

EKG:n seurantaan tarkoitettut kuluttajalähtöiset puettavat laitteet

TURUN YLIOPISTO
Tietotekniikan laitos
TkK-tutkielma
Lääketieteellinen tekniikka ja terveysteknologia
Kesäkuu 2026
Eetu Patana

EKG-monitorointi on yksi tärkeimmistä sydämen toimintaa mittaavista menetelmistä. Useiden sydänsairauksien epäsäännöllisen luonteen vuoksi EKG-monitorointi tuottaa parhaita tuloksia pitkäaikaisessa käytössä. Monitoroinnin optimointi pitkäaikaiseen käyttöön on kuitenkin haastavaa, jotta säilytetään hyvä käyttömukavuus ja riittävä mittaustarkkuus. Eräänä ratkaisuna tähän on kehitetty puettavia laitteita, jotka toimivat EKG-monitoreina. Puettavia laitteita on tehty sekä sairaala- että kuluttajalähtöiseen käyttöön.

Tämän kirjallisuuskatsauksen tarkoituksena on perehtyä yleisimpiin kuluttajalähtöisiin puettaviin laitteisiin, jotka pystyvät EKG-monitorointiin. Tavoitteena on vertailla laitteita ominaisuuksien perusteella sekä löytää laitteille sopivia käyttökohteita. Tutkielmassa havaittiin, että yleisimmät puettavat EKG-laitteet ovat älykelloja, rannekeita, sykevöitä, käsivarsinauhoja, vaatteita ja tekstiilejä. Älykellot ja rannekkeet sopivat arkikäyttöön EKG-monitoroinnista kiinnostuneille, mutta kliiniseen käyttöön niiden tarkkuus ei vielä riitä. Sykevöt soveltuvat erinomaisen tarkkuutensa vuoksi erityisesti urheiluun, mutta pitkäaikainen käyttö voi tuottaa haasteita laitteiden huonon käyttömukavuuden vuoksi. Käsivarsinauhat, vaatteet ja tekstiilit yhdistävät erittäin hyvän tarkkuuden ja käyttömukavuuden, minkä vuoksi niillä voidaan nähdä potentiaalia erityisesti pitkäaikaisen EKG-monitoroinnin parissa jopa kliinisessä käytössä.

Asiasanat: EKG, pitkäaikainen, puettava, kuluttajalähtöinen, älykellot, rannekkeet, sykevöt, käsivarsinauhat, vaatteet, tekstiilit

Sisällys

1	Johdanto	1
2	EKG	3
2.1	Mittausmenetelmä	3
2.2	Elektrokardiogrammin tulkinta	5
3	Puettavat laitteet EKG:n monitorointiin	9
3.1	Älykellot ja rannekkeet	11
3.2	Sykevyöt	12
3.3	Käsivarsinauhat	13
3.4	Tekstiilit ja vaatteet	13
3.5	Puettavien EKG-laitteiden sovellukset	14
4	Laitteiden vertailu	17
5	Pohdinta	25
6	Yhteenveto	27
	Lähdeluettelo	29

Kuvat

2.1	Sydämen tärkeimmät osat sekä sydämen sähköinen toiminta. Vasemmanpuoleisessa kuvassa nuolet osoittavat verenkierron suunnat ja oikeanpuoleisessa kuvassa nuolet osoittavat sydämen impulssin etemissuunnan. Muokattu [8]	5
2.2	Tavallinen elektrokardiogrammi, johon on merkitty tyypilliset aallot ja vaiheet, sekä sydän, johon on merkitty aaltojen lähteet. Muokattu [8], [9]	7
3.1	Mallikuvat alalukujen 3.1–3.4 puettavista laitteista. a) älykello, b) sykevyö, c) käsivarsinauha (kehitteillä on myös huomattavasti pienempiä malleja), d) urheiluliivi, e) t-paita. [20], [21], [22].	15

Taulukot

4.1	Taulukko kuluttajälähtöisten puettavien EKG-laitetyyppien ominaisuuksista.	24
-----	--	----

1 Johdanto

Sydänsähkökäyrän eli elektrokardiogrammin (EKG) monitorointi on pitkään ollut yksi käytetyimmistä mittausmenetelmistä terveydenhuollossa. Se on erittäin turvallinen ei-invasiivinen menetelmä, jolla voidaan tutkia sydämen sähköistä toimintaa. Tyypillisesti EKG-monitorointi tapahtuu vain levossa, jotta häiriöt minimoidaan ja mittaus on mahdollisimman tarkka. Lisäksi EKG-monitoroinnit on yleensä lyhytaikaisia, koska niiden toteutustapa hankala. [1], [2] Suuri osa sydänperäisistä sairauksista on kuitenkin arvaamattomia, ja oireita ilmenee vain satunnaisesti pitkällä aikavälillä, minkä vuoksi diagnosointi tavallisilla EKG-monitoreilla osoittautuu vaikeaksi. Näistä syistä on jo pitkään pyritty kehittämään mahdollisimman hyviä pitkäaikaisempaan käyttöön tarkoitettuja puettavia monitorointiratkaisuja, joita voitaisiin integroida helposti mukaan arkeen. Puettavia EKG-laitteita on kehitetty sairaalakäyttöön sekä yhä yleistyvämmin myös kuluttajalähtöiseen käyttöön. [3]

Puettavat laitteet ovat laitteita, joita käytetään keholla ja ne keräävät tai mittaavat tietoa käyttäjästä. Puettavilla laitteilla tapahtuva EKG-monitorointi on melko uusi innovaatio kuluttajamarkkinoilla ja sen suosio kasvaa jatkuvasti. Laitteita on markkinoilla jo useita erilaisia ja uusia kehitetään jatkuvasti enemmän. Kuluttajalähtöisillä puettavilla laitteilla tapahtuva EKG-monitorointi on osoittanut suurta potentiaalia pitkäaikaisessa monitoroinnissa. Tulevaisuudessa laitteita voitaisiinkin nähdä jopa terveydenhuollossa ja sairaalakäytössä. Tämän hetken suurimpia haasteita pitkäaikaisessa monitoroinnissa ovat kuitenkin erityisesti laitteiden mit-

taustarkkuus, käyttömukavuus ja käyttöaika. [4] Tässä tutkielmassa tarkastellaan ja vertaillaan yleisimpiä kuluttajalähtöisiä puettavia EKG-laitteita.

Tutkielma käsittelee seuraavat tutkimuskysymykset:

TK1: Mitä kuluttajalähtöisiä puettavia EKG-laitteita on?

TK2: Miten kuluttajalähtöiset puettavat EKG-laitteet vertautuvat teknisesti keskenään?

TK3: Mitkä kuluttajalähtöiset puettavat EKG-laitteet sopivat kenellekin?

Tämä tutkielma on toteutettu kirjallisuuskatsauksena. Tiedonhaku tehtiin syksyllä 2025 ja keväällä 2026. Tietoa haettiin Web of Science- ja PubMed-tietokannoista englanniksi sekä Duodecim Oppiportista suomeksi. Tietoa haettiin hakulausekkeella: ("ECG"OR "EKG"OR "electrocardiogram"OR "electrocardiography"), joka yhdistettiin boolean OR- ja AND-operaattoreiden avulla eri aihealueisiin, kuten "principles", "interpretation", "basics", "wearable", "mobile", "remote", "monitoring", "accuracy", "performance", "reliability", "validation", "smartwatch", "armband", "chest strap" ja "textile". Haku rajattiin vuosina 2016-2026 julkaistuihin aineistoihin, mutta erityisesti puettavien laitteiden aineistoissa painotettiin vuosia 2020-2026. Aineistoja karsittiin alustavasti otsikon ja abstraktin perusteella. Myöhemmin aineistoja karsittiin myös sisällön perusteella ja lopulta jäljelle jäi 26 aineistoa. Hakulausekkeiden lisäksi tietoa puettavista laitteista haettiin laitevalmistajien omilta nettisivuilta englanniksi.

Tutkielman luvussa 2 taustoitetaan EKG-monitorointia ja EKG:n tulkintaa. Luvussa 3 esitellään yleisiä sairaalakäyttöisiä EKG:n pitkäaikaismonitorointilaitteita ja alaluvuissa kuluttajalähtöisiä puettavia EKG-laitteita sekä niiden sovelluksia. Luvussa 4 tehdään vertailua kuluttajalähtöisten puettavien laitteiden välillä ominaisuuksien perusteella. Luvussa 5 pohditaan kuluttajalähtöisten laitteiden hyödyllisyyttä ja käyttötarkoituksia sekä käyttäjäryhmiä. Luku 6 toimii yhteenvetona tutkielmalle, jossa kootaan yhteen työn keskeiset tulokset.

2 EKG

Elektrokardiografia on menetelmä, jolla mitataan sydämen sähköistä toimintaa ei-invasiivisesti ihoon kiinnitettävien elektrodien avulla [1]. Elektrokardiografialla tuotetaan kuvio nimeltä sydänsähkökäyrä eli elektrokardiogrammi (EKG), joka toimii kuvauksena sydämen sähköisestä toiminnasta. Ensimmäisen varsinaisen EKG-mittauksen suoritti hollantilainen Willem Einthoven vuonna 1902 kehittämällään kiertokäämigalvanometrillä, vaikka sydämen sähköistä toimintaa oltiin onnistuttu mittaamaan jo tätä aiemminkin. [5], [2] Nykyään EKG:tä käytetään hyvin laajalti terveydenhuollossa ja EKG:tä voidaan pitää yhtenä yleisimmistä sydän- ja verisuonitautien diagnostiikkavälineistä. Menetelmän ei-invasiivisuus tekee siitä erittäin turvallisen ja helposti toteutettavan. [1], [2] EKG:n käyttö diagnostiikassa on kuitenkin monilta osin myös haastavaa [1]. Tämä johtuu EKG-mittauksissa usein tapahtuvista virheistä ja häiriöistä, johtuen muun muassa potilaan liikkeestä, epätäydellisistä elektrodikytkennöistä ja vaihtovirran aiheuttamasta kohinasta. Lisäksi useat sydämen sähköisen toiminnan poikkeamat ilmenevät satunnaisesti, eikä lyhytaikaisilla EKG-mittauksilla välttämättä havaita niitä [6].

2.1 Mittausmenetelmä

EKG perustuu sydämen toiminnan aiheuttamiin sähkökentän muutoksiin kehos-
sa. Sähköiset muutokset johtuvat sydänlihassolujen supistumisesta eli depolarisaa-
tiosta ja palautumisesta eli repolarisaatiosta. Nämä jännitemuutokset tallentuvat

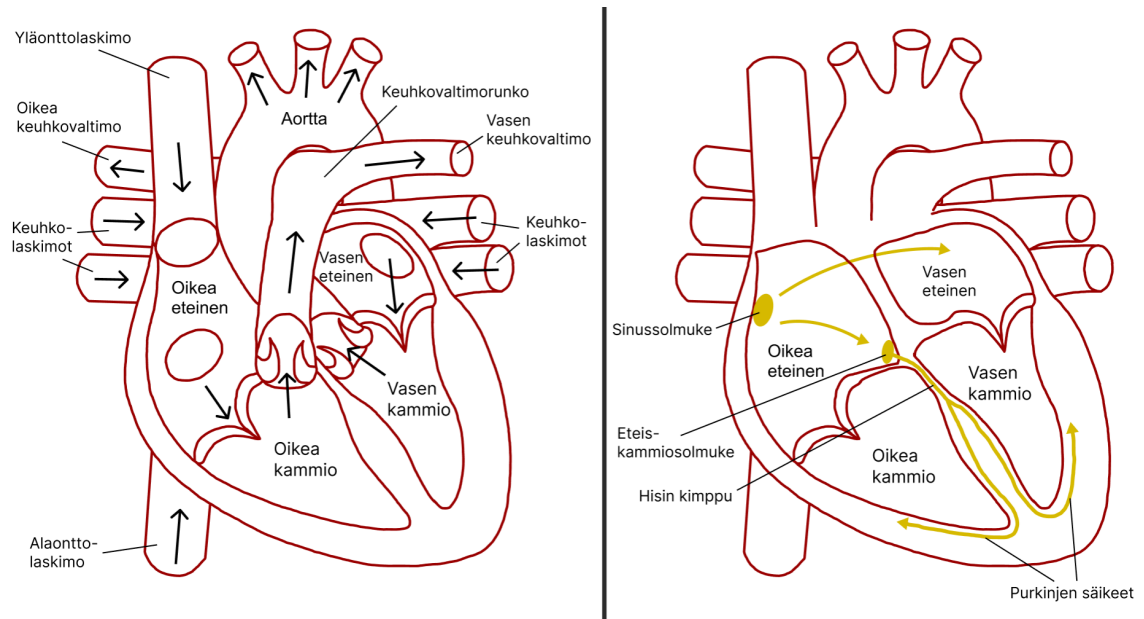
EKG:hen jatkuvana käyränä. [6]

Sydämen sähköisen toiminnan taustalla on sydänlihassolujen solukalvojen kalvojännite. Kalvojännite tarkoittaa solukalvon sisäpuolen potentiaalieroja ulkopuoleen nähden, mikä on seurausta varattujen ionien eri pitoisuuksista solukalvon sisä- ja ulkopuolella. Kalvojännitteen muutokset aiheuttavat sydänlihassolujen depolarisaation ja repolarisaation. Nämä tapahtumat kuitenkin ilmenevät hieman eri tavoilla sydämen eri osissa. [6]

Yleisesti normaalin kalvojännitteen sanotaan olevan noin -90 mV. Tämä kuitenkin koskee vain niitä sydänlihassoluja, joilla tapahtuu nopea aktiopotentiaali. Näihin lukeutuvat kammioliassolut, Purkinjen säikeiden solut, sekä eteisten internodaaliradat ja myosyytit. Näillä soluilla on nopeita natriumkanavia, jotka avautuvat, mikäli kalvojännite muuttuu noin -60 mV:n arvoon. Näin alkaa äkillinen Na^+ -ionien sisäänvirtaus ja tapahtuu depolarisaatio. Kun kalvojännite saavuttaa noin $+30$ mV:n arvon, tapahtuu Na^+ -ionikanavien inaktivoituminen, jonka jälkeen alkaa repolarisaatio. Repolarisaatiossa K^+ -ioneja alkaa virrata ulos solusta, mikä saa kalvojännitteen palautumaan lähtöarvoon. [6]

Sinussolmukkeen ja eteis-kammiosolmukkeen soluilla tapahtuu hitaampi aktiopotentiaali. Nämä solut toimivat sydämen tahdistimina, eli ne ohjaavat sydämen supistumista. Koska niissä nopeat Na^+ -ionikanavat eivät toimi, niiden on käytettävä hitaampia Ca^{2+} -kanavia depolarisaatiossa. Näille soluille ominaista on myös pienempi kalvojännite lepotilassa. Kun kalvopotentiaali saavuttaa noin -50 mV – -40 mV:n kynnysarvon, tapahtuu Ca^{2+} -ionikanavien hidas aukeaminen ja tämän jälkeen hidas inaktivoituminen. [6], [7] Sydämen keskeiset rakenteet ja sähköisen impulssin eteneminen sydämessä esitetään kuvassa 2.1.

Sydämen sähköistä toimintaa voidaan mitata potilaaseen kiinnitettävien elektrodien välisten potentiaalierojen avulla. Elektrodien kytkennät jaetaan bipolaarisiin ja unipolaarisiin kytkentöihin. Bipolaarisessa kytkennässä mitataan elektrodien väli-



Kuva 2.1: Sydämen tärkeimmät osat sekä sydämen sähköinen toiminta. Vasemmanpuoleisessa kuvassa nuolet osoittavat verenkierron suunnat ja oikeanpuoleisessa kuvassa nuolet osoittavat sydämen impulssin etemissuunnan. Muokattu [8]

siä potentiaalteroja yleensä raajoissa. Unipolaarisessa kytkennässä verrataan kehoon kiinnitetyn elektrodin potentiaalia kehon keskimääräiseen potentiaaliin. [6] Tavallisesti EKG:n mittaamiseen käytetään 12-kytkentäistä EKG:tä, jossa asetetaan neljä elektrodia raajoihin ja kuusi elektrodia rintakehälle. Rintakehän elektrodeilla muodostetaan kuusi unipolaarista kytkentää ja raajojen elektrodeilla muodostetaan kolme bipolaarista kytkentää sekä kolme unipolaarista kytkentää. [7]

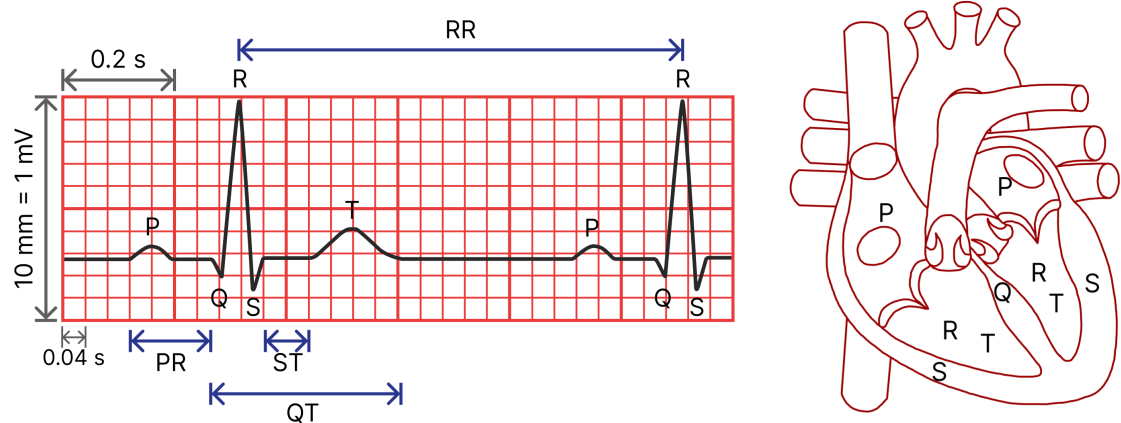
2.2 Elektrokardiogrammin tulkinta

Elektrokardiogrammissa x-akseli osoittaa ajan ja y-akseli osoittaa jännitteen. Käyrä tulostetaan perinteisesti millimetripaperille, joka on jaettu isoihin ja pieniin neliöihin. Paperin x-akselilla yksi sekunti jakautuu viiteen isoon neliöön, jolloin kukin neliö osoittaa 0.2 s:n kestoisen osan. Pienet neliöt jakavat ajan vielä viiteen osaan, jolloin yksi pieni neliö osoittaa 0.04 s:n kestoisen osan. Millimetripaperi tulostuu

25 mm/s nopeudella ja siihen piirtyvä elektrokardiogrammi kalibroidaan näyttämään 1 mV:n suuruinen potentiaalinmuutos 10 mm:n suuruisena pystysuuntaisena poikkeamana. [1] Tavallisesti 12-kytkentäisellä EKG:llä rekisteröinti tapahtuu kahden A4-sivun mittaisena tulosteena. Ensimmäisellä sivulla näkyvät raajakytkennät ja toisella sivulla rintakytkennät. Joskus EKG voidaan myös rekisteröidä niin, että kaikki mittaukset näkyvät allekkain. [6]

EKG:n tulkinta tapahtuu tyypillisesti tarkassa järjestyksessä, jotta havaintoja on mahdollisimman helppo tehdä. EKG sisältää normaalisti muutamia merkittäviä heilahduksia eli aaltoja, joita ovat P-aalto, QRS-kompleksi ja T-aalto. [6] P-aalto tapahtuu näistä ensimmäisenä ja se kuvaa eteisten depolarisaatiota, joka käynnistyy oikean eteisen sinussolmukkeesta ja etenee kohti vasenta eteistä. Tämä vaihe kestää normaalisti alle 120 ms ja on noin 0.25 mV:n suuruinen. Kun kammioden depolarisaatio alkaa, syntyy QRS-kompleksi. QRS-kompleksi sisältää kolme aaltoa, jotka ovat Q-aalto, R-aalto ja S-aalto. Q-aalto on pieni negatiivinen noin 0.1 mV:n suuruinen ja 40 ms:n kestoinen piikki, joka syntyy kammioden väliseinän depolarisaatiosta. Tätä seuraava R-aalto on EKG:ssä yleensä kaikista korkein aalto ja se syntyy kammioden supistumisesta. QRS-kompleksin viimeisenä oleva S-aalto on negatiivinen piikki, joka syntyy purkinjen säikeiden depolarisaation seurauksena. QRS-kompleksi kokonaisuudessaan kestää alle 120 ms:n ajan. Viimeinen aalto on positiivinen T-aalto, joka syntyy kammioden repolarisaation tuloksena. T-aallolla ei ole varsinaista vakioarvoa, vaan sen suuruutta verrataan QRS-kompleksiin. Täten T-aallon korkeus on normaalisti noin $1/8$ – $2/3$ R-aallon korkeudesta ja se kestää noin 120–200 ms. [1]

EKG:n tulkinnessa eri aaltojen väliset ajat ovat myös tärkeitä. Normaalissa EKG:ssä tärkeimmät aaltojen välit ovat PR-intervalli, ST-segmentti, QT-intervalli ja RR-intervalli. [6] PR-intervalli tai PQ-intervalli on P-aallon alusta alkava 120–200 ms kestävä vaihe, jossa sähköimpulssi etenee eteisistä kammioihin. Vaihe päät-



Kuva 2.2: Tavallinen elektrokardiogrammi, johon on merkitty tyypilliset aallot ja vaiheet, sekä sydän, johon on merkitty aaltojen lähteet. Muokattu [8], [9]

tyy QRS-kompleksin alkuun. ST-segmentti on QRS-kompleksin lopusta alkava tasainen vaihe. Se jatkuu T-aallon alkuun asti ja se näyttää kammioiden depolarisaation päättymisen sekä repolarisaation alkamisen. Tämän vaiheen kesto on tyypillisesti noin 80–100 ms. QT-intervalli on vaihe, joka alkaa QRS-kompleksin alusta ja päättyy T-aallon loppuun. Tämä vaihe on hyödyllinen siksi, koska se sisältää kokonaisuudessaan kuvauksen kammioiden depolarisaation alusta repolarisaation loppuun. QT-intervallin kesto on normaalisti noin 400–440 ms. [1], [6] RR-intervalli tarkoittaa kahden R-aallon huipun välistä aikaa ja sen avulla voidaan arvioida sykettä ja sydämen rytmin säännöllisyyttä. Tämä tehdään erityisesti R-aaltojen avulla, koska ne ovat EKG:n selkeimpiä ja tunnistettavimpia kohtia. [7] Esimerkki tavallisesta elektrokardiogrammista ja sen vaiheista on esitetty kuvassa 2.2. Kuvassa on lisäksi sydän, johon on merkitty aaltojen lähteet.

EKG:ssä voi myös esiintyä muita aaltoja, jotka tyypillisesti viittaavat epänormaaliin toimintaan sydämessä. Tällaisia ovat F-aalto, U-aalto, J-aalto, epsilon-aalto ja delta-aalto. F-aallot ovat P-aallon korvaavia epäsäännöllisiä ja amplitudiltaan vaihtelevia aaltoja, joita syntyy eteisvärinässä, jossa eteissä tapahtuu normaalien supistumisten sijaan sekavaa värähtelyä [6]. U-aalto on T-aallon jälkeen ilmenevä pieni positiivinen aalto, joka viittaa papillaarilihaksissa tai Purkinjen säikeissä jäljessä ta-

pahtuvaan repolarisaatioon. [1] J-aalto tai Osborn-aalto on QRS-kompleksissa ja ST-segmentissa tapahtuva positiivinen poikkeama, joka on tyypillinen hypotermiassa. Tämä johtuu yleensä hypotermian aiheuttamasta jännite-eron muutoksesta epikardiumin ja endokardiumin välillä. [6] Epsilon-aalto on positiivinen poikkeama QRS-kompleksin loppuvaiheessa. Se on oikean kammion dysplasiaan liittyvä ilmiö, jossa sydänlihaskudoksessa tapahtuu rakenteellisia muutoksia solutasolla. Delta-aalto on ylöspäin suuntautuva poikkeama QRS-kompleksin alussa. Tämä on seurausta sydämen kammioden ennenaikaisesta aktivaatiosta, mikä johtuu ylimääräisestä reitistä eteisen ja kammion välillä. [7]

3 Puettavat laitteet EKG:n monitorointiin

EKG:n monitorointiin suunnitellaan jatkuvasti uusia menetelmiä, jotta seuranta voisi olla helpompaa ja tehokkaampaa pitkäaikaisessa käytössä. Tavallisesti sairaaloissa EKG-monitorointi tapahtuu levossa 12-kytkentäisellä laitteella, mikä ei sovellu erityisen hyvin pitkäaikaiseen käyttöön [10]. Lääkinnälliseen käyttöön on kuitenkin kehitetty useita muita monitorointilaitteita, jotka eivät ole yhtä rajoittavia. Tällaisia ovat esimerkiksi Holter-monitori, EKG-tapahtumatalennin, sydämen etätelemetria-seuranta sekä silmukkatallennin. [3]

Holter-monitorit on hyvin yleisessä käytössä olevia pitkäaikaiseen seurantaan tarkoitettuja EKG-monitoreita. Ne on yleensä tarkoitettu vain yhden tai kahden vuorokauden mittaisiin ajanjaksoihin, vaikka joskus laitetta voidaankin käyttää jopa 14 vuorokautta. Pääasiallisesti Holter-monitorit on tarkoitettu potilaille, joilla esiintyy päivittäisiä oireita. [3] Holter-monitoroinnissa käytetään tyypillisesti kaksi- tai kolmekytkeäistä menetelmää, jolloin käytössä on kolme tai viisi bipolaarisesti kytkettyä elektrodiä. Elektrodit ovat kertakäyttöisiä ja ne asetetaan potilaan rintakehälle. EKG-signaali tallentuu potilaan mukana kannettavaan laitteeseen. [6]

EKG-tapahtumatalennin on yleisessä käytössä oleva epäsäännöllisempiin oireisiin tarkoitettu EKG-monitori [3], [6]. Tämä laite voidaan kiinnittää olemaan ran-teessa tai rintakehällä elektrodien avulla tai sitä voidaan kantaa mukana, jolloin se

kiinnitetään vain tarvittaessa. Jatkuvan mittaamisen sijaan laite voidaan asettaa monitoroimaan EKG:tä silloin kun oireita esiintyy. [3] EKG-tapahtumatallennin kykenee tyypillisesti tallentamaan muistiin yhteensä noin 30 minuuttia EKG-signaalia [6]. Laite on pieni ja sen käyttö ei vaadi yhtä montaa elektrodia kuin Holter-monitori, eikä sen mukana tarvitse kantaa erillisiä laitteita, mikä mahdollistaa potilaalle suuren vapauden arkielämässä. Lisäksi laitetta voidaan käyttää pidempään eli jopa kuukauden ajan kerrallaan. [3]

Sydämen etätelemetriaseuranta on hyvin samankaltainen menetelmä kuin Holter-monitorointi. Siinä potilaan rinnan alueelle asetetaan useita elektrodeja, jotka yhdistyvät johdoilla potilaan kantamaan laitteeseen. Erona on kuitenkin se, että monitoroitua EKG-signaalia ei varsinaisesti tallenneta. Sen sijaan signaali voidaan lähettää hoitohenkilökunnan seurantajärjestelmään, jolloin hoitohenkilökunta kykenee tutkimaan signaalia etänä. Signaalin lähetys tapahtuu joko potilaan toimesta oireiden esiintyessä tai automaattisesti havaittujen sydämen toiminnan muutosten perusteella. Tämä menetelmä soveltuu potilaille, joilla on epäsäännöllisiä ja lieviä oireita. [3]

Silmukkatallennin eli rytmivalvuri on ihon alle tyypillisesti rintakehän vasemmalle puolelle implantoitava laite, joka rekisteröi EKG:tä jatkuvasti ja tarvittaessa tallentaa signaalin. Tämä laite on erityisesti tarkoitettu epäsäännöllisiin ja harvemin tapahtuviin oireisiin. [3] Laitetta voidaan käyttää samalla tavalla kuin tapahtumatallenninta, eli potilas pystyy itse aktivoimaan EKG:n tallennuksen oireiden ilmaantuessa. Tämän lisäksi laitteeseen asetetaan raja-arvot, joiden ylittyessä EKG:n tallennus alkaa automaattisesti. [3], [6]

Sairaalakäyttöisten ja muiden lääkinnällisten EKG-laitteiden lisäksi on myös olemassa kuluttajalähtöisiä puettavia EKG-laitteita. Tällaisten laitteiden suosio on kasvanut viime vuosien aikana paljon ja erilaisia malleja on kehitetty jo useita. Kuluttajalähtöisten puettavien EKG-laitteiden potentiaali pitkäaikaisessa monitoroinnissa

on hyvin merkittävä, mutta niiden käyttöön liittyy myös paljon haasteita. Suurimpina epävarmuuksina voidaan pitää laitteiden mittaustarkkuutta sekä käyttömukavuudesta johtuvia haasteita pitkäaikaisessa käytössä. Kaikesta huolimatta kuluttajalähtöisten puettavien EKG-laitteiden suosion odotetaan kasvavan suuresti tulevaisuudessa teknologian jatkuvan kehityksen ja laitteiden suuren potentiaalin vuoksi. [10] Seuraavissa alaluvuissa esitellään yleisimmät kuluttajakäyttöön tarkoitetut puettavat EKG-laitteet. Esimerkit erilaisista laitteista esitetään kuvassa 3.1.

3.1 Älykellot ja rannekkeet

Älykellot ovat tällä hetkellä yksi merkittävimmistä kuluttajalähtöisistä puettavista laitteista ja niiden suosio on jatkuvassa kasvussa. Älykellojen teknologian kehitys on nopeaa ja uusia ominaisuuksia suunnitellaan paljon, jotta laitteista saadaan mahdollisimman suuri hyöty. EKG:n monitoroinnista on tullut merkittävä ominaisuus älykelloteknologiassa ja nykyään tämä ominaisuus löytyy suuresta osasta uusia älykelloja. Muun muassa tämän, mutta myös muiden monitorointiominaisuuksien myötä älykelloista on tullut hyödyllisiä välineitä terveyden tarkkailussa. [11] Älykellojen lisäksi on olemassa myös muita rannekkeita, jotka kykenevät EKG:n monitorointiin. Ne eivät ole yhtä yleisiä, mutta niiden toimintatapa on samanlainen ja ne ovat älykellojen tapaan myös nostamassa suosiotaan. [12]

Älykellot ja rannekkeet käyttävät yksikytkentäistä EKG-monitorointia. Laitteissa on tyypillisesti yksi elektrodi rannehihnassa kämmenen puolella ja toinen vastakkaisella puolella. Mittaus tapahtuu joko suoraan yhdestä kädestä ranteen molemmilta puolilta tai asettamalla toinen käsi kellotaulun elektrodiin, jolloin molempien käsiensä potentiaali mitataan. Näillä kahdella mittauksella saadaan muodostettua EKG-käyrä, josta voidaan nähdä oleelliset elementit. Mittaus ei yleensä ole jatkuvaa, vaan käyttäjä voi itse käynnistää mittauksen, joka kestää noin 30 sekuntia. Jotta mittaus onnistuu ja tulokset olisivat tarkkoja, on käyttäjän oltava levossa ja paikoillaan. [11]

EKG-monitorointiin kykeneviä älykelloja on markkinoilla jo useita ja uusia kehitetään jatkuvasti. Tunnetuimpia ovat Applewatch-, Samsung Galaxy Watch-, Fitbit Sense-, Withings ScanWatch -sarjojen mallit sekä useat Polarin älykellot. EKG-monitoroinnin ominaisuudet sekä mittaustarkkuus vaihtelevat jonkin verran mallien välillä. [13] Mittaustarkkuuksista ja ominaisuuksista kerrotaan luvussa 4.

3.2 Sykevyöt

Sykevyöt ovat tarkkoja ja kohtalaisen käytännöllisiä puettavia laitteita. Rintakehää pidetään ihmiskehon parhaana kohtana mitata EKG:tä, koska rintakehä on lähimpänä sydäntä ja siten EKG-signaali on voimakkain. Lisäksi rintakehällä ei yleisesti tapahdu paljoa muiden lihasten aiheuttamaa häiriötä. Tämän vuoksi sykevöillä voidaan saavuttaa korkea tarkkuus, ja niitä pidetäänkin erityisen lupaavana vaihtoehtona EKG:n monitoroinnissa. Toisaalta sykevöiden suuri haaste on niiden heikko käyttömukavuus etenkin pitkäaikaisessa käytössä. [14]

Sykevyöt ovat yksikytkeäisiä EKG-laitteita ja ne käyttävät tyypillisesti kahta elektrodia. Sykevöissä käytetään joustavia ja hengittäviä materiaaleja, niin hihnassa kuin elektrodeissa, mikä auttaa parantamaan laitteen istuvuutta ja käyttömukavuutta puettaessa. [14], [15] Laitetta pidetään rintakehän ympärillä siten, että elektrodit sijoittuvat rintakehän etuosaan. Elektrodien optimaalisesta sijainnista johtuen sykevyöt kykenevät monitoroimaan korkealaatuista EKG-signaalia jopa kävellessä ja juostessa. Mittaus tapahtuu jatkuvasti, eli sitä ei tarvitse erikseen käynnistää. Sykevöiden ominaisuudet siis mahdollistavat vaivattoman käytön ilman erillisiä mittaustoimenpiteitä. [14] Vaikka EKG:tä monitoroivat sykevyöt ovat pitkälti tutkimuksen ja kehityksen alla, on markkinoilla jo muutamia kuluttajien ostettavissa olevia laitteita, joista tunnetuimpia ovat Polarin H-sarjan mallit.

3.3 Käsivarsinauhat

Käsivarsinauhat ovat erittäin potentiaalisia yksikytkentäisiä puettavia laitteita EKG:n monitorointiin. Käsivarsinauha asetetaan vasemman olkavarren ympärille, sillä se on lähempänä sydäntä kuin oikea käsi. Nauhassa käytetään joustavia ja pehmeitä elektrodeja, jotka mittaavat potentiaalieroja käsivarren eri puolilta. [16] Elektrodien määrä vaihtelee eri mallien välillä ja on tyypillisesti 2–3 [16], [17].

Käsivarsinauhat ovat osoittaneet hyvin lupaavia tuloksia EKG:n monitoroinnissa ja niitä voidaan pitää jopa varsin luotettavina mittausvälineinä. Käsivarsinauhojen hyvälaatuinen EKG-signaali perustuu pitkälti siihen, että mittaaminen tehdään sydämen läheisyydessä, kuten sykevöillä. Lisäksi mittauksessa pystytään käyttämään useampia elektrodeja kuin esimerkiksi älykelloissa ja rannekeissa. Käsivarsinauhoilla voidaan monitoroida EKG:tä hyvällä tarkkuudella sekä paikoillaan että liikkeessä, eli laitteilla on hyvät lähtökohdat pitkäaikaismonitorointiin. [16]

Käsivarsinauhojen yksi tärkeimmistä ominaisuuksista on niiden huomaamattomuus. Verrattuna esimerkiksi sykevöihin ja ranteessa pidettäviin laitteisiin käsivarsinauha tarjoaa paljon mukavamman ratkaisun, joka häiritsee käyttäjää vähemmän. Monitorointia käsivarsinauhoilla on myös testattu erilaisissa tilanteissa ja olosuhteissa. Näiden tulosten mukaan käsivarsinauhalla saadaan mitattua hyvälaatuista EKG:tä istuessa, seistessä, kävellessä ja juostessa. [17] Erityisesti EKG-käyttöön tarkoitettuja käsivarsinauhoja on tällä hetkellä kuluttajamarkkinoilla vähän ja suurin osa malleista on vasta kokeellisia versioita. Kehitteillä on kuitenkin useita eri malleja, ja EKG-käsivarsinauhojen voidaan odottaa yleistyvän enemmän tulevaisuudessa.

3.4 Tekstiilit ja vaatteet

Tekstiilit ja vaatteet ovat tällä hetkellä yleistäviä laitteita EKG:n monitoroinnissa. Joustavien elektrodien ansiosta EKG-monitorointia ollaan voitu toteuttaa useilla eri

vaatekappaleilla. Yleisimpiä vaatekappaleita ovat erityisesti t-paidat ja liivit, sillä niissä elektrodit saadaan sijoitettua optimaalisesti rintakehän alueelle. [18] Muita kokeellisempia vaatekappaleita EKG-monitoroinnissa ovat esimerkiksi alushousut, hanskat ja sukat.

Tekstiileihin yhdistettävää elektrodeja on erilaisia ja niiden yhdistämistä vaateisiin on kokeiltu useilla eri tavoilla. Yleensä käytetään taipuisia ja pesunkestäviä elektrodeja, jotka joko ommellaan tai brodeerataan tekstiiliin kiinni. Näissä elektrodityypeissä on jonkin verran eroja tarkkuudessa ja käytännöllisyydessä. Yleisesti brodeeratut elektrodit ovat tarkempia ja tarjoavat paremman ihokontaktin, jolloin tulokset ovat tasalaatuisempia. [15] Näiden elektrodityyppien lisäksi on myös kehitetty kangasmateriaaleja, jotka toimivat elektrodeina. Tällaiset elektrodit voidaan yhdistää suoraan osaksi vaatteen kangsrakennetta ilman erikseen kiinnitettäviä elektrodipaikkauksia. Näin elektrodit ovat entistäkin huomaamattomampia ja iholle ystävällisempiä, mikä voi pidentää käyttöaikaa. [19] Elektrodit kiinnitetään paidoissa ja liiveissä tyypillisesti rintakehän etuosaan, kainaloihin tai rintakehän sivuille [15].

EKG:n monitorointiin tarkoitettujen vaatteiden etu on käytännöllisyys, sillä käyttäjän ei tarvitse käyttää erillistä laitetta. Kuluttajamarkkinoilla laitteita on kuitenkin vähän, sillä vielä ei olla löydetty optimaalista toteutustapaa ja parhaita materiaaleja. Tutkimukset mittaustarkkuudesta ja käytännöllisyydestä ovat tähän mennessä osoittaneet lupaavia tuloksia, mutta laitteiden laajemman käytön voidaan odottaa yleistyvän vasta tulevaisuudessa.

3.5 Puettavien EKG-laitteiden sovellukset

EKG:n avulla voidaan tehdä havaintoja sydämen toiminnasta ja tyypillisesti EKG-käyrän analysointi on vain terveydenhuollon ammattilaisten tehtävä. Kuitenkin yhä yleistyvänä ominaisuutena EKG-laitteissa on käyrän automaattinen analysointi ha-



Kuva 3.1: Mallikuvat alalukujen 3.1–3.4 puettavista laitteista. a) älykello, b) sykevyö, c) käsivarsinauha (kehitteillä on myös huomattavasti pienempiä malleja), d) urheiluliivi, e) t-paita. [20], [21], [22].

vaintojen, algoritmien ja tekoälyn avulla ja tämä ominaisuus löytyy jo joistakin kuluttajalähtöisistä EKG-laitteista. Analyysit voivat havaita viitteitä niin normaalista kuin epänormaalista sydämen toiminnasta. Diagnoosien tekeminen kuitenkin edellyttää virallisia mittauksia ja kliinisesti hyväksyttyjä menetelmiä. [10] Tämänhetkiset järjestelmät keskittyvät pitkälti vain sinusrytmin ja eteisvärinän tunnistamiseen. Laitteilla on kuitenkin tutkittu olevan potentiaalia myös muihinkin sovelluksiin, kuten sydänkohtauksiin, sydämen vajaatoimintaan ja erilaisiin rytmihäiriöihin. [12]

Sinusrytmi tarkoittaa sydämen normaalia rytmiä, jossa sähköinen impulssi lähtee sinussolmukkeesta eteenpäin. EKG-monitoroinnissa sinusrytmiä voidaan pitää hyvin keskeisenä asiana, sillä sen avulla voidaan perustavanlaatuisesti arvioida sydämen toimintaa. Normaalin sinusrytmin tapauksessa EKG ei sisällä merkittäviä poikkeavuuksia, vaan kaikki käyrälle ominaiset elementit ovat normaalisti näkyvillä. [6] Vaikka monet puettavat EKG-laitteet eivät kykene itse sinusrytmin tunnistamiseen, voidaan sitä kuitenkin pitää yhä yleistyvänä ominaisuutena [10].

Joillakin kuluttajalähtöisillä puettavilla EKG-laitteilla voidaan myös havaita eteisvärinää EKG-käyrän perusteella. Eteisvärinä on yleinen sydämen rytmihäiriö, jonka aikana sydämen eteisissä tapahtuu epäsäännöllistä värinää. Tällöin sydämen eteiset eivät supistu normaalisti, vaan värähtelevät sekavasti nopealla taajuudella. Eteisvärinälle tyypillistä EKG-käyrässä on selkeän P-aallon puuttuminen, jolloin tilalla on epäsäännöllisen värähtelyn tuottamia F-aaltoja. [6] Algoritmit tarkkailevat esimerkiksi P-aaltojen puuttumista sekä sykevälivaihtelua, jota voidaan arvioida muun muassa RR-intervallien säännöllisyyden perusteella. Lisäksi eteisvärinälle tyypillisen värähtelyn tunnistamiseen voidaan käyttää tekoälyä ja koneoppimista. [10], [12]

4 Laitteiden vertailu

Tässä osiossa vertaillaan alaluvuissa 3.1–3.4 esiteltyjen puettavien EKG-laitteiden soveltuvuutta pitkäaikaiseen monitorointiin. Vertailu perustuu laitteiden yleisiin ominaisuuksiin ja kliiniseen hyödynnettävyyteen. Lisäksi arvioidaan laitetyyppien mahdollisia rajoitteita. Taulukko 4.1 tiivistää eri laitteiden keskeiset ominaisuudet.

Puettavien laitteiden tärkeimpiä ominaisuuksia EKG-monitoroinnissa ovat mittastarkkuus, laitteen käyttömukavuus ja mahdollisimman pitkä mittausaika. Vertailua vaikeuttaa tiettyjen ominaisuuksien subjektiivisuus. Esimerkiksi mittastarkkuutta on helppo tarkastella suoraan tulosten perusteella, mutta käyttömukavuus ei ole yhtä yksinkertaisesti arvioitavissa. Täten jatkuvan mittausajan on oltava realistinen ja sen tulee huomioida arviot laitteen yhtäjaksoisesta käytöstä.

Jopa 35 % kaupallisista puettavista sydän- ja verisuonitautien monitorointilaitteista on älykelloja ja rannekkeita. Tämä tekee niistä selkeästi suosituimpia ja yleisimpiä laitetyyppejä myös EKG:n monitoroinnissa. Älykellojen ja rannekkeiden suosiota ajaa erityisesti niiden mukavuus ja helppo integroituvuus mukaan arkeen. Usein niiden tarkkuus ei kuitenkaan yletä muiden puettavien EKG-laitteiden tasolle. [4]

Älykellojen ja rannekkeiden avulla tapahtuvan EKG-monitoroinnin tulisi tapahtua aina levossa, jotta syke on tarpeeksi matala ja tasainen. Useimmille laitteille onkin määritetty varsinaiset sykealueet, joiden sisällä mittaus tulisi suorittaa. Mikäli mittaus tehdään sykealueiden ulkopuolella, ei analysoitavaa tulosta anneta käyttäjälle liian heikkolaatuisen signaalin vuoksi. Useimmat älykellot ja rannekkeet

tunnistavat sinusrytmin vähintään 50–100 lyönnin sykealueella, mikä on normaali leposykkeen alue tavallisella ihmisellä. Tämän lisäksi osassa laitteista on eteisvärinän tunnistava ominaisuus. Tämä ominaisuus toimii myös eri sykeväleillä mallista riippuen, mutta on yleisesti vähintään sykealueella 50–120. [13] Älykellojen ja rannekkeiden mahdollisuuksia laajemmassa EKG-poikkeavuuksien tunnistamisessa on myös tutkittu ja on osoittautunut, että eteisvärinän lisäksi laitteilla on mahdollista havaita muitakin rytmihäiriöitä. Tulevaisuudessa EKG:n analysointi älykelloilla ja rannekeilla voi siis laajennetua, vaikka tällä hetkellä se on vielä erittäin rajallista. [23]

Älykellojen ja rannekkeiden mittaustarkkuus vaihtelee mallien välillä melko paljon. Lisäksi valmistajien välillä on eroja EKG:n analysointialgoritmeissa. Tämä tarkoittaa, että eri valmistajien laitteet voivat tehdä toisistaan poikkeavia havaintoja EKG:stä. Tämän vuoksi laitteiden käyttö varsinaisessa diagnostiikassa on epätarkkaa ja laitteiden valmistajat painottavat, että laitteella mitattavan EKG:n perusteella ei saa tehdä diagnooseja. Lisäksi yleensä vain noin 80–90 % EKG-mittauksista on riittävän tarkkoja arvioitavaksi. [13]

Apple Watch-, Withings ScanWatch-, Samsung Galaxy Watch- ja Fitbit Sense-sarjat tarjoavat ominaisuuksiltaan hyvin samankaltaisia älykelloja. Nämä laitteet käyttävät monitoroinnissa sykealueita ja 30 sekunnin pituista mittausaikaa. Laitteiden tekemien analyysien perusteella ne kykenevät tunnistamaan normaalin sinusrytmin, kohonneen sykkeen sekä mahdollisen eteisvärinän. [13] Tällä hetkellä laajimmat sykealueet ovat Apple Watch- ja Withings ScanWatch -sarjojen laitteilla. Sinusrytmin ja eteisvärinän seuranta tapahtuu etenkin uusissa malleissa jopa sykevälillä 50–150. [13], [24], [25] Samsung Galaxy Watch-kellot käyttävät sinusrytmin tunnistuksessa 50–100 sykealuetta ja eteisvärinän tunnistuksessa 50–120 sykealuetta [13], [26]. Fitbit Sense-kelloissa vastaavat sykealueet ovat 50–120 molemmissa tapauksissa [13]. Muista älykelloista poiketen Withings ScanWatch-sarjan laitteil-

la on lisäksi ominaisuutena EKG-intervallien analysointi. Laite kykenee arvioimaan sykevälin, PR-intervallit ja QT-intervallit. [25], [27]

Apple Watch, Withings ScanWatch, Samsung Galaxy Watch ja Fitbit Sense-sarjojen laitteiden tarkkuudet sinusrytmin ja eteisvärinän tunnistuksessa ovat melko korkeat. Näiden laitteiden tarkkuuden kuvaamiseen käytetään tyypillisesti kahta arvoa, jotka ovat sensitiivisyys ja spesifisyys. Sensitiivisyys kuvaa laitteen tarkkuutta tunnistaa poikkeavat löydökset oikein ja spesifisyys kuvaa tarkkuutta tunnistaa normaalit löydökset oikein. [28], [29] Kliinisten tutkimusten tulokset vaihtelevat hieman ja niiden perusteella Apple Watch-kellojen sensitiivisyys eteisvärinän tunnistuksessa on 85–100 % ja spesifisyys sinusrytmin tunnistuksessa on 75–100 %. [11], [24], [28], [29] Withings ScanWatch-kellot ovat antaneet vaihtelevampia tuloksia. Sensitiivisyys on vaihdellut välillä 58–100 % ja spesifisyys välillä 75–100 %. [29], [30] Samsung Galaxy Watch-sarjan kellot tarjoavat tutkimusten perusteella 85–92 %:n sensitiivisyyden ja 75–96 %:n spesifisyyden. Fitbit Sense -sarjan kellot taas ovat saaneet sensitiivisyydeksi 66–90 % ja spesifisyydeksi 79–96 %. [29], [31] Withings ScanWatch-kellojen EKG-intervallien tunnistus toimii myös melko vaihtelevalla tarkkuudella, sillä kaikki algoritmien laskemat komponentit eivät ole yhtä yksinkertaisia määrittää. Tulosten perusteella 93 % mittauksista määritti sykevälin onnistuneesti, 71 % määritti PR-intervallin onnistuneesti ja 56 % määritti QT-intervallin onnistuneesti. [27]

Polarin älykellot tarjoavat myös hyvälaatuisen ja tarkan EKG-signaalin. Tämän sarjan älykelloilla ei ole samanlaisia EKG:n analysointimahdollisuuksia kuin suurimmalla osalla muista älykelloista, minkä vuoksi niillä ei ole käytössä sykerajoituksia, eikä niiden tarkkuudessa voida käyttää sensitiivisyyttä ja spesifisyyttä. Ne kuitenkin käyttävät muiden älykellojen tapaan 30 sekunnin mittauksia, joka tulisi tehdä paikallaan levossa. [32] Polarin älykellojen vahvuutena voidaan erityisesti pitää EKG-signaalin laatua. Polar on omissa tutkimuksissaan verrannut älykello-

jen ja Holter-monitorin EKG-signaalia keskenään. Tulosten mukaan noin puolilla kellon tuottamista EKG-käyristä on laadultaan vain 2 %:n ero Holter-monitoriin. Tutkimuksessa myös havaittiin, että noin viidesosa mittauksista oli vähintään yhtä laadukkaita kuin Holter-monitorilla tehdyt mittaukset. [32]

Älykellojen ja rannekkeiden suuret vaihtelut tarkkuudessa johtuvat pitkälti tutkimusten toteutustavoista ja ympäristöistä. Kontrolloidussa tutkimusympäristössä saadaan jopa erittäin hyviä tuloksia, kun taas vapaammissa mittauksissa arkisissa ympäristöissä tutkimustulokset ovat selkeästi heikompia. Tämän perusteella käyttäjien itse tekemät mittaukset eivät usein anna luotettavia tuloksia, sillä kontrollottomissa ympäristöissä virheiden todennäköisyys on melko suuri. Kokonaisuudessaan älykelloja ja rannekeita voidaan pitää melko tarkkoina levossa tapahtuvissa lyhytaikaisissa mittauksissa. Tulosten vaihtelevuuden vuoksi niiden hyödyntäminen diagnostiikassa on kuitenkin toistaiseksi haasteellista.

Sykevöitä pidetään yleisesti esimerkiksi älykelloja ja rannekeita parempina EKG:n mittausvälineinä. Tämä johtuu siitä, että sykevyöt ovat tarkkoja ja melko monikäyttöisiä EKG:n monitorointivälineitä. Erityisen merkittävää on niiden erinomainen EKG-signaalin laatu myös vaativan fyysisen aktiivisuuden aikana, mikä johtuu pitkälti elektrodien optimaalisesta sijainnista. Tämä on merkittävä asia puettavien laitteiden kannalta, sillä pitkäaikainen EKG:n monitorointi puettavilla laitteilla vaatii hyvää suorituskkyä myös liikkeessä. Sykevyöt eivät tyypillisesti tarjoa diagnostista analyysia EKG:stä, kuten monet älykellot, sillä niiden painotus on pitkäaikaisessa monitoroinnissa ja korkealaatuisessa EKG-signaalissa. Sykevöiden suurimpia haasteita ovat niiden käytettävyys ja käyttömukavuus. Jatkuvässä käytössä sykevyöt ovat tyypillisesti epämuukavia ja ne eivät tarjoa samanlaista huomaamattomuutta kuin muut pienemmät laitteet. [14]

Tällä hetkellä Polar H-sarjan mallit ovat tunnetuimpia EKG:n mittaukseen kykeneviä sykevöitä. Näillä sykevyöillä on mahdollista tuottaa erittäin hyvälaatui-

nen EKG-signaali. Tutkimuksissa on verrattu uusimman Polar H10 -mallin EKG-signaalia muihin kliinisessä käytössä oleviin EKG-monitoreihin kuten Holter-monitoriin ja tavalliseen 12-kytkentäiseen EKG-monitoriin. Tulosten mukaan Polar H10 pystyy levossa tuottamaan jopa lähes täydellisen EKG:n verrattuna klinisiin menetelmiin. Signaalissa ei ole merkittäviä poikkeavuuksia, ja laitteiden välillä signaalien vastavuus on erittäin korkea. Pienetkin sykemuutokset näkyivät EKG-signaalissa ja ne vastasivat lähes täysin kliinisten menetelmien EKG:tä. [33], [34] Polarin omien tutkimusten mukaan käyttäjän ollessa liikkeessä EKG-signaali kuitenkin kärsii hieman. Fyysisten aktiviteettien aikana mitattujen EKG-signaalien tarkkuutta mitattiin sykkeen ja RR-intervallien perusteella. Signaalin laadun heikkenemisestä huolimatta Polar H10:n EKG-signaalissa virheellisesti mitattujen sydämenlyöntien määrä oli vain alle 4 %. Lisäksi Polarin tutkimusten mukaan Polar H10 sykevyö tuotti eri aktiviteettien aikana Holter-monitoriin verrattuna keskiarvolta noin 3,2–4,5 % enemmän signaaleja, joiden RR-intervallin tarkkuus oli 2 ms. Näiden tulosten perusteella sykevöiden EKG-signaali on jopa hyvin verrattavissa klinisiin menetelmiin. [33]

Sykevyöt ovat kuluttajälähtöisessä EKG-monitoroinnissa vielä hieman harvinaisia, vaikka niiden mittaustarkkuus on erinomainen sekä levossa että liikkeessä. Parhaimmillaan niiden tuottaman EKG-signaalin laatu vastaa hyvin jopa kliinisten laitteiden tasoa, minkä vuoksi sykevyöt voisivat mahdollisesti olla hyvä apuväline diagnostiikassa. Sykevöiden suosiota kuitenkin rajoittaa niiden epäkäytännöllisyys arjessa, sillä laitteita voi olla epämukavaa ja haastavaa käyttää pitkäaikaisesti.

Käsivarsinauhoja voidaan pitää väliratkaisuna älykellojen ja rannekeiden sekä sykevöiden välillä. Sijainti on lähellä sydäntä ja laite on myös pienikokoinen, mukava ja huomaamaton. Käsivarsinauhat sopivatkin ominaisuuksiltaan hyvin pitkäaikaiseen monitorointiin. Lisäksi laite on mahdollista kiinnittää tukevasti käsivarteen, jolloin erityisesti liikkeessä EKG-signaali säilyy mahdollisimman hyvänä. [16], [35]

Käsivarsinauhat ovat EKG-monitoroinnin kannalta pitkälti kehityksessä olevia

laitteita, eikä suoranaisesti kuluttajille tarkoitettuja virallisia malleja ole vielä saatavilla. Käsivarsinauhojen tarkkuuksista ja ominaisuuksista on kuitenkin tutkimusnäyttöä, minkä pohjalta tulevaisuudessa tällaiset laitteet voisivatkin olla yleisiä kuluttajien käytössä. Tutkimuksissa on testattu käsivarsinauhojen EKG:n monitorointia erikseen levossa, liikkeessä ja myös osana arkea. Laitteen EKG-signaalin laatua pidetään erittäin hyvänä, vaikkakin hieman huonompana kuin esimerkiksi Holter-monitorin. Näiden kahden vertailussa EKG-signaalin syke ja sykevälivaihtelu antavat lähes yhtä tarkkoja tuloksia. Lisäksi käsivarsinauhan sekä Holter-monitorin signaalien korrelaatioksi luokiteltiin 0,95. [35]. Käsivarsinauhojen EKG-signaalin laatua on tutkittu myös signaali-kohinasuhteen kannalta ja se on pitkälti lähes yhtä hyvällä tasolla kliinisten laitteiden kanssa. Signaalin laatu kuitenkin heikkenee liikkeessä yleisesti hieman enemmän kuin rinnalle asettuvilla laitteilla. Tämä johtuu siitä, että laitteen etäisyys sydämeen on suurempi ja käsivarren isot lihakset häiritsevät EKG-signaalia enemmän. [16]

Käsivarsinauhoilla on myös testattu eteisvärinän tunnistusta. Laitteiden sensitiivisyydeksi on saatu jopa 99,89 % ja spesifisyydeksi jopa 99,99%. Nämä tulokset ovat huomattavasti parempia kuin yleisesti esimerkiksi älykelloilla sekä rannekeilla ja ne vastaavat jopa kliinisten laitteiden tuloksia. Toisaalta tutkimuksia käsivarsinauhoilla on tehty huomattavasti vähemmän, joten tarkkuudelle ei ole vielä täysin pitäviä ja luotettavia todisteita. [36]

Käsivarsinauhojen optimointi EKG-monitorointiin on pitkälti kesken, minkä vuoksi käsivarsinauhojen täyttä potentiaalia ei vielä tiedetä. Kokonaisuudessaan elektrodien sijaintia, nauhan tiukkuutta ja parhaita materiaaleja on tutkittu, mutta kuluttajakäyttöön soveltuvia laitteita ei vielä ole. Syynä käsivarsinauhojen vähäisempään kehitykseen voi esimerkiksi olla niiden välimallisuus älykellojen ja rannekeiden sekä sykevöiden kesken. Monelle älykello tai ranneke voi olla parempi ratkaisu arkeen ja tarkemmissa mittauksissa sykevyö tuottaa laadukkaamman EKG-signaalin.

Tekstiilit ja vaatteet tarjoavat erilaisen lähestymistavan EKG:n monitorointiin verrattuna muihin puettaviin laitteisiin. Tällaisten laitteiden merkittävimpiä ominaisuuksia ovat käyttömukavuus ja huomaamattomuus, joita pidetään isoina haasteina pitkäaikaisessa EKG-monitoroinnissa. Parhaimmillaan tekstiilipohjaisten EKG-laitteiden EKG-signaalin laatu levossa on jopa hyvin lähellä klinisiä laitteita. Kuitenkin suurimmat ongelmat ilmenevät liikkeessä, sillä vaatteita on hankala saada istumaan tarpeeksi tiukasti, jotta elektrodit säilyttävät hyvän ihokontaktin. Parhaimmaksi todettuja vaatekappaleita EKG-monitoroinnissa ovat muun muassa tiukat urheilupaidat ja -liivit. Toisaalta myös liian tiukat vaatteet vähentävät käyttömukavuutta ja täten heikentävät käyttökokemusta. Lisäksi myös tekstiielektrodien materiaaivalinnoissa ilmenee haasteita. Esimerkiksi metallipohjaiset elektrodit johtavat hyvin sähköä, jolloin ne tuottavat hyvälaatuisen EKG-signaalin, mutta ne ovat jäykkiä ja epämukavia. Metallipohjaisten elektrodien sijaan käytettävät mukavammat hiilipohjaiset ja polymeeripohjaiset elektrodit eivät taas tuota yhtä hyvää mittaustarkkuutta huonomman johtavuuden vuoksi. [18]

Elektrodeja voidaan kiinnittää tekstiileihin useilla eri tavoilla, kuten ompelemalla, brodeeraamalla tai rakentamalla ne osaksi tekstiilin 3D-kangasrakennetta. Parhaat tulokset EKG-vaatteista ja -tekstiileistä on saatu elektrodien brodeerauksella sekä erityisesti 3D-tekstiielektrodien avulla. [15], [19] Esimerkiksi brodeeratut hopeaelektrodit tarjoavat hyvän ihokontaktin ja johtavuuden, mikä mahdollistaa erittäin hyvälaatuisen EKG-signaalin levossa. Liikkeessä signaali kuitenkin kärsii merkittävästi. [15] 3D-tekstiielektrodien avulla on puolestaan saatu tuotettua EKG-signaali, jonka laatu vastaa hyvin klinisten laitteiden EKG-signaalia niin levossa kuin liikkeessä. Tällä menetelmällä on matala kontakti-impedanssi, mikä tarkoittaa että epätäydellisestä ihokontaktista huolimatta sen johtavuus on hyvä. Lisäksi tämänkaltaiset tekstiilit ovat mukavia ja niiden käyttöikä on pitkä, sillä elektrodit säilyttävät tarkkuuden jopa pesun jälkeen. [19]

Taulukko 4.1: Taulukko kuluttajälähtöisten puettavien EKG-laitetyyppien ominaisuuksista.

Laitetyyppi	Mittaustarkkuus	Käyttöaika	Rajoitteet
Älykellot ja rannekkeet	Hyvä tarkkuus EKG-signaalissa sekä sinusrytmin ja eteisvärinän tunnistuksessa vain levossa.	30 sekuntia	Voidaan tyypillisesti tehdä vain lyhyitä mittauksia.
Sykevyöt	Erinomainen tarkkuus EKG-signaalissa levossa ja liikkeessä.	tunteja–1 päivä	Epäsoveltuvia jatkuvaan käyttöön.
Käsivarsinauhat	Erittäin hyvä tarkkuus EKG-signaalissa sekä sinusrytmin ja eteisvärinän tunnistuksessa levossa. Liikkeessä tarkkuus kärsii hieman.	päiviä–viikkoja	Voi ottaa häiriötä liikkeessä. Lisäksi laitteita ei ole vielä optimoitu kuluttajakäyttöön.
Tekstiilit ja vaatteet	Erinomainen tarkkuus EKG-signaalissa levossa ja liikkeessä.	tunteja–päiviä	Epäsoveltuvia jatkuvaan käyttöön. Lisäksi laitteita ei ole vielä optimoitu kuluttajakäyttöön.

Tekstiilien ja vaatteiden osalta tulevaisuus näyttää lupaavalta, sillä ne voivat tarjota kuluttajille erittäin helpon ja tehokkaan tavan monitoroida EKG:tä pitkäaikaisesti. Tällä hetkellä tekstiileille ja vaatteille vasta etsitään parhaita ratkaisuja optimaaliseen käyttöön, vaikka tulokset ovat jo erinomaisia. Vaikka EKG-signaalin tarkkuus on korkealla tasolla, voi ongelmaksi tulla vaatteiden jatkuva käyttö. Materiaaleista huolimatta vaatteita voi olla epämukava käyttää pitkään, minkä lisäksi vaatteita on pestävä usein. Jatkuva käyttö ei siis ole yhtä helppoa kuin esimerkiksi älykelloilla ja rannekkeilla tai käsivarsinauhoilla.

5 Pohdinta

Kuluttajille tarkoitettujen puettavien EKG-laitteiden ominaisuudet ja signaalin laatu vaihtelevat laitetyypistä riippuen jopa kohtalaisen paljon. Laitteiden ominaisuuksien perusteella laitetyypit voivat olla toisia sopivampia erilaisissa tilanteissa. Tässä luvussa käsitellään eri laitteiden hyödynnettävyyttä, käyttötarkoituksia ja kohde-ryhmiä.

Älykellot ja rannekkeet sopivat lähes jokaiselle ihmiselle niiden käytännöllisyyden ja huomaamattomuuden vuoksi. Niillä voidaan kuitenkin tehdä lähinnä vain lyhytaikaisia mittauksia levossa. Lisäksi mitatun EKG-signaalin laatu ei yleisesti vastaa sairaalakäyttöisten laitteiden tasoa, minkä vuoksi älykellot ja rannekkeet sopivat pitkälti vain kevyeen arkikäyttöön ja matalan kynnyksen seurantaan EKG-monitoroinnista kiinnostuneille. Sopivuutta arkikäyttöön ajavat käytön yksinkertaisuus ja hyvä käyttömukavuus. Mikäli kuitenkin kyseessä on sydänsairas käyttäjä tai muu käyttäjä, joka haluaa erityisesti tarkkoja tuloksia, ovat älykellot ja rannekkeet huono vaihtoehto.

Sykevyöt ja käsivarsinauhat ovat aktiivisille urheilijoille soveltuvia puettavia EKG-laitteita. Molemmilla laitteilla saadaan tuotettua liikunnan aikana laadukas EKG-signaali, joka vastaa jopa melkein sairaalakäyttöisten puettavien laitteiden tasoa. Yleisesti sykevöiden mittaustarkkuutta voidaan pitää hieman käsivarsinauhoja parempana etenkin liikkeen aikana. Sykevöiden suurimmat haasteet liittyvät kuitenkin käyttömukavuuteen. Hyvillä materiaaleilla tätä on onnistuttu parantamaan

huomattavasti, mutta pitkäaikainen käyttö on edelleen haastavaa. Käsivarsinauhoja voidaan sen sijaan pitää hieman parempina vaihtoehtoina käyttömukavuuden kannalta. Liikkeen aikana tapahtuvan mittaustarkkuuden heikkenemisen vuoksi ne kuitenkin sopivat lähinnä hieman kevyempään liikuntaan kuin sykevyöt. Käsivarsinauhosten suosio kuluttajamarkkinoilla on yleisesti vähäisempi, sillä sykevöiden parempi mittaustarkkuus on ohjannut kehitystä enemmän sykevöiden suuntaan. Täten sykevyöt ovat yleisesti tällä hetkellä kehittyneempiä sekä suositumpia kuin käsivarsinauhat. Käsivarsinauhoilla on kuitenkin potentiaalia erityisesti myös pitkäaikaisessa arkimonitoroinnissa.

Käsivarsinauhat sekä tekstiilit ja vaatteet ovat lupaavimpia ratkaisuja pitkäaikaiseen tarkkaan EKG-monitorointiin. Nämä laitteet tarjoavat erinomaisia tuloksia, jotka ovat verrattavissa sairaalakäyttöisiin EKG:n pitkäaikaismonitorointimahdollisuuksiin. Tekstiileistä ja vaatteista erityisesti urheilupaidat ja -liivit antavat erinomaisia tuloksia EKG-signaalin laadun kannalta, kun taas käsivarsinauhat tarjoavat hieman heikommanlaatuisen signaalin. Käsivarsinauhosten etu tulee kuitenkin käyttömukavuudessa pitkäaikaisesti. Vaikka vaatteet ja tekstiilit ovat käyttömukavuuden kannalta hyviä, niitä tuskin käytetään täysin jatkuvasti, sillä vaatteet likaantuvat ja voivat olla epäkäytännöllisiä jatkuvassa käytössä. Täten pienempi käsivarsinauha voi toimia paremmin pitkäaikaisessa käytössä, sillä erityisesti venyillä, pehmeillä ja muuten mukavilla materiaaleilla käytöstä voidaan tehdä lähes huomaamatonta. Kuitenkin tekstiilit ja vaatteet sekä käsivarsinauhat ovat kaikki erittäin hyviä ja potentiaalisia laitteita pitkäaikaiseen EKG-monitorointiin ja niillä voidaan nähdä mahdollisuuksia jopa kliinisessä käytössä.

6 Yhteenveto

Tässä tutkielmassa tarkasteltiin yleisimpiä kuluttajalähtöisiä puettavia EKG-laitteita. Tavoitteena oli selvittää, millaisia laitteita on kehitetty ja vertailla niiden teknisiä ominaisuuksia. Lisäksi tavoitteena oli pohtia laitteille sopivimpia käyttötarkoituksia ja käyttäjäryhmiä.

Kirjallisuuskatsauksessa osoittautui, että on olemassa hyvin monia erilaisia ratkaisuja EKG:n monitorointiin puettavilla laitteilla. Yleisimpiä laitteita kuluttajalähtöisessä EKG-monitoroinnissa ovat älykellot, rannekkeet, sykevyöt, käsivarsinauhat, tekstiilit ja vaatteet (TK1). Suosituimpia ovat selkeästi älykellot ja rannekkeet, joita on kuluttajamarkkinoilla jo paljon, sekä sykevyöt, joista myös löytyy kuluttajamarkkinoilta useita malleja. Käsivarsinauhat, vaatteet ja tekstiilit ovat harvinaisempia, mutta niitäkin esiintyy jonkin verran esimerkiksi tutkimuskäytössä. Tekstiileistä ja vaatteista menestyneimpiä tutkimuksissa ovat tällä hetkellä urheilupaidat ja -liivit.

Laitteiden väliset tekniset erot ovat melko suuria ja laitteiden osalta joudutaan tekemään paljon erilaisia kompromisseja käyttömukavuuden ja mittaustarkkuuden välillä (TK2). Jos puettavia laitteita halutaan käyttää pitkäaikaisesti osana arkea, on niiden oltava tarkkoja mittauksessa ja niiden käyttömukavuuden on oltava hyvä. Tarkimpia laitteita ovat sykevyöt ja vaatteet, joiden EKG-mittaus tapahtuu rinnan alueella. Niiden käyttömukavuus ei kuitenkaan ole parhaalla tasolla pitkällä aikavälillä, mikä tekee pitkäaikaisesta monitoroinnista haastavaa. Käyttömukavuuden kannalta parhaita laitteita ovat älykellot ja rannekkeet sekä käsivarsinauhat, sillä ne

ovat pieniä ja huomaamattomia. Käsivarsinauhat ovat hieman harvinaisempia laitteita, joiden mittaustarkkuus on kuitenkin hyvällä tasolla sairaalalaitteisiin verrattuna. Älykellojen ja rannekkeiden mittaustarkkuus ei riitä sairaalalaitteiden tasolle, mutta niiden käytännöllisyys tekee niistä hyvin suosittuja.

Laitteille voidaan määrittää käyttötarkoituksia laitemallien yleisten ominaisuuksien perusteella. Lisäksi käyttötarkoitusten avulla voidaan myös määrittää laitemalleille käyttäjäryhmiä (TK3). Älykellot ja rannekkeet sopivat kaikille, joita kiinnostaa mitata EKG:tä satunnaisesti. Käsivarsinauhat ja sykevyöt sopivat urheilijoille, sillä ne tarjoavat tarkan EKG-signaalin myös liikkeessä. Käsivarsinauhat sopivat kevyemmän liikuntaan, kun taas sykevyöt sopivat erinomaisen mittaustarkkuutensa vuoksi myös rankempiin fyysisiin aktiviteetteihin. Käsivarsinauhat sekä vaatteet ja tekstiilit sopivat pitkäaikaiseen monitorointiin, sillä ne toimivat arjessa huomaamattomasti ja niillä saa tuotettua hyvälaatuisen EKG-signaalin levossa ja liikkeessä.

Kuluttajalähtöisten puettavien EKG-laitteiden merkitys terveydenhuollossa tulee todennäköisesti kasvamaan tulevaisuudessa. Pitkäaikainen EKG-seuranta niiden avulla voi auttaa esimerkiksi sydänsairauksien tunnistamisessa ja täten myös vähentää terveydenhuollon kuormitusta. Lisäksi puettavat EKG-laitteet tarjoavat jokaiselle paremmat mahdollisuudet oman terveytensä seurantaan. Nykyiset kuluttajalähtöiset EKG:n seurantaan tarkoitetut puettavat laitteet eivät aina yletä mittaustarkkuuden kannalta aivan sairaalalaitteiden tasolle, mutta niiden kehitys osaksi EKG:n pitkäaikaisseurantaan näyttää lupaavalta.

Lähdeluettelo

- [1] Y. Sattar ja L. Chhabra, *Electrocardiogram*. StatPearls, 2023. url: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK549803>.
- [2] P. R. E. Harris, ”The Normal Electrocardiogram: Resting 12-Lead and Electrocardiogram Monitoring in the Hospital”, *Critical Care Nursing Clinics of North America*, vol. 28, nro 3, s. 281–296, 2016. DOI: 10.1016/j.cnc.2016.04.002.
- [3] W. J. Gionfriddo, D. W. Laidlaw ja N. A. Mark Estes, ”Ambulatory Electrocardiography”, teoksessa *Cardiology Procedures: A Clinical Primer*, R. C. Hendel ja C. Kimmelstiel, toim. Cham: Springer International Publishing, 2022, s. 159–167. DOI: 10.1007/978-3-030-95259-4_20.
- [4] G. Prieto-Avalos, N. A. Cruz-Ramos, G. Alor-Hernández, J. L. Sánchez-Cervantes, L. Rodríguez-Mazahua ja L. R. Guarneros-Nolasco, ”Wearable Devices for Physical Monitoring of Heart: A Review”, *Biosensors*, vol. 12, nro 5, 2022. DOI: 10.3390/bios12050292.
- [5] R. Trobec, I. Tomašić, A. Rashkovska, M. Depolli ja V. Avbelj, *Body Sensors and Electrocardiography*. Springer International Publishing, 2018, s. 1–12. DOI: 10.1007/978-3-319-59340-1.
- [6] A. Aro, M. Eskola, A. Hedman et al., *EKG*. Duodecim Oppiportti, 2019, ekg00001–ekg00026. url: <https://www.oppiortti.fi/opk04500>.

-
- [7] R. X. Stroobandt, S. S. Barold ja A. F. Sinnaeve, *Ecg from basics to essentials: Step by step*. John Wiley & Sons, Incorporated, 2016, s. 12–34. url: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/kutu/detail.action?docID=4093349>.
- [8] M. M. R. K. Mamun, "Significance of Features from Biomedical Signals in Heart Health Monitoring", *BioMed*, vol. 2, nro 4, s. 391–408, 2022. DOI: 10.3390/biomed2040031.
- [9] E. Oporto, D. Mauricio, N. Maculan ja G. Uribe, "Challenges in the Classification of Cardiac Arrhythmias and Ischemia Using End-to-End Deep Learning and the Electrocardiogram: A Systematic Review", *Diagnostics*, vol. 16, nro 1, 2026. DOI: 10.3390/diagnostics16010161.
- [10] S. Smith ja M. Shalisa, "Wearable Electrocardiogram Technology: Help or Hindrance to the Modern Doctor?", *JMIR cardio*, vol. 9, 2025. DOI: 10.2196/62719.
- [11] N. Isakadze ja S. S. Martin, "How useful is the smartwatch ECG?", *Trends in cardiovascular medicine*, vol. 30, nro 7, 2020. DOI: 10.1016/j.tcm.2019.10.010.
- [12] D. Duncker et al., "Smart Wearables for Cardiac Monitoring—Real-World Use beyond Atrial Fibrillation", *Sensors*, vol. 21, nro 7, 2021. DOI: 10.3390/s21072539.
- [13] W. Haverkamp, J. Butler ja S. D. Anker, "Can we trust a smartwatch ECG? Potential and limitations", *European Journal of Heart Failure*, vol. 23, nro 6, s. 850–853, 2021. DOI: 10.17169/refubium-36953.
- [14] X. Zhang, Y. Zhan, X. Wang ja Y. Yang Jin, "A Chest Strap-Based System for Electrocardiogram Monitoring", *Applied Sciences*, vol. 15, nro 11, 2025. DOI: 10.3390/app15115920.

- [15] T. Bystricky, D. Moravcova, P. Kaspar, R. Soukup ja A. Hamacek, "A comparison of embroidered and woven textile electrodes for continuous measurement of ECG", teoksessa *2016 39th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE)*. IEEE, 2016, s. 7–11. DOI: 10.1109/ISSE.2016.7562871.
- [16] B. M. Li et al., "Influence of Armband Form Factors on Wearable ECG Monitoring Performance", *IEEE Sensors Journal*, vol. 21, nro 9, s. 11 046–11 060, 2021. DOI: 10.1109/JSEN.2021.3059997.
- [17] V. P. Rachim ja W.-Y. Chung, "Wearable Noncontact Armband for Mobile ECG Monitoring System", *IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems*, vol. 10, nro 6, s. 1112–1118, 2016. DOI: 10.1109/TBCAS.2016.2519523.
- [18] A. B. Nigusse, D. A. Mengistie, B. Malengier, G. B. Tseghai ja L. V. Langenhove, "Wearable Smart Textiles for Long-Term Electrocardiography Monitoring—A Review", *Sensors*, vol. 21, nro 12, 2021. DOI: 10.3390/s21124174.
- [19] L. Niu et al., "Low-Contact Impedance Textile Electrode for Real-Time Detection of ECG Signals", *ACS Applied Materials & Interfaces*, vol. 16, nro 42, s. 57 860–57 869, 2024. DOI: 10.1021/acsami.4c12819.
- [20] Polar Electro. "Polar", viitattu 13. toukokuuta 2026. url: <https://polar.com/en/>.
- [21] Wellue Ltd. "Wellue", viitattu 13. toukokuuta 2026. url: <https://getwellue.com/products/>.
- [22] Emglare Inc. "Emglare", viitattu 13. toukokuuta 2026. url: <https://emglare.com/products/>.
- [23] N. Van Steijn et al., "Is a single-lead smartwatch ECG capable of detecting a wider spectrum of arrhythmias in clinical practice?", *European Heart Journal*, vol. 46, nro Supplement 1, 2025. DOI: 10.1093/eurheartj/ehaf784.4478.

- [24] Apple. "Take an ECG with the ECG app on Apple Watch", viitattu 16. maaliskuuta 2026. url: <https://support.apple.com/en-us/120278>.
- [25] Withings. "ScanWatch 2", viitattu 16. maaliskuuta 2026. url: https://www.withings.com/fi/fi/scanwatch-2?srsltid=AfmB0opCC93gY-1Y-m1G31_eouN0LNoysEzXeLOSHuTro9dv3cvjGzSj.
- [26] Samsung. "Monitor your heart rate and blood pressure with the Galaxy Watch series", viitattu 16. maaliskuuta 2026. url: https://www.samsung.com/latin_en/support/mobile-devices/measure-your-ecg-with-the-galaxy-watch-series/.
- [27] D. Mannhart et al., "Clinical Validation of Automated Corrected QT-Interval Measurements From a Single Lead Electrocardiogram Using a Novel Smartwatch", *Frontiers in Cardiovascular Medicine*, vol. 9, 2022. DOI: 10.3389/fcvm.2022.906079.
- [28] R. Vyas et al., "Smart watch applications in atrial fibrillation detection: Current state and future directions", *Journal of Cardiovascular Electrophysiology*, vol. 35, nro 12, s. 2474–2482, 2024.
- [29] B. Bence et al., "Detection of Arrhythmias Using Smartwatches—A Systematic Literature Review", *Healthcare*, vol. 12, nro 9, 2024. DOI: 10.3390/healthcare12090892.
- [30] D. Mannhart et al., "Clinical Validation of 5 Direct-to-Consumer Wearable Smart Devices to Detect Atrial Fibrillation", *JACC: Clinical Electrophysiology*, vol. 9, nro 2, s. 232–242, 2023. DOI: 10.1016/j.jacep.2022.09.011.
- [31] M. Iqhrammullah et al., "Accuracy and interpretability of smartwatch electrocardiogram for early detection of atrial fibrillation: A systematic review and meta-analysis", *Journal of Arrhythmia*, vol. 41, nro 3, e70087, 2025. DOI: 10.1002/joa3.70087.

- [32] Polar Research Center, "Wrist-ECG, White Paper", *Polar*, 2023. url: <https://www.polar.com/en/science/whitepapers?srsltid=AfmB0orlo4p6hcFWngnjycgJno87e>
- [33] Polar Research and Technology, "Polar H10 Heart Rate Sensor System, White Paper", *Polar*, 2019. url: <https://www.polar.com/en/science/whitepapers?srsltid=AfmB0orlo4p6hcFWngnjycgJno87ehbbAYKDlt6YsvNwmt8K1bqWeqGX>.
- [34] V. Chung, L. Chopin, J. Karadayi ja J. Grèzes, "Validity of the Polar H10 for Continuous Measures of Heart Rate and Heart Rate", *Sensors*, vol. 26, nro 3, 2026. DOI: 10.3390/s26030855.
- [35] J. Lázaro, N. Reljin, M.-B. Hossain, Y. Noh, P. Laguna ja K. H. Chon, "Wearable Armband Device for Daily Life Electrocardiogram Monitoring", *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 67, nro 12, s. 3464–3473, 2020. DOI: 10.1109/TBME.2020.2987759.
- [36] S. K. Bashar et al., "Feasibility of atrial fibrillation detection from a novel wearable armband device", *Cardiovascular Digital Health Journal*, vol. 2, nro 3, s. 179–191, 2021. DOI: 10.1016/j.cvdhj.2021.05.004.