

Roni Koskinen

**Miten äly- ja urheilukellot suoriutuvat niille suunnitelluista
tehtävistä**

Tietotekniikan kandidaatintutkielma

26. huhtikuuta 2023

Jyväskylän yliopisto

Informaatioteknologian tiedekunta

Tekijä: Roni Koskinen

Yhteystiedot: rpkoskin@student.jyu.fi

Ohjaaja: Tytti Saksa

Työn nimi: Miten äly- ja urheilukellot suoriutuvat niille suunnitelluista tehtävistä

Title in English: L^AT_EX-tutkielmapohjan gradu3 käyttö

Työ: Kandidaatintutkielma

Opintosuunta: Mathematical Information Technology

Sivumäärä: 26+0

Tiivistelmä: Urheilukellot ovat yleistyneet viime vuosina paljon. Laitteet tekevät useita erilaisia fysiologisia ja liikuntaan liittyviä mittauksia. Kuluttajat luottavat näihin mittauksiin ja kohdentavat esimerkiksi harjoitteluohjelmaansa tai levon määrää laitteiden mittauksien mukaisesti. Tässä Kandidaatintutkielmassa perehdytään siihen, kuinka tarkkoja nämä mittaukset ovat. Tutkielma käsittelee myös sitä, miten nämä mittaukset riippuvat ulkoisista muuttujista. Kandidaatintutkielmassa todetaan, että laitteet suoriutuvat mittauksista yleensä hyvin.

Avainsanat: Puettava teknologia, Älykellot, Urheilukellot

Abstract: Smartwatches and sports watches have become increasingly popular in recent years. These devices make several different physiological and exercise-related measurements. Consumers rely on these measurements and adjust their training programs or rest periods according to the device's measurements. This Bachelor's thesis explores how accurate these measurements are. The thesis also examines how these measurements depend on external variables. Thesis concludes that smart watches and sport watches usually perform well in measuring physiological and exercise-related measurements.

Keywords: Puettava teknologia, Älykellot, Urheilukellot

Jyväskylä, 26. huhtikuuta 2023

Taulukot

Taulukko 1. Älykellojen sykemittauksen tarkkuuden korrelaatio elektrodiagrammin sykemittaukseen (Wang ym. 2017)	4
Taulukko 2. Apple Watch 3 ja Fitbit Charge 2 sykemittauksen ero EKG mittarin tuloksiin. Arvot kuvaavat suhteellisen virheen keskimääräistä arvoa (MAPE). Lähde: Nelson ja Allen (2019)	5

Sisällys

1	JOHDANTO	1
2	PUETTAVAT TEKNOLOGIAT	2
3	ÄLYKELLOJEN MITTAUKSET	3
3.1	Syke	3
3.2	Uni	6
3.3	Paikanninjärjestelmä	8
3.4	Korkeuden mittaus	10
3.5	Askeleet	11
3.6	Happisaturaation mittaus	12
4	JOHTOPÄÄTÖKSET	14
	LÄHTEET	16

1 Johdanto

Teknologian kehitys on johtanut liikunnan vähenemiseen, ja vapaa-ajan aktiviteetit on korvautunut aktiviteetteihin, joissa liikunta on vähäistä (Petrusevski ym. 2021). Aktiivisuutta mittaavat laitteet ovat kuitenkin poikkeus tässä kehityksessä. Aktiivisuutta mittaavien laitteiden kerrotaan edistävän terveellisempiä elämäntapoja tekemällä aktiivisuusdatasta käyttäjälleen näkyvän (Shin, Cheon ja Jarrahi 2015). Puettavat teknologiat ovat yleistyneet viimeisen kymmenen vuoden aikana tavallisten kuntoilijoiden käyttöön teknologian nopean kehityksen seurauksena. Teknologian nopea kehittyminen on laskenut laitteiden hintaa ja laitteiden fyysinen koko on pienentynyt. Nämä tekijät ovat mahdollistaneet laitteiden käytön ja hankkimisen suuremmalle joukolle ihmisiä. Teknologian kehittyminen on tehnyt laitteista aiempaa tarkempia ja parempia melkein kaikilla osa-alueilla. Niihin on myös kehitetty paljon uusia ominaisuuksia. Kellot muun muassa seuraavat unta, mittaavat sykettä, mittaavat kuljettua matkaa, noustua korkeutta ja happisaturaatiota.

Tässä tutkielmassa tutkitaan, miten äly- ja urheilukellot suoriutuvat mittaustoiminnoistaan. Aihe on valittu kirjoittajan oman puettavien teknologioiden kiinnostuksen vuoksi. Monet käyttävät äly- tai urheilukelloa päivittäin, ja on mielenkiintoista tietää, mitä tutkimukset kertovat näiden teknologioiden mittauksien tarkkuudesta.

Tutkimus tehdään kirjallisuuskatsauksena. Kirjallisuuskatsaus valittiin tutkimussuunnitel-maksi, sillä puettavista teknologioista on tehty paljon tutkimusta. Tutkimusstrategia on myös soveltuva aiheen laajuuden vuoksi. Aiheen laajuus vaatii useiden eri lähteiden yhdistelemistä yhdeksi kokonaisuudeksi. Yhden tutkimuksen tekeminen aiheesta on käytännössä mahdotonta, sillä tutkimus tutkimukseen tulisi sisällyttää lukuisia eri mittaustapoja ja mittaustilan-teista. Tutkielmassa määritellään ensin, mitä tarkoittaa puettava teknologia sekä mitä tarkoi-tetaan äly- ja urheilukelloilla. Tämän jälkeen käydään läpi älykellojen mittauksista sykkeen, unen, matkan pituuden, korkeuden, askeleiden sekä happisaturaation mittauksen. Nämä on jaettu omiin kappaleisiinsa. Jokaisen kappaleen lopussa tiivistetään, suoriutuvatko laitteet mittauksesta hyvin.

2 Puettavat teknologiat

Puettavat teknologiat tarkoittavat laitteita, jotka ovat suoraan tai irtonaisesti kiinni ihmisessä. Suoraan kiinni olevat laitteet ovat esimerkiksi äly- tai urheilukelloja. Irtonaiset puettavat teknologiat tarkoittavat yleensä puhelimia (Godfrey ym. 2018.) Puettavia teknologioita voi olla monessa eri muodossa, ne voivat olla esimerkiksi koruja, lisävarusteita, lääketieteellisiä laitteita, vaatteita tai vaatteisiin liitettäviä laitteita (Yasar 2022).

Puettavat teknologiat voidaan jakaa kahteen kategoriaan. Ensisijaisiin, eli laitteisiin jotka toimivat itsenäisesti ja yhdistävät muita laitteita toisiinsa (Godfrey ym. 2018). Tällaisia ovat esimerkiksi äly -ja urheilukellot, puhelimet ja älysormukset. Toinen kategoria on toissijaiset, eli sellaiset laitteet, jotka tarvitsevat toimiakseen ensisijaisen laitteen johon ne lähettävät dataa. Ensisijaiset laitteet mittaavat yleensä jotain tiettyä arvoa. Tällaisia ovat esimerkiksi rinnan ympärillä puettava sykevyö (Godfrey ym. 2018.)

Älykellot ovat suosituin laite puettavien teknologioiden kategoriassa (Godfrey ym. 2018). Älykellot tarkoittavat puhelimenkaltaisia laitteita, joita puetaan ranteessa (*Watch - Electric-powered and electronic watches* | Britannica 2023). Älykelloissa on myös yleensä joukko erilaisia antureita (Rawassizadeh, Price ja Petre 2014).

Urheilukellot tarkoittavat tietokonepohjaisi älykelloja, joka on kestävästi valmistettu, vedenkestävä ja siinä on ominaisuuksia kuten sykemittari sekä muita urheiluun, liikkumiseen ja terveyteen liittyviä seuranta ominaisuuksia (*Sports Watch* 2023). Urheilukellojen ero älykelloon on siis se, että nämä ovat usein kestävämmiin valmistettu, ja tarjoavat ensisijaisesti hyvinvoinnin ja urheilun seuraamiseen liittyviä ominaisuuksia. Erot ovat siis pienet, ja esimerkiksi urheilukelloja valmistava Garmin käyttää sivuillaan kelloistaan "Smart Watch"-termiä (Garmin 2023). Tässä tutkielmassa käytetään termiä älykello ja urheilukello sen mukaan, mitä termiä tarkasteltavassa tutkimuksessa käytetään. Tutkielman kannalta näitä laitteita tarkastellaan kuitenkin yhteisenä kokonaisuutena.

3 Älykellojen mittaukset

Tässä luvussa käydään läpi älykellojen mittauksia. Tutkielmaan on valittu käsiteltäväksi sykkeen, matkan pituuden, korkeuden, unen, happisaturaation, sekä askelmittauksen tarkkuudet. Älykellot suorittavat myös muita mittauksia, mutta niitä ei ole sisällytetty tähän tutkielmaan. Nämä mittaukset on valittu siksi, että ne on arvioitu älykellojen käytetyimmiksi ominaisuuksiksi

3.1 Syke

Sykkeiden mittaamisen tarkkuuteen äly- ja urheilukelloissa löytyy tällä hetkellä eniten tutkijamusta verrattuna muihin mitattaviin arvoihin. Kiinnostus sykkeiden mittaamisen tarkkuuteen on siis ilmeinen. Kirjoittajan mielestä sykkeiden mittaamisen tarkkuus onkin yksi tärkeimpiä älykellojen ominaisuuksia. Sykkeestä voidaan tehokkaasti seurata harjoituksen kuormittavuutta, ja sykkeen seuraaminen olisi hyvin vaikeaa ilman sykemittaria. Sykkeiden mittaamiseen käytetään pääosin kahta erilaista menetelmää. Ensimmäinen menetelmä on elektrokardiografia (EKG, eng. ECG), jossa mitataan sydämen lyönnin synnyttämiä sähköaalloja (*Heart Rate Monitors* 2023). Käytän tässä tutkielmassa jatkossa mittaustavasta lyhennettä EKG.

Toinen metodi taas on fotopletysmografinen (Optinen, FPG, eng. PPG), jossa mitataan valtimoiden supistumista ja laajenemista käyttäen infrapunavaloa (*Heart Rate Monitors* 2023). Käytän tässä tutkielmassa jatkossa termiä ”optinen” viitaten fotopletysmografiseen mittaukseen. Optisen mittauksen haittapuoli on siinä, että sykkeiden mittaukseen vaikuttaa erilaiset yksilölliset tekijät (Koerber ym. 2022). Näitä tekijöitä käsitellään tutkielmassa myöhemmin.

Nelsonin ja Allenin (2019) mukaan älykellojen valmistajat käyttävät omia patentoituja algoritmeja optisen sensorin signaalien muuntamiseksi sykearvoiksi. Tämä vaikuttaa myös siihen, miksi eri valmistajien kelloilla saattaa olla isoja eroja sykemittauksen tarkkuudessa. Optisen mittauksen hyöty on myös, että valon avulla voidaan arvioida veren happipitoisuus-

den määrää (*Heart Rate Monitors* 2023). Tämä onkin ollut viimevuosina suosittu tutkimuksen kohde.

EKG mittaamista käytetään yleensä rinnan ympärillä puettavissa sykevöissä, kun taas optista tekniikkaa ranteessa puettavissa laitteissa (*Heart Rate Monitors* 2023). Optisten sensoreiden tarkkuutta tutkittaessa vertailukohtana käytetään usein Polarin EKG-mittausta hyödyntäviä sykevöitä, sillä niiden on todettu olevan hyvin lähellä lääketieteessä käytettävien EKG-laitteen mittauksia. Varsinkin alhaisen, keskisuuren ja jopa suuren harjoitteluintensiiteitin aikana (Gilgen-Ammann, Schweizer ja Wyss 2019; Nelson ja Allen 2019.)

Wang ym. (2017) tutkivat miten Polar H7-sykevyö, sekä neljän erilaisen älykellon sykemittaukset vertautuivat lääketieteessä käytettävään EKG-laitteen sykemittaukseen. Osallistujien sykettä mitattiin elektrodiagrammin avulla siten, että heillä oli neljä johtoa kiinnitettynä elektrodeihin jokaisessa raajassa. Polar H7-sykevyön sekä kaksi satunnaista älykelloa molemmissa ranteissa. Osallistujat juoksivat matolla 2, 3, 4, 5 ja 6 mailia tunnissa nopeuksilla, jokaisella nopeudella kolmen minuutin ajan (Wang ym. 2017). Tutkimuksen mukaan laitteet korreloivat elektrodiagrammin mittauksiin kaavion 1 mukaisesti.

Älykello	Korrelaatio
Polar H7	0,99 (0,987-0,991)
Apple Watch	0,91 (0,884-0,929)
Mio Fuse	0,91 (0,882-0,929)
Fitbit Charge HR	0,84 (0,791-0,872)
Basis Peak	0,83 (0,779-0,865)

Taulukko 1. Älykellojen sykemittauksen tarkkuuden korrelaatio elektrodiagrammin sykemittaukseen (Wang ym. 2017)

Laitteet olivat levossa tarkempia kuin intensiivisen harjoittelun aikana (Wang ym. 2017). Tämän näkee kuviosta vertaamalla korrelaation ylärajaa sen alarajaan. Tähän saatta olla syynä

se, että harjoittelun aikana laite heiluu, ja optinen mittaus saattaa häiriintyä. Tutkielmassa käsitellään vielä myöhemmin tekijöitä, jotka voivat vaikuttaa mittausten tarkkuuteen. Polar H7 sykevyön mittasi siis sykettä tutkimuksen mukaan hyvin tarkasti, korreloiden 0,99 EKG-laitteen mittauksiin (Wang ym. 2017). Kuten taulukosta 1 huomataan, kahden kellon mittausten korrelaatio oli keskimäärin jopa alle 0,85, joten niiden sykemittaukset eivät olleet kovin tarkkoja.

Nelson ja Allen (2019) tutkivat miten tarkasti Apple Watch 3, sekä Fitbit Charge 2 mittasivat sykettä jokapäiväisessä elämässä. Tutkimuksessa osallistuja pitivät kelloa 24 tunnin ajan ranteessaan eläen normaalia arkea, ja mittauksia verrattiin EKG-vertailulaitteen tuloksiin (Nelson ja Allen 2019). Tulokset on esitetty taulukossa 2.

Aktiviteetti	Apple Watch 3	Fitbit Charge 2
24H keskiverto	5,86	5,96
Istuminen	7,21	6,93
Juoksu	3,01	9,88
Kävely	4,64	9,21
Nukkuminen	3,12	3,36

Taulukko 2. Apple Watch 3 ja Fitbit Charge 2 sykemittauksen ero EKG mittarin tuloksiin. Arvot kuvaavat suhteellisen virheen keskimääräistä arvoa (MAPE). Lähde: Nelson ja Allen (2019)

Tulokset eroavat Wang ym. (2017) tutkimuksen tuloksiin siten, että Apple Watchin tarkkuus parani juostessa, verrattuna siihen mitä se oli istuessa. Wangin ym. (2017) tutkimuksessa mittausten tarkkuus heikkeni intensiivisemmän harjoittelun aikana. Tämä voi johtua monesta eri syystä, sillä sykkeen mittauksen tarkkuuteen vaikuttaa yksilölliset tekijät (Koerber ym. 2022; Pasadyn ym. 2019; Hochstadt ym. 2020). Tutkimuksissa käytettiin myös erilaisia laitteita, joiden tarkkuus voi olla eri.

Pasady n ym. (2019) tutkivat neljän eri äly- sekä urheilukellon tarkkuutta juoksumatolla juosten kuudella eri nopeudella. Tässäkin tutkimuksessa tuloksia verrattiin Polar H7 sykevyyden mittaustuloksiin. Tutkimuksessa Apple Watch 3:n korrelaatio EKG-mittauksiin oli 0,96, Fitbit iconic, Garmin Vivosmart HR ja Tom Tom Spark 3 kellojen korrelaatio ECG tuloksiin oli kaikilla sama 0,89 (Pasady n ym. 2019). Apple Watch 3 oli siis huomattavasti tarkempi kello sykkeen mittaukseen, kuin muut tutkimuksessa käytetyt laitteet. Tutkimuksen mukaan laitteiden sykkeen mittaamisen tarkkuus laski harjoitteluin intensiteetin noustessa (Pasady n ym. 2019). Tämä tulos on yhtenäinen Wangin ym. (2017) tutkimuksen kanssa.

Sykkeennmittauksen voidaan siis sanoa olevan useimmiten tarkkaa. Tarkkuudessa on kuitenkin eroja kellojen välillä, eivätkä laitteet kykene täysin tarkkoihin sykkeen mittauksiin (Pasady n ym. 2019; Wang ym. 2017; Nelson ja Allen 2019.) Tarkkuutta arvioidessa on myös hyvä ottaa huomioon, että mittauksiin saattaa vaikuttaa yksilölliset tekijät, kuten ihonväri tai sukupuoli (Shcherbina ym. 2017; Hochstadt ym. 2020). Tämä johtuu älykelloissa käytettävän optisesta sensorista, sillä valon avulla tehty mittaust saattaa häiriintyä, jos valo ei esimerkiksi läpäisekään ihoa tarpeeksi hyvin (Koerber ym. 2022). Tutkimustulokset yksilöllisten tekijöiden vaikutuksista ovat kuitenkin ristiriitaisia (Koerber ym. 2022; Pasady n ym. 2019). Yksi syy tähän saattaa olla, että optinen mittausteknologia on kehittynyt niin, että esimerkiksi ihonvärin tummuus ei enää vaikuta mittaustuloksiin. Koerber ym. (2022) esittävät, että tähän voisi olla syynä vihreän värin käyttäminen optisissa sensoreissa punaisen värin sijaan. Vihreän valon 520 aallonpituuden on ainakin todettu läpäisevän ihon paremmin, kuin muiden aallonpituuksien (Fallow, Tarumi ja Tanaka 2013).

3.2 Uni

Riittävä unen saanti on tärkeä terveyden ja hyvinvoinnin ylläpitämiseksi. Watsonin (2017) mukaan unella on merkitystä niin fyysiseen kehitykseen, emootioiden hallintaan, kognitiiviseen suorituskyykyyn ja muutenkin elämänlaatuun. Watson (2017) mainitsee myös, että urheilijat arvioivat unensa laatua ja kestoa heikosti. Mahdollisuus unen mittaukseen on siis varsinkin urheilijoille hyödyllinen ominaisuus. Unen seurannan tarkkuutta tutkitaan vertaamalla tuloksia ”gold standard” unen mittaustmenetelmään, eli polygrafiamittaukseen (PSG)

(Zambotti ym. 2016; Rundo ja Downey 2019; Miller, Sargent ja Roach 2022).

Unen laatu on vaikea määritellä objektiivisesti. Unen laatua voidaan tarkastella subjektiiville tasolla, sillä unen laadulla tarkoitetaan subjektiivista kokemusta siitä, kuinka hyvin on henkilö on nukkunut. Unen laatua tarkastellaan siten, kokeeko henkilö olonsa väsyneeksi nukutun yön jälkeen vai ei. Levänneisyys on unen laadun ja määrän yhdistelmä, eikä toinen voi korvata toista. Unta arvioitaessa tulee siis ottaa molemmat asiat huomioon. Unen laadun mittaamiseen on useita erilaisia keinoja (Kohyama 2021.) Jotkin näistä menetelmistä käyttävät unen vaiheita mittaamaan unen laatua, esimerkiksi NREM-unen määrän on ainakin todettu olevan yhteydessä arvioituun unen laatuun (Krystal ja Edinger 2008.) Jotkut älykellot antavat arvion nukutun unen laadusta, mutta näiden arvioiden tarkkuudesta ei ole tehty tutkimusta.

Valmistajat eivät usein kerro, millaisilla algoritmeilla he arvioivat unen vaiheita tai unen laatua. Tiedetään kuitenkin, että älykellot käyttävät unen vaiheiden arviointiin ainakin kiihdytinsensoria, joka mittaa liikettä unen aikana. Liikkeen määrästä voidaan päätellä, onko henkilö kevyen unen vaiheessa (Grifantini 2014; Zambotti ym. 2016.) Tiedetään myös, että kehon autonomisista toiminnoista, kuten sykkeestä tai ihon lämpötilasta voidaan tehdä päätelmiä, missä unen vaiheessa henkilö on (Zambotti ym. 2016; Fonseca ym. 2015). Ei voida kuitenkaan varmuudella sanoa, käyttävätkö älykellot näitä mittauksia unen arviointiin. Seuraavaksi käyn läpi tutkimuksia älykellojen unenseurannan tarkkuudesta.

Zambotti ym. (2016) mukaan Fitbit -älykello yliarvioi unta keskimäärin 8 minuuttia pidemmäksi, aliarvioi hereilläoloaikaa nukahtamisen jälkeen 5,6 minuuttia ja yliarvioivat unen tehokkuutta 1,8%. Fitbit-kello tunnisti unen alkamisen ja unitilan hyvin tarkasti. Tutkimuksen mukaan kello ei kuitenkaan tunnistanut hereilläoloaikaa kovin tarkasti nukahtamisen jälkeen.

Liang ja Chapa Martell (2018) tutkivat Fitbit Charge 2 -kellon unen seurannan tarkkutta ja saivat samankaltaisia tuloksia kuin Zambotti ym. (2016). Liangin ja Chapa Martellin (2016) mukaan Fitbit Charge 2 -kello tunnisti unen keston ja unen tehokkuuden tarkasti. Hereillä-

olon tunnistaminen nukahtamisen jälkeen on kuitenkin epätarkkaa. Tämä tutkimuksen tulos on yhtenäinen Zambotti ym. (2016) tutkimuksen tuloksien kanssa. Tulokseksi saatiin myös, että unen vaiheiden, kuten kevyen, REM sekä syvän unen tunnistaminen oli kellolle haastavaa.

Chinoy ym. (2022) tutkimuksen mukaan Fitbit Inspire HR:n sekä Polar Vantage V Titanin unen seurannan tarkkuus oli samankaltainen edellisten tutkimusten tulosten kanssa. Kellot mittasivat unen keston tarkasti, mutta hereilläoloajan mittaus nukahtamisen jälkeen oli epätarkkaa (Chinoy ym. 2022). Kellot arvioivat myös unen vaiheita epätarkasti (Chinoy ym. 2022).

Unen määrän mittaamisen on todettu olevan suhteellisen tarkkaa lukuisissa tutkimuksissa (Zambotti ym. 2016; Liang ja Chapa Martell 2018; Chinoy ym. 2022; Miller, Sargent ja Roach 2022). Voidaan siis kokoavasti todeta, että kellot suoriutuvat pääasiassa hyvin unen määrän mittauksesta. Voidaan myös todeta, että kellot eivät kuitenkaan suoriudu tarkasti unen vaiheiden erottelusta (Chinoy ym. 2022; Zambotti ym. 2016; Liang ja Chapa Martell 2018).

3.3 Paikanninjärjestelmä

Niin ammatti- kuin amatööri juoksijat nojautuvat pitkälti urheilukellon GNSS:n antamaan lukemaan juostun matkan pituudesta. Urheilukellojen sijainnin tarkkuuden mittaamisesta on kuitenkin tehty vähän tieteellistä tutkimusta (Gilgen-Ammann, Schweizer ja Wyss 2020). GNSS-mittaus on käytössä useassa lajissa, ja olisi tärkeä saada tietoa siitä, ovatko mittaukset luotettavia. Seuraavaksi käydään läpi tutkimuksia paikanninjärjestelmän tarkkuudesta äly- ja urheilukelloissa.

Äly- ja urheilukellot käyttävät sijainnin määrittämiseen Global navigation satellite system (GNSS) vastaanottimia (Gilgen-Ammann, Schweizer ja Wyss 2020). Sijaintimittausten avulla kello laskee urheilusuorituksen pituuden ja nopeuden. GNSS:ään lukeutuu Euroopan Ga-

lileo järjestelmä, Yhdysvaltojen Global Navigation System (GPS), Venäjän Glosnass sekä kiinan BeiDou satelliittipaikannusjärjestelmät (Hofmann-Wellenhof, Lichtenegger ja Wasle 2007). Kelloissa on eroa siinä, mitä satelliittijärjestelmiä ne voivat käyttää (Ammann ym. 2016). Joissain tutkimuksissa puhutaan GPS-paikantimen tarkkuudesta, toisissa GLOS-NASS:ista, ja toisissa taas viitataan yleisesti GNSS:ään. Puhuttaessa GNSS:stä tai GPS:stä tarkoitetaan kuitenkin samaa älykellon paikannin sirua, ainoastaan satelliitit joihin yhdistetään muuttuvat.

GPS-mittaamisen tarkkuuteen vaikuttaa lukuisia ulkopuolisia seikkoja. Tarkkuuteen vaikuttaa esimerkiksi laitteen päivitysfrekvenssi. Mitä suurempi frekvenssi sen tarkempi sensori on (Cummins ym. 2013.) Tarkkuuteen vaikuttaa myös se, onko GPS-sirun lähellä korkeita rakennuksia ja onko taivas selkeä (Baranski ja Strumillo 2012).

Gilgen-Ammann, Schweizer ja Wyss (2020) tutkivat Applen, Coroksen, Polarin ja Suennon urheilukellojen GPS-mittauksen tarkkuutta urheilusuorituksissa, jotka olivat pituudeltaan 400-4000 metriä. Lajeihin kuuluivat juoksu, kävely sekä pyöräily. Keskimäärin urheilukellojen GPS-mittauksissa todettiin olevan 3-6% virhe. Tutkijoiden mukaan urheilukellojen matkan pituuden mittaukset olivat kohtuullisia tai hyviä (Gilgen-Ammann, Schweizer ja Wyss 2020.)

Johansson ym. (2020) tutkivat urheilukellojen GPS:n tarkkuutta ultramaratonjuoksussa. Tutkimuksessa juoksureitin pituus oli 56 kilometriä ja reitti sisälsi 800 nousumetriä. Tutkimuksessa oli mukana useita eri äly- ja urheilukelloja, sekä puhelimia. GPS-laitteiden tarkkuus oli tarkimmillaan $0,6\% \pm 0,3\%$ ja epätarkimmillaan $1,6\% \pm 0,9\%$. (Mediaani \pm IQR) (Kvartiiliväli, eng. Interquartile range). Tässä statistiikassa oli mukana myös puhelimet, mutta tulokset ovat silti huomattavasti tarkempia, kuin tutkimuksessa jonka suoritti Gilgen-Ammann, Schweizer ja Wyss (2020) suorittamassa tutkimuksessa. Puhelimet olivat tutkimuksen epätarkimpia laitteita (Johansson ym. 2020). Tulokset ovat erikoisia siksi, että Johansson ym. (2020) tutkimusasetelma on suoritettu vapaammissa olosuhteissa. Reitillä on myös ollut puita ja vuoria, jotka saattaavat häiritä GPS-signaalia. Johanssonin ym. (2020)

mukaan urheilukellot ovat pätevä tapa mitata juostua matkaa.

Voidaan todeta, että äly- ja urheilukellot suoriutuvat pääosin hyvin juoksu-, kävely- sekä pyöräilysuoritusten pituuden mittauksessa (Gilgen-Ammann, Schweizer ja Wyss 2020; Johansson ym. 2020). Kellot käyttävät nopeuden mittaamiseen paikanninjärjestelmän tuloksia, joten voidaan todeta kellojen suoriutuvan nopeuden mittauksestaikin hyvin. On kuitenkin huomioitava, että GPS-mittauksen tarkkuuteen saattaa vaikuttaa esimerkiksi ympäristössä olevat korkeat rakennukset tai taivaan pilvisyys (Baranski ja Strumillo 2012).

3.4 Korkeuden mittaus

Noustat metrit harjoittelun aikana on tärkeä osa urheilijan kokonaistyömäärää. Tämän vuoksi älykellojen korkeuden mittaamisen tarkkuutta on hyvä tutkia (Ammann ym. 2016.) Äly- ja urheilukellot käyttävät korkeuden mittaamiseen barometristä sensoria tai GPS-paikantimen antamaa informaatiota (Ammann ym. 2016). Barometrinen sensori arvioi korkeuden mittaamalla ilmanpainetta (Arokanam, Manivannan ja Harrison 2019). On myös mahdollista, että kello käyttää GPS:n ja barometrin kombinaatiota (Arokanam, Manivannan ja Harrison 2019). Tällä tavalla kello yrittää korjata barometrin mahdolliset ulkoisista seikoista johtuvat mittausvirheet (Arokanam, Manivannan ja Harrison 2019).

Barometriä on aiemmin käytetty sään ennustamiseen (Manivannan ym. 2020). Barometrinen sensori onkin siis herkkä säätilojen muutoksille, jonka vuoksi sääolosuhteet tulee ottaa huomioon laitteen tarkkuutta tutkittaessa (Manivannan ym. 2020; Ammann ym. 2016). Barometrin tarkkuuteen voi vaikuttaa myös ympäristö, korkeus ja sensorin tarkkuus (Manivannan ym. 2020.) Barometrien tarkkuudesta äly- tai urheilukelloissa on kuitenkin tehty suppeasti tutkimusta.

Ammann ym. (2016) tutkivat älykellojen korkeusmittauksen tarkkuutta erilaisilla juoksureiteillä. Reitti erosivat siinä, kuinka paljon niillä oli nousumetrejä. Ensimmäinen reitti oli tasainen, toinen sellainen, jossa nousua oli 90 metriä, ja kolmas reitti oli silmukka, jossa yhdellä

kerralla oli nousua 30 metriä. Tätä reittiä kutsuttiin ”mäkiseksi reitiksi”. Testaamiseen käytettiin Garmin ForerunnerXT, Polar RS800XC, sekä Suunto Ambit 2 -urheilukelloja. Näistä kelloista Garmin ja Suunto käyttivät korkeuden mittaamiseen barometrin sekä GPS yhdistelmää. Kellojen kalibroitiin ennen jokaista testiä vastaamaan kyseistä korkeutta merenpinnan yläpuolella, jossa testaajat olivat (Ammann ym. 2016.)

Ammannin ym. (2016) mukaan kellot aliarvioivat mäkisellä reitillä nousumetrejä 3,3%-9,8%. Tasaisella reitillä mittaukset olivat suhteellisen tarkkoja. Mittaukset erosivat todellisiin nousumetreihin tasaisella reitillä 0,0%-0,4%. Mittaukset olivat siis todella tarkkoja tasaisella reitillä. Tutkijat toteavat, että urheilukellot olivat melko tarkkoja nousumetrioiden mittaamisessa. Mittaukset eivät olleet kuitenkaan täysin tarkkoja, ja eri valmistajien kellojen välillä oli tarkkuus eroja (Ammann ym. 2016.)

Tutkimuksen tuloksia tarkasteltaessa on otettava huomioon, että tutkimuksessa käytettävät kellot oli julkaistu vuosina 2008, 2012 ja 2013. Tekniikka on voinut siis kehittyä tähän mennessä. Ammann ym. (2016) ottivat tutkimuksessa huomioon ulkopuoliset vaikutukset mahdollisimman hyvin, mutta toteavat, että mittauksiin saattoi vaikuttaa esimerkiksi sääolosuhteiden muutos, tai GPS-signaalin vaihteleva vahvuus.

3.5 Askeleet

Aktiviteetit kuten käveleminen muodostavat suurimman osan terveydelle ja hyvinvoinnille suunnitelluista fyysisestä aktiviteetista (Gaz ym. 2018). Tämän vuoksi aktiivisuutta mittaavien laitteiden askelmittarin tarkkuus on tärkeä määrittää. Gazin ym. (2018) mukaan tutkimuksessa käytettyjen älykellojen askelmittarin tarkkuus oli kohtuullisen hyvä. Askeleiden mittaamisen tarkkuus vaihteli kuitenkin riippuen laitteesta ja kävelytilanteesta. Askelmittari oli tarkempi juoksumatolla, kuin maalla kävellessä (Gaz ym. 2018.)

Ahanathapillai ym. (2015) saivat samanlaisia tuloksia askelmittauksen tarkkuudesta Android

älykelloissa, kuin Gaz ym. (2018). Ahanathapillain ym. (2015) mukaan Android käyttöjärjestelmää käyttävät älykellot askelmittaus oli tarkkaa. Normaalisti kävellessä älykellon keskimääräinen virhearvio oli 1,25%, kun älykellon päivitystaajuus oli 50 Hz. Tarkkuus kuitenkin kärsi kävellessä portaissa tai päivitystaajuuden laskiessa (Ahanathapillai ym. 2015.)

Voidaan siis sanoa, että älykellojen tarkkuus mitata askeleita yleisimmissä olosuhteissa on suhteellisen tarkka (Gaz ym. 2018; Ahanathapillai ym. 2015). On kuitenkin otettava huomioon, että mittareiden tarkkuudessa on eroja, jotka riippuvat olosuhteista ja älykellon mallista (Gaz ym. 2018). Tutkimusta äly -ja urheilukellojen askelmittauksesta ei kuitenkaan ole kovin paljoa. Lisää tutkimusta laitteiden askelmittauksen tarkkuudesta olisi hyvä tehdä. Varsinkin siksi, että teknologia kehittyy jatkuvasti eteenpäin ja laitteista tulee tarkempia.

3.6 Happisaturaation mittaus

Happisaturaation (SpO₂) mittaus on tullut älykelloihin vuoden 2021 aikana (Zhang ja Khatami 2022). Kyseessä on siis suhteellisen uusi ominaisuus. SpO₂ mittauksien tarkkuudesta älykelloissa ei vahvistettu (Zhang ja Khatami 2022). Tämä johtuu tehtyjen tutkimusten vähyydestä. SpO₂ mittaus toimii älykelloissa optisesti (Windisch ym. 2023), niin kuin sykkeen mittaus.

Pipek ym. (2021) mukaan Apple Watch Series 6 -älykellon SpO₂-mittauksen korrelaatio vertailulaitteeseen oli 0,81. Apple Watchin mittauksilla olivat taipumus olla hieman korkeampia, kuin vertailulaitteen arvoilla (Pipek ym. 2021). Älykellon SpO₂-mittauksen tarkkuus korrelaatio vertailulaitteen mittauksiin oli 0,81. Pipek ym. (2021) mukaan Apple Watch 6 älykello on luotettava väline SpO₂-mittaukseen kontrolloidussa ympäristössä. Mittauksia verrattiin kahteen kaupallisesti saatavilla olevaan pulssioksimetriin. Tutkimuksissa ei mainittu, mitä pulssioksimetriä vertailukohtana käytettiin, tai oliko vertailulaitteen tarkkuus varmistettu aiemmilla tutkimuksilla.

Pätz ym. (2023) saivat samankaltaisia tuloksia Apple Watchin pulssioksimetrin tarkkuudesta kuin Pipek ym. (2021). Mittauksista 85% oli oikein mitattaessa lapsilta ja 85% aikuisilta

mitattaessa. Pätzin ym. (2023) mukaan Apple Watch 6 mittaukset eivät ole lääketieteellisten standardien tasolla. Tarkkuus on kuitenkin hyvä antamaan arviota happisaturaation määräästä. Siihen ei kuitenkaan tule luottaa täysin.

Voidaan todeta, että SpO2-mittaus Apple Watch -älykellolla on hyvä. Laite ei kuitenkaan ole niin tarkka, että sitä voitaisiin käyttää lääketieteessä. Mittaukset ovat suuntaa antavia. Edellä olevat tutkimukset oltiin suoritettu kontrolloiduissa olosuhteissa, joten niiden vaikutusta ei ole vahvistettu tutkimuksilla. Koska SpO2 mittaus toimii optisesti niin kuin sykkeenkin mittaus, voisi päätellä, että SpO2 mittaukseen pätee samat rajoitteet kuin sykkeenkin mittaukseen.

4 Johtopäätökset

Tässä tutkielmassa tuotiin esiin tutkimustuloksia äly -ja urheilukellojen mittausten tarkkuudesta. Älykellojen mittaukset ovat usein riippuvaisia erilaisista ulkoisista seikoista. Näiden seikkojen merkittävyydestä on kuitenkin ristiriitaisia tutkimustuloksia. Esimerkiksi sykkeenmittauksen tarkkuuden riippuvuudesta sukupuolesta tai ihonvärin tummuudesta on saatu tutkimustuloksia osoittaen, että näillä tekijöillä ei ole merkitystä, sekä että niillä on merkitystä. GPS, sekä korkeuden mittaamiseen tarkkuuteen tiedetään myös vaikuttavan ulkoiset tekijät, kuten sääolosuhteet tai ympäristössä olevat korkeat rakennukset tai puut. Näiden vaikutuksesta ei kuitenkaan ole paljoa tutkimustietoa. On myös ilmeistä, että mittausten tarkkuuteen vaikuttaa kellon malli. Jotkin algoritmit ja sirut ovat tarkempia kuin toiset.

Älykellot suoriutuivat matkan ja korkeuden mittauksista hyvin. Tutkimuksissa saatiin hie-
man erilaisia arvoja tarkkuuksista, mutta kaikissa todettiin matkan mittaamisen kuitenkin
olevan tarkkaa. Tutkimusdataa korkeudenmittauksista oli kuitenkin vähän. 3,3%- 9,8% Syk-
keenmittauksen voidaan todeta olevan äly- ja urheilukelloissa suhteellisen tarkkaa. Tarkkuus
riippuu kuitenkin kellon mallista. Esimerkiksi Apple Watchin korrelaatio EKG-mittarin tu-
loksiin oli 0,91, kun taas Basis Peak kellon korrelaatio vertailulaitteen mittauksiin oli ainoas-
taan 0,83 (Wang ym. 2017.) Joissain tutkimuksissa Apple Watchin korrelaatio vertailulait-
teen tuloksiin oli vieläkin korkeampi. Mittaukset eivät ole siis täysin tarkkoja, mutta riittäviä
suurimmalle osalle käyttäjistä. Sykkeen mittauksen tarkkuuteen vaikuttaa myös aktiviteetti.
Sykkeen mittaus ovat tarkempia

Unen mittauksen tarkkuus riippuu siitä, mitä arvoja halutaan mitata. Älykellot mittasivat
Unen pituuden tarkkuutta hyvin, mutta unen vaiheiden mittaus oli epätarkkaa. Löydökset
todettiin olevan samankaltaisia useammalla eri kellomallilla. Unen vaiheiden erottelu ei kel-
loilta kuitenkaan onnistunut tarkasti. Unen vaiheet ovat yhteydessä unen laatuun (Krystal
ja Edinger 2008), ja unen laatu on erittäin tärkeä arvo arvioidessa unta sen pituuden ohella
(Kohyama 2021). Unen vaiheiden tarkempi arviointi olisi siis tärkeää unen arvioimisen laa-
dukkuuden kannalta.

SpO2 mittaukset ovat Apple Watch kellossa suuntaa antavia. Pätz ym. (2023) mukaan mittauksista noin 85% oli oikein. Pipek ym. (2021) mukaan mittausten korrelaatio vertailulaitteen tuloksiin oli 0,81. Tulokset voivat siis antaa arviota SpO2 arvosta, mutta niitä ne eivät ole täysin tarkkoja. Olosuhteiden vaikutuksesta mittauksiin ei ole varmuutta.

Tässä kandidaatintutkielmassa on vahvuutena se, että tutkielman laatimiseen on hyödynnetty useita eri tutkimuksia, ja yhdistelty näiden tuloksia toisiinsa. Tutkimukset mittausten tarkkuuksista ovat olleet myös suhteellisen tuoreita, sillä ne on julkaistu vuonna 2016 tai sen jälkeen. Heikkouksina tutkielmassa on, ettei tutkimuksia ei ole saatavilla uusimmista äly- tai urheilukelloista. Tekniikka kehittyy nopeasti, melkein joka vuosi tulee uusia malleja, joten uusista malleista ei ole ehditty tuottaa tutkimusta. Toinen heikkous on tutkielman teknologinen raja, joka on hyvin on laaja. Tutkielmaan otettiin mukaan monen eri valmistajan laitteita, ja niissä on keskenään suuriakin tarkkuus eroja. Rajauksen vuoksi tutkielma voitaisiin tehdä ainoastaan käyttäen tiettyä äly- tai urheilukello mallia. Tutkielma toimii hyvin tiivistelmänä siitä, missä vaiheessa modernien älykellojen tarkkuus on tällä hetkellä. Aihe on ajankohtainen ja tärkeä yleisen tietoisuuden lisäämiseksi siitä, että laitteet ovat erehtyväisiä, eikä niiden tarkkuus ole läheskään aina täydellinen.

Lähteet

- Ahanathapillai, Vijayalakshmi, James D. Amor, Zoe Goodwin ja Christopher J. James. 2015. “Preliminary study on activity monitoring using an android smart-watch” [kielellä en]. _Eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1049/htl.2014.0091>, *Healthcare Technology Letters* 2 (1): 34–39. ISSN: 2053-3713, viitattu 30. maaliskuuta 2023. <https://doi.org/10.1049/htl.2014.0091>.
- Ammann, Rahel, Wolfgang Taube, Fabian Kummer ja Thomas Wyss. 2016. “Accuracy of elevation recording using sport watches while walking and running on hilly and flat terrain” [kielellä en]. Company: Springer Distributor: Springer Institution: Springer Label: Springer Number: 4 Publisher: Springer London, *Sports Engineering* 19, numero 4 (joulukuu): 283–287. ISSN: 1460-2687, viitattu 17. tammikuuta 2023. <https://doi.org/10.1007/s12283-016-0207-9>. <https://link-springer-com.ezproxy.jyu.fi/article/10.1007/s12283-016-0207-9>.
- Aroganam, Gobinath, Nadarajah Manivannan ja David Harrison. 2019. “Review on wearable technology sensors used in consumer sport applications”. *Sensors* 19 (9): 1983.
- Baranski, Przemyslaw, ja Pawel Strumillo. 2012. “Enhancing Positioning Accuracy in Urban Terrain by Fusing Data from a GPS Receiver, Inertial Sensors, Stereo-Camera and Digital Maps for Pedestrian Navigation” [kielellä en]. Number: 6 Publisher: Molecular Diversity Preservation International, *Sensors* 12, numero 6 (kesäkuu): 6764–6801. ISSN: 1424-8220, viitattu 27. helmikuuta 2023. <https://doi.org/10.3390/s120606764>.
- Chinoy, Evan D, Joseph A Cuellar, Jason T Jameson ja Rachel R Markwald. 2022. “Performance of Four Commercial Wearable Sleep-Tracking Devices Tested Under Unrestricted Conditions at Home in Healthy Young Adults”. *Nature and Science of Sleep* 14 (maaliskuu): 493–516. ISSN: 1179-1608, viitattu 3. helmikuuta 2023. <https://doi.org/10.2147/NSS.S348795>.
- Heart Rate Monitors: How They Work and Accuracy* [kielellä en]. 2023. Read 28.2.2023. Viitattu 28. helmikuuta 2023. <https://my.clevelandclinic.org/health/diagnostics/23429-heart-rate-monitor>.

Cummins, Cloe, Rhonda Orr, Helen O'Connor ja Cameron West. 2013. "Global Positioning Systems (GPS) and Microtechnology Sensors in Team Sports: A Systematic Review" [kielellä en]. *Sports Medicine* 43, numero 10 (lokakuu): 1025–1042. ISSN: 1179-2035, viitattu 27. helmikuuta 2023. <https://doi.org/10.1007/s40279-013-0069-2>.

Fallow, Bennett A., Takashi Tarumi ja Hirofumi Tanaka. 2013. "Influence of skin type and wavelength on light wave reflectance" [kielellä eng]. *Journal of Clinical Monitoring and Computing* 27, numero 3 (kesäkuu): 313–317. ISSN: 1573-2614. <https://doi.org/10.1007/s10877-013-9436-7>.

Fonseca, Pedro, Xi Long, Mustafa Radha, Reinder Haakma, Ronald M. Aarts ja Jérôme Rolink. 2015. "Sleep stage classification with ECG and respiratory effort" [kielellä en]. Publisher: IOP Publishing, *Physiological Measurement* 36, numero 10 (elokuu): 2027. ISSN: 0967-3334, viitattu 6. huhtikuuta 2023. <https://doi.org/10.1088/0967-3334/36/10/2027>. <https://dx.doi.org/10.1088/0967-3334/36/10/2027>.

Garmin. 2023. Viitattu 10. helmikuuta 2023. <https://www.garmin.com/en-US/c/wearables-smartwatches/>.

Gaz, D.V., T.M. Rieck, N.W. Peterson, J.A. Ferguson, D.R. Schroeder, H.A. Dunfee, J.M. Henderzahn-Mason ja P.T. Hagen. 2018. "Determining the Validity and Accuracy of Multiple Activity-Tracking Devices in Controlled and Free-Walking Conditions" [kielellä English]. *American Journal of Health Promotion* 32 (8): 1671–1678. ISSN: 0890-1171. <https://doi.org/10.1177/0890117118763273>.

Gilgen-Ammann, Rahel, Theresa Schweizer ja Thomas Wyss. 2019. "RR interval signal quality of a heart rate monitor and an ECG Holter at rest and during exercise" [kielellä en]. *European Journal of Applied Physiology* 119, numero 7 (heinäkuu): 1525–1532. ISSN: 1439-6327, viitattu 9. maaliskuuta 2023. <https://doi.org/10.1007/s00421-019-04142-5>.

———. 2020. "Accuracy of Distance Recordings in Eight Positioning-Enabled Sport Watches: Instrument Validation Study". *JMIR mHealth and uHealth* 8, numero 6 (kesäkuu): e17118. ISSN: 2291-5222, viitattu 21. helmikuuta 2023. <https://doi.org/10.2196/17118>.

Godfrey, Alan, Victoria Hetherington, Hubert Shum, Paolo Bonato, NH Lovell ja Sam Stuart. 2018. "From A to Z: Wearable technology explained". *Maturitas* 113:40–47.

Grifantini, Kristina. 2014. “How’s My Sleep?: Personal sleep trackers are gaining in popularity, but their accuracy is still open to debate”. Conference Name: IEEE Pulse, *IEEE Pulse* 5, numero 5 (syyskuu): 14–18. ISSN: 2154-2317. <https://doi.org/10.1109/MPUL.2014.2339252>.

Hochstadt, Aviram, Ofer Havakuk, Ehud Chorin, Arie Lorin Schwartz, Ilan Merdler, Michal Laufer, Natan Lubman, Eihab Ghantous, Sami Viskin ja Raphael Rosso. 2020. “Continuous heart rhythm monitoring using mobile photoplethysmography in ambulatory patients” [kielillä en]. *Journal of Electrocardiology* 60 (toukokuu): 138–141. ISSN: 0022-0736, viitattu 30. maaliskuuta 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jelectrocard.2020.04.017>.

Hofmann-Wellenhof, Bernhard, Herbert Lichtenegger ja Elmar Wasle. 2007. *GNSS–global navigation satellite systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more*. Springer Science & Business Media.

Johansson, Rebecca E, Steffen T Adolph, Jeroen Swart ja Mike I Lambert. 2020. “Accuracy of GPS sport watches in measuring distance in an ultramarathon running race” [kielillä en]. Publisher: SAGE Publications, *International Journal of Sports Science & Coaching* 15, numero 2 (huhtikuu): 212–219. ISSN: 1747-9541, viitattu 21. helmikuuta 2023. <https://doi.org/10.1177/1747954119899880>.

Koerber, Daniel, Shawn Khan, Tahmina Shamsheri, Abirami Kirubarajan ja Sangeeta Mehta. 2022. “Accuracy of Heart Rate Measurement with Wrist-Worn Wearable Devices in Various Skin Tones: a Systematic Review” [kielillä en]. Company: Springer Distributor: Springer Institution: Springer Label: Springer Publisher: Springer International Publishing, *Journal of Racial and Ethnic Health Disparities* (marraskuu): 1–9. ISSN: 2196-8837, viitattu 12. tammikuuta 2023. <https://doi.org/10.1007/s40615-022-01446-9>.

Kohyama, Jun. 2021. “Which Is More Important for Health: Sleep Quantity or Sleep Quality?” [Kielillä en]. Number: 7 Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute, *Children* 8, numero 7 (heinäkuu): 542. ISSN: 2227-9067, viitattu 27. helmikuuta 2023. <https://doi.org/10.3390/children8070542>. <https://www.mdpi.com/2227-9067/8/7/542>.

Krystal, Andrew D., ja Jack D. Edinger. 2008. “Measuring sleep quality” [kielellä en]. *Sleep Medicine, The Art of Good Sleep Proceedings from the 5 International Sleep Disorders Forum: Novel Outcome Measures of Sleep, Sleep Loss and Insomnia*, 9 (syyskuu): S10–S17. ISSN: 1389-9457, viitattu 6. huhtikuuta 2023. [https://doi.org/10.1016/S1389-9457\(08\)70011-X](https://doi.org/10.1016/S1389-9457(08)70011-X). <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S138994570870011X>.

Liang, Zilu, ja Mario Alberto Chapa Martell. 2018. “Validity of consumer activity wristbands and wearable EEG for measuring overall sleep parameters and sleep structure in free-living conditions”. *Journal of Healthcare Informatics Research* 2 (1-2): 152–178.

Manivannan, Ajaykumar, Wei Chien Benny Chin, Alain Barrat ja Roland Bouffanais. 2020. “On the Challenges and Potential of Using Barometric Sensors to Track Human Activity”. *Sensors (Basel, Switzerland)* 20, numero 23 (marraskuu): 6786. ISSN: 1424-8220. <https://doi.org/10.3390/s20236786>.

Miller, Dean J., Charli Sargent ja Gregory D. Roach. 2022. “A Validation of Six Wearable Devices for Estimating Sleep, Heart Rate and Heart Rate Variability in Healthy Adults” [kielellä en]. Number: 16 Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute, *Sensors* 22, numero 16 (tammikuu): 6317. ISSN: 1424-8220, viitattu 25. maaliskuuta 2023. <https://doi.org/10.3390/s22166317>.

Nelson, Benjamin W., ja Nicholas B. Allen. 2019. “Accuracy of Consumer Wearable Heart Rate Measurement During an Ecologically Valid 24-Hour Period: Intraindividual Validation Study” [kielellä EN]. Company: JMIR mHealth and uHealth Distributor: JMIR mHealth and uHealth Institution: JMIR mHealth and uHealth Label: JMIR mHealth and uHealth Publisher: JMIR Publications Inc., Toronto, Canada, *JMIR mHealth and uHealth* 7, numero 3 (maaliskuu): e10828. Viitattu 10. maaliskuuta 2023. <https://doi.org/10.2196/10828>.

Pasady, Selen R., Mohamad Soudan, Marc Gillinov, Penny Houghtaling, Dermot Phelan, Nicole Gillinov, Barbara Bittel ja Milind Y. Desai. 2019. “Accuracy of commercially available heart rate monitors in athletes: a prospective study”. *Cardiovascular Diagnosis and Therapy* 9, numero 4 (elokuu): 379–385. ISSN: 2223-3652, viitattu 9. maaliskuuta 2023. <https://doi.org/10.21037/cdt.2019.06.05>.

Petrusevski, Celeste, Silvana Choo, Michael Wilson, Joy MacDermid ja Julie Richardson. 2021. “Interventions to address sedentary behaviour for older adults: a scoping review”. Publisher: Taylor & Francis _eprint: <https://doi.org/10.1080/09638288.2020.1725156>, *Disability and Rehabilitation* 43, numero 21 (lokakuu): 3090–3101. ISSN: 0963-8288, viitattu 20. helmikuuta 2023. <https://doi.org/10.1080/09638288.2020.1725156>.

Pipek, Leonardo Zumerkorn, Rafaela Farias Vidigal Nascimento, Milena Marques Pagliarelli Acencio ja Lisete Ribeiro Teixeira. 2021. “Comparison of SpO₂ and heart rate values on Apple Watch and conventional commercial oximeters devices in patients with lung disease” [kielellä en]. Number: 1 Publisher: Nature Publishing Group, *Scientific Reports* 11, numero 1 (syyskuu): 18901. ISSN: 2045-2322, viitattu 3. huhtikuuta 2023. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-98453-3>. <https://www.nature.com/articles/s41598-021-98453-3>.

Pätz, C., A. Michaelis, F. Markel, F. Löffelbein, I. Dähnert, R. A. Gebauer ja C. Paech. 2023. “Accuracy of the Apple Watch Oxygen Saturation Measurement in Adults and Children with Congenital Heart Disease” [kielellä en]. *Pediatric Cardiology* 44, numero 2 (helmikuu): 333–343. ISSN: 1432-1971, viitattu 3. huhtikuuta 2023. <https://doi.org/10.1007/s00246-022-02987-w>. <https://doi.org/10.1007/s00246-022-02987-w>.

Rawassizadeh, Reza, Blaine A. Price ja Marian Petre. 2014. “Wearables: has the age of smartwatches finally arrived?” *Communications of the ACM* 58, numero 1 (joulukuu): 45–47. ISSN: 0001-0782, viitattu 10. helmikuuta 2023. <https://doi.org/10.1145/2629633>.

Rundo, Jessica Vensel, ja Ralph Downey. 2019. “Chapter 25 - Polysomnography” [kielellä en]. Teoksessa *Handbook of Clinical Neurology*, toimittanut Kerry H. Levin ja Patrick Chauvel, 160:381–392. Clinical Neurophysiology: Basis and Technical Aspects. Elsevier, tammi-kuu. Viitattu 20. maaliskuuta 2023. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64032-1.00025-4>.

Shcherbina, Anna, C. Mikael Mattsson, Daryl Waggott, Heidi Salisbury, Jeffrey W. Christle, Trevor Hastie, Matthew T. Wheeler ja Euan A. Ashley. 2017. “Accuracy in Wrist-Worn, Sensor-Based Measurements of Heart Rate and Energy Expenditure in a Diverse Cohort” [kielellä en]. Number: 2 Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute, *Journal of Personalized Medicine* 7, numero 2 (kesäkuu): 3. ISSN: 2075-4426, viitattu 30. maaliskuuta 2023. <https://doi.org/10.3390/jpm7020003>.

Shin, Grace, Eun Jeong Cheon ja Mohammad Hossein Jarrahi. 2015. “Understanding quantified-selfers’ interplay between intrinsic and extrinsic motivation in the use of activity-tracking devices”. *IConference 2015 Proceedings*, <http://hdl.handle.net/2142/73740>.

Sports Watch. 2023. Viitattu 10. helmikuuta 2023. <https://encyclopedia2.thefreedictionary.com/sports+watch>.

Wang, Robert, Gordon Blackburn, Milind Desai, Dermot Phelan, Lauren Gillinov, Penny Houghtaling ja Marc Gillinov. 2017. “Accuracy of Wrist-Worn Heart Rate Monitors”. *JAMA Cardiology* 2, numero 1 (tammikuu): 104–106. ISSN: 2380-6583, viitattu 28. helmikuuta 2023. <https://doi.org/10.1001/jamacardio.2016.3340>.

Watch - Electric-powered and electronic watches | *Britannica* [kielellä en]. 2023, tammikuu. Viitattu 10. helmikuuta 2023. <https://www.britannica.com/technology/smartwatch>.

Watson, Andrew M. 2017. “Sleep and Athletic Performance” [kielellä en-US]. *Current Sports Medicine Reports* 16, numero 6 (joulukuu): 413. ISSN: 1537-8918, viitattu 27. helmikuuta 2023. <https://doi.org/10.1249/JSR.0000000000000418>.

Windisch, Paul, Christina Schröder, Robert Förster, Nikola Cihoric ja Daniel R Zwahlen. 2023. “Accuracy of the Apple Watch Oxygen Saturation Measurement in Adults: A Systematic Review” [kielellä en]. *Cureus* (helmikuu). ISSN: 2168-8184, viitattu 3. huhtikuuta 2023. <https://doi.org/10.7759/cureus.35355>. <https://www.cureus.com/articles/139145-accuracy-of-the-apple-watch-oxygen-saturation-measurement-in-adults-a-systematic-review>.

Yasar. 2022. “What is Wearable Technology? Definition, Uses and Examples” [kielellä en]. Viitattu 10. helmikuuta 2023. <https://www.techtarget.com/searchmobilecomputing/definition/wearable-technology>.

Zambotti, Massimiliano de, Fiona C. Baker, Adrian R. Willoughby, Job G. Godino, David Wing, Kevin Patrick ja Ian M. Colrain. 2016. “Measures of sleep and cardiac functioning during sleep using a multi-sensory commercially-available wristband in adolescents” [kielellä en]. *Physiology & Behavior* 158 (toukokuu): 143–149. ISSN: 0031-9384, viitattu 2. helmikuuta 2023. <https://doi.org/10.1016/j.physbeh.2016.03.006>.

Zhang, Zhongxing, ja Ramin Khatami. 2022. “Can we trust the oxygen saturation measured by consumer smartwatches?” [Kielellä English]. Publisher: Elsevier, *The Lancet Respiratory Medicine* 10, numero 5 (toukokuu): e47–e48. ISSN: 2213-2600, 2213-2619, viitattu 3. huhtikuuta 2023. [https://doi.org/10.1016/S2213-2600\(22\)00103-5](https://doi.org/10.1016/S2213-2600(22)00103-5). [https://www.thelancet.com/journals/lanres/article/PIIS2213-2600\(22\)00103-5/fulltext](https://www.thelancet.com/journals/lanres/article/PIIS2213-2600(22)00103-5/fulltext).