



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

**UNEN MITTAAMINEN JA TUTKIMINEN
PUETTAVILLA ÄLYLAITTEILLA**

Tapio Kärkimaa

KONETEKNIIKAN TUTKINTO-OHJELMA

Kandidaatintyö

Toukokuu 2023

TIIVISTELMÄ

Unen mittaaminen ja tutkiminen puettavilla älylaitteilla

Tapio Kärkimaa

Oulun yliopisto, Konetekniikan tutkinto-ohjelma

Kandidaatintyö 2023, 30 s.

Työn ohjaaja yliopistolla: Yrjö Louhisalmi

Tämän kandidaatintyön tarkoituksena oli perehtyä uneen ja sen mittaamiseen erityisesti puettavien älylaitteiden osalta. Työssä tarkasteltiin erilaisia uneen vaikuttavia tekijöitä ja unenmittausmenetelmiä ja selvitettiin, millä menetelmillä unta voi mitata puettavilla älylaitteilla kotioloissa.

Unta tutkitaan pääosin unihäiriöiden selvittämistä varten. Unta ja kehon palautumista olisi hyvä seurata myös ilman varsinaista epäilyä unihäiriöistä. Kliiniset mittaukset ovat kuitenkin usein hankalia toteuttaa eivätkä ne sovellu pitkäaikaiseen unenseurantaan. Tähän ongelmaan ratkaisun tarjoaa unta mittaavat älylaitteet.

Tämän työn aikana selvisi, että älylaitteilla tehtävää unenmittausta verrataan aina unipolygrafiaan, joka on paras unitutkimusmenetelmä. Lisäksi selvisi, että unen tutkiminen perustuu pitkälti univaiheiden erotteluun. Kaikki unenlaatua arvioivat mittalaitteet pyrkivät selvittämään univaiheiden keston mahdollisimman tarkasti. Unipolygrafiassa univaiheiden erottelu tehdään muun muassa aivoaaltoja, silmien liikkeitä ja lihasjännitystä mittaamalla. Työn aikana selvisi myös, että puettavat älylaitteet käyttävät pääosin sykevälivaihtelua mittaavaa fotopletysmografiaa unen mittauksessa. Lisäksi kävi ilmi, että on olemassa myös aivoaaltoja mittaavia älylaitteita. Kaikki puettavat älylaitteet hyödyntävät myös aktigrafiaa unenseurannassaan.

Asiasanat: unitutkimus, puettavat älylaitteet, sykevälivaihtelu, fotopletysmografia

ABSTRACT

Measuring and researching sleep with wearables

Tapio Kärkimaa

University of Oulu, Degree Programme of Mechanical Engineering

Bachelor's thesis 2023, 30 pp.

Supervisor at the university: Yrjö Louhisalmi

The purpose of this bachelor's thesis was to explore sleep and its measurement, particularly in the context of wearables. The work examined various factors affecting sleep and methods of sleep measurement and found out which methods can be used to measure sleep using wearables at home.

Sleep is primarily researched to find out sleep disorders. Monitoring sleep and body recovery would be beneficial even in the absence of suspected sleep disorders. However, clinical measurements are often challenging to implement and not suitable for long-term sleep monitoring. Wearables that measure sleep offer a solution to this problem.

During this thesis, it was found that sleep measurement using wearables is always compared to polysomnography, which is the best method for sleep research. In addition, it turned out that the research of sleep is largely based on the separation of sleep stages. All measurement devices assessing sleep quality strive to determine the duration of each sleep stage as accurately as possible. Polysomnography achieves this through measuring brain waves, eye movements, and muscle tension, among other parameters. It was also discovered that wearables primarily use photoplethysmography, which measures heart rate variability, to measure sleep. In addition, it turned out that there are also wearables capable of measuring brain waves. All wearables also utilize actigraphy in their sleep monitoring.

Keywords: sleep research, wearables, heart rate variability, photoplethysmography

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

SISÄLLYSLUETTELO

MERKINNÄT JA LYHENTEET

1 JOHDANTO	5
2 UNI.....	7
2.1 Unen vaiheet.....	7
2.2 Unihäiriöt	9
3 SYKE UNEN AIKANA	10
3.1 Sykevälivaihtelu.....	10
3.2 Sykkeen mittaaminen	11
4 UNEN MITTAAMISEN MENETELMÄT	12
4.1 Unipolygrafia	12
4.2 Aktigrafia	14
4.3 Lähi-infrapunaspektroskopia.....	14
4.4 Fotopletysmografia	15
5 PUETTAVAT ÄLYLAITTEET UNEN MITTAUKSESSA.....	17
5.1 Älykellot ja aktiivisuusrannekkeet.....	18
5.2 Älysormukset	18
5.3 Älypaidat.....	19
5.4 Pääpannat	20
6 YHTEENVETO	22

LÄHDELUETTELO

MERKINNÄT JA LYHENTEET

EEG	elektroenkefalografia
EKG	elektrokardiogrammi
EMG	elektromyografia
EOG	elektro-okulografia
HbO ₂	happeen sitoutunut hemoglobiini (oxyhemoglobin)
HRV	sykevälivaihtelu (heart rate variability)
NIRS	lähi-infrapunaspektroskopia (near-infrared spectroscopy)
NREM	non-REM
PPG	fotopletysmografia (photoplethysmography)
REM	rapid eye movement

1 JOHDANTO

Uni on ihmiselle välttämätöntä ja nukkumiseen käytetäänkin noin kolmasosa elämästä. Unen määrä ja laatu vaikuttavat suoraan ihmisen hyvinvointiin, ja unihäiriöt voivat aiheuttaa merkittäviä terveysongelmia. Tämän takia on hyvin tärkeää tuntea unen merkitys ja seurata omaa unta.

Virallinen unitutkimus on kohtuullisen työläs lääketieteellinen prosessi, johon yleensä hakeudutaan vasta silloin, kun on syytä epäillä uniongelmia. Kotikäyttöistä unen mittaamista varten on kehitetty erilaisia älylaitteita, joilla voi arvioida muun muassa nukkumisaikaa ja unenlaatua. Puettava elektroniikka, pidempikestoiset akut ja langattomat yhteydet mahdollistavat pitkäaikaisen ja vaivattoman unenseurannan kotona. (Mehrabadi ym. 2020)

Tässä työssä perehdytään unen peruskäsitteisiin, sydämen toiminnan merkitykseen unen mittauksessa ja yleisimpiin unenmittausmenetelmiin. Lisäksi tarkastellaan erilaisia puettavia älylaitteita ja niiden unenmittausmekanismeja. Puettavilla älylaitteilla tarkoitetaan tässä työssä ihmisen päälle puettavia langattomia laitteita, jotka keräävät jotain tietoa ihmisen elintoiminnoista ja luovat niistä tiedoista dataa ihmisen tarkasteltavaksi (Heikkilä 2020). Näiden laitteiden unenmittaus perustuu pääosin syketietojen analysointiin ja liikkeentunnistukseen (Mehrabadi ym. 2020). Puettavilla älylaitteilla tutkitaan unen lisäksi tyypillisesti myös muita ihmisen terveyteen liittyviä asioita, kuten aktiivisuutta ja stressiä (Pinge ym. 2022), mutta tässä työssä keskitytään unen tutkimiseen.

Työn käsittelemiä aiheita on rajattu ja tyypistetty huomattavasti aiheiden kokoon nähden. Esimerkiksi unen käsittely tässä työssä on vain pintaraapaisu valtavaan aihekokonaisuuteen. Työssä esitetyt tiedot unesta ovat terveiden aikuisten normeja, ja todellisuudessa esimerkiksi ikä ja sairaudet vaikuttavat muun muassa univaiheisiin ja unen määrään. Univaiheiden käsittelyssä ei myöskään pureuduta sen tarkemmin aivoaaltojen toimintaan.

Huomautuksena täytyy mainita vielä kolme asiaa. Tässä työssä käytetään virallisesta unitutkimuksesta vain termiä unipolygrafia, vaikka joissain lähteissä siihen viitataan termillä polysomnografia (polysomnography). Tämän lisäksi vanhemmissa lähteissä

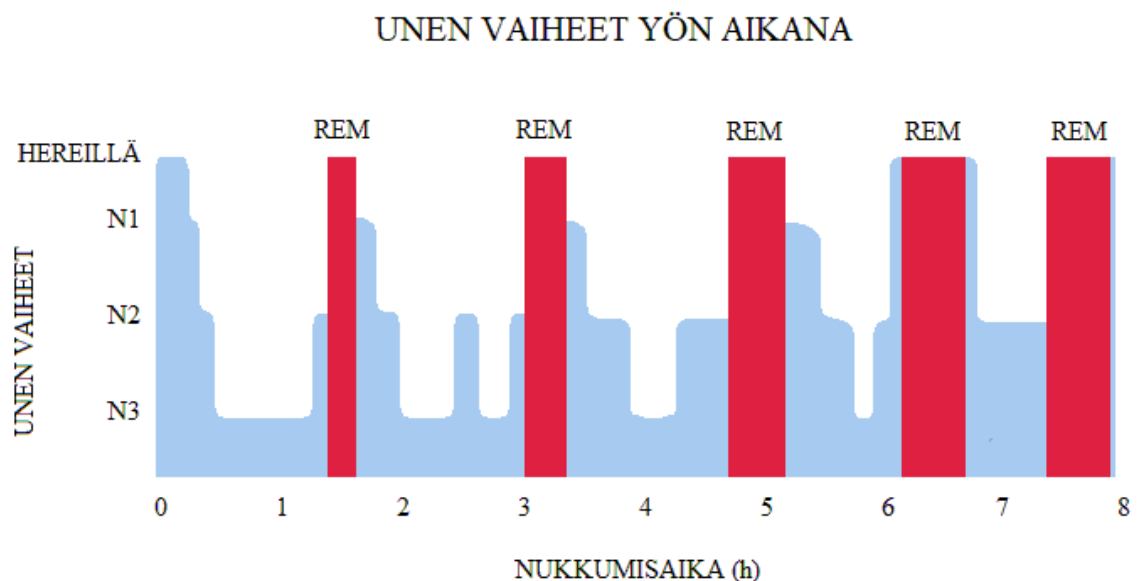
NREM-uni on jaettu neljään vaiheeseen, mutta nykyään vanhat vaiheet 3 ja 4 on yhdistetty yhdeksi syvän unen vaiheeksi, N3-vaiheeksi. Kolmantena täytyy mainita, että älylaitteiden unenmittauksessa käytetyistä algoritmeista ei yleensä ole tarkkaa tietoa julkisesti saatavilla, joten työssä esitetyt laitteiden toimintaperiaatteet ovat vain suuntaa antavia.

2 UNI

Uni on luonnollinen fysiologinen tila, jossa aivojen yhteys tietoiseen olemassaoloon katkeaa. Ihmisen unentarve vaihtelee yksilöittäin, mutta useimmat nukkuvat keskimäärin 7–8 tuntia vuorokaudessa. Unen aikana ihmisen keho lepää, mutta aivot prosessoivat päivän aikana kerättyä tietoa ja valmistautuvat seuraavaan päivään. (Partinen 2019) Samalla kun aivot työskentelevät läpi yön, ne myös huoltavat itse itseään. Ihmisen nukkuessa aivot muun muassa puhdistavat itseään erilaisista kuona-aineista, tallentavat tärkeiksi koettuja asioita ja poistavat tarpeettomia tietoja. (Stenberg 2018)

2.1 Unen vaiheet

Ihmisen uni jaetaan silmien liikkeiden perusteella kahteen vaiheeseen, perusuneen (NREM-uni) ja vilkeuneen (REM-uni). Perusuni jaetaan edelleen kolmeen erilaiseen vaiheeseen, N1-N3, aivojen ja kehon toiminnan perusteella. Yön aikana on myös normaalia heräillä hetkellisesti, usein täysin tiedostamattomasti, ja tämä valvetila lasketaan yleensä yhdeksi unen vaiheeksi. NREM- ja REM-uni esiintyvät tietyissä unisykleissä, joissa univaiheet tyypillisesti etenevät seuraavasti: N1, N2, N3, N2, REM. Yksi unisykli kestää noin 90 minuuttia, ja ihmisen yöuni koostuu normaalisti 4–6 syklistä. (Himanen & Hasan 2006; Patel ym. 2022) Kuvassa 1 havainnollistetaan, kuinka unen vaiheet voisivat edetä yön aikana.



Kuva 1. Unen vaiheiden eteneminen yön aikana (mukaillen Pzizz 2020).

Unisyklin aloittaa N1-vaihe, joka tulkitaan usein valveen ja varsinaisen unen välivaiheeksi, torkkeeksi. Tämä vaihe kestää useimmiten 1–5 minuuttia, jonka aikana ihmisen on vielä helppo havahtua ympäristön ääniin. N1-unen osuus kokonaisuniajasta on yhteensä noin 5 prosenttia. (Himanen & Hasan 2006; Patel ym. 2022)

Torkkeesta uni etenee N2-vaiheeseen, kevyeen uneen. Sen aikana uni syvenee, kehon lämpötila ja syke laskevat ja kehon toiminnot hidastuvat. Kevyen unen vaihe kestää ensimmäisessä syklissä noin 10–25 minuuttia ja pitenee jokaisessa syklissä, kuten kuvassa 1 esitetään. Ihminen viettää N2-vaiheessa yhteensä noin 45 prosenttia yöstä. (Patel ym. 2022; Suni & DeBanto 2022)

Kevyestä unesta uni syvenee N3-vaiheeseen, syvään uneen, joka tunnetaan myös hidasaaltounena. N3-uni on unen syvin vaihe, ja sen aikana keho rentoutuu entisestään ja aivojen toiminta hidastuu huomattavasti. Tästä vaiheesta ihmisen on vaikeinta herätä, ja herätessä syvän unen aikana henkilölle voi aiheutua ohimenevää kognitiivisten kykyjen alenemaa. (Patel ym. 2022) Syvä uni on erityisesti fyysisen levon kannalta tärkeää. Tämän vaiheen aikana aivot keräävät energiavarastojaan ja keho muun muassa rakentaa luita ja lihaksia ja vahvistaa immuunijärjestelmää. Ihmisen unesta noin 25 prosenttia on syvää unta, josta suurin osa esiintyy yön ensimmäisten syklien aikana kuvan 1 mukaisesti. (Partinen 2019; Pzizz 2020; Suni & DeBanto 2022)

Syvän unen jälkeen uni etenee N2-vaiheen kautta REM-uneen. REM-unen aikana ihmisen aivotoiminta vilkastuu ja tällöin nähdään suurin osa yön unista. Aivojen aktivoituessa ihmisen lihaksisto kuitenkin lamaanuu täysin lukuun ottamatta silmiä ja hengitysilhaksia. Samalla hengitystiheys ja syke kiihtyvät ja muuttuvat epätasaisiksi. (Pzizz 2020; Suni & DeBanto 2022) Tämän vaiheen aikana ihmiset usein heräävät spontaanisti, mutta aistiärsykkeillä herättäminen on vielä vaikeaa (Patel ym. 2022). REM-unen katsotaan olevan tärkeää etenkin ihmisen muistin ja oppimisen kannalta. Ensimmäiset REM-vaiheet ovat lyhyitä, ja yön edetessä REM-unen osuus kasvaa, kuten kuvasta 1 huomataan. Ihminen viettää REM-unessa lopulta noin 25 prosenttia yöstään. (Pzizz 2020; Suni & DeBanto 2022)

2.2 Unihäiriöt

Unta tutkitaan pääosin erilaisten unihäiriöiden diagnosoimiseksi. Yksittäiset huonosti nukutut yöt eivät vielä kerro unihäiriöstä, mutta ongelmien pitkittyessä on syytä hakeutua unitutkimuksiin. Yleisimpiä unihäiriöitä ovat unettomuus ja uniapnea eli unen aikaiset hengityskatkokset. Muita unihäiriöitä ovat esimerkiksi narkolepsia eli liikaunisuus, levottomat jalat -oireyhtymä ja erilaiset parasomniat kuten unihalvaus ja hampaiden narskutus. (Rauhala ym. 2006; Tuomilehto 2020)

Uniongelmat voivat olla hyvin ikäviä, sillä huonosti nukutut yöt vaikuttavat merkittävästi päivän vireystilaan ja mielialaan. Heikkolaatuinen uni voi aiheuttaa myös vastustuskyvyn heikkenemistä ja painonhallinnan ongelmia. Unihäiriöiden diagnosoiminen on ensimmäinen askel oman terveyden kehittämiseksi ja uniongelmien ratkaisemiseksi. Useimmat unihäiriöt ovat täysin hoidettavissa, ja monesti unenlaatua voi parantaa itsenäisesti muuttamalla elintapojaan. (Tuomilehto 2020)

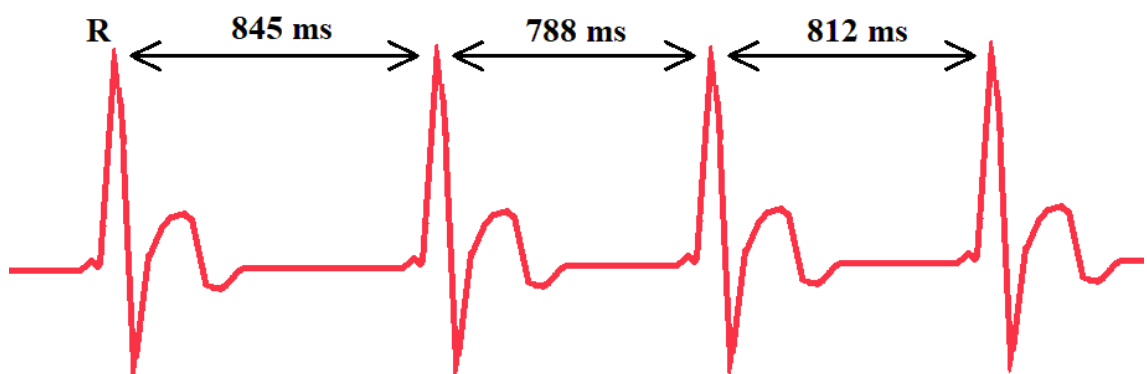
Unihäiriöt tulee selvittää aina lääkärin kanssa kliinisessä unitutkimuksessa. Unta voi myös jossain määrin tutkia kotiooloissa omilla älylaitteillaan. Niiden käytössä tulee kuitenkin muistaa, ettei älylaitteiden tuottama unidata ole niin tarkkaa, että niiden avulla voisi itse muodostaa diagnoosia unihäiriöstä. (Oikarinen 2022)

3 SYKE UNEN AIKANA

Sykkeellä tarkoitetaan sydämen lyöntien lukumäärää minuutissa. Terveen ihmisen tyypillinen leposyke on 50–90 lyöntiä minuutissa. (Strong 2015) Sydämen syketaajuus vaihtelee yksilöittäin muun muassa fyysisen kunnon, iän, sukupuolen ja geenien mukaan. Nukkuessa ihmisen syke voi laskea päivän leposykkeestä 10–20 lyönnillä minuutissa. (Paavonen 2022) Unen aikainen matala leposyke kertoo yleensä kehon hyvästä palautumisesta. Optimaalisen yön sykekäyrän trendiviiva muistuttaa riippumattoa, jossa matalin leposyke havaitaan yön keskivaiheessa. Unen alussa elimistön toiminta hidastuu ja syke laskee, kun taas aamua kohden syke alkaa hiljalleen nousemaan. Yön aikana voi myös esiintyä hetkellisiä sykepiikkejä esimerkiksi REM-unen aikana, mutta ne eivät vaikuta leposykkeen keskimääräiseen etenemiseen. (Rahman ym. 2022; Oura Team 2023) Yön leposykkeestä ei voi kuitenkaan tehdä suoria johtopäätöksiä henkilön terveydentilasta (Paavonen 2022).

3.1 Sykevälivaihtelu

Sydän ei lyö täysin tasaisesti, vaan terveiden sydämen toiminta on jatkuvasti muuttuvaa. Sykkeen vaihtelevuus auttaa sydäntä ja verenkiertoelimistöä mukautumaan nopeasti yllättäviinkin fyysisiin ja psyykkisiin haasteisiin. Tämä peräkkäisten sydämen lyöntien välisen ajan vaihtelu, sykevälivaihtelu (HRV), on yksi merkittävä sydämen toiminnan mittari. (Shaffer & Ginsberg 2017) Sykevälillä tarkoitetaan sykkeiden välistä aikaa millisekunneina, ja se mitataan sydänekäyrän R-piikkien välistä kuten kuvassa 2. Sykevälivaihtelu on puolestaan kahden peräkkäisen sykevälin erotus. (Firstbeat 2015) Esimerkiksi kuvassa 2 ensimmäisen ja toisen sykevälin välinen ero on 57 ms.



Kuva 2. Sykevälivaihtelu on sykkeiden välisen ajan vaihtelua (mukaiillen Firstbeat 2015).

Sykevälivaihtelu kertoo ihmisen autonomisen hermoston toiminnasta. Autonominen hermosto on vastuussa suurimmasta osasta kehon tahdosta riippumattomista toiminnoista, kuten sydämen sykkeestä, hikoilusta ja ruuansulatuksesta. Yleisesti ottaen korkea HRV kertoo ihmisen verenkiertoelimistön olevan hyvässä kunnossa, jolloin keho on helppo palautua rasituksesta. (Shaffer & Ginsberg 2017; Hatson 2020) Autonomisen hermoston toimintaa analysoimalla voidaan myös tutkia henkilön unenlaatua (Wakuda ym. 2004).

3.2 Sykkeen mittaaminen

Sykkeeseen voi helpoimmillaan mitata tunnustelemalla pulssia omasta ranteesta ja laskemalla sykäysten määrän minuutissa (Aivoliitto 2020). Virallinen sydämen toimintojen mittaus tehdään kuitenkin EKG-menetelmällä, jossa mitataan sydämen sähköisiä signaaleja. Kliinisessä EKG:ssä ihmisen rintaan ja raajoihin kiinnitetään yhteensä 12 elektrodiä, jotka rekisteröivät sydämen toimintoja eri puolilta. Elektrodit mittaavat iholta sydämen pienet sähkövirran vaihtelut, joiden mukaan laite muodostaa sydänekäyrän. Näiden mittausten perusteella saadaan tarkat tiedot muun muassa sydämen sykkeestä, sykevälivaihtelusta ja mahdollisista sydämen toimintahäiriöistä. (Cao ym. 2022; Eerola 2022)

EKG on tärkeä osa kliinistä unitutkimusta, mutta pitkäkestoiseen sykkeeseen ja unen seurantaan se on huono menetelmä monimutkaisten elektrodiliitännöiden takia. Sykettä voidaan kliinisen EKG-mittauksen lisäksi mitata erilaisilla sykemittareilla. Rintaan kiinnitettävä sykevyömittari mittaa sydämen sähköistä toimintaa samalla tavalla kuin EKG:ssä mutta suppeammin. Sykevyötä ei kuitenkaan tyypillisesti käytetä unen mittauksessa. Ranteessa ja sormessa pidettävät sykemittarit toimivat optisella sykkeen mittauksella, PPG-tekniikalla. Tämä tekniikka mahdollistaa pitkäaikaisen sykkeen seurannan ja kätevemmän unen mittaamisen. (Cao ym. 2022; Pinge ym. 2022) PPG:n toimintaan ja sen merkitykseen unen mittauksessa palataan luvussa 4.4.

4 UNEN MITTAAMISEN MENETELMÄT

Virallinen unen mittaaminen tapahtuu unipolygrafiitutkimuksissa (Oikarinen 2022). Unipolygrafiassa mitataan muun muassa aivojen ja silmien käyttäytymistä unen aikana, mikä vaatii erikoissairaanhoidon taseisia työkaluja. Unitutkimus voidaan tehdä myös suppeampana yöpolygrafiana, joka voidaan toteuttaa perusterveydenhuollossa ilman vaativimpia tutkimusmenetelmiä. Se keskittyykin enemmän unen aikaisten hengitysongelmien ja nukkumisasennon tutkimiseen. (Erkinjuntti ym. 2006; Virtanen 2021)

Toinen tärkeä menetelmä unen tutkimiseen on aktigrafia. Se perustuu ihmisen liikeaktiiviteettiin päivän ja yön aikana. Laboratoriotason aktigrafialla saadaan hyvinkin tarkkoja tuloksia unesta, vaikkei siinä aivoaaltoja mitatakaan. Aktigrafiaa käytetään erityisesti vuorokausirytmien tutkimiseen. Unitutkimusten ohessa voidaan tehdä myös erilaisia uneen liittyviä testejä, kuten univiivetestistä ja hereilläpysymistestistä. (Virtanen 2021)

Näiden kliinisesti hyväksytyjen unitutkimusmenetelmien lisäksi unta voidaan mitata esimerkiksi aivoverenkierron analysointiin pohjautuvalla NIRS-tekniikalla (Ren ym. 2020) ja sykevälivaihtelun mittaamiseen perustuvalla PPG-tekniikalla (Cao ym. 2022).

4.1 Unipolygrafia

Unipolygrafiaa pidetään parhaimpana unitutkimuksen menetelmänä, johon kaikkia muita tutkimusmenetelmiä verrataan (Virtanen 2021). Laajassa unipolygrafiassa tarkastellaan aivosähkötoimintaa (EEG), silmien liikkeitä (EOG) ja leuan lihasten jännitystä (EMG). Nämä ovat merkittävimmät parametrit unen vaiheiden selvittämiseksi. Muita tärkeitä mitattavia tekijöitä ovat muun muassa hengitys, sydämen syke, veren happisaturaatio ja kehon yöllinen liikehdintä, joita mitataan myös suppeassa yöpolygrafiassa. (Himanen & Hasan 2006)

Unipolygrafiassa EEG-mittaus tehdään pään pinnalle laitettavilla elektrodeilla. Elektrodit kiinnitetään sähkönsäilyvyyttä parantavalla kiinnityspastalla ihoon kiinni. (Himanen & Hasan 2006) EEG perustuu aivojen hermosoluissa tapahtuviin jännitemuutoksiin, jotka voidaan havaita päähän kiinnitettyjen elektrodien välisenä jännite-erona (Huttunen ym.

2006). Näiden jännite-erojen muodostamien aivoaaltojen mittaaminen ja tulkitseminen on tärkein yksittäinen unen mittaamisen menetelmä. Aivoaaltojen perusteella voi päätellä tarkasti, missä unen vaiheessa ihminen on ja kuinka vaiheet etenevät yön aikana. Esimerkiksi syvän unen aikana esiintyy hitaita aivoaaltoja, kun taas REM-unessa aivoaallot ovat paljon nopeampia. Muita parametrejä on silti syytä tarkastella paremman kokonaiskuvan saamiseksi ja mahdollisten uniongelmienvaikeuksien paikantamiseksi. (Himanen & Hasan 2006; Geyer & Carnay 2018)

Silmänliikkeitä mitataan EOG-menetelmällä, jossa silmäkulmiin asetetuilla pinta-elektrodeilla mitataan silmänliikkeistä aiheutuvia potentiaalimuutoksia. EOG:llä voidaan tutkia sekä hitaita, että nopeita nykäysmäisiä silmän liikkeitä. (Nygrén ym. 2004) Esimerkiksi REM-unen aikana EOG:llä havaitaan nopeita silmänliikkeitä, jotka esiintyvät usein ryppäinä (Himanen & Hasan 2006).

Leuan lihasjännitystä mitataan leuanalus-EMG:llä. Siinä leuan alueelle asetetaan kolme elektrodi, joiden välistä jännite-eroa mittaamalla saadaan tietoa leuan lihasten aktiivisuudesta. Esimerkiksi REM-unessa leuan lihasjännitys tyypillisesti vähenee. (Geyer & Carnay 2018) Lisäksi EMG:llä voidaan tutkia raajojen lihasten yönaikaista toimintaa, mutta sitä voidaan mitata myös kiihtyvyyssantureilla (Himanen & Hasan 2006).

Unen aikaista hengitystä voi mitata erilaisilla antureilla, kuten henkilöön kiinnitettävällä venymäliuska-anturilla tai patjan alle laitettavalla levymäisellä liikeanturilla (Erkinjuntti ym. 2006). Venymäanturin toiminta perustuu materiaalin sähköisten ominaisuuksien muuttumiseen anturin venyessä (Nachazel 2020). Esimerkiksi rintaan kiinnitetyn venymäanturin resistanssi vaihtelee hengityksen laajentaessa rintakehää. Patjan alle laitettavassa levymäisessä anturissa hengitysliikkeet aiheuttavat siinä kapasitanssin muutoksia. Tällä menetelmällä voidaan mitata myös muuta yönaikaista liikehdintää. Hengitysliikkeiden lisäksi hengityksen paineprofilia voidaan mitata esimerkiksi happiviikkiin kytketyllä herkällä paineanturilla. Paineprofilista voidaan erottaa myös mahdollinen kuorsaus, mutta kuorsausta voidaan mitata vielä erikseen kaulalle kiinnitetyllä värinäanturilla tai mikrofoniolla. (Erkinjuntti ym. 2006)

Sydämen sykettä mitataan EKG:llä, josta nähdään muun muassa tutkittavan henkilön pulssi ja mahdolliset unenaikaiset rytmihäiriöt. Veren happisaturaatio mitataan tyypillisesti sormesta pulssioksimetrillä, jonka toiminta perustuu optiseen mittaamiseen. (Himanen & Hasan 2006; Schäfer & Vagedes 2013)

4.2 Aktigrafia

Aktigrafia on ihmisen liikkeiden mittausta vuorokauden eri aikoina. Se toteutetaan rannekellon tapaisella mittarilla, jota pidetään tyypillisesti ei-dominantin käden ranteessa. Laitteen liikkeiden perusteella voidaan päätellä, milloin henkilö on ollut hereillä ja milloin unessa. (Partonen & Lauerma 2006) Uni- ja valvetilaa arvioidaan sillä oletuksella, että liike tarkoittaa hereillä oloa ja liikkumattomuus unta (de Zambotti ym. 2019). Liikkeiden tunnistus perustuu kolmiakselisen kiihtyvyyssanturin käyttöön. Mittaukseen liitetään tyypillisesti myös valoisuusanturi, jolla tarkastellaan ympäristön valon määrää. (Partonen & Lauerma 2006)

Virallinen aktigrafiatutkimus kestää suhteellisen pitkään, tyypillisesti 1–2 viikkoa (Virtanen 2021). Tämän aikana tutkittava henkilö elää normaalia elämää pitäen laitetta ranteessaan kellon ympäri. Nykyiset aktigrafialaitteet ovat vedenpitäviä, joten mittausta ei tarvitse keskeyttää edes peseytymisen ajaksi. (de Zambotti ym. 2019)

Aktigrafia on omat etunsa ja heikkoutensa unipolygrafiaan verrattuna. Se on huomattavasti halvempi tutkimusmenetelmä, eikä se vaadi jatkuvaa asiantuntijan läsnäoloa. (de Zambotti ym. 2019) Aktigrafia rajoittuu kuitenkin vain vuorokausirytmien tutkimiseen, eikä sen avulla saada tietoa varsinaisesti unen laadusta, ainoastaan määrästä ja ajankohdasta. Lisäksi laite tulkitsee helposti päiväsaikaisen paikallaan olon uneksi. (Virtanen 2021)

Monet unta mittaavat puettavat älylaitteet hyödyntävät aktigrafiaa. Kuluttajalaitteet mittaavat liikkeen lisäksi tyypillisesti muitakin kehon parametreja, kuten sykettä ja ihon lämpötilaa. Näiden laitteiden tekemiä unianalyyskejä ei kuitenkaan pidetä riittävinä kliiniseen unitutkimukseen. (Virtanen 2021) Puettavien älylaitteiden unenmittausmenetelmistä kerrotaan lisää luvussa 5.

4.3 Lähi-infrapunaspektroskopia

Lähi-infrapunaspektroskopiolla (NIRS) voidaan mitata kudoksen happipitoisen hemoglobiinin (HbO₂) osuutta, ja sitä käytetään useimmiten aivoverenkierron tutkimiseen. Lähi-infrapunavalo kulkeutuu ihmisen kudosten läpi usean senttimetrin syvyyteen ja se kykenee läpäisemään myös kallon luut. NIRS-tekniikka perustuu

happimolekyylisiin sitoutuneen hemoglobiinin optisiin ominaisuuksiin. Hapteen hemoglobiini absorboi lähi-infrapunavaloa eri tavalla kuin hapeton hemoglobiini, jolloin takaisin heijastuneesta valosta voidaan päätellä veren HbO₂:n osuus. (Kallioinen 2012)

Aivokudostutkimuksessa otsalle kiinnitetään tarralla kaksi NIRS-laitteen anturia, jotta saadaan mitattua molempien aivopuoliskojen happeutumista. Anturit sisältävät usein kaksi valonlähdettä ja kaksi valosensoria, mikä parantaa mittaustarkkuutta. NIRS-tutkimus on helppo suorittaa muutamalla ihoon kiinnitettävällä anturilla, eikä tutkittava henkilö altistu vaaralliselle säteilylle. NIRS-laitteet ovatkin kätevyytensä ansiosta nostaneet suosiotaan erilaisissa aivotutkimuksissa. (Kallioinen 2012)

Aivojen hemodynaamiset eli veren virtaukseen liittyvät (Terveyskirjasto 2016) muutokset liittyvät ihmisen autonomisen hermoston toimintaan. Hemodynaamisten muutosten avulla voidaan selvittää aivojen toiminnan tasoa, sillä verenkierron määrä aivoissa korreloi aivojen aktiivisuuden kanssa. Tällöin HbO₂ osuuden vaihtelun avulla voi NIRS-menetelmää käyttäen erotella kevyen unen, syvän unen ja REM-unen toisistaan. Aivojen hemodynamiikan muutosten avulla voidaan myös tutkia unen aikaisia häiriöitä. (Ren ym. 2020) Kuluttajille suunnattuja NIRS-tekniikkaan pohjautuvia unenmittauslaitteita ei kuitenkaan ole vielä markkinoilla.

4.4 Fotopletysmografia

Fotopletysmografia (PPG) on sykkeen ja sykevaihtelun mittaamenetelmä, joka perustuu valon siroamiseen verenkierrosta. Sydämen sykkyvät muuttavat veren tilavuutta valtimoissa, mikä vaikuttaa valon absorboitumiseen. Tällöin valosensoriin heijastuneen valon määrä vaihtelee sykästen mukaan, minkä avulla sykevälä voidaan selvittää. (Pinge ym. 2022)

PPG:tä voidaan käyttää kahdella erilaisella mittaamenetelmällä. Valonlähde ja valosensori voidaan asentaa mittalaitteeseen vierekkäin, jolloin mitataan kudoksesta takaisin heijastuvaa valoa. Ne voidaan sijoittaa myös vastakkaisille puolille mitattavaa kohdetta, jolloin mitataan kudoksen läpäisyyttä valoa. Läpäisyyden perustuvaa menetelmää käytetään esimerkiksi sormenpäätä tehtävässä mittauksessa. (Schäfer & Vagedes 2013) Heijastumiseen perustuvaa mittausta käytetään esimerkiksi ranteessa pidettävissä älylaitteissa (Lee ym. 2016). PPG:tä hyödyntävät laitteet ovat usein pienikokoisia ja

helppokäyttöisiä, mikä mahdollistaa vaivattoman sykkeen ja unen seurannan (Cao ym. 2022).

Fotopletysmografiaan pohjautuva unen mittaaminen perustuu HRV:n analysointiin. PPG-mittaukset antavat sykeväli vaihtelusta hyvinkin tarkkoja tuloksia, jotka eivät eroa merkittäväällä tavalla EKG-mittausten tuloksista. (de Zambotti ym. 2019) Sykeväli vaihtelun perusteella saadaan selville autonomisen hermoston yön aikainen toiminta, ja näin voidaan erotella NREM- ja REM-uni toisistaan. NREM-vaiheiden erottelu ei ole yhtä selkeää, mutta sykevaihtelun analyysin tulokset korreloivat riittäväällä tasolla, jotta voidaan tehdä ero kevyen ja syvän unen välille. HRV:n avulla voidaan siis selvittää unen vaiheet, unisyklit ja unen kokonaispituus sekä arvioida unenlaatua. (Wakuda ym. 2004) Fotopletysmografialla voidaan myös kohtuullisen tarkasti mitata ihmisen hengitystiheyttä unen aikana, sillä sisään- ja uloshengitys vaikuttavat eri tavoin sykkeeseen ja sitä kautta PPG-signaaliin (Iqbal ym. 2022).

Monet unta mittaavat puettavat älylaitteet perustuvat fotopletysmografiaan. PPG:llä kerättyjen HRV- ja hengitystietojen rinnalla käytetään yleensä muitakin menetelmiä kuten aktigrafiaa ja ihon lämpötilan mittaamista, jotka voivat edistää univaiheiden tunnistamista. (de Zambotti ym. 2019) Kuluttajakäyttöön suunnatuista unenseurantalaitteista kerrotaan lisää luvussa 5.

5 PUETTAVAT ÄLYLAITTEET UNEN MITTAUKSESSA

Unen mittaamiseen soveltuvien älylaitteiden määrä kasvaa jatkuvasti ja niiden tekniikka kehittyä kovaa vauhtia. Kuluttajakäyttöön suunnatut puettavat älylaitteet ovat suhteellisen edullisia, ja ne ovat hyvin helppokäyttöisiä, vaikka laitteiden sisältä löytyy todella monimutkaista teknologiaa. Niiden mittaustavat ja -algoritmit vaihtelevat laitteittain, ja eri laitteet saattavat antaa vaihtelevia tuloksia samasta yöstä. (de Zambotti ym. 2019; Heikkilä 2020) Unen määrän laitteet laskevat kohtuullisen luotettavasti, mutta unen laadun arvioinnissa on vielä jossain määrin epätarkkuuksia verrattuna kliiniseen mittaukseen. Älylaitteiden käytössä tulee siis muistaa, että niiden tuottama unidata on vain suuntaa antavaa. (Oikarinen 2022) Teknologian kehittyminen tulee kuitenkin suurella todennäköisyydellä johtamaan siihen, että tulevaisuudessa myös puettavilla älylaitteilla saadaan luotettavaa ja tarkkaa dataa unesta (de Zambotti ym. 2019).

Markkinoilla on tarjolla monenlaisia eri tekniikoilla toimivia unenseurantalaitteita. Laitteiden toiminta perustuu useimmiten liikkeentunnistukseen ja sykevaihTELUN mittaamiseen. Käytössä on myös muita unipolygrafiasta tuttuja menetelmiä, kuten EEG-mittausta ja hengityksen seuranta. Unenmittauslaitteet hyödyntävät yleensä useampaa mittaustapaa rinnakkain tulosten tarkkuuden parantamiseksi. Laitteet mittaavat tyypillisesti muitakin biosignaaleja, kuten ihon lämpötilaa ja sähkönjohtavuutta, joista saattaa olla hyötyä tulevaisuuden unitutkimuksessa. (de Zambotti ym. 2019)

Unta mittaavia puettavia älylaitteita ovat esimerkiksi erilaiset ranteessa pidettävät älykellot ja aktiivisuusrannekkeet, älysormukset, älypaidat ja unta mittaavat pääpannat. Lisäksi on olemassa muita kuluttajakäyttöön kehitettyjä unenseurantamenetelmiä kuten erilaisia patjan alle tai tyynyn sisälle lisättäviä unenmittauslaitteita ja unen seuraamiseen tarkoitettuja älypuhelinsovelluksia. Puettavat älylaitteet arvioivat usein unen laatua, jonka jokainen laitevalmistaja määrittelee omilla algoritmeillaan, mutta tyypillisesti ne pohjautuvat nukkumisaikaan, unen keskeytyksiin ja univaiheanalyysiin. Unidatan tarkastelu tehdään tyypillisesti laitevalmistajien omilla sovelluksilla, jotka voi ladata sovelluskaupasta älypuhelimeen.

5.1 Älykellot ja aktiivisuusrannekkeet

Uusimpien ranteessa pidettävien aktiivisuusrannekkeiden ja älykellojen unenmittausmenetelmät ovat pitkälti samat. Ne käyttävät kolmiakselista kiihtyvyyssanturia liikkeiden tunnistamiseen ja takaisin heijastuvaa PPG-tekniikkaa syk tietojen selvittämiseen. Laitteissa voi olla myös muun muassa lämpötila-anturi, mikrofoni ja valoisuudentunnistin. (de Zambotti ym. 2019; Sadek ym. 2020)

Yksi esimerkki unta mittaavasta aktiivisuusrannekkeesta on Fitbitin Fitbit Charge 5. Se käyttää optista sykkeen mittausta ja 3-akselista kiihtyvyyssmittausta. Aktiivisuusranneke mittaa PPG:llä myös happisaturaatiota ja hengitystiheyttä, joiden avulla se seuraa yön aikaisia hengitysongelmia. Lisäksi rannekkeessa on ympäristön valoisuutta mittaava sensori ja ihon lämpötilan vaihtelua mittaava lämpötila-anturi. Fitbit kertoo laitteensa seuraavan automaattisesti käyttäjän kokonaisuniaikaa ja unen vaiheita ja arvioivan unen laatua. Näiden mittausten perusteella laite antaa käyttäjälleen unipisteet nukutusta yöstä. Fitbit Charge 5:n akku kestää parhaimmillaan viikon verran eli jatkuvan unitiedon tuottaminen onnistuu hyvin. (Fitbit 2023)

Polarin älykellot mittaavat unta niin ikään 3-akselisella kiihtyvyyssanturilla ja PPG-sykkeennmittaustekniikalla. Laitteessa on myös valontunnistin ja lämpötila-anturi. Polarin mukaan heidän laitteensa antavat tietoa käyttäjän kokonaisunijasta, univaiheista ja unen keskeytyksistä, ja ne pärjäävät tarkkuudessa kliinisille aktigrafia-laitteille. Polarin älykellot arvioivat unenlaatua univaiheanalyysin ja unen jatkuvuuden pohjalta. Esimerkiksi Polar Ignite 3 -älykello antaa aamulla unipisteet kerättyjen unitietojen perusteella. Lisäksi se analysoi pitkän aikavälin nukkumistottumuksia ja vertailee kunkin yön unta omaan tyypilliseen uneen. Kello toimii jatkuvalla syke seurannalla perustilassa useita päiviä ja pelkässä yötilassa vielä pidempään. (Polar 2019; Polar 2022)

5.2 Älysormukset

Älysormuksista on tulossa yksi suosituimmista puettavista unenmittauslaitteista. Kehittynyt akkuteknologia ja pienikokoisemmat anturit mahdollistavat tarkan biosignaalien keräämisen sormesta tyylikkäästi muotoillulla älysormuksella. Sormuksen keräämiä tietoja voi hyödyntää pitkäaikaiseen terveyden seurantaan ja oman unen tutkimiseen. (de Zambotti ym. 2019; Mehrabadi ym. 2020)

Markkinoilla on muutamia unta mittaavia älysormuksia, joista tunnetuin on suomalaislähtöinen Oura-sormus. Oura käyttää unen mittauksessa PPG-tekniikalla saatuja HRV- ja hengitystietoja, kiihtyvyyssanturia ja kehon lämpötilan mittausta. Lisäksi sormus mittaa veren happisaturaatiota, jonka avulla voidaan tutkia yön aikaisia hengitysongelmia. Näiden mittausten mukaan määrittäytyy nukutun yön unenlaatu, joka esitetään helposti tulkittavina valmiuslukuna. Valmiuslukuun vaikuttaa myös viimeaikainen aktiivisuustaso. Lisäksi Oura antaa käyttäjilleen yksilöllisiä suosituksia esimerkiksi optimaalisesta nukkumaanmenoajasta. Se myös tunnistaa päiväunet automaattisesti ja muokkaa päivän aktiivisuuskurssia niiden perusteella. (Mehrabadi ym. 2020; Oura 2023) Oura tarjoaa myös tarkasteltavaksi yön leposykekäyrän, jonka muodosta voi tehdä päätelmiä oman unen levollisuudesta. Esimerkiksi riippumaton muotoinen sykekäyrä on tyypillisesti merkki laadukkaasta yöunesta, kun taas tasainen koholla oleva sykekäyrä voi kertoa ylipäätuksesta, jolloin uni ei ole yhtä laadukasta. (Oura Team 2023) Ouran älysormus on kevyt ja kestävä ja se toimii yhdellä latauksella seitsemän päivää, joten se on hyvä unenseurantalaite pidempään käyttöön (Oura 2023).

Toinen esimerkki unta mittaavasta älysormuksesta on Circular-älysormus. Se mittaa unta niin ikään kiihtyvyyssanturilla, PPG-tekniikalla ja lämpötila-anturilla, joiden perusteella se antaa unipisteitä yöstä. Sillä on suurin piirtein samat unenmittausominaisuudet kuin Oura-sormuksellakin. Circular-sormuksessa on lisäksi värinällä toimiva herätyskello, jonka voi asettaa herättämään käyttäjä unisyklin kevyen unen vaiheessa, jonka aikana on helppo herätä. Laitteen akku kestää kuitenkin vain 4 päivää, joten sitä pitää ladata hieman useammin. (Circular 2023)

5.3 Älypaidat

Kehittyneen mikroelektroniikan avulla on mahdollista integroida vaatteisiin erilaisia elektronisia komponentteja. Älykkäissä tekstiileissä voi olla sisällytettynä esimerkiksi antureita, joilla voi mitata ihmisen biosignaaleja, kuten sykettä, sykevälivaihtelua ja hengitystiheyttä. Yleisimmin älytekstiiliä käytetään älypaidoissa, joiden anturit sijoittuvat lähelle tärkeitä elimiä kuten sydäntä ja keuhkoja. Älypaidalla mitataan tyypillisesti ainakin EKG-signaalia ja hengitystiheyttä. (Khundaqji ym. 2020) Hengitystä mitataan hengitysiinduktiivisella pletysmografialla, jonka toiminta perustuu vatsan ja rinnan alueen tilavuudenmuutoksiin. Siinä kahdella mittausvyöllä rekisteröidään niiden

venymästä aiheutuvat sähköisen induktanssin muutokset, joista lopulta saadaan laskettua hengitystilavuus. (Leino 2001)

Tällä hetkellä ainoa markkinoilla oleva unta mittaava älypaita on Hexoskin-älypaita. Siinä on jatkuva syketietojen seuranta yksikytkentäisellä EKG-mittauksella, hengityksen seuranta hengitysenduktiivisella pletysmografialla ja liikkeentunnistus 3-akselisella kiihtyvyyssanturilla. Näillä menetelmillä Hexoskin-älypaita tunnistaa unen automaattisesti ja mittaa muun muassa unen vaiheita, unen kokonaisaikaa, nukkumisasentoa ja unen aikaista hengitystä. Hexoskinin mukaan paita on mukava päällä ja helppokäyttöinen laite unen seurantaan kotioloissa. Akunkesto laitteella on ranteessa ja sormessa pidettäviin älylaitteisiin verrattuna lyhyempi, noin 36 tuntia täyteen ladattuna, mutta sekin riittää hyvin unen mittaamiseen. (Hexoskin 2023a; Hexoskin 2023b)

On olemassa myös muita älypaitoja, mutta toistaiseksi muut älypaidat eivät suoraan sisällä unenmittausominaisuutta. Kuitenkin esimerkiksi Chronolifen älypaidan voi yhdistää unta mittaavan älykellon kanssa, jolloin näiden yhteismittauksessa saadaan tuotettua entistä laajempaa unidataa (Chronolife 2023).

5.4 Pääpannat

Älykkäät unta mittaavat pääpannat tarjoavat kotikäyttöön EEG-menetelmällä toimivan vaihtoehdon unen seuraamiseksi. Pääpannoissa käytetään niin sanottua kuiva-EEG-tekniikkaa. Unipolygrafiassa EEG:n elektrodien ja pään väliin laitetaan sähkönsiirtävää parantavaa geelimäistä ainetta, ja päähän kiinnitetään tyypillisesti noin 20 elektrodia. Kuluttajalaitteiden on kuitenkin oltava helposti kiinnitettäviä ja mukavia käyttää, joten niissä elektrodit kiinnitetään päähän esimerkiksi tarranauhalla kiristettävällä pannalla. Niissä elektrodeja on myös yleensä vähemmän. Älykkäitä pääpantoja kehitetään myös suoraan kliiniseen käyttöön, sillä hankalat unipolygrafialaitteet ja mahdollisesti epämieluisa tutkimisympäristö voivat vaikuttaa uneen. Pääpantojen käyttämän kuiva-EEG:n mittaustulokset aivoaalloista korreloivat hyvin unipolygrafiassa tehtyjen EEG-mittausten kanssa, mutta eivät pääse täysin samaan tarkkuuteen. (Arnal ym. 2020; Hinrichs ym. 2020)

Dreem 3 -pääpanta on yksi esimerkki kliiniseen käyttöön kehitetystä kuiva-EEG:tä käyttävästä unenmittauslaitteesta. Se käyttää viittä eri puolille päätä sijoitettua elektrodia

aivoaaltojen seuraamiseen. Lisäksi siinä on 3-akselinen kiihtyvyysanturi liikkeiden, pään asennon ja hengitystiheyden tunnistamiseksi ja pulssioksimetri syketiетоjen selvittämiseksi. Näiden tietojen perusteella Dreem 3 tunnistaa automaattisesti univaiheet ja muodostaa laajan unianalyysin, jonka tulokset mukailevat kohtuullisen tarkasti unipolygrafialla saatuja tuloksia. (Arnal ym. 2020; Dreem 2023)

Sleep Shepherd -panta on yksi esimerkki kuluttajille suunnatusta unta mittaavasta pääpännästä. Sekin mittaa unta seuraamalla aivoaaltoja ja pään asentoa. Uniparametrienv mittaamisen lisäksi se pyrkii myös parantamaan unenlaatua binauraalisilla äänillä. (Sleep Shepherd 2023a) Binauraaliset äänet syntyvät, kun kumpaankin korvaan soitetään ääntä hieman eri taajuudella, jolloin aivot havaitsevat näiden ääniaaltojen välisen taajuuseron ikään kuin kolmantena äänenä, binauraalisena rytminä. Näillä äänillä voi vaikuttaa muun muassa nukahtamisaikaan, unen määrään ja laatuun. Tietyn taajuuden binauraaliset äänet voivat muokata jossain määrin aivoaaltojen taajuuksia, minkä avulla aivotoimintaa voi joko hidastaa tai kiihdyttää. (Dabiri ym. 2022; Summer 2022) Sleep Shepherd yhdistää binauraaliset äänet EEG-mittauksen kanssa, jolloin sillä voi tuottaa binauraalista ääntä, joka on aina hieman aivoaaltojen taajuutta alhaisempi. Tällöin aivot mukautuvat hiljalleen alempaan taajuuteen ja aivotoiminta hidastuu, mikä helpottaa nukahtamista. Laitteessa on myös älykäs herätysjärjestelmä, joka kiihdyttää aivotoimintaa aamulla luomalla hiljalleen hieman korkeampitaajuisia ääntä. (Sleep Shepherd 2023a; Sleep Shepherd 2023b)

6 YHTEENVETO

Tässä kirjallisuuskatsauksessa esiteltiin uneen ja sydämen sykkeeseen liittyviä peruskäsitteitä, perehdyttiin erilaisiin unenmittausmenetelmiin ja tarkasteltiin puettavien älylaitteiden toimintaa ja käyttöä unen seurannassa.

Uni muodostuu neljästä eri vaiheesta, N1-, N2-, N3- ja REM-unesta. Lisäksi hereillä olo lasketaan usein viidenneksi unen vaiheeksi. Unenlaadun arviointi perustuu pitkälti nukkumisajan mittaamiseen ja univaiheiden tutkimiseen. Paras unitutkimusmenetelmä on unipolygrafia, johon kaikkia muita unenmittausmenetelmiä verrataan. Unipolygrafiassa mitataan muun muassa aivoaaltojen toimintaa EEG:llä ja silmien liikettä EOG:llä. Muita mittausmenetelmiä ovat liikkeeseen perustuva aktigrafia, aivoverenkiertoa tutkiva NIRS-tekniikka ja sykevälivaihtelun mittaamiseen perustuva PPG-tekniikka.

Sydän ei lyö tasaisesti vaan sen lyöntien välinen aika vaihtelee. Tämä sykevälivaihtelu antaa tietoa ihmisen autonomisen hermoston toimintakyvystä. Suuri sykevaihtelu kertoo ihmisen verenkiertoelimistön hyvästä kunnosta, jolloin ihmisen on helppo palautua arjen rasituksesta. HRV:n avulla saadaan myös selvitettyä univaiheet ja hengitystiheys.

Ranteesta, sormesta ja keskivartalosta unta mittaavat älylaitteet käyttävät pääasiassa PPG-mittausta univaiheiden tunnistamiseksi. Pääpannat puolestaan käyttävät laitteissaan käyttäjäystävällisempää variaatiota EEG-mittauksesta. Lisäksi kaikki puettavat älylaitteet hyödyntävät jossain määrin aktigrafiaa.

Työssä esitellyt unta mittaavat puettavat älylaitteet ovat Fitbit Charge 5 -aktiivisuusranneke, Polar Ignite 3 -älykello, Oura-älysormus, Circular-älysormus, Hexoskin-älypaita, Chronolife-älypaita yhdistettynä älykelloon, Dreem 3 -pääpanta ja Sleep Shepherd -pääpanta. Näiden toimintaperiaatteet ja mittaustarkkuudet eroavat jossain määrin toisistaan, mutta kaikilla näillä laitteilla saa kerättyä suuntaa antavaa unidataa. Älylaitteilla tehdyt unimittaukset eivät kuitenkaan riitä unihäiriöiden diagnosoimiseksi, vaan tätä varten tarvitaan kliininen unitutkimus.

LÄHDELUETTELO

Aivoliitto, 2020. *Pulssin tunnistelu* [verkkodokumentti]. Turku: Aivoliitto ry. Saatavissa: <https://www.aivoliitto.fi/tunnepulssisi/pulssin-tunnustelu/> [viitattu 8.5.2023].

Arnal, P. J., Thorey, V., Debellemanni, E., Ballard, M. E., Hernandez, A. B., Guillot, A., Jourde, H., Harris, M., Guillard, M., Van Beers, P., Chennaoui, M. & Sauvet, F., 2020. The Dreem Headband compared to polysomnography for electroencephalographic signal acquisition and sleep staging. *Sleep* [verkkodokumentti], 43 (11), zsa097.

Cao, R., Azmini, I., Sarhaddi, F., Niela-Vilen, H., Axelin, A., Liljeberg, P & Rahmani, A. M., 2022. Accuracy Assessment of Oura Ring Nocturnal Heart Rate and Heart Rate Variability in Comparison With Electrocardiography in Time and Frequency Domains: Comprehensive Analysis. *Journal of Medical Internet Research* [verkkodokumentti], 24 (1), e27487.

Chronolife, 2023. *Smart Textile x Garmin – Chronolife* [verkkodokumentti]. Pariisi: Chronolife SAS. Saatavissa: <https://www.chronolife.net/products/smart-textile-garmin-wearables/> [viitattu 18.5.2023].

Circular, 2023. *Discover Useful Smart Ring Features* [verkkodokumentti]. Pariisi: Circular SAS. Saatavissa: <https://www.circular.xyz/features> [viitattu 16.5.2023].

Dabiri, R., Esmailpour, M. R. M., Nodoushan, M. S., Khaneshenas, F. & Zakerian, S. A., 2022. The effect of auditory stimulation using delta binaural beat for a better sleep and post-sleep mood: A pilot study. *Digital Health* [verkkodokumentti], 8, 1–8.

de Zambotti, M., Cellini, N., Goldstone, A., Colrain, I. M. & Baker, F. C., 2019. Wearable Sleep Technology in Clinical and Research Settings, *Medicine & Science in Sports & Exercise* [verkkodokumentti], 51 (7), 1538–1557.

Dreem, 2023. *Dreem Labs for Clinical Trials* [verkkodokumentti]. Pariisi: Dreem. Saatavissa: <https://dreem.com/clinicaltrials> [viitattu 18.5.2023].

Eerola, H., 2022. *EKG (sydänfilmi)* [verkkodokumentti]. Helsinki: Duodecim Terveyskirjasto. Saatavissa: <https://www.terveyskirjasto.fi/snk03210> [viitattu 8.5.2023].

Erkinjuntti, M., Salmi, T., Polo, O. & Kirjavainen, J., 2006. Suppea yöpolygrafia unenaikaisten hengityshäiriöiden diagnostiikassa. *Teoksessa*: Partanen, J., Falck, B., Hasan, J., Jäntti, V., Salmi, T. & Tolonen, U. (toim.) *Kliininen neurofysiologia*. Helsinki: Duodecim. 653–664. ISBN 951-656-101-2

Firstbeat, 2015. *Heart Rate Variability* [verkkodokumentti]. Jyväskylä: Firstbeat Technologies Oy. Saatavissa: <https://www.firstbeat.com/en/science-and-physiology/heart-rate-variability/> [viitattu 8.5.2023].

Fitbit, 2023. *Fitbit Charge 5 User Manual* [verkkodokumentti]. San Francisco: Fitbit LLC. Saatavissa: https://help.fitbit.com/manuals/manual_charge_5_en_US.pdf [viitattu 14.5.2023].

Geyer, J. D. & Carnay, P. R., 2018. *Atlas of Polysomnography* [e-kirja]. Third Edition. Philadelphia: Wolters Kluwer Health. ISBN 9781496381088

Hatson, M., 2020. *Heart Rate Variability (HRV) Explained for Health and Decision-Making* [video, verkkodokumentti]. YouTube: hatson dot coach. Saatavissa: https://www.youtube.com/watch?v=KP3Bd7_25Oc [viitattu 7.5.2023].

Heikkilä, M., 2020. *Puettavat äylalaitteet mittaavat lepoa ja liikettä, mutta niissä on myös huonoja puolia* [podcast, verkkojulkaisu]. Helsinki: Yle Areena. Saatavissa: <https://areena.yle.fi/podcastit/1-50570039> [viitattu 12.5.2023].

Hexoskin, 2023a. *Hexoskin Smart Shirts - Cardiac, Respiratory, Sleep & Activity Metrics* [verkkodokumentti]. Montreal: Carrè Technologies Inc. Saatavissa: <https://www.hexoskin.com/> [viitattu 17.5.2023].

Hexoskin, 2023b. *Monitoring Sleep with Hexoskin*. [verkkodokumentti]. Montreal: Carrè Technologies Inc. Saatavissa: <https://www.hexoskin.com/pages/monitoring-sleep-with-hexoskin> [viitattu 17.5.2023].

Himanen, S.-L. & Hasan, J., 2006. Unenaikainen EEG, polygrafia, unianalyysi. *Teoksessa*: Partanen, J., Falck, B., Hasan, J., Jäntti, V., Salmi, T. & Tolonen, U. (toim.) *Kliininen neurofysiologia*. Helsinki: Duodecim. 630–640. ISBN 951-656-101-2

Hinrichs, H., Scholz, M., Baum, A.K., Kam, J. W. Y., Knight, R. T. & Heinze, H.-J., 2020. Comparison between a wireless dry electrode EEG system with a conventional wired wet electrode EEG system for clinical applications. *Scientific Reports* [verkkodokumentti], 10, 5218.

Huttunen, J., Tolonen, U. & Partanen, J., 2006. EEG:n fysiologiaa ja patofysiologiaa. *Teoksessa: Partanen, J., Falck, B., Hasan, J., Jääntti, V., Salmi, T. & Tolonen, U. (toim.) Kliininen neurofysiologia*. Helsinki: Duodecim. 50–64. ISBN 951-656-101-2

Iqbal, T., Elahi, A., Ganly, S., Wijns, W. & Shahzad, A., 2022. Photoplethysmography-Based Respiratory Rate Estimation Algorithm for Health Monitoring Applications. *Journal of Medical and Biological Engineering* [verkkodokumentti], 42 (2), 242–252.

Kallioinen, M., 2012. Lähi-infrapunaspektroskopia (NIRS) aivokudoksen happautumisen seurannassa. *Finnanest* [verkkodokumentti], 45 (4). Saatavissa: http://www.finnanest.fi/files/kallioinen_spektro.pdf [viitattu 8.5.2023].

Khundaqji, H., Hing, W., Furness, J. & Climstein, M., 2020. Smart Shirts for Monitoring Physiological Parameters: Scoping Review. *JMIR Mhealth and Uhealth* [verkkodokumentti], 8 (5), e18092.

Lee, H., Ko, H., Lee, J., 2016. Reflectance pulse oximetry: Practical issues and limitations. *ICT Express* [verkkodokumentti], 2 (4), 195-198.

Leino, K., 2001. Hengitysmallin mittaus hengitysenduktiivisella pletysmografilla - toisenlainen lähestymistapa hengityksen monitorointiin. *Finnanest* [verkkodokumentti], 34 (3). Saatavissa: http://www.finnanest.fi/files/a_leino.pdf [viitattu 17.5.2023].

Mehrabadi, M. A., Azmini, I., Sarhaddi, F., Axelin, A., Niela-Vilén, H., Myllyntausta, S., Stenholm, S., Dutt, N., Liljeberg, P. & Rahmani, A. M., 2020. Sleep Tracking of a Commercially Available Smart Ring and Smartwatch Against Medical-Grade Actigraphy in Everyday Settings: Instrument Validation Study. *JMIR Mhealth and Uhealth* [verkkodokumentti], 8 (10), e20465.

Nachazel, T., 2020. *What is a Strain Gauge and How Does it Work?* [verkkodokumentti]. Michigan: Michigan Scientific Corporation. Saatavissa: <https://www.michsci.com/what-is-a-strain-gauge/> [viitattu 6.5.2023].

Nygrén, E., Müller, K. & Honkonen, T., 2004. Silmänliikkeiden poikkeavuudet skitsofreniassa. *Lääketieteellinen Aikakauskirja Duodecim* [verkkodokumentti], 120 (5). Saatavissa: <https://www.duodecimlehti.fi/duo94133> [viitattu 5.5.2023].

Oikarinen, T., 2022. *Viisi asiaa, jotka on hyvä tietää unen mittaamisesta älylaitteilla* [verkkodokumentti]. Helsinki: Terveystalo. Saatavissa: <https://www.terveystalo.com/fi/artikkelit/viisi-asiaa-jotka-on-hyva-tietaa-unen-mittaamisesta-alylaitteilla> [viitattu 5.5.2023].

Oura, 2023. *3. sukupolven Oura-sormus* [verkkodokumentti]. Oulu: Oura Health Oy. Saatavissa: <https://ouraring.com/fi/product/heritage-silver> [viitattu 16.5.2023].

Oura Team, 2023. *Sleeping Heart Rate: Look for These 4 Patterns* [verkkodokumentti]. Oulu: Oura Health Oy. Saatavissa: <https://ouraring.com/blog/sleeping-heart-rate/> [viitattu 11.5.2023].

Paavonen, K., 2022. *Kardiologi vastaa: mitä sydämen syke kertoo terveydestäsi?* [verkkodokumentti]. Helsinki: Terveystalo. Saatavissa: <https://www.terveystalo.com/fi/artikkelit/kardiologi-vastaa-mita-sydamen-syke-kertoo-terveydestasi> [viitattu 3.5.2023].

Partinen, M., 2019. *Mitä uni on?* [verkkodokumentti]. Helsinki: Uniliitto ry. Saatavissa: <https://www.uniliitto.fi/2019/09/17/mita-uni-on/> [viitattu 26.4.2023].

Partonen, T. & Lauerma, H., 2006. Aktigrafia unihäiriöiden diagnostiikassa. *Teoksessa:* Partanen, J., Falck, B., Hasan, J., Jäntti, V., Salmi, T. & Tolonen, U. (toim.) *Klininen neurofysiologia*. Helsinki: Duodecim. 689–696. ISBN 951-656-101-2

Patel, A. K., Reddy, V., Shumway, K. R. & Araujo, J. F., 2022. *Physiology, Sleep Stages*. *StatPearls* [verkkodokumentti].

Pinge, A., Bandyopadhyay, S., Ghosh, S. & Sen, S., 2022. A Comparative Study between ECG-based and PPG-based Heart Rate Monitors for Stress Detection [verkkodokumentti]. *Konferenssissa: 2022 14th International Conference on Communication Systems & Networks*. Bangalore 4.1.–8.1., 2022. Bangalore: IEEE. 84–89. Saatavissa: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9668342> [viitattu 8.5.2023].

Polar, 2019. *White Paper Polar Sleep Plus Stages* [verkkodokumentti]. Kempele: Polar Electro Oy. Saatavissa: <https://www.polar.com/en/img/static/whitepapers/pdf/polar-sleep-plus-stages-white-paper.pdf> [viitattu 15.5.2023].

Polar, 2022. *Technical Specification Polar Ignite 3* [verkkodokumentti]. Kempele: Polar Electro Oy. Saatavissa: https://support.polar.com/e_manuals/ignite-3/polar-ignite-3-user-manual-english/technical-specifications.htm [viitattu 15.5.2023].

Pzizz, 2020. *How Sleep Works* [verkkodokumentti]. Lontoo: Pzizz Ltd. Saatavissa: <https://pzizz.com/blog/science/how-sleep-works/> [viitattu 2.5.2023].

Rahman, M. J., Morshed, B. I., Harmon, B. & Rahman, M., 2022. A pilot study towards a smart-health framework to collect and analyze biomarkers with low-cost and flexible wearables. *Smart Health* [verkkodokumentti], 23, 100249.

Rauhala, E., Himanen, S.-L. & Sjöholm, T., 2006. Laajan polygrafian käyttö unihäiriöiden diagnostiikassa. *Teoksessa: Partanen, J., Falck, B., Hasan, J., Jäntti, V., Salmi, T. & Tolonen, U. (toim.) Kliininen neurofysiologia*. Helsinki: Duodecim. 643–652 ISBN 951-656-101-2

Ren, H., Jiang, X., Xu, K., Chen, C., Yuan, Y., Dai, C. & Chen, W., 2020. A Review of Cerebral Hemodynamics During Sleep Using Near-Infrared Spectroscopy. *Frontiers in Neurology* [verkkojulkaisu], 11, 524009.

Sadek, I., Demarasse, A. & Mokhtari, M., 2020. Internet of things for sleep tracking: wearables vs. nonwearables. *Health and Technology* [verkkodokumentti], 10, 333–340.

Schäfer, A. & Vagedes, J., 2013. How accurate is pulse rate variability as an estimate of heart rate variability? A review on studies comparing photoplethysmographic technology with an electrocardiogram. *International Journal of Cardiology* [verkkodokumentti], 166 (1), 15-29.

Shaffer, F. & Ginsberg, JP, 2017. An Overview of Heart Rate Variability Metrics and Norms. *Frontiers in Public Health* [verkkodokumentti], 5.

Sleep Shepherd, 2023a. *Sleep Shepherd: Sleep Optimizer and Tracker* [verkkodokumentti]. Colorado: Sleep Shepherd LLC. Saatavissa: <https://sleepshepherd.com/> [viitattu 19.5.2023].

Sleep Shepherd, 2023b. *Sleep Improvement - Sleep Shepherd* [verkkodokumentti]. Colorado: Sleep Shepherd LLC. Saatavissa: <https://sleepshepherd.com/sleep-improvement/> [viitattu 19.5.2023].

Stenberg, T., 2018. *Uni on aivojen aikaa* [verkkodokumentti]. Turku: Aivoliitto ry. Saatavissa: <https://www.aivoliitto.fi/aivoterveys/uni/uni-on-aivojen-aikaa#c5fa24a6> [viitattu 26.4.2023].

Strong, E., 2015. *What is normal heart rate?* [video, verkkodokumentti]. YouTube: Strong Medicine. Saatavissa: <https://www.youtube.com/watch?v=RHxfP5rm3Ks> [viitattu 3.5.2023].

Summer, J., 2022. *Can Binaural Beats Help You Fall Asleep?* [verkkodokumentti]. Seattle, WA: Sleep Foundation. Saatavissa: <https://www.sleepfoundation.org/noise-and-sleep/binaural-beats> [viitattu 19.5.2023].

Suni, E. & DeBanto, J., 2022. *How Sleep Works: Understanding the Science of Sleep* [verkkodokumentti]. Seattle, WA: Sleep Foundation. Saatavissa: <https://www.sleepfoundation.org/how-sleep-works> [viitattu 29.4.2023].

Terveyskirjasto, 2016. Hemodynaaminen. *Lääketieteen sanasto* [verkkodokumentti]. Helsinki: Duodecim Terveyskirjasto.

Tuomilehto, H., 2020. ”*Vaikeakin unihäiriö on hoidettavissa*” – *Unilääkäri kertoo, miten uniongelma korjataan*. [verkkodokumentti]. Helsinki: Lääkärikeskus Aava. Saatavissa: <https://www.aava.fi/artikkelit-ja-tiedotteet/artikkelit/vaikeakin-unihairio-on-hoidettavissa-unilaakari-kertoo-miten-uniongelma-korjataan/> [viitattu 11.5.2023].

Virtanen, I., 2021. Unirekisteröinnit avattuina. *Läketieteellinen Aikakauskirja Duodecim* [verkkodokumentti], 137 (6), 605–610. Saatavissa: <https://www.duodecimlehti.fi/duo16126> [viitattu 6.5.2023].

Wakunda, Y., Hasegawa, Y., Fukuda, T., Noda, A. & Arai, F., 2004. Estimation of sleep cycle and quality based on nonlinear analysis of heart rate variability [verkkodokumentti]. *Konferenssissa: 2004 International Symposium on Micromechatronics and Human Science*. Nagoya 31.10.–3.11., 2004. Tokio: IEEE. 181–186. Saatavissa: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1421298> [viitattu 7.5.2023].

