Tampereen yliopisto

Vappu Tainio

VERENPAINEEN LUOTETTAVA NONINVASIIVINEN MITTAAMINEN PÄÄLLE PUETTAVALLA VERENPAINEMITTARILLA

Kandidaatintyö
Lääketieteen ja terveysteknologian tiedekunta
Ohjaaja: Milla Juutinen
Syyskuu 2022

TIIVISTELMÄ

Vappu Tainio: Verenpaineen luotettava noninvasiivinen mittaaminen päälle puettavalla verenpainemittarilla
vuoden aikana
Kandidaatin työ
Tampereen yliopisto
Bioteknologian ja biolääketieteen tekniikan koulutusohjelma
Syyskuu 2022

Kohonnut verenpaine on merkittävä kansanterveydellinen ongelma sekä maailmanlaajuisesti että Suomessa. Kohonnut verenpaine altistaa esimerkiksi sydän -ja verisuonitaudeille sekä aivoverenkiertohäiriöille. Verenpaineen suuruutta mitataan yleensä hetkellisellä kertamittauksella. Diagnosoitaessa verenpainetautia tulee kertamittaus tehdä hoitajan tai lääkärin läsnä ollessa, ja diagnoosin saamiseksi kajoamaton mittaus tehdään useaan kertaan samanlaisissa ja luotettavissa ympäristöolosuhteissa. Mittauksista lasketaan keskiarvo, jonka perusteella arvio sairaudesta tehdään. Jatkuva-aikaisesta verenpaineen mittaamisesta olisi kuitenkin hyötyä, sillä kohonnut verenpaine saattaa helposti jäädä huomaamatta oireettomuutensa takia. Verenpaineen suuruuteen vaikuttaa useat tekijät, ja sen suuruus vaihtelee päivittäin. Tämän takia kertamittaus ei aina anna luotettavaa kuvaa verenpaineen todellisesta tasosta.

Tämä työ on tehty kirjallisuuskatsauksena, ja sen päätavoitteena on selvittää, kuinka verenpainetta voidaan mitata jatkuva-aikaisesti tarpeeksi luotettavalla menetelmällä. Toinen tutkimuskysymys vastaa siihen, mitä hyötyä verenpaineen jatkuva-aikaisesta mittaamisesta on hyvinvoinnin kannalta.

Verenpaineen hetkellinen mittaus tehdään yleensä ranteeseen tai käsivarren ympärille puettavan mansetin avulla. Mittaustekniikka on auskultatorinen tai oskillometrinen, ja perustuu paineen muodostamiseen valtimon ympärille veren virtauksen estämiseksi. Päälle puettavan verenpainemittarin tekniikka perustuu usein oskillometriaan tai vaihtoehtoisesti fotopletysmografiaan (PPG). Koska PPG-mittauksella sekä oskillometrisella tekniikalla on suuri rooli useissa päälle puettavissa verenpainemittareissa, ja tämä työ keskittyy siihen aihepiiriin eikä muita kajoamattomia verenpaineen mittausmenetelmiä käsitellä tässä kandidaatin työssä sen tarkemmin.

Arvioitaessa verenpainemittarin luotettavuutta käytetään ISO 81060-2 -standardia, mikä määrittää mittauksen keskivirheen suuruudeksi alle 5mmHg ja keskihajonnaksi alle 8mmHg. Tähän mennessä tehtyjen tutkimusten perusteella verenpainetta voidaan mitata tarpeeksi luotettavasti kajoamattomilla mittalaitteilla hetkellisesti, mutta jatkuva-aikainen mittaaminen päälle puettavalla verenpainemittarilla ei ole vielä mahdollista luotettavuuden puolesta.

Verenpaineen jatkuva-aikaiseen luotettavaan mittaamiseen on tällä hetkellä käytössä invasiivinen eli kajoava menetelmä, mutta jatkuva-aikaiseen mittaamiseen tarvittaisiin helppokäyttöistä, kustannustehokasta ja luotettavaa mittalaitetta. Verenpaineen kertamittaukselle on edelleen tarve, eikä jatkuva-aikaisen päälle puettavan verenpainemittarin kehittäminen sitä korvaa. Päälle puettavan verenpainemittarin käyttäminen tuo paremmin esiin verenpaineen päivittäisen tasojen vaihtelun, ja sitä seuraamalla voidaan ennakoivasti huomata verenpaineen oireeton kohoaminen.

Avainsanat: verenpaine, verenpainemittari, hypertensio, fotopletysmografia, oskillometrinen mittaus, terveysteknologia, hyvinvointiteknologia, päälle puettava teknologia

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

LYHENTEET JA MERKINNÄT 3
1 JOHDANTO 4
2 TEOREETTINEN TAUSTA 6
2.1 Verenpaineen fysiologia 6
2.2 Verenpaineen mittaaminen 9
3 VERENPAINEMITTAREIDEN NONINVASIIVINEN MITTAUSTEKNIIKKA 12
3.1 Verenpainemittareiden kehitysaskeleet 12
3.2 PPG-mittaus ja oskillometrinen tekniikka 15
4 HYVINVOINTITEKNOLOGIA 18
4.1 Mittaamisen oikeellisuus ja luotettavuus 18
4.2 Päälle puettavat mittalaitteet 20
4.3 Haasteet ja mahdollisuudet 23
5 YHTEENVETO 26
LÄHTEET 28

LYHENTEET JA MERKINNÄT

AC	Vaihtovirta (Alternative current)
AP	Valtimopaine (Arterial pressure)
AV	Aorttapaine (Aortic volume)
DC	Tasavirta (Direct current)
Diastole	Alapaine
EKG	Elektrokardiografia
HR	Sydämen syke (Heart rate)
MAP	Keskivaltimopaine (Mean arterial pressure)
mmHg	Elohopeamillimetri
MV	Minuuttitilavuus (Minute volume)
PPG	Fotopletysmografia (Photopletysmography)
SV	Iskutilavuus (Stroke volume)
SVR	Valtimoiden virtausvastus (Systemic vascular resistance)
Systole	Yläpaine
TAM	Teknologian hyväksymismalli (Technology acceptance model)
TPR	Ison verenkierron ääreisvastus (Total peripheral resistance)

1 JOHDANTO

Sydän- ja verisuonitaudit aiheuttavat Suomessa noin puolet työikäisten kuolemista, ja ovat samalla yksi merkittävimmistä kansantaudeista. Riskitekijöihin, kuten tupakointiin, korkeaan kolesterolin ja verenpaineeseen, vaikuttamalla on suuri merkitys sairauden ennaltaehkäisyssä. [1] Yleisimpinä sydän -ja verisuonisairauksina ovat sydämen vajaatoiminta, sepelvaltimotauti, valtimoverenkierron häiriöt, kohonnut verenpaine sekä rasva-aineenvaihdunnan häiriöt. Riski sairastua sydän- ja verisuonitauteihin kasvaa korkean verenpaineen myötä. [2] Maailmanlaajuisesti kohonnut verenpaine on terveitä elinvuosia vähentävistä tekijöistä merkittävin. Suomalaisesta aikuisväestöstä noin kahdella miljoonalla on kohonnut verenpaine, ja vain viidesosalla väestöstä on ihanteellisella tasolla oleva verenpaine. [3] Systolisen verenpaineen noustessa 20 mmHg tai diastolisen verenpaineen noustessa 10 mmHg riski sairastua aivohalvaukseen tai sepelvaltimotautiin on kaksinkertainen normaalirajoissa olevaan verenpaineeseen verrattuna. Arvioitaessa verenpaineen kasvua ja muutosta noudatetaan Käypä hoito – suosituksia, jonka määritelmän mukaan verenpaine on normaali, kun systolinen paine on alle 140 mmHg ja diastolinen paine alle 90 mmHg.[2]

Yhtenä tärkeimpänä parametrina elimistön toiminnan kannalta pidetään verenpainetta, mikä on helposti mitattavissa oleva ja selkeä indikaattori elimistön terveydentilasta. Verenpaineen tasojen muutoksista voidaan havaita ja ennustaa sydän -ja verisuonitauteja ennen niiden puhkeamista. [4] Kohonnut verenpaine saattaa aiheuttaa verenpainetaudin, mikä diagnosoidaan lääkärin tekemällä verenpainemittauksella. Korkea verenpaine on kansantalouden -ja terveyden näkökulmasta suuri menoerä ja haaste terveydenhuollolle, joten sen diagnosoinnilla, hoidolla ja hallinnalla on tärkeä rooli ennaltaehkäistessä taudin puhkeamista. Tämä vaatii tarkkaa ja luotettavaa mittausmenetelmää, jotta verenpainetta voidaan säännöllisesti seurata sekä puuttua tarpeeksi ajoissa, mikäli arvot nousevat viiterajojen yli. Sydämen sykkeen ja verenpaineen vaihtelut ovat tärkeitä seikkoja sydän- ja verisuonitauteja ennustaessa. [2] Lääkärin vastaanotolla tekemä mittaus on hyvä apu seulontatarkoituksessa, mutta pidempiaikaiseen mittaukseen ja verenpaineen jatkuvaaikaiseen seurantaan henkilön suorittama kotimittauksen tai teknologiaa hyödyntävä mittauksen on osoitettu olevan parempi vaihtoehto. [5]

Yleisimmin käytössä oleva verenpainemittarit mittaavat verenpainetta käsivarren ympärille asetetun mansetin avulla. Mittaustuloksen luotettavuutta lisää mittauksen säännöllisyys ja oikea suoritustapa. [5] Mittauksen luotettavuuteen vaikuttavat erilaiset tekijät, mitkä aiheuttavat epävarmuut-

ta tulokseen. Vaikka verenpaineen mittaus olisi teknisesti suoritettu oikein, olosuhteet voivat vääristää tulosta. Esimerkiksi stressi, raskas liikunta, tunteet, lämpötila, vuorokauden aika ja tupakointi voivat vaikuttaa hetkellisesti verenpaineen suuruuteen. Mittaukseen liittyen käden asento, seisominen tai istuminen vaikuttavat osaltaan mittaustulokseen. [3] Kotona tehty verenpaineen mittaus kuvaa usein potilaan todellista verenpaineen tasoa hyvin, mikäli mittaus on suoritettu oikein. Itse suoritettu mittaus voi myös lisätä potilaan halua hoitaa korkeaa verenpainetta, mikä parantaa sairauden hoitotasapainoa. Mittaustapa sallii kuitenkin vain hetkittäisen mittauksen, eikä sovellu verenpaineen jatkuvaan seurantaan. [5] Ilman mansettia tehtävä, elimistöön kajoamaton ja jatkuva mittaustapa antaisi enemmän vaihtoehtoja verenpaineen jatkuvaan säännölliseen seurantaan, sillä verenpaine saattaa vuorokauden aikana vaihdella suuresti mittauksen ajankohdan mukaan. Verenpainetta mittaavan laitteen käytön tulisi olla helppoa ja miellyttävää, ja sen seuraaminen pitäisi onnistua vaivattomasti esimerkiksi älylaitteen avulla.

Työn tarkoituksena on vastata tutkimuskysymyksiin 1. ”Miten puettavan teknologian avulla on mahdollista mitata verenpainetta luotettavasti, ja mitä haasteita siinä on?” ja 2. ”Kuinka puettavaa verenpainemittausteknologiaa voidaan hyödyntää terveyden ja hyvinvoinnin lisäämiseksi?”. Työn alussa käsitellään verenpaineen fysiologiaa ja mittaamisen teoreettista taustaa. Kolmas luku kertoo päälle puettavien verenpainemittareiden kehityksestä ja tekniikasta. Neljäs luku keskittyy puettavaan teknologiaan, mittaamisen oikeellisuuteen sekä terveysteknologian haasteisiin ja mahdollisuuksiin.

2 TEOREETTINEN TAUSTA

2.1 Verenpaineen fysiologia

Verisuonisto ja sydän muodostavat umpinaisen kuljetusjärjestelmän, jossa veri pääsee virtaamaan elimistön läpi verenkierron ansiosta. Verenkierron tehtävänä on aineiden kuljetus elimistössä sekä elimistön sisäisen tasapainon, homeostasian, ylläpitäminen. Sydämen pumppaustoiminta on autonomista, ja sydämestä lähtiessä verellä on liike-energiaa sydämen mekaanisen supistumisen ansiosta. Verisuonet osallistuvat veren kuljetukseen, sekä myös vastustavat veren virtaamista. [6, s. 332], [7, s. 238] Sydän toimii hydraulisena pumppuna, ja yhden iskun aikana sydämen sirkulaatioon pumppaama verimäärä on 70–80 ml. Yhdessä sydämen pumppaustoiminnan aikaansaaman liike-energian avulla verisuonten seinämien aiheuttama virtausvastus saa aikaan vereen nestepaineen muodostumisen, eli verenpaineen. Liike-energian ja verenpaineen tulee olla virtausvastusta suurempia, jotta veri pääsee virtaamaan verisuonistossa. [6, s. 332]

Sydämen pumppaamaa verimäärää minuutissa kutsutaan sydämen minuuttitilavuudeksi (MV). Sen muodostumista kuvaa kaava

$$\mathrm{MV} = \frac{\mathrm{AP}}{\mathrm{TPR}}, \tag{1}$$

jossa AP kuvaa valtimopainetta, ja TPR on ison verenkierron ääreisvastusta. Virtausnopeus kuvaa matkaa, jonka neste kulkee tietyssä aikayksikössä. Nestetilavuutta, joka kulkee tietyn putken läpi aikayksikössä, kutsutaan nestevirtaukseksi.

Virtausnopeuden kasvaessa tietyn rajan yli nesteen molekyylien liike muuttuu epätasaiseksi, ja nestevirrassa esiintyy pyörteisyyttä eli turbulenssia. Verisuonissa neste pääsee virtaamaan manisaarisesti, jolloin sen nopeus seinämien läheisyydessä on lähellä nollaa. Siirtyessä keskemmälle verisuonen keskiakselia kasvaa nopeus, ja sen maksimiarvo saavutetaan keskellä verisuonta. Poiseullen yhtälö kuvaa Newtonin viskositeettilakia noudattavan nesteen virtausta sylinteriputkessa seuraavan kaavan mukaan

$$q_v = 2\pi \int_0^R vrdr = \frac{\pi \Delta p R^4}{8\eta L}, \tag{2}$$

missä q_v on tilavuusvirta. Yhtälöstä voidaan todeta, että verisuonen virtausvastus on suoraan verrannollinen suonen säteen neljänteen potenssiin, ja verenkierron vastuksen suuruus on riippuvainen verisuonten läpimitasta. [5, s.339], [7, s.942]

Verisuonet rakentuvat kolmesta kerroksesta, ja sisimpänä niissä on litteiden epiteelisolujen muodostama endoteelikerros. Hiussuonet rakentuvat endoteelin lisäksi sidekudoksesta koostuvasta tyvikalvosta. Muut valtimot ja laskimot rakentuvat näiden kerrosten lisäksi lihassyistä ja kimmokudoksesta sisältävästä keskikalvosta. Uloimpana kerroksena on sidekudoksinen kalvo, mikä kiinnittää verisuonet ympäröiviin kudoksiin. [6] Valtimoiden paksut seinämät koostuvat kimmoisasta kudoksesta, ja suuren läpimitan ansiosta verenkierron vastus on pieni. Verisuonten paine kasvaa, kun suonen kimmoisa seinämä venyy verimäärän lisääntyessä. Osa sydämen mekaanisen supistumisen aikaansaamasta liike-energiasta siirtyy vereen, ja siitä edelleen verenkierron myötä varastoitunut liike-energia varastoituu verisuonten seinämiin lisääntyneenä venytyksenä. [6, s. 240–241]

Sydänlihas on väsymätön, ja rakentuu toisiinsa verkkomaisesti liittyneistä supistumiskykyisistä sydänlihassoluista. Sydänlihassolujen välisten rakenteen ansiosta solut kykenevät supistumaan lähes samanaikaisesti, ja sähköinen impulssi pääsee leviämään nopeasti ja suoraan solusta toiseen. Tämän seurauksena sydän supistuu kokonaan ja täydellä voimalla. [6, s. 318] [8] Sydämen toimintaan vaikuttaa useat ulkopuoliset tekijät. Tärkeimpänä pidetään muutoksia valtimoiden ja laskimoiden toiminnassa, veren tilavuutta ja jakautumista elimistössä sekä veren hapenkuljetuskykyä. Myös humoraalinen säätely sekä autonominen hermosto vaikuttavat sydämen toimintaan. Sydän pystyy toimimaan automaattisesti, eikä tarvitse toimiakseen ulkopuolisia ärsykkeitä. [8]

Sydämen supistumisesta aiheutuva liike-energia saa veren virtaamaan, ja synnyttää aorttaan pulssiaallon. Systolen aikana sydämen vasempaan kammioon tulviva veri saa aikaan aortan seinämän venymisen. Diastolen aikana verenpaine laskee, ja verisuonten seinämät rentoutuvat ja työntävät verta valtimoita pitkin eteenpäin. Pulssiaalto etenee nopeudella, joka on riippuvainen valtimoiden seinämien kimmoisuuden aiheuttamasta virtausvastuksesta. Tutkimalla valtimoiden kimmoisuutta voidaan havaita muutoksia verenvirtauksen nopeudessa. Pulssiaallon nopeutta voidaan kuvata kaavalla

$$c = \sqrt{\left(\frac{\Delta p}{\Delta V}\right)\left(\frac{V}{\rho}\right)}, \tag{3}$$

jossa V on veren tilavuus, ρ on veren tiheys ja $\frac{\Delta p}{\Delta V}$ ilmaisee kuinka suuren tilavuuden muutoksen paineen muutos saa aikaan. Paineaallon amplitudi kasvaa aallon edetessä elastisessa verisuo-

nessa. Verisuonen seinämän elastisuuden pienentyessä, suonen seinämän kyky vastaanottaa pulssimuotoista virtausta huonontuu. Tämän seurauksena amplitudin pysyessä vakiona, sydämen vasen kammio joutuu tekemään enemmän työtä, jotta verenvirtaus pysyisi vakiona. [5, s. 340–344]

Verisuonten seinämien tulee olla kimmoisat, jotta ne voivat vastustaa verisuonissa vallitsevaa painetta. Veren virtausnopeus suonistossa on kääntäen verrannollinen verisuonen kykyyn joustaa. Verisuonen seinämän jännityksen kasvamisella on suora riippuvuus verenpaineen nousuun. Samalla pulssinopeus pienenee. Hooken laki kuvaa voiman aiheuttamaa materiaalin venymää, jota voidaan soveltaa kimmoisalle verisuonen seinämälle. Paineen vaikutuksesta verisuoni laajenee, kunnes paineesta aiheutunut jännitys ja suonen seinämän kimmoisuudesta aiheutuva vastavoima ovat yhtä suuret.

Tapahtumaa voidaan kuvata kaavalla

$$F = \left(\frac{EA}{l}\right)(\Delta l), \tag{4}$$

missä F on paineen aiheuttama voima, E kimmokerroin, A poikkipinta-ala, l alkuperäinen pituus ja Δl voiman aiheuttaman pituuden muutos. Kimmoisalle verisuonelle voidaan soveltaa kaavaa

$$F = (EA)\frac{(2\pi R - 2\pi R_0)}{2\pi R_0}, \tag{5}$$

jossa R_0 on putken säde levossa, R putken säde venytyksessä. Seinämän paksuuden ollessa ΔD, tarkasteltavan verisuonen osan pituuden ollessa L ja suonen seinämän poikkipinta-ala on $A = \Delta DL$. Tästä seuraa se, että

$$F = \frac{(E\Delta DL)(R - R_0)}{R_0}, \tag{6}$$

ja tästä edelleen verisuonen seinämään aiheutuu jännitys

$$\sigma = \frac{F}{L} = \frac{(E\Delta D)(R - R_0)}{R_0}, \tag{7}$$

mikä kuvaa sovellettua Hooken lakia elastiselle putkelle. Verisuoni ei noudata täydellisesti Hooken lakia eikä venyminen ole lineaarista, sillä alussa suonessa tapahtuu elastiinin venymistä ja myöhemmin kollageenisäikeiden venymistä. [5, s.342–344]

2.2 Verenpaineen mittaaminen

Verenpainetta voidaan kuvata voimana, mikä kohdistuu verisuonten seinämiin pinta-alaa kohden. Verenpaine mahdollistaa verenkierron sydämen ja elimistön välillä. Systolinen verenpaine eli yläpaine kertoo, kuinka suuri paine valtimoissa on suurimmillaan sydämen supistumisen aikana. [9] Systolen aikana ison verenkierron valtimoiden paine vastaa sydämen vasemman kammion painetta, ja paine on suurimmillaan, kun sydämen vasen kammio pumppaa verta aorttaan ja siitä edelleen suuriin valtimoihin. Diastolinen verenpaine eli alapaine kertoo, kuinka suuri paine valtimoissa on sydämen lepovaiheen aikana ennen seuraavaa kammion supistumista. [6, s. 332] Verenpaineen suuruus ilmoitetaan elohopeamillimetreinä (mmHg). Normaalina verenpaineena pidetään arvoa 130/85 mmHg, jossa ensimmäinen luku kertoo yläpaineen ja toinen luku alapaineen suuruuden. Alla olevaan taulukkoon on koottu verenpaineen tavoitearvoja.

Taulukko 1. Verenpaineen luokittelu, muokattu lähteestä [3]

Verenpaineen luokittelu	Systolinen verenpaine (mmHg)	Diastolinen verenpaine (mmHg)
Optimaalinen verenpaine	< 120	< 80
Normaali verenpaine	< 130	< 85
Tyydyttävä verenpaine	130–139	85–89
Kohonnut verenpaine		
- lievästi kohonnut	140–159	90–99
- kohtalaisesti kohonnut	160–179	100–109
- huomattavasti kohonnut	≥ 180	≥ 110
Matala verenpaine	< 90	< 60

Kohonnut verenpaine, hypertensio, voi olla primaarista tai sekundääristä. Se on usein oireeton, ja sen vuoksi vaikeasti havaittavissa ilman verenpaineen mittaamista. Primaarisen eli essentiaalisen hypertension syntymekanismi ei ole tarkkaan tiedossa, ja se on yleisin syy verenpaineen nousulle. [3] Perinnöllisten tekijöiden lisäksi verenpainetta nostaa tupakointi, lihavuus, runsas suolan ja alkoholin käyttö, vähäinen liikunta, hormonien käyttö (ehkäisypillerit, vaihevuosien hormonihoito) ja stressi. [9] Primaarista hypertensiota voidaan ennaltaehkäistä ja hoitaa terveellisillä elintavoil-

la. Runsas alkoholin sekä suolan käyttö, vähäinen fyysinen aktiivisuus sekä ylipaino lisäävät riskiä hypertensioon, sekä muihin sydän- ja verisuonitauteihin. [3] Sekundäärinen hypertensio on toissijaista ja paljon harvinaisempaa kuin primaarinen hypertensio. Se voi syntyä esimerkiksi munuaissairauden tai lisämunuaisen kuorikerroksen hormonien liikatuotannon seurauksena. [7, s.944] Sekundaarisen hypertension hoitokeinona on varsinaisen sairauden hoito. Valkotakkihypertensiolla tarkoitetaan tilannetta, jossa lääkärin suorittamassa verenpaineen mittaustilanteessa potilaan verenpaine on poikkeuksellisen suuri normaalitasoon verrattuna mittausolosuhteista ja jännityksestä johtuen. [10]

Verenpaine voi olla myös liian matala, ja sitä ilmenee yleisimmin nuorilla terveillä naisilla. Matala verenpaine, hypotonia, on usein oireeton ja suuruudeltaan jopa alle < 100 mmHg ilman että siitä aiheutuu elimistölle haittaa. [11, s. 202] Matalan verenpaineen on todettu joissakin tapauksissa vähentävän riskiä sairastua sydän- ja verisuonitauteihin. Matala verenpaine saattaa aiheuttaa huimausta ja voimattomuutta, mikä ilmenee erityisesti makuuasennosta noustessa. Verenpaineen tulee kuitenkin olla riittävä elimistön homeostasian ja sydämen pumppaustoiminnan vuoksi. Verenpaineen laskiessa alle 90/60 mmHg elimistön kudosvauriot ovat mahdollisia, ja systolisen verenpaineen laskiessa alle kriittisen tason, < 80mmHg, elimistöön aiheutuu minuuteissa vakavia vaurioita. [12] [11, s. 623]

Ortostaattisella hypotensiolla kuvataan sitä, kun verenpaineen arvo laskee enemmän kuin 20/10 mmHg 1–3 minuuttia makuuasennosta seisomaan nousemisen jälkeen. Makuuasennossa verenverenpaine voi olla normaali tai korkea, mutta ylös noustessa sen arvo romahtaa. Oireina hypotensiossa on usein esimerkiksi huimaus, väsymys, päänsärky ja pahoinvointi. Hypotension riskiä lisää autonomista hermostoa vaurioittavat sairaudet, kuten Parkinsonin tauti, sekä useat lääkkeet ja diabetes. [13] Vaikuttavin tekijä hypotensiolle on ikääntymisestä aiheutuva valtimoiden seinämien rakenteiden jäykistyminen. Valtimoiden supistuminen on heikompaa, alaraajojen laskimopumppujen toiminta heikentyy ja sydämen syke laskee, joilla on äkillisen verenpaineen laskua estävä vaikutus. [14] Matala verenpaine on yleinen vaiva, mutta korkea verenpaine on huomattavasti sitä merkityksellisempi kansanterveydellinen ongelma. [13]

Verenpaine ei ole vakiona pysyvä suure, vaan se voi vuorokauden aikana vaihdella terveellä ihmisellä 50–60 mmHg normaalien rajojen puitteissa, mikä tuo haasteen sen mittaamiseen ja paineen oikeellisuuden arviointiin. [5] Verenpainetta voidaan kuvailla monisäikeisellä hemodynaamisella ilmiöllä, johon vaikuttaa muun muassa liikkuminen, elimistön lämpötila, vuorokaudenaika, hengitys ja tunnetila. [15] Elimistön vanhenemisen myötä verisuonten seinämien kimmoisuus vähenee, mikä vaikuttaa verenpainetason nousuun ikääntymisen myötä. Päivittäisten verenpainetasojen ja niissä esiintyvien häiriöiden perusteella voidaan hyvissä ajoin ennustaa riskiä sairastua sydän- ja verisuonitauteihin. [16] Verenpainetaudin diagnosointi perustuu lääkärin tekemään mittaukseen ja arvioon, ja verenpaineen seurantaa riittää kotona tehnyt mittaukset sekä jatkuva-

aikainen mittaus. [9] Arvioitaessa verenpainetautia tai kohonnutta verenpainetta, mittauksen tulisi olla säännöllistä ja jatkuvaa, sillä yksittäinen mittaushetki voi antaa epäluotettavan tuloksen. [15] Ennen kohonneen verenpaineen diagnosointia terveeltä henkilöltä tarvitaan useita samanlaisia yhteneväisissä olosuhteissa suoritettuja mittauksia, ja lopullinen tulos on näiden mittausten keskiarvo. Verenpaineeseen vaikuttaa myös henkilön asento, sekä raajan liikuttaminen mittauksen aikana. Mittausolosuhteiden tulee pysyä mahdollisimman samankaltaisina, jotta tulokset ovat vertailukelpoisia keskenään. Ennen verenpaineen mittaamista, tulisi puolen tunnin ajan välttää raskasta liikuntaa, kofeiinipitoisia juomia sekä tupakointia. Mittaamisen aikana tulisi istua pöydän ääressä stabiilissa asennossa olkavarren ollessa rentona. Mansetti asetetaan sydämen tasolle. Mittaustulos varmistetaan kahdella mittauksella, ja molemmat kirjataan ylös. [9]

Verenpaineen mittaamisen on olemassa kahdenlaisia mittausmenetelmiä, invasiivinen eli kajoava ja noninvasiivinen eli kajoamaton mittaus. Invasiivinen verenpaineen mittausmenetelmä on tarkempi ja luotettavampi mittausmenetelmä kuin noninvasiivinen mittaus. Se on käytössä silloin, kun tarkoituksena on saada verenpaineen seurannasta jatkuvaa, eikä epäsuora menetelmä ole riittävän tarkka verenpainetason määrittämiseksi. Invasiivinen valtimokanyylimittaus tehdään mittausanturia käyttäen suoraan valtimosta. Tällöin painekäyrästä saadaan tarkempaa ja yksityiskohtaisempaa tietoa, ja käyrää voidaan jälkikäteen helpommin käsitellä ja tarkastella. Mittausjärjestelmässä paineanturin avulla mitattu systolisen ja diastolisen verenpaineen arvo muutetaan sähköiseen muotoon, ja se ilmaistaan graafisena painekäyränä mittalaitteistoon kiinnitetyn monitorin avulla. [17] Menetelmään liittyy kuitenkin useita riskejä, kuten tulehdukset, komplikaatiot ja verihyytymät, joten sen käyttöä tulee harkita tilannekohtaisesti. [18]

Perinteisenä verenpaineen mittausmenetelmänä on pidetty noninvasiivista eli epäsuoraa kajoamatonta menetelmää. Se soveltuu sekä verenpaineen hetkelliseen että jatkuva-aikaiseen mittaamiseen. Yleisimpinä käyttökohteina ovat verenpainetason hetkellinen mittaus sekä kohonneen verenpaineen seuranta ja sen perusteella tehtävän hoitopäätöksen tekeminen epäiltäessä verenpainetautia. Epäsuora mittausmenetelmä voi olla automaattinen tai manuaalinen, ja sitä sovelletaan verenpaineen hetkelliseen määritykseen. [17, s. 21] [19] Auskultatorinen mittaus eli kuuntelumenetelmä sekä palpatorinen mittaus eli tunnustelumenetelmä kuuluvat manuaalisiin noninvasiivisiin menetelmiin, ja oskillometrinen mittaus automaattisiin verenpaineen mittausmenetelmiin. [20]

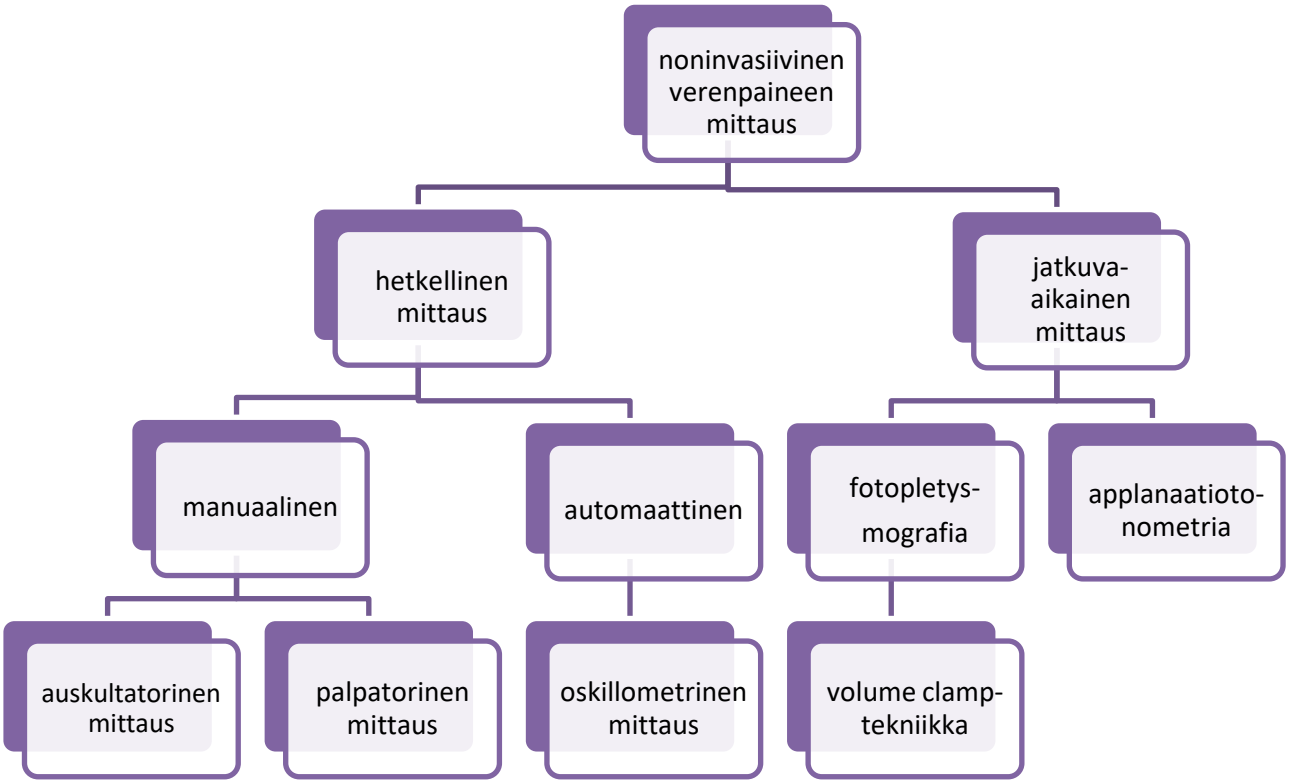
3 VERENPAINEMITTAREIDEN NONINVASIIVINEN MITTAUSTEKNIIKKA

Kuluttajakäyttöön valmistetut verenpainemittarit luokitellaan ympäristöön sijoitettaviksi mittalaitteiksi tai sensoreiksi, ja niiden avulla saatua dataa voidaan käyttää terveyden ja elintapojen seurantaan. Verenpaineen kotimittarit ovat terveysteknologian luokittelun alle kuuluvia laitteita, ja niitä pidetään lääkinnällisiksi laitteiksi luokiteltavina. [21] Verenpainetta kajoamattomasti mittaavien verenpainemittareiden mittaustekniikkaa perustuu usein painemansetin avulla aiheutettuihin muutoksiin veren virtaamisessa. Sen perusteella mittalaitteet tulkitsevat veren pulssiaaltoja sekä niiden muutoksia, minkä avulla verenpaine on mahdollista selvittää. Verenpainemittarit hyödyntävät automaattista oskillometriaan perustuvaa tekniikkaa, kun verenpaineen hetkellinen taso halutaan selvittää. Jatkuva-aikaiseen mittaamiseen verenpainemittarit käyttävät PPG:tä tai sen mahdollistamaa volume clamp-tekniikkaa. Toinen vaihtoehto jatkuva-aikaiselle verenpaineen mittaamiselle on applanaatiotonometria.

3.1 Verenpainemittareiden kehitysaskeleet

Verenpaineen mittauslaitteiden tekniikka on pysynyt lähes muuttumattomana 1900-luvulta lähtien. Ensimmäiset verenpainetta mittaavat laitteet kehitettiin jo 1800-luvulla, joista merkittävänä edistysaskeleena pidetään Samuel Ritter von Baschin (1837–1905) vuonna 1880 kehittämää sfygmomanometria. Mittalaite on samankaltainen kuin edelleen käytössä oleva elohopealla täytetty mittalaite. Hieman tämän jälkeen Scipione Riva-Rocci (1863–1937) kehitti menetelmän, jossa käsivarren ympärille aiheutettiin tasaisesti puristava paine mansettia apuna käyttäen. Riva-Roccin menetelmä on edelleenkin käytössä, ja sen avulla kyetään arvioimaan systolisen ja diastolisen verenpaineen suuruus. Nikolai Korotkov otti mittauksiin apuun stetoskoopin, jonka avulla pystyttiin kuuntelemaan sykeääniä, ja vuonna 1905 hän keksi auskultatoriseen tekniikkaan perustuva verenpaineen mittaustavan. [22] Menetelmä perustuu verenpaineen tason määrittämiseen, ja mittausäänteen kuunteluun käyttäen stetoskooppia sekä elohopeapatsaaseen liitettyä painemansettia. 1970-luvulla kehitettiin ensimmäisen oskillometriseen tekniikkaan perustuva verenpaineen mittauslaite, Dinamap, ja 1980-luvulla yleistyivät kotikäyttöön tarkoitetut samaan tekniikkaan perustuvat verenpainemittarit. Sitä ennen käytössä olevat mittaustekniikat olivat manuaalisia, ja oskillometriaan perustuva digitaalinen verenpainemittari oli ensimmäinen automaattista mittaustapaa hyödyntävä mittari. [5]

Verenpaineen kajoamaton mittaus voidaan suorittaa eri tavoilla riippuen siitä, halutaanko mittauksesta hetkellinen vai jatkuva-aikainen tulos. Hetkellinen mittaus voidaan suorittaa manuaalisesti tai automaattisesti. Auskultatorinen sekä oskillometrinen mittaustekniikka ovat perinteisenä pidettyjä manuaalisia sphygmomanometrisiä menetelmiä verenpaineen mittaamiseen. Molemmat menetelmät hyödyntävät vastapainetta verenpaineen mittauksen yhteydessä. [23] Jatkuva-aikainen mittaaminen voidaan suorittaa joko PPG:tä tai applanaatiotonometriaa hyödyntäen. Kuva 1 havainnollistaa verenpaineen kajoamattomia mittaustapoja.



Kuva 1. Noninvasiivisten verenpaineen mittausmenetelmien luokittelu, muokattu lähteestä [20]

Auskultatorisessa mittauksessa olkavarren ympärille asetetaan ilmalla täytetty mansetti. Mansetin sisällä olevaa painetta kasvatetaan pumppaamalla ilmaa sisään mansettiin, kunnes pulssiääntä ei kykene enää kuulemaan. Tämän jälkeen mansetista päästetään ilmaa hitaasti pois, kunnes pulssiääni voidaan kuuntelemalla havaita, jolloin kyseessä on systolinen paine. Kun manometrin painetta pienennetään entisestään niin, että pulssiääniä ei havaita enää ollenkaan, on kyseessä valtimoiden diastolinen verenpaine. [6, ss. 332–334] Painemansetin avulla olkavarresta mitattua valtimoverenpainetta kutsutaan Riva-Roccin (RR) menetelmäksi, ja se on tällä hetkellä käytetyin menetelmä verenpaineen kajoamattomaan mittaukseen. Auskultatorisella menetelmällä saadaan

selvitettyä valtimoiden systolinen ja diastolinen verenpaine kuuntelemalla stetoskoopilla pulssiääniä, joita kutsutaan Korotkovin ääniksi. [6] Tähän mennessä auskultatorista menetelmää on pidetty verenpaineen mittauksen kultaisena standardina. [20]

Oskillometrinen menetelmä perustuu veren pulssiaaltojen muutosten havaitsemiseen verisuonen sisäpuolella, kun valtimoa puristetaan olkavarren ympärille kierretyn mansetin avulla. Mittaaminen perustuu pulssiäänten kuulemisen sijaan pulssiaaltojen muutokseen, jonka perusteella digitaalinen verenpainemittari laskee algoritmeja hyödyntäen valtimon systolisen ja diastolisen verenpaineen suuruuden.

2000-luvulla on kehitetty digitaalisia ja automaattisia päälle puettavia verenpaineen mittalaitteita erillisten suurten mittalaitteiden sijaan, mitkä kykenevät sekä verenpaineen hetkelliseen sekä jatkuva-aikaiseen mittaamiseen. Perinteisenä pidettyjen verenpainemittareiden ja rannekemallisten mittalaitteiden sijaan verenpaineen mittaamiseen voidaan esimerkiksi käyttää erillistä mittalaitteeseen kiinnitettyä anturia, joka mittaa sormen päästä PPG-signaalia. Yhdessä älypuhelimeen liitettävä sovelluksella, kuten esimerkiksi Samsungin Health Monitor -sovelluksella, PPG-signaalin lisäksi saadaan tietoon syke ja verenpaine pulssiaaltoanalyysia hyödyntäen. Kyseinen sovellus on saanut joulukuussa 2020 Euroopan hyväksymän CE-merkinnän. [25]

Verenpaineen kajoamattomaan jatkuva-aikaiseen mittaamiseen on olemassa erilaisia tekniikoita. Osa tekniikoista on vielä suhteellisen uusia, eikä niiden luotettavuutta voida täysin vielä arvioida. Verenpaineen kajoamaton jatkuva-aikainen mittaus perustuu usein applanaatiotonometriaan, PPG-signaaliin analysointiin sekä pulssin nopeuden ja kulkuajan mittaamisen elimistössä. Applanaatiotonometria on menetelmä, jossa valtimon pulssiaaltosignaali saadaan laskettua värttinävaltimon päälle asetetun anturin avulla, kun valtimoa litistetään. Valtimon litistäminen tapahtuu tonometrin avulla, jolloin valtimossa kulkeva pulssiaallon muuttuva signaali saadaan mitattua venymäanturin avulla. Siirtofunktion avulla saatu signaali voidaan muuntaa aortan pulssiaaltosignaaliksi. [26] [27] Applanaatiotionometria on vielä suhteellisen uusi menetelmä, ja se on herkkä liikeartefaktioille. Anturin asettaminen täysin oikeaan paikkaan on osoittautunut myös haastavaksi, eikä sen luotettavuutta voida täysin vielä arvioida ainakaan verenpaineen jatkuva-aikaisessa mittaamisessa. [26]

PPG-mittauksen avulla voidaan mitata kudosten veritilavuuden muutoksesta aiheutuvia signaaleja, mitkä havaitaan veren pulssiaalloista. PPG-mittaukselle yleisimpiä kohteita ovat veren happisaturaation ja sykkeen seuranta, mutta myös sydämen minuuttitilavuutta ja verenpainetta voidaan diagnosoida PPG-mittauksen avulla. PPG-mittauksessa käytettävä anturi voi olla päälle puettavassa laitteessa, jonka avulla kohdistetaan LED-valoa esimerkiksi ranteeseen. Mitattavan kohteen läpäisevä tai vastaavasti siitä heijastuva valonsäde tunnistetaan laitteen sisäisellä valoilmaisemalla, ja kyseinen tekniikka perustuu valon intensiteetin vaimenemisen muutoksiin elimistössä.

Koska veren tilavuus muuttuu pulssiaaltojen myötä, myös veren absorboima valon määrä muuttuu, mikä voidaan havaita muutoksena PPG-signaalissa. PPG-mittausta voidaan pitää helppokäyttöisenä ja kajoamattomana menetelmänä verenpaineen jatkuva-aikaiseen mittaamiseen, ja sen avulla saadaan määritettyä monipuolista tietoa verisuoniston fysiologisesta tilasta. [28], [29] PPG-mittausta hyödyntävä Volume clamp -tekniikka perustuu sormenpäähän asetettuun mansettiin, jonka paine säädetään niin, että sormen veren virtaus pysyy muuttumattomana. Verisuonessa vallitseva paine vastaa silloin mansetin painetta. [20] Veren tilavuuden muutoksista aiheutuvia pulssiaaltoja voidaan havaita PPG:n avulla, mikä on yksi tapa verenpaineen jatkuva-aikaiseen kajoamattomaan mittaukseen.

3.2 PPG-mittaus ja oskillometrinen tekniikka

PPG-mittaus on lääketieteellisessä käytössä oleva kajoamaton jatkuva-aikainen menetelmä verenvirtauksen muutosten tutkimiseen, joka perustuu optiseen mittaustekniikkaan. PPG-mittauksessa tutkitaan valon kahden eri aallonpituuden, 660 nm ja 940 nm, absorbanssien eroja anturilla, joka voidaan kiinnittää sormeen tai varpaaseen. Valolähteinä käytetään yleisimmin infrapunavaloa ja punaista valoa, sekä niiden lisäksi vastaanottavaa ilmaisinta. Korvalehteen tai nenän väliseinään kiinnitetyllä anturilla absorbanssien ero havaitaan nopeammin kuin raajoihin kiinnitettynä, mutta ottaen huomioon laitteen käyttötarkoituksen huomionarvoista on se, että mittauksen voi tehdä esimerkiksi ranteesta tai sormesta. [30]

PPG mittaa veren tilavuuden muutosta hiussuonistossa. Verisuonissa virtaava veri absorboi ja emittoi valoa eri tavalla riippuen siitä, kuinka suuri veritilavuus on tietyllä ajanhetkellä. Kun veren määrä on suurimmillaan, valo absorboituu kaikista tehokkaimmin, jolloin PPG:n mittaama signaali on kaikista pienin. PPG-signaali on puolestaan korkeimmillaan silloin, kun veren määrä ja sen myötä valon absorptio on pienimillään. Hetki ennen sydämen lyönnin aikaansaamaa pulssiaaltoa on PPG-pulssi korkeimmillaan. [28]

Valon intensiteetti muuttuu kudoksessa absorption, taittumisen, heijastumisen ja sironnan myötä. PPG-mittauksen fysikaalinen tekniikka perustuu Beer-Lambertin lakiin, jossa sähkömagneettisen säteilyn absorption riippuu materiaalin molaarisesta absorptiokertoimesta E, konsentraatiosta C ja säteilyn kulkemasta matkasta D. Absorbanssi saadaan laskettua algebraalisen summan avulla

$$A_{tot} = E_1C_1D_1 + E_2C_2D_2 + \cdots + E_nC_nD_n, \tag{8}$$

missä A_{tot} kuvaa havaittua kokonaisabsorbanssia, E_n on molaarista absorptiokerrointa, C_n aineen konsentraatiota ja D_n valonsäteen kulkemaa matkaa. [31] Beer-Lambertin laista voidaan soveltaa myös muoto, jossa huomioidaan aineeseen tulevan ja aineen läpäisseen valon intensiteetti, jolloin absorbanssi voidaan laskea seuraavalla kaavalla

$$A = \log\left(\frac{I_{in}}{I_{out}}\right) = ECD\ , \tag{9}$$

missä I_{in} on aineeseen tulevan valonsäteen intensiteetti, I_{out} on aineen läpäisevän valonsäteen intensiteetti. [32] Intensiteetin muutoksen välille ja Beer-Lambertin laille saadaan näin ollen muodostettua yhteys, sillä lain mukaan kohdekudokseen absorboituneen sähkömagneettisen säteilyn intensiteetti vaimenee eksponentiaalisesti kohdekudoksessa. Tämä intensiteetti voidaan laskea seuraavan yhtälön mukaisesti

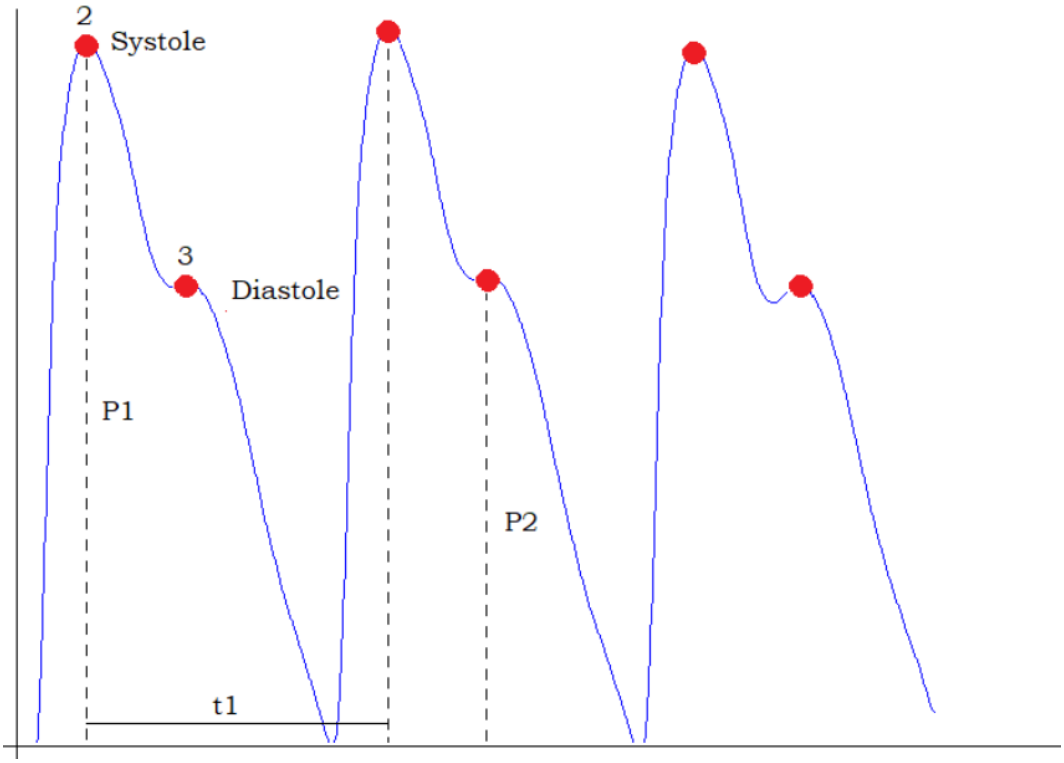
$$I = I_0 F_T 10^{\alpha' d} 10^{-\alpha l}, \tag{10}$$

missä I on kudoksen läpäisseen sähkömagneettisen säteilyn intensiteetti, I_0 kudokseen tulevan sähkömagneettisen säteilyn intensiteetti, F_T valon absorbanssi ympäröivässä kudoksessa, d veren määrä, joka esiintyy ulosvirtauksessa, α' absorptiovakio ulosvirtaavalle verelle, l kohdekudokseen virtaavan valtimoveren määrä ja α absorptiovakio kohdekudokseen virtaavalle verelle. [33]

PPG:stä on olemassa erilaisia lääketieteellisiä sovelluksia, josta yksi yleisimmin käytössä oleva sovellus on pulssioksimetria. Sen avulla voidaan selvittää potilaan hemoglobiinin happisaturaatio ($Sp0_2$) eli happikylläisyysaste verestä, ja sen fysikaalisena periaatteena on valon absorptio kudoksessa. Sormen päähän kiinnitettävä pieni laite sisältää anturin, jossa on kahdella eri aallonpituudella olevaa valon lähdettä, punainen valo ja infrapuna-LED. Laitteen saamasta mittausdatasta saadaan selville veren happisaturaatio sekä pulssitaajuus. [28]

PPG-signaalin muodostumiseen vaikuttaa sydämen aikaansaama verenpaineesta aiheutuva veritilavuuden muutos, signaalin lähettämän laitteen ja vastaanottimen välillä oleva kudos sekä vallitseva vaimenemiskerroin eli absorptiovakio. [34] PPG-signaali muodostuu kahdesta komponentista, AC- ja DC-komponentista. PPG-signaalin aaltomuodon aiheuttaa valtimoissa virtaavan veren vaikutuksesta syntyvä AC-komponentti, jota voi verrata vaihtovirtaan. DC-komponentti syntyy sähkömagneettisen säteilyn absorptiosta verta ympäröivään paikallaan pysyvään kudokseen. Säteilyn intensiteetin muuttuminen aiheutuu veren virtauksen muutoksista,

joten ainoastaan AC-komponentilla on vaikutusta PPG-signaalin muotoon, mikä voidaan havaita kuvasta 2. [31], [33]



Kuva 2. PPG-signaalin aaltomuoto ajan funktiona. P1 kuvaa systolisen verenpaineen pulssiaallon amplitudin suuruutta, P2 diastolisen verenpaineen pulssiaallon amplitudia ja t1 jaksonaikaa sekunneissa. Kuva muokattu lähteestä [29]

Kuvasta voidaan huomata, että verenpaineen kasvaessa AC-komponentin amplitudin arvo pienenee. Mitattaessa verenpainetta hetkellisesti mansetin avulla, mansettipaineen ollessa diastolisen verenpaineen suuruinen eli suurimmillaan, PPG-signaalin amplitudi saa pienimmän arvonsa. Vastaavasti PPG-signaalissa näkyy pulssipiikki, kun verenpaine on pienemillään eli vastaa systolista verenpainetta. [31]

Terveydenhuollon käytössä olevat sekä kuluttajien käyttämät digitaaliset verenpainemittarit perustuvat yleensä automaattiseen oskillometriseen tekniikkaan, jossa painemansetin avulla aiheutetaan kompressiota kyynärvaltimoon. Oskillometrinen mittaustekniikka on kajoamaton mittausmenetelmä verenpaineen hetkellisen tason selvittämiseksi, ja sitä käytetään olkavarren tai ranteen ympärille puettavissa verenpainemittareissa. Mittaus perustuu paineanturin havaitsemiin verenpaineen pulssiaaltojen vaihteluun, kun valtimoa puristetaan ulkopuolelta suurella paineella. Tästä aiheutuvat valtimon poikkipinta-alan muutokset saavat aikaan verenpaineaaltoja, mitä voidaan havaita mittalaitteella. Suurin paine mikä mittauksella havaitaan vastaa valtimoiden pulssi-

painetta, ja systolinen ja diastolinen verenpaine saadaan laskettua paineen muutoksen värähtelykuviosta laitteen algoritmien avulla. [20] Perustekniikka on eri valmistajien mittalaitteissa samanlainen, vaikka pieniä eroavaisuuksia on mittareiden toiminnassa. [5] Digitaaliset verenpainemittarit ovat ennen hyödyntäneet auskultatorista menetelmää, mutta nykyään niissä hyödynnetään oskillometristä tekniikkaa. [6, s. 334]

4 HYVINVOINTITEKNOLOGIA

Terveyden ylläpitämiseen ja hyvinvoinnin mittaamiseen käytettävät laitteet luokitellaan hyvinvointiteknologian sovelluksiksi. Päälle puettavalla teknologialla tarkoitetaan elektronisia laitteita, joiden avulla voidaan mitata ja selvittää käyttäjän fysiologista tilaa sekä käyttäytymistä erilaisten sähköisten signaalien avulla. Mittauksen kohteena voi olla esimerkiksi unen laatu ja kesto, fyysinen aktiivisuus, sydämen syke tai verenpaine. Haluttua fysiologista suuretta tai tilaa mittaava elektroninen laite voi olla erillinen sensori tai anturi, mikä on osana mittalaitetta. Anturi on laite tai laitekomponentti, mikä mittaa ja havaitsee fysikaalista ja kemiallista tietoa ympäristöstä muuttaen sen sähköiseksi lähtösignaaliksi. Mikrosensorit ovat pienoisantureita, joissa on mekaanisia ja sähköisiä käyttökomponentteja. Myös osana vaatteita voidaan käyttää mittaavaa elektroniikkaa. [35] Päälle puettava laite voi sisältää useita erilaisia antureita, jotka mittaavat sähkökemiallisia, optisia tai akustisia muutoksia sekä paineen vaihtelua.

4.1 Mittaamisen oikeellisuus ja luotettavuus

Kuluttajille on tarjolla useita eri valmistajien kaupalliseen käyttöön soveltuvia verenpainemittareita. Arvioitaessa mittareiden luotettavuutta verenpaineen mittaamiseen ovat saadut tutkimustulokset olleet ristiriitaisia keskenään. [18] Päälle puettavan kajoamattomat verenpainemittarin tulisi olla käyttäjäystävällinen, yksinkertainen, pienen kokoinen ja luotettava. Laitteiden luotettavuuden arvioinnissa yhtenä tärkeimpänä mittarina on verenpainemittareiden kliinistä validointia arvioiva ISO 81060-2 – standardi. Standardin mukaan sekä diastolisen että systolisen verenpaineen keskivirheen tulisi olla suuruudeltaan ±5 mmHg ja keskihajonnan < 8 mmHg. Referenssimittauksessa tulee käyttää joko auskultatorista menetelmää tai invasiivistä kajoavaa mittausta. [36] Kajoamatonta verenpaineen mittaustapaa ei voida vielä pitää yhtä luotettavana kuin invasiivistä mittausta verenpaineen jatkuva-aikaiseen seurantaan. Päälle puettavien verenpainetta mittaavien

laitteiden tarkkuutta on tutkittu, ja toistaiseksi on arvioitu, että laitteiden mittaustarkkuus ei ole riittävä ja epätarkkuus on sallittua suurempi. [18]

Arvioitaessa päälle puettavien mittareiden laatua, voidaan keskittyä kolmen kriteerin toteutumiseen. Pätevyydellä ilmaistaan, mittaako laite sitä asiaa, mitä sen on tarkoitus mitata. Luotettavuus kuvaa sitä, onko laitteella mitattu suure tarpeeksi tarkka käyttötarkoitusta varten, onko laitteen toiminta johdonmukaista ja mittausvirhe sallittujen virherajojen puitteissa. Laitteen herkkyys ilmaisee, kuinka hyvin ajan kuluessa tapahtuneet muutokset havaitaan ja analysoidaan. [21] Yhtenä osana mittalaitteen toimintaa voidaan pitää mittaukseen liittyvää anturia, ja siihen liittyviä ominaisuuksia. Arvioitaessa noninvasiivisen verenpainemittarin luotettavuutta verrattuna invasiiviseen mittariin tutkimuksissa mittauskohteena oli systolinen verenpaine (SV) , diastolinen verenpaine (DV) sekä keskimääräinen valtimopaine (MAP). [18] Keskimääräinen valtimopaine määritetään sydämen iskutilavuuden (SV), sykkeen (HR) ja valtimoiden virtausvastuksen (SVR) tulona seuraavasti

$$MAP = SV \cdot HR \cdot SVR \,, \tag{11}$$

ja se kuvaa verenpaineen tasaista komponenttia. Systolisen ja diastolisen verenpaineen erotuksella kuvataan pulssipainetta, mikä on verenpaineen syklisesti muuttuva komponentti.

Mitattaessa verenpainetta perinteisiä noninvaaseja menetelmiä käyttäen, mittaamiseen liittyy useita yleisiä virheen mahdollisuuksia. Oskillometrisessa mittauksessa mittalaite -tai järjestelmä voi olla viallinen; potilaan olkavarteen asetettava mansetti on väärän kokoinen tai asennettu väärin, digitaalista mittaria ei ole kalibroitu tai se on viallinen, stetoskoopin letkut ovat väärän mittaiset, jolloin mittausääni vaimenee liikaa. Verenpainetta mittaava henkilö ei osaa tehdä mittausta oikein tai merkitsee mittaustulokset väärin. Verenpaineen mittaustulokseen vaikuttaa myös potilaan jännittyneisyys, äskettäin tehdyt fyysiset aktiviteetit, kofeiini tai hermostuneisuus. [37, s. 364] [38, s. 193] Jatkuva-aikaiseen mittaamiseen soveltuva päälle puettava verenpainemittari tarjoaa helpon mahdollisuuden verenpaineen pitkäaikaiseen seurantaan, ja osa edellä mainituista virhelähteistä poistuu sen myötä. Myös potilaan kokema stressi ja jännitys mittaustilanteesta katoaa lähes kokonaan, kun laite kulkee lähes huomaamattomasti mukana, ja näin ollen mittalaite antaa todellisuutta paremmin vastaavan tuloksen.

Päälle puettavissa verenpainemittareissa käytetään usein PPG:tä verenpaineen määrittämiseen. Myös siihen liittyy ongelmia, sillä PPG-signaaliin perustuvat laitteet mittaavat veren tilavuuden muutoksia absorbanssin muutosten perusteella. Signaali on altis ympäristötekijöille, ja esimerkiksi valo, ihon pigmentti, tatuoinnit ja runsas ihokarvoitus voivat vaikuttaa mittaustulokseen. Mittarin

anturin pitää olla tarpeeksi tiukassa ihokosketuksessa, jotta mittaus onnistuu ympäristön häiriöiden vähentämiseksi. PPG-signaaliin vaikuttaa myös raajojen liike, liikkeen artefaktit ja ympäristön lämpötila. Tutkimusten mukaan mittaustulokset heikentyvät kylmässä lämpötilassa johtuen PPG-signaalin amplitudien heikentymisestä. [39]

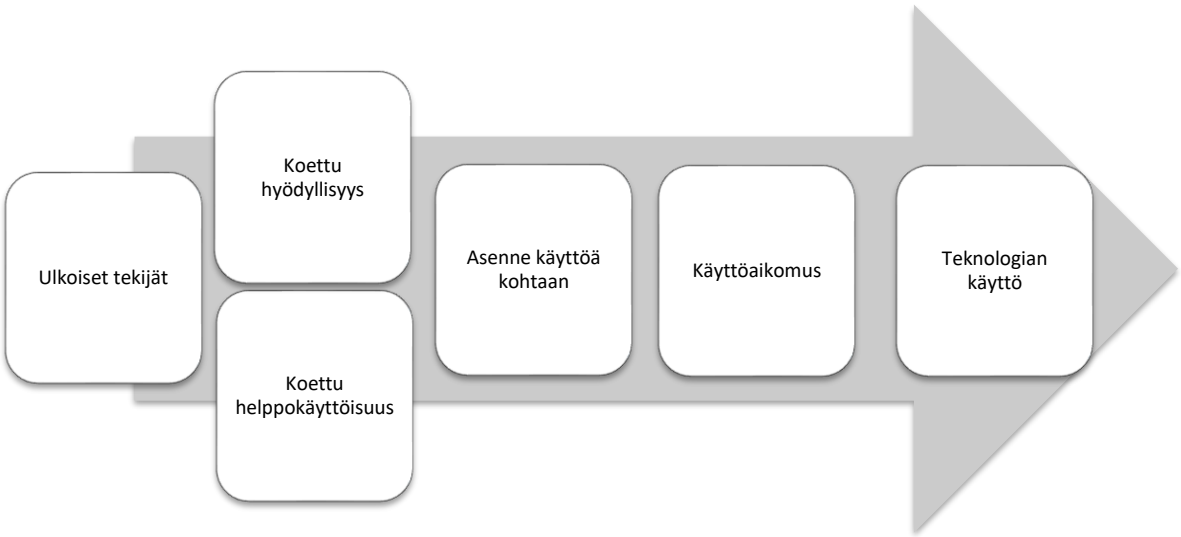
4.2 Päälle puettavat mittalaitteet

Hyvinvointi- ja terveysteknologia käsitteinä on hyödyllistä erottaa toisistaan. Hyvinvointiteknologialla tarkoitetaan kuluttajille valmistettuja laitteita ja sovelluksia, jotka soveltuvat hyvinvoinnin mittaamiseen ja terveyden ylläpitämiseen, mutta niiden avulla ei voida diagnosoida tai hoitaa sairauksia. Esimerkkinä hyvinvointia mittaavista laitteista voidaan pitää aktiivisuusrannekkeita -ja sormuksia tai mobiililaitteisiin ladattavia hyvinvointisovelluksia. Hyvinvointiteknologian laitteilta ei vaadita CE-merkintää tai viranomaisten valvontaa. Terveysteknologialla tarkoitetaan sosiaali- ja terveydenhuollon ammattilaisille valmistettuja laitteita, joita voidaan käyttää apuna sairauksien diagnosoinnissa, hoidossa ja ennaltaehkäisyssä. Tähän voidaan luokitella kuuluvaksi esimerkiksi verenpainemittarit. Terveysteknologian luokituksen alle kuuluvat lääkinnälliset laitteet ovat viranomaisten valvonnan alaisuudessa, ja niiden tulee täyttää asetetut vaatimukset sekä olla CE-merkinnällä varustettuja ennen laitteiden käyttöönottamista. Laitteiden käyttötavan ja käyttötarkoituksen perusteella laitteet voidaan jaotella myös kuluttajalaitteisiin ja ammattikäyttöön tarkoitettuihin laitteisiin hyvinvointi- ja terveysteknologiajaottelun sijaan. [40] [21]

Päälle puettavan teknologian avulla verenpaineen jatkuva-aikainen seuraaminen on helpompaa, ja aiheuttaa käyttäjälle vähemmän stressiä kuin kertamittaus. Voidaan olettaa, että muutokset verenpaineessa tulevat paremmin esiin pitkäaikaisen ja jatkuvan mittaamisen myötä käyttäjän ympäristöolosuhteet huomioiden. Digitaalisen lähestymistavan myötä voidaan paremmin ennakoida mahdollisesti puhkeavaa verenpainetautia tunnistamalla kohonnut verenpaine ja muutokset siinä tarpeeksi ajoissa. [16] Digitalisaatio on nykypäivää, ja ihmiset ovat entistä enemmän kiinnostuneita hyvinvoinnistaan ja sen mittaamisesta vuorokauden aikana. Verenpaineen lisäksi päälle puettavien laitteiden avulla on mahdollista arvioida ja mitata esimerkiksi yksilön henkistä ja fyysistä kuormitusta, unenlaatua, palautumista, toimintakykyä, sykettä ja aktiivisuutta. Laitteisto pyrkii selvittämään arvioitavia kohteita yhden tai useamman signaalin avulla, ja sen antaman mittausdatan tulee olla luotettavaa ja helposti ymmärrettävää.

Teknologian käytettävyydellä tarkoitetaan niitä seikkoja, jotka tekevät laitteen käytöstä helppoa tietyn tavoitteen saavuttamiseksi ja käyttökokemus on positiivinen. [21] Koettu hyödyllisyys sekä helppokäyttöisyys luovat perustan teknologian modernille hyväksymismallille (TAM), joiden vaikutuksesta muodostuu laitteen käyttäjän asenne sovellusta ja teknologiaa kohtaan. Nämä ohjaavat kuluttajan käyttöaikomuksia sekä lopulta varsinaisen teknologian käyttöä myös pitkällä aikavälillä.

Teorian mukaan kuluttaja tekee päätöksensä laitteen käyttöönotosta saatavilla olevan tiedon perusteella, eikä teoria huomioi tilannetta, jossa kuluttajan ei ole tiedostanut omaa motiiviaan. Kuten kuvasta 3 nähdään, teknologian käyttöön ottamiseen vaaditaan useita tietoisia tai tiedostamattomia tekijöitä.



Kuva 3. Teknologian hyväksymismalli. Muokattu lähteestä [41]

Kuluttajan valintaan vaikuttaa myös tutkitusti mielikuvat laitteesta tai sen valmistajasta, subjektiiviset normit, mittaustulosten laatu ja tulosten selkeä esitettävyys. [21] Näiden seikkojen pohjalta voidaan siis tehdä johtopäätös, jonka mukaan ihmisten kiinnostus teknologiaa kohtaan lisääntyy, kun luotettavuuden lisäksi laitteen valmistaja on tunnettu, mittaustulokset ovat luotettavia, mittalaite esittää tulokset selkeästi ja on helppokäyttöinen. Terveysteknologia on vielä suhteellisen uusi ala, ja viimeisten kolmenkymmen vuoden aikana kehitys on ollut huimaa. Digitaalisen muutoksen myötä on pyritty etsimään ratkaisuja, jotta terveydenhuollosta tulisi helpommin saatavaa, edullisempaa ja luotettavampaa. Digitalisaatiota ja sen kehittymistä voidaan nähdä esimerkiksi sähköisissä potilastietojärjestelmissä, kuvantamisessa, lääkinnällisissä laitteissa, mobiilisovelluksissa ja erilaisissa kuluttajille valmistetuissa mittareissa, kuten älykelloissa, sormuksissa ja rannekkeissa. [42]

Tässä työssä käsitellään esimerkkinä kahta ranteeseen puettavaa kellomallista verenpainemittaria, jotka käyttävät erilaisia tekniikoita verenpaineen mittaamiseen. Omronin valmistama HeartGuide on malliltaan BP8000-M perustuen oskillometriseen mittaustekniikkaan, ja Samsungin valmistamaa Galaxy Watch on malliltaan SM-R850 perustuen PPG-signaaliin. HeartGuide on lääkinnälliseksi laitteeksi luokiteltava ranteeseen puettava älykello, jonka yhtenä ominaisuutena on verenpaineen mittaaminen oskillometriseen tekniikkaan perustuen sekä esimerkiksi fyysisen aktiivisuuden sekä unen laadun ja keston mittaaminen. Laitteen sisään rakennettu asentoanturi kykenee arvioimaan käden liikkeitä suhteessa sydämen tasoon, mikä huomioidaan verenpainetta mitattaessa. Laite aktivoituu itsestään ja suorittaa verenpainetason mittaamisen, kun ranteeseen asetettu mittari on oikealla korkeudella sydämeen verrattuna. Artikkeli, joka käsittelee Omronin valmistama HeartGuide verenpainemittaria on vuodelta 2020, ja silloin mittari on arvioitu standardien perusteella tarpeeksi luotettavaksi verenpaineen jatkuva-aikaiseen mittaamiseen ISO 81060-2 standardien täyttymisen myötä. Systolisen ja diastolisen verenpaineen keskivirheeksi saatiin 0,9 mmHg ja 1,1, mmHg. Keskihajonnan suuruudeksi tutkimuksessa saatiin 7,6 mmHg ja 6,1 mmHg. [43] [44]

Samsungin Galaxy Watch 3 on ranteessa pidettävä älykello, mikä hyödyntää verenpaineen mittauksessa PPG-signaalia. Laite tulee asettaa tarpeeksi tiukasti ranteen ympärille, jotta PPG-signaalista saadaan riittävän tarkka. Mittaustulosta tarkastellaan Samsungin Health Monitor -sovelluksen avulla, ja ennen ensimmäistä mittausta mittari tulee kalibroida tarpeeksi luotettavien tulosten saamiseksi. Galaxy Watch 3 kykenee myös happisaturaation mittaamiseen, sekä unenlaadun ja aktiivisuuden seurantaan. Vuonna 2021 julkaistun tutkimuksen mukaan Galaxy Watch 3 älykellolla saatiin verenpaineen mittaamisessa ISO 81060-2 -standardin täyttämä mittaustulos, kun systolisen ja diastolisen verenpaineen keskivirheeksi saatiin 1,1 mmHg ja 0,4mmHg. Vastaavasti keskihajonnan suuruuden ollessa 4,5 mmHg ja 4,6 mmHg. Mittaustulokset on kerätty alla olevaan taulukkoon. [45] [46]

Taulukko 2. HeartGuide ja Galaxy Watch 3 verenpainemittareiden luotettavuuden vertailu ISO 81060-2 -standardiin nähden

	HeartGuide	Galaxy Watch 3	ISO 81060-2 -standardi
keskivirhe			
diastolinen verenpaine	0,9 mmHg	1,1 mmHg	±5 mmHg
systolinen verenpaine	1,1 mmHg	0,4 mmHg	±5 mmHg
keskihajonta			
diastolinen verenpaine	7,6 mmHg	4,5 mmHg	< 8 mmHg
systolinen verenpaine	6,1 mmHg	4,6 mmHg	< 8 mmHg

Tämä perusteella Galaxy Watch 3:a sekä HeartGuidea voidaan pitää luotettavina mittarina verenpaineen jatkuva-aikaiseen seurantaan. [46] Vaikka tutkimusten perusteella mittaustulokset ovat olleet sekä HeartGuiden että Galaxy Watch 3:n kohdalla olleet tarpeeksi luotettavia, niiden perusteella ei vielä voida tehdä päätelmiä siitä, onko päälle puettava mittari tarpeeksi luotettava verenpaineen jatkuva-aikaiseen seurantaan pitkällä aikavälillä. Tutkimustuloksia on tehty vasta muutamia, joten niiden vähäisen määrän perusteella luotettavuuden arviointi on vielä liian vaikeaa. [18]

4.3 Haasteet ja mahdollisuudet

Teknologian käytöstä ja hyödyntämisestä hyvinvoinnin mittaamisessa on verrattain vasta vähän käyttökokemusta. Hyvinvointiteknologian laitteista ja sovelluksista löytyy kirjallisuudesta vain yksittäisiä suosituksia, ja American Academy of Sleep Medicine (AASM) julkaisi vuonna 2018 koonnin potilaiden omakohtaisista kokemuksista koskien kuluttajalaitteiden hyötyjä ja haittoja. Tutkimuksen mukaan älylaitteet lisäävät potilaiden tietoisuutta esimerkiksi unen laadusta ja kestosta. Laitteiden antama palaute on reaaliaikaista, ja näin ollen tulokset saattavat kannustaa käyttäjää hakeutumaan jatkotutkimuksiin. Helppokäyttöisyys, puettavuus, hyvä saatavuus ja edullisuus nähtiin myös positiivisina seikkoina. Hyvinvointiteknologian kuluttajalaitteiden haasteina voidaan pitää luotettavuutta, kertyvän datan analysointia ja tallentumista, mikä ei täytä potilastieto-

järjestelmien standardeja. Teknologian nopea kehittyminen ja muuttuminen, tekee sovelluksista nopeasti vanhanaikaisia. On myös todettu, että jatkuva elintoimintojen seuraaminen aiheuttaa osalle potilaista stressiä. [47]

Päälle puettavien laitteiden käyttöä rajoittaa teknologia, ja sen tarkkuuden, toistettavuuden ja luotettavuuden epävarmuus. Laitteen käytettävyys ja korkea hinta nähdään myös käyttöä rajoittavana tekijänä. Mittareiden käyttöä lisäävänä ja tärkeimpinä valintaperusteina kuluttajan näkökulmasta voidaan puolestaan pitää sitä, että mittari mittaa yksilön hyvinvoinnin kannalta merkityksellistä asiaa. Mittarin päälle pukemisen ja käyttämisen tulee olla helppoa, ja sitä voidaan käyttää motivaation ja kannustamisen vahvistamiseksi. [21] Verenpainemittarin säännöllinen käyttäminen on selkeästi yhteydessä terveyteen ja sen ylläpitämiseen, mikä omalta osaltaan lisää joidenkin käyttäjien käyttömotivaatiota.

Verenpainetauti voidaan todeta ja hoitaa vain tarkan mittausmenetelmän avulla. Mittaustulokseen vaikuttavia tekijöitä, kuten hengitystä, tunnetilaa, lämpötilaa ja stressiä ei pysty vakiomaan, ja tiedostamalla tekijöiden olemassaolon ja vaikutuksen, voidaan muodostaa kokonaiskuva verenpaineesta. Verenpaineen säännöllinen ja pitkäaikainen seuraaminen on tärkeää sairauden hoidossa. Verenpaineen mittauksessa tulee kiinnittää huomiota ympäristöön, ja siihen että mittaukset tehdään tarpeeksi usein ja samankaltaisissa olosuhteissa, jotta tulokset ovat vertailukelpoisia keskenään. Mittaustuloksen luotettavuutta lisää saman laitteen käyttäminen aina tiettyyn kellonaikaan päivästä, kun kyseessä on ei-jatkuva mittausmenetelmä. Verenpaineen kotimittausta pidetään luotettavampana menetelmänä kuvaamaan painetasoa, kuin vastaanotto-olosuhteissa tehtyä kertamittausta. Valkotakkiverenpaine on tunnettu ilmiö, mikä saattaa osalla potilaista nostaa verenpainetta normaalia korkeammalle tasolle kotona tehtyihin mittauksiin verrattuna. [5] Jatkuva-aikaisessa mittausmenetelmässä ei vastaavanlaista haastetta ole, sillä päälle puettava mittalaite mittaa verenpainetta koko ajan olosuhteiden muuttuessa, ja verenpaineen vertailuarvoja saadaan eri vuorokaudenajoilta ilman että mittausta tarvitsee erikseen tehdä. Hetkelliseen manuaaliseen mittaukseen verrattuna verenpaineen jatkuva-aikainen automaattinen mittaaminen vie vähemmän aikaa, ja on potilaalle käyttäjäystävällisempi. [25]

Tutkimuksissa on arvioitu, että pitkällä aikavälillä helposti päälle puettavaa ja helppokäyttöistä verenpainemittaria voitaisiin käyttää verenpaineen jatkuva-aikaisessa seurannassa yhdessä mobiilisovellusten kanssa. Verenpaineen muutoksia seuraamalla olisi mahdollista havaita etukäteen mahdollisesti joitakin synnynnäisiä sydänvikoja analysoimalla veren pulssiaaltoja. Huomioiden myös päälle puettavan mittarin helppokäyttöisyyden, sen käyttäjäryhmänä voisi olla myös pienet lapset ja ikääntyneet ihmiset. [25] Päälle puettavan jatkuva-aikaisen verenpainemittarin tulevaisuuden tavoitteena on löytää tekniikoita, joiden avulla saadaan yksilöityjä ratkaisuja ja hoitoa ko-

honnen verenpaineen hoitoon. Verenpainemittari pystyisi algoritmien ja tekoälyn avulla huomaamaan tarpeeksi ajoissa muutokset verenpaineessa huomioiden muut verenpaineeseen vaikuttavat tekijät, ja ennustamaan riskiä sairastumiseen tarpeeksi ajoissa. [16]

5 YHTEENVETO

Verenpainetta voidaan pitää yhtenä tärkeimmistä elimistön terveyden parametreistä, ja sen mittaaminen onnistuu helposti. Pitkällä aikavälillä nähtävien verenpaineen muutosten avulla voidaan ennakoida ja ennaltaehkäistä useita muita sairauksia. [4] Työn tarkoituksena oli vastata tutkimuskysymyksiin 1. ”Miten puettavan teknologian avulla on mahdollista mitata verenpainetta luotettavasti, ja mitä haasteita siinä on?” ja 2. ”Kuinka puettavaa verenpainemittausteknologiaa voidaan hyödyntää terveyden ja hyvinvoinnin lisäämiseksi?”.

Verenpainemittarin tulee täyttää ISO 81060-2 -standardin mukaiset vaatimukset, jotta mittaustulosta voidaan pitää tarpeeksi luotettavana. Verenpaineen tarpeeksi luotettavaan jatkuva-aikaiseen mittaamiseen on käytössä invasiivinen valtimokanyylimittaus, missä on omat riskinsä. Myös hetkellisen verenpainetason mittaamiseen on olemassa tarpeeksi luotettavia manuaalisia ja automaattisia verenpainemittareita, mitä käytetään esimerkiksi referenssimittauksia tehdessä. Tähän mennessä tehtyjen tutkimusta perusteella verenpaineen kajoamattomaan mittaukseen ei ole vielä kehitetty tarpeeksi luotettavaa jatkuva-aikaista mittausmenetelmää, mitä voisi hyödyntää päälle puettavassa teknologiassa. PPG-signaalia ja oskillometristä tekniikkaa hyödyntävät verenpaineen mittauslaitteet pystyvät mittaamaan verenpainetta tarkasti, mutta mittaustarkkuus ei ole täysin standardien mukainen.

Päälle puettavien verenpainemittareiden tekniikka ei ole vielä tarpeeksi kehittynyttä luotettavan mittauksen tekemiseen. Mittaustulokseen vaikuttaa esimerkiksi rannemittarin oikeaoppiminen pukeminen ja asettelu tarpeeksi tiukalle. Myös ihon pigmentti, tatuoinnit tai ihokarvat voivat vaikuttaa mittaustulokseen. Matala lämpötila heikentää myös PPG-signaalia, sekä käden asento sydämeen nähden vaikuttaa mittaustulokseen. Tähän mennessä tehtyjen kokeellisten tutkimusten perusteella on olemassa päälle puettavia verenpainemittareita, jotka ovat lähellä vaadittuja standardeja. Tekniikan kehittyessä ja ulkopuolisten häiriöiden vaikutusten ymmärtämisessä voidaan varmasti vielä mennä eteenpäin, ja päälle puettavasta jatkuva-aikaisesta verenpainemittarista saadaan tehtyä tarpeeksi luotettava.

Päälle puettavalla, helppokäyttöisellä ja luotettavalla verenpainemittarilla tulee olemaan lähitulevaisuudessa runsaasti kysyntää. Kohonnut verenpaine ja siitä aiheutuvat mahdolliset muut sydän -ja verisuonitaudit ovat kansanterveyden näkökulmasta suuri ongelma. Kohonneen verenpaineen

tunnistaminen tarpeeksi ajoissa on yksi lukuisista keinoista estää muita sairauksia, kuten sydänkohtaus, aivohalvaus tai aivoverenkiertohäiriö. Näin ollen jatkuva-aikaista mittausta suorittava verenpainemittari ei ole tärkeä edistysaskel ainoastaan tieteen näkökulmasta. Sillä on myös tärkeä ennaltaehkäisevä rooli kansanterveyden ja terveydenhuollon edistämisen näkökulmasta, ja päälle puettavaa teknologiaa voidaan hyödyntää terveyden ja hyvinvoinnin lisäämiseksi.

LÄHTEET

[1] ”Sydän- ja verisuonitautien yleisyys Suomessa”, *Terveyden ja hyvinvoinnin laitos THL*, 2021.

[2] Laatikainen Tiina, Jula Antti, Salomaa Veikko, ”Verenpaine Suomessa - FINRISKI-tutkimuksen tuloksia”, *Terveyden ja hyvinvoinnin laitos THL, Helsinki*, marras 2012, [Verkossa]. Saatavissa: https://www.julkari.fi/bitstream/handle/10024/90883/TutkimuksestaTiiviisti2_verenpaine.pdf?sequence=1

[3] Jula A, Korhonen P, Lehto S, Mervaala E, Metsärinne K, Niiranen T, ”Kohonnut verenpaine: Käypähoito-suositus”, *Duodecim, Vuosikerta 136, Nro 21, s.2427-2429*, [Verkossa]. Saatavissa: https://www.duodecimlehti.fi/xmedia/duo/duo15870.pdf

[4] B M McCarthy, B O’Flynn, and A Mathewson, ”An investigation of pulse transit time as a non-invasive blood pressure measurement method”, *Journal of Physics: Conference Series, 307(1):012060, 2011*.

[5] Niiranen Teemu, Anttila Juha, ”Verenpaineen kotimittaus”, *Lääketieteellinen aikakausikirja Duodecim*, vsk. 2009, s. 125 (18).

[6] Hiltunen Erkki, Holmberg Peter, Jyväsjärvi Erkki, Kaikkonen Matti, Lindblom-Ylänne Sari, Niensted Walter, *Galenos Johdanto lääketieteen opintoihin*, 1.-4. p., vsk. 2010. WSOY.

[7] Niensted Walter, Hänninen Osmo, Arstila Antti, Björkvist Stig-Eyrik, *Ihmisen fysiologia ja anatomia*, 1. p., vsk. 1999. WSOY.

[8] Airaksinen Juhani, Aalto-Setälä Katriina, Hartikainen Juha, Huikuri Heikki, Laine Mika, Lommi Jyrki, Raatikainen Pekka, *Kardiologia*, 7. p., vsk. 2016. Kustannus Oy Duodecim.

[9] Mustajoki Pertti, ”Kohonnut verenpaine (verenpainetauti)”, *Lääketieteellinen aikakausikirja Duodecim*, 2020.

[10] Niiranen Teemu, ”Home Blood Pressure Measurement - Epidemiology and Clinical Application”, Turun yliopisto, Turku: Kansanterveyslaitos 2009. [Verkossa]. Saatavissa: http://www.ktl.fi/ attachments/suomi/julkaisut/julkaisusarja_a/ 2008/2008a16.pdf

[11] Iivanainen A, Jauhiainen M & Syväoja P, *Sairauksien hoitaminen terveyttä edistäen*, vsk. 2010, 3.-5. painos. Helsinki: SanomaPro Oy.

[12] T Tilvis, R., Pitkälä, K., Strandberg, T., *Geriatria*. Kustannus Oy Duodecim, 2016.

[13] Kantola I, Jula A, ”Ortostaattisen hypotension tutkiminen ja hoito”, *Suomen Lääkärilehti 2018;73:1811-3*.

[14] Joseph A, Wanono R, Flamant M, ym., ”Orthostatic hypotension: A review”, *Nephrol Ther 2017;13(Suppl 1):55-67*.

[15] James GD, Pickering TG, ”The influence of behavioral factors on the daily variation of blood pressure. Am J Hypertens 1993;6:170S-3S”.

[16] Kazuomi K, ”Manigment of Hypertension in the Digital Era: Small Wearable Monitoring Devices for Remote Blood Pressure Monitoring”, *Volume 76, Issue 3, September 2020; p.640-650*.

[17] J. Honkanen, ”Verenpaineen mittaus, invasiiviset menetelmät”, *07.02.2003*, [Verkossa]. Saatavissa: http://www.kolumbus.fi/jukka.u.honkanen/tdata/invasiivinenverenpainemittaus.pdf

[18] S.-H. Kim, M. Lilot, K. S. Sidhu, J. Rinehart, Z. Yu, C. Canales, M. Cannesson, ”Accuracy and Precision of Continuous Noninvasive Arterial Pressure Monitoring Compared with Invasive Arterial Pressure: A Systematic Review and Meta-analysis”, *Vol 120., No.5*, ss. 1080–1097, 2014.

[19] P. Laine, ”Verenpaineen mittaamisen opettaminen sairaanhoitaja- ja terveydenhoitajaopiskelijoille”, Turun yliopisto, 2010.

[20] A. S. Meidert, B. Saugel, ”Techniques for Non-Invasive Monitoring of Arterial Blood Pressure”, *Frontiers in Medicine*, nro Vol 4., No.2296-858X, 2018, [Verkossa]. Saatavissa: https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmed.2017.00231/full

[21] Rauttola Ari-Pekka, Halonen Janne, Lukander Kristian, Passi Tomi, Uusitalo Arja, Rauhamaa Saija, Virkkala Jussi, ”Puettavan teknologian hyödyntäminen työterveyshuolloissa ja työpaikoilla”, Työterveyslaitos, Helsinki, 2019. [Verkossa]. Saatavissa: https://www.julkari.fi/bitstream/handle/10024/139009/TTL-978-952-261-911-2.pdf?sequence=1&isAllowed=y

[22] Forsius A, ”Verenpaineen mittauksen historiaa”, *Suomen Lääkärilehti 1996: 18–19: 2065. Tarkistettu tammikuussa 2004*.

[23] Sorvoja H, Myllylä R, *Noninvasive blood pressure measurement methods*, Molecular and Quantum Acoustics. Vol. 27, s. 239–264, 2006.

[24] Ogedegbe G, Pickering T, ”Principles and techniques of blood pressure measurement”, *Cardiology Clinics, 01 Nov 2010, 28(4):571-586*, [Verkossa]. Saatavissa: https://europepmc.org/article/MED/20937442#funding

[25] X. Quan, J. Liu, T. Roxlo, S. Siddharth, W. Leong, A. Muir, S-M. Cheong, A. Rao, ”Advances in Non-Invasive Blood Pressure Monitoring”, *Vol.21, No.13, 4273, 2021*, [Verkossa]. Saatavissa: https://doi.org/10.3390/s21134273

[26] Eckerle J, *Tonometry, arterial. Encyclopedia of Medical Devices and Instrumentation*, vsk. 2006. 2nd ed., 402–410. https://doi.org/10.1002/0471732877.emd250.

[27] Nelson, M. R., Stepanek, J., Cevette, M., Covalciuc, M., Hurst, R. T., & Tajik, A. J, *Non invasive measurement of central vascular pressures with arterial tonometry: clinical re vival of the pulse pressure waveform?*, Mayo Clinic proceedings, 85(5), 460–472. https://doi.org/10.4065/mcp.2009.0336., vsk. 2010.

[28] Allen John, ”Photoplethysmography and its application in clinical physiological measurement”, *2007; 28: R1-R39*.

[29] Moraes JL, Rocha MX, Vasconcelos GG, Vasconcelos Filho JE, de Albuquerque ja VHC, Alexandria AR, ”Advances in Photopletysmography Signal Analysis for Biomedical Applications”, *Sensors 2018; 18 (6)*.

[30] Anaesthesia UK, ”Principles of pulse oximetry”, syys 2004, [Verkossa]. Saatavissa: https://www.frca.co.uk/article.aspx?articleid=332

[31] Shelley K., Shelley S., ”Pulse Oximeter Waveform: Photoelectric Plethysmography”, *in Clinical Monitoring, Carol Lake, R. Hines, and C. Blitt, Eds.: W.B. Saunders Company. 2001; 420–428*.

[32] Ayoagi T., ”Pulse oximetry: its invention, theory, and future”, *Journal of Anesthesia*, vsk. 2003; 17 (4): 259-266.

[33] Yoshia I, Shimada Y, Tanaka K., ”Spectrophotometric monitoring of arterial oxygen saturation in the fingertip”, *Medical and Biological engineering and computing. 1980; 18 (1): 27-32*.

[34] Mannerheimer PD, ”The Light-Tissue Interaction of Pulse Oximetry”, *Anesthesia and Analgesia, 2007; 105 (6), s.10-17*.

[35] B. Byrom *ym.*, ”Selection of and Evidentiary Considerations for Wearable Devices and Their Measurements for Use in Regulatory Decision Making: Recommendations from the ePRO Consortium”, *Value in Health*, vsk. 21, nro 6, ss. 631–639, 2018, doi: https://doi.org/10.1016/j.jval.2017.09.012.

[36] ”Ei-invasiiviset verenpainemittarit. Osa 2: Automaattisen mittauksen kliininen validointi”. Suomen standardisoimisliitto, SFS-EN ISO 81060-2:2019:en 2.painos, 42s 2019.

[37] Rautava-Nurmi, H., Westergård, A., Henttonen, T., Ojala, M. & Vuorinen S, *Hoitotyön taidot ja toiminnot*, 2012., Helsinki: Sanoma Pro Oy p.

[38] Ahonen, O., Blek-Vehkaluoto, M., Ekola, S., Partamies, S., Sulosaari, V. & Uski Tallqvist T, *Kliininen hoitotyö. Sisätauteja, kirurgisia sairauksia ja syöpätauteja sairastavan hoito*, vsk. 2012, Helsinki: Sanoma Pro Oy.

[39] Askarian B, Jung K, Chong J, ”Monitoring of Heart Rate from Photoplethysmographic Signals Using a Samsung Galaxy Note8 in Underwater Environments”, *Basel Vol.19, Iss 13, 2019*, [Verkossa]. Saatavissa: https://www.proquest.com/docview/2301761359?accountid=14242&parentSessionId=8Jp%2Ft8Vp61WkLi7bhi4DDAbnMTwmq3rdyfC0bUcoYy4%3D&pq-origsite=primo

[40] Nylund Petra, Ruokoniemi Päivi, ”Tunne terveysteknologia - käyttöönotto vaatii valvontaa”, *sic! Lääketietoa Fimeasta*, vsk. 3/2018, Viitattu: 10. maaliskuuta 2022. [Verkossa]. Saatavissa: https://sic.fimea.fi/verkkolehdet/2018/3_2018/laakkeet-ja-digitalisaatio-2.0/tunne-terveysteknologia-kayttoonotto-vaatii-valvontaa

[41] Davis, F. and F.Davis, *Perceived Usefulness, Perceived Ease of Use, and User Acceptance of Information Technology*. 1989.

[42] Tyrväinen P, Silvennoinen M, Talvitie-Lamberg K, Ala-Kitula A, Kuoremäki R, ”Identifying opportunities for AI applications in healthcare — Renewing the national healthcare and social services”, *IEEE 6th International Conference on Serious Games and Applications for Health (SeGAH)*, vsk. 2018, [Verkossa]. Saatavissa: https://ieeexplore-ieee-org.libproxy.tuni.fi/document/8401381

[43] Kazuomi K, Daichi S, Tomitani N, Kanegae E, ”The first study comparing a wearable watch-type blood pressure monitor with a conventional ambulatory blood pressure monitor on in-office and out-of-office settings”, *The Journal of Clinical Hypertension, Volume 22, Issue 2, p. 135-141*, vsk. 2020, [Verkossa]. Saatavissa: https://doi-org.libproxy.tuni.fi/10.1111/jch.13799

[44] OMRON Healthcare, Inc., ”Blood Pressure Watch - Omron HeartGuide Wrist BP Monitor”. 2022. [Verkossa]. Saatavissa: https://omronhealthcare.com/products/heartguide-wearable-blood-pressure-monitor-bp8000m/

[45] ”Galaxy Watch 3 - Samsung Suomi”, *2022*, [Verkossa]. Saatavissa: https://www.samsung.com/fi/watches/galaxy-watch/galaxy-watch3-45mm-mystic-black-sm-r840ntkaeud/

[46] J. H. Ahn, J. Song, I. Choi, J. Youn, J. W. Cho, ”Validation of Blood Pressure Measurement Using a Smartwatch in Patients With Parkinson’s Disease”, *IoFrontiers in neurogy, Vol.12, 650929, 2021*, [Verkossa]. Saatavissa: https://doi.org/10.3389/fneur.2021.650929

[47] Khosla S, Deak MC, Gault D, et al, ”Consumer Sleep Technology: An American Academy of Sleep Medicine Position Statement”, *J Clin Sleep Med. 2018;14(5):877-880. Published 2018 May 15*.