

Urheilijan unen ja palautumisen seuranta puettavien sensoreiden avulla

TURUN YLIOPISTO
Tietotekniikan laitos
TkK-tutkielma
Lääketieteellinen tekniikka ja terveysteknologia
Toukokuu 2025
Tessa Salmia

TURUN YLIOPISTO
Tietotekniikan laitos

TESSA SALMIA: Urheilijan unen ja palautumisen seuranta puettavien sensoreiden avulla

TkK-tutkielma, 45 s., 3 liites.

Lääketieteellinen tekniikka ja terveysteknologia

Toukokuu 2025

Riittävä ja laadukas uni on keskeinen osa urheilijan palautumista ja suorituskyvyn optimointia. Tässä tutkielmassa tarkastellaan puettavien sensoreiden hyödyntämistä unen ja palautumisen seurannassa sekä näiden laitteiden tarkkuutta fysiologisten mittausten osalta. Tutkimuksen tavoitteena on selvittää, miten puettavat sensorit voivat tukea urheilijoiden palautumisen seurantaa sekä arvioida, kuinka hyvin subjektiiviset ja objektiiviset mittaukset vastaavat toisiaan.

Tutkimus koostuu kirjallisuuskatsauksesta ja empiirisestä osuudesta. Kirjallisuuskatsauksessa kartoitettiin unen ja fysiologisten mittareiden taustaa. Empiirisessä tutkimuksessa vertailtiin Oura Ring 4 -älysormuksen ja Suunto 9 Peak Pro -urheilukellon mittaamaa unenaikaista dataa sykkeen, sykevälivaihtelun, hengitystiheyden ja unen eri vaiheiden osalta.

Tulokset osoittivat, että pidempi uni oli yhteydessä korkeampaan sykevälivaihteluun ja matalampaan leposykkeeseen, mikä tukee unen merkitystä autonomisen hermoston palautumiselle. REM-unella havaittiin vahva yhteys fysiologiseen palautumiseen sykevälivaihtelun kautta. Laitteiden välillä oli eroja unen keston ja vaiheiden mittauksessa: Oura korosti kokonaisunesta kevyttä unta, kun taas Suunto painotti syvää unta. Lisäksi subjektiiviset palautumisarviot eivät täysin vastanneet fysiologisia mittauksia.

Tutkimus antaa viitteitä siitä, että vaikka molemmat sensorit tarjoavat arvokasta tietoa unesta ja palautumisesta, niiden välillä on mittausteknologisiin eroihin perustuvia vaihteluja. Yhdistämällä objektiiviset mittaukset ja subjektiiviset arviot saadaan kokonaisvaltainen kuva palautumisesta.

Asiasanat: uni, palautuminen, puettavat sensorit, sykevälivaihtelu, urheilusuorituskyky

UNIVERSITY OF TURKU
Department of Computing

TESSA SALMIA: Urheilijan unen ja palautumisen seuranta puettavien sensoreiden avulla

Bachelor of Science (Tech) Thesis, 45 p., 3 app. p.
Biomedical Engineering and Health Technology
May 2025

Sufficient and high-quality sleep is a crucial component of an athlete's recovery and performance optimization. This study examines the use of wearable sensors for sleep and recovery monitoring, focusing on their accuracy in physiological measurements. The aim is to determine how wearable sensors can support recovery assessment and evaluate the correspondence between subjective and objective measurements.

The study consists of a literature review and an empirical investigation. The literature review explores the background of sleep and physiological indicators valuable to athlete recovery. The empirical study compares sleep data from the Oura Ring 4 and Suunto 9 Peak Pro, examining heart rate, heart rate variability, respiratory rate, and sleep stages.

Results showed that longer sleep was associated with higher heart rate variability and lower resting heart rate, supporting the role of sleep in autonomic nervous system recovery. REM sleep was strongly linked to physiological recovery through heart rate variability. Differences were found between the devices: considering total sleep duration Oura emphasized light sleep, whereas Suunto emphasized deep sleep. Additionally, subjective recovery assessments did not fully align with physiological measurements.

This study demonstrates that while both devices provide valuable sleep and recovery insights, differences in measurement technology affect their results. It is recommended to integrate objective data with subjective assessments for a comprehensive understanding of recovery.

Keywords: sleep, recovery, wearable sensors, heart rate variability, athletic performance

Alkusanat

Kilpaurheilijana olen kohdannut tilanteita, joissa harjoituskuormitus ja palautuminen eivät ole olleet tasapainossa, mikä on vaikuttanut suorituskykyyn sekä jaksamiseen. Tämä työ syntyi kiinnostuksestani ymmärtää, miten palautumista voidaan mitata puettavilla sensoreilla objektiivisesti ja hyödyntää mittausdataa harjoittelun optimoinnissa.

Iso kiitos Suunnolle, joka tarjosi Suunto 9 Peak Pro -urheilukellon testikäyttöön empiiristä tutkimusta varten. Suunto osoitti kiinnostusta työhöni ja tuki tutkimuksen toteutusta laitteistollaan. Lisäksi tutkielmassa hyödynnettiin Oura Ring 4 -älysormusta unen ja palautumisen mittaamiseen. Kiitos myös tutkielmani ohjajalle ohjauksesta ja hyödyllisistä neuvoista.

Turussa, 12. toukokuuta 2025

Sisällys

1	Johdanto	1
2	Sydän ja sen toiminnan mittaaminen	4
2.1	Sydämen sähköinen toiminta	4
2.2	Sähköisen toiminnan mittaaminen	6
3	Uni ja sen mittaaminen	9
3.1	Unen fysiologia	9
3.2	Unen laatu	12
3.3	Unen mittaaminen ja seuranta	13
4	Palautumisen fysiologia ja mittaaminen	16
4.1	Syke ja sykevälivaihtelu	17
4.2	Hengitystiheys	20
5	Materiaalit ja menetelmät	21
5.1	Käytettävät puettavat sensorit	21
5.1.1	Oura Ring 4 -älysormus	21
5.1.2	Suunto 9 Peak Pro -urheilukello	23
5.2	Tutkimuksen tavoite ja tutkimuskysymykset	24
5.3	Aineistonkeruu ja käsittely	25
5.4	Analyysimenetelmät	28

6 Tulokset	30
6.1 Oura Ring 4	30
6.2 Suunto 9 Peak Pro	33
6.3 Suunnon ja Ouran vertailu	35
7 Johtopäätökset	37
7.1 Unen yhteys palautumiseen	38
7.2 Ouran ja Suunnon vertailu	41
7.3 Työn rajoitukset	43
8 Yhteenveto	44
Lähdeluettelo	46
Liitteet	
A Hakualgoritmit	A-1

Kuvat

1	Sydämen johtoratajärjestelmä	5
2	Tyypillinen EKG-käyrä	7
3	Univaiheiden jakautuminen yön aikana	10
4	Ouran Pearsonin korrelaatiomatriisi	31
5	Ouran Spearmanin korrelaatiomatriisi	32
6	Suunnon Pearsonin korrelaatiomatriisi	33
7	Suunnon Spearmanin korrelaatiomatriisi	34
8	Suunnon ja Ouran väliset korrelaatiot	35

Taulukot

1	Kerättävät muuttujat	25
2	Asteikko harjoitusten kuormittavuuden arvioimiseen	28

Lyhenteet

AV	engl. atrioventricular node, eteis-kammiosolmuke
EKG	engl. electrocardiography, elektrokardiografia
HRV	engl. heart rate variability, sykevälivaihtelu
LED	engl. light-emitting diode, loistediiodivalo
NREM	engl. non-rapid eye movement sleep, perusuni
PPG	engl. photoplethysmography, fotopletysmografia
PSG	engl. polysomnography, polysomnografia
PSQI	engl. Pittsburgh Sleep Quality Index, Pittsburghin unen laatua kartoittava kysely
REM	engl. rapid eye movement sleep, vilkeuni
RMSSD	engl. root mean square of the successive differences, peräkkäisten sykevälivaihteluiden (NN-intervallien) neliöjuuri
SA	engl. sinoatrial node, sinussolmuke
SDNN	engl. standard deviation of the normal-normal intervals, normalisoitujen sykevälivaihteluiden (NN-intervallien) keskihajonta
TSS	engl. Training Stress Score, Suunnon harjoituskuormituksen mittari

1 Johdanto

Huippu-urheilussa urheilijoiden väliset erot ovat häviävän pieniä. Urheilijan suorituskyky perustuu kolmen keskeisen osa-alueen tasapainoon: harjoitteluun, ravitsemukseen ja palautumiseen. Palautuminen mahdollistaa kehon ja mielen optimaalisen toipumisen harjoittelun aiheuttamasta kuormituksesta, tukee pitkän aikavälin kehitystä sekä edistää urheilijan suorituskykyä ja kilpailumenestystä [1], [2]. Riittävä unen määrä ja laatu voivat myös merkittävästi vähentää loukkaantumiseriskiä ja sairastumista, mikä korostaa unen roolia palautumisprosessissa [1], [3]. Palautumisen taustalla vaikuttaa autonominen hermosto, joka säätelee tahdosta riippumattomia toimintoja, kuten sykettä, hengitystä ja verenkiertoa. Autonominen hermosto jakautuu sympaattiseen ja parasympaattiseen hermostoon, joiden välinen tasapaino määrittää kehon valmiustilan ja palautumisen tehokkuuden [4]–[6].

Vaikka palautumisen merkitys on tunnettu pitkään, sen järjestelmällinen seuranta ja optimointi ovat kehittyneet vasta viime vuosikymmeninä teknologian mahdollistamien uusien mittausmenetelmien ansiosta [1], [7]. Puettavat sensorit, kuten älysormukset ja urheilukellot, tarjoavat reaaliaikaista tietoa fysiologisista parametreista, mahdollistaen palautumisen tarkan seurannan [8]. Nykyään urheilijat käyttävät yhä enemmän teknologisia apuvälineitä suorituskykynsä tukemisessa, mutta vaikka nämä laitteet tuovat arvokasta lisätietoa unen ja palautumisen tilasta, on niiden tarkkuudessa sekä luotettavuudessa yhä haasteita [7], [9]. Vain harvat kuluttajakäyttöön tarkoitetut unenseurantalaitteet ovat läpinäkyviä mittausteknologiansa

ja algoritmiensa suhteen, mikä voi osaltaan vaikeuttaa unen laadun ja fysiologisen palautumisen tulkintaan [7], [9].

Tässä tutkielmassa perehdytään puettavien älylaitteiden käyttöön urheilijoiden unen ja palautumisen seurannassa. Työn tavoitteena on tutkia, miten puettavat sensorit voivat auttaa palautumisen optimoinnissa ja millaisia haasteita niiden käyttöön liittyy. Tutkielma tarkastelee myös eri fysiologisten mittareiden, kuten sykkeen, sykevälivaihtelun ja hengitystiheyden yhteyttä unen laatuun ja palautumiseen. Lisäksi tutkimus pyrkii selvittämään, kuinka tarkkoja mittauksia puettavat sensorit tuottavat verrattuna kliinisiin menetelmiin. Tutkimuksen päätavoitteet voidaan tiivistää seuraaviin tutkimuskysymyksiin:

1. Miten puettavia sensoreiden unenaikaisia mittauksia voidaan hyödyntää urheilijan palautumisen seurannassa?
2. Miten unen kesto ja laatu vaikuttavat urheilijan palautumiseen?
3. Miten syke, sykevälivaihtelu ja hengitystiheys ovat yhteydessä unen laatuun?

Tutkielma koostuu kahdesta osasta: kirjallisuuskatsauksesta ja tutkimusosios-
ta. Kirjallisuuskatsauksessa tarkastellaan puettavien sensorien fysiologista taustaa, unen ja palautumisen seurannan tarkkuutta sekä unen yhteyttä urheilijan palautumiseen (tutkimuskysymykset 1 ja 2). Kirjallisuusaineisto kerättiin hakemalla tutkimusartikkeleita useista tieteellisistä tietokannoista, kuten Web of Science, PubMed ja ACM Digital Library. Hakulausekkeet keskittyivät puettaviin sensoreihin, uneen, palautumiseen, fysiologisten mittareiden tarkkuuteen ja urheilijan suorituskykyyn. Hakualgoritmeilla (esitetty liitteessä A), löydettiin 18 artikkelia, joista 14 vahvistettiin vastaavan tutkielmassa esitettyihin tutkimuskysymyksiin ja sisällytettiin työhön.

Tutkimusosuudessa vertaillaan Oura Ring 4 -älysoemuksen ja Suunto 9 Peak Pro -urheilukellon unenaikaista dataa sykkeen, sykevälivaihtelun, hengitystiheyden

ja unen eri vaiheiden osalta (tutkimuskysymys 3). Lisäksi tarkastellaan subjektiivisten palautumisarvioiden ja fysiologisten mittausten yhteyttä (tutkimuskysymykset 1 ja 2). Tutkimuskysymysten selvittämiseksi aineiston analysointiin käytettiin korrelaatioanalyysiä.

Tutkielman rakenne on seuraava: luvussa 2 esitetään sydämen toiminta ja sen mittaamiseen käytetyt menetelmät urheilijan palautumisen ja suorituskyvyn mittaamisen ymmärtämiseksi. Vastaavalla tavalla unen ja palautumisen fysiologiaa sekä niiden merkitystä urheilijan suorituskyvyllä tarkastellaan luvuissa 3 ja 4. Luvussa 5 kuvataan tutkielman empiirisen tutkimuksen materiaalit ja menetelmät, kuten käytettävät sensorit ja datan analysointimenetelmät, ja tutkimuksen tulokset esitetään luvussa 6. Lopuksi luvussa 7 esitetään tutkielman johtopäätökset ja yhteenveto.

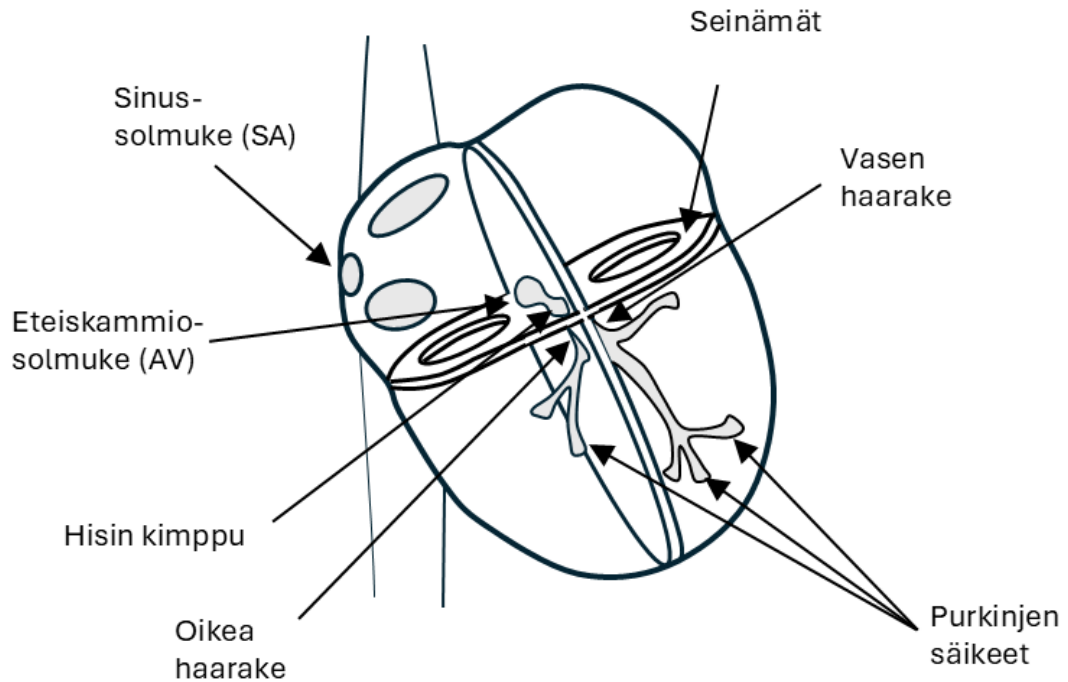
2 Sydän ja sen toiminnan mittaaminen

Sydämen toiminnan mittaaminen avaa ovia urheilijoiden unen seurannalle sekä palautumisen optimoimiselle. Esimerkiksi sykevälivaihtelun analysointi auttaa arvioimaan autonomisen hermoston toimintaa, mikä on tärkeää stressin ja palautumisen tasapainon ymmärtämisen kannalta. Unen aikainen sydämen sykkeen seuranta puolestaan voi paljastaa palautumiseen liittyviä häiriöitä. Tässä luvussa kuvataan tiivistetysti sydämen rakenne, toimintamekanismit sekä toiminnan mittaamiseen käytettäviä menetelmiä. Näiden seikkojen ymmärtäminen on olennaista puettavien sensorien toimintaperiaatteiden ja niiden hyödyntämiskapasiteetin tarkastelun kannalta.

2.1 Sydämen sähköinen toiminta

Sydän on tasaisin väliajoin supistuva nelilokeroinen ontto lihas, joka vastaa verenkierrolle välttämättömien paine-erojen tuottamisesta [5]. Sydämen väliseinä jakaa sydämen oikeaan ja vasempaan puoleen, jotka koostuvat kumpikin eteisestä ja kammioista [5]. Sydämen sähköisen toiminnan kannalta keskeiset rakenteet, kuten sinusolmuke, eteis-kammiosolmuke, Hisin kimppu ja Purkinjen säikeet, havainnollistetaan kuvassa 1 [10]. Sydämen sisäinen säätely ja autonominen hermosto säätelevät sydämen sykettä ja sen pumppaaman veren määrää. Sisäinen säätely riippuu sydämeen virtaavan veren tilavuudesta, joka vaikuttaa sydämen eteenpäin pumppaaman

veren määrään. Autonominen hermosto puolestaan säätelee sykettä ja sydämen su-pistumiskykyä kehon eri osista tulevien viestien perusteella. [11]



Kuva 1: Sydämen johtoratajärjestelmä. Aktiopotentialiaali saa alkunsa sinussolmukkeessa (engl. sinoatrial node; SA) ja etenee molempien eteisten läpi. Eteisten depolarisaatio leviää eteis-kammiosolmukkeeseen (engl. atrioventricular node; AV) ja kulkee edelleen Hisin kimpun (engl. bundle of His) kautta haarakkeisiin ja Purkinjen säikeisiin (engl. Purkinje fibers). Muokattu lähteestä [10].

Sydämen sähköinen toiminta perustuu johtoratajärjestelmään, joka koostuu sähköiseen toimintaan erikoistuneista sydänlihassoluista [4], [5]. Johtoratajärjestelmä varmistaa sydämen rytmin sekä aktiopotentialien kulkeutumisen sydämessä [5], [12]. Järjestelmä alkaa oikean eteisen sinussolmukkeesta, joka on sydämen luonnollinen tahdistin. Sinussolmukkeen autorytmisten sydänlihassolujen depolarisoituessa eli jännitteen purkautuessa spontaanisti kynnysjännitteeseen, syntyy aktiopotentialiaaleja eli solukalvoa pitkin kulkevia sähköisen latauksen aaltoja [5], [12]. Depolarisoituminen saa näin aikaan sydämen sykkeen.

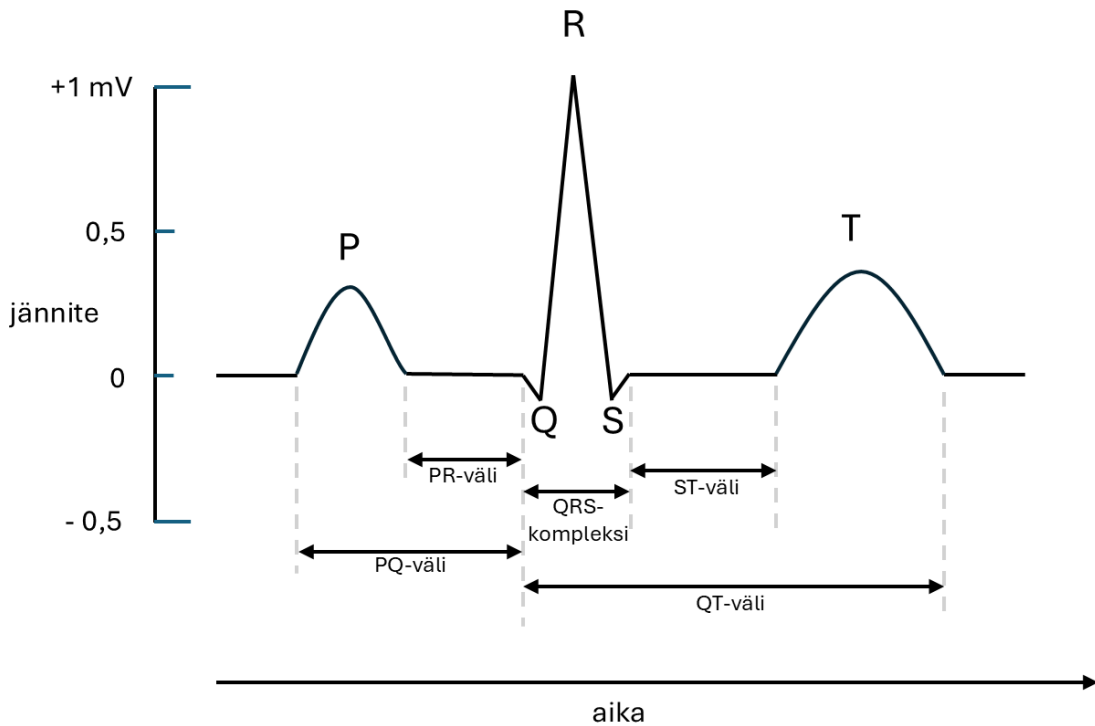
Aktiopotentialit leviävät sydämessä avointen soluliitosten kautta kahdella eri tavalla: sydänlihassolusta toiseen tai sydänlihassolujen muodostaman impulsinjohtojärjestelmän solusta toiseen. Aktiopotentiali kulkeutuu eteisten kautta eteis-kammiosolmukkeeseen ja aiheuttaa samalla eteisten supistumisen. Eteis-kammiosolmukkeessa aktiopotentiali hidastuu, jotta kammiot ehtivät täyttyä ennen supistumista. [5] Aktiopotentiali jatkaa kulkuaan Hisin kimpun kautta kammioiden johtoratoihin ja Purkinjen säikeisiin, jotka levittävät signaalin koko kammioiden alueelle. Tämä saa aikaan kammioiden voimakkaan depolarisaation, jolloin verta pumppautuu valtimoihin. [12] Kammioiden repolarisaatio alkaa jo niiden supistumisen aikana, valmistellen seuraavaa vastaavanlaista sykliä. Eteisten repolarisaatio tapahtuu kammioiden depolarisaation aikana [4].

2.2 Sähköisen toiminnan mittaaminen

Sydämen solukalvojen ionivirtaukset aiheuttavat jännite-eroja, joita voidaan mitata tarkasti elektrokardiografialla (EKG), yleisimmällä ja luotettavimmalla menetelmällä sydämen toiminnan mittaamiseen [5]. Elektrokardiografia perustuu aktiopotentialien syklittäisen kulun mittaamiseen. Jännite-erot ja sähkövirrat voidaan havaita elektrodeilla, jotka mittaavat kehon sisäisiä sähköisiä kenttiä sydämen depolarisaation ja repolarisaation aikana. [13]

Perinteinen EKG-mittaus koostuu tavallisesti kymmenestä ihon pinnalle asetetusta elektrodista, jotka muodostavat kaksitoista erilaista kytkentää [5]. Tyypillisessä EKG-käyrässä (kuva 2) eteisten depolarisaatio voidaan havaita P-aaltona, joka alkaa jo hieman ennen eteisten supistumista. Kammioiden depolarisaatio näkyy QRS-kompleksina, joka muodostuu kolmesta lähekkäisestä aallosta. QRS-kompleksista voidaan mitata esimerkiksi RR-intervalli eli kahden peräkkäisen R-piikin välinen aika. Suodattamalla epänormaalit lyönnit pois saadaan NN-intervalli. Kammioiden repolarisaation aikana solukalvojen sisäpinnan negatiivinen varaus palautuu ja tä-

mä näkyy EKG-käyrässä T-aaltona. Analysoimalla aaltomuotoja ja aikaintervalleja saadaan yksityiskohtaista tietoa sydämen toiminnasta ja mahdollisista poikkeamista. [5], [13].



Kuva 2: Tyypillinen EKG-käyrä yhden sydämen toimintakierron syklin ajalta, mitattuna kytkenästä II. P-aalto kuvaa eteisten depolarisaatiota, QRS-kompleksi kammioiden depolarisaatiota ja T-aalto kammioiden repolarisaatiota. Aaltomuodon eri vaiheet sijoittuvat millisekunnin sadasosien ajalle. Muokattu lähteestä [13].

Vaikka EKG:ta on perinteisesti pidetty tarkimpana menetelmänä sykevälivaihtelun ja RR- tai NN-intervallien mittaamiseen, tutkimukset ovat osoittaneet, että myös fotopletysmografiaan (engl. photoplethysmography; PPG) perustuvilla puettavilla laitteilla mitattu data on vertailukelpoista EKG:n kanssa [14]–[16]. Fotopletysmografia on yleisesti käytetty optinen menetelmä, jolla voidaan mitata verimäärän vaihtelua kudosten mikroverisuonistossa. Se perustuu valon lähettämiseen kudokseen ja heijastuneen tai kudoksen läpäisseen valon mittaamiseen toisella anturilla eli fotodetektorilla. [15], [17], [18] PPG-signaalit sisältävät sekä sydämen sykäysten synkronoiman pulssikomponentin että hitaammin muuttuvan tasakomponentin, jo-

ka kuvastaa esimerkiksi hengityksen ja hermoston säätelytoimintojen vaikutuksia [18]. Tekniikkaa käytetään muun muassa verenpaineen ja happisaturaation mittaamiseen sekä verenkierron arviointiin [17], [18]. PPG-signaaleja analysoimalla voidaan arvioida elinten, kuten sydämen ja keuhkojen toimintaa sekä epäsuorasti myös aivojen toimintaa [17]. Lisäksi PPG:n sovelluskohteita ovat diagnostisissa tarkoituksissa käytettävät valtimojäykkyyden arviointi ja hengitystiheyden mittaus [17].

EKG:n ja PPG:n hyödyntäminen puettavissa älylaitteissa, kuten älykelloissa ja -sormuksissa, on mahdollistanut sydämen toiminnan seurannan osana arkea. Älylaitteet ovat käyttäjäystävällisiä ja ne helpottavat tiedonkeruuta pitkällä aikavälillä. Nämä ominaisuudet ovat lisänneet älylaitteiden suosiota ja niiden keräämä tieto on tuonut uusia mahdollisuuksia, esimerkiksi terveydentilan ja palautumisen seurannalle. [15], [19], [20] Apple Watch:in kaltaiset älylaitteet tuottavat perinteisiin 12-kytkentäisiin laitteisiin verrattavissa olevaa yhden kytkennän EKG-dataa [19], [21], [22]. Lisäksi tekoälyn avulla voidaan analysoida EKG-signaaleja automaattisesti ja tunnistaa sydänsairauksia entistä varhaisemmassa vaiheessa [19].

PPG:hen perustuvissa puettavissa laitteissa käytetään usein vihreää loistediodivaloa (LED), vaikka infrapunavalo läpäisee kudoksen paremmin. Tämä johtuu muun muassa siitä, että monet nykyiset laitteissa hyödynnettävät algoritmit ja teknologiat on optimoitu juuri vihreälle valon aallonpituudelle. [17], [23] Osa laitteista, kuten Oura sormus, hyödyntää kuitenkin myös infrapunavaloa, sillä se mahdollistaa korkealaatuiset mittaukset läpäisemällä kudokset syvemmälle kuin vihreä valo. Tämä parantaa signaalin laatua etenkin sydämen toimintaa kuvaavien parametrien kuten leposykkeen, sykevälivaihtelun ja hengitystiheyden osalta. [23] Osa älykelloista hyödyntää fotopletysmografiaa myös hengitystiheyden mittaamiseen [24]. PPG-teknologian kehittyessä sen tarkkuus ja sovellusalueet ovat laajentuneet, ja tulevaisuudessa PPG-mittausten merkityksen lääketieteellisissä käyttötarkoituksissa odotetaan kasvavan [17], [18].

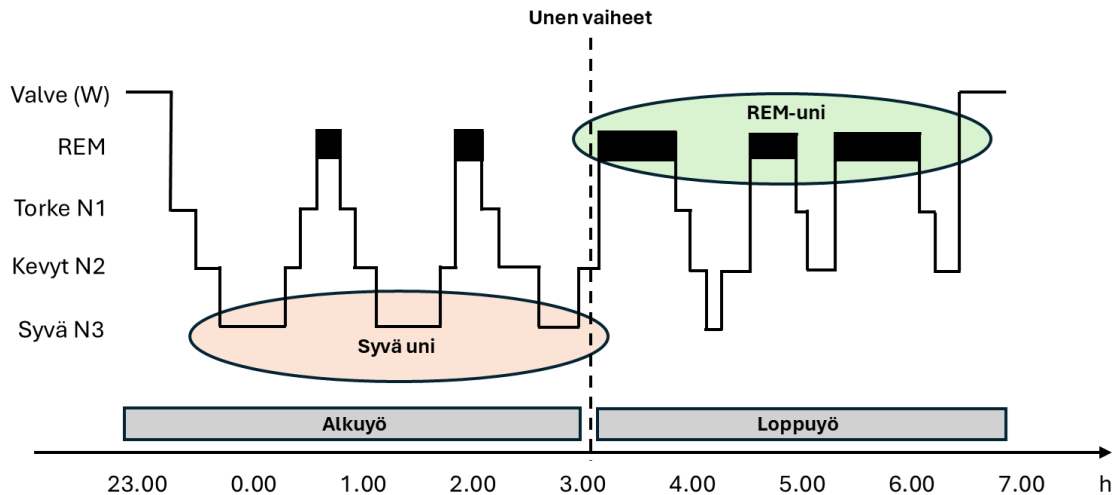
3 Uni ja sen mittaaminen

Uni on luonnollinen jaksottainen liikkumattomuuden tila, jossa heräämiskynnys nousee eli reagointi ulkoisiin ärsykkeisiin laskee. Uni on aivojen itsesäätelyä, ja sen merkitys ihmisen terveydelle on kiistaton, sillä univajeella on vakavia kognitiivisia sekä fyysisiä vaikutuksia hyvinvointiin. [25] Unen rooli on täten myös keskeinen urheilijan palautumisessa ja tässä luvussa esitellään tiivistetysti unen fysiologiaa sekä keskeisiä mittausmenetelmiä.

3.1 Unen fysiologia

Ihmisen uni koostuu kolmivaiheisesta perusunesta (engl. non-rapid eye movement sleep; NREM) ja vilkeunesta (engl. rapid eye movement sleep; REM)[5], [26]–[30]. Autonomisella hermostolla on keskeinen rooli unen säätelyssä ja kehon tasapainon ylläpitämisessä unen aikana [30], sillä se kontrolloi tahdosta riippumattomia toimintoja, sydämen sykettä, verenpainetta, hengitystä ja ruoansulatusta, jotka ovat olennaisia kehon homeostaasin ylläpidossa [5], [6]. Vaikka uni-valverytmiä säätelee pääasiassa keskushermosto, autonominen hermosto täydentää tätä toimintaa vaikuttamalla unisyklin eri vaiheisiin ja kehon fysiologisiin prosesseihin [6], [30]. Unen aikana sympaattisen ja parasympaattisen hermoston aktiivisuus vaihtelee unisyklin vaiheiden mukaan ja tätä yhteistoimintaa kutsutaan sympatovagaaliseksi tasapainoksi [30]–[32]. Parasympaattisen hermoston hallitsevuus NREM-unessa ja sympaattisen hermoston aktivoituminen REM-unessa kuvastavat autonomisen hermoston moni-

puolista roolia unen fysiologiassa [30]. Nämä unisyklin eri vaiheet vuorottelevat yön aikana, muodostaen noin 90 minuutin mittaisia syklejä [5], [26]–[30]. Jokaisella unen vaiheella on omat ominaispiirteensä sekä merkityksensä palautumisen kannalta [28]. Unen eri vaiheita havainnollistetaan kuvassa 3.



Kuva 3: Univaiheiden jakautuminen yön aikana. Uni koostuu syklisesti vuorottelevista perusunen (NREM) ja vilkeunen (REM) vaiheista. Hidasaaltoinen syvä uni (kuvassa N3), joka painottuu alkuyöhön, tukee fyysistä palautumista, kun taas yön loppupuolella lisääntyvä REM-uni edistää oppimista, muistia ja tunteiden prosessointia. Laadukas uni sisältää 4–5 unisykliä, joiden kesto on noin 90 minuuttia. Muokattu lähteestä [33].

NREM-unen aikana sympaattisen hermoston aktiivisuus vähenee asteittain unen syventyessä, jolloin parasympaattisesta hermostosta tulee hallitseva [30]–[32]. Tämä johtaa sydämen sykkeen, verenpaineen ja sydämen iskutilavuuden laskuun ja näin parasympaattisen hermoston aktivoituminen edistää palautumista [4], [5], [32]. NREM-uni jaetaan kolmeen eri vaiheeseen unen syvyyden perusteella. Näistä ensimmäinen vaihe on torke (N1), jonka aikana siirrytään valvetilasta uneen. Torke kattaa noin viisi prosenttia koko uniajasta ja sen aikana herääminen on vielä helppoa. [27], [28] Toisessa vaiheessa eli kevyessä unessa (N2) uni on vain hieman syvempää, mutta kehon lämpötila kuitenkin laskee ja sydämen syke hidastuu, jolloin tietoisuus ympäristöstä katoaa lopullisesti [28]. Toisen vaiheen aikana aivoissa tapahtuu merkittäviä

sähköfysiologisia tapahtumia: unisukkuloita ja K-komplekseja, jotka voidaan havaita aivosähkökäyrästä. K-kompleksit auttavat ylläpitämään unta ja ovat siten tärkeitä palautumisen kannalta. [27], [29], [30] Toisen vaiheen kesto pitenee jokaisessa unisyklissä ja kattaa lopulta noin 45 prosenttia koko unesta [27]. NREM-unen kolmas vaihe on unen syvin vaihe (N3). Tässä syvässä unessa aivosähkökäyrästä voidaan havaita matalataajuisia hidasaaltoja. [29] Syvä uni on erityisen tärkeää elimistön palautumiselle ja aivojen toiminnalle, sillä sen aikana elimistö korjaa ja uudistaa kudoksia, vahvistaa luita ja lihaksia sekä parantaa immuunijärjestelmää [27], [28]. Koko uniajasta syvä uni kattaa noin neljäsosan. Ikääntymisen myötä syvän unen määrä vähenee. [27]

NREM-vaiheiden jälkeen unisykli etenee REM-unen vaiheeseen, jolloin sympaattinen hermosto aktivoituu uudelleen [27], [31], [32]. Sympaattisen hermoston aktiivisuus voi olla jopa korkeampi kuin hereillä ollessa, mikä selittää univaiheen aikana koetut fysiologiset muutokset, kuten sykkeen ja verenpaineen vaihtelut [32]. Tämä sympaattisen hermoston aktivoituminen mahdollistaa osaltaan REM-unelle tyypilliset nopeat silmänliikkeet, lihasten nykimisen ja unien aikana koetut intensiiviset kokemukset [4], [5], [27], [32]. Luonteenomaista REM-unelle on myös unien näkeminen [25], [27]. Aivojen aktiivisuus kohoaa REM-unen aikana hereilläolon tasolle, mutta lihakset pysyvät velttoina lukuun ottamatta palleaa ja silmien lihaksia [27], [28]. REM-unella on keskeinen välillinen rooli palautumisessa sekä suorituskyvyn tukemisessa erityisesti muistin, oppimisen ja motoristen taitojen vahvistamisen kautta [34], [35]. Uusien taitojen kehitykselle onkin erityisen tärkeää, että ensimmäinen unijakso harjoittelun jälkeen sisältää riittävästi REM-unta, sillä se auttaa vahvistamaan opittuja liikeratoja [36]. Yön aikana REM-unen syklit pitenevät ja lisääntyvät loppua kohden, muodostaen noin 20–25 prosenttia ihmisen yön unesta [5], [27].

3.2 Unen laatu

Unen laadulle ei ole yksiselitteistä määritelmää, mutta on huomattu, että hyvälaatuiselle unelle ominaista on yhtäjaksoisuus, lyhyt nukahtamisviive sekä tehokkuus [37], [38]. Unen tehokkuus ilmoitetaan prosentteina ja sillä tarkoitetaan sitä, miten suuren osan vuoteessa vietetystä ajasta yksilö nukkuu [39]. Yli 85 prosentin unitehokkuus viittaa tyypillisesti rauhalliseen ja yhtäjaksoiseen uneen. Unitehokkuus voi heikentyä nukahtamisen kestäessä yli 20 minuuttia ja yöunen keskeytyessä usein tai pitkäksi aikaa. [39] Unen jatkuvuudella ja tehokkuudeella on todettu olevan suurempi merkitys fyysiseen toimintakykyyn kuin unen kestolla, ja ne ovat unen laadun kannalta merkittävämpiä tekijöitä [35]. Yhtenä laadukkaan unen kriteerinä pidetään myös unisykliä määrää, joita olisi hyvä olla 4–5, ja joiden aikana uni syvenee ja kevenee vuorotellen [5], [26]–[30]. Myös sympatovagaalinen tasapaino on ratkaiseva unen syvyyden ja laadun, sekä kehon palautumisen kannalta, sillä se heijastaa hermoston kykyä reagoida stressitekijöihin ja unen eri vaiheiden vaatimukseen [31], [40]. Epätasapainotila, jossa sympaattinen hermosto on yliaktiivinen suhteessa parasympaattiseen hermostoon, voi haitata palautumista ja lisätä stressiä elimistössä [32]. Lisäksi hyvälle unelle on ominaista, että herätessä yksilö on tyytyväinen uneensa ja kokee olonsa usein levänneeksi sekä palautuneeksi [37], [38]. Vastaavasti huonolaatuinen uni on katkonaista ja keskeytyy usein, ja sille on tyypillistä pitkä nukahtamisviive, lyhyt kesto, väsynyt olo herätessä ja yksilön negatiivinen kokemus unen laadusta [37], [38].

Useat fysiologiset, psykologiset sekä ympäristölliset tekijät ovat yhteydessä unen laatuun. Hyvä unenlaatu vaikuttaa positiivisesti ja huono negatiivisesti yksilön elämänlaatuun. Fysiologisista tekijöistä esimerkiksi ikä, kehon painoindeksi sekä vuorokausirytmii vaikuttavat unen rakenteeseen. Psykologisista tekijöistä stressi, ahdistus ja masennus heikentävät unen jatkuvuutta ja palauttavuutta. [37] Ympäristölliset tekijät, kuten huoneen lämpötila, älylaitteiden käyttö ennen nukkumaanmenoa sekä

sosiaaliset ja perheeseen liittyvät sitoumukset, voivat osaltaan häiritä unta. Optimaaliseen nukkumisympäristöön kuuluvat muun muassa hiljaisuus, pimeys sekä oikea lämpötila [34], [37]. Lisäksi stressi, ahdistus ja elämäntavat, kuten alkoholin ja kofeiinin käyttö, voivat heikentää unen laatua [37], [41]. Urheilijoiden osalta on havaittu, että kilpailu- ja harjoittelu-aikataulut, matkustaminen ja kilpailujännitys vaikuttavat negatiivisesti unen laatuun, etenkin kilpailupäivinä ja niiden jälkeen [34]. Myöhäiset harjoitusajankohdat voivat häiritä nukahtamista ja vähentää unen kokonaiskestoja, mikä saattaa johtaa heikentyneeseen palautumiseen ja seuraavan päivän suoritusvalmiuden laskuun [34].

Riittävän ja laadukkaan unen varmistaminen on erityisen tärkeää urheilijoille, sillä unen puute voi vaikuttaa haitallisesti lihasten korjaantumiseen, hormonitasapainoon ja energiatasoihin [34]. Uni on tärkeä osa urheilijan palautumisprosessia ja suorituskyvyn optimointia, ja siihen liittyvien häiriöiden ehkäiseminen vaatii usein suunnitelmallista nukkumisaikataulujen sekä ympäristötekijöiden hallintaa [34].

3.3 Unen mittaaminen ja seuranta

Unen laadun mittaamiseen käytetyt menetelmät jaetaan subjektiivisiin ja objektiivisiin menetelmiin [35], [37], [41]. Objektiivisesti unen laatua voidaan arvioida mittaamalla unen kesto, tehokkuutta, nukahtamisviivettä sekä unenaikaista heräilyä. Subjektiivisiin mittausmenetelmiin kuuluu muun muassa yksilön kokema tyytyväisyys unen eri osa-alueista.

Käytetyin unen laadun mittari on subjektiivinen Pittsburgin unen laatua kartoittava kysely (engl. Pittsburg Sleep Quality Index; PSQI) [35], [38]. PSQI analysoi unen laatua ja univaikeuksia yhden kuukauden aikajaksolla. Kysely sisältää 19 kysymystä seitsemältä eri unen osa-alueelta: unenlaatu, nukahtamisviive, unen kesto, unen tehokkuus, unihäiriöt, unilääkkeiden käyttö ja päiväväsymys. Osa-alueiden pisteet yhdistetään lopulliseksi pistelukumaksi (0–21) ja yli viiden pisteen kokonais-

pistemäärä viittaa heikkoon unenlaatuun. [38], [41] PSQI käsittää siis ne unen osat alueet, joilla on havaittu olevan yhteyttä unen laatuun ja sitä kautta palautumiseen [38], [41].

Objektiivisista menetelmistä polysomnografia (engl. polysomnography; PSG) on niin sanottu kultainen standardi, sillä se mittaa tarkasti unen eri vaiheita, kuten latenssia eli REM-unen viivettä, kestoja ja tehokkuutta sekä sydämen sykettä ja hengitystä [30], [42]. PSG on kuitenkin kallis ja vaatii usein laboratoriomittauksia, minkä vuoksi sitä käytetään lähinnä tutkimuksissa ja unihäiriöiden diagnosoinnissa [43]. Unta ja unen laatua on mahdollista mitata myös kuluttajakäyttöön tarkoitettujen puettavien teknologian avulla [44]. Puettavat älylaitteet tarjoavat reaaliaikaista tietoa unen eri vaiheista ja laadusta. Unen mittaus ja univaiheiden luokittelu perustuvat algoritmeihin, jotka hyödyntävät liikesensoreita sekä biosignaaleja, kuten sykettä, sykevälivaihtelua ja ihon lämpötilaa. [45]

Puettavien älylaitteiden tarkkuus polysomnografiaan verrattuna vaihtelee mitausparametrin riippuen. Yleisesti ottaen kuluttajakäyttöön tarkoitettujen laitteiden pystyvät luotettavasti arvioimaan unen kokonaiskestoja, mutta niiden tarkkuus unen eri vaiheiden havaitsemisessa jää usein polysomnografiaa alhaisemmaksi. [44] Tutkimusten mukaan älylaitteiden tarkkuus unen kokonaiskeston arvioinnissa voi olla jopa 85–95 prosenttia polysomnografiaan verrattuna, mutta unen vaiheiden tunnistamisessa tarkkuus laskee noin 60–80 prosenttiin [44]. Eri laitteiden välillä on myös havaittu eroja, erityisesti algoritmien ja käytettyjen anturien osalta. Joissakin tutkimuksissa Oura-sormuksen on raportoitu olevan tarkempi REM-unen tunnistamisessa kuin monet älykellot, kun taas älykellot voivat olla parempia liikkeeseen perustuvien heräämistien havaitsemisessa. [30], [44] Puettavat älylaitteet hyödyntävät yhä useammin autonomisen hermoston signaaleja, kuten sykevälivaihtelua, unen vaiheiden arvioimisessa. Tämä tarjoaa lupaavia mahdollisuuksia esimerkiksi unen laadun

ja vaiheiden mittaamiseen, mutta tarkkuus on vielä toistaiseksi hiukan polysomnografiaa alhaisempi [30].

Unen fysiologian kautta unen laatua on mahdollista arvioida eri univaiheiden, etenkin REM-unen ja syvän unen keston mukaan. NREM-unen vaiheista syvä uni on palauttavaa, mikä tekee siitä hyvän mittarin yön aikana tapahtuvan palautumisen ja unen laadun arviointiin. Uniajan pidentyessä REM-unen määrä kasvaa, joten myös REM-unta voidaan käyttää unen laadun arvioinnissa.[35], [42] REM-unen vaikutusta unen laatuun ei kuitenkaan tunneta vielä tarkasti, mutta sen arvellaan heijastavan pieniä unen muutoksia, ja se onkin osana uusien unen laadun mittarien kehityksessä [42]. Univaiheiden lisäksi unen laatua voidaan arvioida mittaamalla autonomisen hermoston toimintaa, vaikka unen aikaisen toiminnan arvioiminen on haastavaa. Käytännössä autonomisen hermoston aktiivisuutta mitataan epäsuorasti sydämen sykkeen ja sykevälivaihtelun avulla. Nämä mittarit tarjoavat arvokasta tietoa hermoston toiminnasta ja tasapainosta unen aikana. [32], [40], [46]

4 Palautumisen fysiologia ja mittaaminen

Palautuminen on urheilijalle keskeinen tekijä suorituskyvyn optimoinnissa, sillä harjoittelua palautumattomassa tilassa ei koeta yhtä kehittäväksi kuin täysin palautuneena. Etenkin pääharjoituksissa urheilijan on tärkeä olla palautunut, jotta harjoituksista saadaan irti maksimaalinen hyöty. Palautumisen tehokkuus vaikuttaa keskeisesti urheilijan pitkän aikavälin kehitykseen ja hyvinvointiin, ja sen pitkäaikainen laiminlyönti yhdessä liiallisen rasituksen kanssa voi johtaa suorituskyvyn laskuun sekä alipalautuneisuuden tilaan. [47]

Palautuminen on monivaiheinen prosessi, joka tähtää kehon ja mielen tasapainon palauttamiseen harjoittelun tai kilpailun aiheuttaman rasituksen jälkeen [47]. Fysiologisessa mielessä palautumisen keskeisiä osa-alueita ovat lihasten aineenvaihdunnan ja energiavarastojen palautuminen, joita voidaan tukea oikeanlaisella ravinnolla, kylmähoidoilla sekä laadukkaalla unella. Psykologinen palautuminen puolestaan liittyy mielen rentouttamiseen ja kognitiivisen kuormituksen purkamiseen esimerkiksi itse-säätelyn ja rentoutumistekniikoiden avulla. [47], [48]

Erityisesti uni on olennainen osa palautumisprosessia. Laadukas ja riittävä uni tukee sekä fysiologista että psykologista palautumista [47], [48]. Kilpailujen tai intensiivisten harjoitusten jälkeen palautuminen voi häiriintyä heikon unenlaadun takia [47]. Harjoittelun ja kilpailujen kovan intensiteetin takia huippu-urheilijoiden unen-

tarve on keskivertoihmistä suurempi. Riittämätön uni, alle seitsemän tuntia yössä, voi lisätä stressihormonien kuten kortisolin määrää ja hidastaa näin lihasten palautumista. [1], [47], [48]

Urheilun absoluuttisella huipulla erot urheilijoiden suorituskyvyssä ovat pieniä. On arveltu, että palautumisen optimoinnilla voi olla potentiaalia kilpailuedun saavuttamisessa [47]. Palautumisen seuranta voidaan tukea hyödyntämällä objektiivisia mittareita subjektiivisen kokemuksen rinnalla [48]. Urheilijat, jotka seuraavat unenlaatuaan palautumistrendien seuraamiseen kehitetyillä puettavilla älylaitteilla, raportoivat useammin tuntevansa olonsa palautuneeksi harjoittelun jälkeen [8]. Älylaitteet mahdollistavat autonomisen hermoston tilan seurannan mittaamalla muun muassa sykettä sekä sykevälivaihtelua unen aikana. [7], [47] Tätä puettavien laitteiden keräämää dataa voidaan siis hyödyntää urheilijoiden tarpeisiin yksilöllisten palautumisstrategioiden suunnittelussa, mikä edistää optimaalista palautumista ja suorituskyvyn ylläpitämistä [7], [8], [47].

Tämän luvun tarkoituksena on tarkastella palautumisen mittaamista sekä fysiologisten mittareiden, kuten sykkeen, sykevälivaihtelun ja hengitystiheyden, hyödyntämistä urheilijoiden unen ja palautumisen seurannassa.

4.1 Syke ja sykevälivaihtelu

Sydämen syke, erityisesti leposyke, on keskeinen palautumisen mittari, joka kuvaa sydämen lyöntitiheyttä ja heijastaa autonomisen hermoston tasapainoa sekä palautuneisuuden tilaa [15]. Leposyke on yksilöllinen, mutta perusterveellä aikuisilla se vaihtelee 60–100 lyönnin välillä minuutissa. Urheilijoilla leposyke on usein jopa alhaisempi. [17]

Säännöllinen sykkeen seuranta tukee harjoittelun ja palautumisen optimointia, sillä leposyke heijastaa parasympaattisen hermoston aktiivisuutta sekä autonomisen hermoston tasapainoa [15], [49]. Jatkuvasti kohonnut syke voi esimerkiksi olla merk-

ki stressistä tai muista terveyshaasteista, kuten kohonneesta verenpaineesta [49]. Sympaattinen hermosto kiihdyttää sydämen sykettä stressin sekä liikunnan aikana, ja sykkeen käyttäytyminen rasituksen jälkeen antaa tärkeää tietoa sydämen sopeutumisesta rasitukseen. Nopea sykkeen palautuminen korkeasta rasituksesta lepotasolle viittaa hyvään sydämen autonomiseen säätelyyn ja korkeaan parasympaattiseen aktiivisuuteen, jota korkeaintensiteettinen aerobinen harjoittelu entisestään tehostaa. [49] Leposykettä voidaan laskea parantamalla elämäntapoja, kuten lisäämällä säännöllistä kestävyysliikuntaa, vähentämällä kofeiinin ja alkoholin käyttöä sekä stressiä meditaation tai rentoutumisharjoitusten avulla [50]. Puettavat älylaitteet hyödyntävät EKG- ja PPG-teknologiaa (luku 2.2), sykkeen mittaamisessa [15], [19], [21], [22].

Sykevälivaihtelu (engl. heart rate variability; HRV) kertoo peräkkäisten sydämenlyöntien välisten aikojen vaihtelusta ja on keskeinen autonomisen hermoston toiminnan mittari [15], [16], [20], [30], [51]. Autonomisen hermoston sympaattinen ja parasympaattinen haara säätelevät sydämen sykevälin vaihtelua, joten HRV tarjoaa tietoa sympatovagaalisesta tasapainosta [14]. Sykevälivaihtelu laajentaa sykkeen pohjalta saatavaa tietoa [15], ja antaa viitteitä terveydentilasta sekä sydämen toiminnasta, kuten kehon ylikuormitustilasta ja autonomisen hermoston kyvystä sopeutua stressiin [51].

Lepotilassa mitattu HRV heijastaa sydämen parasympaattista aktiivisuutta ja on tärkeä fyysisen palautumisen mittari, esimerkiksi urheilijoiden harjoittelusta palautumisen seurannassa [15]. Unenaikaisten HRV-trendien avulla voidaan arvioida palautumista ja stressikuormaa, sillä korkea sykevälivaihtelu viittaa hyvään autonomisen hermoston sopeutumiskykyyn ja matala heikkoon stressinsietoon [16], [51]. HRV:n vaihtelua selittävät useat yksilölliset tekijät, kuten ikä, sukupuoli, elämäntavat sekä mittausten aikainen kehon asento, liike, hengitystiheys ja vuorokauden-aika [51], [52], minkä vuoksi sykevälivaihtelun seurannassa on tärkeää arvioida mit-

tauksia yksilöllisesti ja pitkällä aikavälillä [51]. Terveen aikuisen sykevälivaihtelu on keskimäärin 42 ms, mutta vaihtelee 19–75 millisekunnin välillä. Urheilijoilla keskimääräinen lukema voi nousta yli sadan ja on kestävyysurheilijoilla selvästi aikuisten normaalia keskiarvoa korkeampi. [16], [52]

Sykevälivaihtelun arvoihin voidaan vaikuttaa monilla elämäntapavaihtelulla, jotka tukevat autonomisen hermoston palautumista. Säännöllinen aerobinen harjoittelu lisää parasympaattista aktiivisuutta ja siten nostaa HRV:tä, mutta harjoittelun kuormitus on tärkeää pitää tasapainossa ylikuormituksen välttämiseksi [52]. Laadukas ja riittävä uni on yksi tärkeimmistä HRV:n ylläpitäjistä, sillä heikentynyt unenlaatu voi laskea HRV-arvoa [14], [51]. Myös psyykkistä kuormitusta vähentävät stressinhallintakeinot, kuten rentoutusharjoitukset, tukevat autonomisen hermoston tasapainoa [14]. Lisäksi terveelliset elämäntavat, kuten ravitseva ruokavalio ja alkoholin käytön vähentäminen, voivat osaltaan tukea HRV:n paranemista ja kokonaisvaltaista palautumista [14], [52].

Jotta sykevälivaihtelusta saadaan tarkkaa ja hyödyllistä tietoa palautumisen arvioimiseksi, sitä analysoidaan erityyppisillä menetelmillä. Nämä analysointimenetelmät voidaan jakaa kolmeen pääluokkaan: aika-, taajuus- ja epälineaarisiin menetelmiin. Aikaperusteisista mittareista yleisimmin käytetyt ovat normalisoitujen sykevälivaihteluiden keskihajonta (engl. standard deviation of the normal-normal intervals; SDNN) ja peräkkäisten sykevälivaihteluiden neliöjuuri (engl. root mean square of the successive differences; RMSSD). SDNN kuvastaa HRV:n kokonaisvaihtelua keskiarvosta, kun taas RMSSD mittaa lyhyen aikavälin vaihtelua, mikä heijastaa parasympaattisen hermoston aktiivisuutta. [52] Tässä tutkielmassa käytetyt puettavat älylaitteet soveltavat RMSSD:tä sykevälivaihtelun mittaamisessa.

4.2 Hengitystiheys

Hengitystiheys kertoo hengitysten määrän minuutissa [17]. Aikuisen normaali hengitystiheys levossa vaihtelee yleensä 12–20 hengityksen välillä minuutissa [23], [24], [53]. Hengitystiheyden vaihtelu voi kertoa paljon terveydentilasta. Levonaikainen hengitystiheys on yksilöllinen, mutta pysyy suhteellisen vakaana pitkällä aikavälillä. [23] Hengitystiheys reagoi kuitenkin herkästi erilaisiin fysiologisiin ja patologistiin muutoksiin. Poikkeamat yksilöllisestä keskiarvosta voivat olla merkki mahdollisista terveysongelmista, kuten kroonisista keuhkosairauksista, keuhkokuumeesta tai sydänkohtauksesta. Terveysongelmien mahdollisuus on olemassa erityisesti, jos muutokset ovat suuria tai jatkuvia useiden päivien ajan. [23], [24], [54] Hengitystiheyttä voidaan pitää myös palautumisen mittarina, sillä se reagoi stressiin, fyysiseen rasitukseen, kognitiiviseen kuormitukseen ja jopa lämpötilamuutoksiin. [24], [54] Kohonneella hengitystiheydellä voi olla esimerkiksi yhteys elimistön rasiustilaan. Hengitystiheys voikin auttaa urheilijoita seuraamaan sekä fyysisen kuormituksen että stressin vaikutuksia kehoon ja palautumiseen. [23]

Hengitystiheyden arviointi perustuu useimmiten elektrokardiogrammilla tai foptoletysmografialla tehtyihin mittauksiin [18], [53]. EKG-mittauksessa keuhkojen impedanssin muutos hengityksen aikana aiheuttaa jännitevaihtelun, jonka avulla voidaan analysoida hengitystaaajuutta [53]. Useimmiten sormesta tai ranteesta mitattavassa PPG-signaalissa voidaan havaita hengityksestä johtuvaa vaihtelua, ja signaalin analysoimiseen on kehitetty useita algoritmeja, joiden avulla pystytään arvioimaan hengitystiheys. [17]. Vaikka PPG-mittaus on helppokäyttöinen ja sitä hyödynnetään useissa puettavissa älylaitteissa, mittausten tarkkuus aiheuttaa haasteita. Tarkkuus riippuu anturin sijainnista ja ympäristöolosuhteista. [24] Sormesta mitattu PPG-signaali on usein laadukkaampi kuin ranteesta saatu, ja unen aikana sormesta tai ranteesta mitattuja PPG-signaaleja voivat heikentää asennon vaihtelut ja liikehäiriöt. [17], [24]

5 Materiaalit ja menetelmät

Markkinoilla on valtava määrä erilaisia urheilukelloja, älysormuksia, aktiivisuusrannekkeita ja muita puettavia älylaitteita. Tässä tutkielmassa unta ja palautumista seurataan kahdella erilaisella puettavalla älylaitteella; Oura Ring 4 -älysormuksella ja Suunto 9 Peak Pro -urheilukellolla. Luvussa 5.1 esitetään nämä työssä käytettävät puettavat älylaitteet, luvussa 5.2 tutkimushypoteesit, luvussa 5.3 aineistonkeruumenetelmät ja luvussa 5.4 analyysimenetelmät.

5.1 Käytettävät puettavat sensorit

Urheilijan unen ja palautumisen seurantaan käytettiin Oura Ring 4 -älysormusta sekä Suunto 9 Peak Pro -urheilukelloa. Molemmat laitteet tarjoavat PPG-pohjaisia mittauksia ja yksityiskohtaisia analysointityökaluja, mutta niiden painopisteet eroavat toisistaan. Oura keskittyy erityisesti unen ja palautumisen seurantaan, kun taas Suunto 9 Peak Pro on suunniteltu tarkkoihin mittauksiin myös liikunnan aikana. Suunnon GPS-ominaisuus tuo merkittävää lisäarvoa erityisesti aktiivisille urheilijoille, kun taas Oura painottaa enemmän biometrisiä signaaleja, kuten kehon lämpötilaa ja hormonaalisia muutoksia. [55]–[57]

5.1.1 Oura Ring 4 -älysormus

Oura Ring 4 -älysormus on suunniteltu monipuoliseen terveydentilan seurantaan ja erityisesti unen laadun analysoimiseen. Sormus hyödyntää PPG-, lämpötila- ja

kiihtyvyyssantureita, jotka mahdollistavat fysiologisten signaalien jatkuvan ja tarkan seurannan. Ouran PPG-järjestelmä käyttää infrapunavaloa ja LED-antureita, jotka on asetettu sormuksen molemmille puolille, mahdollistaen selkeän signaalin mittaamisen. Tämä eroaa monista älykelloista, joissa valo on sijoitettu vain yhdelle puolelle ja joissa vihreää valoa käytetään yleisimmin. Ouran PPG-anturi on suunniteltu tuottamaan lääketieteellistä tarkkuutta lähentelevää dataa, mikä tekee sen signaaleista 99,9 % luotettavia verrattuna EKG:hen. Kaikki tiedot visualisoidaan Oura-sovelluksessa, joka tarjoaa käyttäjälle selkeitä suosituksia palautumisen ja unen parantamiseksi. [55], [58]

Oura tarjoaa käyttäjälle päivittäin 0–100 välillä vaihtelevan arvon unenlaadusta, aktiivisuudesta ja valmiudesta. Korkeampi arvo viittaa parempaan uneen, aktiivisuuteen tai valmiuteen. Kokonaisvaltainen unenlaadun arvo heijastaa unen yhtenäisyyttä, tehokkuutta ja eri vaiheiden tasapainoa, kun taas aktiivisuuden arvo mittaa käyttäjän fyysisen aktiivisuuden tasoa päivän aikana. Valmiuden arvo puolestaan yhdistää unen ja aktiivisuuden mittaustiedot arvioidakseen kehon palautuneisuutta ja valmiutta tulevaan päivään. [55]

Sormus mittaa muun muassa leposykettä, sykevälivaihtelua, hengitystiheyttä sekä kehon lämpötilan vaihteluita. Näiden mittausten avulla Oura analysoi unen laadua ja eri vaiheita, kuten kevyttä unta, REM-unta ja syvää unta. [55] Ouran unen vaiheiden tunnistustarkkuus perustuu monisensoriseen lähestymistapaan, jossa yhdistetään kiihtyvyyssanturin, autonomisen hermoston mittareiden (HRV ja kehon lämpötila) sekä sirkadiaanisen rytmin mallinnusta [44]. Sormus laskee tarkat kes-
tot jokaiselle unen vaiheelle ja suhteuttaa ne kokonaisunen määrään. Lisäksi se arvioi unitehokkuutta, joka kuvaa unen yhtenäisyyttä ja keskeytymättömyyttä. [55] Leposykkeestä Oura raportoi keskimääräisen ja alhaisimman sykearvon, jotka kuvaavat kehon palautumista. Sykevälivaihtelun analyysi toteutetaan RMSSD:llä ja se antaa lisätietoa autonomisen hermoston toiminnasta. Sormus antaa käyttäjälle sy-

kevälivaihtelun keskiarvon sekä korkeimman havaitun arvon yön aikana. Kehon lämpötilan muutosten ja hengitystiheyden mittaus antavat arvokasta tietoa stressistä, kuormituksesta ja mahdollisista hengityshäiriöistä, kuten uniapneasta. Lämpötilan vaihteluiden pohjalta Oura analysoi myös hormonaalisia muutoksia ja mahdollistaa naisilla kuukautiskierron seurannan. [55]

5.1.2 Suunto 9 Peak Pro -urheilukello

Suunto 9 Peak Pro -urheilukello on suunniteltu erityisesti urheilijoille ja aktiivisille käyttäjille, jotka haluavat seurata suorituskykyään ja palautumistaan monipuolisesti. Se hyödyntää optista PPG-mittausta ja kiihtyvyyssantureita fysiologisten signaalien tarkkaan mittaamiseen levossa sekä harjoitusten aikana. PPG-järjestelmä käyttää moniväristä LED-teknologiaa ja monikerroksista algoritmia, joiden avulla on mahdollista tarkkailla sykettä ja sykevälivaihtelua eri valaistusolosuhteissa ja liikkeessä. Näin sykkeen mittaus onnistuu tarkasti myös haastavissa olosuhteissa, kuten raskaan liikunnan aikana. Kuten Ourassa, sykevälivaihtelun analyysi toteutetaan RMSSD:llä. Integroidut kiihtyvyyssanturit mittaavat kehon liikkeitä unen laadun ja palautumisen arviointia varten. Kaikki tiedot visualisoidaan Suunto-sovelluksessa. Sovellus arvioi käyttäjän kokonaisvaltaista palautumista harjoitusten ja unen näkökulmasta ja tarjoaa yksityiskohtaisia analyysseja, esimerkiksi palautumisen tilasta sekä energiatasapainosta.[56], [57]

Suunto 9 Peak Pro mittaa muun muassa sykettä, sykevälivaihtelua, hapenotto-kykyä sekä energiankulutusta, ja se on varustettu GPS-teknologialla tarkkaa harjoitusten seuranta varten. Lisäksi Suunto 9 Peak Pro arvioi käyttäjän palautumista yhdistämällä sykkeen ja sykevälivaihtelun analyysin unenaikaisiin mittauksiin. Kellon unenseurantaohjelma seuraa unen eri vaiheita, kuten kevyttä unta, syvää unta, REM-unta ja antaa arvioita unen laadusta sekä tehokkuudesta. Ouran unilukemaa vastaavasti Suunto 9 Peak Pro -kellossa unenlaatu esitetään uniyhteenvedossa astei-

kolla 0–100, jossa 100 on paras unen laatu. Unenaikaisen sykkeen keskimääräinen ja alhaisin arvo raportoidaan, mikä tarjoaa tietoa kehon palautumisen tilasta. Kellon kehittynyt PPG-järjestelmä mittaa myös veren happisaturaatiota yön aikana, mikä auttaa arvioimaan hapensaantia ja hengityksen poikkeavuuksia. [56], [57]

5.2 Tutkimuksen tavoite ja tutkimuskysymykset

Tutkimuksen tavoitteena on selvittää unen laadun ja fysiologisten palautumismittareiden yhteyttä urheilijan palautumiseen ja suorituskykyyn sekä tarkastella Oura-sormuksen ja Suunto-urheilukellon mittaustulosten yhteneväisyyttä ja eroja. Näiden kahden laitteen vertailu tarjoaa näkökulmaa siihen, miten luotettavasti eri teknologiat mittaavat urheilijoiden palautumista ja unen laatua.

Tutkielmassa suoritettava empiirinen tutkimus pyrkii vastaamaan seuraaviin tutkimuskysymyksiin:

1. Miten eri mittarit, kuten unen vaiheet, HRV ja syke, ovat yhteydessä toisiinsa?
2. Miten nämä mittarit heijastavat subjektiivisia kokemuksia palautumisesta ja vireystilasta?
3. Miten samankaltaisia tuloksia saadaan Suunto 9 Peak Pro -urheilukellolla ja Oura-sormuksella unen ja fysiologisten palautumismittareiden osalta?

Vastaamalla näihin tutkimuskysyksiin pyritään syventämään ymmärrystä unen ja palautumisen merkityksestä urheilijoiden suorituskyvylle. Lisäksi tutkimus tarjoaa mahdollisuuden tarkastella kirjallisuudessa esitettyjä unen ja palautumisen yhteyksiä urheilijan suorituskykyyn. Tutkimuksessa tarkastellaan seuraavia hypoteeseja: unen kesto ja laatu ovat yhteydessä seuraavan päivän vireystilaan ja subjektiiviseen palautumisen kokemukseen, HRV:n ja sykevaihteluiden ajatellaan olevan käytökelpoisia mittareita palautumistilan ja harjoitusvalmiuden ennakoinnissa, Suunto

9 Peak Pro ja Oura Ring 4 tuottavat samansuuntaisia tuloksia unen kestosta ja sykkeestä, mutta mahdollisesti eroavat unen vaiheiden mittauksessa, sillä Oura mittaa unen parametreja Suunnon kelloa laajemmin.

5.3 Aineistonkeruu ja käsittely

Aineisto kerättiin kahden viikon mittausjaksolla, jonka aikana tehtiin päivittäiset mittaukset Suunto Peak Pro 9 -urheilukellolla ja Oura Ring 4 -sormuksella. Mittausjaksoksi valittiin kaksi viikkoa, sillä sen ajateltiin riittävän datan keräämisen unen, palautumisen ja harjoittelun trendien tarkastelemiseksi. Tämä ajanjakso on riittävän pitkä paljastaakseen yhtäläisyyksiä unen laadun ja palautumisen välillä, mutta samalla tarpeeksi lyhyt, jotta mittaukset voidaan toteuttaa yhden harjoitusjakson aikana. Mittausaika ajoitettiin tarkasti urheilijan harjoitusohjelman mukaan, jolloin saatiin kattava otos eri kuormitustasojen vaikutuksesta. Kerättävät ja analysoitavat muuttujat on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1: Kerättävät muuttujat. Ensimmäisessä sarakkeessa (vasemmalla), kuvataan muuttuja, seuraavassa sen mittayksikkö, kolmannessa sarakkeessa tiedon saatavuus tutkimuksessa käytettyjen puettavien sensorien osalta ja viimeisessä sarakkeessa (oikealla) lyhyt kuvaus muuttujan yhteydestä urheilijan palautumiseen ja suorituskykyyn luvuissa 2–4 esitetyn kirjallisuuskatsauksen perusteella.

Mittari	Mittayksikkö	Laite	Kuvaus
Unen kesto	Aika (h ja min)	Molemmat	Unen keston on katsottu olevan yhteydessä palautumiseen ja suorituskykyyn.
Kevyt uni	Aika (h ja min)	Oura	Kevyt uni vaikuttaa erityisesti hermoston palautumiseen ja rentoutumiseen.
Syvä uni	Aika (h ja min)	Molemmat	Syvä uni on tärkeää fyysiselle palautumiselle ja lihasten korjautumiselle sekä immuunijärjestelmän palautumiselle.
REM-uni	Aika (h ja min)	Oura	REM-uni on tärkeä kognitiiviselle palautumiselle.

Mittari	Mittayksikkö	Laite	Kuvaus
Nukahtamisviive	Minuutit (min)	Oura	Uneen siirtymisen ajalla voi olla yhteys stressitasoihin ja palautumiskykyyn.
Unen tehokkuus	Suhteellinen osuus (0–100)	Oura	Kertoo kuinka paljon sängyssä vietyä ajasta on unta.
Aika hereillä	Aika (h ja min)	Molemmat	Heräily kesken unien saattaa heikentää unen laatua ja hidastaa palautumista.
Unenlaatu	Pistemäärä (0–100)	Molemmat	Kertoo unen laadusta verrattuna omaan normaalitasoon.
Yön keskisyke	Lyönnit / min	Molemmat	Yöllinen keskisyke kertoo levon ja palautumisen tasosta.
Yön alin syke	Lyönnit / min	Molemmat	Yön alin syke kertoo levon ja palautumisen tasosta.
HRV	ms	Molemmat	Kertoo palautumisen tasosta. Oura vertaa edellisen kahden viikon keskiarvoa edellisen kolmen kuukauden keskiarvoon. Korkea HRV viittaa yleensä hyvään palautumistilaan.
Hengitystiheys	Hengityksiä / min	Oura	Kertoo terveydentilasta ja keuhkojen palautumisesta. Heijastaa koko kehon palautumistilaa.
Subjekttiivinen unen laatu	Asteikko 1–10	Itseraportointi	Oma arvio unen laadusta tuo tutkimukseen subjektiivisen näkökulman, kun arvio kirjataan ylös ennen laitteiden lukemien tarkastelua.
Subjekttiivinen vireystila	Asteikko 1–10	Itseraportointi	Aamulla kirjattu arvio vireystilasta on hyvä lisä palautumisen arviointiin.
Päivän harjoitusten kuormittavuus	Subjekttiivinen asteikko 1–10 sekä Suunnon Training Stress Score (TSS)	Itseraportointi ja Suunto Peak Pro 9	Arvio harjoittelun kuormittavuudesta auttaa vertaamaan päivän rasituksen vaikutusta uneen ja palautumiseen.

Laitteet asetettiin paikoilleen ajoissa muutamaa tuntia ennen nukkumaanmenoa, sillä pyrkimys oli välttää mahdolliset virheelliset mittaukset. Kello asetettiin oikeaan ranteeseen ja sormus vasempaan etusormeen, ja kumpikin laite pidettiin paikallaan koko yön ajan. Suunto-kelloa käytettiin lisäksi harjoitusten kuormitta-

vuuden mittaamiseen, ja sen antamat tiedot yhdistettiin koehenkilön subjektiivisiin arvioihin.

Harjoitusten kuormittavuutta arvioitiin Suannon käyttämän Training Stress Score (TSS) -menetelmän avulla, joka huomioi harjoituksen keston ja intensiteetin [59]. TSS perustuu anaerobiseen kynnykseen ja sykkeen intensiteettivyöhykkeisiin, ja sen avulla voidaan tarkastella sekä lyhyt- että pitkäaikaisia harjoittelun kuormitustasoja [59]. Harjoitusten subjektiivista kuormittavuutta arvioitiin käyttäen asteikkoa, jossa arvo 0 vastaa täydellistä lepoa ja arvo 10 maksimaalista fyysistä kuormitusta. Väliarvot kuvaavat kuormittavuuden nousua asteittain; esimerkiksi arvo 3 tarkoittaa kohtalaista kuormitusta, jossa puhuminen on vielä helppoa ja arvo 7 tarkoittaa erittäin raskasta kuormitusta, jossa keskustelu on jo vaikeaa. Kuormittavuusasteikko on esitetty taulukossa 2. Harjoitusten kuormittavuus arvioitiin heti suorituksen jälkeen katsomatta TSS-arvoa. Kuormittavuuden seurannan lisäksi jokaisena mittauspäivänä koehenkilö kirjasi heti heräämisen jälkeen subjektiiviset kokemuksensa vireystilasta ja unenlaadusta. Arviot tehtiin asteikolla 1–10, jossa 1 kuvaa huonointa ja 10 parasta kokemusta. Arvio tehtiin ennen sovelluksien tarjoamien lukuarvojen katsomista, jotta sovellusten antamat tiedot eivät vaikuttaisi koehenkilön subjektiiviseen arvioon.

Mittausjakso toteutettiin vaihtelevissa olosuhteissa. Ensimmäinen viikko vietettiin harjoitusleirillä ulkomailla, jonka aikana harjoittelun kuormittavuus oli selkeästi normaalia korkeampi. Harjoitusleirin jälkeen seurasi pitkä ja kehoa kuormittava matkustuspäivä takaisin Suomeen. Mittausta jatkettiin Suomessa toisen viikon ajan, jolloin harjoittelun kuormitusta oli kevennetty palautumisen edistämiseksi. Mittausjakso mahdollisti näin unen ja palautumisen tarkastelun erityyppisissä ympäristöissä ja eri kuormitustasoilla.

Taulukko 2: Asteikko harjoitusten kuormittavuuden arvioimiseen. Koehenkilö arvioi jokaisen mittausjaksolla suoritettujen harjoitusten käyttämällä taulukossa kuvattua asteikkoa.

Arvo	Kuvaus
0	Ei kuormitusta, lepo
1	Hyvin kevyt, esimerkiksi rauhallinen kävely
2	Kevyt, hengittäminen helppoa
3	Kohtalainen, kuormitus havaittavissa mutta puhuminen helppoa
4	Melko raskas, ponnistelu alkaa tuntua
5	Raskas, vaativa mutta hallittava
6	Hyvin raskas, keskittyminen kuormittavaa
7	Erittäin raskas, keskustelu vaikeaa
8	Äärimmäisen raskas, lihakset kuormittuvat voimakkaasti
9	Lähes maksimaalinen kuormitus
10	Maksimaalinen kuormitus, äärimmäinen ponnistus

Mittausten aikana kerätty data tallentui päivittäin molempien laitteiden omiin sovelluksiin, joista se on mahdollista tallentaa erikseen analysoitavaksi. Data käsiteltiin CSV-muodossa sen jälkeen, kun tiedot ladattiin sovelluksista ulos. Ennen analyysien suorittamista data esikäsiteltiin. Datan aikaleimat muunnettiin datetime-muotoon Pandas-kirjaston avulla, mikä mahdollisti mittaustulosten synkronoinnin eri laitteiden välillä. Lisäksi kaikki ajat, jotka oli alun perin tallennettu muotoon "hh:min", muunnettiin kokonaisiksi tunneiksi.

5.4 Analyysimenetelmät

Tutkimuksessa analysoitiin unen ja palautumisen välisiä yhteyksiä sekä laitteiden antamien mittaustulosten yhteneväisyyksiä korrelaatioanalyysillä. Jatkuvien muut-

tujien välisiä yhteyksiä tarkasteltiin Pearsonin korrelaatiokertoimella. Vastaavasti jatkuvan muuttujan ja järjestysasteikollisen muuttujan välistä yhteyttä tarkasteltiin Spearmanin järjestyskorrelaatiokertoimella. Analyysit suoritettiin Python-ohjelmointikielellä (versio 3.11), käyttäen seuraavia kirjastoja: Pandas, NumPy, SciPy, Seaborn ja Matplotlib. Koodit ovat saatavilla GitLab-repositoriossa.

Empiirisen tutkimuksen 1. kysymyksen tarkastelemiseksi analyysit suoritettiin laitteen sisäisesti eli saman laitteen mittaamia mittauksia verrattiin toisiinsa. Kysymyksen 2 kohdalla kummankin laitteen tuottamia mittaustuloksia verrattiin koehenkilön raportoimiin subjektiivisiin mittauksiin ja kysymyksen 3 selvittämiseksi analyysit suoritettiin laskemalla korrelaatio samalle muuttujalle laitteiden välillä.

Datan visualisoinnissa käytettiin lämpökarttaa (engl. heatmap), joka havainnollistaa muuttujien välisten korrelaatiokertoimien suuruutta ja suuntaa. Korrelaatiomatriisi esitettiin graafisesti väriasteikon avulla, jossa vahvat positiiviset korrelaatiot (lähellä +1) ja vahvat negatiiviset korrelaatiot (lähellä -1) korostuvat.

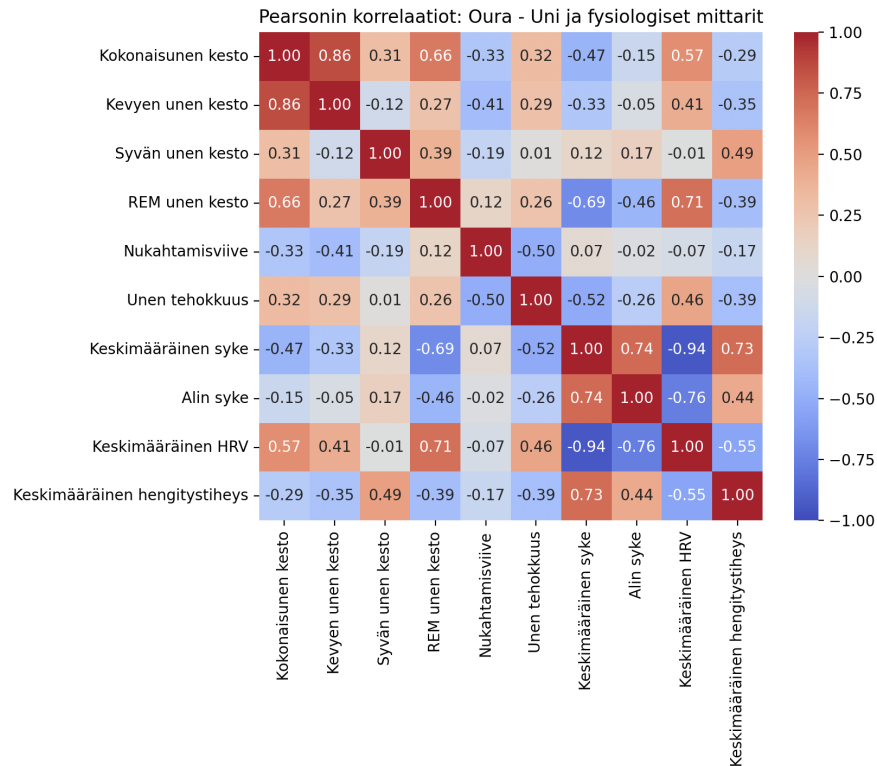
6 Tulokset

Tässä luvussa esitetään tutkielmassa suoritettun empirisen tutkimuksen keskeiset tulokset, jotka on jaoteltu kolmeen osioon. Oura Ring 4 -älyormuksen tulokset unen keston, eri unen vaiheiden sekä fysiologisten mittausten osalta esitetään luvussa 6.1 ja vastaavat Suunto Peak Pro 9 -urheilukellolla mitatut tulokset luvussa 6.2. Laitteiden välisten mittausten yhtenevyyttä tarkastellaan luvussa 6.3.

6.1 Oura Ring 4

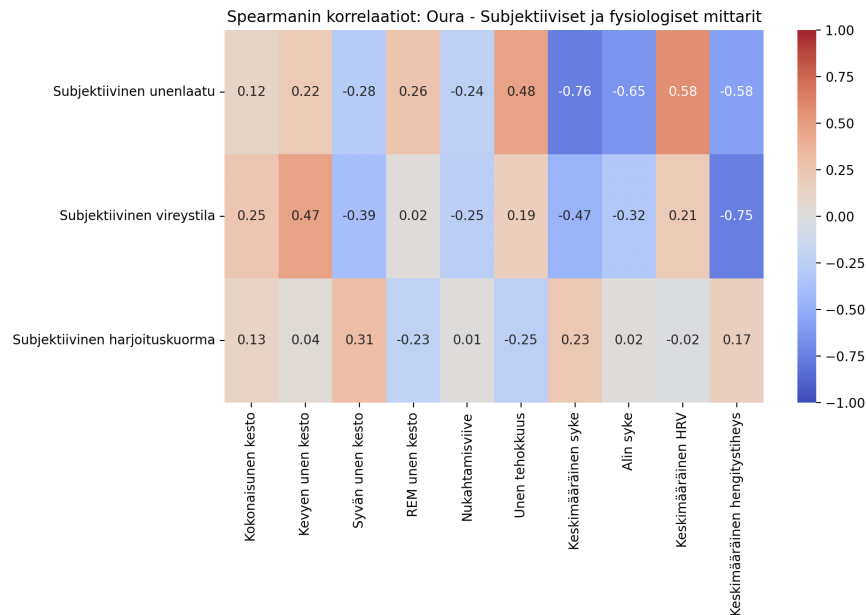
Kokonaisunen kestolla havaittiin voimakas positiivinen korrelaatio kevyen unen keston ($r = 0.86$) ja REM-unen keston ($r = 0.66$) kanssa 4. Syvän unen kesto ja kokonaisunen kesto sen sijaan korreloivat vain heikosti ($r = 0.29$). Lisäksi kokonaisunen kesto oli kohtalaisen positiivisesti yhteydessä HRV:hen ($r = 0.54$) ja negatiivisesti sykkeen ($r = -0.47$) kanssa. REM-unella havaittiin huomattava positiivinen korrelaatio HRV:n kanssa ($r = 0.72$) ja lähes saman suuruinen negatiivinen yhteys sykkeen kanssa ($r = -0.69$).

Hengitystiheyden ja unen vaiheiden väliset yhteydet olivat heikompia. Syvän unen ja hengitystiheyden välillä havaittiin kohtalainen korrelaatio ($r = 0.35$), kun taas kokonaisunen keston ja hengitystiheyden välillä yhteys oli heikko ja negatiivinen ($r = -0.27$). REM-unen ja hengitystiheyden välillä havaittiin kohtalainen korrelaatio ($r = -0.33$). Myös kevyen unen ja hengitystiheyden välillä yhteys oli samansuuruista ($r = -0.32$).



Kuva 4: Pearsonin korrelaatiomatriisi. Oura-sormuksen jatkuvien muuttujien väliset korrelaatiot unen keston, unen vaiheiden ja fysiologisten mittareiden välillä. Matriisista voidaan havaita selkeitä yhteyksiä, kuten kokonaisunen keston ja kevyen unen vahva positiivinen korrelaatio ($r = 0.86$) sekä REM-unen ja HRV:n välinen positiivinen korrelaatio ($r = 0.72$). Sen sijaan esimerkiksi HRV korreloi negatiivisesti sykkeen kanssa ($r = -0.91$). Matriisissa vahvat positiiviset ja negatiiviset korrelaatiot on esitetty väriasteikolla. Punainen väri kuvaa positiivista korrelaatiota ja sininen väri negatiivista.

Fysiologisten mittareiden välillä havaittiin useita voimakkaita ja huomattavia keskinäisiä korrelaatioita. HRV:n ja yön keskisykkeen välinen korrelaatio oli voimakkaasti negatiivinen ($r = -0.91$) ja vastaavasti alimman sykkeen kanssa huomattavan negatiivinen ($r = -0.79$). Hengitystiheys oli kohtalaisen negatiivisesti yhteydessä HRV:hen ($r = -0.41$) ja unen tehokkuuteen ($r = -0.38$), mutta huomattavan positiivisesti keskisykkeeseen ($r = 0.68$). Lisäksi alin syke ja HRV olivat huomattavan negatiivisesti korreloituneita ($r = -0.79$).



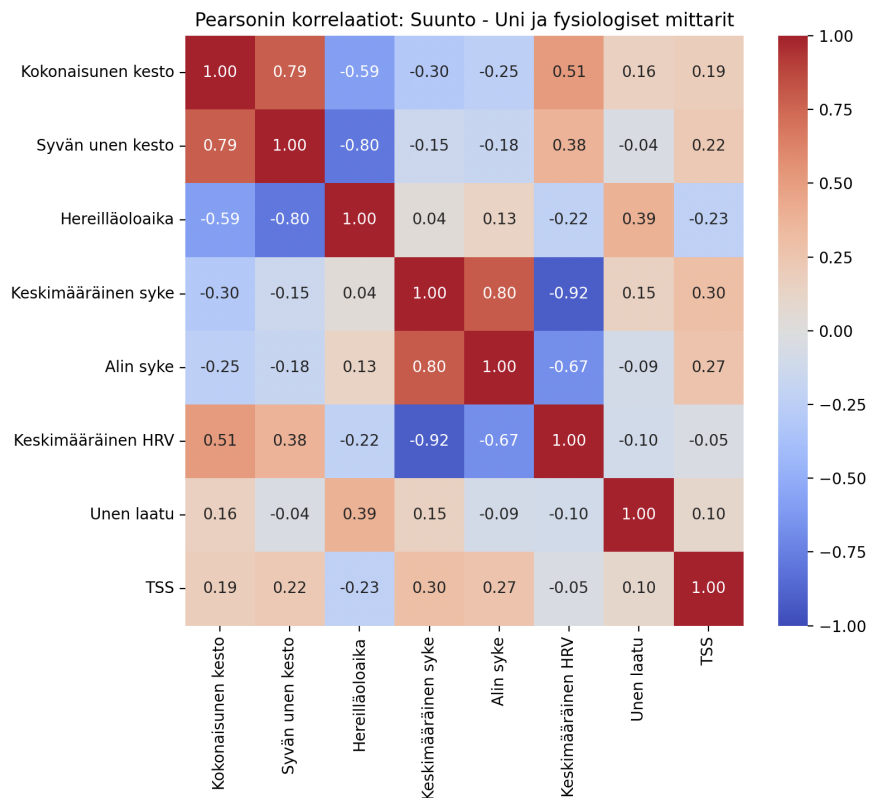
Kuva 5: Spearmanin korrelaatiomatriisi. Koehenkilön subjektiivisten arvioiden ja Ouran fysiologisten mittareiden väliset korrelaatiot. Matriisi havainnollistaa subjektiivisen unenlaadun ja vireystilan yhteyttä unen ja fysiologisten mittareiden arvoihin. Korkeat positiiviset ja negatiiviset arvot osoittavat vahvoja yhteyksiä. Esimerkiksi subjektiivinen vireystila korreloi positiivisesti kevyeen uneen ja HRV:hen, kun taas sykkeen ja hengitystiheyden välillä havaitaan negatiivinen korrelaatio. Positiivista korrelaatiota on kuvattu punaisella värillä ja negatiivista sinisellä.

Subjektiiivisten arvioiden ja fysiologisten mittareiden välillä korrelaatiot olivat pääasiassa heikkoja (kuva 5). Unen subjektiivisesti koettu laatu ei korreloinut merkittävästi unen keston ($r = 0.06$), mutta subjektiivinen vireystila oli kohtalaisesti yhteydessä kevyeen uneen ($r = 0.45$) sekä HRV:hen (0.30). Lisäksi subjektiivinen vireystila ja syke korreloivat negatiivisesti ($r = -0.47$).

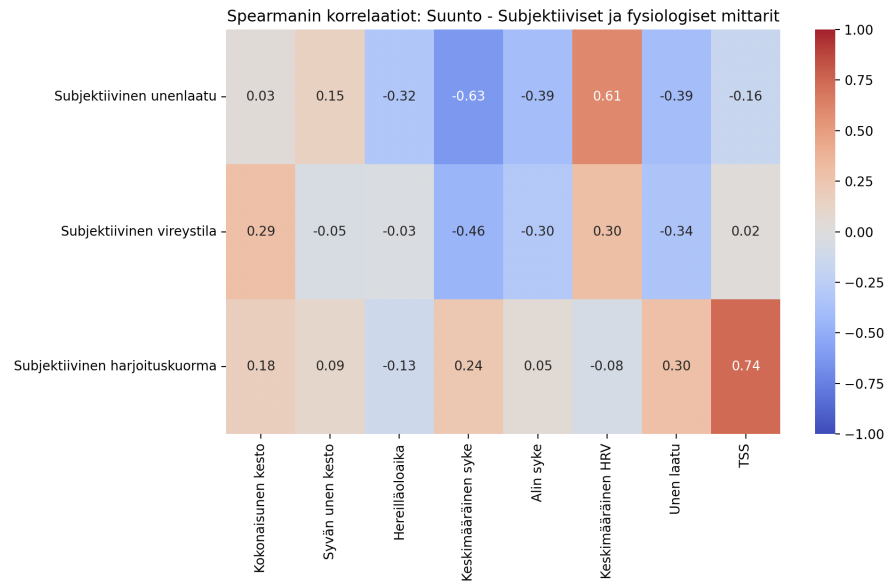
Subjektiiivinen harjoituskuorman arvio korreloi kohtalaisesti syvän unen ($r = 0.31$) ja heikon negatiivisesti REM-unen keston kanssa ($r = -0.23$). Sykkeen kanssa korrelaatio oli positiivinen ($r = 0.23$), samoin hengitystiheyden kanssa ($r = 0.17$). Yhteydet olivat kuitenkin suhteellisen heikkoja. HRV:n ja subjektiivisen harjoituskuorman välillä ei havaittu merkittävää yhteyttä ($r = -0.02$). Lisäksi subjektiivisen harjoituskuorman ja unen tehokkuuden välinen korrelaatio oli heikko ($r = -0.25$).

6.2 Suunto 9 Peak Pro

Suunto 9 Peak Pro -mittauksissa kokonaisunen kesto oli huomattavan positiivisesti yhteydessä syvän unen keston ($r = 0.79$) ja negatiivisesti hereilläoloaikaan ($r = -0.59$). Korrelaatiot on esitetty kuvassa 6. Kokonaisunen kesto oli kohtalaisesti yhteydessä HRV:hen ($r = 0.51$) sekä negatiivisesti sykkeeseen ($r = -0.30$). Syvän unen ja HRV:n korrelaatio oli kohtalainen ($r = 0.38$), mutta syvän unen ja alhaisimman sykkeen välillä yhteys oli heikosti negatiivinen ($r = -0.18$). Lisäksi HRV:n ja sykkeen välillä havaittiin voimakas negatiivinen korrelaatio ($r = -0.92$).



Kuva 6: Pearsonin korrelaatiomatriisi. Suunto 9 Peak Pro -urheilukellon jatkuvien muuttujien väliset korrelaatiot unen keston, unen vaiheiden ja fysiologisten mittausten välillä. Kuvasta havaitaan merkittäviä yhteyksiä, kuten kokonaisunen keston ja syvän unen vahva positiivinen korrelaatio ($r = 0.79$) sekä hereilläoloajan ja syvän unen negatiivinen korrelaatio ($r = -0.80$). Matriisi havainnollistaa myös HRV:n ja sykkeen välistä vahvaa negatiivista yhteyttä ($r = -0.92$). Punainen väri kuvastaa positiivista korrelaatiota ja sininen negatiivista.

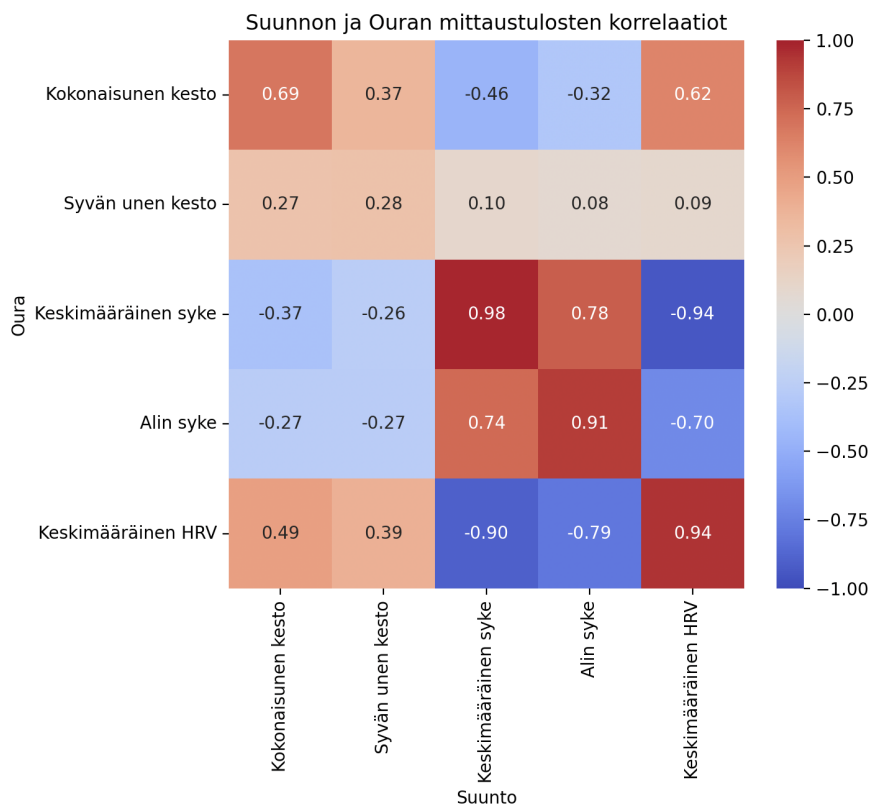


Kuva 7: Spearmanin korrelaatiomatriisi. Suunto 9 Peak Pro -urheilukellon subjektii- visten arvioiden ja fysiologisten mittareiden väliset korrelaatiot. Matriisista voidaan havaita esimerkiksi subjektii- visten unenlaadun ja HRV:n negatiivinen korrelaatio ($r = -0.63$). Vastaavasti subjektii- visten harjoituskuorman arvio korreloi vahvasti objek- tiivisesti mitatun harjoituskuorman (TSS) kanssa ($r = 0.74$). Positiivista korrelaa- tiota on kuvattu punaisella ja negatiivista sinisellä.

Harjoituskuorman (TSS) ja unen välillä havaittiin pääasiassa heikkoja ja kohta- laisia yhteyksiä. TSS korreloi positiivisesti syvän unen ($r = 0.22$) ja sykkeen (yön keskisyke: $r = 0.30$, yön alin syke: 0.27) kanssa, kun taas sen yhteys hereilläoloaikaan oli negatiivinen ($r = -0.23$). HRV:llä sen sijaan ei havaittu olevan merkittävää yhteyt- tä TSS:n kanssa ($r = -0.05$). Subjektii- visten arvioiden ja objektiivisten mittareiden välillä oli joitakin huomattavia yhteyksiä (kuva 7). Subjektii- visten unenlaatu oli ne- gatiivisesti korreloitunut sykkeen kanssa ($r = -0.63$) ja positiivisesti HRV:n kanssa ($r = 0.61$). Subjektii- visten harjoituskuorman arvio oli yhteydessä kellon tuottaman TSS:n kanssa ($r = 0.74$).

6.3 Suunnon ja Ouran vertailu

Ouran ja Suunnon mittaustulosten välillä havaittiin vaihtelevaa samankaltaisuutta eri muuttujien osalta. Vertailussa huomioitiin vain ne muuttujat, jotka olivat saatavilla molemmista laitteista: kokonaisunen kesto, syvän unen kesto, yön keskisyke, yön alin syke ja sykevälivaihtelu. Laitteiden välistä vertailua on havainnollistettu kuvassa 8.



Kuva 8: Suunnon ja Ouran mittaustulosten väliset korrelaatiot. Matriisi havainnollistaa, miten samojen fysiologisten ja subjektiivisten mittareiden tulokset korreloivat laitteiden välillä. Koska diagonaalilla korrelaatiot ovat positiivisia, laitteiden antamat lukemat ovat samansuuntaisia. Etenkin syketietojen osalta mittaustulokset ovat linjassa keskenään, mutta unen osalta yhteys on heikompaa. Diagonaalien ulkopuolella olevat arvot tulee suhteuttaa aiemmissä luvuissa esiteltyihin laitteen sisäisiin arvoihin.

Kaikki korrelaatiot olivat positiivisia (diagonaali kuvassa 8). Kokonaisunen keston osalta laitteiden välinen korrelaatio oli huomattava ($r = 0.69$). Fysiologisten pa-

rametrien arvot olivat laitteiden välillä yhtenäisiä. Keskimääräisen sykkeen ja alimman sykkeen korrelaatiot olivat vahvoja (yön keskisyke: $r = 0.98$ ja yön alin syke: $r = 0.91$) eli laitteet tuottivat lähes identtisiä mittaustuloksia. Myös HRV:n korrelaatio oli vahva ($r = 0.94$). Merkittävin poikkeama löytyi syvästä unesta. Syvän unen osalta laitteiden välinen korrelaatio oli muihin muuttujiin nähden heikko ($r = 0.28$). Myös diagonaalin ulkopuolella laitteiden välillä voidaan havaita eroja syvän unen osalta: Suunnolla keskisykkeen ja alimman sykkeen yhteys syvään uneen on negatiivinen, kun taas Ouralla positiivinen, joskin korrelaatiot ovat merkityksettömiä. Myös Suunnon HRV on selvemmin yhteydessä syvään uneen kuin Ouran.

7 Johtopäätökset

Urheilijat hyödyntävät puettavia sensoreita palautumisensa seurannassa arjessa. Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää, voivatko puettavat sensorit todella auttaa urheilijoiden palautumisen seurannassa ja optimoinnissa, kuinka tarkkoja niiden mittaukset ovat verrattuna kliinisiin menetelmiin ja millaisia haasteita niiden käyttöön liittyy. Työssä suoritettun kirjallisuuskatsauksen perusteella (luvut 2, 3 ja 4) on tunnistettu useita unen, fysiologisten mittausten sekä palautumisen välisiä yhteyksiä, jotka puoltavat puettavien sensorien käyttöä palautumisen optimoinnissa. Puettavat älylaitteet mahdollistavat suhteellisen tarkan palautumisen seurannan verrattuna kliinisiin laboratorioissa suoritettaviin mittauksiin. Ne pystyvät mittaamaan muun muassa sykettä, sykevälivaihtelua, hengitystiheyttä ja unen eri vaiheita, joita kaikkia käytetään palautumisen arvioinnissa.

Vaikka puettavat sensorit tarjoavat arvokasta tietoa palautumisesta, niiden mittaustarkkuus ei täysin vastaa polysomnografiaa (luku 3.3). Altinin ja Kinnusen tutkimus [44] osoittaa, että Ouran mittaustarkkuus (96%) on huomattavan korkea, vaikkei ylläkään täysin PSG:n tasolle. Scott ym. [60] osoitti, että puettavista älylaitteista PPG- ja HRV-perusteiset laitteet olivat tarkimpia unen seurannassa, mutta laitteiden välillä on edelleen algoritmien eroavaisuuksista, mittausteknologioiden vaihtelusta sekä yksilökohtaisista tekijöistä johtuvia eroja. Myös tässä tutkimuksessa havaittiin laitteiden välisiä eroja, erityisesti Suunnon ja Ouran välillä unen keston ja fysiologisten mittareiden osalta. Näiden haasteiden vuoksi käyttäjien on syytä

tarkastella mittaustuloksia kriittisesti ja yhdistää ne subjektiivisiin tuntemuksiin sekä muihin palautumista kuvaaviin mittareihin, kuten harjoituskuorman seurannan arvoihin, jotta palautumisen seurannasta saadaan mahdollisimman hyödyllistä ja luotettavaa.

7.1 Unen yhteys palautumiseen

Tässä työssä suoritetussa empiirisessä tutkimuksessa havaittiin unen vaiheiden ja fysiologisten parametrien välillä useita systemaattisia yhteyksiä, jotka tukevat aiempia löydöksiä unen palauttavasta merkityksestä sekä autonomisen hermoston tasapainosta. Unen eri vaiheiden jakautuminen yön aikana vaikuttaa palautumisprosesseihin, ja aiempi tutkimus on osoittanut unen optimoinnin keskeisen merkityksen urheilijoiden suorituskyvyille [1]. Tässä tutkimuksessa havaittiin pidemmän unen liittyvän autonomisen hermoston tehokkaampaan palautumistilaan ja unen eri vaiheiden tasapainoon. Näiden havaintojen perusteella puettavat älylaitteet voivat tarjota käyttökelpoista tietoa unen ja palautumisen seurannassa.

Unen keston ja eri univaiheiden välillä havaittiin systemaattinen yhteys. Pidempi uni mahdollisti univaiheiden kehittymisen ja tasapainoisen jakautumisen yön aikana. Tämä havainto on linjassa unen fysiologian tunnettujen periaatteiden kanssa (luku 3.1). REM-unen osuus kasvaa yleensä yön edetessä, ja syvän unen jaksoja esiintyy enemmän unen alkuvaiheessa [1].

Pidempi kokonaisunen kesto mahdollistaa enemmän syvän unen jaksoja ja vähentää unenaikaista heräilyä, mikä parantaa unen tehokkuutta ja vähentää sen katkoisuutta. Koska unen tehokkuus on yksi hyvän unenlaadun kriteereistä, voidaan pidemmän unen katsoa edesauttavan palautumista. Tour de Francen aikana ammattipyöräilijöille toteutetussa tutkimuksessa havaittiin pidemmän unen keston olevan yhteydessä parempaan fysiologiseen palautumiseen [61], mikä korostaa unen merkitystä urheilijan suorituskyvyn kannalta. Tulokset vahvistavat, että unen määrä

ja laatu ovat yhteydessä autonomisen hermoston tasapainoon ja tukevat urheilijan palautumista.

Unen kokonaiskesto ja univaiheet olivat myös merkittävässä yhteydessä fysiologisiin palautumismittareihin. Pidempi uni oli yhteydessä korkeampaan sykevälivaihteluun ja matalampaan sykkeeseen, mikä indikoi tehokkaampaa parasympaattisen hermoston toimintaa ja parempaa palautumista [1], [14]. Li ym. [51] on osoittanut, että HRV:n unenaikainen nousu kertoo kehon kyvystä edistää palautumista sekä stressiin sopeutumista. Matala HRV puolestaan on yhteydessä huonoon unenlaatuun ja heikentää merkittävästi urheilijan suorituskykyä laskemalla harjoitusvirettä sekä palautumistilaa [14].

HRV:n ja sykkeen välillä havaittiin vahva negatiivinen yhteys, mikä tukee aiempia havaintoja autonomisen hermoston toiminnasta. Korkeampi HRV liittyi matalampaan sykkeeseen ja parempaan palautumiseen, mikä vastaa Chalmersin ym. tutkimusnäyttöä [14]. REM-unella havaittiin vahva positiivinen yhteys HRV:hen ja vastaavasti negatiivinen yhteys sykkeeseen, mikä viittaa REM-unen olevan keskeinen univaihe palautumisen kannalta. Tämä havainto on yhtenevä Sargentin ym. [61] tutkimuksen kanssa: palautuminen näkyi ammattipyöräilijöillä matalampana sykkeenä ja korkeampana HRV-arvona erityisesti kevyiden ja vähemmän kuormittavien kilpailupäivien jälkeen.

Hengitystiheys oli negatiivisesti yhteydessä REM-unen keston ja vastaavasti positiivisesti yhteydessä syvän unen keston. Tutkimuksessa oli kuitenkin käytettävissä vain koko yön aikainen keskimääräinen hengitystiheys, eikä eri univaiheiden aikaista hengitystiheyttä voida näin ollen eritellä. Yleisesti kuitenkin hengityksen ajatellaan olevan epäsäännöllistä REM-unen ja rauhallisempaa syvän unen aikana [62]. Altinin ja Kinnusen tutkimuksessa havaittiin, että hengitystiheyden ja muiden autonomisen hermoston signaalien analysoiminen parantaa Oura-sormuksen unen vaiheiden luokittelua [44], eli hengitystiheyden seurannasta voi olla hyötyä palautumisen ar-

vioinnissa. Lisäksi korkeampi hengitystiheys oli yhteydessä matalampaan HRV:hen sekä huonompaan unen tehokkuuteen, mikä viittaa palautumisen olevan heikompaa hengitystiheyden ollessa koholla. Hengitystiheyden ja sykkeen (keskimääräinen ja leposyke) välinen positiivinen yhteys puolestaan tukee havaintoa hengitystiheyden liittymisestä korkeampaan kuormitustilaan tai kehon aktiivisuustasoon unen aikana [15]. Löydösten perusteella urheilija voisi siis hyödyntää hengitystiheyttä arvioimaan sen hetkistä palautumistilaa ja kuormitustasoa, korkeamman hengitystiheyden tarkoittaessa kehon kuormittuneisuutta ja mahdollisesti alipalautuneisuutta.

Subjektiiivisten palautumisarvioiden yhdistäminen fysiologisiin mittareihin tarjoaa holistisemman kuvan palautumisen tilasta [47]. Tässä tutkimuksessa havaittiin subjektiiivisten arvioiden ja fysiologisten mittareiden välisten yhteyksien olevan pääasiassa heikkoja, mikä on linjassa aiempien tutkimusten kanssa [48], [63]. Esimerkiksi subjektiiivisen unenlaadun ja kokonaisunen keston välinen yhteys oli heikko, mikä viittaa siihen, ettei unen kesto yksinään määritä unen koettua laatua. Muita vaikuttavia tekijöitä voivat olla unen katkonaisuus sekä syvän unen osuus. Kevyen unen kesto oli kuitenkin selvästi yhteydessä parempaan subjektiiiviseen vireystilaan, mikä voi kertoa riittävän kevyen unen tukevan hermoston rentoutumista ja palautumista, mikä on suoraan yhteydessä urheilijan suorituskykyyn. Toisaalta tämä voi myös johtua siitä, että koehenkilö heräsi useimmiten kevyestä unesta, jolloin olo herätessä oli virkeämpi kuin syvästä unesta herätessä. Subjektiiivinen vireystila oli yhteydessä myös kohtalaisesti HRV:hen sekä sykkeeseen, mikä viittaa autonomisen hermoston paremman palautumisen heijastuvan myös parempaan koettuun vireystilaan. Tämä vahvistaa käsitystä HRV:n hyödyllisyydestä palautumisen arvioinnissa niin fysiologisesta kuin subjektiiivisestakin näkökulmasta [58].

Suunto 9 Peak Pro:lla mitatun harjoituskuormituksen ja syvän unen välillä havaittiin positiivinen yhteys, mikä viittaa harjoituskuormituksen nousun lisäävän syvän unen määrää. Samalla yöllinen hereilläoloaika lyheni, mikä saattaa tarkoittaa

unen olevan levollisempaa kehon ollessa suuremman harjoituskuorman alla. Nämä havainnot tukevat aiempaa käsitystä fyysisen kuormituksen vaikutuksesta univaiheisiin ja palautumiseen [1], [61], [64]. Harjoituskuorman vaikutukset uneen voivat kuitenkin olla yksilöllisiä. Tässä tutkimuksessa unen laatu parani kuorman kasvaessa, mutta Exelin ja Dabnichkin [64] mukaan korkea kuormitus on yhteydessä alentuneeseen unenlaatuun, erityisesti kokonaisrasituksen ollessa korkea. Tämä korostaa kuormituksen hallinnan merkitystä urheilijan optimaalisen palautumisen kannalta. Subjekttiivisen harjoituskuorman arviot olivat linjassa objektiivisen TSS-mittauksen kanssa, mikä viittaa älylaitteen soveltuvan kuormitustason ja sitä kautta palautuneisuuden arviointiin.

7.2 Ouran ja Suunnon vertailu

Vaikka Ouran ja Suunnon mittaustulokset olivat pääosin samansuuntaisia, havaittiin niiden välillä myös selkeitä eroja. Vertailu paljasti mittausteknologioiden yhteeneväisyyksiä ja eroavaisuuksia unen, fysiologisten mittareiden ja harjoituskuorman osalta. Lisäksi subjektiivisten arvioiden yhteydet laitteiden tuottamiin mittauksiin erosivat osittain toisistaan.

Merkittävimmät erot laitteiden välillä liittyvät mittausta paikkaan ja algoritmeihin: Oura mittaa sormesta ja Suunto ranteesta. Ouran unen algoritmi on kattavampi, sillä se kattaa kaikki NREM-unen vaiheet ja REM-unen, kun taas Suunto mittaa vain kokonaisunen kestoja, syvää unta ja hereilläoloaika. Tämä voi selittää Suunnon lyhyemmän kokonaisunen keston, sillä osa kevyestä unesta ja REM-unesta saatetaan tulkita hereilläoloajaksi. Tutkimuksessa havaitut erot ovat linjassa Henriksenin ym. [63] sekä Topalidiksen ym. [9] tutkimusten kanssa. Molemmat toteavat puettavien laitteiden mittaavan unta tarkasti, mutta univaiheiden tunnistamisen vaihtelevan eri laitteiden välillä.

Eroavaisuuksia havaittiin myös syvän unen mittaamisessa. Suunnon mittauksis-

sa kokonaisunen ja syvän unen välillä oli vahva yhteys, kun taas Ouran mittauksissa tämä yhteys oli huomattavasti heikompi. Tämä indikoi laitteiden määrittävän syvän unen eri tavoin. Ero saattaa johtua esimerkiksi siitä, ettei syvän unen määrä kasva suoraviivaisesti unen pidentyessä tai siitä, että Oura painottaa eri fysiologisia tekijöitä syvän unen tunnistuksessa.

Myös syvän unen ja sykkeen välinen suhde poikkesi laitteiden välillä. Suunnon mittauksissa syvän unen kasvaessa yön alin syke laski, kun taas Ouralla yhteys oli päinvastainen. Tämä viittaa jo todettuihin eroihin laitteiden käyttämissä algoritmeissa, jotka määrittävät syvän unen ajanjakson eri perustein. Sargentin ym. [61] tutkimus antaa viitteitä siitä, että syke ja HRV reagoivat eri tavoin unen eri vaiheisiin. Jos Oura ja Suunto mittaavat univaiheita eri tavoin, tämä voi osittain selittää havaitut erot ja myös sen, miksi syketiedoissa esiintyy eroja, vaikka ne olisivat ajallisesti synkronoituja.

Joka tapauksessa päinvastaiset korrelaatiot herättävät kysymyksiä laitteiden mitaustarkkuudesta. Jos urheilijalla on käytössään vain yksi palautumista mittaava laite, voidaanko sen tuloksiin täysin luottaa? Kahden laitteen datan vertailu auttaa olemaan kriittisempi ja subjektiivisilla arvioilla voidaan täydentää saatuja mittaus-tuloksia. Toisaalta myös subjektiivisten arvioiden ja fysiologisten mittarien korrelaatiot olivat Ouralla ja Suunnolla osittain vastakkaisia. Ouralla subjektiivisen unenlaadun ja syvän unen välinen korrelaatio oli positiivinen, mutta Suunnolla negatiivinen. Subjektiivinen unenlaatu oli myös vahvemmin yhteydessä sykkeeseen Suunnolla kuin Ouralla. Tämä voi selittyä sillä, että Suunto mittaa vähemmän unta ja enemmän valveillaoloaika sekä korkeampaa sykettä. Tällöin käyttäjän kokemus huonosta unesta vastaa tarkemmin mitattua fysiologista tilaa, mikä voi osaltaan selittää, miksi subjektiivisen arvioinnin ja syketietojen välinen yhteys Suunnolla korostuu. Toisaalta Suunnon tulokset nimenomaan korostavat subjektiivisten mittarien hyödyntämistä puettavien sensorien rinnalla palautumistilan arvioinnissa.

7.3 Työn rajoitukset

Tässä tutkimuksessa käytetty data perustui yhden koehenkilön mittaustuloksiin, mikä rajoittaa yleistettävyyttä. Laitteiden väliset erot voivat olla osittain yksilöllisiä, ja tulokset saattavat vaihdella eri käyttäjien välillä. Tutkimuksesta voidaan vetää tiettyjä johtopäätöksiä, mutta niiden osalta on oltava kriittinen. Jotta tutkimus olisi yleistettävämpi, se tulisi toteuttaa uudelleen laajemmalla otannalla.

Toinen keskeinen rajoite on unen vaiheiden määrittämiseen liittyvä epävarmuus. Eri laitteiden käyttämät algoritmit voivat tuottaa erilaisia tuloksia, erityisesti syvän unen määrän osalta. Suunnon ja Ouran mittaustulokset erosivat merkittävästi syvän unen ja HRV:n osalta, mikä voi viitata erilaiseen tapaan määrittää univaiheiden kestoja. Myös harjoituskuormituksen ja unen välisen suhteen tarkempi analysointi vaatisi laajempaa otantaa ja tilastollista mallinnusta. TSS:n ja harjoittelun vaikutus uneen voi olla yksilöllistä, ja kovempi treenikuorma ei välttämättä aina johda parempaan uneen. Koehenkilö on tutkimusjaksoa pidemmällä aikavälillä todennut kovan harjoittelun parantavan tiettyyn pisteeseen asti unen laatuaan, mutta harjoituskuorman noustessa liian suureksi unen laatu on alkanut kärsiä ja tämä on linjassa Exelin ja Dabnichkin [64] tutkimuksen kanssa. Sen sijaan kevyemmin harjoittellessa uni on saattanut olla levotonta. Yleinen oletus voisi kuitenkin nimenomaan olla, että kova harjoittelu johtaa heikkenevään unen tehokkuuteen ja laatuun.

8 Yhteenveto

Tässä tutkielmassa tarkasteltiin puettavien sensorien käyttöä urheilijoiden unen ja palautumisen seurannassa. Tutkimuksen päätavoitteena oli selvittää, miten nämä laitteet voivat auttaa palautumisen optimoinnissa ja millaisia haasteita niiden käyttöön liittyy. Lisäksi tarkasteltiin puettavien sensorien mittaustarkkuutta verrattuna kliinisiin menetelmiin. Päättökysymykset olivat:

1. Miten puettavia sensoreiden unenaikaisia mittauksia voidaan hyödyntää urheilijan palautumisen seurannassa?
2. Miten unen kesto ja laatu vaikuttavat urheilijan palautumiseen?
3. Miten syke, sykevälivaihtelu ja hengitystiheys ovat yhteydessä unen laatuun?

Tutkimuksessa havaittiin unen keston, univaiheiden sekä arvioidun unen laadun olevan yhteydessä fysiologisiin palautumismittareihin (tutkimuskysymys 3). Pidempi uni liittyi korkeampaan HRV-arvoon ja matalampaan leposykkeeseen sekä hengitystiheyteen, mikä tukee autonomisen hermoston unenaikaista palautumista. Erityisesti pidempi REM-uni nosti sykevälivaihtelua ja laski leposykettä, mikä korostaa REM-unen merkitystä palautumiselle. Subjektiivinen arvio unen laadusta oli positiivisesti yhteydessä Ouralla sekä Suunnolla mitattuun sykevälivaihteluun, ja Ouralla lisäksi unen tehokkuuteen.

Unen kesto ja laatu vaikuttavat merkittävästi urheilijan palautumiseen, sillä ne ovat yhteydessä autonomisen hermoston toimintaan ja sitä kautta kehon palautu-

miskykyyn (tutkimuskysymys 2). Kirjallisuuskatsauksen perusteella riittävä uni tukee hermoston tasapainoa, vähentää stressihormonien eritystä ja tehostaa parasympaattista aktivaatiota, mikä edistää harjoittelun jälkeistä fyysistä ja psyykkistä toipumista. Pidempi kokonaisuni mahdollistaa enemmän palauttavaa REM- ja syvää unta, ja unen aikana mitattava korkeampi sykevälivaihtelu sekä matalampi syke ovat merkkejä tehokkaammasta palautumisesta. Myös tutkimuksen tulokset tukivat näitä havaintoja: sekä Ouralla että Suunnolla pidempi uni oli yhteydessä korkeampaan sykevälivaihtelun arvoon ja matalampaan leposykkeeseen, ja erityisesti REM-unella havaittiin vahva positiivinen yhteys HRV:hen. Tämä osoittaa, että laadukas ja riittävän pitkä uni on keskeinen osa urheilijan fysiologista palautumista.

Tutkielman perusteella puettavat sensorit tarjoavat käytännöllisen tavan seurata urheilijan palautumista unen ja fysiologisten mittareiden avulla (tutkimuskysymys 1). Puettavien älylaitteiden mittaustarkkuudet eivät kuitenkaan täysin vastaa kliinisiä menetelmiä ja eri laitteet voivat antaa osittain ristiriitaisia tuloksia. Laitteiden tuottamiin tietoihin kannattaakin siis suhtautua hieman varauksella, etenkin kun käytössä on vain yksi laite. Leposykkeen ja sykevälivaihtelun osalta laitteet vaikuttavat kuitenkin olevan johdonmukaisia, jolloin urheilija voi käyttää näitä mittareita arvioidessaan palautumisen tilaansa; matala leposyke ja korkea sykevälivaihtelu kertoo paremmasta palautumisesta. Arvioita tehtäessä puettavien sensorien mittaus-tulokset kannattaa kuitenkin suhteuttaa urheilijan omiin aiempiin tuloksiin, sillä harjoituskuormituksen vaikutuksessa ja eri mittareiden välisissä yhteyksissä saattaa esiintyä yksilöllistä vaihtelua. Lisäksi älylaitteiden tuottamia palautuneisuusarvioita voidaan täydentää urheilijan omalla subjektiivisella arviolla, joka olisi hyvä tehdä ennen laitetietojen tarkastelua. Näin voidaan ehkäistä laitteen antaman palautteen tiedostamattomia vaikutuksia omaan kokemukseen palautumisesta.

Lähdeluettelo

- [1] A. M. Watson, "Sleep and Athletic Performance", *Current sports medicine reports*, vol. 24, s. 413–418, 2017. DOI: 10.1249/JSR.0000000000000418.
- [2] M. Kellmann, "Preventing overtraining in athletes in high-intensity sports and stress/recovery monitoring", *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports*, vol. 20, s. 95–102, 2010. DOI: 10.1111/j.1600-0838.2010.01192.x.
- [3] P. Dürking, S. Achtzehn, H. C. Holmberg ja B. Sperlich, "Integrated framework of load monitoring by a combination of smartphone applications, wearables and point-of-care testing provides feedback that allows individual responsive adjustments to activities of daily living", *Sensors (Switzerland)*, vol. 18, s. 1632–, 2018. DOI: 10.3390/s18051632.
- [4] J. Leppäluoto, R. Kettunen, H. Rintamäki et al., toim., *Anatomia ja fysiologia : rakenteesta toimintaan*, 9., uudistettu painos. Helsinki: Sanoma Pro Oy, 2019, s. 134–135, 328, 346–357, ISBN: 978-952-63-4036-4.
- [5] E. Haug, "Sydämen toiminta", teoksessa *Ihmisen fysiologia*, O. Sand, K. C. Toverud, K. Sillman ja Ø. V. Sjaastad, toim., 1.-5. p. Helsinki: Sanoma Pro, 2012, s. 270–277, ISBN: 978-952-63-1129-6.
- [6] J. A. Waxenbaum, V. Reddy ja M. Varacallo, "Anatomy, Autonomic Nervous System", teoksessa *StatPearls (Internet)*, Treasure Island: StatPearls Publishing, 2023.

-
- [7] M. W. Driller, I. C. Dunican, S. E. Omond et al., "Pyjamas, Polysomnography and Professional Athletes: The Role of Sleep Tracking Technology in Sport", *Sports*, vol. 11, s. 14–, 2023. DOI: 10.3390/sports11010014.
- [8] G. M. Migliaccio, J. Padulo ja L. Russo, "The Impact of Wearable Technologies on Marginal Gains in Sports Performance: An Integrative Overview on Advances in Sports, Exercise, and Health", *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 14, s. 6649–, 2024. DOI: 10.3390/app14156649.
- [9] P. I. Topalidis, S. Baron, D. P. Heib, E. S. Eigl, A. Hinterberger ja M. Schabus, "From Pulses to Sleep Stages: Towards Optimized Sleep Classification Using Heart-Rate Variability", *Sensors*, vol. 23, s. 9077–, 2023. DOI: 10.3390/s23229077.
- [10] T. G. Laske, M. Shrivastav ja P. A. Iaizzo, "The Cardiac Conduction System", teoksessa *Handbook of Cardiac Anatomy, Physiology, and Devices*, P. A. Iaizzo, toim. Totowa, NJ: Humana Press, 2009, s. 159–175, ISBN: 978-1-60327-371-8.
- [11] P. A. Iaizzo, *Handbook of cardiac anatomy, physiology, and devices*, 2. painos. New York, NY: Springer, 2009, ISBN: 978-1-60327-371-8.
- [12] G. J. Tortora, teoksessa *Principles of anatomy and physiology*, B. Derrickson, toim., 16. painos. Wiley, 2023, s. 619–646, ISBN: 978-1-394-21021-3.
- [13] S. Vieau ja P. A. Iaizzo, "Basic ECG theory, 12-lead recordings, and their interpretation", teoksessa *Handbook of Cardiac Anatomy, Physiology, ja Devices, Third Edition*, Springer International Publishing, 2015, s. 321–334. DOI: 10.1007/978-3-319-19464-6_19.
- [14] T. Chalmers, B. A. Hickey, P. Newton et al., "Associations between Sleep Quality and Heart Rate Variability; Implications for a Biological Model of Stress Detection Using Wearable Technology", *International Journal of Envi-*

- ronmental Research and Public Health*, vol. 19, s. 5770–, 2022. DOI: 10.3390/ijerph19095770.
- [15] O. P. Nuutila, E. Korhonen, J. Laukkanen ja H. Kyröläinen, ”Validity of the wrist-worn polar vantage v2 to measure heart rate and heart rate variability at rest”, *Sensors*, vol. 22, s. 137–, 2022. DOI: 10.3390/s22010137.
- [16] R. Tiwari, R. Kumar, S. Malik, T. Raj ja P. Kumar, ”Analysis of Heart Rate Variability and Implication of Different Factors on Heart Rate Variability”, *Current Cardiology Reviews*, vol. 17, 2021. DOI: 10.2174/1573403x169992012\allowbreak31203854.
- [17] M. A. Almarshad, M. S. Islam, S. Al-Ahmadi ja A. S. Bahammam, ”Diagnostic Features and Potential Applications of PPG Signal in Healthcare: A Systematic Review”, *Healthcare (Switzerland)*, vol. 10, s. 547–, 2022. DOI: 10.3390/healthcare10030547.
- [18] J. Allen, ”Photoplethysmography and its application in clinical physiological measurement”, *Physiological Measurement*, vol. 28, R1–R39, 2007. DOI: 10.1088/0967-3334/28/3/R01.
- [19] A. Bartschke, Y. Börner ja S. Thun, ”Accessing the ECG Data of the Apple Watch and Accomplishing Interoperability Through FHIR”, vol. 278, s. 245–250, 2021. DOI: 10.3233/SHTI210076.
- [20] M. Schaffarczyk, B. Rogers, R. Reer ja T. Gronwald, ”Validity of the Polar H10 Sensor for Heart Rate Variability Analysis during Resting State and Incremental Exercise in Recreational Men and Women”, *Sensors*, vol. 22, 2022. DOI: 10.3390/s22176536.
- [21] S. Alnasser, D. Alkalthem, S. Alenazi, M. Alsowinea, N. Alanazi ja A. Al Fagih, ”The Reliability of the Apple Watch’s Electrocardiogram”, *Cureus*, vol. 15, e49786–e49786, 2023. DOI: 10.7759/cureus.49786.

- [22] T. Hilbel ja N. Frey, "Review of current ECG consumer electronics (pros and cons)", *Journal of Electrocardiology*, vol. 77, s. 23–28, 2023. DOI: 10.1016/j.jelectrocard.2022.11.010.
- [23] Oura Health Oy. "Respiratory Rate", url: <https://support.ouraring.com/hc/en-us/articles/360025443174-Respiratory-Rate> (viitattu 11.05.2024).
- [24] H. Jung, D. Kim, J. Choi ja E. Y. Joo, "Validating a Consumer Smartwatch for Nocturnal Respiratory Rate Measurements in Sleep Monitoring", *Sensors*, vol. 23, s. 7976–, 2023. DOI: 10.3390/s23187976.
- [25] P. M. Fuller, J. J. Gooley ja C. B. Saper, "Neurobiology of the sleep-wake cycle: Sleep architecture, circadian regulation, and regulatory feedback", *Journal of Biological Rhythms*, vol. 21, s. 482–493, 2006. DOI: 10.1177/0748730406294627.
- [26] S. Javaheri ja S. Redline, "Sleep, slow-wave sleep, and blood pressure", *Current Hypertension Reports*, vol. 14, s. 442–448, 2012. DOI: 10.1007/s11906-012-0289-0.
- [27] A. K. Patel, V. Reddy, K. R. Shumway ja J. F. Araujo, "Physiology, Sleep Stages", teoksessa *StatPearls (Internet)*, Treasure Island: StatPearls Publishing, 2024.
- [28] N. Baranwal, P. K. Yu ja N. S. Siegel, "Sleep physiology, pathophysiology, and sleep hygiene", *Progress in Cardiovascular Diseases*, vol. 77, s. 59–69, 2023. DOI: 10.1016/j.pcad.2023.02.005.
- [29] M. P. Walker, "The role of sleep in cognition and emotion", *Annals of the New York Academy of Sciences*, vol. 1156, s. 168–197, 2009. DOI: 10.1111/j.1749-6632.2009.04416.x.

- [30] M. de Zambotti, J. Trinder, A. Silvani, I. M. Colrain ja F. C. Baker, "Dynamic coupling between the central and autonomic nervous systems during sleep: A review", *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, vol. 90, s. 84–103, 2018. DOI: 10.1016/j.neubiorev.2018.03.027.
- [31] D.-J. Dijk, "Slow-wave sleep, diabetes, and the sympathetic nervous system", *Proceedings of the National Academy of Sciences - PNAS*, vol. 105, s. 1107–1108, 2008. DOI: 10.1073/pnas.0711635105.
- [32] M. G. Miglis, "Sleep and the Autonomic Nervous System", teoksessa *Sleep and Neurologic Disease*. Elsevier Inc., 2017, s. 227–244, ISBN: 978-0-12-804074-4.
- [33] B. Rasch ja J. Born, "About Sleep's Role in Memory", *Physiol Rev*, vol. 93, s. 681–766, 2013. DOI: 10.1152/physrev.00032.2012.
- [34] O. Troynikov, C. G. Watson ja N. Nawaz, "Sleep environments and sleep physiology: A review", *Journal of Thermal Biology*, vol. 78, s. 192–203, 2018. DOI: 10.1016/j.jtherbio.2018.09.012.
- [35] S. J. McCarter, P. T. Hagen, E. K. S. Louis et al., *Physiological markers of sleep quality: A scoping review*, 2022. DOI: 10.1016/j.smr.2022.101657.
- [36] M. P. Walker ja R. Stickgold, "It's Practice, with Sleep, that Makes Perfect: Implications of Sleep-Dependent Learning and Plasticity for Skill Performance", *Clinics in Sports Medicine*, vol. 24, s. 301–317, 2005. DOI: 10.1016/j.csm.2004.11.002.
- [37] K. L. Nelson, J. E. Davis ja C. F. Corbett, "Sleep quality: An evolutionary concept analysis", *Nursing Forum*, vol. 57, s. 144–151, 2022. DOI: 10.1111/nuf.12659.
- [38] F. Ramlee, A. N. Sanborn ja N. K. Tang, "What sways people's judgment of sleep quality? A quantitative choice-making study with good and poor sleepers", *Sleep*, vol. 40, 2017. DOI: 10.1093/sleep/zsx091.

- [39] Oura Health Oy. ”Unen Osatekijät”, url: <https://support.ouraring.com/hc/fi/articles/360057792293-Unen-osatekij%C3%A4t> (viitattu 15.12.2025).
- [40] F. Shaffer ja J. P. Ginsberg, ”An Overview of Heart Rate Variability Metrics and Norms”, *Frontiers in Public Health*, vol. 5, s. 258–258, 2017. DOI: 10.3389/fpubh.2017.00258.
- [41] J. M. Schmickler, S. Blaschke, R. Robbins ja F. Mess, ”Determinants of Sleep Quality: A Cross-Sectional Study in University Students”, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 20, s. 2019–, 2023. DOI: 10.3390/ijerph20032019.
- [42] G. Barbato, ”REM sleep: An unknown indicator of sleep quality”, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 18, 24 2021. DOI: 10.3390/ijerph182412976.
- [43] B. Jafari ja V. Mohsenin, ”Polysomnography”, *Clinics in Chest Medicine*, vol. 31, s. 287–297, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ccm.2010.02.005>.
- [44] M. Altini ja H. Kinnunen, ”The promise of sleep: A multi-sensor approach for accurate sleep stage detection using the oura ring”, *Sensors*, vol. 21, s. 4302–, 2021. DOI: 10.3390/s21134302.
- [45] M. D. Zambotti, N. Cellini, A. Goldstone, I. M. Colrain ja F. C. Baker, ”Wearable Sleep Technology in Clinical and Research Settings”, *Medicine and Science in Sports and Exercise*, vol. 51, s. 1538–1557, 2019. DOI: 10.1249/MSS.0000000000001947.
- [46] J. Trinder, J. Kleiman, M. Carrington et al., ”Autonomic activity during human sleep as a function of time and sleep stage”, *Journal of Sleep Research*, vol. 10, s. 253–264, 2001. DOI: 10.1046/j.1365-2869.2001.00263.x.

- [47] M. Kellmann, M. Bertollo, L. Bosquet et al., "Recovery and performance in sport: Consensus statement", *International Journal of Sports Physiology and Performance*, vol. 13, s. 240–245, 2018. DOI: 10.1123/ijsp.2017-0759.
- [48] R. Doherty, S. M. Madigan, A. Nevill, G. Warrington ja J. G. Ellis, "The sleep and recovery practices of athletes", *Nutrients*, vol. 13, s. 1330–, 2021. DOI: 10.3390/nu13041330.
- [49] V. A. Cornelissen, B. Verheyden, A. E. Aubert ja R. H. Fagard, "Effects of aerobic training intensity on resting, exercise and post-exercise blood pressure, heart rate and heart-rate variability", *Journal of Human Hypertension*, vol. 24, s. 175–182, 2010. DOI: 10.1038/jhh.2009.51.
- [50] P. Palatini, "Heart rate reduction through lifestyle modification: reply", *European Heart Journal*, vol. 26, s. 1808–1808, 2005. DOI: 10.1093/eurheartj/ehi400.
- [51] K. Li, C. Cardoso, A. Moctezuma-Ramirez, A. Elgalad ja E. Perin, "Heart Rate Variability Measurement through a Smart Wearable Device: Another Breakthrough for Personal Health Monitoring?", *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 20, s. 7146–, 2023. DOI: 10.3390/ijerph20247146.
- [52] C. J. Lundstrom, N. A. Foreman ja G. Biltz, "Practices and Applications of Heart Rate Variability Monitoring in Endurance Athletes", *International Journal of Sports Medicine*, vol. 44, s. 9–19, 2023. DOI: 10.1055/a-1864-9726.
- [53] G. Baura, "Pulse oximeters", teoksessa *Medical Device Technologies*, 2. painos, San Diego: Academic Press, 2021, s. 281–303, ISBN: 978-0-12-811984-6.

- [54] A. Nicolò, C. Massaroni, E. Schena ja M. Sacchetti, "The importance of respiratory rate monitoring: From healthcare to sport and exercise", *Sensors (Switzerland)*, vol. 20, s. 1–45, 2020. DOI: 10.3390/s20216396.
- [55] Oura Health Oy. "Oura Tuki", url: <https://support.ouraring.com/hc/fi> (viitattu 02.01.2025).
- [56] Suunto Oy. "Suunto 9 Peak Pro", url: <https://www.suunto.com/fi-fi/Tuotteet/Urheilulaitteet-ulkoiluun/suunto-9-peak-pro/suunto-9-peak-pro-all-black/> (viitattu 02.01.2025).
- [57] Suunto Oy. "Suunto 9 Peak Pro User Guide", url: https://ns.suunto.com/Manuals/Suunto_9_Peak_Pro/Userguides//Suunto_9_Peak_Pro_UserGuide_FI.pdf (viitattu 23.01.2025).
- [58] H. Kinnunen, A. Rantanen, T. Kentt ja H. K. ki, "Feasible assessment of recovery and cardiovascular health: Accuracy of nocturnal HR and HRV assessed via ring PPG in comparison to medical grade ECG", *Physiological Measurement*, vol. 41, 4–04NT01, 2020. DOI: 10.1088/1361-6579/ab840a.
- [59] Suunto Oy. "SuuntoTSS", url: <https://www.suunto.com/fi-fi/sports/News-Articles-container-page/training-stress-score-i> (viitattu 27.01.2025).
- [60] H. Scott, L. Lack ja N. Lovato, "A systematic review of the accuracy of sleep wearable devices for estimating sleep onset", *Sleep Medicine Reviews*, vol. 49, s. 101227–101227, 2020. DOI: 10.1016/j.smrv.2019.101227.
- [61] C. Sargent, S. Jasinski, E. R. Capodilupo, J. Powers, D. J. Miller ja G. D. Roach, "The Night-Time Sleep and Autonomic Activity of Male and Female Professional Road Cyclists Competing in the Tour de France and Tour de France Femmes", *Sports Medicine - Open*, vol. 10, s. 20–39, 2024. DOI: 10.1186/s40798-024-00716-6.

-
- [62] T. Stenberg, ”Elimistön fysiologiaa unen aikana”, *Lääketieteellinen Aikakauskirja Duodecim*, vol. 135, s. 831–837, 9 2019.
- [63] A. Henriksen, F. Svartdal, S. Grimsgaard, G. Hartvigsen ja L. A. Hopstock, ”Polar Vantage and Oura Physical Activity and Sleep Trackers: Validation and Comparison Study”, *JMIR Formative Research*, vol. 6, e27248, 2022. DOI: 10.2196/27248.
- [64] J. Exel ja P. Dabnichki, ”Precision Sports Science: What Is Next for Data Analytics for Athlete Performance and Well-Being Optimization?”, *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 14, s. 3361–, 2024. DOI: 10.3390/app14083361.

Liite A Hakualgoritmit

Tässä liitteessä kuvataan kirjallisuuskatsauksen systemaattiset tietokantahaut. Haut toteutettiin Web of Science-, PubMed- ja ACM Digital Library -tietokannoissa ja suurimmassa osassa hakuja hakuvuodeksi rajattiin vuodet 2020–2024. Fysiologista taustaa käsitteleviin lukuihin aineistoa haettiin myös Turun Yliopiston Volterkirjastosta. Tietokantojen hakulausekkeet kattoivat pääosin seuraavat aihealueet: puettavat sensorit, uni, palautuminen, urheilijat sekä fysiologiset mittarit kuten HRV, syke ja hengitystiheys. Osa hakulausekkeista tuotti tuhansia osumia, mutta vain rajattu määrä käytiin läpi. Suurin osa käytetyistä lähteistä löytyi tarkennetuilla hauilla, useissa hakutuloksissa esiintyneinä artikkeleina tai hyödyllisten artikkelien kautta lähteinä.

Web of Science

Yleishaku

```
TS=(("wearable sensors" OR "wearable technology" OR "wearable devices")
AND (("athlete recovery" OR "recovery monitoring" OR "recovery optimization")
OR ("sleep tracking" OR "sleep quality" OR "sleep duration")
OR ("heart rate variability" OR HRV OR "oxygen saturation" OR "SpO2")
OR ("performance" OR "injury prevention" OR "under-recovery")))
AND PY=(2018-2024)
AND LA=(English OR Finnish)
```

Tulokset: 9231 → rajattu vuosiin 2020–2024 → 7645 tulosta

Tarkennettu haku

```
TS=(("wearable sensors" OR "wearable technology" OR "wearable devices")
AND (("athlete recovery" OR "recovery monitoring" OR "recovery optimization")
OR ("sleep tracking" OR "sleep quality" OR "sleep duration")
OR ("heart rate variability" OR HRV OR "oxygen saturation" OR "SpO2")))
AND PY=(2020-2024)
AND LA=(English OR Finnish)
```

Tulokset: 925 → valikoitui 6 artikkelia

Yksittäiset haut

```
TS=(wearables AND heart rate AND sleep)
```

Tulokset: 200 → valikoitui 1 artikkeli

```
TS=((wearables) AND (sleep) AND (athletes OR performance))
```

Tulokset: 10 → valikoitui 1 artikkeli

```
TS=(wearables AND heart rate AND sleep AND athlete)
```

Tulokset: 13 → valikoitui 3 artikkelia

```
TS=(wearable* AND sleep* AND (athlete* OR sport*))
```

Tulokset: 63 → suurin osa keskeisistä lähteistä

PubMed

Tulosmäärät vaihtelivat 13–15 000 välillä. Osa hauista tuotti runsaasti osumia, mutta mukaan valikoitui vain otsikon tai abstraktin perusteella relevanteimmat.

```
(wearable* AND sleep* AND (athlete* OR sport*)) AND PY=(2020-2024)
```

Tulokset: 67 → suurin osa lähteistä löytyi jo WoS:n kautta

```
(smart watch OR sports watch) AND ECG AND PY = (2011-2024)
```

Tulokset: 97 → valikoitui 14 artikkelia otsikon ja abstraktin perusteella

```
Heart rate variability OR HRV
```

Tulokset: 15 989 tulosta → valikoitui muutama artikkeli otsikon perusteella

```
recovery AND sport
```

Tulokset: 1309 tulosta → valikoitui 2 artikkelia

```
respiratory rate AND sleep AND wearables
```

Tulokset: 120 → valikoitui 1 artikkeli

ACM Digital Library

```
[All: athlete] AND [All: sleep] AND [All: wearable]
```

E-Publication Date: 2016–2024

Tulokset: 373 → valikoitui 1 uusi artikkeli