

**TAPAUSTUTKIMUS: NELJÄN VIIKON ALPPIMAJAJAKSON FYSIOLOGISET
VASTEET NAISMAASTOHIIHTÄJÄN HENGITYS- JA
VERENKIERTOELIMISTÖSSÄ**

Bettina Wikström

Liikuntafysiologia
Kandidaatintutkielma
Liikuntatieteellinen tiedekunta
Jyväskylän yliopisto
Kevät 2022

TIIVISTELMÄ

Wikström, B. 2022. Tapaustutkimus: neljän viikon alppimajakson fysiologiset vasteet naismaastohiihtäjän hengitys- ja verenkiertoelimistössä. Liikuntatieteellinen tiedekunta, Jyväskylän yliopisto, liikuntafysiologian kandidaatintutkielma, 60 s., 2 liitettä.

Hypoksian eli alhaisen sisäänhengitysilman happiosapaineen tiedetään aiheuttavan monia fysiologisia vasteita ja adaptaatioita hengitys- ja verenkiertoelimistössä. Neljän viikon *live high train low* -korkeanpaikanharjoittelumallin (LHTL) mukaisella alppimajakasolla (AJ) voidaan saavuttaa 2–10 %:n parannus elimistön kokonaishemoglobiinimassassa (tHb_{massa}). tHb_{massa} on selvästi yhteydessä maksimaaliseen hapenottookykyyn ($VO_{2\text{max}}$), joka on yksi keskeisimmistä maastohiihtäjän suorituskykyyn vaikuttavista fysiologisista tekijöistä. tHb_{massa} -vaste on todettu hyvin yksilölliseksi sekä eri yksilöisen välillä että saman yksilön sisäisesti eri korkeanpaikanharjoitusjaksojen välillä. Yksilöllisen vaihtelun takia on perusteltua analysoida yksittäisen urheilijan fysiologisia vasteita ja adaptaatioita korkeanpaikanharjoittelusta. Tarkan ja pitkäjänteisen yksilöllisen analysoinnin avulla voidaan löytää vasteiden ja suorituskyvyn kannalta mahdollisimman optimaalisia tapoja suorittaa korkeanpaikanharjoittelua.

Tämän tapaustutkimuksen tarkoitus oli selvittää, millaisia fysiologisia vasteita ja adaptaatioita naismaastohiihtäjän hengitys- ja verenkiertoelimistössä ilmenee neljän viikon LHTL:n mukaisen AJ:n seurauksena. Tutkimuksen aineisto kerättiin osana laajempaa Jyväskylän yliopiston LHTL:a tutkivaa projektia. Tutkimuksessa oli yhteensä 16 koehenkilöä, joista tämän tutkimuksen koehenkilöksi valittiin satunnaisesti vapaaehtoinen 27-vuotias ja kansallisella tasolla kilpaileva naismaastohiihtäjä.

Tutkimuksessa suoritettiin kymmenen päivän alkuseurantajakso, neljän viikon AJ sekä neljän viikon jälkiseurantajakso. AJ:lla tutkittava asui 2 500 m korkeutta vastaavissa normobaarisessa hypoksiassa korkeuteen sopeutumiskampanian jälkeen. Tutkittavan hypoksinen annos oli 1 184 km·h. Harjoittelu suoritettiin muilta osin merenpinnantason olosuhteissa, mutta AJ:lla tutkittava suoritti viikoittain kaksi tunnin mittaista juoksuharjoitusta hypoksisissa olosuhteissa. Alkuseurantajaksoilla mitattiin tHb_{massa} :n, $VO_{2\text{max}}$:n ja verimuuttujien lähtötasot. tHb_{massa} mitattiin optimoitulla hiilimonoksidin takaisinhengitysmenetelmällä. Happisaturaatiota mitattiin AJ:lla päivittäin levossa sekä hypoksiaharjoitusten aikana. Verimuuttujista seerumin erytropoietiinin (EPO) pitoisuus analysoitiin myös AJ:n kolmantena päivänä. tHb_{massa} :n ja verimuuttujien taso mitattiin AJ:n viimeisenä päivänä sekä noin neljä viikkoa AJ:n päättymisestä. Verimuuttujista EPO:n pitoisuus analysoitiin muista muuttujista poiketen jo kolme viikkoa AJ:n päättymisestä. $VO_{2\text{max}}$:n muutoksia seurattiin AJ:n jälkeen kolmella testillä, jotka suoritettiin jälkiseurantajakson kolmantena, kahdeksantena ja 25. päivänä.

Tutkimuksen keskeisin havainto oli, että neljän viikon LHTL-jakso paransi tutkittavan tHb_{massa} :a vain maltillisesti (2,7 %). Tutkittavan $VO_{2\text{max}}$ (l/min) oli lähtötasoa 1,5 % alhaisempi kaksi päivää AJ:n jälkeen ja lähes sama kuin lähtötasolla 25. päivää AJ:n jälkeen. Teoreettisen $VO_{2\text{max}}$:n perusteella LHTL-jakso saattoi edesauttaa tutkittavaa saavuttamaan paremman kestävyys suorituskyvyn noin neljä viikkoa AJ:n jälkeen. Tulevaisuudessa olisi suositeltavaa tutkia tutkittavan mahdollisia LHTL-jaksoja, jotta saataisiin enemmän tietoa LHTL:n hyödyistä tutkittavalle sekä jakson optimaalisesta toteuttamisesta hänen kohdallaan.

Asiasanat: korkeanpaikanharjoittelu, kestävyysurheilija, alppimaja, erytropoiesi, hemoglobiinimassa, maksimaalinen hapenottookyky

KÄYTETYT LYHENTEET

EPO	erytropoietini
FIO ₂	sisään hengitettävän ilman hapen osuus
Hb	hemoglobiini
tHb _{massa}	kokonaishemoglobiinimassa
HbCO	karboksihemoglobiini
HH	hypobaarinen hypoksia
HIF-1	hypoxia-inducible factor 1, hypoksian indusoima tekijä 1
LHTL	<i>live high train low</i> -korkeanpaikanharjoittelumalli
NH	normobaarinen hypoksia
PCO ₂	hiilidioksidiosapaine
PO ₂	happiosapaine
SaO ₂	hemoglobiinin happisaturaatio
VO ₂	hapenkulutus
VO _{2max}	maksimaalinen hapenottokyky

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	1
2	HENGITYS- JA VERENKIERTOELIMISTÖN MERKITYS MAASTOHIIHDOS- SA3	
2.1	Hengityselimistön rakenne, toiminta ja toiminnan säätely.....	4
2.2	Verenkiertoelimistön rakenne, toiminta ja toiminnan säätely	6
2.2.1	Rakenne ja toiminta	6
2.2.2	Verenkierron säätely.....	8
2.3	Maksimaalinen hapenottokyky.....	9
2.4	Veren hapenkuljetuskyky	11
3	MAASTOHIIHTÄJIEN KESTÄVYYSHARJOITTELU.....	14
4	HYPOKSIAN FYSIOLOGISET VASTEET JA ADAPTAATIOT	16
4.1	Hypoksiavasteiden stimuloituminen ja fysiologiset mekanismit	16
4.2	Hypoksiavasteisiin vaikuttavat tekijät	18
4.3	Fysiologiset vasteet ja adaptaatiot hengitys- ja verenkiertoelimistössä	21
4.4	Hypoksiavasteiden säilyminen	23
5	LIVE HIGH TRAIN LOW -KORKEANPAIKANHARJOITTELU- MALLI	25
6	TUTKIMUSONGELMAT JA HYPOTEESI.....	27
7	MENETELMÄT.....	28
7.1	Tutkimusasetelma.....	28
7.2	Koehenkilö	29
7.3	Tutkimusaineiston keräys ja analysointi	31
7.3.1	Optimoitu hiilimonoksidin takaisin hengitysmenetelmä.....	33
7.3.2	Laskimoverinäytteet	36
7.3.3	Maksimaalisen hapenottokyvyn testit	37
8	TULOKSET	39
8.1	Veren hapenkuljetuskyky	39

8.2	Maksimaalinen hapenottokyky	41
8.3	Valtimoveren happipitoisuus	42
8.4	Verimuuttujat	43
9	POHDINTA	46
9.1	Kokonaishemoglobiinimassa ja veritilavuus	46
9.2	Maksimaalinen hapenottokyky	47
9.3	Valtimoveren happipitoisuus	49
9.4	Verimuuttujat	50
9.5	Yhteenveto	52
	LÄHTEET	54

LIITTEET

Liite 1: tHb_{massa} :n (g/kg) ja veritilavuuden (ml/kg) viitearvot eritasoisilla kestävyysurheilijoilla.

Liite 2: Koehenkilön harjoituspäiväkirjan viikoittaiset yhteenvedot.

1 JOHDANTO

Korkeanpaikanharjoittelu tai hypoksia-altistus on yksi oleellinen osa kestävyysurheilijoiden, kuten esimerkiksi maastohiihtäjien, vuosiharjoitussuunnitelmaa. Korkeanpaikanharjoittelussa hypoksian eli sisäänhengitysilman happiosapaineen laskun vaikutuksesta voidaan saavuttaa maastohiihtäjien suorituskykyä merkittävästi hyödyttäviä fysiologisia hypoksiavasteita hengitys- ja verenkiertoelimistössä. Hypoksiavasteet ovat elimistön luonnollinen tapa sopeutua hypoksian aiheuttamaan valtimoveren happipitoisuuden laskuun. Tämän vuoksi korkeanpaikanharjoittelu onkin hyväksytty tapa pyrkiä parantamaan urheilijan suorituskykyä. (Peltonen & Nummela 2016b, 583–584) Maksimaalinen hapenottoakyky (VO_{2max}) on ja yksi keskeisimmistä kestävyysuorituskykyyn vaikuttavista tekijöistä (Joyner & Coyle 2008) ja hengitys- ja verenkiertoelimistön toimintakykyä kuvaava indeksiksi (Mitchell & Blomqvist 1971, González-Alonson & Calbetin 2003 mukaan). Huipputaso maastohiihtäjiltä on mitattu korkeimpia koskaan raportoituja VO_{2max} :n arvoja (Sandbakk & Holmberg 2017), joka ilmentää hengitys- ja verenkiertoelimistön toimintakyvyn merkitystä maastohiihtäjän suorituskyvyllä.

Hypoksian keskeisimmät fysiologiset vasteet ja adaptaatiot liittyvät veren hapenkuljetuskyvyn kehittymiseen (Shmidt & Prommer 2010). Viikkoja kestävä alppimajakson pitkäaikainen hypoksia kiihdyttää elimistön erytropoiesia, eli punasolujen muodostusta, ja täten kokonais-hemoglobiinimassan (tHb_{massa}) kasvua (Peltonen & Nummela 2016b, 595). Punasolumassa ja tHb_{massa} ovat selvästi yhteydessä VO_{2max} :yyn (Lundbyn ym. 2016), joka ilmentää keskeisten hypoksiavasteiden hyödyllisyyttä kestävyysuorituskyvyllä. Yksi monista korkeanpaikanharjoittelutavoista on *live high train low* -korkeanpaikanharjoittelumalli (LHTL). LHTL:ssä asutaan korkeanpaikanolosuhteissa esimerkiksi alppimajassa, mutta harjoittelu toteutetaan matalamman korkeuden tai merenpinnan tason olosuhteissa. Asuminen korkeanpaikanolosuhteissa ilmentää hengitys- ja verenkiertoelimistössä hypoksiavasteita, mutta harjoittelu matalammalla säilyttää merenpinnan tason harjoitteluintensiteetin ja hapen jakelun. (Wilber ym. 2007)

Hypoksiavasteiden ilmeneminen ja niiden voimakkuus sekä korkeanpaikanharjoittelun vaikutukset suorituskykyyn ovat todettu hyvin yksilöllisiksi. Tutkimuksissa onkin todettu perustelluksi selvittää ja seurata yksilöllisesti hypoksian fysiologisia vasteita ja adaptaatioita, niihin vaikuttavia tekijöitä sekä niiden toistettavuutta elimistössä. Yksilöllisen seurannan avulla urheilija saavuttaa todennäköisemmin korkeanpaikanharjoittelusta tavoitellut hyödyt suorituskyvyn parantamisessa. (Nummela ym. 2019)

Tämän tapaustutkimuksen tarkoitus oli selvittää, millaisia fysiologisia vasteita ja adaptaatioita koehenkilönä olleen naismaastohiihtäjän hengitys- ja verenkiertoelimistössä ilmenee neljän viikon LHTL:n mukaisen alppimajakson seurauksena. Tutkimuksen tulokset ja analyysi ovat hyödyllisiä tutkittavana olleen urheilijan mahdollisten tulevien korkeanpaikanharjoittelujaksojen suunnittelun, toteutuksen ja optimoinnin kannalta. Tarkan ja pitkäjänteisen yksilöllisen analysoinnin avulla voidaan löytää mahdollisimman optimaalisia tapoja suorittaa korkeanpaikanharjoittelua keskeisten hypoksiavasteiden ja suorituskyvyn parantamisen kannalta.

2 HENGITYS- JA VERENKIERTOELIMISTÖN MERKITYS MAASTO-HIIHDOS- HIIHDOSSA

Maastohiihto on vaativa ja monipuolinen kestävyyslaji, jossa huipputasolla menestymiseen vaaditaan korkeaa fyysistä suorituskykyä, väsymyksen sietokykyä, hyviä lajitekneillisiä taitoja sekä kilpailukykyinen kalusto (Rusko 2003a, xi). Maastohiihdon kilpasuoritukseen vaikuttavat lisäksi urheilijan terveydentila, psykologiset tekijät (Rusko 2003a, xi; Rusko 2003b 1–18), kilpailutaktiikat sekä ulkoiset olosuhteet, kuten kilpailukorkeus, maasto ja lumen koostumus (Oh-tonen & Mikkola 2016, 491–492). Vaativuutta maastohiihtoon teettävät muun muassa yhdis-tetty ylä- ja alavartalotyöskentely sekä kestävyys-suorituksen intervalliluonteinen intensiteettien vaihtelu mäkisessä maastossa ja usein kylmissä sääolosuhteissa. Lajitekneistä haastavuutta ai-heuttaa esimerkiksi jyrkät ylä- ja alamäkiosuudet sekä toistuvat alatekneikkoiden vaihtelut. Kai-ken kaikkiaan maastohiihto asettaa suuret vaatimukset tekniselle ja taktiselle taidolle sekä mo-nille fyysisille ominaisuuksille, kuten aerobiselle ja anaerobiselle teholle, voimalle, nopeudelle ja kestävyydelle. (Holmberg 2015)

Kestävyys voidaan määrittää kyvyksi ylläpitää tiettyä nopeutta tai tehoa mahdollisimman pitkiä aikoja (Jones 2006). Nummelan (2016, 272) mukaan kestävyuden merkitys on suuri sekä yli kahden minuutin kestoissa suorituksissa että pitkäaikaisissa, lyhyitä tehokkaita työjaksoja si-sältävissä suorituksissa. Kestävyuden merkitys onkin täten olennainen intervalliluonteisessa maastohiihdossa, jossa kilpasuorituksen kesto ulottuu sprintin noin kolmesta minuutista mara-tonhiihtojen useisiin tunteihin (Losnegard 2019). Kestävyys-suorituksen fysiologiset tekijät muodostuvat lukuisista keskushermoston, hermosignaalien johtumisen, hengityksen, keuhko-verenkierron, perifeerisen verenkierron ja lihassetabolian osatekijöitä (Hauswirth & Meur 2012, 3–8).

Kolme keskeisintä kestävyys-suorituskyvyn fysiologista tekijää ovat: 1) VO_{2max} eli elimistön maksimaalinen kapasiteetti hyödyntää happea adenosiniinrifosfaatin (ATP) uudelleenmuodos-tuksessa solujen oksidatiivisessa aineenvaihdunnassa, 2) anaerobinen kynnyks (AnK) eli suurin suhteellinen aerobinen teho, jossa veren laktaattipitoisuudessa ei tapahdu jatkuvaa nousua, sekä 3) suorituksen taloudellisuus, eli hapenkulutuksen taso tietyllä nopeudella tai tehon tasolla (Jo-lyner & Coyle 2008). AnK syntyy kompleksisesti useiden erilaisten fysiologisten tekijöiden yh-teisvaikutuksena tietylle hapenkulutuksen (VO_2) tasolle. AnK:llä tapahtuu myös hengitys- ja

verenkiertoelimistön toiminnan muutoksia. (Poole ym. 2021) Kestävyysuorituksen taloudellisuus riippuu suoritustekniikasta (Nummela 2016, 272) ja hermo-lihasjärjestelmän tehontuotokyvystä eli kyvystä tuottaa voimaa maksimaalisen suorituksen aikana (Paavolainen ym. 1999). Tässä luvussa keskitytään kuitenkin hengitys- ja verenkiertoelimistöön liittyvien kestävyysuorituksen fysiologisten osatekijöiden eli hengityksen, keuhkoverenkierron ja perifeerisen verenkierron merkitykseen maastohiihdossa.

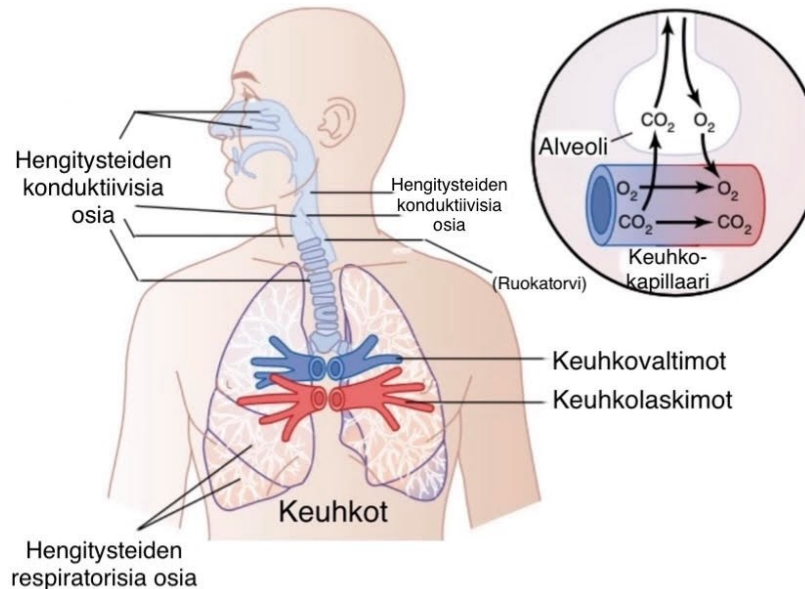
Kestävyysuorituksen fysiologisten tekijöiden ja kestävyysuorituskykyyn keskeisimmin vaikuttavien tekijöiden perusteella hengitys- ja verenkiertoelimistön ja sen toimintakyvyn merkitys maastohiihdossa on erittäin keskeinen. González-Alonso ja Calbet (2003) ovat todenneet Mitchelliin ja Blomqvistiin (1971) viitaten VO_{2max} :n olevan indeksi hengitys- ja verenkiertoelimistön toimintakyvylle, ja huippumaastohiihtäjiltä on mitattu korkeimpia koskaan raportoituja VO_{2max} :n arvoja (Sandbakk & Holmberg 2017). Lisäksi Losnegard ym. (2013) ovat todenneet maastohiihdossa sekä sprintin että normaalimatkan suorituksen olevan suuresti yhteydessä suoritusenaikaiseen aerobiseen huipputehoon ja liikkumisen hapenkulutukseen. Seuraavissa alaluissa käydään läpi hengitys- ja verenkiertoelimistön rakennetta, toimintaa ja säätelyä sekä maastohiihtäjän fyysisen suorituskyvyn kannalta merkittävimpiä hengitys- ja verenkiertoelimistön fysiologisia tekijöitä.

2.1 Hengityselimistön rakenne, toiminta ja toiminnan säätely

Hengitystiet muodostuvat konduktiivisesta eli johtavasta sekä respiratorisesta eli kaasuja vaihtavasta osasta (ks. kuva 1). Konduktiivinen osa rakentuu ilmatestä nenän ja keuhkojen ilmetiehyiden välillä. Respiratorinen osa rakentuu respiratorisista ilmetiehyistä, alveolaarisista tiehyistä, alveolipusseista sekä alveoleista kattaen suurimman osan (2,5–3 litraa) keuhkon tilavuudesta. Ihmisellä on kaksi keuhkoa, jotka ovat kokonaiskapasiteetiltaan keskimäärin naisilla 4,2 litraa. (McArdle ym. 2015, 253–267) Hengityselimistön lihakset jakautuvat sisään- ja uloshengityselimistöön (Hall 2016, 497–507)

Hengityselimistön toiminnan päätarkoituksena on mahdollistaa jatkuva alveolaarinen kaasujen vaihdunta elimistön tarpeiden mukaisella tasolla. Alveolaarinen kaasujen vaihto tarkoittaa hapen (O_2) ja hiilidioksidin (CO_2) diffuusioitumista eli siirtymistä suuremmasta paineesta kohti

pienempää painetta alveolien ilman ja keuhkokapillaarien veren välillä. Normaleissa merenpinnan tason olosuhteissa ilmanpaine on noin 760 elohopeamillimetriä (mmHg). Taulukossa 1 on ilmoitettu normaalit hapen osapaineet (PO_2) ja hiilidioksidin osapaineet (PCO_2) ympäristön ilmassa, alveoleissa, laskimoveressä ja valtimoveressä. (Silverthorn 2016, 559–591)



KUVA 1. Hengityselimistön rakenne ja alveolin kaasujen vaihto (mukaeltu Hall 2011, 472). O_2 , happi; CO_2 , hiilidioksidi.

TAULUKKO 1. Hapen ja hiilidioksidin osapaineita eri olosuhteissa.

Kaasun osapaine	Ympäristön ilma			
	(merenpinnantasoo)	Alveoli	Laskimoveri	Valtimoveri
PO_2	160 mmHg	100 mmHg	≤ 40 mmHg	85–100 mmHg
PCO_2	0,25 mmHg	40 mmHg	≤ 46 mmHg	35–45 mmHg

PO_2 Hapen osapaine, PCO_2 Hiilidioksidin osapaine, mmHg Elohopeamillimetriä.

Keuhkojen kaasutasoa säädellään ventilaatiolla eli keuhkotuuletuksella hengityslihasten toiminnan avulla. Ventilaatio tarkoittaa ilman eli kaasuseoksen sisään- ja ulosvirtausta keuhkojen alveolien ja ympäristön ulkoilman välillä litroina minuutissa. Ventilaation tärkein tehtävä on mahdollistaa jatkuva alveolaarinen ventilaatio. Ventilaatiossa happipitoinen ilma siirtyy ympäristön ilmasta hengitysteiden kautta keuhkoihin ja hiilidioksidipitoinen ilma siirtyy hengitysteitä pitkin keuhkoista ympäristöön. Hengityslihasten toimintaa säätelämällä hengitys ja ventilaatio saadaan tehostumaan, mikäli elimistössä ilmenee tarvetta siihen. (Hall 2016, 497–507)

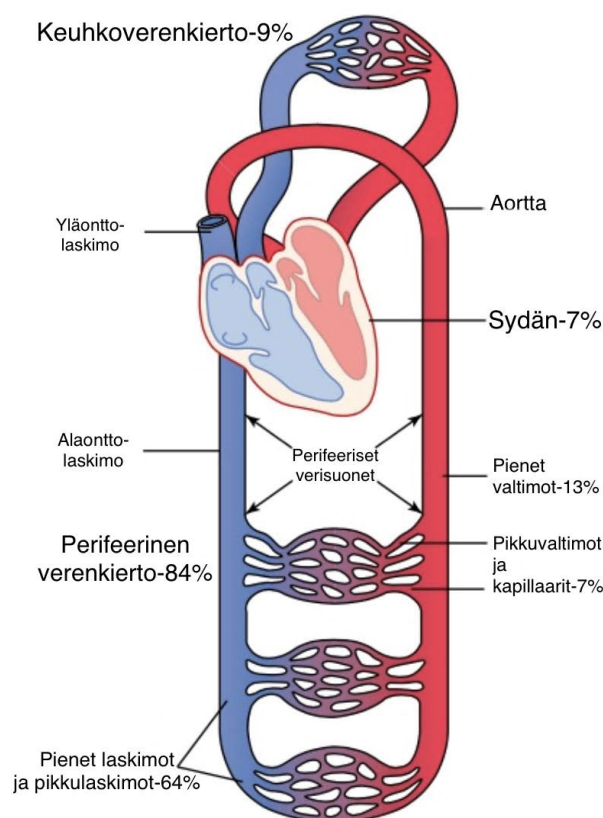
Hengityselimistön toiminnan eli hengityksen säätelystä vastaa autonomisen hermoston hengityskeskukseen hermosoluryhmät, jotka sijaitsevat aivorungon ydinjatkeessa ja aivosillassa. Säätelyjärjestelmä on hyvin tarkka ja täten valtimoveren hapen- ja hiilidioksidin osapaineet säilyvät elimistön tarpeiden mukaisella tasolla myös hengitykseen kohdistuvien stressitilanteiden kuten esimerkiksi raskaan fyysisen rasituksen aikana. Hengityksen säätelyä ohjaavaa informaatiota saadaan hengityskeskukseen myös hengityskeskukseen ja periferian kemoreseptoreilta, valtimopainetta aistivilta baroreseptoreilta sekä useilta reseptoreilta keuhkoista kuten esimerkiksi sensorisilta reseptoreilta hengitysteiden seinämien sileästä lihaskudoksesta. Hengityskeskukseen kemoreseptorit aistivat pääasiassa veren PCO_2 :ta ja vetyionipitoisuutta, kun taas periferian kemoreseptorit aistivat pääasiassa PO_2 :ta. Hengityksen säätelyn tarkoituksena on taata, ettei veren PO_2 pääsisi laskemaan alle 70 mmHg:in, PCO_2 nousisi tai laskisi sen normaalista tasosta 35–75 mmHg tai veren pH (käänteinen vetyionipitoisuuden logaritminen mitta) nousisi tai laskisi normaalista tasosta 7,3–7,5. (Hall 2016, 539–548)

2.2 Verenkiertoelimistön rakenne, toiminta ja toiminnan säätely

Verenkiertoelimistö eli sydän, verisuonisto ja veri luovat edellytykset verenpaineelle, verenvirtaukselle, veren kulkureiteille sekä aineiden kuljettamiselle veressä elimistön eri kudosten välillä (Silverthorn 2016, 461). Seuraavissa alaluvuissa käydään läpi verenkiertoelimistön rakennetta ja toimintaa sekä verenkierron säätelyä.

2.2.1 Rakenne ja toiminta

Kuvassa 2 nähdään yksinkertaistettu havainnollistus verenkiertoelimistön rakenteesta sekä veren jakautuminen verenkierron eri osiin prosentteina kokoverestä. Sydän on noin nyrkin kokoinen pääosin sydänlihaskudoksesta muodostuva nelionteloinen elin. Sydän voidaan nähdä rakenteellisesti kahtena erillisenä, oikeana ja vasempana pumppuna. Molemmat pumput muodostuvat kahdesta ontelosta: eteisestä ja kammiosta. Verisuonisto jakautuu keuhkoverenkiertoon ja perifeeriseen verenkiertoon. Sydämen oikea pumppu pumppaa veren keuhkoverenkiertoon ja vasen pumppu perifeeriseen verenkiertoon. Verisuonistossa suonet jakautuvat vielä valtimoihin ja laskimoihin. (Silverthorn 2016, 461–496)



KUVA 2. Verenkiertoelimistön yksinkertaistettu rakenne ja veren jakautuminen verenkiertojärjestelmän eri osiin (mukaeltu Hall 2011, 158).

Veri on kudos, joka muodostuu verenkiertoelimistössä virtaavasta, noin 58 % plasmaa ja 42 % verisoluja sisältävästä nesteestä. Naisella veren kokonaismäärä on keskimäärin noin neljä litraa. Plasmasta suurin osa (92 %) on vettä, mutta se sisältää myös kaasuja, ioneja, hivenaineita, vitamiineja sekä orgaanisia molekyyliä, kuten plasmaproteiineja. (Silverthorn 2016, 535–555) Plasman ja verisolujen prosentiosuudet kokoverestä voivat kuitenkin vaihdella esimerkiksi sukupuolen ja kehonpainon mukaan. Plasmaa ilman veren hyytymistekijöitä kutsutaan seerumiksi. (Hall 2016, 307–486) Verisoluista yli 99 % on punasoluja, eli erytrosyyttejä, ja alle prosentti valkosoluja eli leukosyyttejä ja verihiutaleita eli trombosyyttejä. Punasolujen prosenttiosuutta kokonaisverimäärästä kutsutaan hematokriitiksi ja se on normaalisti naisilla 37–47 %. Punasolujen tärkein proteiini on happea sitova hemoglobiini (Hb). (Silverthorn 2016, 535–555) Suomessa veren Hb-pitoisuuden viitearvo naisilla on 117–147 g/l (Tunturi 2020a), joten kokoveren punasolujen tHb_{massa} on tällöin naisilla keskimäärin 486–588 g.

Sydämen toiminta perustuu sydänlihaksen jatkuvaan rytmiseen supistumiseen ja rentoutumiseen eli sydämen sinusrytmiin. Sydämen syke (lyöntiä / min) kuvaa sinusrytmin tiheyttä minuutissa. Sydämen supistumisvaiheen aikana kammioissa olevasta verestä noin 60 % työntyy keuhko- ja perifeeriseen verenkiertoon. Kammioista verenkiertoon työntyvää verimäärää kutsutaan iskutilavuudeksi. Valtimot kuljettavat keuhkoverenkierrossa kaasujen vaihdon seurauksena hapettuneen veren sydämen kautta kaikkialle elimistön perifeeriseen verenkiertoon. Laskimot puolestaan kuljettavat hiilidioksidipitoisen veren perifeerisestä verenkierrosta kohti sydäntä, josta se pumpataan jälleen keuhkoverenkiertoon, jossa tapahtuu alveolaarinen kaasujen vaihto. (Hall 2016, 169–178) Keuhkoverenkierron verenvirtauksen taso on huomattavan suuri muihin kudoksiin verrattuna, koska keuhkojen verenkierto ottaa vastaan sydämen oikean kamion minuuttitilavuuden. Keuhkoverenkierrossa virtaa täten suunnilleen saman verran verta minuutissa kuin koko perifeerisessä verenkierrossa. (Silverthorn 2016, 565)

Verenkierron toiminnan tarkoitus on huolehtia, että kudosten sisältö on jatkuvasti solujen selviytymiseen ja niiden tehtävien suorittamiseen optimaalinen. Verenkierto kuljettaa kudoksille ravintoaineita, happea ja hormoneja sekä kuljettaa solujen aineenvaihdunnan jätteenä pois soluista. Sydän ja verisuonet huolehtivat tarvittavasta minuuttitilavuudesta ja valtimopaineesta, jotta verenvirtaus on tilannekohtaisesti riittävällä tasolla. Koko elimistön kudosten verenvirtauksen tasoa kuvaa sydämen minuuttitilavuus (l/min), joka tarkoittaa sydämen vasemasta kammioista perifeeriseen verenkiertoon pumpattavaa verimäärää minuutissa. Sydämen minuuttitilavuus onkin täten iskutilavuuden ja sykkeen tulo. (Hall 2016, 169–258)

2.2.2 Verenkierron säätely

Verenkierron säätely jakautuu hermostolliseen ja paikalliseen säätelyyn ja niillä vaikutetaan muun muassa sydämen toimintaan, verenpaineeseen ja verenvirtauksen tasoon. Hermoston sympaattinen ja parasympaattinen hermotus on verenkierron nopein ja kokonaisvaltainen säätelijä. Hermostollinen säätely on peräisin vasomotorisesta keskuksesta, joka hengityskeskuksen tapaan sijaitsee ydinjatkeessa ja aivosillassa. Sympaattinen hermotus säätelee verenvirtauksen vähenemistä kudoksissa, pienentää laskimoiden tilavuutta sekä kasvattaa sydämen sykettä, pumppausvoimaa ja pumpattavaa verimäärää. Parasympaattinen hermotus laskee sydämen sykettä ja supistuvuutta. (Hall 2016, 203–270)

Verenkierron paikallinen säätely on kudosten mekanismi säädellä niiden verenkiertoa itsenäisesti tarpeiden ja kudosten välisen humoraalisen, eli nesteiden kautta tapahtuvan aineiden vaihtelun perusteella. Paikallinen säätely jakautuu akuuttiin ja pitkäaikaiseen säätelyyn. Akuutti paikallinen säätely voi olla verisuonten laajentamista (vasodilaatio), supistamista (vasokonstriktio) tai pikkuvaltimoiden ja kapillaarien välissä olevien prekapillaarisulkijoiden avaamista ja sulkemista. Akuutin säätelyn mekanismit ovat erittäin tärkeitä etenkin kudosten verisuonten autoregulaatiossa eli verenvirtauksen säätelyssä kudosten hapen tarpeen mukaan. Kudosten verenkiertoa säädellään akuutisti paikallisesti myös solujen aineenvaihdunnan tai verenpaineen muutosten seurauksena. Paikalliset säätelymekanismit voivat kumota sympaattisen hermoston aiheuttamaa vasokonstriktiota vapauttamalla vasodilatorisia aineita. Verenkierron pitkäaikainen paikallinen säätely perustuu rakenteellisiin muutoksiin verisuonistossa, kuten angiogeneesiin eli kapillaarien uudismuodostukseen sekä tarpeettomien verisuonten poistamiseen verisuonijärjestelmästä. (Hall 2016, 203–243)

2.3 Maksimaalinen hapenottokyky

Kuten jo tämän luvun alussa todettiin VO_{2max} kuvaa hengitys- ja verenkiertoelimistön toimintakykyä, joka on yksi keskeisimmistä kestävyysuorituskykyyn vaikuttavista tekijöistä esimerkiksi maastohiihdossa. VO_{2max} :ä voidaan pitää hengitys- ja verenkiertoelimistön toimintakyvyn mittarina ainakin siitä syystä, että VO_{2max} :ä eniten rajoittavista neljästä tekijästä kolme ovat hengitys- ja verenkiertoelimistön fysiologisia tekijöitä. Nämä kolme tekijää ovat sydämen maksimaalinen minuuttitulavuus, veren hapenkuljetuskapasiteetti ja keuhkojen diffuusiokapasiteetti. (Hauswirth & Meur 2012, 3–8) Hengityselimistön ja verenkiertoelimistön tehokas yhteistoiminta onkin täten erittäin keskeistä VO_{2max} :n ja kestävyysuorituskyvyn kannalta. Neljäs VO_{2max} :ä eniten rajoittavista tekijöistä on lihasten kapasiteetti käyttää happea energia-aineenvaihdunnassa ja se pystytään mittaamaan valtimo- ja laskimoveren happikonsentraatioiden erotuksella (Hauswirth & Meur 2012, 3–8). Lihasten kapasiteetti hyödyntää happea ei kuvaa hengitys- ja verenkiertoelimistön toimintakykyä, joten sen osuuteen ei keskitytä tässä luvussa.

Sydämen maksimaalinen minuuttitulavuus. Sydämen maksimaalinen minuuttitulavuus selittää noin 70–85 % VO_{2max} :tä (Ceretelli & Di Prampero 1987, 297–339, Hauswirthin & Meurin 2012, 3–8 mukaan), joten se on hyvin merkittävä hengitys- ja verenkiertoelimistön fysiologinen

tekijä maastohiihtäjän suorituskyvyssä. Iskuutilavuus on keskeisin sydämen maksimaalista minuuttitulavuutta määrittävä tekijä (Joyner & Coyle 2008), sillä sykkeessä ei ole todettu eroa harjoitelleiden ja vähän liikkuvien välillä (McArdle 2015, 344).

Veren hapenkuljetuskapasiteetti. Veren hapenkuljetus alkaa keuhkoissa, kun alveolaarisen kaasuvaihdunnan seurauksena valtimoveri hapettuu eli happi joko sitoutuu punasolun Hb:iin tai liukenee plasmaan (Silverthorn 2016, 535–555). Kokoveren Hb-konsentraatio kuvaa veren kapasiteettia kuljettaa hapetta yhtä verilitraa kohti (Silverthorn 2016, 535–601). Veren Hb-konsentraatioon ja täten veren hapenkuljetuskapasiteettiin vaikuttaa keskeisesti elimistön punasolumassa, punasolujen tHb_{massa} sekä veritulavuus (ml, ml/kg) (Shmidt & Prommer 2010). Lundbyn ym. (2016) mukaan punasolumassa on selvästi yhteydessä $VO_{2\text{max}}$:yyn, joten yksilöiden välistä $VO_{2\text{max}}$:n vaihtelua selittää sydämen maksimaalisen minuuttitulavuuden lisäksi eniten elimistön tHb_{massa} . Elimistön tHb_{massa} riippuu Peltosen ja Nummelan (2016a, 594) mukaan iästä, sukupuolesta, kehon koosta, kestävyysharjoittelusta, perimästä sekä asuinympäristön sijainnista suhteessa merenpinnantasoon. Naisten $VO_{2\text{max}}$ on keskimäärin noin 10 % alhaisempi kuin miesten johtuen muun muassa naisten noin 10 % alhaisemmasta Hb-konsentraatiosta (mm. Saltin & Åstrand 1967, Joynerin & Coylen 2008 mukaan).

Keuhkojen diffuusiokapasiteetti. Keuhkojen diffuusiokapasiteetilla tarkoitetaan keuhkojen kapasiteettia kyllästä verta hapella ja siihen vaikuttavia fysiologisia tekijöitä ovat O_2 diffuusio, ventilaatio, alveolaarinen ventilaatio, ja Hb- O_2 affiniteetti eli sitoutumisherkkyys (Hauswirth & Meur 2012, 3–8). Huippukestävyysurheilijoilla keuhkojen diffuusiokapasiteetin merkityksen on todettu olevan yhteydessä valtimoveren hapen desaturatioon eli heikentyneeseen happikylläisyyteen, kun työskennellään maksimaalisella intensiteetillä (Dempsey & Wagner 1999). Keuhkojen diffuusiokapasiteetti rajoittaa kuitenkin vähiten $VO_{2\text{max}}$:ä merenpinnan tason olosuhteissa terveillä harjoitelleilla henkilöillä (Hauswirth & Meur 2012, 3–8). Holmberg ja Calbet (2007) ovatkin todenneet, että esimerkiksi huippumaastohiihtäjien hemoglobiinin happisaturaatio (SaO_2) on hyvä niin submaksimaalisessa kuin väsymykseen asti tehdyssä suorituksessa sekä eri hiihtotekniikoiden välillä.

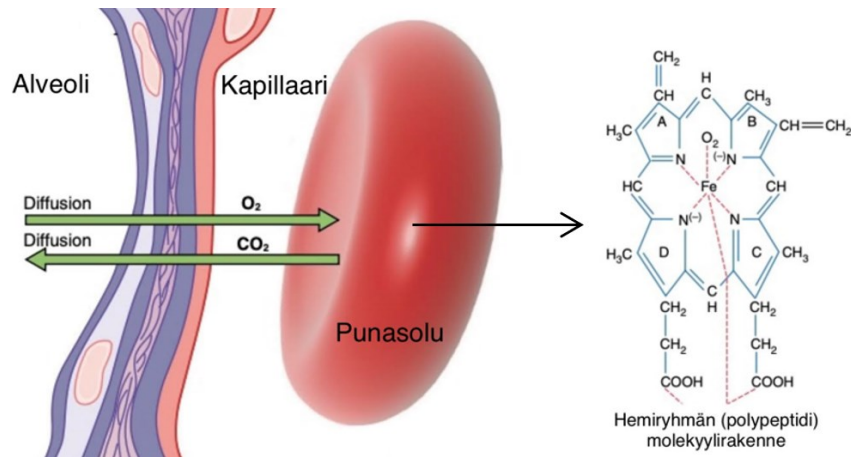
$VO_{2\text{max}}$ voidaan määrittää suoralla $VO_{2\text{max}}$:n testillä, johon on olemassa erilaisia kuormitusmalleja ja -tapoja (Nummela & Peltonen 2018, 79). Maastohiihtäjät tekevät suoran $VO_{2\text{max}}$ -testin joko sauvakävellen tai rullasuksilla hiihtäen juoksumatolla, ja kuormitusmalli valitaan muun muassa testattavan odotetun maksimisuorituksen mukaan. Sauvakävelytestissä kuormitusta

nostetaan lisäämällä nopeutta sekä nostamalla kulmaa kolmen minuutin välein. VO_{2max} määritetään suurimmaksi testin aikana mitatuksi VO_2 :n minuutin keskiarvoksi. VO_2 :sta pystytään mittaamaan hengityskaasuanalysointorilla ventilaation sekä sisään ja uloshengitetyn hapen määrän erotuksena, koska sisään hengitetyn ilman koostumus on vakio. Lisäksi testissä määritetään kuormitustapakohtainen teoreettinen VO_{2max} . (Nummela & Peltonen 2018, 85–95)

Maastohiihdossa maajoukkue-tason naishiihtäjän VO_{2max} :n viitearvona pidetään $> 70 \text{ ml/kg}^{-1}/\text{min}^{-1}$, hyvän kansallisen tason naismaastohiihtäjän viitearvona $67\text{--}70 \text{ ml/kg}^{-1}/\text{min}^{-1}$ ja keskimääräistä kansallista tasoa paremman naishiihtäjän viitearvona $63\text{--}67 \text{ ml/kg}^{-1}/\text{min}^{-1}$. (Mero ym. 1997) Tønnessen ym. (2015) tutkivat vuosien 1990–2013 välillä maailmanmestaruuskilpailuissa tai talviolympialaisissa Norjaa edustaneen 59 maastohiihtäjän juoksumatolla juosten mitattua VO_{2max} :ä. Tutkimuksessa todettiin, että kehonpainoon suhteutettu VO_{2max} oli naisilla normaalimatkan hiihtäjillä keskimäärin $72 \text{ ml/kg}^{-1}/\text{min}^{-1}$ ja sprinttihiihtäjillä keskimäärin $68 \text{ ml/kg}^{-1}/\text{min}^{-1}$. Absoluuttiset VO_{2max} arvot samassa tutkimuksessa olivat naisilla normaalimatkan hiihtäjillä keskimäärin 4.3 l/min ja sprinttihiihtäjillä keskimäärin 4.0 l/min . Tutkimuksessa havaittiin mitalin saavuttaneiden keskuudessa keskimäärin 15 % alempi VO_{2max} naisilla kuin miehillä. (Tønnessen ym. 2015)

2.4 Veren hapenkuljetuskyky

Punasolu koostuu solukalvosta, Hb:sta ja entsyymeistä. Hb on punasolun pääkomponentti, sillä sen proteiinirakenne mahdollistaa hapen sitoutumisen punasoluihin ja täten veren hapenkuljetuksen. Kuvassa 3 havainnollistetaan hapen siirtymistä alveolista kapillaariin ja sitoutumista punasolun Hb:n hemiryhmään. Yhdessä Hb:ssa on neljä hemiryhmää ja happi muodostaa sidoksen niiden rauta-atomin (Fe) kanssa. Hapestä yli 98 % kulkeutuu veren punasolujen Hb:iin sitoutuneena keuhkoista kudoksille (Silverthorn 2016, 535–555), joten valtimoveren happipitoisuus mukaillee pitkälti SaO_2 :ta (Peltonen & Nummela 2016a, 586). SaO_2 seuraa valtimoveren PO_2 :tta, mutta siihen vaikuttaa myös muut oksihemoglobiinin (HbO_2) dissosiaatiokäyrän sijaintia muokkaavat tekijät (pH, PCO_2 , lämpötila ja 2,3-bisfosfoglyseraattikonsentraatio). (Peltonen & Nummela 2016, 586)



KUVA 3. Hapen ja hiilidioksidin diffuusio, punasolu sekä hemoglobiinin hemiryhmän molekyyli rakenne (mukaeltu Hall 2011, 418 ja 490). O₂, happi; CO₂, hiilidioksidi.

Punasolujen muodostus eli erytropoiesi tapahtuu luuytimessä ja sitä säätelee munuaisten tuottamaa sytokiini nimeltä erytropoietiini (EPO) (Silverthorn 2016, 535–555). Sytokiinit ovat tarpeen tullen valmistettavia viestinvälittäjäproteiineja, joten punasolujen muodostuminen on vaste elimistössä syntyneelle punasolujen tarpeelle (Silverthorn 2016, 192). Erytropoiesin tarve syntyy, kun kudoksille ei kyetä kuljettamaan riittävästi happea ja hapen saatavuus kudoksissa heikkenee. Tällöin hapen alhainen osapaine eli hypoksia kudoksissa saa soluissa aikaan EPO:n muodostusta signaloivan *hypoksian indusoima tekijä 1:n* (HIF-1) muodostumista. HIF-1:n muodostuminen ja sen signaloiva vaikutus EPO:n muodostukseen perustuu elimistön endokriinisen järjestelmän toimintaan homeostasian ylläpitämisessä. EPO:n tärkein tehtävä on tuoda lisää hemoglobiinia verenkiertoon aktivoimalla erytropoiesia luuytimessä, jolloin hapenkuljetuskapasiteetti keuhkoista kudoksille lisääntyy. Hb:n muodostuksessa välttämätön rauta saadaan ravinnosta ja sitä kuljetetaan veressä transferrini-proteiiniin sitoutuneena. Elimistön ylimääräistä rautaa varastoidaan maksassa ferritiini-nimisissä proteiineissa, joista sitä vapautetaan tarvittaessa Hb:n muodostukseen. (Silverthorn 2016, 535–555)

Erytropoiesissa luuytimen solut muuttuvat ensin erytrobasteiksi eli tumallisiksi punasolujen esiasteiksi, jotka täyttyvät luuytimessä valmiina olevilla Hb:lla. Erytroblastit kehittyvät tuman poistuessa retikulosyyteiksi eli nuoriksi punasoluiksi. Retikulosyyttejä vapautetaan tämän jälkeen luuytimestä verenkiertoon. (Silverthorn 2016, 535–555) Retikulosyyteissä tapahtuu normaalisti noin viikon ajan proteiinien translaatiota, esimerkiksi lopun Hb:n muodostamiseksi, ennen kuin ne ovat kypsiä punasoluja. Kypsien punasolujen elinikä on keskimäärin 120 vuoro-

kautta. (Dzierzak & Philipsen 2013) Punasolujen ominaisuuksia voidaan kuvata perusverenku-
vasta laskettavilla neljällä punasoluindeksillä, jotka ovat E-MCV, E-MCH, E-MCHC ja E-
RDW (Tunturi 2020b). Kypsien punasolujen keskitilavuus (E-MCV) kertoo kokoveren yksit-
täisen punasolun keskimääräisen koon femolitroissa (fl). Punasolujen hemoglobiinin keski-
massa (E-MCH) kertoo kokoveren yksittäisen punasolun keskimääräisen hemoglobiinimassan
pikogrammoina (pg). Punasolujen keskimääräinen hemoglobiinikonsentraatio (E-MCHC) ker-
too yksittäisen punasolun keskimääräisen Hb:n osuuden punasolun tilavuudesta grammoina lit-
rassa. Punasolujen koon vaihtelu (E-RDW) kertoo yksittäisten punasolujen koon vaihtelun toi-
siinsa nähden prosenteissa. Punasoluindeksejä tarkastelemalla saadaan täten yksityiskohtaisem-
pia tietoja punasolujen ominaisuuksista ja täten myös veren hapenkuljetuskyvystä. (Tunturi
2020b)

Elimistön punasolumassa voidaan mitata merkitsemällä punasolut radioaktiivisen isotoopin
avulla, mutta menetelmä on kallis ja haastava (Peltonen & Nummela 2016a, 594). tHb_{massa} pys-
tytään määrittämään hieman helpommin, muun muassa Schmidin ja Prommerin (2005) kehit-
tämällä optimoidulla hiilimonoksidin takaisinhengitysmenetelmällä, jossa hiilimonoksidi (CO)
toimii veren Hb:n merkkajana. Hiilimonoksidin takaisinhengityksestä pystytään arvioimaan
myös veritilavuus, punasolutilavuus ja plasmatilavuus. Tiivistetysti sanottuna tHb_{massa} määrite-
tään kyseisessä menetelmässä 1) veren karboksihemoglobiinin osuuden muutoksen
($\Delta\text{HbCO}\%$), 2) keuhkojen ja spirometrin hiilimonoksidin määrän (ennen vs. jälkeen hiilimo-
noksidin takaisinhengityksen) 3) Hb:n CO:n sitoutumiskapasiteetin ($1,39 \text{ ml/g}^{-1}$) sekä 4) yksi-
lökohtaisen CO-annoksen perusteella (Schmidt & Prommer 2005). Liitteessä 1 on Blood tec:n
(Bayreuth, Germany) mittausaineiston perusteella määritetyt tHb_{massa}:n ja veritilavuuden vii-
tearvot eritasoisille kestävyysurheilijoille. Kansainvälisen tason naiskestävyysurheilijoille
tHb_{massa}:n viitearvo on 12,0–13,5 g/kg ja veritilavuuden 90–105 ml/kg. Vastaavat viitearvot
ovat kansallisen tason naiskestävyysurheilijoille 11,5–12,5 g/kg ja 87–95 ml/kg, ja alueellisen
tason naiskestävyysurheilijoille 10,5–11,5 g/kg ja 77–87 ml/kg.

3 MAASTOHIIHTÄJIEN KESTÄVYYSHARJOITTELU

Maastohiihdossa fyysisen harjoittelun perustana on kehittää etenkin menestymiseen vaadittavia fyysistä suorituskyyä ja väsymyksen vastustuskykyä kehittäviä ominaisuuksia sekä lajiteknilisiä taitoja. Kestävyysharjoittelu on maastohiihdossa keskeinen fyysisen suorituskyyyn sekä väsymyksen vastustuskyvyn ominaisuuksia kehittävä harjoittelumuoto, koska kestävyysharjoittelu kehittää kestävyysuorituskyyyn vaikuttavia tekijöitä (Nummela 2016, 272–275). Kestävyysharjoittelu ei kuitenkaan ole ainoa harjoittelumuoto, jolla voidaan harjoittaa kestävyysuorituskyyyn vaikuttavia tekijöitä. Kestävyysuorituskyyä voidaan parantaa lisäksi esimerkiksi voimaharjoittelun avulla hermo-lihasjärjestelmän toimintakyvyn ominaisuuksia kehittämällä. (Hoff ym. 2002) Maastohiihdossa kestävyysominaisuuksien käyttäminen kovissa hiihtovauheissa sekä väsyneenä vaatiikin hyviä taito-, tekniikka-, voima- ja nopeusominaisuuksia. Täten näiden jokaisen ominaisuuden harjoittamisen merkitys on aivan yhtä keskeinen osa maastohiihtäjän harjoittelua, kun tavoitellaan kestävyysuorituskyyyn maksimointia lajisuorituksessa. (Ohtonen & Mikkola 2016, 491–492)

Kilpaurheilussa harjoittelulla tähdätään suorituskyyyn maksimointiin kilpasuorituksessa. Tästä syystä maastohiihtäjän kestävyysharjoittelu tulee suunnitella ja toteuttaa yksilöllisesti muun muassa urheilijan omien tavoitteiden mukaisten pääkilpailujen fysiologiset vaatimukset ja kilpailuajankohdat huomioiden. Suomessa maastohiihdon pääkilpailut hiihdetään Suomen Hiihtoliiton (SHL) organisoimana Suomen Cup -kilpailusarjana, johon lukeutuu neljä Suomen Cup -viikonloppua sekä kahdet SM-kilpailut, joissa hiihdetään sekä normaalimatkan kilpailuja että sprintti- ja viestikilpailuja (SHL 2021).

Kestävyysharjoittelu voidaan jakaa aerobiseen perus- (PK, ~ 40–70 % VO_{2max}), vauhti- (VK, ~ 65–90 % VO_{2max}) ja maksimikestävyysharjoitteluun (MK, ~ 80–100 % VO_{2max}), joilla on sekä omat erityispiirteensä että yhtäläisiä vasteita harjoitusvaikutuksissa. Kestävyysharjoittelu sisältää myös nopeuskestävyysharjoittelun (NK), jossa suoritusteho ylittää VO_{2max} -tehon. (Nummela 2016, 272–275) Vaatimukseksi maastohiihtäjän nousemiseen kansainväliselle tasolle on yleisesti todettu 10 vuoden ja 10 000 tunnin määrätietoisen harjoittelun toteuttaminen (Ohtonen & Mikkola 2016, 503–504). Sandbakk ym. (2016) ovat todenneet norjalaisten kansallisen tason hiihtäjien harjoittelun kokonaismäärän olevan keskimäärin 709 tuntia ja kansainvälisesti menestyvien 920 tuntia vuodessa. Kansainvälisellä tasolla menestyvien maastohiihtäjien vuosita-

son kokonaisharjoittelumäärän onkin yleisesti raportoitu olevan noin 800–900 tuntia, josta kestävyysharjoittelun osuus on yli 90 %. Kestävyysharjoittelusta 88–91 % on PK-harjoittelua, 3–7 % VK-harjoittelua ja 5–8 % MK- ja NK-harjoittelua. (Sandbakk ym. 2016)

Kestävyysharjoittelun harjoitusvaikutukset eli kestävyysharjoitteluadaptaatiot muodostuvat harjoittelijan lähtötason sekä harjoituksen keston, tehon ja toistotiheyden avulla (McArdle ym. 2016, 477). Adaptoituminen kestävyysharjoitteluun tapahtuu mekanosensorien eli mekaaniseen voimaan reagoivien biomolekyylien siirtovaikutusten välityksellä, kun adaptaatioihin johtavien geenien prosessointi proteiineiksi käynnistyy (Coffey 2012, 119–124). Kestävyysharjoitteluadaptaatioita ilmenee ainakin solujen aineenvaihdunnassa, hengitys- ja verenkiertoelimistössä, luurankolihasissa sekä hormonitoiminnassa (Mujika 2012, V). Kestävyysharjoittelun keskeisimpien adaptaatioiden seurauksena hapenkäyttökyky ja -saatavuus paranevat elimistössä. Hapensaataavuus paranee, kun sydämen iskutilavuus ja verentilavuus kasvavat kasvattaen sydämen minuuttitulavuutta. Hapenkäyttökyky ja -saatavuus paranevat myös, kun harjoitettujen lihasryhmien paikallisen verenkierron määrä (angiogeneesin seuraus), mitokondrioiden lukumäärä sekä oksidatiivisten entsyymien aktiivisuus kasvavat ja veren hapenkuljetuskyky paranee. (McArdle ym. 2016, 487) Maastohiihtäjien kestävyysharjoittelulla ja muulla harjoittelulla pyritään siis mahdollisimman hyvin kehittämään kestävyysuorituskykyyn vaikuttavia tekijöitä ja näin kestävyysuorituskykyä.

4 HYPOKSIAN FYSIOLOGISET VASTEET JA ADAPTAATIOT

Hypoksialla tarkoitetaan sisäänhengitysilman happiosapaineen laskemista alemmas kuin 150 mmHg. Hypoksia muodostuu joko ilmanpaineen laskusta (< 760 mmHg), jolloin puhutaan hypobaarisesta hypoksiasta (HH) tai sisään hengitettävän ilman hapen osuuden (FIO₂) laskusta (< 20,9 %), jolloin puhutaan normobarisesta hypoksiasta (NH). Normobaarisella tarkoitetaan normaalia ilmanpainetta ja hypobaarisella normaalia alhaisempaa ilmanpainetta. NH muodostetaan keinotekoisesti laskemalla FIO₂:tta korvaamalla osa ilman O₂:sta typellä (N₂), jolloin ilmanpaine säilyy normaalina. Taulukossa 2 on luokiteltu korkeudet merenpinnantason olosuhteista äärimmäisen korkeuden olosuhteisiin ja ilmoitettu niitä vastaavat FIO₂:det. Jokainen 1000 metrin lisäys korkeudessa laskee alveolaarista PO₂:tta noin 5 mmHg. Hypoksia vaikuttaa elimistön fysiologiaan aiheuttaen hypoksiavasteita, joilla elimistö akklimatisoituu eli sopeutuu hypoksian aiheuttamaan hypoksemiaan eli valtimoveren happipitoisuuden laskuun ja heikentyneeseen hapen jakeluun elimistössä. Hypoksiavasteet jaetaan akuutteihin ja kroonisiin vasteisiin niiden ilmenemisnopeuden ja pysyvyyden perusteella. Akuutit vasteet ilmenevät sekuntien, minuuttien, tuntien ja päivien aikana, kun taas kroonisia vasteita ilmenee päivien, viikkojen ja kuukausien aikana. Elimistön fysiologiset hypoksiavasteet ulottuvat elinten ja elinjärjestelmien välittömistä hetkellisistä toiminnallista muutoksista aina pysyviin adaptaatioihin pitkäaikaisessa hypoksiassa oleiluun. (Peltonen & Nummela 2016a, 583–588)

TAULUKKO 2. Korkeusluokat ja niitä vastaavat FIO₂:det (mukaeltu Sinex & Chapman 2015).

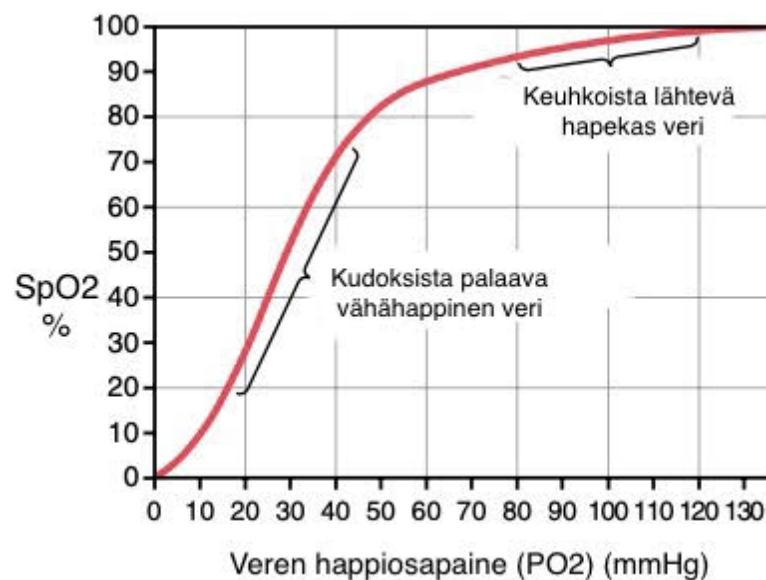
Luokittelu	Korkeus (m)	FIO ₂ (%)
Lähellä merenpinnantasia	<500	19,8–20,9
Alhainen korkeus	500–2000	16,7–19,8
Kohtalainen korkeus	2 000–3 000	14,8–16,7
Huomattava korkeus	3 000–5 500	10,9–14,8
Äärimmäinen korkeus	>5 500	≤10,9

m Metriä, FIO₂ Sisään hengitettävän ilman hapen osuus.

4.1 Hypoksiavasteiden stimuloituminen ja fysiologiset mekanismit

Hypoksian fysiologisten vasteiden ilmeneminen on seurausta happitason ja sen muutosten tunnistamisesta elimistössä (Peltonen & Nummela 2016a, 584–586). Alhainen PO₂ on hypoksian

tärkein ja yleisesti ymmärretty fysiologinen stimuloija elimistössä syntyville hypoksiavasteille (Self ym. 2011). Hypoksian keskeisimmät fysiologiset vasteet ja adaptaatiot liittyvätkin veren hapenkuljetuskykyä kehittäviin fysiologisiin mekanismeihin (Shmidt & Prommer 2010). Useimmat hypoksian fysiologisiin adaptaatioihin tähtäävät mekanismit käynnistyvät solujen transkriptiotekijöiden, kuten HIF-1:n ilmentymisen välityksellä. HIF-1 on keskeisin *hypoksian indusoimiin tekijöihin* (HIFs) lukeutuvista transkriptiotekijöistä, jota ilmenee elimistössä huomattavasti jo tunnin aikana hypoksisissa olosuhteissa (Prabhakar & Semenza 2012). SaO₂:n muutokset hypoksisissa olosuhteissa ilmentävät valtimoveren hapettumisen ja koko perifeerisen verenkierron hapen jakelun muutoksia. Valtimoveren PO₂:n vaikutusta SaO₂:on kuvaa oksihemoglobiinin dissosiaatiokäyrä (kuva 4). (Peltonen & Nummela 2016a, 584–586)



KUVA 4. Oksihemoglobiinin dissosiaatiokäyrä (mukaeltu Hall 2011, 530). SpO₂ %, hemoglobiinin happisaturaatio; mmHg, elohopeamillimetri.

Hypoksian aktivoimat transkriptiotekijät käynnistävät geenien luennan proteiineiksi eli proteiinisynteesin (Peltonen & Nummela 2016a, 584–586). HIF-1:n välityksellä aktivoituvia geenejä ovat ainakin seuraavien hapenkuljetukseen ja energia-aineenvaihduntaan tarvittavien proteiinien geenit: a) angiogeneesiä stimuloivaan *verisuonen endoteelin kasvutekijä-A*:han (VEGF, vascular endothelial growth factor) liittyvät geenit, b) erytropoiesia stimuloivat erytropoietinigeenit, c) energiankäyttöön liittyvät mitokondrioiden geenit, d) anaerobiseen aineenvaihduntaan liittyvät glykolyyttisten entsyymien geenit sekä e) geenit, jotka parantavat typpioksidin saatavuutta ja saavat aikaan vasodilaatiota keuhkoverenkierrossa (Hall 2016, 563–564). Edellä mainitut geenit ovat kuitenkin vain murto-osa geeneistä, joita HIFs aktivoivat (Prabhakar &

Semenza 2012). Hypoksian fysiologisen vasteena muodostuvat proteiinit ovat edellytys useimpien hypoksian fysiologisten adaptaatioiden ilmenemiselle. Hypoksian fysiologisia vasteita ja adaptaatioita ilmenee veren hapenkuljetuskyvyn lisäksi ainakin VO_{2max} :ssä, minuuttitilavuudessa, ventilaatiossa, lihasten toiminnassa, suorituksen taloudellisuudessa sekä elimistön immuuniteetissa. Hypoksiavasteet näissä elimistön fysiologisissa ominaisuuksissa ilmenevät joko suoraan hypoksian seurauksena tai vaihtoehtoisesti veren hapenkuljetuskykyyn liittyvien hypoksiavasteiden seurauksena. (Peltonen & Nummela 2016a, 584–586)

4.2 Hypoksiavasteisiin vaikuttavat tekijät

Hypoksinen annos. Hypoksia-altistuksesta aiheutuvien fysiologisten vasteiden ja adaptaatioiden ilmenemiseen vaikuttaa hypoksinen annos (eng. hypoxic dose). Hypoksinen annos kuvaa altistuksen määrää ja se voidaan ilmaista esimerkiksi tuntimääränä tietyllä luonnollisella korkeudella tai tiettyä korkeutta vastaavissa keinotekoisissa hypoksiaolosuhteissa. (Wilber ym. 2007) Hypoksinen annoksen ilmaisussa on sitemmin ryhdytty käyttämään perinteisen altistustuntien ja korkeuden ilmoittamisen lisäksi ainakin korkeuden (m =metriä) ja altistustuntien (h =tuntia) tuloa eli kilometritunteja ($km \cdot h = m/1\,000 \times h$) (Garvican-Lewis ym. 2016). Hypoksinen annoksen ($km \cdot h$) ja esimerkiksi keskeisen tHb_{massa} -vasteen välillä ei kuitenkaan ole lineaarista suhdetta (Chapman ym. 2014a). Liian pieni hypoksinen annos, eli riittämätön korkeus tai/ja altistuksen kesto, ei todennäköisesti riitä ilmentämään hypoksian fysiologisia vasteita ja adaptaatioita elimistössä. Liian suuri hypoksinen annos, eli liika korkeus tai/ja liian pitkä altistus, voi puolestaan heikentää hyödyllisten vasteiden ja adaptaatioiden ilmenemistä (Nummela ym. 2019) ja harjoittelusta palautumista tai olla terveydelle haitallinen (Wilber ym. 2007). Hypoksinen annoksen vaikutusta tutkittiin muun muassa Heikuran ym. (2018) tutkimuksessa ($n=48$), jossa verrattiin kolmen eri hypoksinen annoksen (keskimäärin: 1 013 $km \cdot h$, 1 320 $km \cdot h$ ja 1 563 $km \cdot h$) aiheuttamaa prosentuaalista muutosta tHb_{massa} :ssa. Tutkimuksessa todettiin, että keskimäärin 1 013 $km \cdot h$:n annoksen aiheuttama vaste oli merkitsevästi pienempi kuin keskimäärin 1 320 $km \cdot h$:n annoksen. Keskimäärin 1 563 $km \cdot h$:n ja 1 013 $km \cdot h$:n annoksien aiheuttamien vasteiden välillä ei puolestaan todettu merkitsevää eroa.

Aiempi tHb_{massa} , rautavarastot, korkeus ja terveydentila. Hypoksinen annoksen lisäksi tHb_{massa} -vasteeseen voivat vaikuttavat ainakin hypoksia-altistusta edeltävä tHb_{massa} ja S-Ferrit:n taso,

korkeus sekä elimistön EPO-vaste. Nummela ym. (2019) tutkivat lukuisten muuttujien: korkeuden, altistusajan sekä ennen altistusta mitattujen tHb_{massa}:n, S-Ferrit:n ja S-hsCRP:n tasojen yhteyttä korkeanpaikanleirin aiheuttaman tHb_{massa}:n (g/kg) muutokseen regressioanalyysillä, mutta totesivat ainoastaan korkeuden olevan siihen tilastollisesti merkitsevästi yhteydessä. Kyseisen tutkimuksen aineistossa kaikkiaan 56 % korkeanpaikanleireistä (82 kpl) sai aikaan positiivisen tHb_{massa}-vasteen. Tarkasteltaessa ainoastaan yli 2 000 m korkeutta vastaavissa olosuhteissa suoritettuja leirejä (52 kpl), positiivinen tHb_{massa}-vaste todettiin 65 %:ssa leireistä. Matala S-hsCRP-pitoisuus tai korkea S-Ferrit-pitoisuus eivät takaa tHb_{massa}:n kasvua hypoksia-altistuksessa, mutta alhainen S-Ferrit-pitoisuus (< 30 µg·L⁻¹) saattaa kuitenkin estää tHb_{massa}-vasteen. Terveystilan tai sairauden vaikutusta tHb_{massa}-vasteeseen tutkittaessa on todettu ja pohdittu muun muassa, ettei tulehdus ja korkea S-hsCRP:n pitoisuus itsessään vaikuta siihen negatiivisesti (Nummela ym. 2019). Terveydellisistä syistä johtuvat keskeytykset harjoittelussa ja vähentynyt harjoittelu on puolestaan todettu olevan yhteydessä tHb_{massa}:n vähenemiseen (Gough ym. 2013). Tutkimuksissa on myös todettu, että rautalisän nauttiminen vaikuttaa tarpeelliselta optimaalisen EPO-vasteen saavuttamiseen ja siten onnistuneeseen sopeutumiseen hypoksia-altistuksessa (Garvican-Lewis ym. 2018).

Sukupuoli. Sukupuolien välisistä eroista tHb_{massa}-vasteeseen korkeanpaikanharjoittelun myötä on olemassa ristiriitaisia tuloksia. Heikura ym. (2018) tiivistivät, ettei aiemmissa tutkimuksissa ole onnistuttu löytämään eroja sukupuolien välisessä vasteessa. He pohtivat tuloksen voivan johtuvan esimerkiksi naisten vähäisemmästä määrästä sukupuolia vertaileissa tutkimuksissa tai lukuisista tutkimuksista, joissa on tutkittu vain miehiä tai naisia. Heikuran ym. (2018) tutkimuksessa tHb_{massa}:n muutos todettiin merkittävästi suuremmaksi naisilla (n=27) kuin miehillä (n=21) kehon painoon suhteutetussa arvossa, mutta absoluuttisten arvojen muutoksessa ei todettu tilastollisesti merkitsevää eroa sukupuolten välillä. Lisäksi prosentuaalinen muutos tHb_{massa}:n kehon painoon suhteutetussa sekä absoluuttisessa arvossa todettiin tilastollisesti merkittävästi suuremmaksi naisilla kuin miehillä. Nummelan ym. (2019) tutkimuksessa todettiin puolestaan tHb_{massa}:n muutos tilastollisesti merkittävästi suuremmaksi miehillä (n=27) kuin naisilla (n=32) niin absoluuttisia kuin kehon painoon suhteutettuja arvoja tarkasteltaessa. Myös prosentuaalinen muutos tHb_{massa}:n kehon painoon suhteutetussa (3,7 % vs. 0,9 %) sekä absoluuttisessa arvossa (3,1 % vs. 0,9 %) oli suurempi miehillä kuin naisilla Nummelan ym. (2019) tutkimuksessa. Nummela ym. (2019) epäilevät oman tutkimuksensa sukupuolieron selittyvän ainakin osittain siitä, että niillä 12:lla, jolla oli alhainen ennen altistusta mitattu S-Ferrit, 11 oli naisia. Nummelan ym. (2019) ja Heikuran ym. (2018) päinvastaisille tuloksille ei ole selkeää

selittävää tekijää, mutta myös ennen altistusta mitatun tHb_{massa} :n tason vaikutusta pidetään yhtenä mahdollisena selittävänä tekijänä.

Yksilöllisyys. Tutkimuksissa määritetty optimaalinen hypoksinen annos voi olla yksilötasolla suuntaa antava hypoksian fysiologisten vasteiden ja adaptaatioiden tavoittelussa. Optimaalinen hypoksinen annos perustellaan siten, että se tuottaa halutun hematologisen vasteen tutkimuksissa vähintään 50 %:lle tutkittavista, muttei aiheuta yli 50 %:lle vuoristotaudin tai alipalautumisen oireita (Wilber ym. 2007). Muun muassa Nummela ym. (2019) ovat todenneet hypoksian fysiologisten vasteiden ja adaptaatioiden ilmenemisessä ja voimakkuudessa esiintyvän merkittävää yksilöllistä vaihtelua niin yksilöiden välillä kuin yksilöiden sisäisesti. Suurta yksilöiden välistä tai/ja sisäistä vaihtelua on todettu ainakin tarkasteltaessa EPO-vastetta (Chapman ym. 1998, Chapman ym. 2014a) ja tHb_{massa} :n muutosta (mm. Hauser ym. 2016, Hauser ym. 2017, McLean ym. 2013, Nummela ym. 2019, Robertson ym. 2010b, Wachsmuth ym. 2012). Yksilöiden väliset erot esimerkiksi Hauserin ym. (2016) tutkimuksen korkeanpaikanharjoittelujaksolle osallistuneiden hyvätasoisten triathlonistimiesten ($n=21$) prosentuaalisessa tHb_{massa} -vasteessa olivat suuria, sillä HH:n ryhmässä vaste vaihteli 0,1 % laskun ja 10,6 % kasvun välillä ja NH:n ryhmässä vaste vaihteli 1,4 % laskusta 7,7 % kasvuun. Myös Nummelan ym. (2019) tutkimuksessa yhteensä 82 korkeanpaikanharjoitusleirin aineistosta ($n=59$) todettiin kestävyysurheilijoiden absoluuttisen tHb_{massa} :n muutoksen vaihtelevan merkittävästi eri yksilöiden välillä ($-84,3$ g - $+91,0$ g).

Yksilön sisäinen vasteiden vaihtelu. Yksilöiden välisten hypoksiavasteiden vaihtelun lisäksi vaihtelua on todettu myös yksilöiden sisäisesti, eli esimerkiksi toisistaan erillisten korkeanpaikanleirien välillä. Robertson ym. (2010b) todistivat ensimmäisen kerran kohtalaisen pienellä otannalla ($n=8$) kolmen viikon korkeanpaikanharjoittelujakson (NH) aiheuttamassa keskimääräisessä tHb_{massa} :n muutoksessa kohtalaisen, mutta epäselkeän negatiivisen korrelaation eri altistusten välillä. Myös Nummela ym. (2019) tutkivat vähintään kaksi korkeanpaikanleiriä suorittaneiden ($n=15$) yksilöiden sisäisen tHb_{massa} :n muutoksen vaihtelua, josta selvisi 27 %:lla vasteen olleen aina positiivinen, 13 %:lla aina negatiivinen ja jopa 60 %:lla ilmenneen sekä positiivisia että negatiivisia vasteita eri korkeanpaikanleirien välillä. Tutkimuksessa todettiinkin, ettei korrelaatiokerroin kahden onnistuneen korkeanpaikanleirin välillä ollut tilastollisesti merkitsevä, joka ilmentää suurta vaihtelua yksilöllisessä vasteessa eri altistusten välillä. Samansuuntaisia tuloksia tHb_{massa} :n muutoksen suuresta vaihtelusta eri altistusten välillä ovat saaneet muun muassa Wachsmuth ym. (2013), vaikka he totesivatkin EPO-vasteen eri altistusten

välillä tilastollisesti erittäin toistettavaksi. Yksilöiden sisäistä vaihtelua hypoksiavasteissa selittävä fysiologinen tekijä voi olla muun muassa erilainen elimistön tila hypoksia-altistuksen lähtötilanteessa, johon voivat vaikuttaa esimerkiksi altistusta edeltävä harjoittelu, palautuminen ja terveydentila. Tutkimusnäyttöön peilaten on todettu perustelluksi selvittää ja seurata yksilöllisesti hypoksian fysiologisia vasteita ja adaptaatioita, niihin vaikuttavia tekijöitä sekä niiden toistettavuutta elimistössä, jotta urheilijan on mahdollista saavuttaa korkeanpaikanharjoittelun halutut hyödyt suorituskyvyn parantamisessa. (Nummela ym. 2019)

Normobaarisen ja hypobaarisen hypoksian vasteiden erot. Coppelin ym. (2015) systemaattisessa katsauksessa todettiin, että NH:n ja HH:n fysiologisten vasteiden välillä on joitakin eroja, mutta ne ovat melko pieniä. NH:n ja HH:n välinen merkitsevä ero fysiologisissa vasteissa ilmeni katsauksen perusteella muun muassa ventilaatiossa sekä uloshengitetyn typpioksidin tasossa, jotka molemmat olivat korkeammat NH:ssa. Muun muassa VO_{2max} :n ja tHb_{massa} :n vasteissa puolestaan ei todettu eroa NH:n ja HH:n välillä. Katsauksen johtopäätöksiä rajoittaa kuitenkin muun muassa se, että tutkimuksissa raportoitujen NH:n ja HH:n välisissä vaste-eroissa on huomattavaa epä johdonmukaisuutta. (Coppel ym. 2015) Hauserin ym. (2016) tutkimuksessa todettiin samanlainen keskimääräinen tHb_{massa} -vaste NH:ssa ja HH:ssa 2 250 m:n korkeudessa tai sitä vastaavissa olosuhteissa suoritettua korkeanpaikanharjoittelujakson seurauksena, kun hypoksinen annos oli samansuuruinen (230 vs 238 h). NH:ssa ja HH:ssa suoritettavan korkeanpaikanharjoittelujakson fysiologisissa vasteissa ja adaptaatioissa ei siis olla tieteellisesti todettu suuria eroavaisuuksia, ja muun muassa hyvin keskeisessä hypoksiavasteessa eli tHb_{massa} -vasteessa on todettu samanlainen keskimääräinen vaste NH:lle ja HH:lle.

4.3 Fysiologiset vasteet ja adaptaatiot hengitys- ja verenkiertoelimistössä

Hypoksian fysiologisten vasteiden ja adaptaatioiden tarkoituksena on toimia kompensoivina mekanismeina, joilla elimistö pyrkii parantamaan valtimoveren hapettumista ja hapen jakelua kudoksille. (Peltonen & Nummela 2016a, 585–586) Tässä luvussa käydään läpi hengitys- ja verenkiertoelimistön vasteita ja adaptaatioita akuutissa ja kroonisessa hypoksiassa levossa sekä submaksimaalisen kuormituksen aikana.

Akuutista hypoksiasta johtuva hypoksemia käynnistää hengityselimistössä välittömästi hypoksiseksi ventilatoriseksi vasteeksi kutsutun hermostollisen refleksin, joka kiihdyttää ventilaatiota

(Levine 2000, 259–280, Peltosen & Nummelan 2016a, 587–590 mukaan). Hypoksisen ventilaatorisen vasteen ansiosta levonaikainen SaO₂:n taso laskee urheilijoiden käyttämien korkeuksien (< 3000 m) tasoisessa hypoksiassa vain maltillisesti (alimmillaan noin 90 %) (Wagner 2001, Peltosen ja Nummelan 2016a, 587–590 mukaan). Akuutin hypoksian fysiologisia vasteita verenkiertoelimistössä ovat sykkeen ja sydämen minuuttitulavuuden nousu sekä perifeerisessä verenkierrossa perifeerisen vastuksen ja verenpaineen lasku (Levine 2000, 259–280, Peltosen & Nummelan 2016a, 590–591 mukaan). Lisäksi plasmatilavuus pienenee 12–24 tunnin aikana hypoksiassa noin 10–15 %, jolloin Hb-konsentraatio ja hematokriitti nousevat (Hannon ym. 1969, Peltosen & Nummelan 2016a, 591 mukaan). Keuhkoverenkierrossa akuutti hypoksia aiheuttaa vasokonstriktiota (Brimioulle ym. 1996, Peltosen & Nummelan 2016a, 590–591 mukaan), mutta verenpaine säilyy samana kuin merenpinnantason olosuhteissa samalla sydämen minuuttitulavuuden tasolla (Reeves ja Stenmark 2001, Peltosen & Nummelan 2016a, 592 mukaan). EPO:n pitoisuus seerumissa kohoaa hypoksiassa ensimmäisistä tunneista alkaen ja voi yli kaksinkertaistua ensimmäisten kahden vuorokauden aikana. Tämän jälkeen EPO:n pitoisuus kääntyy laskuun ja palaa merenpinnantason arvoihin kahdessa viikossa. EPO:n vaikutuksesta kiihtyvä erythropoiesi lisää akuutisti trasferriinireseptorin (P-TfR) pitoisuutta plasmassa sekä retikulosyyttien (E-retik) määrää veressä. (Eckardt 1989, Milledge & Bärtzsch 2014, Peltosen & Nummelan 2016a, 585–594 mukaan; Piehl ym. 1998)

Elimistön sopeutumismekanismien seurauksena kroonisessa hypoksiassa veren hapenkuljetuskyky parantuu ja valtimoveren happipitoisuus palautuu lähelle merenpinnantason arvoja (Amann ym. 2013). Valtimoveren happipitoisuuden palautumiselle keskeisimpiä hypoksiavasteita ovat verenkiertoelimistön hematologiset adaptaatiot eli punasolumassan ja tHb_{massa}:n lisääntyminen ilman veren määrän lisääntymistä. (Peltonen & Nummela 2016a, 594) Muita kroonisen hypoksian seurauksena ilmeneviä vasteita ovat sydämen minuuttitulavuuden lasku (ainakin riittävän voimakkaassa hypoksiassa) (Vogel ym. 1974, Peltosen & Nummelan 2016a, 591 mukaan), keuhkoverenkierron vastuksen ja valtimopaineen kasvu (Reeves ym. 2001, Peltosen & Nummelan 2016a, 592 mukaan), sykkeen ja perifeerisen verenkierron verenpaineen nousu (Levine 2000, 259–280, Peltosen & Nummelan 2016a, 590–591 mukaan), seerumin ferritiinipitoisuuden lasku (Robertson ym. 2010b) sekä angiogeneesi (Peltonen & Nummela 2016a, 585). Onnistuneella hypoksia-altistuksella voidaan saavuttaa tilapäisesti 2–10 % kasvu tHb_{massa}:ssa (Rusko ym. 2004) ja jokainen gramman lisäys tHb_{massa}:ssa puolestaan aikaansaa neljän millilitran nousun VO₂:ssa parantaen VO_{2max}:ä (Shmidt & Prommer 2010). Kehonpainon prosentuaa-

lisen muutoksen ja kehonpainoon suhteutetun tHb_{massa} :n muutoksenvälillä on todettu merkittävä yhteys (Hauser ym. 2018), joka on otettava huomioon tHb_{massa} :n muutosta tarkasteltaessa. Punasolumassan ja tHb_{massa} :n lisääntymistä ilman veren määrän lisääntymistä kuvaavat absoluuttiset ja kehonpainoon suhteutetut muutokset punasolumassassa (g, g/kg), hemoglobiinimassassa (g, g/kg), hemoglobiinitilavuudessa (ml, ml/kg) ja veritilavuudessa (ml, ml/kg) (Peltonen & Nummela 2016a, 594).

Hypoksisissa olosuhteissa suoritettavassa fyysisessä kuormituksessa on tärkeää huomioida, että elimistön aerobinen kapasiteetti ($VO_{2\text{max}}$) alenee akuutisti urheilijoilla yksilöllisesti 4–10 % jokaista lisääntyneen korkeuden tuhatta metriä kohden (Wehrin & Hallen 2006). Submaksimaalisen vakiokuormituksen aikana alveoli-arteria happiosapaine-ero on jonkin verran suurempi kuin normoksiassa (Wagner ym. 1986, Peltosen & Nummelan 2016a, 589 mukaan). Tästä syystä myös SaO_2 alenee jo alhaisilla kuormitustasoilla hypoksiassa (Peltonen ym. 1999). Akuutissa hypoksiassa submaksimaalisessa vakiokuormituksessa elimistön sopeutumismekanismejä ovat ventilaation tason nousu ja sydämen minuuttitilavuuden kasvu sykkeen nousun seurauksena normoksiaan verrattuna (Peltonen ym. 2001). Kroonisessa hypoksiassa submaksimaalisen kuormituksen aikainen alveoli-arteria happiosapaine-ero pienenee, SaO_2 alkaa kohota (Wagner 2001, Peltosen ja Nummelan 2016a, 587–590 mukaan) ja sydämen minuuttitilavuus laskee (McArdle ym. 2015, 610) tietyllä $VO_{2\text{max}}$:n tasolla. Syke voi kuitenkin olla koholla submaksimaalisessa kuormituksessa normoksiaan verrattuna kroonisen hypoksian aikaansaamasta sydämen minuuttitilavuuden laskusta huolimatta. (McArdle ym. 2015, 610) Kuten jo aiemmin on todettu $VO_{2\text{max}}$ parantuu kroonisessa hypoksiassa sopeutumismekanismien ansiosta, pysyen kuitenkin alempana kuin merenpinnantason $VO_{2\text{max}}$. Tietyin vakiokuormituksen hapenkulutuksen taso on siis alhaisempi kroonisessa hypoksiassa akuuttiin verrattuna.

4.4 Hypoksiavasteiden säilyminen

LHTL-jaksolta merenpinnantasolle paluun jälkeen suorituskyvyn muutosten takana vaikuttavia hengitys- ja verenkiertoelimistön fysiologisia tekijöitä ovat veren hapenkuljetuskyvyn muutokset ja hengityksen mukautuminen (Peltonen & Nummela 2016b, 597). tHb_{massa} on suurimmillaan heti hypoksia-altistuksen päätyttyä ja laskee hitaasti ensimmäiset kaksi viikkoa merenpinnantason olosuhteissa. Tämän jälkeen tHb_{massa} :n lasku kiihtyy alentuneen seerumin EPO:n käynnistämän neosytolyysin eli nuorien punasolujen tuhoutumisen seurauksena ja palaa ennen

korkeanpaikanharjoittelua mitatulle tasolle neljässä viikossa. (Alfrey ym. 1997) Suorituskyvyn kannalta hyödyllisiä hengityksen toiminnan muutoksia hypoksiassa ovat maksimaalisen hengityskapasiteetin lisääntyminen ja hengitykseen kuluvan energian pieneneminen. Hengitykseen kuluvan energian määrä kasvaa ensimmäisen merenpinnantason olosuhteissa vietetyn viikon jälkeen ja palautuu ennen korkeanpaikanharjoittelua mitatulle tasolle. (Chapman ym. 2014b) Korkeanpaikanharjoittelun seurauksena saavutettujen suorituskyvyllä edullisten hengitys- ja verenkiertoelimistön fysiologisten vasteiden ja adaptaatioiden pysyvyys on siis vain väliaikaista. Vaikka hypoksian fysiologiset vasteet ja adaptaatiot hengitys- ja verenkiertoelimistössä ovat vain väliaikaisia, ne hyödyttävät kuitenkin kiistatta kestävyysuorituskykyyn vaikuttavia tekijöitä, jotka parantavat täten siirtovaikutuksilla kestävyysuorituskykyä.

Hypoksia-altistuksen päättymisen jälkeen merenpinnantason suorituskyvyssä ilmenee perinteisen näkemyksen mukaan muutamia mahdollisesti tunnistettavia vaiheita. Ensimmäisten päivien aikana (päivinä 1–7) korkeanpaikanharjoittelun päättymisestä suorituskyvyssä on havaittu parannuksia, jonka jälkeen (päivinä 3–14) suorituskyky heikkenee ja harjoittelunsietokyky huononee. Tämän jälkeen suorituskyvyssä on ilmennetty pidempi tasainen vaihe päiviin 18–20 tai pidempään, jonka jälkeen esiintyy vielä mahdollisesti suorituskyvyn paranemisen vaihe noin 36–46 päivään asti merenpinnantasolle paluusta. (Sinex & Chapman 2015) Perinteisen näkemyksen ensimmäiselle/ensimmäisille vaiheille on olemassa eniten tieteellistä näyttöä ja muun muassa kansallisen ja huipputasojuoksijoilla suorituskyvyn on todettu parantuneen joko 3000 m tai 5000 m juoksussa ensimmäisten päivien aikana LHTL-jakson päättymisestä (Levine & Stray-Gundersen 1997; Robertson ym. 2010a). Toisaalta on myös todettu, että monet urheilijat saavuttavat parhaan harjoittelun ja hypoksia-altistuksen yhteisvaikutuksen päivien 14–28 välillä merenpinnantasolle paluusta (Peltonen & Nummela 2016b, 597–598).

Suorituskyvyn muutosten merenpinnantasolle paluun jälkeen on tosin havaittu olevan hyvin vaihtelevia ainakin eri yksilöiden ja urheilulajien välillä, joten suorituskyvyn muutokset eivät välttämättä vastaa kaikissa tilanteissa perinteisiä vaiheita. Myöhempien vaiheiden suorituskykyvasteita on tutkittu vähemmän ja tuloksissa esiintyy vaihtelua. Tulosten vaihtelun on ajateltu johtuvan mahdollisesti esimerkiksi siitä, että tutkimusasetelman vakioiminen on lukuisista syistä haasteellista. Suorituskyvyn muutokset viikkoja merenpinnantasolle paluun jälkeen ovat siis huonommin tunnettuja ja mahdollisesti vaihtelevampia ensimmäisiin vaiheisiin verrattuna. (Sinex & Chapman 2015)

5 LIVE HIGH TRAIN LOW -KORKEANPAIKANHARJOITTELMALLI

Kiinnostus korkeanpaikanharjoittelusta ja sen hyödyistä alkoi 1960-luvun lopulla. Nykyisin korkeanpaikanharjoittelu tai hypoksia-altistus sen monine mahdollisine toteutustapoineen on yksi oleellinen osa kestävyysurheilijoiden, kuten esimerkiksi maastohiihtäjien, vuosiharjoitus-suunnitelmaa. Korkeanpaikanharjoittelun tärkein syy on sama kuin muussakin harjoittelussa eli suorituskyvyn parantaminen. Keskeisin ero merenpinnan tason harjoitteluun korkeanpaikanharjoittelussa on kroonisen hypoksian aikaansaamat fysiologiset vasteet elimistössä. (Peltonen & Nummela 2016b, 595). Onnistuneen korkeanpaikanharjoittelun fysiologiset vasteet mahdollistavat korkeammilla tehoilla harjoittelun, joka puolestaan voi mahdollistaa kestävyysuorituskykyyn vaikuttavien hermolihaskäytännön ja verenkiertoelimistön tekijöiden kehittymistä (Rusko ym. 2004). Korkeanpaikanharjoittelu on hapenkuljetuskapasiteetin ja suorituskyvyn parantamisen lisäksi tärkeä tekijä elimistön kokonaisvaltaisessa akklimatisoitumisessa eli sopeutumisessa korkeanpaikanolosuhteissa järjestettävien kilpailujen ympäristöolosuhteisiin (Wilber ym. 2007).

Benjamin Levine ja James Stray-Gundersen kehittivät 1990-luvun alussa *live high train low* -korkeanpaikanharjoittelumallin (LHTL), koska urheilijoilla oli muodostunut perinteisestä *live high train high* -korkeanpaikanharjoittelumallista (LHTH) negatiivisia kokemuksia koskien harjoittelun toteuttamista korkeanpaikanolosuhteissa (Wilber ym. 2007). LHTL:ssä asutaan korkeanpaikanolosuhteissa, mutta harjoittelu toteutetaan matalamman korkeuden olosuhteissa tai merenpinnan tason olosuhteissa. Merenpinnan tasoa vastaavissa olosuhteissa olosuhteet ovat normoksiset eli hapen osapaine on normaali. LHTH:ssä puolestaan sekä asutaan että harjoitellaan korkeanpaikanolosuhteissa. LHTH:iin liittyvät negatiiviset kokemukset on yhdistetty urheilijoiden haasteisiin tuottaa sellaista harjoitteluintensiteetin tasoa ja hapen jakelua elimistössä, jotka tarvitaan tuottamaan tai säilyttämään suorituskykyyn positiivisesti vaikuttavat fysiologiset muutokset. LHTL:ssä asuminen korkealla luo olosuhteet, joissa elimistö akklimatisoituu hypoksiaan, mutta harjoittelu matalammalla säilyttää merenpinnan tason harjoitteluintensiteetin ja hapen jakelun. Lupaavat tulokset LHTL:n toimivuudesta edistivät mallin kehittymistä, ja muun muassa suomalainen Heikki Rusko kehitti vielä 1990-luvulla LHTL:n toteuttamista helpottavan typpilaimennusmenetelmän. Muita LHTL:n toteuttamisessa käytettäviä menetelmiä ovat esimerkiksi luonnonmukaisen vuoriston menetelmä ja lisähappimenetelmä. (Wil-

ber ym. 2007) Suomessa puhutaan yleisesti alppimajoista, kun tarkoitetaan esimerkiksi typpi-laimennusmenetelmää hyödyntäviä keinotekoisia hypoksiaolosuhteita esimerkiksi tietyssä huoneessa tai huoneistossa.

Korkeanpaikanharjoittelujakso tulee toteuttaa korkeanpaikanharjoittelutapaan nähden optimaalisesti, jotta suorituskykyä voidaan parantaa. Optimointi vaatii tarkkaa tapauskohtaista suunnittelua muun muassa asumiskorkeuteen, harjoittelujaksoa edeltävään ja sitä seuraavaan harjoitteluun, harjoittelujakson keston sekä harjoitussisältöihin liittyvien tekijöiden osalta. Lisäksi korkeanpaikanharjoittelujakson suunnittelussa on keskeistä valmistella ja pohtia akklimatisoitumisen ja vasteiden seurannan toteuttamista sekä nesteytykseen ja ravitsemukseen liittyviä tekijöitä. (Peltonen & Nummela 2016b, 595–600) Korkeanpaikanharjoitteluun ja korkeanpaikanolosuhteisiin akklimatisoitumisen ongelmiin liittyviä riskejä ovat esimerkiksi yleinen akuutti vuoristotauti (AMS, acute mountain sickness) (Roach ym. 2018) sekä vakavammat keuhkoödeema ja aivoödeema, joiden ilmeneminen on harvinaista alle 4 000 m:n korkeudessa (Eide & Asplund 2012). AMS:n diagnosoinnissa ja vakavuuden arvioinnissa on hyödyllistä käyttää AMS:n oirekartoitukseen perustuvaa *the Lake Louise AMS* -arvoa (Roach ym. 2018).

LHTL on todettu tutkimusten perusteella parhaaksi toteutusmuodoksi korkeanpaikanharjoittelulle, mikäli tavoitteena on parantaa merenpinnantason suorituskykyä (Sinexin & Chapmanin 2015). On myös olemassa joitain viitteitä, että LHTL:n yhteydessä suoritettavalla ajoittaisella hypoksiaharjoittelulla (IHT, intermittent hypoxic training) voidaan saavuttaa tehostava vaikutus suorituskyvyn parantamisessa (Robertson ym. 2010a; Sinex & Chapman 2015). Rusko ym. (2004) esittivät, että hematologisten vasteiden ilmeneminen LHTL-jakson myötä on mahdollista, kun jakso on vähintään kolmen viikon kestoinen, päivittäinen hypoksia-altistusaika yli 12 tuntia ja toteutettu 2 100–2 500 m:n korkeudessa/korkeutta vastaavassa hypoksiassa. Chapman ym. (2014a) puolestaan totesivat tutkimuksessaan 2 000–2 500 m:n korkeudessa toteutetun neljän viikon mittaisen LHTL:n olevan optimaalinen merenpinnantason suorituskyvyn parantamisessa. Samassa tutkimuksessa alle 2 000 ja yli 2 500 m:n korkeudessa neljän viikon LHTL:n suorittaneilla ilmeni yhtä suurelle hypoksiselle annokselle samanlainen punasolumassavaste, muttei samanlaista merenpinnantason suorituskyvyn paranemista kuin 2 000–2 500 m:n korkeudessa asuneilla. Chapman ym. (2014a) tekivätkin johtopäätöksen, ettei hypoksian aiheuttama erytropoieettinen vaste yksinään riitä parantamaan merenpinnantason suorituskykyä, vaikka saattaakin vaikuttaa siihen.

6 TUTKIMUSONGELMAT JA HYPOTEESI

1. Kuinka neljän viikon alppimajajakso vaikuttaa koehenkilön tHb_{massa} :aan ja millaisia muutoksia tHb_{massa} :ssa tapahtuu alppimajakson jälkeen?

Hypoteesi: Optimaalisella suoritettulla LHTL-jaksolla voidaan saavuttaa tHb_{massa} :ssa tilapäisesti 2–10 % lisäys (Rusko ym. 2004). tHb_{massa} on suurimmillaan heti hypoksia-altistuksen päätyttyä ja palaa ennen korkeanpaikanharjoittelua mitatulle tasolle neljässä viikossa (Alfrey ym. 1997).

2. Kuinka neljän viikon alppimajajakso vaikuttaa hengitys- ja verenkiertoelimistön toimintakykyä kuvaavaan $VO_{2\text{max}}$:yyn ja millaisia muutoksia siinä tapahtuu alppimajakson jälkeen?

Hypoteesi: Jokainen gramman lisäys tHb_{massa} :ssa aikaansaa neljän millilitran nousun VO_2 :ssa parantaen $VO_{2\text{max}}$:ä (Shmidt & Prommer 2010). Korkeanpaikanharjoittelun päätyttyä merenpinnantason suorituskyvyssä esiintyy perinteisen näkemyksen mukaan vaihtelua (Sinex & Chapman 2015).

3. Miten hypoksia vaikuttaa koehenkilön valtimoveren happipitoisuuteen?

Hypoteesi: Levonaikainen SaO_2 :n taso laskee hengitys- ja verenkiertoelimistön hypoksiavasteiden ansiosta vain maltillisesti ($> 90\%$) PO_2 :n ollessa yli 60 mmHg (FIO_2 yli 14,8 %) (Wagner 2001, Peltosen ja Nummelan 2016a, 587–590 mukaan).

4. Kuinka neljän viikon alppimajajakso vaikuttaa tutkittavan verimuuttujiin ja millaisia muutoksia niissä tapahtuu alppimajakson jälkeen?

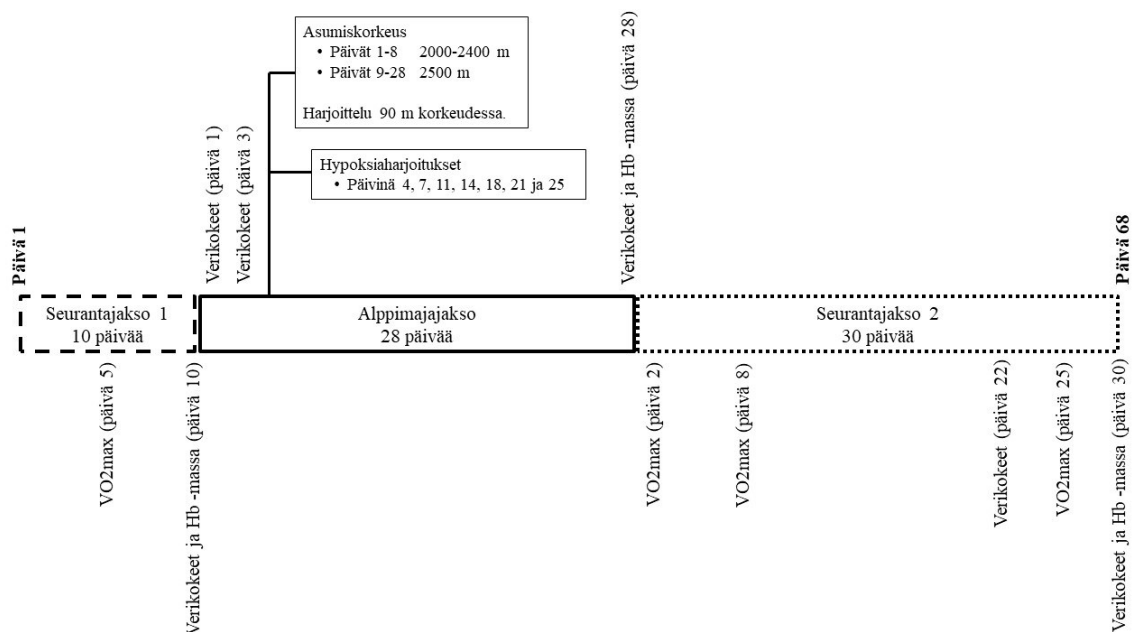
Hypoteesi: Erytropoieesin aktivoituminen lisää akuutisti EPO:n pitoisuutta seerumissa. EPO:n pitoisuus seerumissa palaa lähtötasolle kahdessa viikossa. (Eckardt 1989, Milledge & Bärtsh 2014, Peltosen & Nummelan 2016a, 585–594 mukaan) Seerumin ferritiinipitoisuuden on todettu laskevan kroonisessa hypoksiassa (Robertson ym. 2010b). Veren hapenkuljetuskyvyn kasvun voidaan odottaa vaikuttavan positiivisesti veren hematokriittiin sekä mahdollisesti koveren yksittäisen punasolun keskimääräisen hemoglobiinimassan ja yksittäisen punasolun keskimääräisen Hb:n osuuteen punasolun tilavuudesta.

7 MENETELMÄT

Tämän tapaustutkimuksen aineisto kerättiin osana laajempaa Jyväskylän yliopiston tutkimusprojektia nimeltä *Korkeanpaikan tutkimus, Vuokatti*. Tutkimus alkoi Vuokatissa huhtikuussa 2021. Tutkimuksessa oli Jyväskylän yliopiston eettisen lautakunnan hyväksymä lausunto. Tässä kandidaatintutkielmassa tehtiin yhden koehenkilön tapaustutkimus kyseisen tutkimusprojektin aineistosta. Tämän tutkimuksen tavoitteena oli selvittää neljän viikon *live high train low* -korkeanpaikanharjoittelumallin mukaisesti suoritetun alppimajakajakson fysiologisia vasteita naismaastohiihtäjän hengitys- ja verenkiertoelimistössä.

7.1 Tutkimusasetelma

Tutkimus koostui kolmesta vaiheesta: seurantajaksosta 1, alppimajakajaksosta ja seurantajaksosta 2. Tutkimus kesti kokonaisuudessaan yhdeksän viikkoa ja viisi päivää (yht. 68 päivää). Ensimmäinen seurantajakso (seurantajakso 1) kesti 10 päivää, alppimajakajakso 28 päivää ja jälkimmäinen seurantajakso (seurantajakso 2) 30 päivää. Kuvassa 5 on havainnollistettu tutkimuksen aikajana, keskeisimpien mittausten ajankohdat sekä alppimajakajakson asumis- ja harjoittelukorkeuksiin liittyviä tietoja.



KUVA 5. Tutkimuksen vaiheet ja eri vaiheissa tehdyt mittaukset.

Alppimajajakson ajan tutkittava asui 2 000–2 500 metrin korkeutta vastaavissa olosuhteissa alppimajassa (Vuokatti Sport, Sotkamo, Suomi), eli keinotekoisesti typpilaimennusmenetelmällä hypoksisiksi olosuhteiksi luodussa huoneistossa. Hypoksiset olosuhteet muodostettiin huoneistoon K2-2500 High Flow Series -laitteistolla (Hypoxico, Bickenbach, Saksa). Tutkittavaa ohjeistettiin viettämään vähintään 12 tuntia päivässä alppimajassa, mutta suositus oli oleilla alppimajassa mahdollisimman paljon hypoksiavasteen maksimoimiseksi. Tutkittavan viettämä aika alppimajassa oli keskimäärin 17,1 tuntia päivässä. Alppimajajakson alussa toteutettiin sopeutusjakso asumiskorkeuteen. Tavoitteena oli suorittaa sopeutusjakso siten, että asumiskorkeus olisi ollut ensimmäisen viikon ajan 2 250 metriä, jonka jälkeen korkeus pyrittiin nostamaan 2 500 metriin. Teknisten haasteiden vuoksi asumiskorkeuden toteuma oli seuraava: ensimmäisenä päivänä 2000 m, toisena päivänä 2 100 m, kolmannesta kuudenteen päivään 2 300 m, seitsemäntenä ja kahdeksäntenä päivänä 2 400 m ja yhdeksäntenä päivänä ja siitä eteenpäin 2 500 m. Päivänä 25 alppimajan korkeus oli pudonnut yön aikana sähkökatkoksen vuoksi ja korkeus oli ollut määrittelemättömän ajan 1 500–2 500 m, kunnes tilanne huomattiin aamulla. Kaikki muu harjoittelu paitsi hypoksiaharjoitukset (ks. luku 7.3) toteutettiin merenpinnantasoa vastaavissa olosuhteissa (Vuokatti, Sotkamo, Suomi, 90 m) tutkimusjakson aikana.

7.2 Koehenkilö

Tutkimukseen osallistui 16 nuorten tai aikuisten maajoukkueeseen tai hyvälle kansalliselle tasolle kuuluvaa aktiivista maasto- tai ampumahiihtäjää. Tämän tutkimuksen koehenkilöksi valittiin satunnaisesti vapaaehtoinen 27-vuotias ja kansallisella tasolla kilpaileva naismaastohiihtäjä. Kaksi kuukautta ennen tutkimuksen alkua koehenkilön rautavarastojen kokonaismäärä tarkastettiin olevan riittävällä tasolla ($>30 \mu\text{g/l}$) alppimajajakson suorittamiselle. Lisäksi tutkittava söi rautalisää suun kautta otettavina tabletteina kuukauden ajan ennen alppimajajaksoa ja koko alppimajajakson ajan. Tutkittava sai kestävyysurheiluun perehtyneen ravitsemusterapeutin ohjeet ravitsemukseen ja nesteytykseen korkeanpaikanharjoittelun ajaksi. Tutkittavalle tehtiin selväksi hänen oikeutensa ja velvollisuutensa tutkittavana sekä tutkimukseen liittyvät riskit ja edut. Tutkittava allekirjoitti tutkimukseen suostumuslomakkeen ennen ensimmäisiä mittauksia.

Tutkimuksen alku sijoittui vuosiharjoitussuunnitelmallisesti kausien 2020–2021 ja 2021–2022 vaihteeseen. Ennen alppimajajaksoa tutkittavalla oli kahden viikon kevyt harjoitusjakso kilpailukauden päätteeksi ja alppimajajakson alku sijoittui uuden harjoituskauden alkuun. Tutkittava

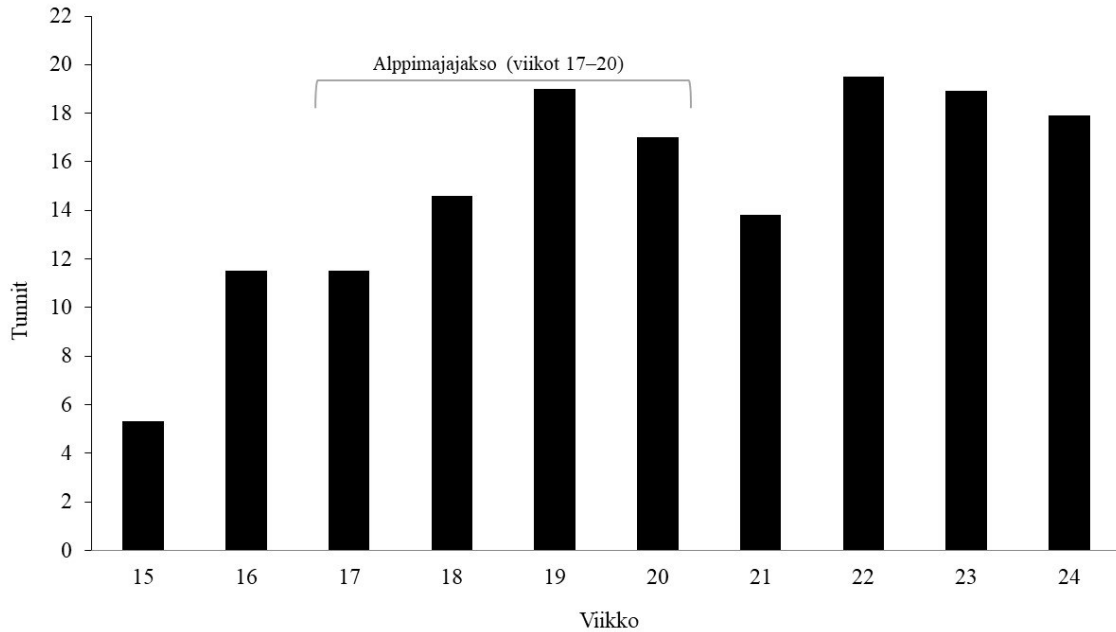
ja hänen valmentajansa suunnittelivat harjoitusohjelman huomioiden tutkimusryhmän antamat suulliset suositukset. Alppimajakajakson aikana pyrittiin harjoittelemaan maltillisesti sekä harjoittelutehojen että -määrien puolesta. Etenkin alppimajakajakson alussa pyrittiin varovaisuuteen, jotta elimistön kokonaiskuormitus ei nousisi liian korkeaksi harjoittelun ja hypoksisten olosuhteiden yhdistelmästä.

Tutkittava täytti sähköistä eLogger-harjoituspäiväkirjaa (eSportwise Oy, Espoo, Suomi), jonka viikoittaisista yhteenvedoista (liite 2) tarkasteltiin harjoitusmäärää (h) ja eri tehoryhmien harjoittelumääriä (h). Taulukossa 3 ja kuvassa 6 on yhteenveto tutkittavan harjoittelusta tutkimusjakson ajalta vuodelta 2021 (viikot numeroitu kalenterivuoden viikkonumeroin). Taulukon 3 tuntimäärät on ilmoitettu kymmenen minuutin ja prosenttiosuudet prosentin tarkkuudella. Taulukossa toteutuma on jaettu kolmeen jaksoon: viikot 15–16, viikot 17–20 ja viikot 21–24, jotka vastaavat 1–3 päivän tarkkuudella tutkimuksen eri vaiheita. Harjoittelussa painotettiin aerobista peruskestävyysharjoittelua ja voimaharjoittelua. Tehoharjoittelua tehtiin tutkimusjakson aikana ominaisuuksia ylläpitävänä harjoitteluna. Harjoitussuunnitelmaa muokattiin jakson aikana noin viiden päivän ajan nyrjähtäneen nilkan vuoksi. Lisäksi tutkittava kirjasi ylös harjoituskohtaiset harjoituspäiväkohtaiset koetut tuntemukset asteikolla 0–10 (0= erittäin huono, 10= erittäin hyvä) ja koetut kuormitukset Borgin (1998, 104) asteikolla 0–10. Koetun kuormituksen ja tuntemusten kirjaamisella seurattiin, miten harjoittelu sujui ja miten harjoitusten kuormitus ja niistä palautuminen toteutui tutkimusjakson aikana. Tutkittava koki harjoitukset keskimäärin melko raskaiksi (4/10) ja harjoituskohtainen koettu tuntemus oli keskimäärin melko hyvä (6/10) tutkimusjakson kaikissa vaiheissa. Harjoitustuntemus oli 5/10 tai sitä alempi 14 kertaa alppimajakajaksolla, 11 kertaa seurantajaksoilla 2 ja vain yhden kerran seurantajaksoilla 1.

TAULUKKO 3. Tutkittavan harjoittelumäärät ja eri harjoitteluosa-alueiden osuudet tutkimuksen ajankohdan ajalta vuodelta 2021.

Ajankohta vuonna 2021	Kokonaismäärä (hh:min)	PK-harj. osuus	Teho-harj. osuus	Voima-harj. osuus	Muu* harj.
Viikot 15–16	16:50	78 %	4 %	18 %	(<1 %)
Viikot 17–20	62:00	77 %	7 %	16 %	(<1 %)
Viikot 21–24	70:10	81 %	6 %	12 %	1 %
Yhteensä	149:00				

* Nopeus-, tuki- tai taitoharjoittelu; hh:min, tunnit:minuutit harj., harjoittelu; PK, peruskestävyys.



KUVA 6. Tutkittavan viikoittaiset harjoitustunnit tutkimuksen ajankohdan ajalta.

7.3 Tutkimusaineiston keräys ja analysointi

Tässä kappaleessa käydään läpi ne aineistonkeruumenetelmät, joita tutkittava suoritti omatoimisesti kaikissa tutkimuksen vaiheissa. Seuraavissa tämän luvun kappaleissa käydään vielä erikseen läpi jokaisen tutkimusvaiheen muita aineistonkeräysmenetelmiä. Tutkittava mittasi tutkimusjaksolla joka aamu heti heräämisen ja wc-käynnin jälkeen ortostaattisen sykereaktion Polar V800 sykemittariin asennetun ohjelman ja Polar H10 sykevyön (Polar Electro Oy, Kempele, Suomi) avulla. Myös kehonpaino mitattiin heti ortostaattisen sykereaktion mittaamisen jälkeen ensimmäisen seurantajakson neljännestä päivästä alkaen. Tutkittava kirjasi ylös joka päivä myös unen määrän, koetun unen laadun asteikolla ja aamuisen palautumistuntemuksen asteikolla 1–5 sekä koetun virtsan värin ja määrän asteikolla 1–3 toisen seurantajakson päivään 28 asti. Lisäksi koehenkilön kirjasi vapaita kommentteja muun muassa tuntemuksista ja ajatuksista koko tutkimusjakson ajan. Kirjattujen kommenttien perusteella harjoittelussa ilmeni vaihtelevia tuntemuksia LHTL-jakson aikana sekä noin kaksi viikkoa LHTL-jakson jälkeen. Tutkittavalla oli myös usein työstressiä kaikkien tutkimusvaiheiden aikana. Näiden edellä kuvatujen objektiivisten ja subjektiivisten omatoimisesti suoritettujen mittausten ja kirjausten perusteella pyrittiin seuraamaan elimistön sopeutumista hypoksisiin olosuhteisiin sekä korkeanpaikanharjoittelun kuormituksen ja siitä palautumisen tasapainoa. Tutkimusryhmä, tutkittava ja

tutkittavan valmentaja reagoivat tarvittaessa elimistön reaktioihin ja tuntemuksiin esimerkiksi soveltamalla harjoitussuunnitelmaa.

Seurantajakso 1. Seurantajaksolla 1 tutkittava vastasi joka päivä *The Lake Louise* -kyselyyn, josta laskettiin Lake Lousien AMS -arvo asteikolla 0–15. Kyselyä hyödynnettiin yleiseen terveydentilaan liittyvien oireiden tarkkailemiseen ja kyselyyn vastaamisen harjoitteluun. VO_{2max} :n lähtötaso mitattiin suoralla maksimaalisen hapenottokyvyn testillä (suora VO_{2max} :n testi) ensimmäisen seurantajakson viidentenä päivänä. Laskimoverinäyte otettiin ja optimoitu hiilimonoksidin takaisinhengitysmenetelmä tehtiin ensimmäisellä seurantajaksolla kerran (päivä 10). Optimoitua hiilimonoksidin takaisinhengitysmenetelmää käsitellään luvussa 7.3.1. Seurantajakson 1 aikana tehdyn alkuseurannan ja lähtötasomittausten tulosten perusteella koehenkilö todettiin terveeksi ja kykeneväiseksi suorittamaan neljän viikon *live high train low* -korkeanpaikanharjoittelujakso.

Alppimajajakso. Testattava kirjasi päivittäin alppimajassa viettämänsä ajan puolen tunnin tarkkuudella, jotta pystyttiin laskemaan alppimajajakson hypoksinen annos. Tutkittavan hypoksinen annos oli kokonaisuudessaan 1 184 km·h tutkimuksen aikana. Tutkittava vastasi joka päivä *The Lake Louise* -kyselyyn, josta laskettiin Lake Lousien AMS -arvo asteikolla 0–15. Tutkittavalla ei ilmennyt terveyttä heikentävän tai vaarantavan tasoista AMS:a tutkimuksen aikana. Alppimajajakson ajan tutkittava mittasi omatoimisesti aamuisin, iltapäivisin ja iltaisin lepotilan SaO_2 :n Onyx Vantage 9590 -happisaturaatiomittarilla (Nonin Medical Inc., Plymouth, Yhdysvallat). Mittauksista kirjattiin ylös kaikkien mittausten päiväkohtainen keskimääräinen SaO_2 , jonka perusteella analysoitiin valtimoveren happipitoisuuden muutoksia alppimajajakson aikana. Optimoitu hiilimonoksidin takaisinhengitysmenetelmä tehtiin kerran alppimajajakson aikana (päivä 28). Laskimoverinäyte otettiin kolme kertaa alppimajajakson aikana (päivä 1, 3, 28). Alppimajajakson aikana koehenkilö teki kaksi hypoksiaharjoitusta viikossa (päivinä 4, 7, 11, 14, 18, 21, 25) juoksumatolla (Toorx Professional Line TRX9500, Garlando, Novi Ligure, Italia) juosten. Hypoksiset olosuhteet muodostettiin harjoituksessa JAY-10H hypoksiageneraattorilla (Longfian, Hebei, Kiina). Kunkin harjoituksen kesto oli yksi tunti. Juoksumaton nopeus oli 11,7 km/h ja kulma 0 %, joilla pyrittiin kevyttheoiseen peruskestävyysharjoitukseen. Happisaturaatiota, sykettä ja laktaattia seurattiin 20 minuutin välein sopivan kuormitustehon varmistamiseksi. Hypoksiajuoksujen hypoksia-altistuksen osuus tutkittavan hypoksiesta annoksesta oli 2,5 % tässä tutkimuksessa.

Seurantajakso 2. Testattava suoritti suoran VO_{2max} :n testin kolme kertaa seurantajaksolla 2 (päivinä 2, 8 ja 25). Testeillä mitattiin alppimajakson sekä merenpinnantason olosuhteisiin paluun vaikutusta VO_{2max} :n testin tuloksiin. Optimoitu hiilimonoksidin takaisinhengitysmenetelmä tehtiin kerran seurantajaksolla 2 (päivä 30). Seurantajaksolla 2 otettiin kaksi laskimoverinäytettä (päivinä 22 ja 30).

Tutkittava suoritti tutkimusjakson aikana lisäksi neljä submaksimaalista kestävyysuorituskykytestiä, joiden yhteydessä tehtiin myös hermo-lihasjärjestelmän suorituskykyä mittaavat staattisen ja esikevennyshypyn testit sekä penkkipunnerruksen tehomittaus. Näiden suorituskykymittausten tarkoituksena oli seurata tutkittavan kuormittuneisuutta ja palautumisen tilaa tutkimusjakson aikana. Edellä kuvattuja suorituskykytestejä tehtiin tutkittavalle alkuperäistä tutkimussuunnitelmaa vähemmän aikatauluhaasteiden sekä jalkavaivan vuoksi. Submaksimaalisten kestävyysuorituskykytestien ja hermo-lihasjärjestelmän suorituskykytestien aineisto jätettiin pois tämän tutkimuksen analyyseistä.

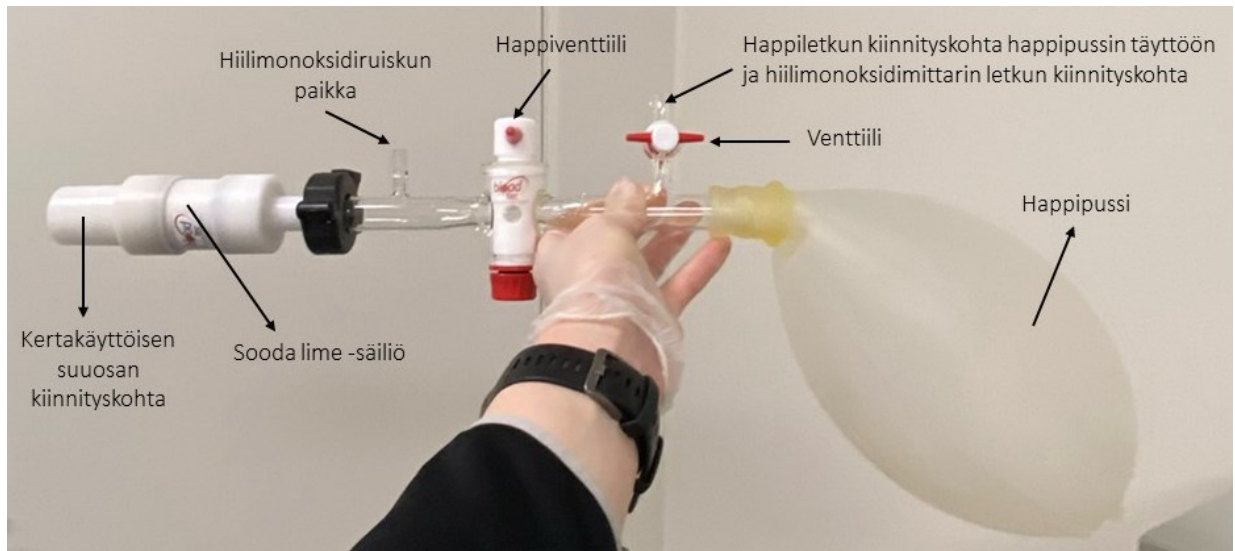
7.3.1 Optimoitu hiilimonoksidin takaisinhengitysmenetelmä

Hemoglobiinimassan, punasolutilavuuden, veritilavuuden ja plasmatilavuuden määrittäminen suoritettiin Schmidtin ja Prommerin (2005) kehittämällä optimoidulla hiilimonoksidin takaisinhengitysmenetelmällä. Menetelmän tyypillinen virhe on 1,7 % (mm. Gore ym. 2006; Schmidt & Prommer 2005). Samassa tutkimuksessa optimoidun hiilimonoksidin takaisinhengitysmenetelmän raportoitiin ilmentävä tarkasti pienetkin muutokset tHb_{massa} :ssa (keskivirhe 9 g). Optimoitu hiilimonoksidin takaisinhengitysmenetelmä tehtiin koehenkilölle aina kello 7:30 ja 9:00 välillä. Optimoidun hiilimonoksidin takaisinhengitysmenetelmän vaiheet ovat seuraavat: 1) esimittaukset ja -näytteet, 2) hiilimonoksidin takaisinhengitysvaihe ja 3) jälkimittaukset ja -näytteet.

Esimittaukset ja -näytteet. Ensimmäisenä koehenkilöltä otettiin sairaanhoitajan toimesta laskimoverinäyte veren hematokriitin (%) ja Hb:n (g/l) määrittämiseksi. Laskimoverinäytteen jälkeen koehenkilölle suoritettiin InBody-mittaus, jonka tuloksista kirjattiin mittauspöytäkirjaan kehonpaino (kg), kehon rasvaton massa (kg) ja painoindeksi. Ennen tutkimusjakson ensimmäistä Inbody -mittausta mitattiin myös tutkittavan pituus (cm), joka syötettiin InBody:n tieto-

koneohjelmaan. Kehonkoostumusmittauksen jälkeen tutkittava istui 15 minuuttia, jotta veren tilavuus tasoittui. Tässä tutkimuksessa käytetyn InBody -laitteen (Inbody 720, Biospace Co., Seoul, Korea) korrelaatiokertoimet ovat rasvamassalle ≥ 98 % ja rasvattomalle massalle ≥ 99 % (McLester ym. 2020). Mittauspöytäkirjaan kirjattiin lisäksi kalibrointitekijät eli mittauslaboratorion lämpötila ja ilmanpaine. Koehenkilön keuhkojen hiilimonoksidipitoisuuden lähtötaso mitattiin Dräger PAC 7000 -hiilimonoksidimittarilla (Dräger Safety, Lübeck, Germany). Sormenpäästä otettiin kolme kapillaariverinäytettä (85 μ l), joista analysoitiin veren karboksihemoglobiinin (HbCO) prosenttisuuden lähtötaso ABL90 FLEX -verikaasuanalyysaattorilla (Trioloab Oy, Turku, Suomi). Keuhkojen hiilimonoksidipitoisuus ja sormenpääverenäytteiden HbCO:n prosenttisuudet kirjattiin mittauspöytäkirjaan.

Hiilimonoksidin takaisinhengitysvaihe. Esimittausten ja -näytteiden jälkeen aloitettiin hiilimonoksidin takaisinhengitysvaihe. Hiilimonoksidin takaisinhengityksessä tutkittava hengitti normaalia rauhallista hengitystä kahden minuutin ajan ainoastaan kuvan 7 mukaisessa SpiCO Calcuator 2.2 -spiometrissä (Blood tec, Bayreuth, Germany). Spiometrin ilma koostui koehenkilölle määritetystä yksilöllisestä hiilimonoksididiannoksesta sekä 100 % hapesta. Hiilimonoksididiannoksen suuruus määritettiin kertomalla kehonpaino tutkittavan sukupuolen ja kestävyysharjoittelutaustan perusteella määritetyllä annoskertoimella (Schmidt & Prommer 2005). Mittaaja määrittäi koehenkilön annoskertoimen yhdeksi (1,0), joten hiilimonoksididiannos oli yhtä monta millilitraa kuin hänen kehonpainonsa oli kilogrammoina. Annoskerroin ja hiilimonoksididiannos kirjattiin ylös mittauspöytäkirjaan. Hiilimonoksididiannoksen valmistelussa mittaaja otti hiilimonoksidia kaasupullosta ruiskuun ensin hieman tutkittavalle määritettyä annosta enemmän, jonka jälkeen ruiskun annettiin olla paikallaan vähintään viisi minuuttia kaasun tilavuuden tasoittumiseksi. Juuri ennen hiilimonoksidin takaisinhengitystä mittaaja pienensi hiilimonoksididiannoksen tarkasti koehenkilölle määritettyyn annokseen. Spiometrissä oli hengityskalkkia eli sooda limettä sille tarkoitettussa säiliössä (ks. kuva 7), jotta uloshengitettyä hiilidioksidia saatiin poistettua hengitettävästä ilmasta. Koehenkilöllä oli nenäklipsi hiilimonoksidin takaisinhengityksen ajan, jotta hengitys tapahtui ainoastaan suun kautta spiometrissä. Tutkittavan hengittäessä spiometrissä tarkkailtiin mahdollisten ilmavuotojen esiintymistä hiilimonoksidimittarilla.



KUVA 7. Hiilimonoksidin takaisinhengityksessä käytettävä spirometri.

Jälkimittaukset ja -näytteet. Hiilimonoksidin takaisinhengityksen päättymisestä kahden minuutin päästä mitattiin jälleen koehenkilön keuhkojen hiilimonoksidipitoisuus hiilimonoksidimittarilla. Neljän sekä kuuden minuutin päästä hiilimonoksidin takaisinhengityksen päättymisestä otettiin kaksi kapillaariverinäytettä (yht. 4 kpl), joista analysoitiin jälleen veren HbCO:n prosenttiosuudet verikaasuanalysaattorilla. Keuhkojen hiilimonoksidipitoisuus ja sormenpääverinäytteiden HbCO:n prosenttiosuudet hiilimonoksidin takaisinhengitysvaiheen jälkeen kirjattiin mittauspöytäkirjaan. Viimeisenä vaiheena mittaja suoritti vielä hiilimonoksidin takaisinhengitysmenetyksessä käytettyyn spirometriin kohdistuvat jälkimittaukset, joissa selvitettiin spirometrin happipussin tilavuus seitsemän litran kalibroitipumpulla (Hans Rudolph, inc., Boston, Massachusetts, Yhdysvallat) sekä happipussin hiilidioksidipitoisuus hiilimonoksidimittarilla. Jälkimittauksista kirjattiin mittauspöytäkirjaan vielä happipussin tilavuus sekä happipussin hiilimonoksidipitoisuus.

Lopulta optimoidun hiilimonoksidin takaisinhengitysmenetyksen aikana kerätyn aineiston tiedot syötettiin verikoetuloksista ja mittauspöytäkirjasta Bloodtec:n verkko-ohjelmaan, joka laski automaattisesti hemoglobiinimassan (g, g/kg), punasolutilavuuden (ml, ml/kg), veritilavuuden (ml, ml/kg) ja plasmatilavuuden (ml, ml/kg). Verkko ohjelmaan syötettiin siis seuraavat tiedot: kehonpaino, lämpötila, ilmanpaine, Hb (g/l), hematokriitti (%), kaikista sormenpääverinäytteistä mitattu veren HbCO:n prosenttiosuus, hiilimonoksidiannoksen suuruus, keuhkojen hiilimonoksidipitoisuus ennen ja jälkeen hiilimonoksidin takaisinhengityksen sekä happipussin ti-

lavuus ja hiilimonoksidipitoisuus hiilimonoksidin takaisinhengityksen jälkeen. Optimoidun hiilimonoksidin takaisinhengitysmenetelmän tuloksista analysoitiin neljän viikon alppimajakson ja sitä seuranneen neljän viikon merenpinnantason olosuhteiden vaikutusta tutkittavan tHb_{massa}:an, punasolutilavuuteen, veritilavuuteen ja plasmatilavuuteen.

7.3.2 Laskimoverinäytteet

Taulukossa 4 on yhteenveto, josta nähdään kaikista tutkimusjakson aikana otetuista laskimoverinäytteistä analysoidut verimuuttujat. Perusveren kuvan verimuuttujat ovat hemoglobiinin, leukosyyttien ja trombosyyttien pitoisuudet, hematokriitti, punasolujen määrä, punasolujen kokojakauma, kypsien punasolujen keskitilavuus, punasolujen hemoglobiinin keskimassa sekä punasolujen keskimääräinen hemoglobiinikonsentraatio. Leukosyyttien, trombosyyttien ja seerumin c-reaktiivisen proteiinin pitoisuuksia ei tarkasteltu tämän tutkimuksen analyyseissä.

TAULUKKO 4. Yhteenveto eri laskimoverinäytteistä analysoiduista verimuuttujista.

Mittauspäivä	Mitatut veriarvot
Seurantajakso 1, päivä 10	B-PVKT
Alppimajakso, päivä 1	E-Retik (%), S-Epo (U/l), S-Ferrit (µg/l) ja S-CRP (mg/l)
Alppimajakso, päivä 3	S-Epo (U/l)
Alppimajakso, päivä 28	B-PVKT, E-Retik (%), S-Epo (U/l), S-Ferrit (µg/l) ja S-CRP (mg/l)
Seurantajakso 2, päivä 22	S-Epo (U/l)
Seurantajakso 2, päivä 30	B-PVKT, E-Retik (%), S-Ferrit (µg/l) ja S-CRP (mg/l)

B-PVKT, perusveren kuvan verimuuttujat; E-Retik, epäkypsien punasolujen määrä veren punasoluista; S-EPO, seerumin erytropoietiini; S-Ferrit, seerumin ferritiini; S-CRP, seerumin c-reaktiivinen proteiini.

Ensimmäisen seurantajakson ja alppimajakson ensimmäisen päivän aamun (ennen alppimajaan ”muuttamista”) laskimoverinäytteistä analysoitiin verimuuttujien lähtötasoja. Alppimajakson muiden laskimoverinäytteiden avulla selvitettiin hypoksian vaikutusta verimuuttujiin. Alppimajaksoa seuranneen seurantajakson laskimoverinäytteillä selvitettiin merenpinnantason olosuhteisiin paluun vaikutusta verimuuttujiin. Seurantajaksojen 1 ja 2 sekä alppimajak-

son viimeisen päivän laskimoverinäytteistä analysoituja tuloksia tarvittiin tiettyjen verimuuttujien (ks. luku 7.3.1) osalta myös optimoidun hiilimonoksidin takaisinhengitysmenetelmän tulosten määrittämisessä.

Kaikki muut laskimoverinäytteet paitsi seurantajakson 1 verinäyte otettiin paastoverinäytteinä, sillä niistä analysoitiin paastoa vaativia verimuuttujia. Ennen paastoverinäytteitä tutkittava ohjeistettiin olemaan syömättä ja juomatta 8–10 tuntia. Näytteenotto suoritettiin paikallisen lääkärikeskuksen sairaanhoitajien toimesta. Näytteenotossa käytettiin Vacuette seerumigeeli ja Vacuette EDTA (etyleenidiamiinitetraetikkahappo) -näyteputkia. Näytteitä sentrifugoitiin 3600 rpm 10 minuutin ajan ja ne analysoitiin samana päivänä Vita-laboratoriossa. Perusveren kuvan analysoinnissa käytetyt menetelmät olivat impedanssimittaus ja virtaussytometrinen partikkeli-laskenta (solut) sekä fotometrinen mittaus (Hb). Seerumin erytropoietini pitoisuus analysoitiin luminoimmunometrisellä menetelmällä ja seerumin ferritiinin pitoisuus elektrokemiluminometrisellä menetelmällä. Epäkypsien punasolujen määrä veren punasoluista analysoitiin automaattisella solulaskennalla. Kaikkien tämän tutkimuksen analyyseissä tarkasteltujen verimuuttujien analyysimenetelmät olivat akkreditoituja eli niistä saadut tulokset ovat 95 %:n todennäköisyydellä ilmoitetun vaihteluvälin sisällä.

7.3.3 Maksimaalisen hapenottokyvyn testit

Tutkimusjakson aikana hengitys- ja verenkiertoelimistön toimintakapasiteettia ja tutkittavan kestävyys suorituskykyä testattiin suoralla VO_{2max} :n testillä. VO_{2max} :n testit suoritettiin Vuokatti Sport Testiaseman (Sotkamo, Suomi) juoksumatolla (Telineyhtymä, Kotka, Suomi) sauvakävellessä. Testaaja oli kaikilla testikerroilla sama. Tutkittava suoritti omatoimisen ja itse määritellyn samanlaisen verryttelyn ennen jokaista testiä. Verryttelyn jälkeen ennen testin aloittamista koehenkilö punnittiin kehonpainon määrittämiseksi. Testissä aloituskuormalla maton kulma oli 3,5 astetta ja nopeus 5,0 km/h. Jokaisen kuorman kesto oli kolme minuuttia ja kuormitusta kasvatettiin eri kuormien välillä nostamalla kulmaa ja vauhtia, tai jompaakumpaa niistä. Jokaisella kuormalla teoreettisen VO_2 :n kasvu oli Balken ja Waren (1959) kaavan mukaan 6 ml/kg/min.

Testissä koehenkilön hengityskaasuja ja ventilaatiota mitattiin sekoituskammiomenetelmällä Medikro 919 spiroergometrillä (Medikro Oy, Kuopio, Suomi). Laitteen mittaustarkkuus O_2 :n ja CO_2 :n analysoinnissa on 0,05 %.

60 sekunnin $VO_{2:n}$ keskiarvo ja maksimaalinen hapenotto-kyky (VO_{2max}) eli korkein mitattu 60 sekunnin keskiarvoinen VO_2 . Sykettä seurattiin koko testin ajan Polar H10 -sykesensorilla (Polar Electro Oy, Kempele, Suomi) ja jokaisen kuorman viimeisen 60 sekunnin keskiarvo kirjattiin ylös. Veren laktaattipitoisuus mitattiin jokaisen kuorman päätteeksi ja välittömästi testin lopettamisen jälkeen. Laktaattipitoisuuden määrittämiseksi koehenkilöltä otettiin kapillaarive-rinäyte (20 μ l) sormenpästä juoksumaton ollessa käynnissä näytteenoton ajan. Kaikki testin aikana otetut laktaattinäytteet analysoitiin testin päätyttyä automaattisella Biosen C-Line Clinic-laktaattianalysaattorilla (EKF Diagnostics, Barleben / Magdeburg, Germany).

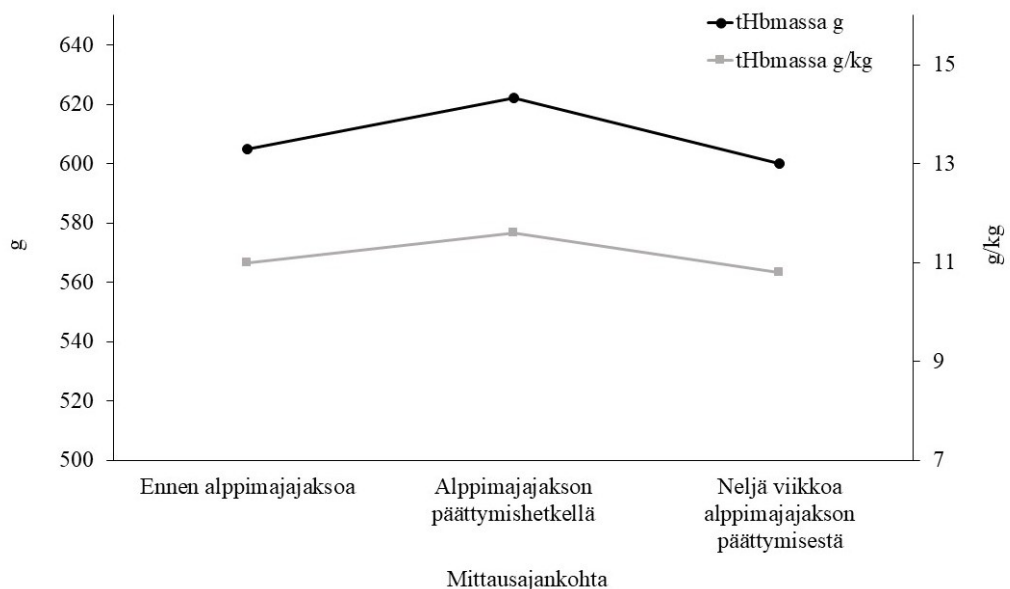
Testin jälkeen hengityskaasu-, ventilaatio-, syke- ja laktaattitietojen perusteella testaja määrittäi tutkittavan aerobisen ja anaerobisen kynnyksen. Tuloksiin kirjattiin molempien kynnysten teoreettinen hapenkulutus (l/min), mitattu hapenkulutus (l/min ja ml/kg/min), laktaatti ja syke. Lisäksi tuloksiin kirjattiin testin kokonaiskesto (min), mitattu VO_{2max} (l/min ja ml/kg/min), testin aikainen suurin teoreettinen hapenkulutus, maksimilaktaatti ja -syke. Tässä tutkimuksessa $VO_{2max:n}$ testien tuloksista analysoitiin hengitys- ja verenkiertoelimistön toimintakyvyn muutoksia $VO_{2max:n}$ arvoista (l/min ja ml/kg/min) ja niiden prosentuaalisista muutoksista eri tutkimusvaiheissa. Kestävyys- ja suorituskyvyn muutoksia tarkasteltiin myös teoreettisen $VO_{2max:n}$ muutosten perusteella.

8 TULOKSET

Tässä luvussa käydään läpi tämän tapaustutkimuksen tulokset, jotka on jaettu neljään eri alalukuun. Ensimmäisessä alaluvussa käsitellään veren hapenkuljetuskykyä kuvaavien muuttujien kehitystä ja toisessa VO_{2max} :n eli hengitys- ja verenkiertoelimistön toimintakykyä kuvaavan muuttujan kehitystä tutkimusjaksolla. Kolmannessa alaluvussa käsitellään valtimoverenhappipitoisuuden kehitystä alppimajakson aikana. Neljännessä ja viimeisessä alaluvussa tarkastellaan tutkimusjakson vaikutusta laskimoverinäytteistä analysoituihin verimuuttujiin.

8.1 Veren hapenkuljetuskyky

Kuva 8 havainnollistaa neljän viikon alppimajakson sekä sen jälkeisten neljän viikon merenpinnantason olosuhteiden vaikutusta tHb_{massa} :an. Taulukossa 5 on absoluuttisen (g) ja kehonpainoon suhteutetun (g/kg) tHb_{massa} :n mittaustulokset kaikissa tutkimuksen aikana tehdyissä mittauksissa. Koehenkilön tHb_{massa} lisääntyi alppimajakson aikana absoluuttisen arvon osalta 2,7 % ja kehonpainoon suhteutetun arvon osalta 5,2 %. Viitearvoja (liite 1) tarkasteltaessa tutkittavan tHb_{massa} (g/kg) nousi alueelliselta tasolta juuri kansallisen tason kestävyysurheilijan tasolle. Neljän viikon aikana alppimajakson päättymispäivästä tHb_{massa} laski absoluuttisen arvon osalta 3,7 % ja kehonpainoon suhteutetun arvon osalta 7,4 %. Kehonpaino laski 3,0 % alppimajakson aikana ja nousi 3,6 % neljän viikon aikana alppimajakson päättymispäivästä.



KUVA 8. Mitattu tHb_{massa} tutkimuksen eri vaiheissa. tHb_{massa} , kokonaishemoglobiinimassa.

TAULUKKO 5. tHb_{massa} tutkimusjakson eri vaiheissa.

tHb _{massa}	Ennen alppimajajaksoa	Alppimajajakson päättymishetkellä	Neljä viikkoa alppimajajakson päättymisestä
g	605	622	600
g/kg	11,0	11,6	10,8

tHb_{massa}, kokonaishemoglobiinimassa.

Taulukkoon 6 on koottu tutkittavan punasolu-, plasma- ja veritilavuuden absoluuttiset (ml) ja kehonpainoon suhteutetut (ml/kg) arvot tutkimuksen eri vaiheissa. Punasolutilavuus kasvoi absoluuttisen arvon osalta 1,1 % ja kehonpainoon suhteutetun arvon osalta 4,0 % alppimajajakson aikana. Alppimajajakson päättymishetkestä punasolutilavuus laski neljässä viikossa molempien arvojen osalta hieman alemmalle tasolle kuin ennen alppimajajaksoa. Plasmatilavuus ja veritilavuus laskivat alppimajajakson aikana sekä absoluuttisten (-6,7 % ja -3,5 %) että kehon painoon suhteutettujen (-3,7 % ja -0,4 %) arvojen osalta. Sekä plasmatilavuudessa että veritilavuudessa saavutettiin tutkimusjakson korkeimmat arvot neljä viikkoa alppimajajakson jälkeen. Plasmatilavuuden absoluuttisen arvon kasvu neljässä viikossa oli 12,8 % ja kehonpainoonsuhteutetussa arvossa 9,6 %. Veritilavuuden vastaavat lukemat olivat 7,3 % ja 3,9 %. Viitearvoja (liite 1) tarkasteltaessa veritilavuus (ml/kg) oli alueellisen tason kestävyysurheilijan tasolla ennen alppimajajaksoa ja heti sen jälkeen. Veritilavuus nousi juuri kansallisen tason urheilijan viitearvoihin neljä viikkoa alppimajajakson jälkeen.

TAULUKKO 6. Punasolutilavuuden, plasmatilavuuden ja veritilavuuden absoluuttiset ja kehonpainoon suhteutetut arvot tutkimuksen eri vaiheissa.

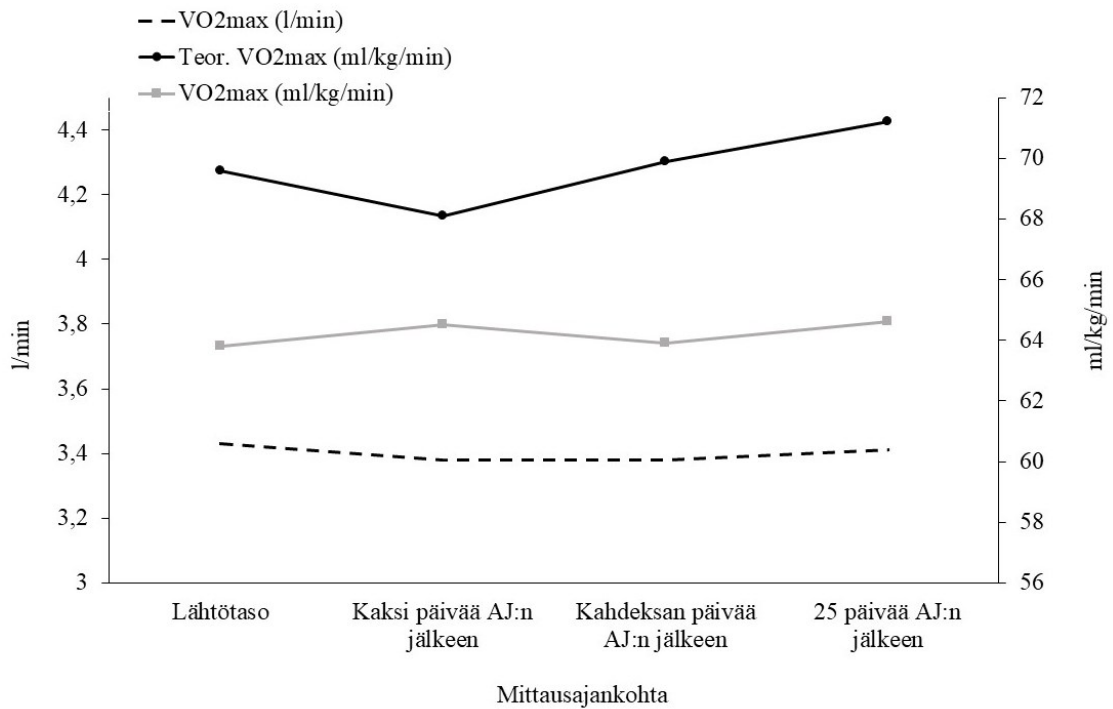
Muuttuja	Ennen alppimajajaksoa	Alppimajajakson päättymishetkellä	Neljä viikkoa alppimajajakson päättymisestä
Punasolutilavuus	1 862 ml	1 882 ml	1 853 ml
	33,8 ml/kg	35,2 ml/kg	33,4 ml/kg
Plasmatilavuus	2 789 ml	2 613 ml	2 996 ml
	50,6 ml/kg	48,8 ml/kg	54,0 ml/kg
Veritilavuus	4 651 ml	4 495 ml	4 849 ml
	84,4 ml/kg	84,0 ml/kg	87,4 ml/kg

8.2 Maksimaalinen hapenottokyky

Taulukkoon 7 on koottu jokaisen suoran VO_{2max} :n testin tuloksista tutkittavan VO_{2max} :n absoluuttiset, kehonpainoon suhteutetut ja teoreettiset hapenkulutuksen arvot sekä testeissä mitattu kehonpaino. Kuva 9 havainnollistaa VO_{2max} :n kehitystä tutkimusjakson aikana. VO_{2max} :n kehitys oli maltillisia koko tutkimusjakson ja sen eri vaiheiden aikana. Tutkimusjakson ensimmäisen ja viimeisen mittauksen välinen kehitys VO_{2max} :ssä oli absoluuttisen arvon (l/min) osalta 0,5 %:n lasku, kehonpainoon suhteutetun (ml/kg/min) arvon osalta 1,2 %:n kasvu ja teoreettisen VO_{2max} :n osalta 2,2 % kasvu. Kaksi päivää alppimajakson päättymisestä VO_{2max} oli absoluuttisen arvon osalta 1,5 % alempi, kehonpainoon suhteutetun arvon osalta 1,1 % korkeampi ja teoreettisen VO_{2max} :n osalta 2,2 % alempi kuin lähtötasotestissä. Alppimajakson jälkeisen seurantajakson aikana absoluuttinen VO_{2max} nousi 0,9 %, kehonpainoon suhteutetussa VO_{2max} :ssä ei tapahtunut juurikaan muutosta (+0,2 %) ja teoreettinen VO_{2max} kasvoi 4,4 %. Kaksi päivää ja kahdeksan päivää alppimajakson päättymisestä tehdyissä testeissä absoluuttinen VO_{2max} pysyi samana, kehonpainoon suhteutettu VO_{2max} laski 0,9 % ja teoreettinen VO_{2max} kasvoi 2,2 %. Maastohiihtäjien VO_{2max} :n viitearvojen (Mero ym. 1997) perusteella mitattu VO_{2max} (ml/kg/min) on keskimääräisen kansallisen tason yläpuolella. Teoreettinen VO_{2max} puolestaan sijoittuu hyvän kansallisen tason hiihtäjän viitearvoihin ja nousi neljä viikkoa alppimajakson jälkeen tehdyssä testissä maajoukkue-tason urheilijan viitearvoihin.

TAULUKKO 7. Koehenkilön VO_{2max} :n absoluuttiset ja kehonpainoon suhteutetut hapenkulutukset sekä kehonpaino suorissa VO_{2max} :n testeissä. VO_{2max} , maksimaalinen hapenottokyky; Teor., teoreettinen.

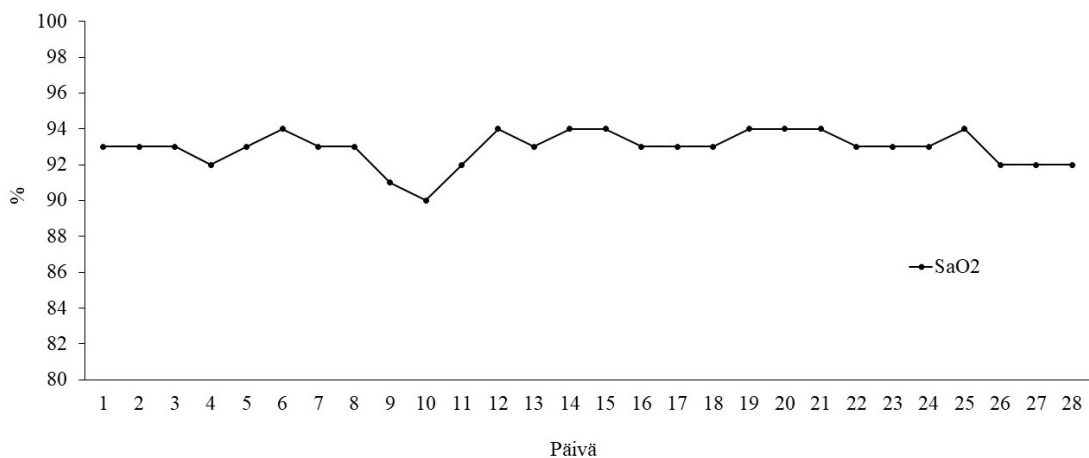
	Seurantajakso 1 Päivä 5	Seurantajakso 2		
		Päivä 2	Päivä 8	Päivä 25
VO_{2max} (l/min)	3,43	3,38	3,38	3,41
VO_{2max} (ml/kg/min)	63,8	64,5	63,9	64,6
Teor. VO_{2max} (ml/kg/min)	69,6	68,1	69,9	71,2
Kehonpaino (kg)	53,8	52,3	52,8	52,9



KUVA 9. Absoluuttinen, kehonpainoon suhteutettu ja teoreettinen VO₂max tutkimuksen eri vaiheissa. AJ, alppimajakso; VO₂max, maksimaalinen hapenottoikyky, Teor., teoreettinen.

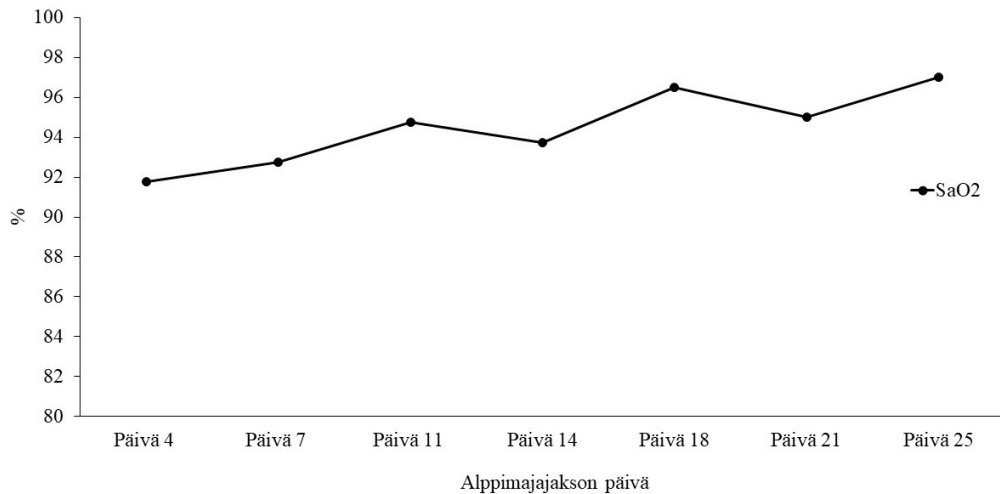
8.3 Valtimoveren happipitoisuus

Kuvasta 10 nähdään koehenkilön lepotilan SaO₂:n (%) päivittäiset keskiarvot ja niiden vaihtelu alppimajakson aikana. SaO₂:n (%) päivittäinen lepotilan keskiarvo oli alppimajakson aikana keskimäärin 93 %. Arvot vaihtelivat koko alppimajakson ajan 90–94 % välillä.



KUVA 10. SaO₂:n päivittäinen keskiarvo alppimajakson aikana. SaO₂, hemoglobiinin happisaturaatio.

Kuvasta 11 nähdään tutkittavan hypoksiaharjoitusten keskimääräisen SaO₂:n kehitys kaikkien hypoksiaharjoitusten aikana. SaO₂:n kehitys hypoksiaharjoitusten välillä oli alppimajakson edetessä pääosin nouseva. Ensimmäisessä hypoksiaharjoituksessa SaO₂ oli keskimäärin 92 % ja jakson viimeisessä harjoituksessa 97 %.



KUVA 11. Hypoksiaharjoitusten keskimääräisen SaO₂:n kehitys alppimajakson aikana. SaO₂, hemoglobiinin happisaturaatio.

8.4 Verimuuttujat

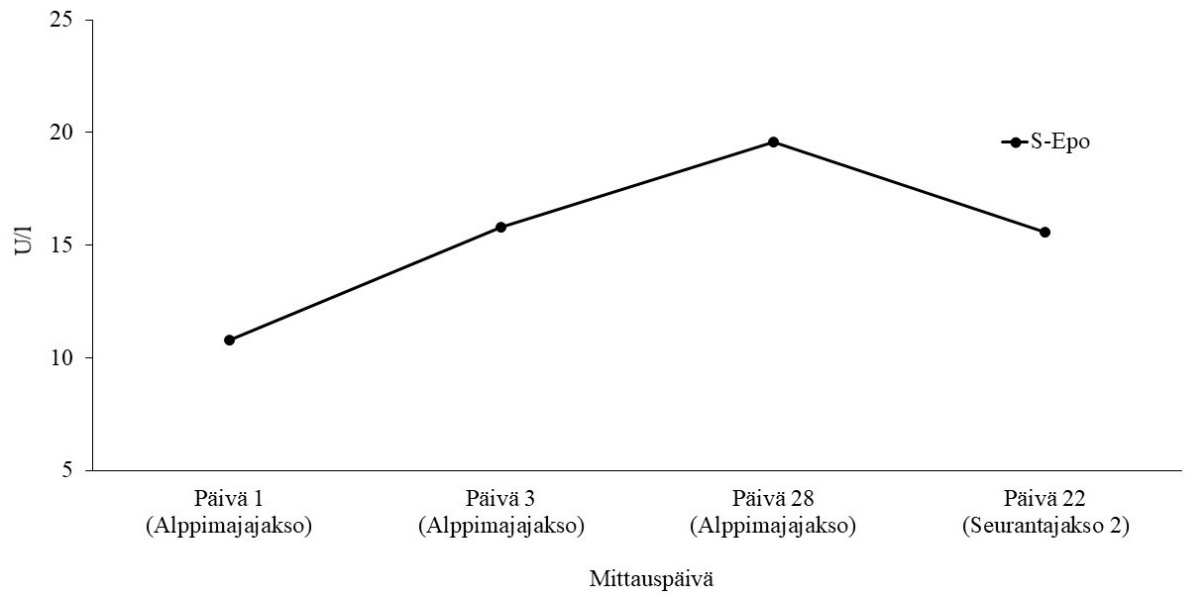
Taulukoon 8 on koottu tutkittavan kaikkien laskimoverinäytteiden tulokset. Hb (g/l), B-Hkr (%) ja B-Eryt ($\times E12/l$) nousivat lähtötasomittauksesta alppimajakson viimeisen päivän mittaukseen, mutta laskivat neljä viikkoa alppimajakson jälkeen otetussa verinäytteessä tutkimusjakson alhaisimpiin lukemiin. Punasolujen Hb:n keskimassa (E-MCH) ja niiden keskimääräinen Hb-konsentraatio (E-MCHC) pysyivät samana lähtötason ja alppimajakson päättymispäivän verinäytteiden välillä, mutta laskivat hieman neljä viikkoa alppimajakson jälkeen otetussa verinäytteessä. Kypsien punasolujen keskitilavuus (MCV) nousi lähtötasomittauksesta hieman alppimajan päättymispäivän mittaukseen ja pysyi samana koko tutkimusjakson viimeiseen mittaukseen. Punasolujen kokojakaumassa (E-RDW) nähtiin prosenttien kasvu lähtötason ja alppimajakson viimeisen päivän verinäytteiden välillä.

TAULUKKO 8. Kaikkien tutkimuksen laskimoverinäytteiden tulokset.

Veriarvo (yksikkö)	Seurantajakso 1 Päivä 10	Alppimajakso			Seurantajakso 2	
		Päivä 1	Päivä 3	Päivä 28	Päivä 22	Päivä 30
Hb (g/l)	143	-	-	152	-	136
B-Hkr (%)	44	-	-	46	-	42
B-Eryt (×E12/l)	4,4	-	-	4,62	-	4,21
E-MCH (pg)	33	-	-	33	-	32
E-MCHC (g/l)	329	-	-	329	-	323
E-MCV (fl)	99	-	-	100	-	100
E-RDW (%)	13	-	-	14	-	13
E-Retik (%)	-	1,4	-	< 0,6	-	1,1
S-Epo (U/l)	-	10,8	15,8	19,6	15,6	-
S-Ferrit (µg/l)	-	65	-	54	-	51

Hb, hemoglobiini; B-Hkr, veren hematokriitti; B-Eryt, punasolujen määrä verilitrassa; E-MCH, punasolujen hemoglobiinin keskimassa; E-MCHC, punasolujen keskimääräinen hemoglobiinkonsentraatio; E-MCV, kypsien punasolujen keskitilavuus; E-RDW, punasolujen kokoja-kauma; E-Retik, epäkypsien punasolujen määrä veren punasoluista; S-EPO, seerumin erythropoietiini; S-Ferrit, seerumin ferritiini.

Epäkypsien punasolujen määrä veren punasoluista (E-Retik) laski alppimajakson ensimmäisen ja viimeisen päivän verinäytteiden välillä, mutta nousi jälleen neljä viikkoa alppimajakson päättymisen jälkeen otetussa verinäytteessä. Tutkittavan S-Ferrit:n taso laski sekä alppimajakson että seurantajakson 2 aikana. Kuva 12 havainnollistaa S-EPO:n tason muutoksia tutkimuksen eri mittauksissa. S-EPO:n pitoisuudessa nähtiin selkeä vaste alppimajakson hypoksille olosuhteille. Tutkimusjakson mittausten huippuarvo S-EPO:ssa saavutettiin alppimajakson viimeisenä päivänä. S-EPO:n taso oli koholla vielä 22 päivää alppimajakson päättymisestä lähtötasoon verrattuna.



KUVA 12. Seerumin erythropoietiinipitoisuus tutkimuksen eri vaiheissa. S-Epo, seerumin erythropoietini.

9 POHDINTA

Tämän tapaustutkimuksen tarkoituksena oli selvittää neljän viikon alppimajajakson, eli LHTL-jakson fysiologisia vasteita ja adaptaatioita tutkittavan naismaastohiihtäjän hengitys- ja verenkiertoelimistössä. Tutkimuksen keskeisin havainto oli, että neljän viikon LHTL-jakso paransi tutkittavan tHb_{massa} :a vain maltillisesti, mutta aiemmissa tutkimuksissa vasteessa todetun yksilökohtaisen 2–10 % vaihtelun mukaisesti (Rusko ym. 2004). tHb_{massa} -vasteesta huolimatta hengitys ja verenkiertoelimistön toimintakykyä kuvaavassa $VO_{2\text{max}}$:ssä tutkittavalla ei ilmennyt parannusta ensimmäisten päivien aikana LHTL-jakson päättymisestä. Tutkittavan $VO_{2\text{max}}$:n maltillinen nousu noin neljä viikkoa LHTL-jakson päättymisen jälkeen mukailee kuitenkin korkeanpaikanharjoittelujakson jälkeen suorituskyvyssä ilmeneviä vaihteita ja vaihteluja (Peltonen & Nummela 2016b, 597–598). Seuraavissa alaluvuissa pohditaan alppimajajakson fysiologisia vasteita ja adaptaatioita tutkittavan hengitys ja verenkiertoelimistössä, pohditaan niihin vaikuttaneita tekijöitä sekä niiden muutoksia ja säilymistä alppimajajakson jälkeen normoksiassa.

9.1 Kokonaishemoglobiinimassa ja veritilavuus

Ensimmäiseksi tämän tutkimuksen tutkimuskysymykseksi oli asetettu se, miten neljän viikon alppimajajakso vaikuttaa koehenkilön tHb_{massa} :an ja millaisia muutoksia siinä tapahtuu alppimajajakson jälkeen. Tutkittavan absoluuttisessa ja kehonpainoon suhteutetussa tHb_{massa} :ssa saavutettuja (2,7 % ja 5,2 %) parannuksia voidaan pitää normaalina yksilöllisenä vasteena LHTL-jaksolle. Toisaalta on tärkeää huomioida, että kehonpainoon suhteutetun tHb_{massa} :n suurempaan prosentuaaliseen kasvuun vaikutti kehonpainon aleneminen alppimajajakson aikana. Alppimajajakson jälkeen merenpinnantason olosuhteisiin paluusta seurannut tHb_{massa} -vaste tutkittavalla oli aiemman tutkimustiedon mukainen, eli laski ennen korkeanpaikanharjoittelua mitatulle tasolle neljässä viikossa (Alfrey ym. 1997). Neljän viikon korkeanpaikanharjoittelujakson on todettu kasvattavan tHb_{massa} :a keskimäärin 7–8 % (Levine & Stray-Gundersen 2006, Peltosen & Nummelan 2016b, 596 mukaan), joten tutkittavan vaste oli huomattavasti keskimääräistä vastetta alhaisempi. Tutkittavan saavuttama tHb_{massa} -vaste on kuitenkin osoitus vähintään kohtuullisesti onnistuneen korkeanpaikanharjoittelujaksosta, sillä tHb_{massa} -vaste vaihtelee yksilöllisesti huomattavan paljon ja voi olla jopa negatiivinen (mm. Hauser ym. 2016; Nummela ym. 2019).

Tutkittava saavutti prosentuaalisesti maltillisen hyödyn tHb_{massa} :ssa siitä huolimatta, että tutkittavan hypoksinen annos oli yli kaksi kertaa suurempi kuin Ruskon ym. (2004) toteama vähimmäisannos hematologisen vasteen ilmenemiselle LHTL-jakson seurauksena (vähintään 2 100 m, 12 h/pv ja 3 vko, eli hypoksinen annos: $2\,100\text{ m}/1\,000 \times 252\text{ h} = 529\text{ km}\cdot\text{h}$). Voidaan kuitenkin myös pohtia, olisiko tutkittavan hypoksista annosta ($1\,184\text{ km}\cdot\text{h}$) jonkin verran suurempi annos voinut vaikuttaa tHb_{massa} -vasteeseen jopa merkittävästi parantavasti. Tätä ajatusta tukee se, että Heikuran ym. (2018) tutkimuksessa keskimäärin $1\,013\text{ km}\cdot\text{h}$ hypoksinen annos aiheutti merkittävästi pienemmän vasteen kuin $1\,320\text{ km}\cdot\text{h}$ annos. Melko pienellä hypoksisen annoksen erolla olisi tämän perusteella voinut olla merkittävä vaikutus vasteeseen. Alppimajassa vietettyjen tuntien kertymistä vähensi jonkin verran muun muassa tutkittavan työt, jotka olivat pakko suorittaa työpaikalla merenpinnantason olosuhteissa. Tutkimusjakson aikana ilmenneet tekniset haasteet alppimajan hypoksiset olosuhteet muodostavassa laitteistossa eivät pienentäneet hypoksista annosta.

Tutkittavan vasteita korkeanpaikanharjoittelujaksolle ei olla tutkittu aiemmin, joten tHb_{massa} -vastetta ei pidä tulkita tutkittavan suurimmaksi saavutettavaksi vasteeksi neljän viikon LHTL-jakson suorittamisesta. Yleiseksi todettua yksilöiden sisäistä vaihtelua eri korkeanpaikanharjoittelujaksojen välillä on pohdittu selittävän muun muassa erilainen harjoittelu tai elimistön palautumistila ennen korkeanpaikanharjoittelua (Nummela ym. 2019). Tässä tutkimuksessa korkeanpaikanharjoittelujakson alku sijoittui vain kahden viikon päähän ainakin viisi kuukautta kestäneen kilpailukauden päättymisestä. Koko harjoituskauden 2020–2021 jälkeen pidettiin siis vain kahden viikon kevennetty harjoittelujakso, jonka jälkeen uusi harjoituskausi 2021–2022 aloitettiin kuukauden korkeanpaikanharjoittelulla. Täten voidaan pohtia, oliko tutkimusjakson ajankohdalla vaikutusta saavutettuun tHb_{massa} -vasteeseen, kun elimistö oli todennäköisesti vasta palautumassa pitkän kilpailukauden rasituksesta. Tästä syystä korkeanpaikanharjoittelujakson aloittaminen erilaisessa harjoitteluvaiheessa ja elimistön palautuneisuustilassa saattaisi olla optimaalisempi tHb_{massa} -vasteen sekä vasteiden ja adaptaatioiden näkökulmasta.

9.2 Maksimaalinen hapenottokyky

Toiseksi tutkimuskysymykseksi tässä tutkimuksessa oli asetettu se, kuinka neljän viikon alppimajakso vaikuttaa hengitys- ja verenkiertoelimistön toimintakykyä kuvaavaan $VO_{2\text{max}}$:yyn ja

millaisia muutoksia siinä tapahtuu alppimajakson jälkeen. Tutkittavan hengitys- ja verenkiertoelimistön toimintakykyä kuvaava VO_{2max} oli hieman heikentynyt maltillisesta tHb_{massa} :n parantumisesta huolimatta heti alppimajakson jälkeen. Lähtötasoa alhaisempi VO_{2max} ei tarkoita, ettei jokainen gramman lisäys tHb_{massa} :ssa kasvattaisi neljää millilitraa VO_2 :ta hypoteesin mukaisesti (Shmidt & Prommer 2010). Alppimajakson jälkeen mitattuun alhaisempaan VO_{2max} :yn on voinut vaikuttaa heikentävästi muun muassa lukuisat kestävyysuorituskykyyn vaikuttavat fysiologiset ja psyykkiset tekijät. Hengitys- ja verenkiertoelimistön toimintakyky on saattanut heikentyä esimerkiksi sydämen maksimaaliseen minuuttitulavuuteen, keuhkojen diffuusiokapasiteettiin tai lihasten hapenkäyttökykyyn liittyvien tekijöiden heikentymisen seurauksena (Hauswirth & Meur 2012, 3–8). Tutkittava on suorittanut vuosien ajan tutkimuksen menetelmien mukaisia VO_{2max} :n testejä, joten tutkittavan kokemuksen ja osaamisen näkökulmasta testien toistettavuutta ja tulosten luotettavuutta voidaan pitää hyvänä.

Lähtötasoa alhaisempaa VO_{2max} :ä saattaa selittää myös se, että maksimaalista suorituskykyä kehittävää tehoharjoittelua tehtiin vain ominaisuuksia ylläpitävästi alppimajakson aikana. Uuden harjoituskauden alun harjoittelun ja tämän tutkimuksen LHTL-jakson ei ollut tarkoitus spesifisti parantaa maksimaalista suorituskykyä, jota suorassa VO_{2max} :n testissä testataan. Voidaan myös pohtia, oliko tutkittavan kokonaisuormitus ajoittain LHTL-jaksolla liiallinen ja saattoiko se vaikuttaa heikentävästi korkeanpaikanharjoittelun jälkeiseen maksimaaliseen suorituskykyyn. Tutkittavan kokonaisuormitus saattoi olla ajoittain korkea hypoksisissa olosuhteissa asumisen, tavoitteellisen kestävyysuorituksen ja stressaavan työn yhteisvaikutuksesta. VO_{2max} :n pieneen laskuun on lisäksi saattanut vaikuttaa, että alppimajaksoilla kirjattujen vaipaiden kommenttien perusteella tutkittava joutui välillä laskemaan normaaleja harjoitusintensiteettejä huonon harjoitustuntemuksen vuoksi. Absoluuttisen VO_{2max} :n vaihteluun tutkimuksen eri mittauksissa on suhtauduttava kuitenkin kriittisesti, sillä siinä tapahtuneet prosentuaaliset muutokset ovat kaiken kaikkiaan hyvin pieniä (0–1,5 %). Tutkittavan biologisista tekijöistä ja mittauslaitteiden teknisistä tekijöistä johtuva päivittäinen vaihtelu VO_2 :n mittaustuloksissa voi tutkimusten mukaan olla jopa 4 % (Hodges ym. 2005). Myös jo 0,1 %:n virhe hengityskasuanalysoijan O_2 :n mittauksessa aiheuttaa 3 %:n virheen VO_2 :n arvioinnissa (Ingalsuo 2007, 33).

VO_{2max} :n näkökulmasta myöskään tutkittavan kestävyysuorituskyvyssä ei nähty perinteisen näkemyksen mukaista vaihetta, eli ensimmäisten korkeanpaikanharjoittelujakson jälkeisten päivien kestävyysuorituskyvyn parantumista (Sinex & Chapman 2015). Tutkittavan VO_{2max} :n paraneminen alppimajakson jälkeisten viikkojen aikana mukaillee kuitenkin sitä käsitystä, että

monet urheilijat saavuttavat parhaan harjoittelun ja hypoksia-altistuksen yhteisvaikutuksen kahden-neljän viikon aikana merenpinnantasolle paluusta (Peltonen & Nummela 2016b, 597–598). Teoreettisen VO_{2max} :n parantuminen 4,4 %:lla alppimajakson jälkeisten neljän viikon aikana osoittaa, että hypoksiavasteet ja adaptaatiot yhdessä onnistuneen harjoittelun kanssa saattoivat mahdollistaa kestävyysuorituskykyyn vaikuttavien tekijöiden kehittymistä (Rusko ym. 2004). Esimerkiksi maksimaalista suorituskykyä kehittävää tehoharjoittelua tehtiin alppimajakson ja sen jälkeisen seurantajakson aikana lähes saman verran. Pelkän normoksiassa harjoittelun avulla saavutettu parannus teoreettisessa VO_{2max} :ssa ei siis välttämättä olisi ollut samanlainen kuin tämän tutkimusjakson aikainen parannus. Tutkimuksessa olisi ollut myös mielenkiintoista tietää, millä tavalla alppimajakoksella saavutetut vasteet tHb_{massa} :ssa ja VO_{2max} :ssä olisivat vaikuttaneet maastohiihdon kilpasuoritusta mukailevaan kestävyysuoritukseen tämän tutkimuksen koehenkilöllä. Tätä olisi voitu testata tutkimuksessa esimerkiksi laboratorio-olosuhteissa tehdyillä vakioiduilla rullahiihtotesteillä.

9.3 Valtimoveren happipitoisuus

Kolmanneksi tutkimuskysymykseksi oli asetettu se, miten neljän viikon alppimajakso vaikuttaa valtimoveren happipitoisuuteen. Koehenkilön elimistössä voidaan todeta ilmenneen teorian mukaisesti niin akuutteja kuin kroonisia hypoksiavasteita, joilla valtimoveren happipitoisuutta on pystytty ylläpitämään koholla alppimajakson aikana. Hypoksian vaikutus koehenkilön valtimoveren happipitoisuutta hyvin kuvaavaan SaO_2 :oon oli siis hypoteesin mukainen, eli siinä ilmeni levossa vain maltillista laskua. Tutkittavan päiväkohtaisen SaO_2 säilyminen melko tasaisena koko alppimajakson ajan poikkeaa kuitenkin kirjallisuudessa esitetystä tiedosta, jonka mukaan valtimoveren happipitoisuus kohoaa lähelle merenpinnantasoa pitkäkestoisessa hypoksiassa (Amann ym. 2013). SaO_2 :n säilyminen tasaisena ja maltillisen alhaisena (90–94 %) koko alppimajakson ajan voidaan pohtia johtuvan ainakin jossain määrin vain maltillisesta tHb_{massa} :n kasvusta. Tätä ajatusta tukee se, että valtimoveren happipitoisuuden palautumiselle keskeisimpiä hypoksiavasteita ovat verenkierroelimistön hematologiset adaptaatiot eli punasolumassan ja tHb_{massa} :n lisääntyminen. (Peltonen & Nummela 2016a, 594)

Alppimajakson aikana suoritettujen submaksimaalisten hypoksiaharjoitusten keskimääräisessä SaO_2 :ssa nähtiin kohoamista alppimajakson edetessä. Valtimoveren happipitoisuuden

kohoaminen kroonisessa hypoksiassa submaksimaalisen vakiokuormituksen aikana on aiemman kirjallisuuden mukainen vaste hengitys- ja verenkiertoelimistössä (Wagner 2001, Peltosen ja Nummelan 2016a, 587–590 mukaan). Ristiriitaisuus hypoksiaharjoitusten ja päiväkohtaisen keskimääräisen SaO₂:n kehityksen kanssa alppimajakson aikana on kuitenkin pohdintaa herättävä, sillä tHb_{massa}:n kasvu oli maltillinen. Voidaan pohtia, onko hypoksiaharjoituksissa kohonneeseen SaO₂:n kohoamiseen voinut vaikuttaa esimerkiksi elimistön tottuminen juoksuun ja juoksun taloudellistuminen talven hiihtopainotteisen harjoittelun jälkeen. Tutkittavaa ei ohjeistettu suorittamaan totuttelujaksoa hypoksiaharjoituksissa käytettyyn juoksunopeuteen, vaikka tutkittavan harjoittelussa ennen tutkimusta ei ollut painotettu juoksua harjoitustapana. Alppimajaksoa edeltävinä kahtena viikkona tutkittava oli suorittanut kaksi juoksuharjoitusta sekä tutkimukseen liittyvät juoksua sisältävät suoran VO_{2max}:n testin ja submaksimaalisen fyysisen suorituskyvyn testin, jotka sisälsivät juoksua. Juoksuharjoitteluun tottuminen sekä lukuisat kroonisen hypoksian hengitys- ja verenkiertoelimistön hypoksiavasteet submaksimaalisessa vakiokuormituksessa ovat siis voineet vaikuttaa kuormituksen suhteelliseen kevenemiseen (% VO_{2max}). Kuormituksen suhteellinen keveneminen on puolestaan voinut edesauttaa elimistön kykyä ylläpitää valtimoveren happipitoisuutta paremmin koholla alppimajakson hypoksiaharjoituksissa.

9.4 Verimuuttujat

Neljänneksi tutkimuskysymykseksi oli asetettu se, kuinka alppimajakso vaikuttaa tutkittavan verimuuttujiin sekä, millaisia muutoksia niissä tapahtuu alppimajakson jälkeen. Koehenkilöllä ilmeni aiemman tutkimustiedon mukaisesti akuutti nousu laskimoverinäytteestä analysoidussa S-Epo:n pitoisuudessa, mutta pitoisuus oli vielä alppimajakson 25. päivän mittauksessa huomattavasti kolmannen päivän mittausta korkeampi. On myös mielenkiintoista, ettei tutkittavan S-Epo:n pitoisuus laskenut lähtötasolle edes kolmen viikon aikana merenpinnantason olosuhteisiin paluusta. Aiemman tutkimustiedon mukaan S-Epo:n pitoisuus laskee akuutin vasteen jälkeen jo kahdessa viikossa takaisin lähtötasolle (Eckardt 1989, Milledge & Bärtzsch 2014, Peltosen & Nummelan 2016a, 585–594 mukaan). EPO-vaste on kuitenkin todettu myös hyvin yksilölliseksi (Chapman ym. 1998, Chapman ym. 2014a), joten tutkittavan vastetta ei sen perusteella voida todeta epänormaaliksi tai epäluotettavaksi. S-Epo:n pitoisuuteen vaikuttavat myös mahdolliset veritilavuuden muutokset eri mittausten välillä.

Alppimajajakson asumiskorkeus oli teknisten haasteiden takia ennen kolmannen päivän S-Epo:n mittausta 2 000–2 100 m suunnitellusta 2 250 m:stä poiketen. Tämän seurauksena voidaan pohtia, onko ensimmäisten päivien suunniteltua alhaisempi asumiskorkeus voinut vaikuttaa tutkittavan akuuttiin EPO-vasteeseen, erytropoieesin stimuloitumisen tehokkuuteen ja täten saavutettuun tHb_{massa}-vasteeseen. Tuoreen kirjallisuuden perusteella voidaan myös pohtia olisiko tutkittavan EPO-vaste voinut vaikuttaa tHb_{massa}:n säilymiseen merenpinnantason olosuhteisiin paluun jälkeen. S-Epo:n säilymisellä kohonneena on nimittäin ehdotettu olevan mahdollisesti vaikutusta tHb_{massa}:n pidempikestoisessa säilymisessä korkeanpaikanharjoittelujakson jälkeen (Yan ym. 2021). Tässä tutkimuksessa ei pyritty säilyttämään erityisten toimenpiteiden avulla S-Epo:n pitoisuutta koholla, mutta sen luontaisella säilymisellä kohonneena ei nähty vaikutusta koehenkilön tHb_{massa}:n säilymiseen neljä viikkoa alppimajajakson päättymisestä. Toisaalta useammat tHb_{massa}:n mittaukset alppimajajakson jälkeisellä seurantajaksoilla olisivat antaneet mielenkiintoista tietoa tutkittavan tHb_{massa}:n laskun etenemisestä. Tiheämmän seurannan avulla olisi voitu pohtia, vaikuttiko S-Epo:n koholla säilyminen tHb_{massa}:n aiemman kirjallisuuden mukaiseen säilymiseen poikkeavalla tavalla.

S-Ferrit:n pitoisuudessa vaste neljän viikon alppimajajakson krooniselle hypoksialle oli hypoteesin mukainen, eli sen pitoisuus laski alppimajajakson aikana (Robertson ym. 2010b). Laskua tapahtui siitä huolimatta, että arvioidusti myös veritilavuus laski alppimajajakson alussa ja lopussa tehdyn optimoidun hiilimonoksidin takaisinhengitysmenetelmän perusteella. S-Ferrit:n pitoisuudessa tapahtunut lasku on tHb_{massa}-vasteen perusteella todennäköisesti osoitus siitä, että varastoitua rautaa on käytetty erytropoieesissa Hb:n muodostukseen (Silverthorn 2016, 535–555). S-Ferrit:n pitoisuudessa nähtyä pienehköä laskua seurantajakson 2 ja merenpinnantason olosuhteisiin paluun jälkeen ei puolestaan todennäköisesti selitä erytropoieesi. S-Ferrit:n laskua saattavat selittää sen sijaan muun muassa veritilavuuden kasvu tai rautalisän käytön lopettaminen alppimajajakson jälkeen.

Laskimoverinäytteissä veren hapenkuljetuskykyä kuvaavissa, mutta veren määrään suhteessa olevissa Hb:ssa ja hematokriitissa tapahtuneet muutokset ilmensivät veren hapenkuljetuskyvyn parantumista yhtä verilitraa kohti alppimajajakson aikana. Tämä tulos oli looginen tHb_{massa}-vasteen kanssa. On kuitenkin jälleen huomioitava, että optimoidussa hiilimonoksidin takaisinhengitysmenetelmästä tulokseksi saadussa veritilavuuden arvioissa nähtiin laskua alppimajajakson aikana. Lasku veritilavuudessa vaikuttaa parantavasti Hb:in ja hematokriittiin, joten pelkkiä laskimoverinäytteiden tuloksia tulkittaessa veren hapenkuljetuskyvyn kehitys alppimajajakson

aikana näyttäytyisi todellisuutta positiivisempänä. Alppimajajakso ei vaikuttanut juurikaan punasolujen ominaisuuksia kuvaaviin punasoluidekseihin. Tuloksen voidaan pohtia olevan samansuuntainen muiden hematologista vastetta kuvaavien muuttujien kanssa, joiden perusteella veren hapenkuljetuskyvyssä tapahtui vain maltillista kehitystä. Epäkypsien punasolujen osuus punasoluista (E-retik) oli alppimajakson päättyessä alhaisempi kuin jakson alussa, joten erytropoieesin aktiivisuuden voidaan pohtia olleen melko vähäinen alppimajakson lopussa. Tämän tutkimuksen kannalta olisi ollut mielenkiintoista nähdä millainen vaste E-retik:ssa saavutettiin alppimajakson alussa. Tiedon avulla olisi voitu pohtia paremmin, oliko tutkittavan saavuttama S-Epo:n vaste riittävä käynnistämään tehokkaan erytropoieesin ja jäikö E-retik:n vaste maltilliseksi tHb_{massa} -vasteen tapaan.

9.5 Yhteenveto

Tämän tapaustutkimuksen analyysin perusteella neljän viikon alppimajakson voidaan todeta ilmentäneen tutkittavan hengitys ja verenkiertoelimistössä hypoksisten olosuhteiden aiheuttamia fysiologisia vasteita ja adaptaatioita. Tutkimuksessa suoritettun LHTL-jakson todettiin kuitenkin aiheuttaneen tutkittavalle naismaastohiihtäjälle vain maltillisia hyötyjä kestävyysuorituskykyyn keskeisesti vaikuttaviin hengitys- ja verenkiertoelimistön muuttujiin. Siitä huolimatta LHTL-jakso mahdollisesti edesauttoi siirtovaikutuksin tutkittavaa saavuttamaan paremman merenpinnantason kestävyysuorituskyvyn noin neljä viikkoa alppimajakson jälkeen. Tutkittavan mahdollisten tulevien korkeanpaikanharjoitusjaksojen avulla olisi suositeltavaa tutkia, olisiko hänen mahdollista saavuttaa parempia hyötyjä korkeanpaikanharjoittelusta esimerkiksi erilaisen hypoksisen annoksen, harjoittelun tai vähäisemmän elimistön kokonaiskuormituksen seurauksena. Viitearvojen perusteella tutkittavalla olisi varaa kehitykselle, joka voisi nostaa hänen tHb_{massa} :n ja $VO_{2\text{max}}$:n tasot selvästi kansallisen kärkitason arvoihin tai jopa korkeammiksi. Tämän tutkimuksen perusteella tutkittavan saattaisi siis olla mahdollista saavuttaa systemaattisen ja onnistuneen korkeanpaikanharjoittelun avulla parannuksia kestävyysuorituskykyyn keskeisesti vaikuttavissa hengitys- ja verenkiertoelimistön fysiologisissa tekijöissä. Mahdollisuutta parempien hyötyjen saavuttamiseen voidaan pitää hyvänä, sillä useiden tutkimusten perusteella yksilöiden on todettu saavuttavan toisistaan merkittävästi poikkeavia hengitys- ja verenkiertoelimistön vasteita ja adaptaatioita eri korkeanpaikanharjoittelujaksoista.

Tämän tapaustutkimuksen vahvuus oli tutkittavana olleen urheilijan saama hyöty hänen yksilöllisiä hypoksiavasteitansa ja adaptaatioitansa sekä LH TL-jakson toteutusta pohtivasta analyysistä. Analyysiä voidaan käyttää urheilijan mahdollisten tulevien korkeanpaikanharjoittelujaksojen suunnittelussa sekä niistä saavutettujen hengitys- ja verenkiertoelimistön fysiologisten vasteiden vertailussa ja seurannassa. Tässä tutkimuksessa keskeisten muuttujien mittaukseen käytetyt tutkimusmenetelmät olivat tarkkuudeltaan ja toistettavuudeltaan luotettaviksi osoitettuja. Kaikki tutkimusmittaukset suoritettiin mahdollisimman huolellisesti eikä tulosten kannalta keskeisissä mittauksissa ilmennyt ongelmia. Tämän tutkimuksen heikkouksia ovat tulosten yksilöllisyys, jonka vuoksi tuloksia ei voida missään tilanteessa yleistää. Tutkimuksen aikana alppimajassa ilmeni teknisiä vikoja, joiden vuoksi alppimajajakson asumiskorkeuteen tuli pieniä poikkeuksia alkuperäiseen tutkimussuunnitelmaan verrattuna.

LÄHTEET

- Alfrey, C. P., Rice, L., Udden, M. M. & Driscoll, T. B. (1997). Neocytolysis: physiological down-regulator of red-cell mass. *The Lancet* 349 (9062), 1389–1390. doi: 10.1016/S0140-6736(96)09208-2.
- Amann, M., Goodall, S., Twomey, R., Subudhi, A. W., Lovering, A. T. & Roach, R. C. (2013). AltitudeOmics: on the consequences of high-altitude acclimatization for the development of fatigue during locomotor exercise in humans. *Journal of Applied Physiology* 115 (5), 634–642. doi: 10.1152/jappphysiol.00606.2013.
- Balke, B. & Ware, R. W. (1959). An experimental study of “physical fitness” of Air Force personnel. *United States Armed Forces medical journal* 10 (6), 675–688.
- Borg, G. Borg’s Perceived Exertion and Pain Scales. (1998). Champaign, IL: Human Kinetics.
- Chapman, R. F., Karlsen, T., Resaland, G. K., Ge, R.-L., Harber, M. P., Witkowski, S., Stray-Gundersen, J. & Levine, B. D. (2014a). Defining the “dose” of altitude training: how high to live for optimal sea level performance enhancement. *The Journal of Applied Physiology* 116 (6), 595–603. doi: 10.1152/jappphysiol.00634.2013.
- Chapman, R. F., Laymon Stickford, A. S., Lundby, C. & Levine, B. D. (2014b). Timing of return from altitude training for optimal sea level performance. *Journal of Applied Physiology* 116 (7), 837–843. doi: 10.1152/jappphysiol.00663.2013.
- 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. doi: 10.1152/jappl.1998.85.4.1448.
- Coffey, V. G. (2012). *The Molecular Bases of Endurance Training Adaptation*. Teoksessa: Mujika, I. *Endurance training – Science and Practice*. Victoria-Gasteiz: Iñigo Mujika S.L.U, 119–126.
- Coppel, J., Hennis, P., Gilbert-Kawai, E. & Grocott M. P. W. (2015). The physiological effects of hypobaric hypoxia versus normobaric hypoxia: a systematic review of crossover trials. *Extreme physiology & medicine* 4 (1), 2–2. doi:10.1186/s13728-014-0021-6.
- Dempsey, J. A. & Wagner, P. D. (1999). Exercise-induced arterial hypoxemia. *Journal of Applied Physiology* 87 (6), 1997–2006. doi:10.1152/jappl.1999.87.6.1997.
- Dzierzak, E. & Philipsen, S. (2013). Erythropoiesis: Development and differentiation. *Cold Spring Harbor perspectives in medicine* 3 (4), a011601-a011601. doi:10.1101/cshperspect.a011601.

- Eide, R. P., 3. & Asplund, C. A. (2012). Altitude illness: update on prevention and treatment. *Current Sports Medicine Reports* 11 (3), 124–130. doi: 10.1249/JSR.0b013e3182563e7a.
- González-Alonso, J. & Calbet, J. A. L. (2003). Reductions in Systemic and Skeletal Muscle Blood Flow and Oxygen Delivery Limit Maximal Aerobic Capacity in Humans. *Circulation* 107 (6), 824–830. doi:10.1161/01.CIR.0000049746.29175.3.
- Gore C. J., Bourdon, P. C., Woolford S. M., Ostler, L. M., Eastwood, A., & Scroop, G. C. (2006). Time and sample site dependency of the optimized CO-Rebreathing method. *Medicine and Science in Sport and Exercise* 38 (6), 1187–1193. doi: 10.1249/01.mss.0000222848.35004.41.
- Garvican-Lewis, L. A., Sharpe, K. & Gore, C. J. (2016). Time for a new metric for hypoxic dose? *Journal of applied physiology* 121 (1), 352–355. doi:10.1152/jappphysiol.00579.2015.
- Garvican-Lewis, L. A., Vuong, V. L., Govus, A. D., Peeling, P., Jung, G., Nemeth, E., Hughes, D., Lovell, G., Eichner D. & Gore, C. J. (2018). Intravenous iron does not augment the hemoglobin mass response to simulated hypoxia. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 50 (8) 1669-1678. doi: 10.1249/MSS.0000000000001608.
- Gough, C. E., Sharpe, K., Garvican, L. A., Anson, J. M., Saunders, P. U. & Gore, C. J. (2013). The effects of injury and illness on haemoglobin mass. *International Journal of Sports Medicine* 34 (9), 763–769. doi: 10.1055/s-0033-1333692.
- Hall, J. E. (2011). *Guyton and Hall textbook of medical physiology*. 12. painos. Philadelphia, PA: Saunders Elsevier.
- Hall, J. E. (2016). *Guyton and Hall textbook of medical physiology*. 13. painos. Philadelphia, PA: Saunders Elsevier.
- Hauser, A., Schmitt, L., Troesch, S., Saugy, J. J., Cejuela-Anta, R., Faiss, R., Robinson, N., Wehrin, J. P. & Millet, G. P. (2016). Similar Hemoglobin Mass Response in Hypobaric and Normobaric Hypoxia in Athletes. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 48 (4), 734–741. doi: 10.1249/MSS.0000000000000808.
- Hauser, A., Troesch, S., Saugy, J. J., Schmitt, L., Cejuela-Anta, R., Faiss, R., Steiner, T., Robinson, N., Millet, G. P. & Wehrin, J. P. (2017). Individual hemoglobin mass response to normobaric and hypobaric “live high–train low”: a one-year crossover study. *Journal of Applied Physiology* 123 (2), 387–393. doi: 10.1152/jappphysiol.00932.2016.
- Hauser, A., Troesch, S., Steiner, T., Brocherie, F., Girard, O., Saugy, J. J., Schmitt, L., Millet, G. P. & Wehrin, J. P. (2018). Do male athletes with already high initial hemoglobin

- mass benefit from “live high-train low” altitude training? *European Journal of Applied Physiology* 103 (1), 68–76. doi: 10.1113/EP0865590.
- Hauswirth, C. & Meur, Y. L. (2012). *Physiological Demands of Endurance Performance*. Teoksessa: Mujika, I. *Endurance training – Science and Practice*. Victoria-Gasteiz: Iñigo Mujika S.L.U, 3–10.
- 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. doi: 10.1123/ijsp.2017-0547.
- Hodges, L. D., Brodie, D. A. & Bromley, P. D. (2005). Validity and reliability of selected commercially available metabolic analyzer systems. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports* 15 (5), 271–279. doi: 10.1111/j.1600-0838.2005.00477.x.
- Hoff, J., Gran, A. & Helgerud, J. (2002). Maximal strength training improves aerobic endurance performance. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports* 12 (5), 288–295. doi:10.1034/j.1600-0838.2002.01140.x.
- Holmberg, H. C. (2015). The elite cross-country skier provides unique insights into human exercise physiology. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports* 25 (4), 100–109. doi:10.1111/sms.12601.
- Holmberg H. C. & Calbet, J. A. (2007). Insufficient ventilation as a cause of impaired pulmonary gas exchange during submaximal exercise. *Respiratory Physiology Neurobiology* 157 (2), 348–359. doi:10.1016/j.resp.2006.12.013.
- Ingalsuo, P. (2007). *Diodilasertekniikan soveltuvuus hengityskaasuanalysointorin kaasumittauksiin*. Liikuntabiologian laitos. Pro gradu -tutkielma. Viitattu 13.6.2022. https://jyx.jyu.fi/bitstream/handle/123456789/7202/1/URN_NBN_fi_jyu-2007422.pdf.
- Jones, A. M. (2006). The Physiology of the World Record Holder for the Women’s Marathon. *International Journal of Sports Science and Coaching* 1 (2), 101–116. doi:10.1260/174795406777641258.
- Joyner, M. J. & Coyle, E. F. (2008). Endurance exercise performance: the physiology of champions. *Journal of Physiology* 586 (1), 35–44. doi:10.1113/jphysiol.2007.143834.
- Levine, B. D. & Stray-Gundersen, J. (1997). "Living high-training low": effect of moderate-altitude acclimatization with low-altitude training on performance. *Journal of Applied Physiology* 83 (1), 102–112. doi: 10.1152/jappl.1997.83.1.102.

- Losnegard, T. (2019). Energy system contribution during competitive cross-country skiing. *European Journal of Applied Physiology* 119 (8), 1675–1690. doi:10.1007/s00421-019-04158-x.
- Losnegard T., Myklebust H., Spencer M. & Hallèn J. Seasonal Variations in VO₂max, O₂-cost, O₂-deficit and Performance in Elite Cross-Country Skiers. (2013) *Journal of strength and conditioning research* 27 (7), 1780–1790. doi:10.1519/JSC.ObOI3e31827368f6.
- Lundby, C., Montero, D. & Joyner, M. (2016). Biology of VO₂max: looking under the physiology lamp. *Acta Physiologica* 220 (2), 218–228. doi:10.1111/apha.12827.
- McArdle, W. D., Katch, F. I. & Katch, V. L. (2015). *Exercise physiology: Energy, nutrition, and human performance*. 7. painos. Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins.
- McLean, B., Buttifant, D., Gore, C., White, K. & Kemp, J. (2013). Year-to-year variability in haemoglobin mass response to two altitude training camps. *British Journal of Sports Medicine* 47 (1), 51–58. doi: 10.1136/bjsports-2013-092744.
- McLester, C. N., Nickerson, B. S., Kliszczewicz, B. M. & McLester, J. R. (2020). Reliability and Agreement of Various InBody Body Composition Analyzers as Compared to Dual-Energy X-Ray Absorptiometry in Healthy Men and Women. *Journal of Clinical Densitometry* 23 (3), 443–450. doi: 10.1016/j.jocd.2018.10.008.
- Mero, A., Nummela, A. ja Keskinen K. (1997). *Nykyaikainen urheiluvalmennus*. Jyväskylä: Mero Oy.
- Mujika, I. (2012). Preface. Teoksessa: Mujika, I. *Endurance training – Science and Practice*. Victoria-Gasteiz: Iñigo Mujika S.L.U, V.
- Nummela, A. (2016). *Kestävyysharjoittelu*. Teoksessa: Mero, A., Nummela, A., Kalaja, S. & Häkkinen, K. *Huippu-urheiluvalmennus - Teoria ja käytäntö päivittäisvalmennuksessa*. Lahti: VK-kustannus Oy, 272–294.
- Nummela, A., Eronen, T., Koponen, A., Tikkanen, H. & Peltonen, J. E. (2019). Variability in hemoglobin mass response to altitude training camps. *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports* 31 (1), 44–51. doi: 10.1111/sms.13804.
- Nummela, A. & Peltonen, J. (2018). Suorat testit. Teoksessa: Keskinen, K., L., Häkkinen, K. & Kallinen, M. *Fyysisen kunnon mittaaminen – käsi- ja oppikirja kuntotestaajille*. Helsinki: Liikuntatieteellinen Seura ry, 79–101.
- Ohtonen, O. & Mikkola, J. (2016). *Maastohiihdon lajiansalyysi ja valmennuksen ohjelmointi*. Teoksessa: Mero, A., Nummela, A., Kalaja, S. & Häkkinen, K. *Huippu-urheiluvalmennus – Teoria ja käytäntö päivittäisvalmennuksessa*. Lahti: VK-kustannus Oy, 491–519.

- 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 (5), 1527–1533. doi:10.1152/jappl.1999.86.5.1527.
- Peltonen, J. & Nummela, A. (2016a). Fysiologiset vasteet hypoksiassa. Teoksessa: Mero, A., Nummela, A., Kalaja, S. & Häkkinen, K. *Huippu-urheiluvalmennus - Teoria ja käytäntö päivittäisvalmennuksessa*. Lahti: VK-kustannus Oy, 583–594.
- Peltonen, J. & Nummela, A. (2016b). Vuoristoharjoittelun ja hypoksia-altistuksen toteutus urheilussa. Teoksessa: Mero, A., Nummela, A., Kalaja, S. & Häkkinen, K. *Huippu-urheiluvalmennus - Teoria ja käytäntö päivittäisvalmennuksessa*. Lahti: VK-kustannus Oy, 595–600.
- Peltonen, J. E., Leppävuori, A. P., Kyrö, K. P., Mäkela, P. & Rusko, H. K. (1999). Arterial haemoglobin oxygen saturation is affected by FIO₂ at submaximal running velocities in elite athletes. *Medicine and science in sports and exercise* 9 (5), 265–271. doi: 10.1111/j.1600-0838.1999.tb00244.x.
- Peltonen, J. E., Tikkanen, H. O. & Rusko, H. K. (2001). Cardiorespiratory responses to exercise in acute hypoxia, hyperoxia and normoxia. *European Journal of Applied Physiology* 85 (1), 82–88. doi:10.1007/s004210100411.
- Piehl, A. K., Svedenhag, J., Wide, L., Berglund, B. & Saltin, B. (1998). Short-term intermittent normobaric hypoxia – hematological, physiological and mental effects. *Scandinavian journal of medicine & science in sports* 8 (3), 132–137. doi: 10.1111/j.1600-0838.1998.tb00182.x.
- Poole, D. C., Rossiter, H. B., Brooks, G. A. & Gladden, L. B. (2021). The anaerobic threshold: 50+ years of controversy. *The Journal of Physiology* 599 (3), 737–767. doi:10.1113/JP279963.
- Prabhakar, N. R. & Semenza, G. L. (2012). Adaptive and Maladaptive Cardiorespiratory Responses to Continuous and Intermittent Hypoxia Mediated by Hypoxia-Inducible Factors 1 and 2. *Physiological reviews* 92 (3), 967–1003. doi: 10.1152/physrev.00030.2011.
- Roach, R. C., Hackett, P. H., Oelz, O., Baertsch, P., Luks, A. M., MacInnis, M. J., Baillie, J. K. & The Lake Louise AMS Score Consensus Committee. (2018). The 2018 Lake Louise Acute Mountain Sickness Score. *High Altitude Medicine & Biology* 19 (1), 4–6. doi: 10.1089/ham.2017.0164.

- Robertson, E. Y., Saunders, P. U., Pyne, D. B., Gore, C. J. & Anson, J. M. (2010a). Effectiveness of intermittent training in hypoxia combined with live high/train low. *European Journal of Applied Physiology* 110 (2), 379–387. doi: 10.1007/s00421-010-1516-5.
- Robertson, E. Y., Saunders, P. U., Pyne, D. B., Aughley, R. J., Anson, J. M. & Gore, C. J. (2010b). Reproducibility of performance changes to simulated live high/train low altitude. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 42 (2), 394-401. doi: 10.1249/MSS.0b013e3181b34b57.
- Rusko, H. (2003a). *Physiology of cross country skiing*. Teoksessa: Rusko H. (toim.) *Cross Country Skiing*. Osney Mead, Oxford; Malden, MA: Blackwell Science, 1–31.
- Rusko, H. (2003b). Preface. Teoksessa: Rusko H. (toim.) *Cross Country Skiing*. Osney Mead, Oxford; Malden, MA: Blackwell Science, xi.
- Rusko, H. K., Tikkanen, H. O. & Peltonen, J. E. (2004). Altitude and endurance training. *Journal of Sports and Science* 22 (10) 928–945. doi:10.1080/02640410400005933.
- Sandbakk, Ø., Hegge, A. M., Losnegard, T., Skattebo, O., Tonnessen, E. & Holmberg, H. C. (2016). The physiological capacity of the world's highest ranked female cross-country skiers. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 48 (6), 1091–1100. doi: 10.1249/MSS.0000000000000862.
- Sandbakk, Ø. & Holmberg, H.-C. (2017). Physiological Capacity and Training Routines of Elite Cross-Country Skiers: Approaching the Upper Limits of Human Endurance. *International Journal of Sports Physiology and Performance* 12 (8), 1003–1011. doi:10.1123/ijsp.2016-0749.
- Self, D. A., Mandella, J. G., Prinzo, O. V., Forster, E. M. & Shaffstall, R. M. (2011). Physiological equivalence of normobaric and hypobaric exposures of humans to 25,000 feet (7620 m). *Aviation, space, and environmental medicine* 82 (2), 97–103. doi:10.3357/ASEM.2908.2011.
- Silverthorn, D. U. (2016). *Human physiology: An integrated approach*. 7. painos. San Francisco: Pearson/Benjamin Cummings.
- Sinex, J. A. & Chapman, R. F. (2015). Hypoxic training methods for improving endurance exercise performance. *Journal of Health and Sport Science* 4 (4), 325–332. doi: 10.1016/j.jshs.2015.07.005.
- 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), 486–495. doi:10.1007/s00421-005-0050-3.

- Shmidt, W. & Prommer, N. (2010). Impact of Alterations in Total Hemoglobin Mass on VO_{2max} . *Exercise and Sport Sciences Reviews* 38 (2), 68–75. doi:10.1097/JES.0b013e3181d4957a.
- Suomen Hiihtoliitto. (2021). Maastohiihdon Suomen Cup, info. Viitattu 13.10.2021. <https://arkisto.hiihtoliitto.fi/suomen-cup/info/>.
- Tønnessen, E., Haugen, T. A., Hem, E., Leirstein, S. & Seiler, S. (2015). Maximal Aerobic Capacity in the Winter-Olympics Endurance Disciplines: Olympic-Medal Benchmarks for the Time Period 1990–2013. *International Journal of Sports Physiology and Performance* 10 (7), 835–839. doi:10.1123/ijsp.2014-0431.
- Tunturi, S. (2020a). Hemoglobiini (B-Hb). Duodecim Terveyskirjasto. Kustannus Oy Duodecim. Viitattu 20.11.2021. <https://www.terveyskirjasto.fi/snk03031>.
- Tunturi, S. (2020b). Punasoluindeksit. Duodecim Terveyskirjasto. Kustannus Oy Duodecim. Viitattu 16.11.2021. <https://www.terveyskirjasto.fi/snk03033>.
- Wachsmuth, N. B., Völzke, C., Prommer, N., Schmidt-Trucksäss, A., Frese, F., Spahl, O., Eastwood, A., Stray-Gundersen, J. & Schmidt, W. (2012). The effects of classic altitude training on hemoglobin mass in swimmers. *European Journal of Applied Physiology* 113 (5), 1199–1211. doi: 10.1007/s00421-012-2536-0.
- Wehrin, J., P. & Hallen, J. (2006). Linear decrease in VO_{2max} and performance with increasing altitude in endurance athletes. *European Journal of Applied Physiology* 96 (4) 404–412. doi:10.1007/s00421-005-0081-9.
- 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. doi:10.1249/mss.0b013e3180de49bd.
- Yan, B., Ge, X., Yu, J., Hu, Y. & Girard, O. (2021). Hypoxic re-exposure retains hematological but not performance adaptations post-altitude training. *European Journal of Applied Physiology* 121 (4), 1049–1059. doi: 10.1007/s00421-020-04589-x.

LIITTEET

LIITE 1. tHb_{massa}:n (g/kg) ja veritilavuuden (ml/kg) viitearvot eritasoisilla kestävyysurheilijoilla (Blood tec, Bayreuth, Germany).



Classification of total hemoglobin mass and blood volume

The following chart shows values of total hemoglobin mass (tHb) and blood volume (BV) of endurance athletes (e.g. runners, cross-country skiers, racing cyclists) of different proficiency levels. The values result from approx. 1000 measurements in healthy subjects with normal BMI and are related to body weight in order to allow comparison.

		normal untrained	leisure sportsmen	athletes at regional level	national elite	international elite	highest value ever measured
♂	tHb g/kg	9,5 – 10,5	10,5 – 12,0	12,0 – 13,5	13,5 – 15	14,5 – 16,5	20,1
	BV ml/kg	65 - 75	75 - 85	85 - 95	95 - 110	105 – 120	135
♀	tHb g/kg	8,5 – 9,5	9,5 – 10,5	10,5 – 11,5	11,5 – 12,5	12,0 – 13,5	14,5
	BV ml/kg	60 – 70	70 – 77	77 – 87	87 – 95	90 - 105	110

LIITE 2. Koehenkilön harjoituspäiväkirjan viikoittaiset yhteenvedot.

Tiivis yhteenvedo kaikista viikoista (viikko 17 puuttuu).

Viikko	Pvm	Päiviä	Harj	Km	H	TL	Lepo	Sairas	YH	LH	VP	Tunne(ka)	Pal(ka)	Uni(ka)
18	03.05.2021 - 09.05.2021	7	13	230.0	14:35	0.0	0	0	0	0	0	0.0	0.0	0.0
19	10.05.2021 - 16.05.2021	7	13	241.0	19:00	0.0	0	0	0	0	0	0.0	0.0	0.0
20	17.05.2021 - 23.05.2021	6	12	191.5	17:00	0.0	1	0	0	0	0	0.0	0.0	0.0
21	24.05.2021 - 30.05.2021	7	11	153.5	13:50	0.0	0	0	0	0	0	1.0	0.0	0.0
22	31.05.2021 - 06.06.2021	7	12	237.0	19:30	0.0	0	0	0	0	0	1.0	0.0	0.0
23	07.06.2021 - 13.06.2021	6	11	248.5	18:55	0.0	1	0	0	0	0	0.0	0.0	0.0
24	14.06.2021 - 20.06.2021	7	13	225.0	17:55	0.0	0	0	0	0	0	1.0	0.0	0.0
15	12.04.2021 - 18.04.2021	5	5	57.5	5:20	0.0	2	0	0	0	0	0.0	0.0	0.0
16	19.04.2021 - 25.04.2021	6	11	138.5	11:30	0.0	1	0	0	0	0	0.0	0.0	0.0

Viikko 15

Lajiryhmä	Kpl	Km	H	%
Hiihto	2	34.5	2:15	42.2
Rullahiito	0	0.0	0:00	0.0
Sauvalenkit	0	0.0	0:00	0.0
Jalkalenkit	3	23.0	1:50	34.4
Pyörälenkit	0	0.0	0:00	0.0
Muu kestävyys	0	0.0	0:00	0.0
Voima	2	0.0	1:12	22.5
Nopeus/taito	1	0.0	0:03	0.9
Pelit	0	0.0	0:00	0.0
Muut	0	0.0	0:00	0.0

Tehoryhmä	Kpl	Km	H	%
Peruskestävyys	9	50.5	3:30	60.9
Vauhtikestävyys	0	0.0	0:00	0.0
Maksimikestävyys	0	0.0	0:00	0.0
Nopeuskestävyys	0	0.0	0:00	0.0
Nopeus	1	0.0	0:03	0.9
Kestovoima	0	0.0	0:00	0.0
Nopeusvoima	3	0.0	0:30	8.7
Maksimivoima	4	0.0	1:42	29.6
Taito	0	0.0	0:00	0.0
Tukiharjoittelu	0	0.0	0:00	0.0
Lihahuolto	0	0.0	0:00	0.0

Viikko 16

Lajiryhmä	Kpl	Km	H	%
Hiihto	3	55.5	4:50	42.0
Rullahiito	3	40.5	2:30	21.7
Sauvalenkit	1	2.5	0:25	3.6
Jalkalenkit	5	26.0	2:20	20.3
Pyörälenkit	1	14.0	0:30	4.3
Muu kestävyys	0	0.0	0:00	0.0
Voima	1	0.0	0:55	8.0
Nopeus/taito	0	0.0	0:00	0.0
Pelit	0	0.0	0:00	0.0
Muut	0	0.0	0:00	0.0

Tehoryhmä	Kpl	Km	H	%
Peruskestävyys	16	129.5	9:52	85.8
Vauhtikestävyys	5	6.0	0:26	3.8
Maksimikestävyys	3	3.0	0:17	2.5
Nopeuskestävyys	0	0.0	0:00	0.0
Nopeus	0	0.0	0:00	0.0
Kestovoima	0	0.0	0:00	0.0
Nopeusvoima	1	0.0	0:20	2.9
Maksimivoima	2	0.0	0:35	5.1
Taito	0	0.0	0:00	0.0
Tukiharjoittelu	0	0.0	0:00	0.0
Lihahuolto	0	0.0	0:00	0.0

Viikko 17

Lajiryhmä	Kpl	Km	H	%
Hiihto	0	0.0	0:00	0.0
Rullahiihto	3	47.5	3:15	28.3
Sauvalenkit	0	0.0	0:00	0.0
Jalkalenkit	5	38.5	3:00	26.1
Pyörälenkit	3	77.0	2:45	23.9
Muu kestävyys	0	0.0	0:00	0.0
Voima	2	0.0	2:25	21.0
Nopeus/taito	0	0.0	0:00	0.0
Pelit	0	0.0	0:00	0.0
Muut	1	0.0	0:05	0.7

Tehoryhmä	Kpl	Km	H	%
Peruskestävyys	10	151.0	7:59	69.4
Vauhtikestävyys	1	12.0	1:00	8.7
Maksimikestävyys	0	0.0	0:00	0.0
Nopeuskestävyys	0	0.0	0:00	0.0
Nopeus	1	0.2	0:01	0.1
Kestovoima	0	0.0	0:00	0.0
Nopeusvoima	3	0.0	0:25	3.6
Maksimivoima	3	0.0	2:00	17.4
Taito	1	0.0	0:05	0.7
Tukiharjoittelu	0	0.0	0:00	0.0
Lihashuolto	0	0.0	0:00	0.0

Viikko 18

Lajiryhmä	Kpl	Km	H	%
Hiihto	0	0.0	0:00	0.0
Rullahiihto	5	133.0	6:50	46.9
Sauvalenkit	0	0.0	0:00	0.0
Jalkalenkit	6	38.0	3:20	22.9
Pyörälenkit	2	56.0	2:00	13.7
Muu kestävyys	1	3.0	0:15	1.7
Voima	3	0.0	2:10	14.9
Nopeus/taito	0	0.0	0:00	0.0
Pelit	0	0.0	0:00	0.0
Muut	0	0.0	0:00	0.0

Tehoryhmä	Kpl	Km	H	%
Peruskestävyys	16	219.5	13:42	82.6
Vauhtikestävyys	2	5.75	0:24	2.4
Maksimikestävyys	2	4.75	0:19	1.9
Nopeuskestävyys	0	0.0	0:00	0.0
Nopeus	0	0.0	0:00	0.0
Kestovoima	1	0.0	0:15	1.5
Nopeusvoima	2	0.0	0:15	1.5
Maksimivoima	2	0.0	1:40	10.1
Taito	0	0.0	0:00	0.0
Tukiharjoittelu	0	0.0	0:00	0.0
Lihashuolto	0	0.0	0:00	0.0

Viikko 19

Lajiryhmä	Kpl	Km	H	%
Hiihto	0	0.0	0:00	0.0
Rullahiihto	7	191.5	12:10	64.0
Sauvalenkit	0	0.0	0:00	0.0
Jalkalenkit	6	49.5	4:15	22.4
Pyörälenkit	0	0.0	0:00	0.0
Muu kestävyys	0	0.0	0:00	0.0
Voima	3	0.0	2:35	13.6
Nopeus/taito	0	0.0	0:00	0.0
Pelit	0	0.0	0:00	0.0
Muut	0	0.0	0:00	0.0

Tehoryhmä	Kpl	Km	H	%
Peruskestävyys	22	220.25	15:06	79.8
Vauhtikestävyys	4	13.0	0:50	4.4
Maksimikestävyys	3	5.25	0:21	1.9
Nopeuskestävyys	2	1.5	0:06	0.5
Nopeus	1	1.0	0:02	0.2
Kestovoima	1	0.0	0:15	1.3
Nopeusvoima	3	0.0	0:20	1.8
Maksimivoima	2	0.0	1:55	10.1
Taito	0	0.0	0:00	0.0
Tukiharjoittelu	0	0.0	0:00	0.0
Lihashuolto	0	0.0	0:00	0.0

Viikko 20

Lajiryhmä	Kpl	Km	H	%
Hiihto	0	0.0	0:00	0.0
Rullahiihto	7	133.0	9:00	52.9
Sauvalenkit	0	0.0	0:00	0.0
Jalkalenkit	7	58.5	5:10	30.4
Pyörälenkit	0	0.0	0:00	0.0
Muu kestävyys	0	0.0	0:00	0.0
Voima	3	0.0	2:45	16.2
Nopeus/taito	0	0.0	0:00	0.0
Pelit	0	0.0	0:00	0.0
Muut	1	0.0	0:05	0.5

Tehoryhmä	Kpl	Km	H	%
Peruskestävyys	19	172.0	12:53	75.4
Vauhtikestävyys	4	14.75	1:01	6.0
Maksimikestävyys	2	1.75	0:08	0.8
Nopeuskestävyys	3	2.0	0:06	0.6
Nopeus	1	1.0	0:02	0.2
Kestovoima	2	0.0	0:30	2.9
Nopeusvoima	3	0.0	0:25	2.4
Maksimivoima	2	0.0	1:55	11.2
Taito	0	0.0	0:00	0.0
Tukiharjoittelu	1	0.0	0:05	0.5
Lihashuolto	0	0.0	0:00	0.0

Viikko 21

Lajiryhmä	Kpl	Km	H	%
Hiihto	0	0.0	0:00	0.0
Rullahiihto	5	84.0	5:25	37.8
Sauvalenkit	1	3.5	0:35	4.1
Jalkalenkit	8	72.0	6:10	43.0
Pyörälenkit	0	0.0	0:00	0.0
Muu kestävyys	0	0.0	0:00	0.0
Voima	2	0.0	2:00	14.0
Nopeus/taito	1	0.0	0:10	1.2
Pelit	0	0.0	0:00	0.0
Muut	0	0.0	0:00	0.0

Tehoryhmä	Kpl	Km	H	%
Peruskestävyys	17	144.5	11:39	81.3
Vauhtikestävyys	4	4.0	0:18	2.1
Maksimikestävyys	2	2.5	0:12	1.4
Nopeuskestävyys	1	0.5	0:01	0.1
Nopeus	1	0.0	0:05	0.6
Kestovoima	1	0.0	0:15	1.7
Nopeusvoima	2	0.0	0:15	1.7
Maksimivoima	3	0.0	1:30	10.5
Taito	1	0.0	0:05	0.6
Tukiharjoittelu	0	0.0	0:00	0.0
Lihashuolto	0	0.0	0:00	0.0

Viikko 22

Lajiryhmä	Kpl	Km	H	%
Hiihto	0	0.0	0:00	0.0
Rullahiihto	7	154.5	10:45	55.1
Sauvalenkit	2	15.0	1:45	9.0
Jalkalenkit	6	38.5	3:15	16.7
Pyörälenkit	1	29.0	1:00	5.1
Muu kestävyys	0	0.0	0:00	0.0
Voima	3	0.0	2:45	14.1
Nopeus/taito	0	0.0	0:00	0.0
Pelit	0	0.0	0:00	0.0
Muut	0	0.0	0:00	0.0

Tehoryhmä	Kpl	Km	H	%
Peruskestävyys	17	199.0	13:38	74.2
Vauhtikestävyys	7	21.0	1:42	9.3
Maksimikestävyys	3	4.0	0:18	1.6
Nopeuskestävyys	2	1.0	0:02	0.2
Nopeus	2	1.0	0:02	0.2
Kestovoima	2	0.0	0:30	2.7
Nopeusvoima	2	0.0	0:10	0.9
Maksimivoima	2	0.0	2:00	10.9
Taito	0	0.0	0:00	0.0
Tukiharjoittelu	0	0.0	0:00	0.0

Viikko 23

Lajiryhmä	Kpl	Km	H	%
Hiihto	0	0.0	0:00	0.0
Rullahiihto	9	222.5	14:55	78.9
Sauvalenkit	2	14.0	1:30	7.9
Jalkalenkit	2	12.0	1:00	5.3
Pyörälenkit	0	0.0	0:00	0.0
Muu kestävyys	0	0.0	0:00	0.0
Voima	1	0.0	1:15	6.6
Nopeus/taito	1	0.0	0:05	0.4
Pelit	0	0.0	0:00	0.0
Muut	1	0.0	0:10	0.9

Tehoryhmä	Kpl	Km	H	%
Peruskestävyys	16	193.0	14:12	86.5
Vauhtikestävyys	2	4.5	0:15	1.5
Maksimikestävyys	1	7.0	0:25	2.5
Nopeuskestävyys	0	0.0	0:00	0.0
Nopeus	2	1.0	0:08	0.8
Kestovoima	1	0.0	0:10	1.0
Nopeusvoima	1	0.0	0:05	0.5
Maksimivoima	1	0.0	1:00	6.1
Taito	1	0.0	0:10	1.0
Tukiharjoittelu	0	0.0	0:00	0.0
Lihahuolto	0	0.0	0:00	0.0

Viikko 24

Lajiryhmä	Kpl	Km	H	%
Hiihto	0	0.0	0:00	0.0
Rullahiihto	5	130.5	8:10	45.6
Sauvalenkit	3	22.5	2:45	15.3
Jalkalenkit	5	44.0	3:45	20.9
Pyörälenkit	1	28.0	1:00	5.6
Muu kestävyys	0	0.0	0:00	0.0
Voima	2	0.0	1:55	10.7
Nopeus/taito	3	0.0	0:15	1.4
Pelit	0	0.0	0:00	0.0
Muut	1	0.0	0:05	0.5

Tehoryhmä	Kpl	Km	H	%
Peruskestävyys	17	202.2	14:46	82.4
Vauhtikestävyys	4	11.0	0:35	3.3
Maksimikestävyys	2	3.0	0:15	1.4
Nopeuskestävyys	2	1.0	0:04	0.4
Nopeus	2	0.3	0:10	0.9
Kestovoima	1	0.0	0:05	0.5
Nopeusvoima	2	0.0	0:10	0.9
Maksimivoima	2	0.0	1:40	9.3
Taito	2	0.0	0:10	0.9
Tukiharjoittelu	0	0.0	0:00	0.0
Lihahuolto	0	0.0	0:00	0.0