



TIETO- JA SÄHKÖTEKNIIKAN TIEDEKUNTA
ELEKTRONIIKAN JA TIETOLIIKENNETEKNIIKAN TUTKINTO-OHJELMA

KANDIDAATINTYÖ

LÄPILEIKKAUS UNEN MITTAAMISEN MENETELMIIN

Tekijä

Eemil Kulmala

Ohjaaja

Teemu Myllylä ja Hany Ferdinando

Maaliskuu 2023

Kulmala E. (2023) Lämpileikkaus unen mittaamisen menetelmiin. Oulun yliopisto, tieto- ja sähkötekniikan tiedekunta, elektroniikan ja tietoliikennetekniikan tutkinto-ohjelma. Kandidaatintyö, 30 s.

TIIVISTELMÄ

Tämän kandidaatintutkielman tavoitteena on esitellä lukijalle yleisiä unen mittaamiseen käytettäviä menetelmiä. Työssä käydään läpi pintapuolisesti unen rakenne ja unen mitattavia fysiologisia ominaisuuksia, sekä esitellään yleisimpiä sekä kliinisessä mittauksessa, että tutkimuksessa ja kaupallisissa laitteissa käytettäviä menetelmiä. Menetelmien suuren määrän ja niiden kompleksisuuden vuoksi teoriaan ei mennä erityisen syvälle, vaan tavoitteena on antaa yleiskuva eri menetelmistä ja niiden toimintaperiaatteista. Lisäksi työssä esitellään yleisiä kuluttajalle saatavissa olevia kaupallisia unen mittaukseen soveltuvia laitteita, sekä niiden keskeisiä ominaisuuksia.

Avainsanat: unimittaus, puettava elektroniikka, uni, unitutkimus.

Kulmala E. (2023) A Cross-section of sleep measurement methods. University of Oulu, Degree Programme in Electronics and Communications Engineering. Bachelor's Thesis, 30 p.

ABSTRACT

The aim of this bachelor's thesis is to introduce the reader to common methods used in measuring sleep. The work briefly reviews the structure of sleep and measurable physiological properties of sleep and introduces the most common methods used in clinical measurement, and in research and commercial devices. Due to the large number of methods and their complexity, the theory will not go particularly deep, but the aim is to give an overview of the different methods and their operating principles. In addition, the work presents common commercial devices suitable for sleep measurement available to the consumer, as well as their key features.

Key words: sleep, sleep measurement, sleep research, wearable electronics.

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

SISÄLLYSLUETTELO

ALKULAUSE

LYHENTEIDEN JA MERKKIEN SELITYKSET

TIIVISTELMÄ.....	2
ABSTRACT	3
SISÄLLYSLUETTELO.....	4
ALKULAUSE.....	6
LYHENTEIDEN JA MERKKIEN SELITYKSET.....	7
1 JOHDANTO	8
2 UNEN MITTAAMINEN.....	9
2.1 Unisykli	9
2.2 Kliininen mittaus	10
2.2.1 Polysomnografia (PSG).....	10
2.2.1.1 EEG	10
2.2.1.2 EOG.....	11
2.2.1.3 EMG	11
2.2.1.4 Vaiheiden erottaminen	12
2.2.1.5 Haasteita	13
2.2.2 Uniapneamittaus	13
2.3 Unen tutkimuksessa käytettävät menetelmät	13
2.3.1 Fotopletysmografia.....	14
2.3.1.1 Toimintaperiaate.....	14
2.3.1.2 Unen mittaaminen	14
2.3.1.3 Haasteita	14
2.3.2 Aktigrafia.....	15
2.3.2.1 Toimintaperiaate.....	15
2.3.2.2 Tarkkuus ja haasteet	15
2.3.3 Pään alueen mittaukset	16
2.3.3.1 EEG, EOG ja EMG	16
2.3.3.2 NIRS.....	17
2.4 Datan analysointi	19
2.4.1 Manuaalinen pisteytys	20
2.4.2 Automaattinen pisteytys	20
3 UNEN SEURANTA KOTIMITTAUKSESSA	21
3.1 Sormukset.....	21
3.1.1 Oura-ring	21
3.2 Kellot ja rannekkeet.....	21
3.2.1 MotionWatch 8	21
3.2.2 Fitbit	21

3.2.3	Activinsights Band	21
3.2.4	GENEactiv	22
3.3	Pään aluetta mittaavat laitteet	22
3.3.1	Neuroon	22
3.3.2	Sleep Profiler	22
3.4	Makuualustaan integroidut sovellutukset	22
3.4.1	Withings Sleep Analyzer	22
3.4.2	Emfit QS	23
3.5	Älypuhelinsovellukset	23
3.5.1	SleepScore	23
3.5.2	Sleep Cycle	23
3.6	Haasteita	23
4	POHDINTA	25
4.1.1	Nykyhetki ja tulevaisuus	25
5	YHTEENVETO	26
6	LÄHDELUETTELO	27

ALKULAUSE

Haluan kiittää ohjaajaani Teemu Myllylää asiantuntevasta opastuksesta työn tekemiseen, sekä kummisetäni ja pitkän linjan unen mittaamisen ammattilaista Hannu Kinnusta, joka antoi näkökulmaa aiheeseen perehtymiseen. Kiitos myös ystäväilleni, erityisesti Juhana Mobergille, henkisestä tuesta kandidaatintyön tekemiseen.

Oulussa 7.3.2023

Eemil Kulmala

LYHENTEIDEN JA MERKKIEN SELITYKSET

PSG	Polysomnography (polysomnografia)
EEG	Electroencephalography (elektroenkefalografia)
EKG	Electrocardiography (elektrokardiografia)
EMG	Electromyography (elektromyografia)
EOG	Elektro-oculografia (elektro-okulografia)
PPG	Photoplethysmography (fotoplethysmografia)
REM	Rapid Eye Movements (nopeat silmän liikkeet)
NREM	non-REM
NIRS	Nearinfrared spectroscopy (lähi-infrapunaspektroskopia)

1 JOHDANTO

Uni on elintärkeä biologinen prosessi, jonka ajatellaan olevan ihmisen terveyden ja suorituskyvyn kannalta keskeisessä asemassa. Uni edesauttaa mm. yksilön virkeyttä, oppimiskykyä, immunitettia, fyysistä suorituskykyä, metabolista terveyttä, sekä kardiovaskulaarista terveyttä. [1]–[3] Unen merkittävyyden vuoksi niin yksilön kuin yhteiskunnankin tasolla on sen mittaamiseksi kehitetty paljon menetelmiä niin kliiniseen käyttöön, kuin kaupallisia laitteita tavallisen kuluttajankin saataville. Kliinisen unen mittauksen tavoitteena on diagnosoida unihäiriöitä ja -ongelmia ja tarjota potilaalle mahdollista hoitoa niihin. Kliinisen mittauksen rinnalle on kuitenkin viime vuosikymmeninä kehitetty suuri määrä kaupallisia laitteita ja menetelmiä, joilla kuluttajat voivat mitata omaa unta ja siten saada tietoa unikäyttäytymisestään ja mahdollisesti parantaa unen laatuaan ja sen myötä myös terveyttään.

Kaupallisten unta mittaavien laitteiden suurta suosiota selittävät osaltaan niiden helppokäyttöisyys, mahdollisuus unen mittaukseen tosielämän olosuhteissa, sekä suhteellisen edullinen hinta. Verrattuna laboratoriomittauksiin, kaupalliset laitteet eivät vaadi laboratorio-olosuhteita eivätkä ammattilaisen työtä mittaustulosten analysoinnissa. Näin ollen kaupallisia laitteita voidaan hyödyntää unen mittauksessa laajasti ja jatkuva-aikaisesti, parantaen unitottumuksia niin yksilön, kuin yhteiskunnankin tasolla. Unta mittaavien kaupallisten laitteiden tarkkuutta ja käyttömahdollisuuksia myös kliinisessä mittauksessa on tutkittu edellisinä vuosina paljon, mutta laitteiden validointi kliiniseen käyttöön vaatii edelleen lisää tutkimusta.

Tämä kandidaatintyö on katsaus unen mittaamisesta olemassa olevaan kirjallisuuteen ja tutkimustuloksiin, ja sen tavoitteena on antaa lukijalle yleiskuva unen mittaamisen menetelmistä. Työ pyrkii vastaamaan seuraaviin tutkimuskysymyksiin:

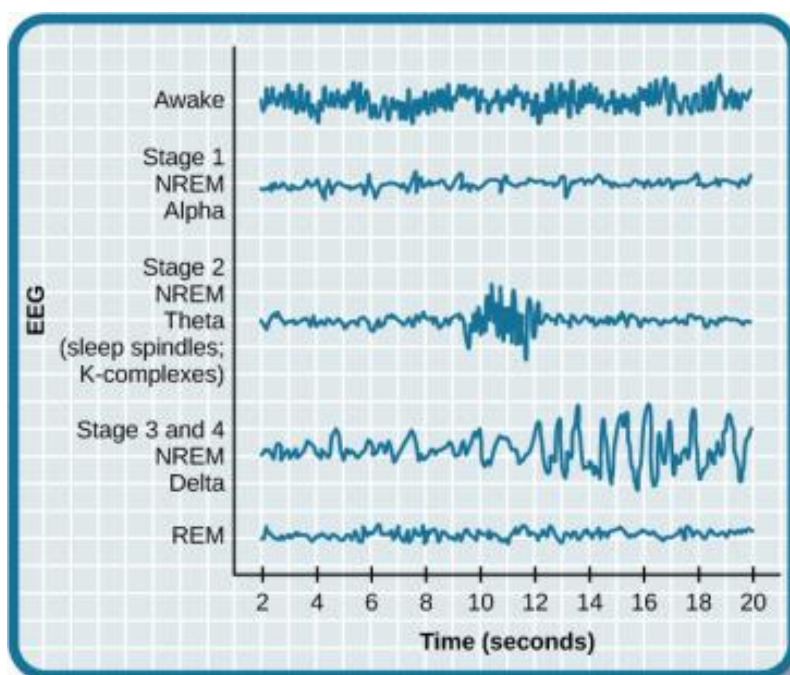
- Mitä kehon fysiologisia muutoksia voidaan hyödyntää unen mittaamiseen?
- Mitä erilaisia menetelmiä unen mittaamiseen on?
- Mitkä ovat kuluttajan mahdollisuudet unen mittaamiseen kaupallisten laitteiden avulla?

Lisäksi käydään lyhyesti läpi kaupallisten laitteiden haasteita unen mittaamisessa, sekä lopussa pohditaan puettavan elektroniikan mahdollisuuksia unen mittauksessa niin yksilön, kuin yhteiskunnankin tasolla.

2 UNEN MITTAAMINEN

2.1 Unisykli

Uni voidaan jakaa aivojen toiminnan mukaan NREM- ja REM-vaiheisiin. NREM jakautuu edelleen kolmeen osaan, joita ovat tasot N1, N2 ja N3. Terve uni koostuu sykleistä, joissa unen eri vaiheet seuraavat toisiaan. Tavallisen, terveen aikuisen uni alkaa tason 1 NREM-vaiheesta (N1), joka kestää tyypillisesti 1–7 minuuttia. N1 on siirtymävaihe ennen vaihetta N2, jossa kyetään edelleen havaitsemaan ääniä ja josta pienikin ääni voi palauttaa takaisin valveille. NREM tasoa 1 seuraa taso 2 (N2), jossa yleensä pysytään syklin alussa n. 10–25 minuuttia ja jonka kokonaisuus terveen unen määrästä on jopa 40–60 %. Vaiheessa N2 uni on hiukan syvempää kuin vaiheessa N1, joten heräämiseen vaaditaan hiukan voimakkaampi ärsyke kuin vaiheesta N1. Vaiheessa N2 uni syventyy hiljalleen, jolloin lopulta päädytään vaiheeseen N3, eli syvään uneen. Syvän unen osuus koko unen määrästä on 5–15 %. [1], [4] NREM-vaiheen jaksot voidaan määritellä aivosähkökäyrän (EEG) aaltomuodoilla, kuten unisukkuloilla (sleep spindle), k-komplekseilla ja korkean jännitteen hitailla aaltomuodoilla. REM-vaihe määritellään aivosähkökäyrän aktivoitumisen ja lihasjännityksen heikkenemisen perusteella.[1] Kuvassa 1 on esitetty EEG-signaalit unen eri vaiheissa.



Kuva 1. Havainnekuva aivosähkökäyrästä unen eri vaiheissa [1]

REM-unta esiintyy 4–6 kertaa unen aikana diskreetteinä jaksoina. Ensimmäisen unisyklin aikana REM-vaihe on yleensä lyhyt, mutta sen pituus kasvaa unen loppua kohden. REM-unesta heräämiseen vaadittavan ärsykkeen taso vaihtelee unen aikana. REM-vaiheessa voi myös esiintyä lyhyitä jaksoja hereillä, tyypillisesti lähellä jakson vaihtumista. REM-uneen liittyy lihasjännitysten vähenemistä ja refleksien heikkenemistä, mikä ehkäisee unien aiheuttamaa liikehdintää.[1]

Edellä tehty kuvaus unen vaiheista sopii aikuisen ihmisen unisykliin, mutta sykli muuttuu ihmisen elinkaaren aikana. [1], [4] Esimerkiksi vastasyntyneet siirtyvät suoraan valveilta REM-uneen ja heidän unisyklinsä on aikuista lyhempi. [1] Vaiheen N3 eli syvän unen osuus pienenee unen määrästä ihmisen iän kasvaessa, REM-unen määrän pysyessä lähes vakiona. Vastaavasti tason N1 uni ja heräämisten määrä unen aikana kasvavat. [4]

Fysiologiset prosessit, kuten aivotoiminta, syke, verenpaine, sympaattisen hermoston toiminta, lihasjännitys, veren virtaus aivoihin, hengitys, hengitysteiden vastus sekä lämmönsäätely muuttuvat unen aikana. Parasymptaattisen aktiivisuuden on todettu lisääntyvän ja sympaattisen aktiivisuuden on todettu heikentyvän nukahtamisen ja NREM-vaiheen aikana. Autonominen hermoston toiminta saa aikaan verenpaineen ja sydämen sykkeen heikentymistä. Nämä kardiovaskulaariset muutokset tyypillisesti ilmenevät vaiheen N2 aikana. REM-unessa lihasjännityksen heikkeneminen rinnassa ja kurkussa saa aikaan hengitysteiden vastuksen kasvamisen. Tämä johtaa epäsäännölliseen hengitykseen. [1] Näitä unen vaiheisiin liittyviä fysiologisia muutoksia hyödynnetään unta mitattaessa ja analysoitaessa.

2.2 Kliininen mittaus

2.2.1 Polysomnografia (PSG)

Tämän hetken tarkimpana tapana unen mittaamiseen pidetään laboratorio-olosuhteissa toteutettavaa polysomnografiaa (PSG). [3], [5]–[10] Polysomnografian avulla saatuja mittaustuloksia pidetäänkin useimmissa tutkimuksissa vertailukohtana, kun tutkitaan muiden unta mittaavien sovellutusten luotettavuutta. Polysomnografia on kattava, useaa eri parametria käyttävä yön yli tehtävä mittaus, joka toteutetaan useimmiten unilaboratoriossa. PSG tallentaa tyypillisesti aivosähkökäyrää (EEG), silmien liikkeitä (EOG), lihasten aktiivisuutta (EMG), sydämen signaaleja (EKG), hengitystä ja hengitysvastusta, veren happipitoisuutta, raajojen liikkeitä ja kuorsausta. [3]–[5] Näistä unen vaiheiden määrittämiseen käytetään yleensä EOG:n, EMG:n ja EEG:n signaaleja. [4]

2.2.1.1 EEG

Perinteinen unen mittaaminen vaatii etu-, keski- ja takaraivo-EEG-aktiivisuuden, eli aivosähkökäyrän mittaamista. Aivosähkökäyrä määritetään signaalin amplitudin, polaarisuuden ja taajuuden mukaan. Tavallisesti aivosähkökäyrä sisältää delta- (< 4 Hz), theta- (4–7 Hz), alpha- (8–13 Hz), ja betataajuuksia (> 13 Hz). Alpha-aktiivisuutta havaitaan useimmiten ennen nukahtamista, silmien ollessa kiinni. Alpha-taajuuksia esiintyy myös sykäyksittäin unen katketessa hetkittäisesti. Lisäksi alpha-alueen taajuuksia voidaan havaita REM-unen aikana, mutta tällöin taajuus on tyypillisesti hiukan matalampi kuin hereillä ollessa. Alpha-aktiivisuus vähenee siirryttäessä tason N1 uneen. [4]

Teräväksi aalloiksi kutsutaan suuren amplitudin negatiivisia aaltoja, joita havaitaan lyhyen aikaa siirryttäessä unen vaiheesta N1 vaiheeseen N2. Teräväksi aalto määritellään sen taipumisen kestäessä 70–200 millisekuntia. Vaiheen N2 tyypillisiä aaltoja ovat unisukkulat (sleep spindle). Nämä ovat 12–14 Hz sinivärähtelyjä, joiden kesto on 0,5–1,5 sekuntia. Unisukkuloita voi esiintyä vielä vaiheessa N3, mutta ei REM-unessa. K-kompleksi on korkean amplitudin kaksivaiheinen vähintään 0,5 sekuntia kestävä aalto, joka alkaa terävällä, negatiivisella jännitteellä ja jota seuraa positiivinen taipumaton hidas aalto. Terävät aallot

eroavat k-komplekseista kapeampina, ei kaksivaiheisina ja tavallisimmin matalammalla amplitudillaan. [4]

Unen syvetessä ilmenee hitaita aaltoja tai delta-aktiivisuutta. Nämä ovat korkean amplitudin laajoja aaltoja. Kun aivosähkökäyrässä on määritelty delta-aktiivisuus alle 4 hertsin aalloiksi, on hitaat delta-aallot määritelty unen tason määrittämistä varten alle 2 hertsin aalloiksi, joiden huipusta-huippuun-jännitteen tulee olla suurempaa kuin 75 mikrovoltia. Koska K-kompleksi muistuttaa sarjaa hitaita aaltoja, voi joissain tilanteissa olla haastavaa erottaa näitä kahta toisistaan.[4]

Saha-laita-aallot ovat lovettuja, rosoisia aaltoja theta-aktiivisuuden alueella. Saha-laita-aaltoja voi esiintyä REM-unessa. Ne eivät ole REM-vaiheelle vaatimuksena, mutta voivat olla apuna REM-vaiheen vahvistamisessa.[4]

2.2.1.2 EOG

EOG, eli silmien liikkeiden mittaaminen perustuu silmällä olevaan potentiaalieroon: silmän takaosa on negatiivisesti varautunut suhteessa etuosaan. Tämän standardoidun lähestymistavan silmien mittaukseen voivat kuitenkin sekoittaa silmien epäsymmetrinen liike tai tekosilmä. Silmien liikkeille on määritelty kaksi tyypillistä kuviota. Hitaita silmän liikkeet (SEM) ovat heilurimaisia, oskilloivia liikkeitä, joita havaitaan ennen nukahtamista ja tason N1 unessa. Siirtyessä unen tasolle N2, hitaita silmän liikkeitä ei enää yleensä havaita. Nopeat silmän liikkeet (REM) ovat terävämpiä ja niitä havaitaan tyypillisesti hereillä, sekä REM-unen aikana.[4]

Päätavoite silmien liikkeiden tallentamiseen on identifioida hereillä olon skannaavat tai lukevat silmän liikkeet, hitaat N1 vaiheen silmän liikkeet ja REM-unen aikaiset silmän liikkeet. Silmän liikkeet voidaan mitata silmän eri osien potentiaalieron ansiosta pintaelektrodeilla. Silmien liikkeet ovat tyypillisesti konjugoituja, jolloin molemmat silmät liikkuvat samanaikaisesti kohti yhtä elektrodia ja poispäin toisesta. [4]

2.2.1.3 EMG

Lihasten aktiivisuutta mitataan EMG:n avulla. Leuan alueen EMG perustuu jännitemittaukseen, joka tehdään kolmen elektrodin avulla. Elektrodit sijoitetaan kasvojen alueelle ja leuan alapuolelle, mentaaliseen ja submentaaliseen alueelle. Jännite mitataan kahden elektrodin väliltä. Jos näistä toinen pettää, voidaan se korvata kolmannella elektrodilla. Jännitevahvistus säädetään sellaiseksi, että jonkin verran aktiivisuutta havaitaan hereillä ollessa. [4]

Leuan alueen EMG on oleellinen osa REM-vaiheen identifioinnissa. REM-unessa leuan EMG heikkenee sen amplitudin ollessa sama tai pienempi kuin pienin EMG-amplitudi NREM-unessa. Leuan EMG voi saavuttaa REM-tason paljon ennen REM-vaiheen todellista alkua tai ilman että EEG:n REM-vaiheen kriteerit täyttyvät. Riippuen vahvistuksesta usein voidaan myös havaita EMG:n heikkeneminen nukahtaessa ja edelleen siirryttäessä vaiheesta N1 vaiheeseen N3. EMG:n heikkeneminen ei ole kuitenkaan kriteerinä vaiheille N2 ja N3. [4]

Lisäksi EMG:n avulla mitataan jalkojen liikkeitä. Mittaus tehdään sijoittamalla kaksi elektrodia molempiin jalkoihin, mitattavan lihaksen yläosaan n. 2–4 cm päähän toisistaan. Jalkojen lihasaktiivisuutta mittaamalla pyritään havaitsemaan merkittävät liikkeet, joista edelleen määritetään periodiset liikkeet. Jalkojen liikkeiden mittaamista hyödynnetään unihäiriöiden diagnosoinnissa. [4]

2.2.1.4 Vaiheiden erottaminen

Polysomnografiassa uni luokitellaan yleisimmin kappaleessa 2.1 kuvattuihin neljään vaiheeseen N1, N2, N3 ja REM, joiden lisäksi määritetään viidenneksi vaiheeksi valveillaolo.[3] Taulukossa 1 on esitetty unen vaiheiden mitattavia ominaisuuksia eri mittausmenetelmillä.

Vaihe	EEG	EOG	EMG
Hereillä (silmät auki)	Pienen jännitteen, korkean taajuuden vaimentunutta alfa-aktiivisuutta	Silmien räpäytyksiä, REM (nopeita silmän liikkeitä)	Suhteellisen korkea
Hereillä (silmät suljettuna)	Pienen jännitteen, korkean taajuuden vaimentunutta alfa-aktiivisuutta > 50 %	Hitaita silmän liikkeitä	Suhteellisen korkea
Taso N1	Pienen amplitudin vaihtelevan taajuuden alfa-aktiivisuutta < 50 %, ei unisukkuloita tai k-komplekseja	Hitaita silmän liikkeitä	Voi olla matalampi kuin hereillä
Taso N2	Vähintään yksi unisukkula tai k-kompleksi, < 20 % hitaiden aaltojen osuus	-	Voi olla matalampi kuin hereillä
Taso N3	> 20 % etupuolella hallitsevia hitaita aaltoja	-	Yleensä matala
REM	Matalan jännitteen vaihtelevan taajuuden aktiivisuutta, voidaan havaita sahalaita-aaltoja	Episodiset REM	Samaa tai matalampaa kuin matalin signaali NREM-vaiheissa

Taulukko 1. Unen vaiheiden havaittavat ominaisuudet eri mittausmenetelmillä. [4]

Valveillaolo voidaan edelleen jakaa mitattavien ominaisuuksien mukaan kahteen vaiheeseen, valveilla silmät auki ja silmät kiinni. Silmien ollessa auki EEG:ssä havaitaan korkean taajuuden ja matalan jännitteen alpha-aktiivisuutta. EOG-mittaus havaitsee tyypillisesti nopeita silmien liikkeitä ja leuan EMG-aktiivisuus on verrattain korkea, mahdollistaen erottamisen REM-vaiheen unesta. Silmien ollessa kiinni, EEG:ssä havaitaan merkittävää alpha-aktiivisuutta. EOG:lla havaitaan sekä nopeita, että hitaita silmien liikkeitä ja lihasjännitys on yleensä suhteellisen korkea. Jotta vaihe voidaan määritellä valveillaoloksi, täytyy jakson EEG-mittauksesta vähintään 50 % sisältää alpha-aktiivisuutta tai valveillaoloon varmuudella viittaavia havaintoja, kuten silmien räpäytyksiä, lukevia silmän liikkeitä, tai nopeita silmän liikkeitä yhdistettynä korkeisiin leuan EMG-mittauksen tuloksiin. [4]

Vaiheessa N1 EEG-mittauksessa havaitaan pienen jännitteen ja vaihtelevan taajuuden aktiivisuutta. Vaiheen määritetään olevan N1, jos alle puolet EEG:stä sisältää alpha-aktiivisuutta ja syvempien univaiheiden kriteerit eivät täyty. Vaiheessa N1 havaitaan usein hitaita silmän liikkeitä ja lihasaktiivisuus on samaa tai pienempää verrattuna valveillaoloon. Vertex-aallot tavallisesti ilmestyvät EEG-kuvaan tässä vaiheessa.[4]

Vaihetta N2 määrittävät K-kompleksien tai unisukkuloiden havaitseminen EEG:ssä. Lisäksi suurimman osan jaksosta EEG:n delta-aktiivisuuden täytyy olla alle 20 %. Silmien ei yleensä havaita liikkuvan lainkaan vaiheessa N2.[4]

Vaihe N3, eli syvä uni, määritetään hitaiden aaltojen osuuden EEG:n jaksosta ollessa enemmän kuin 20 %. Lisäksi voidaan havaita unisukkuloita. Leuan alueen lihasaktiivisuus on yleensä heikompaa kuin vaiheissa N1 ja N2.[4]

REM-unelle tyypillistä ovat matalan jännitteen ja vaihtelevan taajuuden EEG-aktiivisuus, nopeat silmien liikkeet ja suhteellisen matalan amplitudin leuan EOG. Lisäksi EEG:ssä voidaan havaita sahalaita-aaltoja. Ohimenevää lihasaktiivisuutta havaitaan EMG:ssä nopeina, epäsäännöllisinä purskeina, joiden kesto on yleensä alle 0,25 sekuntia.[4]

2.2.1.5 Haasteita

Polysomnografiassa unen mittaaminen tehdään yhden yön unen aikana. Mittaaminen vaatii unilaboratorion henkilökuntaa sekä mittaus- että analysointivaiheessa. Tämän vuoksi mittauksen hinta on korkea. Mittauksen ja tulosten analysoinnin korkean hinnan vuoksi pidempiaikaista unen seuranta polysomnografian avulla ei juuri tehdä.[11] Lisäksi haasteena on, että polysomnografia toteutetaan laboratorio-olosuhteissa. Tämä voi vaikuttaa potilaan unen laatuun, eivätkä mittaukset siksi aina kuvaa potilaan todellista unimallia. [12]

2.2.2 Uniapneamittaus

Uniapnea on yleinen unihäiriö, jonka esiintyvyys on n. 2–4 % keski-ikäisestä väestöstä. Uniapnean tyypillisiä oireita ovat väsymys päivisin ja unenaikaiset hengityksen häiriöt. Uniapnea voidaan todeta mittauksen avulla, ja uniapneamittaus onkin hyvin yleinen kliininen unen mittaus. [13]

Yleisimmin uniapneamittauksessa käytetty menetelmä on polysomnografia, josta on kerrottu luvussa 2.2.1. Mittaus on kuitenkin mahdollista toteuttaa myös kotimittauksena, joka perustuu ainoastaan hengityselinten ja sydämen mittauksiin. Mittaukseen sisältyy yleensä ilmavirran, hengitysvastuksen, happisaturaation ja sykkeen mittaukset. Kotimittauksen etuna on sen edullisuus, helppous ja mukautuvuus. Myös happisaturaation mittausta yksistään käytetään seulontatestinä sellaisten potilaiden tunnistamiseksi, joilla on riski merkittävään apneaan. Happisaturaatiomittausta ei kuitenkaan tulisi käyttää polysomnografian tai sydämen ja hengityselinten mittauksen korvaajana, sillä sen avulla kyetään tunnistamaan ainoastaan uniapnea, johon liittyy happisaturaation vajetta.[13]

2.3 Unen tutkimuksessa käytettävät menetelmät

Laboratoriossa toteutettavan unen mittaamisen lisäksi on nykyään olemassa suuri määrä erilaisia laitteita, joilla kuluttajat voivat mitata omaa unta ja joita käytetään enenevässä määrin myös tutkimuskäytössä. Kun polysomnografiassa mittaukset tehdään usealla sensorilla ja useista kehon eri osista, kuluttajille saatavissa olevissa laitteissa mittaustekniikka on tiivistetty pieneen laitteeseen kuten rannekkeeseen, kelloon, sormukseen tai unimaskiin. Laitteesta riippuen puettavassa elektroniikassa hyödynnetään unen mittaamiseen eri menetelmiä, kuten aktigrafiaa, fotopletysmografiaa, EEG:tä, lämpötilaa tai silmien liikkeitä.

Koska siirtymätilaa N1 on vaikeaa erottaa kevyen unen vaiheesta N2, puettavissa, unta mittaavissa laitteissa N1 ja N2 on yleensä yhdistetty yhdeksi vaiheeksi, jota kutsutaan kevyeksi uneksi.[3]

2.3.1 Fotopletysmografia

Fotopletysmografia (PPG) on edullinen jo 1930-luvulla kehitetty optinen menetelmä, joka hyödyntää valonläpäisyn muutoksia kudoksen veren määrän muutoksen havaitsemiseen. [14]–[16] Lähivuosikymmeninä tapahtunut kehitys puolijohdeteknologiassa, optoelektronikassa ja digitaalisessa signaalinkäsittelyssä on mahdollistanut myös PPG:n kehittymisen ja nykyään se onkin laajasti käytetty menetelmä kliinisessä monitoroinnissa. [16]

2.3.1.1 Toimintaperiaate

PPG perustuu valon emittoimiseen kudokseen ja kudoksesta pois tulevan valon absorbointiin. Valo emittoidaan tyypillisesti LED:llä (light emitting diode) ja takaisinheijastunut valo absorboidaan valon havaitsimen avulla. Valon havaitsimen spektristen ominaisuuksien tulee vastata emittoimiseen käytetyn valonlähteen ominaisuuksia. [16]

Fotopletysmografian toteutukseen on yleisesti käytössä kaksi tapaa. Ensimmäisessä tavassa valo johdetaan mitattavan kudoksen, kuten sormenpään tai korvalehden läpi. Tällöin mitattava kudokseksi asetetaan valonlähteen ja havaitsimen väliin. Toinen tapa on emittoida valoa kudokseen ja mitata kudoksesta takaisin heijastunut säteily. Molemmissa tavoissa havaitaan pieniä muutoksia havaitsimelle tulevassa valossa, jotka johtuvat mikroverenkierron muutoksista. Suurimmat intensiteettiin vaikuttavat tekijät ovat veren tilavuus, verisuonten seinämien liike ja punasolujen suuntautuminen. [16]

2.3.1.2 Unen mittaaminen

PPG on monipuolinen työkalu ja sitä voidaan käyttää laajasti monenlaisissa kliinisissä mittauksissa. [16] Unen mittaamisessa fotopletysmografiaa käytetään autonomisen hermoston muutosten, kuten pulssin ja pulssivaihtelun, sekä hengityksen mittaamiseen. Lisäksi voidaan mitata myös veren happipitoisuutta. Unta mitattaessa käytetään edellisessä kappaleessa kuvatuista menetelmistä jälkimmäistä [3], [9], [15]

Sykevaihtelun hyödyntämistä unen vaiheiden määrittämisessä tutkitaan paljon. On todettu, että autonomisen hermoston aktiivisuus korreloi unen vaiheiden etenemisen kanssa läpi unen ja siten autonomisen hermoston muutoksia voidaan käyttää unen vaiheiden arvioimiseen.[3], [6]

2.3.1.3 Haasteita

Fotopletysmografian haasteena puettavassa elektronikassa on ylimääräinen ympäristöstä, mitattavan henkilön ominaisuuksista, fysiologisista tekijöistä ja laitteen ominaisuuksista aiheutuva kohina. Epätarkkuuksia ja vaihtelevuutta mittaukseen voivat aiheuttaa esimerkiksi mittauksen kohteiden ihonväri, lihavuus, ikä ja sukupuoli, mittauslaitteen sijainti kehossa, kehon lämpötila, ulkopuolinen valo, ihoon kohdistuva ulkopuolinen paine ja mittauslaitteen liikkuminen suhteessa ihoon. Laboratorio-olosuhteiden ulkopuolella tapahtuvassa mittauksessa näitä ympäristön aiheuttamia häiriötekijöitä ei ole mahdollista välttää. [14]

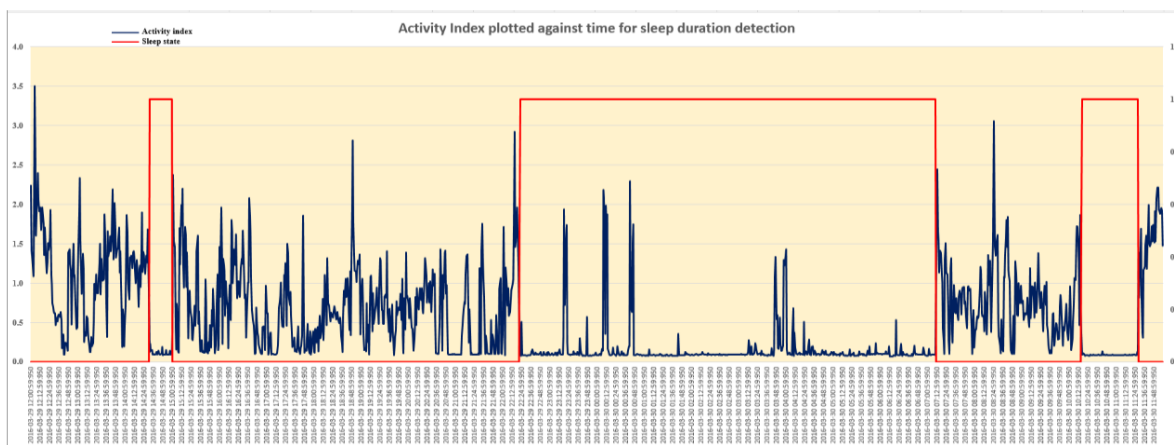
2.3.2 Aktigrafia

Aktigrafia on polysomnografian ohessa toinen kliiniseen käyttöön hyväksytty unen mittaamisen menetelmä, jolla useimmiten määritetään vain kaksi unen vaihetta, valveilla ja unessa. Pieni koko, käytännöllisyys ja vedenkestävyys mahdollistavat aktigrafian laitteiden käyttämisen arkielämän olosuhteissa. Tämän ansiosta laitteita on mahdollista hyödyntää pidempiaikaisessa seurannassa ja tutkimuksessa laboratorio-olosuhteiden ulkopuolella.[11], [17], [18] Kliinisen käytön lisäksi aktigrafiaa hyödynnetään myös valtaosassa unta mittaavista kuluttajilla saatavissa olevista laitteista.

2.3.2.1 Toimintaperiaate

Aktigrafia perustuu raajojen liikkeiden mittaamiseen kiihtyvyyssanturin avulla. Useimmiten mittaus toteutetaan puettavalla, ranteen liikkeitä mittaavalla laitteella. [11], [17], [18] Laitteen kiihtyvyyssanturi havaitsee muutokset liikkeessä useissa eri suunnissa (esimerkiksi 3-akselisesti) ja tuottaa havaitun liikkeen perusteella digitaalisen signaalin. Signaali kertoo liikkeen eli aktiivisuuden määrän. Aktigrafiaassa unen vaiheen määrittäminen perustuu siihen olettamukseen, että liike merkitsee tilaa hereillä ja liikkeettömyys unta. Mitattu jakso määritetään digitaalisen signaalin perusteella olevan joko unessa tai hereillä, riippuen siitä ylittääkö havaittu aktiivisuus hereillä olemiseen vaadittavaksi määritetyn kynnyksen. [11]

Kuvassa 2 on esitetty aktigrafian avulla mitatut tulokset 24 tunnin ajalta alkaen iltapäivästä päättyen seuraavan päivän iltapäivään. Sininen signaali kuvaa laitteen mittaamaa aktiivisuutta ja punainen viiva esittää unen vaihetta. Kuvaajan oikean laidan akselin arvo 0 tarkoittaa tilaa hereillä ja 1 unta. Unen vaiheet on määritetty kuvaajasta älykkäällä unen keston tunnistavalla algoritmilla. [19]



Kuva 2. Aktiivisuus ja unen vaiheet aktigrafialla mitattuna [19]

2.3.2.2 Tarkkuus ja haasteet

Tutkimusten mukaan aktigrafialla kyetään saavuttamaan suuri herkkyys (kyky havaita todellinen uni) ja suuri tarkkuus (kyky havaita sekä todellinen herääminen, että uni), mutta korkean spesifisyyden (kyky havaita todellinen herääminen) saavuttaminen on haasteellista,

koska laitteilla ei kyetä tunnistamaan vaihetta, jossa ollaan hereillä liikkumatta. [11], [20] Aktigrafian onkin todettu usein yliarvioivan unen määrää suhteessa hereillä oloon. [18] Eri tutkimusten mukaan spesifisyys vaihtelee välillä 26,9–80 %, riippuen kohderyhmästä ja tutkimuksesta. [11] Matalasta spesifisyydestään huolimatta aktigrafia on kliiniseenkin käyttöön hyväksytty unen mittaamisen menetelmä polysomnografian rinnalla.

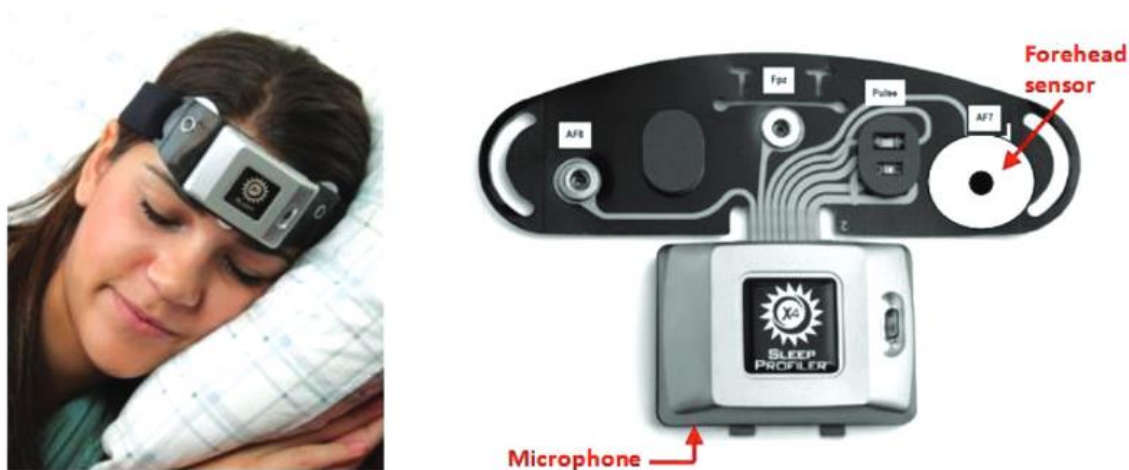
Tutkimuksissa on myös havaittu negatiivinen korrelaatio herkkyyden ja spesifisyyden välillä. Muuttamalla hereillä olon määrittämiseen vaadittavan aktiivisuuden kynnystä pienemmäksi saadaan hereillä olemisen havaitsemista tarkemmaksi, eli spesifisyys kasvaa. Tällöin kuitenkin kyky havaita todellinen uni, eli herkkyys, pienenee. Vastaavasti kasvattamalla kynnystä voidaan kasvattaa herkkyyttä pienentäen kuitenkin samalla spesifisyyttä. Tätä ominaisuutta voidaan hyödyntää tutkimuksessa painottamalla haluttua ominaisuutta riippuen tutkimuksen tavoitteesta ja tutkimuskohteesta. [11]

Lisäksi luotettavaa aktigrafiaan perustuvaa mittausta haastaa kliinisten laitteiden hinta. Tutkimustason laitteet ovat kalliita, eikä asetusten ja mittausdatan analysointiin käytettävien algoritmien valintaan ole yksimielisyyttä. Suurimmat kliinisen aktigrafian käyttöä rajoittavat tekijät tällä hetkellä ovatkin sen hinta ja datan prosessoinnin haasteet. [11]

2.3.3 Pään alueen mittaukset

Fotopletysmografian ja aktigrafian lisäksi on olemassa myös pään alueen muutoksiin perustuvia unen mittaamisen menetelmiä. Markkinoilla on erilaisia EEG:tä mittaavia laitteita, joissa hyödynnetään lisäksi usein myös EOG:tä ja EMG:tä. [21]–[23] Aivosähkökäyrän mittauksiin perustuvien laitteiden lisäksi aivojen muutosten havaitsemiseen perustuvaa unen mittausta tehdään NIRS-tekniikan avulla. [24]

2.3.3.1 EEG, EOG ja EMG

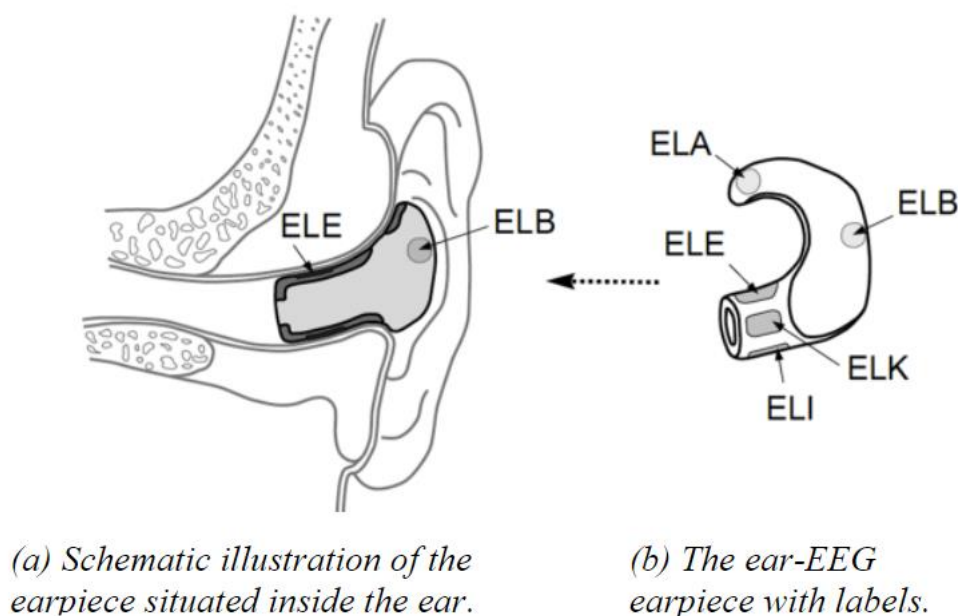


Kuva 3. Kuva aivosähkökäyrää mittaavasta Sleep Profiler -laitteesta käytössä ja sen elektrodien asettelusta [21]

Puettavat, aivosähkökäyrää mittaavat kaupalliset laitteet käyttävät mittaamiseen samankaltaisia menetelmiä kuin kliiniseen mittaukseen käytetyt laitteet. Tutkimukset ovatkin osoittaneet, että puettavan elektronikan laitteiden avulla toteutettavan mittauksen päästään parhaimmillaan hyvin lähelle kliinisten laitteiden tarkkuutta. Esimerkiksi Sleep Profiler -laitteella toteutetussa tutkimuksessa laitteella on todettu olevan hyvät mahdollisuudet täydentää ja jopa haastaa unen mittauksen kliinisiä menetelmiä.[21], [22] Joissain tutkimuksissa on kuitenkin vastaavasti todettu tutkittujen laitteiden häviävän edelleen selvästi kliinisille laitteille mittauksen tarkkuudessa. Pääsyyinä epätarkkuuteen voivat olla esimerkiksi signaalin laadun heikkous ja unen analysoinnin algoritmit. [23] Markkinoilla olevien laitteiden mittaustarkkuudessa ja tulosten luotettavuudessa on siis suuria eroja.

Toimintaperiaate EEG:n mittaamiseen perustuvassa unen mittauksessa on pitkälti sama kuin polysomnografian aivosähkökäyrän mittaamisessa. Mittaus tapahtuu pään alueelta ihoa vasten asetettujen elektrodien avulla. Elektrodit mittaavat aivojen sähköistä aktiivisuutta ja aivosähkökäyrä määritetään mitatun signaalin ominaisuuksien mukaan. Mittaus voidaan tehdä kolme-kanavaisesti, jolloin saadaan eriteltyä EEG-, EOG- ja EMG-signaalit. Mitatuista signaaleista voidaan havaita unen eri vaiheille tyypillisiä signaalimuotoja, joiden perusteella tehdään unen vaiheiden määrittys. [21], [22]

Yleinen tapa aivosähkökäyrän mittauksen toteutukseen puettavalla elektronikalla on tehdä mittaus otsalta tai muualta pään alueelta ihoa vasten asetettavien elektrodien avulla. Aivosähkökäyrää on myös mahdollista mitata korvan kautta. Korvan EEG-mittauksessa elektrodit sijaitsevat laitteessa, joka asetetaan korvakäytävään. Korvan kautta toteutettavan mittauksen etuna on käyttömukavuus ja elektrodien paikallaan pysymisen varmuus hyvän istuvuuden ansiosta. [12] Kuvassa 4 on esitetty korvan kautta aivosähkökäyrää mittaava laite. Kuvan 5 kohdassa a) ELE ja ELB ovat EEG:tä mittaavia elektrodeja.



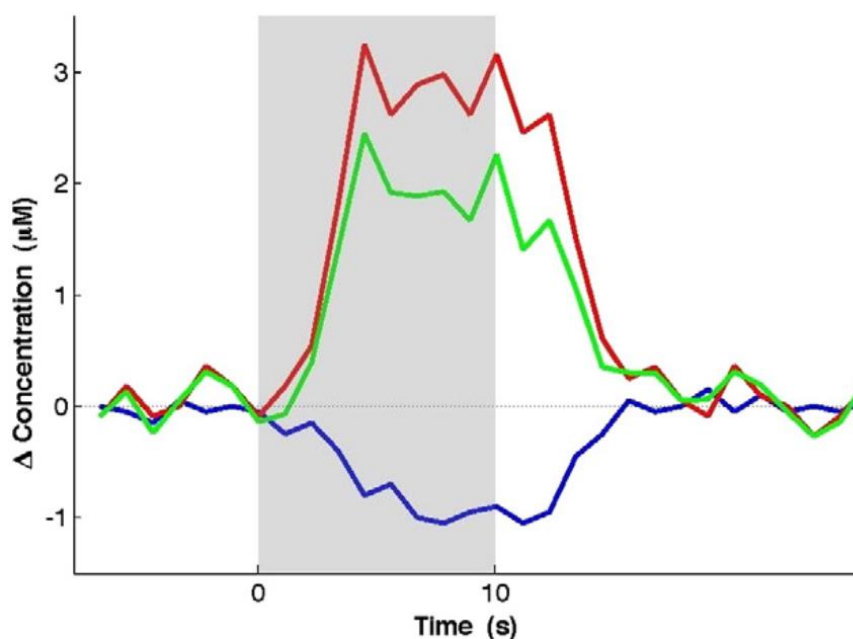
Kuva 4. Havainnekuva korvan EEG-mittaukseen käytettävästä laitteesta [12]

2.3.3.2 NIRS

NIRS (Near-Infrared Spectroscopy) on suosiotaan nostava toiminnallinen kuvantamismenetelmä, joka on nykyään laajasti käytössä aivojen kuvantamista hyödyntävissä

käyttötarkoituksissa. Menetelmän suosioon vaikuttavia tekijöitä ovat sen suhteellisen korkea ajallinen resoluutio, tunkeilemattomuus, alhaiset kustannukset, siirrettävyys ja suhteellinen herkkyys kohteen liikkeille. [24] NIRS-tekniikka perustuu ihmisen kudosten ominaisuuteen olla suhteellisen läpäisevä lähi-infrapuna-aallonpituuksilla olevalle säteilylle (650–1000 nm). Kudokseen emittoitu NIR-valo joko absorboituu pigmentoituneisiin yhdisteisiin tai siroaa kudoksissa. Valon tunkeutumisen kudokseen mahdollistaa siroamisen n. 100 kertaa suurempi todennäköisyys suhteessa absorptioon. NIRS:n peruseriaate on valon emittoiminen kudokseen ja takaisin tulevan vaimentuneen valon havaitseminen. NIR-valon suhteellisen korkean vaimenemisen kudoksessa aiheuttaa mikroverenkierron pienissä verisuonissa (halkaisijaltaan < 1 mm) sijaitseva hemoglobiini. NIRS on herkkä yli 1 mm halkaisijaltaan oleville verisuonille, koska ne absorboivat valon kokonaan. Hemoglobiinin absorptiospektri riippuu sen happipitoisuudesta, mitä hyödynnetään NIRS-mittauksessa aivojen hemoglobiinin happipitoisuuden määrittämiseen. [24], [25] NIRS-tekniikan toteutukseen on olemassa kolme menetelmää, jatkuva-aaltainen (CW), taajuusalainen (FD) ja aika-alainen (TD) menetelmä. Käytetyin menetelmä on jatkuva-aaltainen menetelmä sen pienten kustannusten ja mukautuvien ominaisuuksien vuoksi. [24] Jatkuva-aaltoisella menetelmällä ei tosin saada yhtä tarkkoja mittaustuloksia kuin kahdella muulla menetelmällä. [25]

Kuvassa 5 on esitetty tyypillinen aivokuoren aktivaatio NIRS-tekniikalla mitattuna. Punainen käyrä kuvaa hapellisen hemoglobiinin määrää, sininen viiva hapettoman hemoglobiinin määrää ja vihreä viiva hemoglobiinin kokonaismäärää. [25]



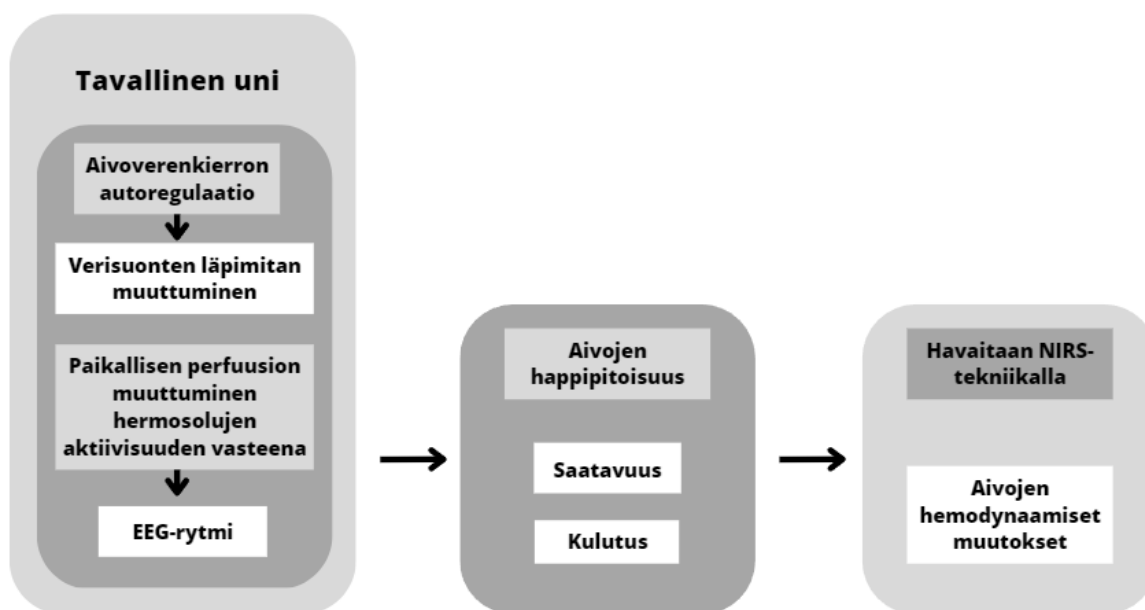
Kuva 5. Luonnos tyypillisestä aivokuoren aktivaatiosta NIRS-tekniikalla mitattuna. [25]

Edellisten vuosikymmenten aikana univaiheisiin liittyviä hermostomekanismeja ja patofysiologisia unihäiriöihin liittyviä mekanismeja on tutkittu funktionaalisen neurokuvantamisen avulla. Tutkimusten avulla on saatu tietoa hemodynaamiikkaan liittyen aivojen aineenvaihdunnasta, hermosolujen toiminnasta ja vasomotorisesta aktiivisuudesta. Funktionaalisen neurokuvantamisen menetelmillä on kuitenkin rajoitteensa ja NIRS onkin nyt havaittu kilpailukykyiseksi tekniikaksi niin neurokuvantamiselle, kuin EEG-mittauksellekin unen mittaamisessa. NIRS:n avulla toteutettujen hemodynaamisten muutosten mittausten on todettu olevan riittävän tarkkoja unen mittaamiseen verrattuna neurokuvantamisen avulla

toteutettuihin mittauksiin. [24] NIRS-tekniikalla voidaan havaita aivojen hemodynaamikasta aiheutuvia matalataajuisia värähtelyjä, jotka tarjoavat lisätietoa unen neurologian ymmärtämiseksi. Näitä hemodynaamisia värähtelyjä ei kyetä havaitsemaan EEG:n avulla, minkä vuoksi NIRS-tekniikkaa voidaankin käyttää EEG:n ohessa luomaan kattavampaa kuvaa unen aikaisesta aivotoiminnasta. [24], [26]

NIRS-tekniikkaa voidaan hyödyntää sekä unen vaiheiden erottamisessa, että uniongelmien havaitsemisessa. Kuten kappaleessa 2.1 todettiin, unen vaiheisiin liittyy muutoksia hermotoiminnassa ja aivojen aktiivisuudessa. Unen vaiheiden määrittäminen NIRS:n avulla perustuu näihin aivotoiminnan muutoksiin liittyvien aivojen hapentarpeen ja hapensaannin muutosten mittaamiseen. Uniapneaa mitataan NIRS-tekniikalla hengitykseen ja sen häiriöihin liittyvien veren happipitoisuuden muutosten kautta. Aivojen hapetuksen muutokset unen hengityshäiriöiden aikana mahdollistavat hengityshäiriöiden havaitsemisen NIRS:n avulla. [24]

Kuvassa 6 on esitetty aivojen hemodynaamisiin muutoksiin tavallisessa unessa vaikuttavia tekijöitä havainnollistavan diagrammin avulla. Tavallisessa unessa NIRS:n vaihteluihin vaikuttaa monimutkainen aivoverenkierron säätelymekanismi. Lisäksi muutosten NIRS-mittauksessa voidaan todeta olevan yhteydessä EEG-rytmiin. Hemodynaamiikkaan voivat vaikuttaa kaaviossa esitettyjen asioiden lisäksi sydämen lyöntitiheys, verenpaine ja pulssin happisaturaatio, mutta näiden vaikutuksista tarvitaan lisää tutkimusta. [24]



Kuva 6. Aivojen hemodynaamiset muutokset tavallisen unen aikana. [24]

Tämän hetken näkymä unen mittaamiseen NIRS:n avulla on lupaava, mutta haasteita on edelleen olemassa. Hapen saatavuuden, kulutuksen ja läpivirtauksen välisiä suhteita ei edelleenkään tunneta ja siksi hemodynaamiseen aktiivisuuteen liittyviä eri toiminnallisuuden monimutkaisia vuorovaikutuksia tulisi tutkia lisää. [24]

2.4 Datan analysointi

Mittaamisen jälkeen tehdään unen analysointi kerätyn mittausdatan perusteella. Tämä tehdään joko käymällä data läpi ja tekemällä luokittelu manuaalisesti, tai kuten kuluttajalle

saatavissa olevien laitteiden tapauksessa, datan läpikäymisen ja unen luokittelun eri vaiheisiin hoitaa valmiiksi koodatut algoritmit. [3] Pisteyttäminen on hyvin merkittävässä osassa unen mittaamisen prosessia, sillä sen perusteella mittausdataa voidaan analysoida ja saada sen sisältämä tieto merkitsevään muotoon. On myös todettu, että kehittyneemmällä pisteyttämisen algoritmeilla voidaan saada samasta mittausdatasta tarkempia tuloksia. [27]

2.4.1 Manuaalinen pisteytys

Unen manuaalinen pisteyttäminen on perinteisesti laboratoriomittauksissa käytetty menetelmä, jossa pisteyttäminen ja unen jakaminen vaiheisiin tapahtuu vasta kun kaikki mittausdata on kerätty. Manuaalinen pisteytys tapahtuu yleensä AASM (American Academy of Sleep Medicine) standardin mukaan, jossa uni jaetaan 30 sekunnin jaksoihin (epoch) ja jokainen jakso pisteytetään erillisenä. [3], [8], [11] Unen vaiheet määritetään identifioimalla mittausdatasta visuaalisesti spesifisiä eri vaiheisiin liittyviä ominaisuuksia, kuten esimerkiksi K-kompleksit, unisukkulat tai hitaiden aaltojen prosentuaalinen osuus jakson pituudesta. [11] Koska manuaalisen pisteyttämisen toteuttaminen vaatii ammattilaisen, on se unen pisteyttämisen menetelmänä automaattiseen pisteyttämiseen verrattuna kallis. [11], [28]

2.4.2 Automaattinen pisteytys

Unen automaattista pisteyttämistä on tutkittu ja viime vuosikymmenen aikana paljon ja sen toteuttamiseen on esitetty useita erilaisia menetelmiä. Polysomnografian mittauksiin liittyvien olemassa olevien automaattisten pisteyttämistapojen käyttämät menetelmät vaihtelevat paljon ja niiden tarkkuus on välillä 75–95 % verrattuna manuaaliseen pisteyttämiseen. [29] Puettavan elektroniikan laitteiden keräämä datan laatu vaihtelee ja näin ollen myös datan analysointiin käytettävät algoritmit ovat laitteesta riippuvaisia. Kaupallisten laitteiden mittaukseen perustuvan automaattisen unen pisteyttämisen on todettu saavuttavan kiitettäviä tuloksia niin sykevaihteluun perustuvassa, aivosähkökäyrää mittaavissa kuin aktigrafiaa hyödyntävissä laitteissakin. [3], [5], [7], [17], [20], [21], [27] Automaattisen unen pisteyttämisen on jopa esitetty voivan olla parempi menetelmä manuaaliseen pisteytykseen verrattuna. [21]

3 UNEN SEURANTA KOTIMITTAUKSESSA

Unen mittaukseen ja seurantaan on kehitetty suuri määrä kaupallisia menetelmiä ja laitteita. Tässä luvussa esitellään yleisiä kaupallisia mittauslaitteita ja niiden keskeisimpiä ominaisuuksia. Lisäksi käsitellään lyhyesti kaupallisten laitteiden haasteita unen mittauksessa.

3.1 Sormukset

3.1.1 *Oura-ring*

Oura-ring on unta, aktiivisuutta ja palautumista mittaava sormus, joka lupaa tarjota sovelluksen välityksellä käyttäjälleen yksilöllistä opastusta elämäntapoihin. Oura-ring mittaa käyttäjän sormesta sydämen sykettä, sykevaihtelua, liikkeitä, veren happisaturaatiota, sekä ihon lämpötilaa. Happisaturaation ja sykkeen mittaus toteutetaan LED-antureiden ja infrapuna-antureiden avulla. Lisäksi sormus sisältää ihon lämpötilaa mittaavan lämpötila-anturin, fotodiodeja sekä liikkeitä mittaavan kiihtyvyyssanturin. [30]

3.2 Kellot ja rannekkeet

3.2.1 *MotionWatch 8*

MotionWatch 8 on Actiwatch sarjan uusien, lääketieteellisen luokan aktigrafiaan perustuva kello, jonka avulla voidaan mitata unta, vuorokausirytmisiä ja fyysistä aktiivisuutta. Kello mittaa käyttäjänsä liikkeitä 3-akselisen kiihtyvyyssensorin avulla. Lisäksi kellossa on valoanturi, joka havainnoi ympäristön valoisuutta ja käyttää tietoa vuorokausirytmien analysoinnissa. [31]

3.2.2 *Fitbit*

Fitbit valmistaa unta ja aktiivisuutta mittaavia aktiivisuusrannekkeita ja älykelloja. Fitbitin yksi uusimmista aktiivisuusrannekkeista on Fitbit Charge 5, joka lupaa tarjota käyttäjälleen kattavasti tietoa mm. unesta ja sen laadusta, terveydentilasta ja aktiivisuudesta perustuen sykkeen, sykevaihtelun, liikkeiden, lämpötilan ja veren happisaturaatioiden mittaukseen. Charge 5 käyttää sykkeen mittaamiseen optista sensoria ja liikkeen mittaamiseen 3-akselista kiihtyvyyssanturia. Lisäksi laitteessa on punavaloa ja infrapunavaloa hyödyntävät sensorit happisaturaation mittaamiseen, lämpötila-anturi ihon lämpötilan mittaamiseen, sekä valoanturi valaistuksen mittaamiseen. [32]

3.2.3 *Activinsights Band*

Activinsights Band on suunniteltu kliiniseen ja tutkimuskäyttöön auttamaan terveydenhuollon ammattilaisia pitkäaikaisessa elämäntapa-analyysissä. Laite lupaa tarjota automatisoituja, objektiivisia raportteja käyttäjänsä elämäntavasta. Laitteen avulla voidaan havaita urheilusuoritus, aktiivisuus, uni, sekä inaktiivinen istuminen ja makoilu. Activinsights Bandin mittaus perustuu aktigrafiaan. [33]

3.2.4 *GENEactiv*

GENEactiv on toinen Actininsightsin tuottama aktigrafiaan perustuva laite, joka on suunniteltu erityisesti tutkimus- ja kliiniseen käyttöön. GENEactiv on tehty Ison-Britannian lääketieteellisten standardien mukaan ja aktigrafian lisäksi se mittaa myös ympäristön valoa ja lämpötilaa. Ranteen lisäksi laitetta voidaan käyttää myös käsivarressa, selässä ja jalassa. GENEactiv tarjoaa datan filttöimättömänä raakadatan, minkä vuoksi sitä voidaan käyttää esimerkiksi kehittämään koneoppivia datan analysointimalleja. Laitteen tarjoama raakadata mahdollistaa myös sen hyödyntämisen erilaisissa tutkimustarkoituksissa. [34]

3.3 Pään aluetta mittaavat laitteet

3.3.1 *Neuroon*

Neuroon on kuluttajan käyttöön suunniteltu kasvomaski, joka lupaa käyttäjälleen unen mittaamisen ja seurannan lisäksi mahdollisuuden unen A/B-testaamiseen, selkounistimulointia, sekä meditaatio-ominaisuuden. Laitteen toiminta perustuu pääosin aivosähkökäyrän mittaamiseen. EEG-mittauksen lisäksi Neuroon mittaa myös EOG:ta, veren happipitoisuutta, ihon lämpötilaa, sykettä ja liikkeitä. EEG-mittaus tapahtuu EEG-sensorin ja EOG-mittaus EOG-sensorin avulla. Happipitoisuuden mittaukseen käytetään infrapuna-alueella toimivaa lediä. Lisäksi maskissa on liikkeiden mittaamiseen 3-akselinen kiihtyvyysanturi, sekä lämpötilamittarit ihon lämpötilan mittaukseen. [35]

3.3.2 *Sleep Profiler*

Sleep Profiler on tutkimus- ja kliiniseen käyttöön suunniteltu aivosähkökäyrän mittaukseen perustuva unta mittaava laite. Laite mittaa EEG-, EOG- ja EMG-signaaleja unen analysointia varten. Näiden lisäksi laitteella voidaan valinnaisesti mitata myös submentaalisen alueen EMG-signaalia tai ECG-signaalia, sykettä, pään asentoja, pään liikkeitä ja kuorsauksia. [36] Sleep Profiler käyttää EEG:n mittaamiseen 3-kanavaista EEG-sensoria, sykkeen mittaamiseen infrapuna-alueella toimivaa lediä, liikkeen mittaamiseen 3-akselista kiihtyvyysanturia, sekä kuorsauksen havaitsemiseen akustista mikrofonia. EMG:n ja ECG:n mittaukseen laitteessa on liitännät erillisille sensoreille. [37] Laitteesta on olemassa myös uniapneaa mittaava versio Sleep Profiler PSG2, joka mittaa edellä mainittujen lisäksi ilmavirtaa, happisaturaatiota ja hengitysvastusta. [37], [38]

3.4 Makuualustaan integroidut sovellutukset

3.4.1 *Withings Sleep Analyzer*

Withings Sleep Analyzer on patjan alle asetettava unta mittaava laite, joka lupaa käyttäjälleen tiedon unen kestosta, nukahtamis- ja heräämisajoista, uniapneajaksoista, unen vaiheista, sykkeestä, kuorsauksesta ja pisteyttää unen. Sleep Analyzerin unen mittaus perustuu sykkeen, liikkeiden ja hengityksen mittaamiseen. Pneumaattinen sensori mittaa

hengitystiheyttä, kehon liikkeitä, sekä hengitystiheyttä ballistografian avulla. Lisäksi laitteen mikrofoni havaitsee kuorsauksen ja hengityksen katkeamisen äänen perusteella. [39]

3.4.2 *Emfit QS*

Emfit QS on ballistografiaan perustuva, patjan alle asetettava unta mittaava laite. Emfit tarjoaa laitettaan sekä yksityis-, että kliniseen käyttöön. Laitteen mittaus perustuu ballistografian avulla toteutettavaan sykkeen ja sykevaihtelun, hengityksen, sekä liikkeiden mittaamiseen. Yksityiskäyttöön suunniteltu Emfit QS tarjoaa käyttäjälleen tietoa unesta, sen laadusta, sekä palautumisesta käyttöliittymänä toimivan sovelluksen kautta. Kliinisessä käytössä laite tarjoaa kattavampaa dataa. Unen vaiheiden määrittämiseen käytettävän datan (syke, hengitystaajuus, liikkeet) laite lähettää 4 sekunnin välein. Sykevaihtelu ja unen tasot 30 sekunnin jaksoihin määritettynä lähetetään 3 minuutin välein. Näiden lisäksi laitteesta saadaan päästökaistasuodatettu ballistografinen signaali. [40]

3.5 Älypuhelinsovellukset

Kaupallisten laitteiden lisäksi unen mittaukseen on kehitetty myös älypuhelimien kautta unta mittaavia sovelluksia. Seuraavissa kappaleissa esitellään kaksi suosittua unen mittaamisen sovellusta.

3.5.1 *SleepScore*

SleepScore on sekä android- että IOS-puhelimille saatavilla oleva unta mittaava sovellus. Sovellus perustaa mittauksensa älypuhelimien mikrofoniin tallentamiin audiosignaaleihin. Audiosignaalin perusteella sovellus lupaa havaita hengitystaajuuden ja kehon liikkeitä. Näiden avulla sovellus pisteyttää unen, määrittää sen keston, sekä erittelee nukahtamisajan, kevyen unen, syvän unen, REM-unen ja hereillä olon kestot. [41]

3.5.2 *Sleep Cycle*

Kuten edellisessä kappaleessa käsitely SleepScore, on myös Sleep Cycle android- ja IOS-puhelimille saatavilla oleva unen mittaamisen sovellus. Myös Sleep Cycle perustaa mittauksensa puhelimen mikrofoniin tuottamaan audiosignaaliin. Signaalin perusteella sovellus pisteyttää unen, määrittää sen keston, sekä erittelee unen vaiheet. [42]

3.6 Haasteita

Unen mittaamisen tavoitteena puettavan elektroniikan avulla on saavuttaa antureiden ja laitteiden riittävän pieni ja häiritsemätön koko, mutta säilyttää samanaikaisesti mahdollisimman tarkat mittaustulokset. [2] Laitteissa onkin yleensä suuri määrä yksinkertaisen kuoren ja helppokäyttöisyyden sisään piilotettua kompleksisuutta ja tämän johdosta laitteita on helppo käyttää tutkimuksissa väärin ja tehdä virheellisiä tulkintoja niiden mittaustuloksista. Laitteiden hyödyntämisessä tutkimuskäytössä tulisikin muistaa ja huomioda, että kuluttajan käyttöön suunnitellut laitteet ovat kaupallisia laitteita, jotka eivät ole erityisesti suunniteltuja tutkimus- tai kliniseen käyttöön. [11], [43]

Myös ihmisten väliset erot voivat vaikuttaa unen mittaamisen tarkkuuteen. Esimerkiksi ihmisen iän, sukupuolen ja unen rakenteen vaikutusta unen mittauksen tarkkuuteen on tutkittu.

Iän ja unen rakenteen on todettu mahdollisesti vaikuttavan mittaukseen, mutta niitä on haastavaa huomioida mittausta tehdessä. Jotta ihmisten välisten eroavaisuuksien vaikutuksista puettavan elektronikan laitteiden mittaustarkkuuteen saataisiin kattavampaa ja tarkempaa tietoa, tulisi sitä tutkia lisää. Näiden lisäksi haasteena puettavalla elektronikalla tehtävissä mittauksissa on vaihtelevat ympäristön olosuhteet. Häiriöitä mittauksessa voivat aiheuttaa esimerkiksi mittauslaitteiden liikkuminen suhteessa ihoon, tai ympäristön lämpötilan vaihtelut. [11], [43]–[45]

4 POHDINTA

Tässä luvussa pohditaan unen mittaamista puettavan elektroniikan avulla ja sen merkitystä yksilön ja yhteiskunnan tasolla laajemmasta näkökulmasta.

4.1.1 Nykyhetki ja tulevaisuus

Unen mittaamiseen on olemassa valtavan suuri määrä sekä kliinisiä, että kuluttajan käyttöön suunniteltuja erilaisia menetelmiä ja laitteita. Kaupallisten, puettavan elektroniikan laitteiden tarkkuutta ja mahdollisuuksia on tutkittu paljon ja tutkimuksilla on osoitettu, että laitteilla on mahdollista saavuttaa kiitettäviä, parhaimmillaan jopa laboratoriomittausten tarkkuutta lähestyviä mittaustuloksia.

Puettavan elektroniikan laitteita tutkittaessa on usein vertailukohtana niin kutsuttu unen mittaamisen kultainen standardi, polysomnografia, ja tutkimuskysymyksenä on selvittää laitteiden tarkkuuden riittävyttä kliinisiin mittauksiin. Tällainen tutkimus on tarpeen laitteiden kliinisen käytön mahdollisuuksien ja mittaustarkkuuden selvittämiseen. Tilaa olisi kuitenkin myös tutkimuksille, joiden tavoitteena on tutkia puettavan elektroniikan käyttömahdollisuuksia yksilön elämäntapaohjauksessa ja unen mittauksen merkitystä unikäyttäytymisen parantamisessa.

Puettavan elektroniikan kaupallisten laitteiden hyödyntämisen mahdollisuudet ovat suuret. Kun unta voidaan mitata arkielämän olosuhteissa ja jatkuvasti, mahdollistaa se myös suurten datamäärien keräämisen. Kun dataa on mahdollista kerätä suuria määriä suurilta joukoilta ihmisiä, on sen perusteella mahdollista myös toteuttaa entistä laajempia unen ja unikäyttäytymisen tutkimuksia. Lisäksi suuri datamäärä mahdollistaa myös unen pisteyttämisen algoritmien kehittämisen koneoppimisen avulla. Koneoppimista hyödynnetään unen pisteyttämisessä jo nyt, mutta datamäärän kasvaessa voitaisiin päästä entistä tarkempiin tuloksiin.

Varsinaisen unen pisteyttämisen ja unijaksojen tunnistamisen lisäksi kaupalliset laitteet tarjoavat jo nyt käyttäjälleen elämäntapaohjausta ja parempaa unikäyttäytymistä tukevia ohjeita. Laitteiden algoritmeja tulisikin kehittää niin, että ne voisivat analysoida käyttäjänsä elämäntapoja kokonaisvaltaisemmin ja entistä tarkemmin ja tarjota tämän perusteella entistä parempia ja yksilöllisempiä ohjeita ja apua terveyden edistämiseen.

Laajemman unitutkimuksen lisäksi puettavaa unta mittaavaa elektroniikkaa voidaan hyödyntää myös erilaisissa arkielämän tilanteissa. Esimerkkinä unen mittaamisen mahdollisesta hyödyntämisestä arjessa voisi olla auton rattiin nukahtamisen havaitseminen. Rattiin nukahtamisen havaitsemisen on todettu olevan mahdollista aivosähkökäyrää mittaavan laitteen avulla. Menetelmän käyttöön ottaminen tosielämään vaatii kuitenkin vielä lisää tutkimusta ja menetelmien kehittymistä. [46] Rattiin nukahtamisen tunnistaminen on vain yksi unen mittaamisen mahdollinen käyttökohde, ja mahdollisuudet erilaisiin sovellutuksiin ovat suuret.

5 YHTEENVETO

Unen mittaamiseen on nykyaikana suuri määrä sekä kliinisiä, että tutkimuskäytössä olevia menetelmiä. Yleisin kliinisessä käytössä oleva menetelmä on polysomnografia, joka on monisensorinen, laboratorio-oloissa toteutettava, yleensä yhden yön aikainen unimittaus. Polysomnografia tallentaa tyypillisesti aivosähkökäyrää (EEG), silmien liikkeitä (EOG), lihasten aktiivisuutta (EMG), sydämen signaaleja (EKG), hengitystä ja hengitysvastusta, veren happipitoisuutta, raajojen liikkeitä ja kuorsausta. Polysomnografian lisäksi toinen unen mittaamisen kliinisenä menetelmänä käytetty mittaus on uniapneamittaus, jonka avulla pyritään havaitsemaan uniapnea. Uniapneamittaus voidaan toteuttaa myös kotiolosuhteissa. Unen mittauksen tutkimusmenetelmiä ovat valon ominaisuuksiin perustuva fotopletysmografia, liikkeiden havaitsemiseen perustuva aktigrafia, sekä pään alueen signaalien, kuten aivosähkökäyrän mittaamiseen perustuvat spesifit laitteet.

Unen mittaamisen jälkeen tapahtuu datan analysointi, joka voidaan tehdä joko manuaalisesti tai automatisoidusti. Manuaalisen pisteyttämisen toteuttavat ammattilaiset, minkä vuoksi se on automaattiseen pisteyttämiseen verrattuna kallis tapa. Automaattisessa pisteyttämisessä hyödynnetään tekoälyä ja koneoppimista ja sen menetelmät ovat kehittyneet edellisten vuosien aikana paljon.

Unta mittaavia kaupallisia laitteita on markkinoilla paljon. Laitteet perustavat mittauksensa yleensä aivojen signaalien mittaamiseen, fotopletysmografiaan, ballistografiaan, aktigrafiaan tai äänten mittauksiin. Puettavaa elektroniikkaa hyödynnetään yleensä sormen, pään tai ranteen alueelta toteutettavissa mittauksissa. Lisäksi unta voidaan mitata patjan alle asetettavilla laitteilla, sekä älypuhelimien kautta siihen asennettavalla sovelluksella.

Unen mittaamisen kaupalliset laitteet ovat kehittyneet viime vuosien aikana paljon ja kehittyvät jatkuvasti. Jo nyt unta mittaavia puettavan elektroniikan laitteita voidaan hyödyntää niin tutkimuskäytössä, kliinisessä mittauksessa kuin yksilön elämäntapojen tarkastelussakin ja menetelmien kehittymisen ja validoinnin myötä mahdollisuudet kasvavat koko ajan.

6 LÄHDELUETTELO

- [1] F. J. Nieto ja D. J. Petersen Scd, ”Foundations of Sleep Health National Sleep Foundation”.
- [2] I. Perez-Pozuelo *ym.*, ”The future of sleep health: a data-driven revolution in sleep science and medicine”, *npj Digital Medicine*, vsk. 3, nro 1. Nature Research, 1. joulukuuta 2020. doi: 10.1038/s41746-020-0244-4.
- [3] M. Altini ja H. Kinnunen, ”The promise of sleep: A multi-sensor approach for accurate sleep stage detection using the oura ring”, *Sensors*, vsk. 21, nro 13, heinä 2021, doi: 10.3390/s211134302.
- [4] J. D. Geyer ja P. R. Carney, *Atlas of Polysomnography*, vsk. Third edition. Philadelphia: Wolters Kluwer Health, 2018. [Verkossa]. Saatavissa: <http://pc124152.oulu.fi:8080/login?url=https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=e000xww&AN=2013148&site=ehost-live&scope=site>
- [5] M. Xiao, H. Yan, J. Song, Y. Yang, ja X. Yang, ”Sleep stages classification based on heart rate variability and random forest”, *Biomed Signal Process Control*, vsk. 8, nro 6, ss. 624–633, 2013, doi: 10.1016/j.bspc.2013.06.001.
- [6] M. Radha *ym.*, ”A deep transfer learning approach for wearable sleep stage classification with photoplethysmography”, *NPJ Digit Med*, vsk. 4, nro 1, joulu 2021, doi: 10.1038/s41746-021-00510-8.
- [7] M. A. Grandner *ym.*, ”Performance of a multisensor smart ring to evaluate sleep: in-lab and home-based evaluation of generalized and personalized algorithms”, *Sleep*, tammi 2022, doi: 10.1093/sleep/zsac152.
- [8] Institute of Electrical and Electronics Engineers, *2019 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops (PerCom Workshops)*.
- [9] S. Lee, S. Nam, ja H. Shin, ”The analysis of sleep stages with motion and heart rate signals from a handheld wearable device”, teoksessa *2016 International Conference on Information and Communication Technology Convergence, ICTC 2016*, marras 2016, ss. 1135–1137. doi: 10.1109/ICTC.2016.7763388.
- [10] Institute of Electrical and Electronics Engineers ja IEEE Consumer Electronics Society, *2017 IEEE 6th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE) : 24-27 Oct. 2017*.
- [11] M. de Zambotti, N. Cellini, A. Goldstone, I. M. Colrain, ja F. C. Baker, ”Wearable Sleep Technology in Clinical and Research Settings”, *Med Sci Sports Exerc*, vsk. 51, nro 7, ss. 1538–1557, heinä 2019, doi: 10.1249/MSS.0000000000001947.
- [12] A. Stochholm, K. Mikkelsen, ja P. Kidmose, ”Automatic sleep stage classification using ear-EEG”, teoksessa *Proceedings of the Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, EMBS*, loka 2016, vsk. 2016-October, ss. 4751–4754. doi: 10.1109/EMBC.2016.7591789.
- [13] R. L. Riha, ”Clinical assessment of the obstructive sleep apnoea/hypopnoea syndrome”, *Therapeutic Advances in Respiratory Disease*, vsk. 4, nro 2. ss. 83–91, 2010. doi: 10.1177/1753465810365080.
- [14] J. Fine *ym.*, ”Sources of inaccuracy in photoplethysmography for continuous cardiovascular monitoring”, *Biosensors*, vsk. 11, nro 4. MDPI, 2021. doi: 10.3390/bios11040126.
- [15] R. Cao *ym.*, ”Accuracy Assessment of Oura Ring Nocturnal Heart Rate and Heart Rate Variability in Comparison With Electrocardiography in Time and Frequency Domains: Comprehensive Analysis”, *J Med Internet Res*, vsk. 24, nro 1, tammi 2022, doi: 10.2196/27487.

- [16] A. Schäfer ja J. Vagedes, "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*, vsk. 166, nro 1. ss. 15–29, 5. kesäkuuta 2013. doi: 10.1016/j.ijcard.2012.03.119.
- [17] M. A. Mehrabadi *ym.*, "Sleep tracking of a commercially available smart ring and smartwatch against medical-grade actigraphy in everyday settings: Instrument validation study", *JMIR Mhealth Uhealth*, vsk. 8, nro 11, marras 2020, doi: 10.2196/20465.
- [18] M. Marino *ym.*, "Measuring sleep: Accuracy, sensitivity, and specificity of wrist actigraphy compared to polysomnography", *Sleep*, vsk. 36, nro 11, ss. 1747–1755, marras 2013, doi: 10.5665/sleep.3142.
- [19] V. K. Verma, W. Y. Lin, M. Y. Lee, ja C. S. Lai, "Levels of activity identification & sleep duration detection with a wrist-worn accelerometer-based device", teoksessa *Proceedings of the Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, EMBS*, syys 2017, ss. 2369–2372. doi: 10.1109/EMBC.2017.8037332.
- [20] N. I. Y. N. Chee, S. Ghorbani, H. A. Golkashani, R. L. F. Leong, J. L. Ong, ja M. W. L. Chee, "Multi-night validation of a sleep tracking ring in adolescents compared with a research actigraph and polysomnography", *Nat Sci Sleep*, vsk. 13, ss. 177–190, 2021, doi: 10.2147/NSS.S286070.
- [21] D. J. Levendowski, L. Ferini-Strambi, C. Gamaldo, M. Cetel, R. Rosenberg, ja P. R. Westbrook, "The accuracy, night-To-night variability, and stability of frontopolar sleep electroencephalography biomarkers", *Journal of Clinical Sleep Medicine*, vsk. 13, nro 6, ss. 791–803, 2017, doi: 10.5664/jcsm.6618.
- [22] P. H. Finan *ym.*, "Validation of a Wireless, Self-Application, Ambulatory Electroencephalographic Sleep Monitoring Device in Healthy Volunteers", *Journal of Clinical Sleep Medicine*, vsk. 12, nro 11, ss. 1443–1451, 2016, doi: 10.5664/jcsm.6262.
- [23] Institute of Electrical and Electronics Engineers ja IEEE Consumer Electronics Society, *2017 IEEE 6th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE) : 24-27 Oct. 2017*.
- [24] H. Ren *ym.*, "A Review of Cerebral Hemodynamics During Sleep Using Near-Infrared Spectroscopy", *Frontiers in Neurology*, vsk. 11. Frontiers Media S.A., 19. marraskuuta 2020. doi: 10.3389/fneur.2020.524009.
- [25] M. Ferrari ja V. Quaresima, "A brief review on the history of human functional near-infrared spectroscopy (fNIRS) development and fields of application", *NeuroImage*, vsk. 63, nro 2. ss. 921–935, 1. marraskuuta 2012. doi: 10.1016/j.neuroimage.2012.03.049.
- [26] T. Näsi, J. Virtanen, T. Noponen, J. Toppila, T. Salmi, ja R. J. Ilmoniemi, "Spontaneous hemodynamic oscillations during human sleep and sleep stage transitions characterized with near-infrared spectroscopy", *PLoS One*, vsk. 6, nro 10, loka 2011, doi: 10.1371/journal.pone.0025415.
- [27] S. Ghorbani *ym.*, "Multi-Night at-Home Evaluation of Improved Sleep Detection and Classification with a Memory-Enhanced Consumer Sleep Tracker", *Nat Sci Sleep*, vsk. 14, ss. 645–660, 2022, doi: 10.2147/NSS.S359789.
- [28] X. Zhang, W. Kou, E. I. C. Chang, H. Gao, Y. Fan, ja Y. Xu, "Sleep stage classification based on multi-level feature learning and recurrent neural networks via wearable device", *Comput Biol Med*, vsk. 103, ss. 71–81, joulu 2018, doi: 10.1016/j.compbiomed.2018.10.010.
- [29] A. Patanaik, J. L. Ong, J. J. Gooley, S. Ancoli-Israel, ja M. W. L. Chee, "An end-to-end framework for real-time automatic sleep stage classification", *Sleep*, vsk. 41, nro 5, touko 2018, doi: 10.1093/sleep/zsy041.

- [30] "OURA Ring. (julkaisuaika tuntematon). Haettu 27.2.2023 osoitteesta <https://ouraring.com/fi>".
- [31] "Camntech. (julkaisuaika tuntematon). Haettu 27.2.2023 osoitteesta <https://www.camntech.com/motionwatch-8/>".
- [32] "Fitbit. (julkaisuaika tuntematon). Haettu 28.2.2023 osoitteesta <https://www.fitbit.com/>".
- [33] "Activinsight Band. (julkaisuaika tuntematon). Haettu 28.2.2023 osoitteesta <https://activinsights.com/technology/activinsights-band/>".
- [34] "Activinsights. (julkaisuaika tuntematon). Haettu 28.2.2023 osoitteesta <https://activinsights.com/technology/geneactiv/>".
- [35] "Neuroon. (julkaisuaika tuntematon). Haettu 28.2.2023 osoitteesta: <https://www.kickstarter.com/projects/intelclinic/neuroon-open-smartest-sleep-dreams-and-meditation>".
- [36] "Sleep Profiler. (julkaisuaika tuntematon). Haettu 28.2.2023 osoitteesta: <https://www.advancedbrainmonitoring.com/products/sleep-profiler>".
- [37] "Sleep Profiler & PSG2 X8 LE Hardware Technical Manual Sleep Profiler TM and PSG2 LE X8 Hardware Technical Manual Sleep Profiler model PSG2 model", 2015.
- [38] "Sleep Profiler. (julkaisuaika tuntematon). Haettu 28.2.2023 osoitteesta: <https://www.advancedbrainmonitoring.com/products/sleep-profiler-psg2>".
- [39] "Withings Sleep Analyzer. (julkaisuaika tuntematon). Haettu 28.2.2023 osoitteesta: <https://www.withings.com/fi/en/sleep-analyzer/shop>".
- [40] "Emfit. (julkaisuaika tuntematon). Haettu 6.3.2023 osoitteesta: <https://emfit.com>".
- [41] "SleepScore. (julkaisuaika tuntematon). Haettu 6.3.2023 osoitteesta: <https://www.sleepscore.com/sleepscore-app/>".
- [42] "Sleep Cycle. (julkaisuaika tuntematon). Haettu 6.3.2023 osoitteesta: <https://www.sleepcycle.com>".
- [43] J. Dunn, R. Runge, ja M. Snyder, "Wearables and the medical revolution", *Personalized Medicine*, vsk. 15, nro 5. Future Medicine Ltd., ss. 429–448, 1. syyskuuta 2018. doi: 10.2217/pme-2018-0044.
- [44] Z. Liang ja M. A. C. Martell, "Not all errors are created equal: Influence of user characteristics on measurement errors of consumer wearable devices for sleep tracking", *EAI Endorsed Trans Pervasive Health Technol*, vsk. 4, nro 15, 2018, doi: 10.4108/eai.24-7-2018.159404.
- [45] Institute of Electrical and Electronics Engineers, *2017 Tenth International Conference on Mobile Computing and Ubiquitous Network (ICMU)*.
- [46] Y. S. Kweon, H. G. Kwak, G. H. Shin, ja M. Lee, "Automatic Micro-sleep Detection under Car-driving Simulation Environment using Night-sleep EEG", teoksessa *9th IEEE International Winter Conference on Brain-Computer Interface, BCI 2021*, helmi 2021. doi: 10.1109/BCI51272.2021.9385325.

