissa ja subjektiivisissa tuntemuksissa odotetaan korreloivan keskenään. Kestävyysurheilijoiden kokonaiskuormituksen arviointi tapahtuu yleensä edellä mainittujen muuttujien avulla (Nummela & Peltonen, 2018).

6 TUTKIMUSMENETELMÄT

6.1 Tutkittavat

Tutkimukseen osallistui 16 vapaaehtoista tutkittavaa (11 naista, 5 miestä). He olivat 17–29-vuotiaita maasto- tai ampumahiihtäjiä, jotka harjoittelivat tavoitteellisesti ja kilpailivat joko kansallisella tai kansainvälisellä tasolla. Tutkimukseen rekrytoitiin vapaaehtoisia urheilijoita ensisijaisesti Vuokatin alueelta. Kutsu tutkimukseen lähetettiin myös maasto- ja ampumahiihdon maajoukkueille. Tutkittavat voidaan luokitella McKayn ym. (2022) määrittelemän tieteellisten tutkimusten osanottajien luokittelun mukaan kansallisen ja kansainvälisen tason urheilijoiksi (tasot 3 ja 4). Luokittelussa tutkittaville on määritetty taso asteikolla 0–5, vähän liikkuvista maailman luokan urheilijoihin. Tutkittavien keskimääräiset lähtötiedot on esitetty taulukossa 1.

Tutkittavat hyväksyttiin mukaan tutkimukseen, jos heillä ei tutkimuksen alussa ollut osallistumista estävää vammaa tai sairautta. Tutkittaville kerrottiin, että tutkimukseen osallistuminen on vapaaehtoista, eikä siitä kieltäytyminen tai tutkimuksen keskeyttäminen aiheuttaisi heille minkäänlaisia seuraamuksia. Ennen tutkimusta tutkittavat allekirjoittivat suostumuslomakkeen. Jyväskylän yliopiston eettinen toimikunta on antanut tutkimuksesta lausunnon (29/13.00.04.00//2021).

TAULUKKO 1. Tutkittavien lähtötiedot (ka ± SD). BMI = Painoindeksi (Body Mass Index), VO_{2max} = maksimaalinen hapenotto-kyky, Hb-massa = kokonaishemoglobiinimassa.

Sukupuoli	Ikä (v)	Pituus (cm)	Paino (kg)	BMI (kg/m ²)	VO _{2max} (ml/kg/min)	Hb-massa (g)
Naiset (n=11)	23,0 ± 4,2	169,2 ± 6,2	61,2 ± 7,1	21,4 ± 1,8	57,7 ± 5,5	657,2 ± 76,7
Miehet (n=5)	20,2 ± 2,1	183,0 ± 6,7	78,0 ± 8,7	23,3 ± 1,8	70,7 ± 8,8	1055,5 ± 162,3
Kaikki (n=16)	22,1 ± 3,9	173,5 ± 9,0	66,4 ± 10,9	22,0 ± 2,0	61,8 ± 8,9	771,0 ± 212,2

6.2 Tutkimusprotokolla

Tämä pro gradu -tutkimus toteutettiin osana Jyväskylän yliopiston liikuntatieteellisen tiedekunnan korkeanpaikan tutkimushanketta. Tutkimusta tukivat Kainuun liitto (ERDF, 308764) sekä Suomen kulttuuri- ja opetusministeriö (OKM/128/626/2021; OKM/39/626/2022). Mittaukset suoritettiin Jyväskylän yliopiston liikuntateknologian yksikössä Vuokatissa (Snowpolis, Kidekuja 2, Sotkamo) kevään ja kesän 2021 aikana.

Tutkittavina toimineet vapaaehtoiset kestävyysurheilijat oleskelivat Vuokatin alppimajassa kahdessa ryhmässä (8+8) neljän viikon ajan, jonka aikana he toteuttivat LHTLH-mallin mukaista harjoittelua. Lisäksi tutkimuksessa oli mukana kontrolliryhmä (8 henkilöä), jonka tuloksia ei sisällytetä tähän pro gradu -tutkielmaan. Hypoksiaryhmien samanlaiset tutkimusprotokollat mahdollistivat tulosten analysoinnin yhtenä ryhmänä. Tulokset ilmoitettiin sukupuolittain ainoastaan tutkittavien painojen, hemoglobiinimassojen ja VO_{2max} -arvojen osalta. Näin tehtiin, koska näissä arvoissa miesten ja naisten väliset erot mittaustuloksissa olivat huomattavia. Epätasaisen sukupuolijakauman ja pienen otannan vuoksi päädyttiin tarkastelemaan muita tuloksia yhtenä ryhmänä.

Hypoksiajakson aikana urheilijat harjoittelivat normaalisti oman henkilökohtaisen harjoitusohjelmansa mukaan. Asuinhuoneistona toimineiden alppimajojen hengitysilman hapen määrä oli alennettu vastaamaan noin 2500 metrin korkeutta merenpinnan tasolta. Tutkittavat suorittivat suurimman osan harjoittelustaan merenpinnan tasolla, mutta he suorittivat myös kaksi kertaa viikossa tunnin mittaisen hypoksiaharjoituksen hypoksiageneraattorin (JAY-10H hypoxic generator mask, Longfian, Hebei, Kiina) avulla juoksumatolla juosten. Hypoksiaharjoitukset suoritettiin vakionopeudella, ja niiden aikana tutkittavilta otettiin 20 minuutin välein laktaattinäyte, sekä samalla kirjattiin ylös syke, happisaturaatio ja RPE. Hypoksiaharjoituksista kerättyä dataa ei analysoitu tässä tutkielmassa.

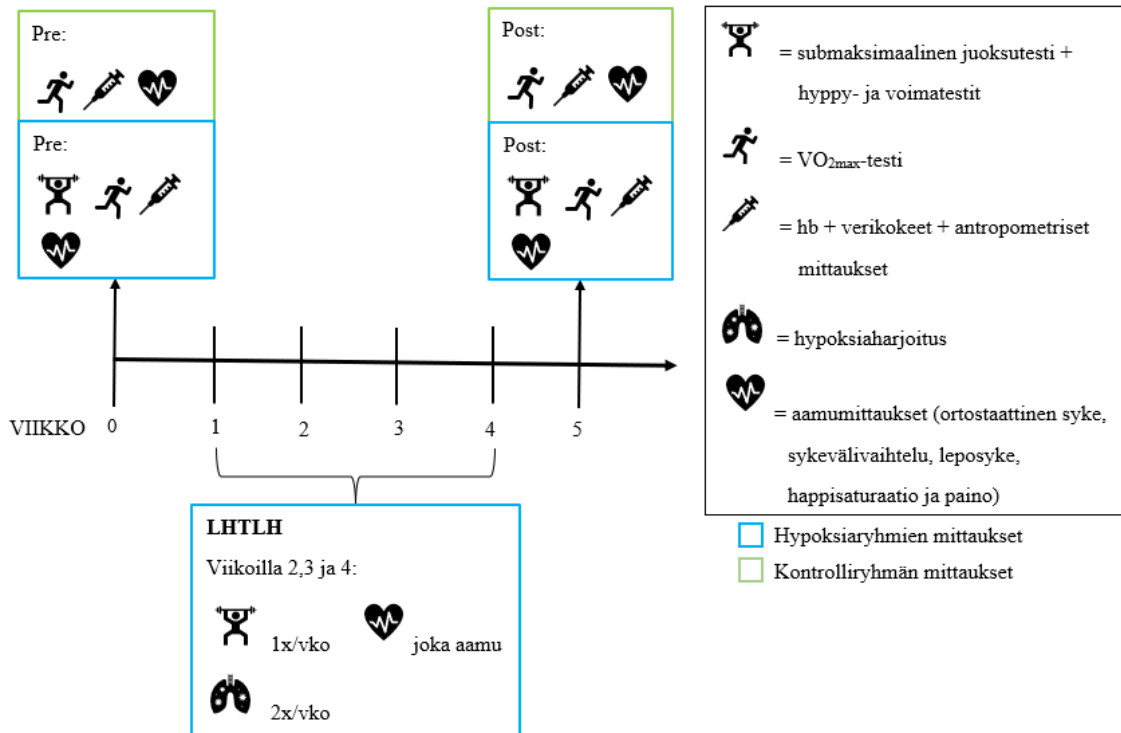
Tutkimuksen aikana urheilijoiden autonomisen hermoston palautuneisuutta, elimistön suorituskykyä, subjektiivisia tunteuksia sekä hematologisia ja antropometrisia muutoksia seurattiin erilaisten mittausten avulla. Autonomisen hermoston palautuneisuudesta tietoa

kerättiin leposykkeen, ortostaattisen sykkeen ja RMSSD:n aamumittauksilla. Aamumittauksiin kuuluivat sykemuuttujien lisäksi happisaturaation ja painon mittaukset. Niihin luetaan myös kuuluvaksi tutkittavien täyttämien harjoituspäiväkirjojen tiedot, joista tässä tutkielmassa raportoidaan heidän subjektiiviset tuntemuksensa päivän kuormittuneisuuden ja aamun palautuneisuuden tunteista. Tutkittavat suorittivat aamumittaukset joka aamu itsenäisesti.

Kestävyysuorituskykyä tutkittiin VO_{2max} -testillä ja submaksimaalisella juoksumattotestillä. Alavartalon räjähtävää voimantuottokykyä tutkittiin hyppytestillä, joihin kuuluivat staattinen ja esikevennetty hyppytesti sekä reaktiivinen pohjehyppely. Ylävartalon räjähtävän voimantuottokyvyn testinä käytettiin penkkipunnerruksen tehotestiä 50 %:n kuormalla urheilijan 1 RM -tuloksesta (yhden toiston maksimi, 1 Repetition Maximum). Penkkipunnerrustestit rajattiin tämän tutkielman ulkopuolelle. Tutkittavien hemoglobiinimassat määritettiin käyttäen CO-takaisinhengitysmenetelmää. Hemoglobiinimassan määrittämisen yhteydessä heiltä otettiin hematologisten adaptaatioiden mittaamiseksi laskimoverinäytteitä, mutta niiden tuloksia ei raportoida tässä tutkielmassa.

Tutkittavien joukon keskimääräiset tulokset autonomisen hermoston palautuneisuutta arvioivissa syketesteissä, happisaturaatioissa, submaksimaalisissa kestävyysuorituskykytesteissä, räjähtävän voimantuottokyvyn testeissä ja subjektiivisissa tuntemuksissa analysoitiin neljältä eri testipäivältä. Näiden mittauksien välisiä yhteyksiä tutkittiin analysoimalla testipäivien keskimääräisiä muutoksia. Testipäivät määräytyivät submaksimaalisten juoksumattotestien ja hyppytestien suorituspäivien mukaan. Testipäivistä ensimmäinen oli hypoksiajaksoa edeltävällä viikolla ja muut kolme noin viikon välein hypoksiajakson viikoilla 2, 3 ja 4. Tutkimuksen kulku kokonaisuudessaan on esitetty kuvassa 5.

VO_{2max} , paino ja CO-takaisinhengitysmenetelmällä mitattu hemoglobiinimassa mitattiin ja analysoitiin vain ajalta ennen hypoksiajaksoa sekä sen jälkeen. VO_{2max} ja hemoglobiinimassa raportoitiin suorituskykyyn vaikuttavina taustamuuttujina, joiden avulla varmistettiin hypoksiajakson onnistuminen ja kontrolloitiin urheilijoiden terveydentilaa. Etenkin maksimaalisen hapenotto- ja voimantuottokyvyn kasvua voidaan pitää hypoksiajakson onnistumisen mittarina.



KUVA 5. Tutkimuksen kulku kuvattuna yhden hypoksiaryhmän ja kontrolliryhmän osalta. Molempien hypoksiaryhmien protokollat olivat samanlaiset. Pre = alkumittaus, post = loppumittaus, LHTLH = Live High – Train Low and High -hypoksiajakso, VO_{2max}-testi = maksimaalisen hapenotto-kyvyn testi, hb = hemoglobiinimassa.

6.3 Aamumittaukset

6.3.1 Autonomisen hermoston palautuneisuuden seuranta

Urheilijoiden autonomisen hermoston palautumista seurattiin leposykkeen, ortostaattisen sykkeen ja HRV:n neliöllisen keskiarvon (RMSSD) sekä harjoituspäiväkirjamerkintöjen avulla. Urheilijat ohjeistettiin suorittamaan joka aamu heräämisen ja wc-käynnin jälkeen Polarin rannetietokoneella (Vantage V1, Polar Electro Oy, Kempele, Suomi) laitteeseen valmiiksi ohjelmoitu ortostaattinen syketesti, joka keräsi myös testin aikaisen leposykkeen ja RMSSD:n. Testissä sykedataa kerättiin rauhallisessa ympäristössä selinmakuulla kahden minuutin ajan, jonka jälkeen noustiin seisomaan, ja kerättiin sykedataa kahden minuutin ajan pystyasennossa. Ortostaattisen syketestin tulos ilmoitettiin pystyasennossa mitatun keskimääräisen sykkeen ja

makuuasennossa mitatun keskimääräisen sykkeen välisenä erotuksena. Leposyke oli ortostaattisen syketestin aikana mitattu alin syke.

6.3.2 Subjektiiiset tuntemukset, happisaturaatio ja paino

Harjoituskuormaa ja palautumista arvioitiin tutkittavien täyttämien harjoituspäiväkirjojen avulla. Tutkittavia pyydettiin täyttämään harjoituspäiväkirjaa viikon ajalta ennen hypoksiajaksoa, hypoksiajakson ajan sekä neljän viikon ajan hypoksiajakson päätyttyä. Harjoituspäiväkirjaan urheilijat merkitsivät harjoitustietojen lisäksi päivittäisen koetun kuormittuneisuuden tunteensa asteikolla 1–10 sekä aamun palautuneisuuden tunteet asteikolla 1–5. Tutkittavien keskimääräiset sykemuuttujien tulokset ja subjektiiiset tuntemukset sekä niissä tapahtuneet muutokset raportoitiin tutkimusprotokollassa määritetyiltä neljältä testipäivältä.

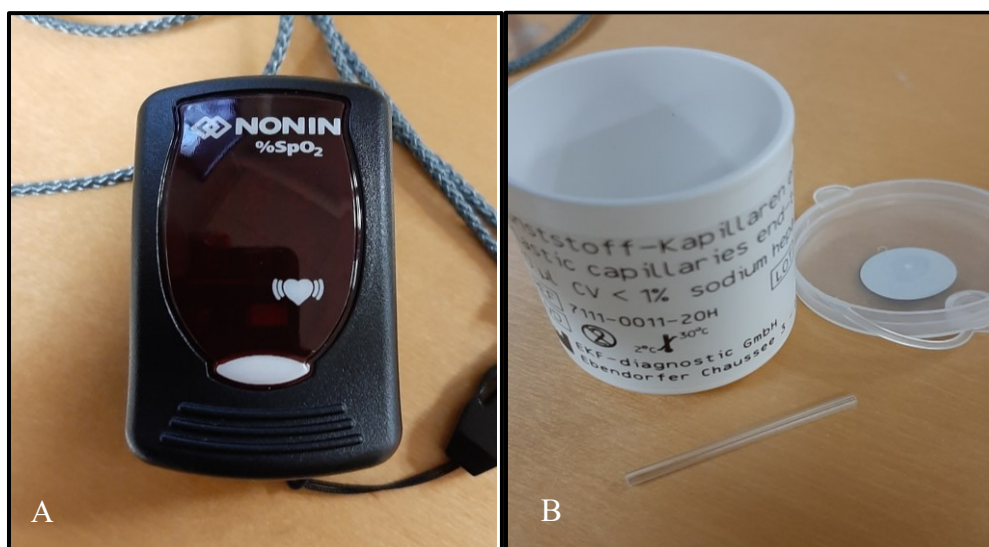
Urheilijat mittasivat happisaturaationsa sormenpäätä joka aamu happisaturaatiomittarilla (Onyx® Vantage 9590, Nonin Medical Inc, Minneapolis, Minnesota, USA), joka on esitetty kuvassa 6. Happisaturaatio mitattiin myös submaksimaalisten juoksumattotestien ja hypoksiaharjoitusten aikana. Tutkittavien keskimääräiset happisaturaatiot raportoitiin edellä tutkimusprotokollassa määritetyiltä neljältä testipäivältä. Happisaturaatiomittauksia ei pystytty suorittamaan ennen hypoksiajakson alkamista, koska tutkittavilla ei ollut käytössään happisaturaatiomittaria. Täten ensimmäisen testipäivän aamun happisaturaationa analyyseissä käytettiin terveen ihmisen keskimääräistä happisaturaation arvoa 97 % (Collins ym., 2015). Tutkittavat mittasivat happisaturaation lisäksi itsenäisesti painosa joka aamu vaa'alla (Prego P-881B, Inbound Finland Oy, Helsinki, Suomi), jonka mittaustarkkuus oli 100 g. Tutkittavien painot raportoitiin ennen hypoksiaa ja sen jälkeen suoritetuista mittauksista. Painot raportoitiin, koska niillä voi olla vaikutusta suorituskykyymuuttujiin.

6.4 Submaksimaalinen juoksumattotesti

Hypoksiajakson seurauksena tapahtuvia kestävyys suorituskyvyn muutoksia mitattiin submaksimaalisten juoksumattotestien avulla. Juoksu oli tutkittaville urheilijoille tuttu

harjoitusmuoto, jonka vuoksi kestävyysuorituskykyä voitiin luotettavasti mitata juosten tehdyllä testillä. Testissä he juoksivat neljä kertaa neljän minuutin kuorman vakionopeudella ja nousevalla kulmalla. Syke, RPE ja happisaturaatio kirjattiin jokaisen kuorman jälkeen, sekä otettiin laktaattinäyte 20 µl:n kapillaariputkiin. Happisaturaatiomittari ja laktaattinäytteiden ottoon käytetty kapillaariputki on esitetty kuvassa 6. Laktaattinäytteet analysoitiin laktaattianalysointilaitteella (Biosen C-Line Clinic, EKF-Diagnostics, Cardiff, Iso-Britannia), ja RPE kirjattiin Borgin asteikolla 1–10 (kuva 4). Happisaturaatio mitattiin turvallisuussyistä urheilijoiden voinnin seuraamiseksi, jotta testi voitaisiin keskeyttää happisaturaation mahdollisesti laskiessa alle 90 %:n, jota pidetään matalana ja oireita – kuten huimausta ja hengenahdistusta – aiheuttavana lukemana (Nonin Medical Inc, 2022).

Testistä oli kolme erilaista variaatioita, jotka erosivat toisistaan ainoastaan juoksunopeuksien osalta. Ensimmäisen testimallin juoksunopeus oli 10 km/h toisen 11,7 km/h ja kolmannen 13,5 km/h. Kuormien kulmat olivat kaikissa variaatioissa 2, 4, 7 ja 9°. Käytettävä testimalli päätettiin yksilöllisesti yhdessä urheilijan kanssa kuntotason mukaan ennen ensimmäistä testiä. Submaksimaalisten juoksumattotestien tulokset analysoitiin tutkimusprotokollassa määritetyiltä neljältä testipäivältä. Tuloksista analysoitiin testikertojen samojen kuormien väliset laktaatti-, RPE- ja sykearvot sekä niissä tapahtuneiden muutosten väliset korrelaatiot.



KUVA 6. Tutkimuksessa käytetty happisaturaatiomittari (A) ja laktaattinäytteiden ottoon käytetty kapillaariputki (B).

6.5 Räjähävän voimantuoton testit

Submaksimaalisen juoksumattotestin jälkeen lyhyellä, urheilijoiden itse määrittämällä ja tuntemuksiinsa perustuvalla palautumisajalla he suorittivat staattisen ja esikevennetyn hyppytestin sekä reaktiivisen pohjehyppelyn tässä järjestyksessä voimalevyllä (HUR FP8, Kokkola, Suomi), joka on esitetty kuvassa 7. Hyppytestit analysoitiin samoilta testipäiviltä kuin submaksimaalisten juoksumattotestien tulokset. Voimalevyn datan tulosten tarkasteluun käytettiin Coachtech-ohjelmistoa (Vuokatti Sports Technology Unit, University of Jyväskylä, Vuokatti, Suomi). Coachtech-ohjelmistoon tiedot kerättiin mittalaitteilla, jotka näkyvät myös kuvassa 8. Ennen testejä suoritettiin voimalevyn kalibrointi nollatasoon. Urheilijat saivat kolme yritystä kussakin hyppytestissä, joista tulokseksi kirjattiin paras tulos.

Staattinen hyppy toteutettiin siten, että urheilija asettui paikalleen kyykkyasentoon voimalevyllä polvet noin 90° kulmassa ja kädet asetettuina lanteille. Kun testaja antoi luvan, urheilija suoritti yhden maksimaalisen ponnistuksen suoraan ylöspäin ilman vauhdin ottamista eli esikevennystä. Mikäli Coachtech-ohjelmiston piirtämästä korkeuskäyrästä havaittiin esikevennys, hyppy hylättiin. Käsien tuli pysyä lanteilla koko suorituksen ajan hypyn hyväksymiseksi. Tulokseksi kirjattiin hypyn nousukorkeus, joka laskettiin impulssien avulla lentoaikaan perustuen kaavalla 1 (Moir, 2008).

$$h = \frac{g \times t_f^2}{8}, \quad (1)$$

missä h = nousukorkeus [m]

g = maan putoamiskiihtyvyys 9,81 m/s²

t_f = lentoaika [s]

Esikevennyshypyssä urheilija asettui voimalevyllä seisomaan jalat suorina ja kädet lanteilla. Testajan annettua luvan, urheilija suoritti yhden maksimaalisen hypyn suoraan ylöspäin ensin esikevennettyä hyppyä käyttämällä polvikulman noin 90° kulmassa. Käsien tuli pysyä lanteilla

koko suorituksen ajan hypyn hyväksymiseksi. Myös esikevennyshypystä tulokseksi kirjattiin hypyn nousukorkeus, joka laskettiin kaavan 1 mukaan.

Reaktiivisessa pohjehyppelyssä urheilija suoritti 10 peräkkäistä pohjehyppyä hyppysarjana päkiäponnistuksella mahdollisimman suorilla jaloilla siten, että hyppykorkeus oli mahdollisimman korkea, mutta kontaktiajat mahdollisimman pieniä. Myös reaktiivisessa pohjehyppelyssä hyväksytty suoritus edellytti käsien pitämistä lanteilla koko suorituksen ajan. Datasta tarkasteltiin hyppysarjan kahden tehollisesti parhaan hypyn keskiarvoista tehoa. Hyppysarjan mekaaninen teho P laskettiin kaavalla 2 (Bosco ym., 1983).

$$P = \frac{g^2 \times t_f \times t_t}{4 \times n \times t_c} \quad (2)$$

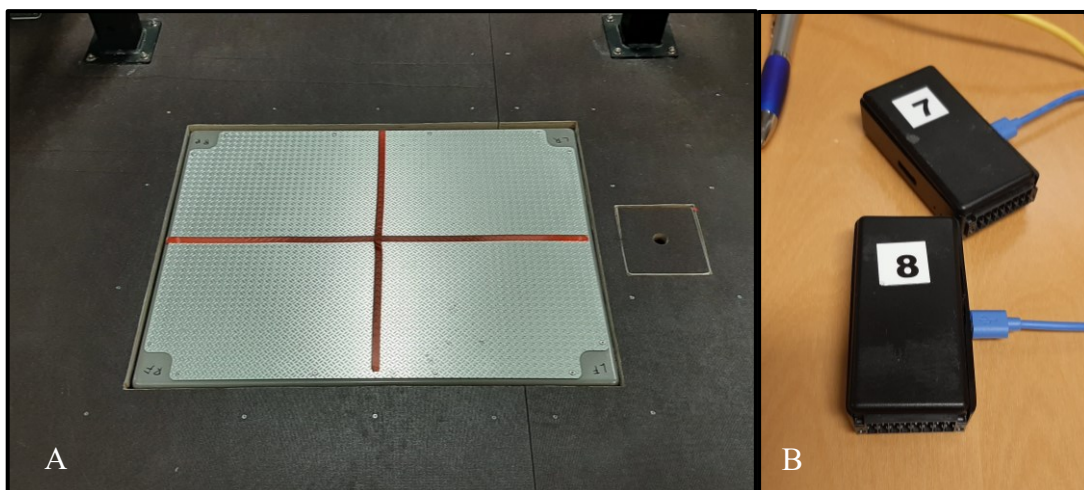
missä g = maan putoamiskiihtyvyyys $9,81 \text{ m/s}^2$

t_f = keskimääräinen lentoaika [s]

t_t = keskimääräinen hypyn kokonaisaika [s]

t_c = keskimääräinen kontaktiaika [s]

n = hyppyjen lukumäärämäärä



KUVA 7. Hyppytesteissä käytetty voimalevy (A) ja voimalevyltä datan keräämiseen käytetyt mittalaitteet (B).

6.6 Suorituskykyyn vaikuttavat taustamuuttajat

6.6.1 Hemoglobiinimassan mittaaminen

Urheilijoiden hemoglobiinimassavasteita hypoksiaan mitattiin käyttäen mukailtua protokollaa kahden minuutin hiilimonoksidin takaisinhengitysmenetelmästä (Schmidt & Prommer, 2005). Tarkoituksena oli määrittää tutkittavien hemoglobiinimassassa tapahtuneet keskimääräiset muutokset hypoksiajakson ajalta. Mittaukset suoritettiin ennen hypoksiajaksoa sekä sen jälkeen. Ennen CO-takaisinhengitystä tutkittavilta otettiin sairaanhoitajan toimesta laskimoverinäytteet hemoglobiinikonsentraation ja hematokriitin määrittämiseksi, ja heille tehtiin kehonkoostumusmittaus käyttäen Inbody-laitetta (Inbody 770, Biospace Co., Seoul, Korea). Lisäksi ennen varsinaista mittausta tutkittavien hengitysilman hiilimonoksidipitoisuus määritettiin käyttäen hiilimonoksidimittaria (Dräger PAC 7000, Dräger Safety, Lübeck, Germany). Tutkittavat istuivat alkumittauksien jälkeen noin 15 minuutin ajan paikoillaan, jotta veren tilavuus ehti tasoittua.

CO-takaisinhengityksessä tutkittavat hengittivät kehon massaan suhteutetun hiilimonoksidiannoksen sekä noin neljä litraa puhdasta happea kahden minuutin ajan suljetun spirometrin (SpiCO Calcualtor 2.2, Blood tec, Bayreuth, Germany) avulla. Miehillä hengitetyn hiilimonoksidin määrä oli 1,1–1,2 ml/kg ja naisilla 1,00 ml/kg. Tutkittavat käyttivät nenäklipsiä, jolla minimoitiin suljetusta systeemistä tapahtuvat vuodot. Hemoglobiiniin sitoutuneen hiilimonoksidin (%HbCO) määrä määritettiin sormen päästä kapillaariputkeen otettavalla verinäytteellä ennen hiilimonoksidin hengittämistä, heti hiilimonoksidin hengityksen loputtua sekä neljän ja kahdeksan minuutin kuluttua siitä. Määritys tehtiin OSM3-hemoksimetrillä (Radiometer, Kööpenhamina, Tanska). Hemoglobiinimassa laskettiin %HbCO:n määrässä tapahtuneen keskimääräisen muutoksen perusteella hiilimonoksidin hengittämisen jälkeen.

6.6.2 Maksimaalisen hapenottokyvyn testi

VO_{2max}-testi toteutettiin sauvakävellen Vuokatti Sportin Testiasemalla juoksumatolla (Telineyhtymä, Kotka, Suomi) hypoksiajaksoa edeltävällä viikolla sekä hypoksiajakson päättymistä seuraavalla viikolla. Testin tarkoituksena oli määrittää tutkittavien kehon painoon suhteutetussa VO_{2max}:ssä (ml/kg/min) tapahtuvat muutokset hypoksiajakson aikana. Kaikki tutkittavat suorittivat testin samaa protokollaa noudattaen. Ennen testin suorittamista tutkittavat suorittivat omatoimisen alkuverryttelyn, jonka jälkeen tutkittavien paino punnittiin. Kuormitusta kasvatettiin kuormittain kulman ja nopeuden tai molempien lisäyksellä yhden kuorman pituuden ollessa kolme minuuttia. Aloituskuormassa maton kulma oli 3,5 astetta ja nopeus 5,0 km/h.

Testi suoritettiin käyttäen sekoituskammiomenetelmällä toimivaa hengityskaasuanalysointia (Medikro 919, Medikro Oy, Kuopio, Suomi), jonka avulla saatiin tietoon tarkat hengityskaasupitoisuudet testin ajalta. VO_{2max} määritettiin 30 sekunnin keskiarvona hengityskaasujen perusteella. Jokaisen kuorman lopuksi sekä testin päättymisen jälkeen tutkittavilta otettiin sormenpäältä verinäyte 20 µl:n kapillaariputkeen ilman juoksumaton pysäyttämistä, sekä kirjattiin ylös syke ja RPE. Laktaatinäytteet analysoitiin laktaattianalysointilaitteella (Biosen C-Line Clinic, EKF-Diagnostics, Cardiff, Iso-Britannia), ja RPE kirjattiin Borgin asteikolla 1–10, joka on aiemmin esitetty kuvassa 4. Sykkeen seuranta toteutettiin käyttäen Polarin sykesensoria (Polar H10, Polar Electro Oy, Kempele, Suomi). Testaaja ei vaihtunut testikertojen tai tutkittavien välillä.

6.7 Tilastolliset analyysit

Kerättyjen tietojen tilastolliset tarkastelut suoritettiin käyttäen IBM SPSS 28 -ohjelmistoa (IBM Corporation, Armonk, New York, USA). Tulokset esitettiin käyttäen keskiarvoja ja keskihajontoja. Muuttujien normaalijakautuneisuus tarkistettiin Shapiro-Wilkinson testillä (arvo yli 0,5). Normaalijakautuneille muuttujille, joista analysoitavana oli vain kaksi mittauskertaa, suoritettiin parillinen t-testi keskiarvomuutosten tutkimiseksi. Muuttujille, jotka eivät olleet normaalijakautuneita, suoritettiin non-parametriset Wilcoxonin testit. Useampien

mittapisteiden välisten erojen merkitsevyyksiä tutkittiin käyttäen toistettujen mittausten varianssianalyysiä (rmANOVA) ja muuttujille, jotka eivät olleet normaalijakautuneita, käytettiin non-parametrinen toistettujen mittausten varianssianalyysiä eli Friedmanin testiä. Korrelaatioita analysoitiin korrelaatiokertoimen merkitsevyydestin (Pearsonin menetelmä) avulla. Tulokset määritettiin tilastollisesti merkitseviksi, kun $p < 0,05$.

7 TULOKSET

7.1 Aamumittaukset

7.1.1 Autonomisen hermoston palautuneisuus

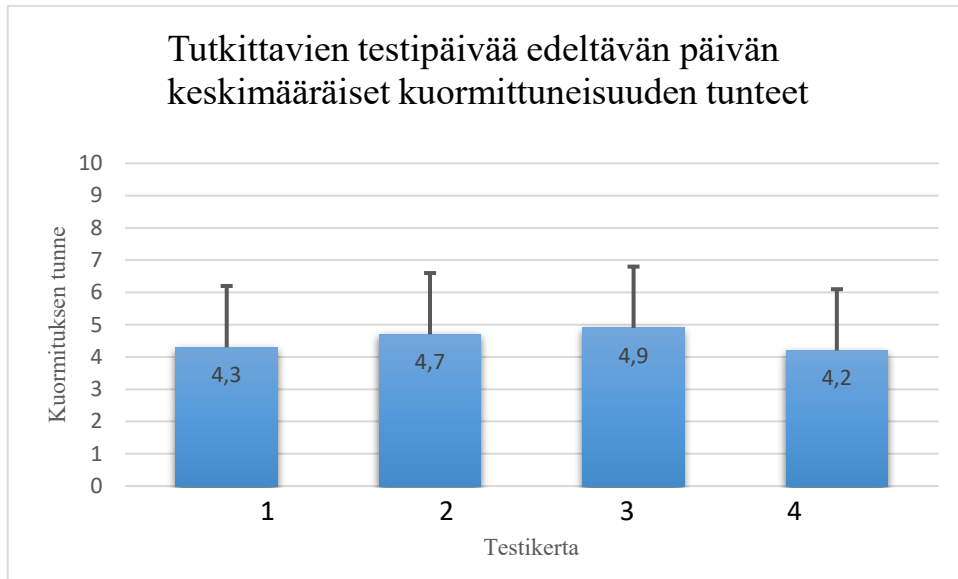
Leposykkeessä ja RMSSD:ssä ei havaittu merkittäviä muutoksia hypoksiajakson aikana. Ortostaattisessa testissä havaittiin merkittävät muutokset ensimmäisen ja toisen testikerran ($p=0,009$) sekä ensimmäisen ja neljännen testikerran välillä ($p=0,009$). Muutos ensimmäisen ja toisen testikerran välillä oli noin $8,0 \pm 6,9$ bpm (lyöntiä minuutissa) ($29,5 \pm 25,6$ %). Ensimmäisen ja neljännen testikerran välinen muutos oli noin $15,3 \pm 13,5$ bpm ($56,6 \pm 49,7$ %). Näiden autonomisen hermoston palautumisen tilaa arvioivien sykemuuttujien keskimääräiset tulokset on esitetty taulukossa 2.

TAULUKKO 2. Leposykkeen, RMSSD:n ja ortostaattisen syketestin keskimääräiset tulokset testikerroittain (ka \pm SD). Orto = ortostaattinen syke, bpm = lyöntiä minuutissa (beats per minute). ** $p<0,01$ tilastollisesti merkitsevä muutos ensimmäiseen testikertaan nähden.

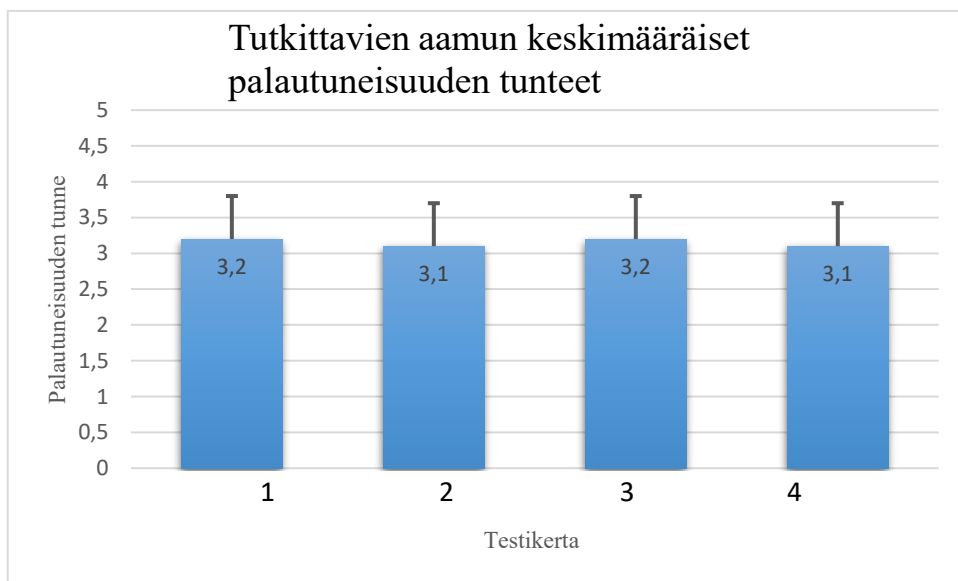
Mitattu muuttuja (n=9)	Alkumittaus	2. viikko	3. viikko	4. viikko
Leposyke (bpm)	$52,2 \pm 10,1$	$54,2 \pm 10,6$	$57,2 \pm 9,5$	$52,6 \pm 7,3$
RMSSD (ms)	$96,6 \pm 46,1$	$114,1 \pm 53,2$	$90,3 \pm 52,7$	$89,9 \pm 56,2$
Orto (bpm)	$27,1 \pm 14,5$	$35,1 \pm 11,5^{**}$	$35,3 \pm 12,2$	$42,4 \pm 13,6^{**}$

7.1.2 Subjektiiiviset tuntemukset, happisaturaatio ja paino

Subjektiiivisissa tuntemuksissa ei havaittu merkittäviä muutoksia hypoksiajakson aikana. Testipäivää edeltävän päivän kuormittuneisuuden tunteen (n=10) ja testipäivän palautuneisuuden tunteen (n=12) keskimääräiset tulokset on esitetty kuvissa 8 ja 9.



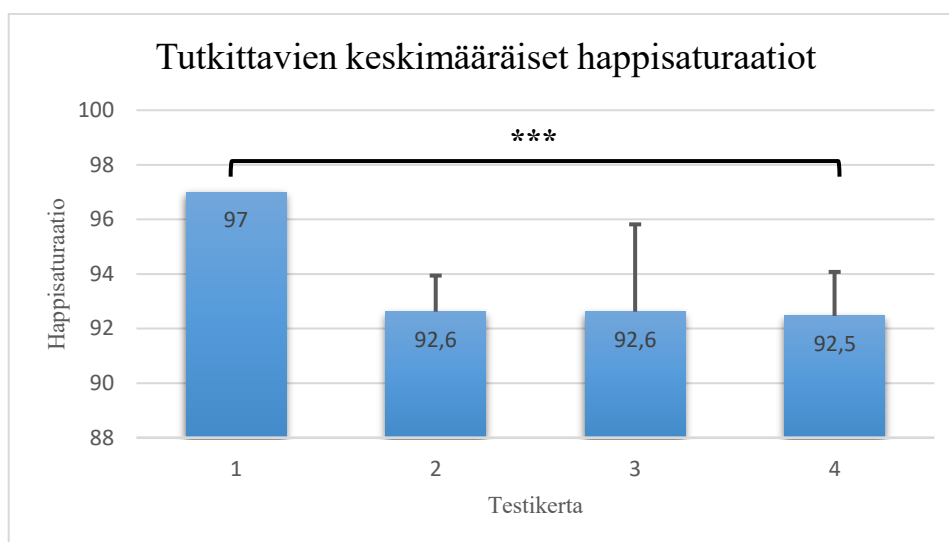
KUVA 8. Tutkittavien keskimääräiset kuormittuneisuuden tunteet asteikolla 1-10 testikerroittain (ka ± SD).



KUVA 9. Tutkittavien keskimääräiset aamun palautuneisuuden tunteet asteikolla 1-5 testikerroittain (ka ± SD).

Tutkittavien happisaturaatio (n=13) oli hypoksiajakson aikaisten testipäivien aamuina keskimäärin 92,6 %, joka on selkeästi normaalia merenpinnan tason keskimääräistä

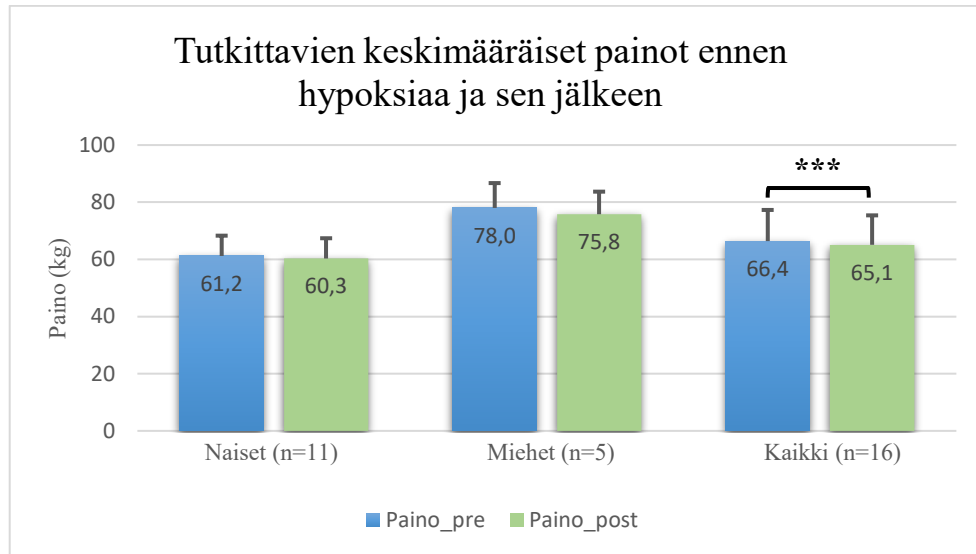
happisaturaatiota (97 %) (Collins ym., 2015) matalampi. Muutos merenpinnan tason arvioidusta happisaturaatiosta hypoksisten olosuhteiden lukemiin oli tilastollisesti merkitsevä ($p < 0,001$). Hypoksiajakson aikana testikertojen välillä ei havaittu tilastollisesti merkitsevää muutosta happisaturaatioissa. Tutkittavien keskimääräiset happisaturaatiot testikerroittain on esitetty kuvassa 10.



KUVA 10. Tutkittavien keskimääräiset happisaturaatiot ($\bar{x} \pm SD$) neljältä testikerralta.

Ensimmäisen testikerran osalta happisaturaationa on käytetty keskimääräistä terveen ihmisen happisaturaatioarvoa 97 % (Collins ym. 2015). *** $p < 0,001$ tilastollisesti merkitsevä muutos testikertojen välillä.

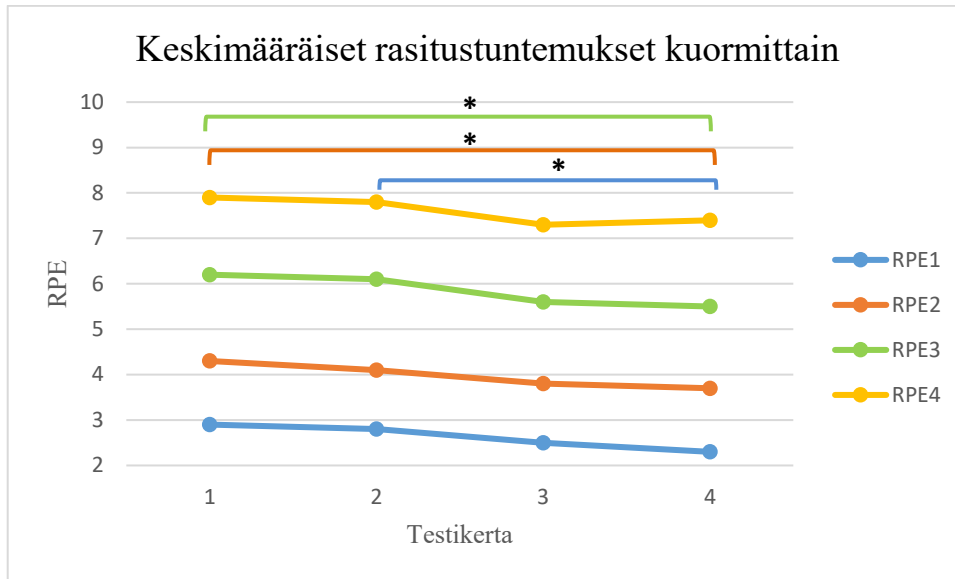
Tutkittavien paino laski merkitsevästi hypoksiajakson aikana tutkittaessa koko ryhmää ($p < 0,001$). Painon muutos oli keskimäärin $-1,3 \pm 1,2$ kg ($-1,8 \pm 1,7$ %) hypoksiajakson aikana. Naisten paino laski keskimäärin noin $0,9 \pm 1,0$ kg ja miesten noin $2,2 \pm 1,2$ kg. Muutokset kehon painossa on esitetty kuvassa 11 sukupuolittain sekä kaikkien tutkittavien osalta.



KUVA 11. Tutkittavien keskimääräiset painot (ka ± SD) ennen hypoksiajaksoa ja sen päätyttyä. Paino_pre = paino ennen hypoksiajaksoa, paino_post = paino hypoksiajakson jälkeen. *** p<0,001 tilastollisesti merkitsevä muutos testikertojen välillä.

7.2 Submaksimaalinen juoksumattotesti

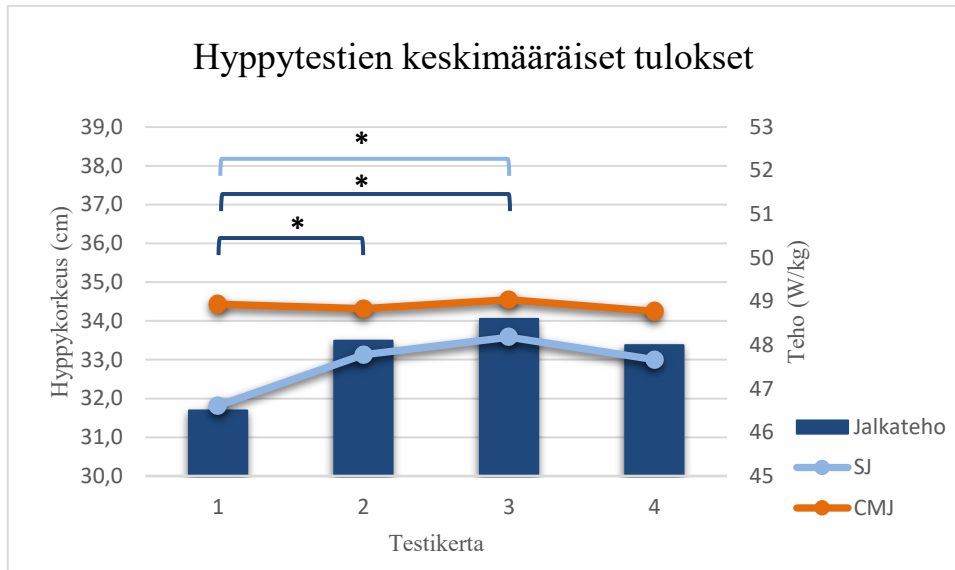
Submaksimaalisten juoksumattotestien (n=13) sykkeissä ja laktaateissa ei havaittu merkittäviä muutoksia samojen kuormitustasojen välillä eri testikerroilla. RPE:ssa havaittiin merkitseviä muutoksia vertailtaessa eri testikertojen samoja kuormitustasoja. Keskimääräiset RPE-lukemat testikerroilta kuormittain on esitetty kuvassa 12. Ensimmäisessä kuormassa tapahtui merkitsevä muutos testikertojen 1 ja 4 välillä (d=0,54, p=0,028), toisessa kuormassa testikertojen 2 ja 4 välillä (d=0,27, p=0,047) ja kolmannessa kuormassa testikertojen 1 ja 4 välillä (d=0,654, p=0,034). Neljännen kuorman osalta ei havaittu muutosta RPE:ssa.



KUVA 12. Kuormien keskimääräiset rasitustuntemukset (RPE) submaksimaalisista juoksumattotesteistä testikerroittain. RPE:t numeroitu kuormittain (1–4). * $p < 0,05$ tilastollisesti merkitsevä muutos testikertojen välillä. Sulkeen väri ilmaisee kuorman, johon merkitsevyys viittaa.

7.3 Räjähävän voimantuoton testit

Staattisen hypyn keskimääräisissä nousukorkeuksissa havaittiin tilastollisesti merkitsevä muutos ensimmäisen ja kolmannen testikerran välillä. Hyppykorkeus kasvoi tuolla välillä keskimäärin $1,8 \pm 2,7$ cm ($6,2 \pm 8,6$ %) ($p=0,030$). Esikevennyshyppyjen nousukorkeuksissa ei havaittu tilastollisesti merkittäviä muutoksia. Reaktiivisen pohjehyppelyn kahden parhaan hypyn keskimääräisessä tehossa huomattiin kasvua ensimmäisen ja toisen testikerran välillä $3,4 \pm 6,0$ % ($p=0,049$) sekä ensimmäisen ja kolmannen testikerran välillä $4,5 \pm 6,8$ % ($p=0,031$). Staattisen hypyn ja esikevennetyn hypyn keskimääräiset nousukorkeudet sekä pohjehyppelyn kahden parhaan hypyn keskimääräiset tehot on esitetty kuvassa 13. Taulukossa 3 on esitetty hyppytestien keskimääräiset tulokset testikerroittain keskihajontojen kanssa.



KUVA 13. Staattisen ja esikevennetyn hypyn keskimääräiset nousukorkeudet ja reaktiivisen pohjahyppelyn kahden parhaan hypyn tehot testikerroittain. SJ = staattinen hyppy, CMJ = esikevennyshyppy. * $p < 0,05$ tilastollisesti merkitsevä muutos testikertojen välillä. Sulkeen väri ilmaisee muuttujan, johon merkitsevyys viittaa.

TAULUKKO 3. Staattisen (SJ) ja esikevennetyn (CMJ) hyppytestin nousukorkeudet sekä reaktiivisen pohjahyppelyn kahden parhaan hypyn keskimääräiset tehot (jalkateho) testikerroittain ($ka \pm SD$). * $p < 0,05$ tilastollisesti merkitsevä muutos testikertojen välillä.

Mitattu muuttuja (n=15)	Alkumittaus	2. viikko	3. viikko	4. viikko
SJ (cm)	31,8 ± 6,5	33,1 ± 6,2	33,6 ± 6,2*	33,0 ± 6,6
CMJ (cm)	34,4 ± 8,9	34,3 ± 7,3	34,5 ± 7,4	34,2 ± 7,6
Jalkateho (W/kg)	46,5 ± 6,3	48,1 ± 7,1*	48,6 ± 7,5*	48,0 ± 7,6

7.4 Autonomisen hermoston palautuneisuuden ja suorituskyvyn korrelaatiot

Autonomisen hermoston palautuneisuuden tilaa kuvaavien sykemuuttujien muutokset alkumittausten ja neljännen hypoksiaviikon välillä eivät korreloineet keskenään eivätkä suorituskykytestien tulosten tai subjektiivisten tunteiden muutosten kanssa. Subjektiivisten

tuntemusten muutosten havaittiin korreloivan keskenään samalla aikavälillä: testipäivää edeltävän päivän kuormittuneisuuden tunteen muutokset korreloivat negatiivisesti testiaamun palautuneisuuden tunteen muutosten kanssa ($p < 0,05$). Subjektiiivisten tuntemusten, räjähtävän voimantuottokyvyn ja submaksimaalisen juoksumattotestin viimeisten kuormien laktaattipitoisuuksien muutosten keskinäiset korrelaatiot (r , Pearsonin korrelaatiokertoimet) ja niiden merkitsevyydet (p -arvot) alkumittausten ja neljännen hypoksiaviikon mittausten välillä on esitetty taulukossa 4.

TAULUKKO 4. Subjektiiivisten tuntemusten, räjähtävän voimantuottokyvyn ja submaksimaalisen kestävyystestin viimeisen kuorman laktaattipitoisuuksien alkumittausten ja neljännen hypoksiaviikon välisten muutosten korrelaatiot. r = Pearsonin korrelaatiokerroin, Recovery = aamun palautuneisuuden tunne, TL = edellisen päivän kuormittuneisuuden tunne (Training Load), La4 = submaksimaalisten mattotestien neljännen kuorman laktaattipitoisuus.

	Recovery	TL	SJ	CMJ	Jalkateho	La4
Recovery	$r = 1$	$r = -0,967$ $p = 0,033$	$r = -0,979$ $p = 0,021$	$r = -0,360$ $p = 0,640$	$r = -0,980$ $p = 0,020$	$r = 0,995$ $p = 0,005$
TL	$r = -0,967$ $p = 0,033$	$r = 1$	$r = 0,999$ $p = 0,001$	$r = 0,295$ $p = 0,705$	$r = 0,977$ $p = 0,023$	$r = -0,957$ $p = 0,043$
SJ	$r = -0,979$ $p = 0,021$	$r = 0,999$ $p = 0,001$	$r = 1$	$r = 0,313$ $p = 0,687$	$r = 0,983$ $p = 0,017$	$r = -0,969$ $p = 0,031$
CMJ	$r = -0,360$ $p = 0,640$	$r = 0,295$ $p = 0,705$	$r = 0,313$ $p = 0,687$	$r = 1$	$r = 0,183$ $p = 0,817$	$r = -0,273$ $p = 0,727$
Jalkateho	$r = -0,980$ $p = 0,020$	$r = 0,977$ $p = 0,023$	$r = 0,983$ $p = 0,017$	$r = 0,183$ $p = 0,817$	$r = 1$	$r = -0,989$ $p = 0,011$
La4	$r = 0,995$ $p = 0,005$	$r = -0,957$ $p = 0,043$	$r = -0,969$ $p = 0,031$	$r = -0,273$ $p = 0,727$	$r = -0,989$ $p = 0,011$	$r = 1$

Submaksimaalisen juoksumattotestin aikaisen sykkeen, laktaattikonsentraation tai RPE:n alkumittausten ja neljännen hypoksiaviikon mittausten välisten muutosten ei havaittu korreloivan saman aikavälin happisaturaation muutosten kanssa. RPE:n ja sykkeen muutosten ei myöskään havaittu korreloivan merkitsevästi räjähtävän voimantuottokyvyn muutosten

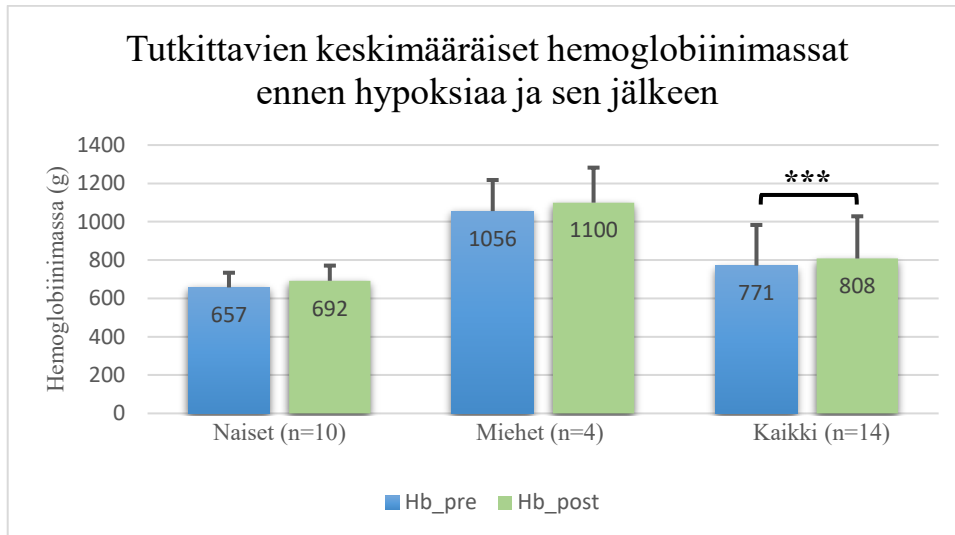
kanssa. Submaksimaalisen mattotestin kuormien keskimääräisen laktaattikonsentraation ja RPE:n muutosten välillä havaittiin positiivinen korrelaatio kuormilla 1, 2 ja 3. Korrelaatiot on esitetty taulukossa 5. Laktaatin ja sykkeen tai sykkeen ja RPE:n muutosten välillä ei havaittu merkitseviä korrelaatioita. RPE:n muutokset eivät myöskään korreloineet muiden tutkittujen subjektiivisten tuntemusten muutosten kanssa.

TAULUKKO 5. Keskimääräisten laktaattikonsentraatioiden ja RPE:n muutosten väliset korrelaatiot submaksimaalisissa juoksumattotesteissä kuormittain alkumittausten ja neljännen hypoksiaviikon välillä. La = laktaattikonsentraatio, mattotestin kuormat numeroitu (1–4). * $p < 0,05$ tilastollisesti merkitsevä korrelaatio muuttujien välillä.

Vertailtu muuttujapari	Korrelaatiokerroin	p-arvo
La1 - RPE1	0,965	0,035*
La2 - RPE2	0,957	0,043*
La3 - RPE3	0,983	0,017*
La4 - RPE4	0,758	0,242

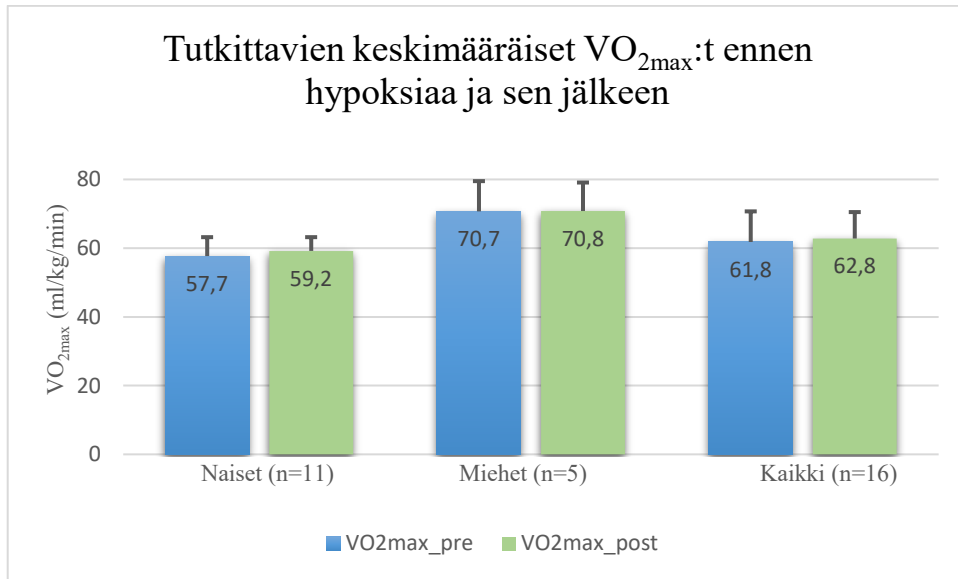
7.5 Suorituskykyyn vaikuttavat taustamuuttajat

Hemoglobiinimassassa havaittiin merkitsevää kasvua hypoksiajaksoa edeltävistä mittauksista hypoksiajakson viimeisen viikon mittauksiin ($p < 0,001$). Hemoglobiinimassa kasvoi tutkittavilla keskimäärin $37,4 \pm 20,6$ g ($5,0 \pm 3,0$ %). Naisten hemoglobiinimassa kasvoi keskimäärin noin $34,7 \pm 20,8$ g ($5,3 \pm 3,4$ %) ja miesten noin $44,0 \pm 21,4$ g ($4,0 \pm 1,4$ %). Hemoglobiinimassan muutokset on esitetty kuvassa 14 kaikkien tutkittavien keskimääräisenä hemoglobiinimassana sekä sukupuolittain.



KUVA 14. Tutkittavien keskimääräiset hemoglobiinimassat (ka ± SD) ennen hypoksiajaksoa ja sen päätyttyä. Hb_pre = hemoglobiinimassa ennen hypoksiajaksoa, Hb_post = hemoglobiinimassa hypoksiajakson jälkeen. *** p<0,001 tilastollisesti merkitsevä ero mittausajankohtien välillä.

Suhteellisessa maksimaalisessa hapenottokyvyssä (ml/kg/min) ei havaittu tilastollisesti merkitseviä muutoksia hypoksiajakson aikana (p=0,195). Kaikkien tutkittavien keskimääräinen VO_{2max} oli alkumittauksissa 61,8 ± 8,9 ml/kg/min ja loppumittauksissa 62,8 ± 7,7 ml/kg/min. Tutkittavien keskimääräiset maksimaaliset hapenottokyvyt ennen hypoksiajaksoa sekä hypoksiajakson jälkeen on esitetty kuvassa 15 kaikkien tutkittavien osalta sekä sukupuolittain. VO_{2max} on mitattu 30 sekunnin suurimpana keskiarvona.



KUVA 15. Tutkittavien keskimääräiset maksimaaliset hapenottokyvyt ($ka \pm SD$) ennen hypoksiajaksoa ja sen päätyttyä. VO_{2max_pre} = maksimaalinen hapenottokyky ennen hypoksiajaksoa, VO_{2max_post} = maksimaalinen hapenottokyky hypoksiajakson jälkeen.

8 POHDINTA

Tämän tutkimuksen tarkoituksena oli selvittää, miten neljä viikkoa kestävä LHTLH-tyyppinen hypoksiajakso vaikuttaa happisaturaatioon, autonomisen hermoston palautuneisuuden tilaan, räjähtävään voimantuottokykyyn ja submaksimaaliseen kestävyysuotuskykyyn, sekä ovatko nämä muuttujat yhteydessä toisiinsa. Tutkimusjakson aikana havaittiin hypoteesin mukaisesti happisaturaation laskua ja hyppytestien avulla mitatun räjähtävän voimantuottokyvyn kasvua. Autonomisen hermoston palautuneisuuden tilaa arvioivissa sykemuuttujissa havaittiin muutoksia vain ortostaattisessa testissä, vaikka muissakin mitatuissa sykemuuttujissa odotettiin tapahtuvan muutoksia kasvaneen kuormituksen vuoksi. Autonomisen hermoston tilaa kuvaavien sykemuuttujien, suorituskykytestien ja subjektiivisten tuntemusten muutosten välillä ei havaittu hypoteesin mukaista yhteyttä.

Asuinhuoneistoina simuloidun hypoksiajakson ajan toimivat alppimajat, joiden happipitoisuus oli säädetty vastaamaan noin 2500 metrin korkeutta. Tutkittavat viettivät alppimajoissa keskimäärin 18 h/vrk tutkimuksen ajan. Tutkimuksen aikana harjoittelua suoritettiin sekä merenpinnan tasolla että hypoksiageneraattoreiden avulla simuloidussa hypoksiassa. Nämä olosuhteet vastaavat aiemmin kirjallisuudessa esitettyjä suosituksia niin hypoksiajakson keston ja asumiskorkeuden (Chapman ym., 2014) kuin päivittäisen hypoksia-altistusajan (Rusko ym., 2004) osalta. Tähän mennessä suoritettujen tutkimusten perusteella simuloitujen hypoksisten olosuhteiden aiheuttamat fysiologiset vasteet ovat samankaltaisia kuin luonnollisen hypoksian aiheuttamat vasteet, jos hypoksialle altistumisajoissa noudetaan tutkimusten mukaisia suosituksia (esim. Garvican ym., 2012; Robertson ym., 2010). Täten luonnollisen ja simuloidun hypoksian aiheuttamia vasteita voitiin tarkastella yhteneväisinä.

Happisaturaatio oli koko hypoksiajakson ajan kaikilla tässä tutkimuksessa mitatuilla kolmella mittauskerralla keskimäärin 92,6 %, eikä siinä havaittu muutoksia hypoksiajakson edetessä. Hypoksiajakson aikaiset happisaturaatiolukemat olivat ihmisten keskimääräistä normoksiassa mitattua arvoa selkeästi matalampia, ja ne vastaavat Mazzeon (2008) tutkimuksessa havaittua happisaturaation laskua 92 %:iin alle 3000 metrin korkeudessa. Tätä suuremmissa korkeuksissa happisaturaatio laskee vielä alemmas. (Mazzeo, 2008) Tässä tutkimuksessa happisaturaatioita

ei voitu suoraan verrata arvoihin ennen hypoksiajaksoa, koska tiedot happisaturaatioista puuttuvat ajalta ennen hypoksiajaksoa. Tähän syynä on se, ettei tutkittavilla ollut happisaturaatiomittaria käytettävissä ennen varsinaisen hypoksiajakson alkamista.

Tiedetään kuitenkin, että ihmisen keskimääräinen happisaturaatio merenpinnan tasolla on yleensä välillä 96–98 % (Collins ym., 2015), joten ensimmäisen testikerran keskimääräisenä happisaturaatioarvona tilastoanalyysissä käytettiin lukemaa 97 %. Tutkittavien ollessa urheilijoita, voidaan heidän happisaturaatioidensa olettaa olleen terveen ihmisen lukemissa ennen hypoksiajaksoa. Otettaessa huomioon alkutilanteen arvioitu happisaturaatiolukema, laski happisaturaatio hypoksisiin olosuhteisiin saapuessa noin neljällä prosenttiyksiköllä ($p < 0,001$). Tämä oli odotettavissa oleva tulos, sillä hypoksian tiedetään aiheuttavan happisaturaation laskua ja siten kiihdyttävän punasolutuotantoa (Giles ym., 2016). Alle 90 %:n happisaturaatiota pidetään hankalia oireita aiheuttavana lukemana (*Nonin Medical Inc*, 2022), joten tutkittavien keskimääräinen happisaturaatio ei päässyt laskemaan terveydelle haitallisiin lukemiin. Alkumittausten ja neljännen hypoksiaviikon välisten happisaturaation muutosten ei havaittu korreloivan autonomisen hermoston palautuneisuuden, kestävyysuorituskyvyn tai räjähtävän voimantuottokyvyn muutosten kanssa.

Autonomisen hermoston palautuneisuuden tilan arviointiin käytettiin aamun leposykkeeseen, RMSSD:n ja ortostaattisen sykkeen mittausta. Leposykkeissä ei havaittu merkitseviä muutoksia hypoksiajakson aikana verrattuna alkumittausten tuloksiin, vaikka oletuksena oli, että siinä havaittaisiin kasvua rasituksen kasvaessa sekä hypoksian että harjoittelun myötä. Merkitsevien muutosten puute voi johtua osittain tulosten suuresta hajonnasta. Toisaalta tiedetään, että pelkästään leposykkeeseen mittaamisella ei saada tarpeeksi tietoa elimistön kuormittuneisuudesta, koska kuormittuneisuus ei aina vaikuta leposykkeeseen (Uusitalo & Nummela, 2016). Tämän vuoksi käytettiin lisäksi RMSSD:n mittausta ja ortostaattista syketestiä. Leposyke päätettiin ottaa mukaan autonomisen hermoston tilan analyysiin, koska leposyke on helposti mitattava ja yleisesti urheilijoiden käyttämä muuttuja.

RMSSD:ssä ei havaittu merkittäviä muutoksia tutkimuksen aikana. RMSSD:n oletettiin kasvavan hypoksiajakson aikana elimistöön kohdistuvan kuormituksen seurauksena, mutta näin

ei tapahtunut. Kuten leposykkeekin kohdalla, havaittiin myös RMSSD:n tuloksissa kohtuullisen suurta hajontaa, joka voi vaikuttaa osaltaan tulosten tilastollisen merkitsevyyden puuttumiseen. Analyyseissä käytetty RMSSD oli mitattu joka aamu makuulla ainoastaan kahden minuutin ajan, joka luotettavan HRV:n mittaamiseksi voi olla lyhyt aika, kun Shafferin & Ginsbergin (2017) mukaan tavallisesti lyhin käytetty RMSSD:n keräysaika on viisi minuuttia. Tutkimuksessa tiedostettiin, että yösykeanalyysi olisi ollut luotettavampi menetelmä RMSSD:n keräykseen, sekä antanut kokonaisvaltaisemman kuvan palautumisen tilasta ja etenkin parasympaattisen hermoston aktivaatiosta, mutta tällaista dataa ei ollut käytettävissä (Shaffer & Ginsberg, 2017).

Ortostaattisessa sykkeessä havaittiin merkitsevä $29,5 \pm 25,6$ %:n kasvu alkumittausten ja toisen hypoksiaviikon mittauksen välillä sekä $56,6 \pm 49,7$ %:n kasvu alkumittausten ja neljännen hypoksiaviikon mittausten välillä ($p=0,009$). Ortostaattisen sykkeen kasvu kertoo autonomisen hermoston heikentyneestä palautuneisuuden tilasta (Nummela & Peltonen, 2018). Ortostaattisen sykkeen odotettiin alussa kasvavan raskuuden vuoksi, mutta sopeutumisen seurauksena lähtevän laskuun ensimmäisen viikon jälkeen (Bernardi ym., 2001). Kuitenkaan tutkimuksessa ei havaittu merkitsevää ortostaattisen sykkeen laskua, vaan se pysyi kohonneena hypoksiajakson loppuun asti. Ortostaattisen sykkeen kasvu hypoksiajakson edetessä voi hypoksian kuormittavuuden lisäksi johtua myös muista stressitekijöistä. Tulosten analysoinnissa tiedostettiin, että ortostaattinen syketesti on herkkä ulkopuolisille häiriöille. Käytetyin protokolla ortostaattisen sykkeen mittaamiseen sisältää viisi minuuttia sykkeen lepokeräystä ja kolme minuuttia pystyasennon sykkeen keräystä. (Uusitalo & Nummela, 2016) Tässä tutkimuksessa lepo- ja pystyasennon keräykset suoritettiin molemmat vain kahden minuutin ajalta, mikä voi aiheuttaa virhettä tuloksiin. On huomioitavaa, että ortostaattinen syketestit suoritettiin joka aamu yhdessä RMSSD:n ja leposykkeiden mittauksen kanssa, mutta näistä kaikista mittapisteistä analysoitiin tässä tutkielmassa vain neljän aamun mittaukset. Tämä voi aiheuttaa virhettä tuloksiin, koska näissä muuttujissa voi esiintyä suurtakin päiväkohtaista vaihtelua.

Tutkittavien kuormituksen ja palautumisen tasoa arvioitiin harjoituspäiväkirjoista kerättyjen testipäivää edeltävän päivän kuormittuneisuuden tunteen ja testipäivän aamun palautumisen tunteen avulla. Näiden subjektiivisten tuntemusten osalta tutkimuksen aikana ei havaittu

tilastollisesti merkitseviä muutoksia. Keskimääräiset aamun palautuneisuuden tunteet ja testipäivää edeltävän päivän kuormittuneisuuden tunteet pysyivät samalla tasolla koko hypoksiajakson ajan. Näissä molemmissa muuttujissa odotettiin tapahtuvan kasvua hypoksian ja harjoittelun aiheuttaman kuormituksen (Peltonen & Nummela, 2016) seurauksena alkumittausten ja neljännen hypoksiaviikon välillä. Koska tuntemukset ovat subjektiivisia, on mahdollista, että tutkittavat ovat sopeuttaneet kirjaamansa tuntemukset siihen, miltä he ovat odottaneet olonsa tuntuvan normaalitilaan vertailun sijaan. Testipäivää edeltävän päivän kuormittuneisuuden tunteen ja testausaamun palautuneisuuden tunne kuitenkin olivat yhteydessä toisiinsa. Autonomisen hermoston tilaa arvioivien sykemuuttujien ja subjektiivisten tuntemusten väliltä ei löydetty yhteyttä. Oletuksena oli, että sykemuuttujien ja tuntemusten välillä havaittaisiin korrelaatiota. Ortostaattisen sykkeen osalta havaittu merkitsevä nousu olisi voinut aiheuttaa palautumisen tunteen heikkenemisen, mutta sitä ei tapahtunut. Osasyynä tähän ovat mahdollisesti henkiset tekijät; esimerkiksi harjoittelun mielekkyys ja harjoitteluympäristön vaihtelu saattoivat parantaa tuntemuksia normaalitilaan nähden.

Räjähtävää voimantuottokykyä mitattiin tutkimuksessa staattisen ja esikevennetyn hypyn nousukorkeuksien sekä reaktiivisen pohjehyppelyn maksimaalisen tehon avulla. Hyppytestit suoritettiin joka testauskerralla submaksimaalisen juoksumattotestin jälkeen. Staattisen hyppytestin nousukorkeuksissa havaittiin tilastollisesti merkitsevä muutos ainoastaan ensimmäisen ja kolmannen testikerran välillä. Hyppykorkeus kasvoi noiden mittausten välillä keskimäärin $6,2 \pm 8,6 \%$ ($p=0,030$). Esikevennettyjen hyppytestien hyppykorkeuksissa ei havaittu merkitsevää muutosta tutkimuksen aikana. Osasyynä esikevennetyn hypyn hyppykorkeuden muuttumattomuudelle voisi olla esikevennetyssä hypyssä staattista hyppyä suuremmissa määrin hyödynnettävä lihaksiin ja jänteisiin varastoidun elastisen energian käyttäminen. Elastinen energia mahdollisesti kasvattaa hypyn tehoa staattiseen hyppytyyliin nähden. (Komi & Bosco C, 1978) Jos elastisen energian tehokkaampi hyödyntäminen olisi syynä esikevennyshypyn tulosten muuttumattomuuteen, tarkoittaisi se hypoksian vaikuttamista eri tavalla elastisen energian tuotannon mekanismeihin kuin staattisessa hypyssä hyödynnettäviin voimantuottomekanismeihin. Toisaalta elastista energiaa hyödyntävän reaktiivisen pohjehyppelyn teho kasvoi tutkimuksen aikana, joten elastisen energian hyödyntäminen on epätodennäköinen selitys ilmiölle.

Reaktiivisessa pohjehyppelyn maksimaalisessa tehossa havaittiin tilastollisesti merkitsevä $3,4 \pm 6,0$ %:n kasvu ensimmäisen ja toisen testikerran välillä ($p=0,049$) sekä $4,5 \pm 6,8$ %:n kasvu ensimmäisen ja kolmannen testikerran välillä ($p=0,031$). Oli odotettavissa, että räjähtävä voimantuottokyky voi kasvaa hypoksian aikana, koska Ruggieron ym. (2020) tutkimuksessa havaittiin voimantuottokyvyn palautumisen nopeutumista hypoksian seurauksena normoksisiiin olosuhteisiin verrattuna. Tässä tutkielmassa kaikkien hyppytestien osalta on mahdollista, että oppiminen vaikutti tutkimusjakson alussa tulosten paranemiseen, koska osalle urheilijoista staattinen ja esikevennetty hyppytesti sekä reaktiivinen pohjehyppely eivät olleet ennestään tuttuja testimenetelmiä. Osasyynä hyppytestien tulosten paranemiselle voi olla tutkimuksessa havaittu kehon painon lasku. Ei voida siis täysin varmasti sanoa, kuinka suurelta osin hypoksialle altistuminen vaikutti näissä testeissä ilmenneisiin muutoksiin. Todennäköisesti hypoksiassa tapahtuva harjoittelu kehittää niitä ominaisuuksia, joita harjoitetaan, joten syynä vain joidenkin hyppytestien tulosten muutoksiin voi olla niiden harjoittaminen hypoksijakson aikana (Álvarez-Herms ym., 2014; Coşkun ym., 2022).

Submaksimaalisten mattotestien neljänsien kuormien laktaattikonsentraatioiden muutosten havaittiin korreloivan negatiivisesti staattisen hypyn nousukorkeuden ja jalkatehon muutosten kanssa. Tämä voi selittyä mattotestin ja hyppytestien suoritusten läheisyydellä, sillä hyppytestit suoritettiin vain muutaman minuutin palautumisajalla mattotestistä. Vaikuttaisi siltä, että mahdollisesti palautumisaika mattotestistä ei ollut riittävä ennen hyppytestien suorittamista, joten mattotestin lopussa korkeammaksi noussut laktaatti saattoi vaikuttaa hyppytestien heikentyneisiin tuloksiin.

Myös testipäivän kuormittuneisuus tai huonot tuntemukset saattoivat vaikuttaa juoksutesteihin ja hyppysuorituskykyyn, vaikka korrelaatioanalyseistä huomataan, että sekä staattisen hyppytestin hyppykorkeuden että reaktiivisen pohjehyppelyn tehon muutokset alkumittausten ja neljännen hypoksiaviikon välillä korreloivat negatiivisesti aamun palautuneisuuden tunteen ja submaksimaalisen juoksumattotestin viimeisen kuorman laktaattipitoisuuden muutosten kanssa sekä positiivisesti edellisen päivän kuormittuneisuuden tunteen muutosten kanssa. Oletettavaa oli, että hyppytestien tulokset paranisivat, jos aamun palautuneisuuden tunne olisi korkeampi ja edellisen päivän kuormittuneisuuden tunne olisi matalampi. Tuloksista ilmenee tapahtuneen päinvastoin. On mahdollista, että kun urheilijan vireystila on lievästi alentunut,

lisääntyä yrityksen määrä ja siten myös tuotetun voiman määrä. Jos urheilijat olisivat olleet erittäin kuormittuneessa tilassa, olisi tulos todennäköisesti päinvastainen. Urheilijoiden hyvä väsymyksenkestävyys todennäköisesti auttaa suoriutumaan paremmin myös väsyneessä tilassa.

Kestävyys suorituskykyä arvioitiin analysoimalla submaksimaalisen juoksumattotestin aikaisten laktaattipitoisuuksien, sykkeitä ja RPE-arvoita. Näistä vain RPE:ssä havaittiin tilastollisesti merkitseviä muutoksia eri testikertojen välillä tutkittaessa samaa kuormitustasoa. RPE:ssä havaittiin suurin muutos testikertojen 1 ja 4 välillä ensimmäisissä ja kolmansissa kuormitustasoissa. Myös testikertojen 2 ja 4 välillä havaittiin merkitsevä kasvu toisen kuorman osalta. Huomioitavaa on, että neljännen eli kuormitukseltaan raskaimman kuorman osalta ei havaittu muutosta RPE:ssä. Osasyynä tähän voi olla testin submaksimaalinen luonne. Maksimaalisessa testissä olisi mahdollisesti voitu havaita suurempia muutoksia sekä rasitustuntemuksissa että sykkeissä ja laktaattipitoisuuksissa. Maksimaalista testausta ei ollut tässä tutkimuksessa järkevää käyttää viikoittain tapahtuvaan testaukseen sen suuren kuormittavuuden vuoksi, sillä se olisi häirinnyt urheilijoiden normaalia harjoittelua (Lamberts ym., 2004).

Alkumittauksien ja neljännen hypoksiaviikon välillä suoritettujen submaksimaalisten juoksumattotestien aikaisten laktaattipitoisuuksien ja RPE-lukemien muutosten välillä huomattiin positiiviset korrelaatiot kuormien 1, 2 ja 3 osalta. RPE:n ja sykkeen muutosten välillä ei havaittu korrelaatiota. Nummelan & Peltosen (2018) mukaan RPE:n ja testin aikana kerättyjen muiden muuttujien välille ei aina saada hyvää korrelaatiota. Korrelaatiotestien perusteella mattotestin viimeisen kuorman laktaattikonsentraatio on kasvanut, kun aamun palautuneisuuden tunne on kasvanut ja edellisen päivän kuormittuneisuus laskenut. Tämä vaikuttaa ristiriitaiselta, koska palautuneemmassa tilassa saman kuormituksen tulisi olla kevyempää kuin kuormittuneemmassa tilassa. Tällöin myös laktaattitasot olisivat palautuneemmassa tilassa matalammat, koska submaksimaalisen testin aikaisten sykkeiden ja laktaattipitoisuuksien laskun tiedetään indikoivan aerobisen kestävyuden kehittymisen lisäksi urheilijan harjoitustilasta (Uusitalo & Nummela, 2016).

Submaksimaalisen juoksumattotestin aikaisen RPE:n ja harjoituspäiväkirjoista kerättyjen subjektiivisten tuntemusten muutosten välillä ei havaittu yhteyttä, vaikka aamun palautuneisuuden tunteen ja päivien kuormittavuuden oletettiin näkyvän RPE-arvoissa. Palautuneisuuden tunteen muutokset eivät siis vaikuta olevan suoraan yhteydessä submaksimaalisen kestävyysuoritusuuden aikaisen kuormituksen tunteen muutosten kanssa. Tämä voi johtua esimerkiksi siitä, että palautuneisuuden tunteeseen vaikuttavat muutkin kuin lihaksistolliset tuntemukset, kuten yönunen määrä ja laatu sekä psyykinen vireystila. Suorituskyky todennäköisesti määräytyy enemmän fyysisten kuin psyykkisten tekijöiden perusteella. Juoksumattotestin aikaiset RPE:n muutokset kuitenkin korreloivat positiivisesti laktaattikonsentraation muutosten kanssa kolmen ensimmäisen mattotestin kuorman osalta. Submaksimaalisen mattotestin aikana kerättyjen tietojen ja autonomisen hermoston tilaa arvioivien mittausten välillä ei havaittu korrelaatioita. Havaitun ortostaattisen sykkeen kasvun ei siis havaittu vaikuttavan submaksimaaliseen kestävyysuorituskykyyn tutkittaessa näissä tapahtuneita muutoksia. Autonomisen hermoston kuormittuneisuus voi näkyä sekä levossa että kuormituksessa sykkeiden nousuna, joten on yllättävää, että kuormituksen aikana mitattujen muuttujien muutokset eivät korreloineet lepotilan mittausten kanssa.

Hypoksiajakson aikana suoritetuista mittauksista analysoitiin suorituskykyyn vaikuttavina taustatietoina tutkittavien painon, hemoglobiinimassan ja maksimaalisen hapenottokyvyn muutokset alkua- ja loppumittausten välillä. Näiden tietojen avulla varmistettiin hypoksiajakson onnistuminen ja urheilijoiden terveydentilan seuranta. Tutkimuksen aikana havaittiin tilastollisesti merkitsevä keskimäärin noin $1,8 \pm 1,7$ %:n lasku tutkittavien painossa ($p < 0,001$). Tämä vastaa myös Dünwaldin ym. (2019) kirjallisuuskatsauksen tulosta, jossa useissa eri tutkimuksissa tutkittavien painojen muutokset vaihtelivat 1500-3500 metrin korkeudessa toteutetun hypoksiajakson seurauksena $-4,3$ kg:sta $+0,1$ kg:aan. Painon lasku voi selittyä hypoksisissa olosuhteissa kasvaneella perusaineenvaihdunnan tasolla, liian vähäisellä energiansaannilla kulutukseen nähden ja/tai riittämättömällä nesteytyksen määrällä (Dünwald ym., 2019).

Hemoglobiinimassa kasvoi tutkittavilla keskimäärin noin $5,0 \pm 3,0$ % ($p < 0,001$) alkumittausten ja hypoksiajakson päättymistä seuraavan viikon mittausten välillä. Muutoksen suuruus vastaa aiempien tutkimusten esittämiä tuloksia (esim. Garvican ym., 2012; Garvican-Lewis ym., 2015;

Wehrlin ym., 2006). Vaikka hemoglobiinimassa kasvoi, ei tutkimuksessa samalla aikavälillä kuitenkaan havaittu merkitsevää muutosta suhteellisessa VO_{2max} :ssä. Peltosen & Nummelan (2016) mukaan onnistuneen hypoksiajakson seurauksena VO_{2max} kasvaa. Useissa tutkimuksissa (mm. Robertson ym., 2010; Schmidt & Prommer, 2010) hemoglobiinimassan ja VO_{2max} :n välillä on havaittu yhteys. Täten olisi ollut odotettavaa, että VO_{2max} :ssä olisi havaittu tutkimuksen aikana kasvua. Suhteellisen VO_{2max} :n olisi voitu olettaa kasvavan myös tutkittavien keskimääräisen painon laskun vuoksi tutkimuksen aikana. Syy VO_{2max} :n muuttumattomuuteen on epäselvä. Riittämätön hypoksinen annos on epätodennäköinen syy tälle ilmiölle, koska urheilijat viettivät alppimajassa jopa aiemmissa tutkimuksissa esitettyä vähimmäisaikaa enemmän aikaa, ja alppimajojen happipitoisuus oli aiempien tutkimusten perusteella säädetty sopivalle tasolle. Myös hyvä hemoglobiinimassavaste viittaa riittävään hypoksiseen annokseen.

Tutkimuksen rajoitukset ja vahvuudet. Tähän tutkimukseen osallistuneiden urheilijoiden tiedot analysoitiin yhtenä ryhmänä, koska molempien ryhmien tutkimusprotokollat olivat samanlaiset. Sukupuolten välisiä eroavaisuuksia hypoksiavasteissa ei tutkittu tarkemmin pääasiassa suhteellisen pienen otannan ($n=16$) ja epätasaisen sukupuolijakauman vuoksi ($n=11$ vs. $n=5$). Sukupuolella voi aiempien tutkimusten perusteella olla vaikutusta esimerkiksi hypoksian aiheuttaman hemoglobiinimassavasteen suuruuteen, mutta tästä on olemassa ristiriitaista tietoa (Heikura ym., 2018; Nummela ym., 2021), joten se vaatii lisätutkimuksia. Sukupuolten välisten hypoksiavasteiden tarkemman käsittelyn lisäksi kontrolliryhmän tulokset jätettiin pois tästä tutkielmasta aiheen rajauksen vuoksi.

Tutkimuksen yhtenä rajoitteena olivat puutteet taustatiedoissa. Osalla tutkittavista ilmeni tutkimuksen aikana allergiaoireita, mutta tästä tarkempia tietoja ei voitu kerätä kesken tutkimuksen. Erityisesti keskusteluissa tutkittavien kanssa esiin nousivat siitepölyallergioiden oireet, koska tutkimus suoritettiin alkukesästä, jolloin siitepölyaika oli pahimmillaan. Lisäksi ainakin osa tutkittavista sai tutkimuksen aikana korona- ja mahdollisesti myös muita rokotteita, mutta näitä tietoja ei tilastoitu. Myöskään tutkittavien muista mahdollisista tutkimustuloksiin vaikuttavista lääkityksistä ei ole tietoa. Täten esimerkiksi allergioiden ja mahdollisten lääkeaineiden vaikutusta tuloksiin ei voida arvioida. Esimerkiksi tiedetään, että jotkin sairaudet ja lääkeaineet voivat vaikuttaa HRV:uun alentavasti (Task Force, 1996).

Tutkittavat harjoittelivat tutkimuksen ajan noudattaen omaa henkilökohtaista kevään ja alkukesän harjoitusohjelmaansa. Täten harjoittelun painotuksissa (esim. voimaominaisuuksien harjoittaminen) saattoi olla huomattavia yksilöllisiä vaihteluja, jotka saattoivat vaikuttaa tämän tutkimuksen voimantuoton mittaustuloksiin. Harjoituspäiväkirjoista kerätyt harjoitustiedot jätettiin tämän tutkielman ulkopuolelle aiheen rajauksen vuoksi, joten tarkempaan tietoon harjoittelun sisällöstä ei tässä tutkielmassa perehdytty. Harjoituspäiväkirjoista kerätyissä subjektiivisissa tuntemuksissa ja autonomisen hermoston tilaa arvioivissa sykemuuttujissa havaittiin puutteita harjoituspäiväkirjan täytön suhteen. Joissakin tapauksissa tutkittavat kertoivat, että sykemittareissa oli esiintynyt häiriöitä, joiden vuoksi sykedataa ei saatu kaikilta päiviltä. Tämä näkyi myös sykemuuttujien analysoinnissa entisestään pienentyneenä otantana. On mahdollista, että myös muissa mittauksissa tapahtui mittausrvirheitä laitteiden tai käyttäjän virheiden vuoksi, jotka voivat vaikuttaa tutkimuksen tuloksiin. Käyttäjälähtöisiä mittausrvirheitä pyrittiin minimoimaan tutkimushenkilöstön suorittamissa mittauksissa pitämällä testajat mahdollisuuksien mukaan samoina läpi tutkimuksen.

Tulosten perusteella yhdeksi ongelmaksi tutkimuksessa muodostui submaksimaalisen juoksumattotestin ja hyppytestien suorittaminen samalla testauskerralla niin, että näiden testien välistä palautumisaikaa ei kontrolloitu. Jokainen urheilija sai itsenäisesti päättää, milloin tunti olonsa riittävän palautuneeksi mattotestistä suorittaakseen hyppytestit. Mattotesti saattoi siis vaikuttaa hyppytestien tuloksiin negatiivisesti, joskin tässä voi esiintyä yksilöllistä vaihtelua. Mattotestin ja hyppytestien läheisyyden negatiivisesta vaikutuksesta huomattiin viitteitä mattotestin viimeisen kuorman laktaattikonsentraation muutoksen negatiivisessa korrelaatiossa staattisen hyppytestin nousukorkeuden ja reaktiivisen pohjehyppelyn tehon muutosten kanssa. Mattotestin ja hyppytestien välistä palautumisaikaa olisi voitu kontrolloida paremmin asettamalla kaikille sama ja riittävän pitkä palautumisaika. Täten olisi voitu minimoida submaksimaalisen mattotestin vaikutus hyppytestien tuloksiin.

Kaikkien post-mittausten tuloksiin saattoi vaikuttaa varsinaisen hypoksiajakson jälkeinen seurantajakso, jonka aikana osa tutkittavista toteutti kolme kertaa viikossa lyhytaikaisen 90 minuutin mittaisen hypoksia-altistuksen sekä puolen tunnin mittaisen hypoksiaharjoituksen hypoksiageneraattorin avulla juoksumatolla juosten. Loput tutkittavat harjoittelivat normaalisti merenpinnan tasolla. Tästä syystä post-mittaukset analysoitiin vain niiden muuttujien osalta,

joista ei ollut käytettävissä muita kuin tutkimuksen alussa ja lopussa mitatut arvot (hemoglobiinimassa ja VO_{2max}). Seurantajakson ei haluttu vaikuttavan sykemuuttujien, submaksimaalisen mattotestin ja hyppytestien tuloksiin, joten niiden osalta analysoitiin vain alkumittauksista ja hypoksiajakson aikana toteutettujen testien tulokset. Toisaalta tässä tutkielmassa haluttiin selvittää erityisesti hypoksian aikaisia vaikutuksia autonomisen hermoston palautuneisuuteen ja suorituskykyyn, joten vertailuarvoksi riittävät ennen hypoksiajaksoa suoritettut alkumittaukset.

Yleisesti alppimajassa toteutetun simuloidun hypoksiajakson etuina perinteiseen vuoristossa toteutettavaan korkeanpaikan harjoitusjaksoon verrattuna ovat huomattavasti lyhyempi matkustus aika ja pienemmät matkustuskustannukset, koska suomalaisille urheilijoille vuoristoharjoittelu tarkoittaa poikkeuksetta ulkomaille matkustamista. Matkustaessa sairastumisherkkyys erilaisista taudinaiheuttajista on suurempaa kuin kotimaassa esimerkiksi aikaerorasituksen vuoksi (*Terve urheilija*, 2022). Hypoksiajakson aikaisella sairastumisella on todettu olevan negatiivinen vaikutus saatuihin fysiologisiin vasteisiin (Heikura ym., 2018). Toisaalta matkustamisen ja siten ympäristön vaihtelun voidaan kokea lisäävän mielen vireystilaa harjoituskaudella.

Johtopäätökset. Tutkimuksessa havaittiin hypoteesin mukainen happisaturaation lasku sekä räjähtävän voimantuotto kyvyn kasvu hypoksian seurauksena. Voidaan todeta, että autonomisen hermoston palautumisen osalta tutkimustulokset jäivät selkeästi odotettua vajavaisemmiksi. Mitatuista sykemuuttujista ainoastaan ortostaattisen sykkeen havaittiin nousevan vasteena hypoksiaan, vaikka yhtenä tutkimuksen hypoteesina oli, että kokonaiskuormituksen kasvu vaikuttaisi myös muihin sykemuuttujiin. Hypoksian on todettu aiheuttavan yksilöllisiä adaptaatioita elimistöön (mm. Nummela ym., 2021; Stray-Gundersen ym., 2001; Wilber, 2007), joten odotettavasti osassa mittausten tuloksista hajonta oli suurta. Lisäksi tutkimuksen pieni otanta todennäköisesti vaikutti siihen, että tuloksissa esiintyi suurta hajontaa. Suuri hajonta aiheutti myös sen, että huomattavakaan muutokset mitatuissa muuttujissa eivät aina olleet tilastollisesti merkitseviä. Näin voidaan olettaa tapahtuneen esimerkiksi leposykkeen ja RMSSD:n kohdalla. Myös sykemuuttujien lyhyt mittausaika vaikutti todennäköisesti tulosten luotettavuuteen.

Tutkimuksessa ei havaittu korrelaatioita hypoksiajakson aikaisten autonomisen hermoston palautuneisuuden tilaa kuvaavien sykemuuttujien ja suorituskykytestien tulosten tai subjektiivisten tuntemusten muutosten välillä. Sykemuuttujien muutokset hypoksiajakson aikana eivät korreloineet myöskään keskenään. Muuttujien keskinäisten korrelaatioiden osalta tutkimuksen hypoteesi ei siis toteutunut. Urheilijat harjoittelivat tutkimuksen aikana jopa useita kertoja päivässä, joten palautuminen ei välttämättä olisi ollut täydellistä edes merenpinnan tasolla, koska autonomisen hermoston tilan on todettu palautuvan harjoitusta edeltävälle tasolle 24 tunnin kuluessa harjoittelusta mitattaessa sitä HRV:n avulla normoksisissa olosuhteissa (Furlan ym., 1993). Tämän tutkimuksen aikana harjoittelun lisäksi kuormitusta aiheuttivat hypoksiset olosuhteet, joten on ymmärrettävää, että elimistön palautuminen tapahtui hitaasti tai sitä ei ehtinyt tapahtua lainkaan. Onkin syytä pohtia, oliko tutkittavien mahdollista missään vaiheessa hypoksiajaksoa palautua kuormituksesta siten, että merkitseviä muutoksia olisi voitu havaita. Ylikuormitusperiaatteeseen perustuen harjoitusvaikutusten aikaansaamiseksi tarvitaan elimistön tasapainotilan ajoittaista häiritsemistä, eli kuormittuneisuus on välttämätöntä kehittymisen kannalta. On siis mahdollista, että urheilijat saivat mahdollisuuden palautua täydellisesti vasta harjoitusleirin päätyttyä. Tämän seurauksena hypoksian aikana autonomisen hermoston palautumista kuvaavissa sykemuuttujissa ei ehkä olisikaan pitänyt havaita huomattavia tehostuneen palautumisen merkkejä.

Tutkimuksessa kuitenkin vahvistettiin jo olemassa olevaa tietoa hypoksian aiheuttaman hemoglobiinimassan ja happisaturaation kasvun sekä painon laskun suuruusluokasta. Myös räjähtävässä voimantuottokyvyssä huomattiin kasvua hypoksian aikana staattisen hypyn hyppykorkeuden ja reaktiivisen pohjehyppelyn tehon kasvamisen perusteella, kuten Ruggieron ym. (2020) tutkimuksen mukaan tutkimuksen hypoteesissa voitiin olettaa. Voimantuottokyvyn muutokset voivat perustua hypoksian lisäksi urheilijoiden mahdolliseen harjoittelun voimapainotukseen, oppimisvaikutukseen tai havaittuun painon laskuun. Suurimmat tilastollisesti merkitsevät muutokset mitatuissa muuttujissa havaittiin tapahtuvan alkumittausten ja kolmannen tai neljännen hypoksiaviikon välillä. Koska mittaukset suoritettiin kyseisten hypoksiaviikkojen alussa, voidaan sanoa, että hypoksian vaikutukset ilmenivät voimakkaimmin noin 2–3 viikon kuluttua hypoksian alkamisesta. Niin moni asia vaikuttaa sekä autonomisen hermoston toimintaan että suorituskykyyn, että on mahdotonta sanoa, aiheuttiko pelkästään hypoksia havaitut muutokset.

Jatkotutkimusmahdollisuudet. Hypoksian aiheuttama hemoglobiinimassavaste on tähän mennessä jo kohtuullisen runsaslukuisesti tutkittu muuttuja, ja sen suuruuden suhteen on paljon samankaltaisia tuloksia, joita tämänkin tutkimuksen tulos vahvisti. Tämä tutkimus jätti kuitenkin paljon mahdollisuuksia jatkotutkimuksille. Autonominen hermoston tilan arvioinnissa käytettyjen mittauksien tarkkuutta olisi hyvä kasvattaa. Esimerkiksi HRV:n mittaamiseen yösykeanalyysin käyttäminen parantaisi mittausten luotettavuutta (Nummela ym., 2010). Myös post-mittausten sisällytys tutkimuksiin antaisi arvokasta lisätietoa hypoksiajakson jälkeen tapahtuvista muutoksista.

Yleisesti yhtenä suurena ongelmana etenkin autonominen hermoston tilan mittaamisessa on siihen vaikuttavien muuttujien moninaisuus. Mahdollisesti voimaharjoittelun vakioiminen tai pelkästään sen tarkempi seuraaminen simuloitun hypoksiajakson aikana helpottaisi tulosten tulkitsemista. Harjoitteluintervention luominen voisi olla vaihtoehto, mutta urheilijoiden yksilölliset vasteet harjoitteluun eivät puolla sen käyttämistä tämän tyyppisissä tutkimuksissa. Todennäköisesti olisi myös hankalaa rekrytoida urheilijoita tutkimukseen, jossa yksilöllisesti suunniteltua harjoittelua ei olisi mahdollista suorittaa. Mahdollisissa tulevaisuuden tämän aiheen tutkimuksissa otantaa kannattaa kasvattaa tähän tutkimukseen verrattuna, jotta hajontaa saadaan pienennettyä, ja siten saataisiin mahdollisesti myös enemmän tilastollisesti merkitseviä tuloksia.

Sukupuolten välisistä eroista hypoksiavasteissa on ristiriitaisia tutkimustuloksia (Heikura ym., 2018; Nummela ym., 2021), joita voitaisiin tutkia lisää enemmän kohdennetusti. Myös alkutilanteen hemoglobiinimassan ja ferritiinipitoisuuden vaikutusta hypoksiavasteiden suuruuteen voitaisiin tutkia tarkemmin. Myöskään simuloitua alppimajaharjoittelua erilaisia hypoksiamalleja noudattaen ei ole tutkittu tarpeeksi. Mikä on lopulta optimaalisin tapa hyödyntää simuloitua hypoksiaa huippu-urheilussa? Tulevaisuuden tutkimuksissa voitaisiin keskittyä kestävyysurheilijoiden lisäksi teholajien urheilijoiden hypoksiavasteisiin, joita on tutkittu vähemmän kuin kestävyysurheilijoita. Teholajien urheilijoiden tutkimisen mielekkyyttä lisää tämänkin tutkimuksen tuloksena saatu räjähtävän voimantuottokyvyn kasvu. Hypoksian aikaisiin räjähtävän voimantuottokyvyn testeihin voisi lisätä myös muita hermo- ja lihaskudosten toimintaa koskevia mittauksia, joiden avulla saataisiin lisätietoa voimantuotosta.

LÄHTEET

- Ahtiainen, J., & Häkkinen, K. (2018). Hermolihasjärjestelmä - johdanto. Teoksessa K. Keskinen, K. Häkkinen, & M. Kallinen (Toim.), *Fyysisen kunnon mittaaminen - käsi- ja oppikirja kuntotestaaajille* (s. 168). Liikuntatieteellinen Seura ry.
- Álvarez-Herms, J., Julià-Sánchez, S., Corbi, F., Pagès, T., & Viscor, G. (2014). Anaerobic performance after endurance strength training in hypobaric environment. *Science & Sports, 29*, 311–318.
- Bernardi, L., Passino, C., Serebrovskaya, Z., Serebrovskaya, T., & Appenzeller, O. (2001). Respiratory and cardiovascular adaptations to progressive hypoxia: Effect of interval hypoxic training. *European Heart Journal, 22*(10), 879–886. <https://doi.org/10.1053/euhj.2000.2466>
- Bobbert, M., Gerritsen, K., Litjens, M., & van Soest, A. (1996). Why is countermovement jump height higher than squat jump height? *Medicine and Science in Sports and Exercise, 28*(11), 1402–1412.
- Borg, G. (1970). Perceived exertion as an indicator of somatic stress. *Scandinavian Journal of Rehabilitation Medicine, 2*(2), 92–98.
- Borg, G. (1982). Psychophysical bases of perceived exertion. *Medicine and Science in Sports and Exercise, 14*(5), 377–381.
- Bosco, C., Luhtanen, P., & Komi, P. (1983). A Simple Method for Measurement of Mechanical Power in Jumping. *European Journal of Applied Physiology, 50*, 273–282.
- Burge, C. M., & Skinner, S. L. (1995). Determination of hemoglobin mass and blood volume with CO: evaluation and application of a method. *Journal of Applied Physiology, 79*(2), 623–631.
- Chapman, R. F., Karlsen, T., Resaland, G. K., Ge, R., Harber, M. P., Witkowski, S., Stray-Gundersen, J., & Levine, B. D. (2014). Defining the "dose" of altitude training: how high to live for optimal sea level performance enhancement. *Journal of Applied Physiology, 116*, 595–603. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00634.2013>.-Chronic
- Chapman, R. F., Stray-Gundersen, J., & Levine, B. D. (1998). Individual variation in response to altitude training. *Journal of Applied Physiology, 85*(4), 1448–1456. <http://www.jap.org>

- Clark, S. A., Quod, M. J., Clark, M. A., Martin, D. T., Saunders, P. U., & Gore, C. J. (2009). Time course of haemoglobin mass during 21 days live high:train low simulated altitude. *European Journal of Applied Physiology*, *106*(3), 399–406. <https://doi.org/10.1007/s00421-009-1027-4>
- Collins, J. A., Rudenski, A., Gibson, J., Howard, L., & O’Driscoll, R. (2015). Relating oxygen partial pressure, saturation and content: The haemoglobin–oxygen dissociation curve. *Teoksessa Breathe* (Vsk. 11, Numero 3, ss. 194–201). European Respiratory Society. <https://doi.org/10.1183/20734735.001415>
- Coškun, B., Aras, D., Akalan, C., Kocak, S., & Hamlin, M. J. (2022). Plyometric Training in Normobaric Hypoxia improves Jump Performance. *International Journal of Sports Medicine*, *43*(6), 519–525. <https://doi.org/10.1055/a-1656-9677>
- Costill, D., Thomason, H., & Roberts, E. (1973). Fractional utilization of the aerobic capacity during distance running. *Medicine and Science in Sports*, *5*(4), 248–252.
- Denis, C., Chatard, J. C., Dormois, D., Linossier, M. T., Geysant, A., & Lacour, J. R. (1986). Effects of endurance training on capillary supply of human skeletal muscle on two age groups (20 and 60 years). *Journal of Physiology-Paris*, *81*(5), 379–383.
- Dünnwald, T., Gatterer, H., Faulhaber, M., Arvandi, M., & Schobersberger, W. (2019). Body composition and body weight changes at different altitude levels: A systematic review and meta-analysis. *Frontiers in Physiology*, *10*(MAR). <https://doi.org/10.3389/fphys.2019.00430>
- Enoka, R. M., & Stuart, D. G. (1992). Neurobiology of muscle fatigue. *Journal of Applied Physiology*, *72*(5), 1631–1648. <https://doi.org/10.1152/jappl.1992.72.5.1631>
- Foster, C. (1983). Vo₂max and training indices as determinants of competitive running performance. *Journal of Sports Sciences*, *1*(1), 13–22. <https://doi.org/10.1080/02640418308729657>
- Furlan, R., Piazza, S., Dell’Orto, S., Gentile, E., Cerutti, S., Pagani, M., & Malliani, A. (1993). Early and late effects of exercise and athletic training on neural mechanisms controlling heart rate. *Cardiovascular Research*, *27*(3), 482–488.
- Garvican, L., Martin, D., Quod, M., Stephens, B., Sassi, A., & Gore, C. (2012). Time course of the hemoglobin mass response to natural altitude training in elite endurance cyclists. *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports*, *22*(1), 95–103. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0838.2010.01145.x>

- Garvican-Lewis, L., & Govus, A. (2016). Iron Supplementation and Altitude: Decision Making Using a Regression Tree. *Journal of Sports Science and Medicine*, 15(1), 204–205. <http://www.jssm.org>
- Garvican-Lewis, L., Halliday, I., Abbiss, C., Saunders, P., & Gore, C.-P. (2015). Altitude Exposure at 1800 m Increases Haemoglobin Mass in Distance Runners. Teoksessa ©*Journal of Sports Science and Medicine* (Vsk. 14). <http://www.jssm.org>
- Garvican-Lewis, L., Sharpe, K., & Gore, C. (2016). Time for a new metric for hypoxic dose? *Journal of Applied Physiology*, 121(1), 352–355. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00579.2015>
- Gastin, P. B. (2001). Energy system interaction and relative contribution during maximal exercise. Teoksessa *Sports Medicine* (Vsk. 31, Numero 10, ss. 725–741). <https://doi.org/10.2165/00007256-200131100-00003>
- Giles, D., Kelly, J., & Draper, N. (2016). Alterations in autonomic cardiac modulation in response to normobaric hypoxia. *European Journal of Sport Science*, 16(8), 1023–1031. <https://doi.org/10.1080/17461391.2016.1207708>
- Gore, C., Craig, N., Rice, A., Bourdon, P., Lawrence, S., Walsh, C., Stanef, T., Barnes, P., Parisotto, R., Martin, D., & Pyne, D. (1998). Altitude training at 2690m does not increase total Haemoglobin mass or sea level VO₂max in world champion track cyclists. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 1(3), 156–170.
- Hainsworth, R., Drinkhill, M. J., & Rivera-Chira, M. (2007). The autonomic nervous system at high altitude. Teoksessa *Clinical Autonomic Research* (Vsk. 17, Numero 1, ss. 13–19). <https://doi.org/10.1007/s10286-006-0395-7>
- Heikura, I. A., Burke, L. M., Bergland, D., Uusitalo, A. L. T., Mero, A. A., & Stellingwerff, T. (2018). Impact of energy availability, health, and sex on hemoglobin-mass responses following live-high-train-high altitude training in elite female and male distance athletes. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 13(8), 1090–1096. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2017-0547>
- Heinicke, K., Prommer, N., Cajigal, J., Viola, T., Behn, C., & Schmidt, W. (2003). Long-term exposure to intermittent hypoxia results in increased hemoglobin mass, reduced plasma volume, and elevated erythropoietin plasma levels in man. *European Journal of Applied Physiology*, 88(6), 535–543. <https://doi.org/10.1007/s00421-002-0732-z>

- Heinicke, K., Wolfarth, B., Winchenbach, P., Biermann, B., Schmid, A., Huber, G., Friedmann, B., & Schmidt, W. (2001). Blood Volume and Hemoglobin Mass in Elite Athletes of Different Disciplines. *International Journal of Sports Medicine*, 22(7), 504–512.
- Hynynen, E., Nummela, A., Rusko, H., Hämäläinen, I., & Jylhä, R. (2007). Effects of training on cardiac autonomic modulation during night sleep in cross-country skiers. Teoksessa V. Linnamo, P. Komi, & E. Müller (Toim.), *Science and Nordic Skiing* (ss. 90–98). Meyer & Meyer Sport (UK) Ltd.
- Hynynen, E., Vesterinen, V., Rusko, H., & Nummela, A. (2010). Effects of moderate and heavy endurance exercise on nocturnal HRV. *International Journal of Sports Medicine*, 31(6), 428–432. <https://doi.org/10.1055/s-0030-1249625>
- Häkkinen, K. (2018). Hermo-lihasjärjestelmän voimantuoton biomekaaniset tekijät. Teoksessa K. Keskinen, K. Häkkinen, & M. Kallinen (Toim.), *Fyysisen kunnon mittaaminen - käsi- ja oppikirja kuntotestaajille* (ss. 169–175). Liikuntatieteellinen Seura ry.
- Ilander, O., & Heikura, I. (2021). Hiilihydraatit ja rasva urheilussa. Teoksessa O. Ilander (Toim.), *Liikuntaravitsemus 3.0* (1. p., ss. 387–395). VK-Kustannus Oy.
- International Ski Federation. (2018). *The international ski competition rules (ICR), Book II Cross-country*. www.fis-ski.com
- Kaikkonen, P., Rusko, H., & Martinmäki, K. (2008). Post-exercise heart rate variability of endurance athletes after different high-intensity exercise interventions. *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports*, 18(4), 511–519. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0838.2007.00728.x>
- Kayser, B. (1996). Lactate during exercise at high altitude. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 74(3), 195–205.
- Kayser, B., & Verges, S. (2013). Hypoxia, energy balance and obesity: from pathophysiological mechanisms to new treatment strategies. *Obesity Reviews*, 14(7), 579–592.
- Koivisto-Mørk, A. E., Svendsen, I. S., Skattebo, Ø., Hallén, J., & Paulsen, G. (2021). Impact of baseline serum ferritin and supplemental iron on altitude-induced hemoglobin mass response in elite athletes. *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports*, 31(9), 1764–1773. <https://doi.org/10.1111/sms.13982>
- Komi, P. v, & Bosco C. (1978). Utilization of stored elastic energy in leg extensor muscles by men and women. *Medicine and Science in Sports*, 10(4), 261–265.

- Lamberts, R. P., Lemmink, K. A., Durandt, J. J., & Lambert, M. I. (2004). Variation in heart rate during submaximal exercise: implications for monitoring training. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 18, 641–645.
<https://www.researchgate.net/publication/281812219>
- Levine, B. D., & Stray-Gundersen, J. (1992). A practical approach to altitude training: where to live and train for optimal performance enhancement. *International Journal of Sports Medicine*, 13(1), 209–212.
- Levine, B. D., Stray-Gundersen, J., Wehrlin, J. P., Zuest, P., Hallen, J., Marti, B., Gore, C. J., Rodriguez, F. A., Truijens, M. J., Townsend, N. E., Stray-Gundersen, J., Levine, B. D., Physiol Rodriguez, C., Levine Q Fu, B. D., Shiller, S. M., Martini, E. R., Okazaki, K., Shibata, S., Comp Biol, I. O., ... Zeis, B. (1997). “Living high-training low”: effect of moderate-altitude acclimatization with low-altitude training on performance. *Journal of Applied Physiology*, 83(6), 1938–1945.
<http://jap.physiology.org/cgi/content/full/83/1/102#BIBL><http://highwire.stanford.edu/lists/artbytopic.dtlcanbe><http://jap.physiology.org/cgi/content/full/83/1/102>
- Losnegard, T. (2019). Energy system contribution during competitive cross-country skiing. Teoksessa *European Journal of Applied Physiology* (Vsk. 119, Numero 8, ss. 1675–1690). Springer Verlag. <https://doi.org/10.1007/s00421-019-04158-x>
- Lundby, C., & Robach, P. (2016). Does ‘altitude training’ increase exercise performance in elite athletes? Teoksessa *Experimental Physiology* (Vsk. 101, Numero 7, ss. 783–788). Blackwell Publishing Ltd. <https://doi.org/10.1113/EP085579>
- Maastohiihto - Suomen Olympiakomitea*. (2022). Suomen Olympiakomitea. <https://www.olympiakomitea.fi/huippu-urheilu/huippu-urheilutietoa/olympialajit/talvilajit/maastohiihto/>
- Markus, I., Constantini, K., Hoffman, J. R., Bartolomei, S., & Gepner, Y. (2021). Exercise-induced muscle damage: mechanism, assessment and nutritional factors to accelerate recovery. Teoksessa *European Journal of Applied Physiology* (Vsk. 121, Numero 4, ss. 969–992). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. <https://doi.org/10.1007/s00421-020-04566-4>
- Mazzeo, R. S. (2008). Physiological responses to exercise at altitude - An Update. *Sports Medicine*, 38(1), 1–8.

- McArdle, W. D., Katch, F. I., & Katch, V. L. (2010). *Exercise Physiology: Nutrition, energy, and human performance* (7. p.). Lippincott Williams & Wilkins.
- McKay, A. K. A., Stellingwerff, T., Smith, E. S., Martin, D. T., Mujika, I., Goosey-Tolfrey, V. L., Sheppard, J., & Burke, L. M. (2022). Defining Training and Performance Caliber: A Participant Classification Framework. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, *17*(2), 317–331. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2021-0451>
- Mikkola, J., Hynynen, E., Linnamo, V., Nummela, A., Talkkari, J., & Vesterinen, V. (2012). *Suorituskykyyn vaikuttavat tekijät ja väsyminen sprinttihilhdossa*.
- Millet, G. P., Faiss, R., & Pialoux, V. (2012). Point: Hypobaric hypoxia induces different responses than normobaric hypoxia. *Journal of Applied Physiology*, *112*(10), 1783–1787.
- Millet, G. P., Roels, B., Schmitt, L., Woorons, X., & Richalet, J. P. (2010). Combining hypoxic methods for peak performance. Teoksessa *Sports Medicine* (Vsk. 40, Numero 1, ss. 1–25). <https://doi.org/10.2165/11317920-000000000-00000>
- Moir, G. L. (2008). Three different methods of calculating vertical jump height from force platform data in men and women. *Measurement in Physical Education and Exercise Science*, *12*(4), 207–218. <https://doi.org/10.1080/10913670802349766>
- Mounier, R., & Brugniaux, J. (2012). Counterpoint: Hypobaric hypoxia does not induce different responses than normobaric hypoxia. *Journal of Applied Physiology*, *112*(10), 1784–1786.
- Nonin Medical Inc. (2022). What Is Your Normal Oxygen Level. <https://www.nonin.com/resource/what-is-your-normal-oxygen-level/>
- Nummela, A. (2016). Energia-aineenvaihdunta. Teoksessa A. Mero, A. Nummela, S. Kalaja, & K. Häkkinen (Toim.), *Huippu-urheiluvalmennus - Teoria ja käytäntö päivittäisvalmennuksessa* (1. p., ss. 128–139). VK-Kustannus Oy.
- Nummela, A., Eronen, T., Koponen, A., Tikkanen, H., & Peltonen, J. E. (2021). Variability in hemoglobin mass response to altitude training camps. *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports*, *31*(1), 44–51. <https://doi.org/10.1111/sms.13804>
- Nummela, A., Hynynen, E., Kaikkonen, P., & Rusko, H. (2010). Endurance performance and nocturnal HRV indices. *International Journal of Sports Medicine*, *31*(3), 154–159. <https://doi.org/10.1055/s-0029-1243221>
- Nummela, A., & Peltonen, J. (2018). Testien ja mittausten käyttö harjoittelun seurannassa. Teoksessa K. Keskinen, K. Häkkinen, & M. Kallinen (Toim.), *Fyysisen kunnan*

- mittaaminen - käsi- ja oppikirja kuntotestaaajille* (ss. 145–152). Liikuntatieteellinen Seura ry.
- Nummela, A., & Rusko, H. (2000). Acclimatization to altitude and normoxic training improve 400-m running performance at sea level. *Journal of Sports Sciences*, 18(6), 411–419. <https://doi.org/10.1080/02640410050074340>
- Ohtonen, O. (2019). *Biomechanics in Cross-country Skiing Skating Technique and Measurement Techniques of Force Production* [Jyväskylän yliopisto]. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-951-39-7797-9>
- Ohtonen, O., & Mikkola, J. (2016). Maastohiihdon lajiansalyysi ja valmennuksen ohjelmointi. Teoksessa A. Mero, A. Nummela, S. Kalaja, & K. Häkkinen (Toim.), *Huippu-urheiluvalmennus - Teoria ja käytäntö päivittäisvalmennuksessa* (ss. 491–519). VK-Kustannus Oy.
- Okazaki, K., Stray-Gundersen, J., Chapman, R. F., & Levine, B. D. (2019). Iron insufficiency diminishes the erythropoietic response to moderate altitude exposure. *Journal of Applied Physiology*, 127, 1569–1578. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00115.2018>
- Paavolainen, L., Häkkinen, K., Hämäläinen, I., Nummela, A., & Rusko, H. (1999). Explosive-strength training improves 5-km running time by improving running economy and muscle power. *Journal of Applied Physiology*, 86(4), 1527–1533. <https://doi.org/10.1034/j.1600-0838.2003.00340.x>
- Peltonen, J., & Nummela, A. (2016). Vuoristoharjoittelun ja hypoksia-altistuksen toteutus urheilussa. Teoksessa A. Mero (Toim.), *Huippu-urheiluvalmennus - Teoria ja käytäntö päivittäisvalmennuksessa* (1. p., ss. 595–600). VK-Kustannus Oy.
- Pichot, V., Roche, F., Gaspoz, J. M., Enjolras, F., Antoniadis, A., Minini, P., Costes, F., Busso, T., Lacour, J. R., & Barthelemy, J. C. (2000). Relation between heart rate variability and training load in middle-distance runners. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 32(10), 1729–1736. <https://doi.org/10.1097/00005768-200010000-00011>
- Pottgieser, T., Ahlgrim, C., Ruthardt, S., Dickhutt, H., & Schumacher, Y. (2008). Hemoglobin mass after 21 days of conventional altitude training at 1816 m. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 12(6), 673–675.
- Reynafabje, C., Lozano, R., & Valdivieso, J. (1959). The Polycythemia of High Altitudes: Iron Metabolism and Related Aspects. *Blood*, 14(4), 433–455.

- Robertson, E. Y., Saunders, P. U., Pyne, D. B., Aughey, R. J., Anson, J. M., & Gore, C. J. (2010). Reproducibility of performance changes to simulated live high/train low altitude. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 42(2), 394–401. <https://doi.org/10.1249/MSS.0b013e3181b34b57>
- Ruggiero, L., Hoiland, R. L., Hansen, A. B., Ainslie, P. N., & McNeil, C. J. (2020). High-altitude acclimatization improves recovery from muscle fatigue. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 52(1), 161–169. <https://doi.org/10.1249/MSS.00000000000002100>
- Rusko, H. (2003). Physiology of cross country skiing. Teoksessa H. Rusko (Toim.), *Handbook of Sports Medicine and Science: Cross Country Skiing* (ss. 1–30). Blackwell Science Ltd.
- Rusko, H., Tikkanen, H., & Peltonen, J. (2004). Altitude and endurance training. *Journal of Sports Sciences*, 22(10), 928–945. <https://doi.org/10.1080/02640410400005933>
- Sandbakk, Ø., & Holmberg, H. C. (2014). A reappraisal of success factors for olympic cross-country skiing. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 9(1), 117–121. <https://doi.org/10.1123/IJSPP.2013-0373>
- Sandbakk, Ø., Holmberg, H.-C., Leirdal, S., & Ettema, G. (2011). The physiology of world-class sprint skiers. *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports*, 21(6). <https://doi.org/10.1111/j.1600-0838.2010.01117.x>
- Saunders, P. U., Telford, R. D., Pyne, D. B., Cunningham, R. B., Gore, C. J., Hahn, A. G., & Hawley, J. A. (2004). Improved running economy in elite runners after 20 days of simulated moderate-altitude exposure. *Journal of Applied Physiology*, 96, 931–937. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00725.2003.-To>
- Saunders, P. U., Telford, R. D., Pyne, D. B., Gore, C. J., & Hahn, A. G. (2009). Improved race performance in elite middle-distance runners after cumulative altitude exposure. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 4(1), 134–138. <https://doi.org/10.1123/ijsp.4.1.134>
- Schmidt, W., & Prommer, N. (2005). The optimised CO-rebreathing method: A new tool to determine total haemoglobin mass routinely. *European Journal of Applied Physiology*, 95(5–6), 486–495. <https://doi.org/10.1007/s00421-005-0050-3>
- Schmidt, W., & Prommer, N. (2010). Impact of alterations in total hemoglobin mass on $\dot{V}O_{2max}$. *Exercise and Sport Sciences Reviews*, 38(2), 68–75. www.acsm-essr.org

- Seiler, S., Haugen, O., & Kuffel, E. (2007). Autonomic recovery after exercise in trained athletes: Intensity and duration effects. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 39(8), 1366–1373. <https://doi.org/10.1249/mss.0b013e318060f17d>
- Selye, H. (1936). A Syndrome produced by Diverse Nocuous Agents. *Nature*, 138(32).
- Sevre, K., Bendz, B., Hanké, E., Nakstad, A. R., Hauge, A., Kåsin, J. I., Lefrandt, J. D., Smit, A. J., Eide, I., & Rostrup, M. (2001). Reduced autonomic activity during stepwise exposure to high altitude. *Acta Physiologica Scandinavica*, 173(4), 409–417.
- Shaffer, F., & Ginsberg, J. P. (2017). An Overview of Heart Rate Variability Metrics and Norms. Teoksessa *Frontiers in Public Health* (Vsk. 5). Frontiers Media S.A. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2017.00258>
- Smith, G. A. (2003). Biomechanics of cross country skiing. Teoksessa H. Rusko (Toim.), *Handbook of Sports Medicine and Science: Cross Country Skiing* (ss. 38–52). Blackwell Science Ltd.
- Stellingwerff, T., Peeling, P., Garvican-Lewis, L. A., Hall, R., Koivisto, A. E., Heikura, I. A., & Burke, L. M. (2019). Nutrition and Altitude: Strategies to Enhance Adaptation, Improve Performance and Maintain Health: A Narrative Review. Teoksessa *Sports Medicine* (Vsk. 49, ss. 169–184). Springer. <https://doi.org/10.1007/s40279-019-01159-w>
- Stray-Gundersen, J., Chapman, R. F., & Levine, B. D. (2001). "Living high-training low" altitude training improves sea level performance in male and female elite runners. *Journal of Applied Physiology*, 91, 1113–1120. <http://www.jap.org>
- Stray-Gundersen, J., & Levine, B. D. (1999). "Living high and training low" can improve sea level performance in endurance athletes. *British Journal of Sports Medicine*, 33, 150–154.
- Sumi, D., Kojima, C., & Goto, K. (2018). Impact of Endurance Exercise in Hypoxia on Muscle Damage, Inflammatory and Performance Responses. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 32(4), 1053–1062. www.nscs.com
- Task Force. (1996). Guidelines: Heart rate variability: Standards of measurement, physiological interpretation, and clinical use. *European Heart Journal*, 17, 354–381.
- Terve urheilija*. (2022). Terve urheilija -ohjelma. <https://terveurheilija.fi/urheilijan-ravitsemus/ravitsemus-matkustaessa/#kohteessa>
- Thayer, J. F., Åhs, F., Fredrikson, M., Sollers, J. J., & Wager, T. D. (2012). A meta-analysis of heart rate variability and neuroimaging studies: Implications for heart rate variability as a

- marker of stress and health. Teoksessa *Neuroscience and Biobehavioral Reviews* (Vsk. 36, Numero 2, ss. 747–756). <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2011.11.009>
- Tulppo, M. P., Mäkikallio, T. H., Seppänen, T., Laukkanen, R. T., & Huikuri, H. v. (1998). Vagal modulation of heart rate during exercise: effects of age and physical fitness. *American Journal of Physiology*, 274(2), 424–429.
- Uusitalo, A. (2001). Overtraining - Making a Difficult Diagnosis and Implementing Targeted Treatment. *The Physician and Sportsmedicine*, 29(5), 35–50.
- Uusitalo, A., & Nummela, A. (2016). Urheilijan ylikuormitustila. Teoksessa A. Mero, A. Nummela, S. Kalaja, & K. Häkkinen (Toim.), *Huippu-urheiluvalmennus - Teoria ja käytäntö päivittäisvalmennuksessa* (1., ss. 625–639). VK-Kustannus Oy.
- Valleala, R., Nurkkala, V.-M., Kalermo-Poranan, J., Hakkarainen, A., & Linnamo, V. (2016). Teknologian hyödyntäminen urheiluvalmennuksessa. Teoksessa A. Mero, A. Nummela, S. Kalaja, & K. Häkkinen (Toim.), *Huippu-urheiluvalmennus - Teoria ja käytäntö päivittäisvalmennuksessa* (1., ss. 603–622). VK-Kustannus Oy.
- Vesterinen, V., Mikkola, J., Nummela, A., Hynynen, E., & Häkkinen, K. (2009). Fatigue in a simulated cross-country skiing sprint competition. *Journal of Sports Sciences*, 27(10), 1069–1077. <https://doi.org/10.1080/02640410903081860>
- Viru, A. (2002). Early contributions of Russian stress and exercise physiologists. *Journal of Applied Physiology*, 92(4), 1378–1382.
- Wagner, P. D. (2000). New ideas on limitations to VO₂max. *Exercise and Sport Sciences Reviews*, 28(1), 10–14.
- Wehrin, J. P., Zuest, P., Hallén, J., & Marti, B. (2006). Live high-train low for 24 days increases hemoglobin mass and red cell volume in elite endurance athletes. *Journal of Applied Physiology*, 100(6), 1938–1945. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.01284.2005>
- Wilber, R. L. (2007). Application of altitude/hypoxic training by elite athletes. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 39(9), 1610–1624. <https://doi.org/10.1249/mss.0b013e3180de49e6>
- Wilber, R. L., Stray-Gundersen, J., & Levine, B. D. (2007). Effect of hypoxic "dose" on physiological responses and sea-level performance. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 39(9), 1590–1599. <https://doi.org/10.1249/mss.0b013e3180de49bd>
- Witkowski, S., Zhang, Y., Alfrey, C., Sivieri, M., Karlsen, T., Resaland, G. K., Harber, M., Stray-gundersen, J., Levine, B. D., Si-vieri, M., & Stray-Gundersen, J. (2002).

Determinants of erythropoietin release in response to short-term hypobaric hypoxia.
Journal of Applied Physiology, 92, 2361–2367.
<https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00684.2001>.-We