

Eteisvärinän havaitseminen
fotopletysmografiaan perustuvilla
puettavilla laitteilla ja älypuhelimella

TURUN YLIOPISTO
Tietotekniikan laitos
TkK-tutkielma
Lääketieteellinen tekniikka ja terveysteknologia
Joulukuu 2024
Linda Lehtniemi

TURUN YLIOPISTO

Tietotekniikan laitos

LINDA LEHTNIEMI: Eteisvärinän havaitseminen fotopletysmografiaan perustuvilla puettavilla laitteilla ja älypuhelimella

TkK-tutkielma, 25 s., 2 liites.

Lääketieteellinen tekniikka ja terveysteknologia

Joulukuu 2024

Eteisvärinä on yksi yleisimmistä rytmihäiriöistä – jopa yli 10 % yli 75-vuotiaasta väestöstä sairastaa eteisvärinää. Eteisvärinädiagnoosin perustana on rytmihäiriön aikainen EKG-tutkimus, jonka haasteena on kuitenkin taudin mahdollinen kohtausittaisuus tai täysi oireettomuus. Hoitamaton eteisvärinä voi pahimmillaan aiheuttaa aivoinfarktin. On olemassa siis tarve pitkäaikaisen sydämen seurannan mahdollistaville ratkaisuille, ja fotopletysmografiaa (FPG) hyödyntävät älylaitteet voisivat olla yksi vaihtoehto nykyisten EKG:aan perustuvien menetelmien rinnalle.

Tämä tutkielma perehtyy eteisvärinän havaitsemiseen FPG:aa hyödyntävillä älylaitteilla. Tavoitteena on selvittää, millainen on kuluttajakäytössä jo olevien laitteiden toimivuus tässä tarkoituksessa, ja mitkä ovat menetelmän suurimmat rajoitteet.

Tutkielmassa havaittiin, että FPG-älylaitteet tunnistavat eteisvärinän luotettavasti, pääosin yli 90 % ja usein jopa yli 95 % herkkyydellä, spesifisyydellä, tarkkuudella sekä positiivisella ja negatiivisella ennustearvolla. Suurimmat menetelmän haasteet ovat käyttökelvottoman signaalin suuri osuus, sekä menetelmän vaikea tutkittavuus liikkeessä olevilla henkilöillä. Lisää tutkimusta tarvitaan rytmihäiriöiden havaitsemisessa sairaalaolosuhteiden ulkopuolella, normaalia elämää eläviltä henkilöiltä. Myös osallistujamäärältään laajemmille tutkimuksille voisi olla tarvetta.

Asiasanat: fotopletysmografia, eteisvärinä, älypuhelin, älykello, ranneke, älylaitteet

Sisällys

1	Johdanto	1
2	Tausta	3
2.1	Sydämen rakenne ja toiminta	3
2.2	Eteisvärinä	4
2.3	Elektrokardiografia	5
2.4	Fotopletysmografia	7
3	Eteisvärinän havainnointi FPG-laitteilla	12
3.1	Rannekkeet ja älykellot	13
3.2	Älypuhelimien kamera	16
3.3	Tutkimusaineiston yhteenveto	18
4	Pohdinta	21
5	Yhteenveto	24
	Lähdeluettelo	26
	Liitteet	
A	Tutkimusten tuloksia	A-1

Kuvat

1.1	PubMed-tietokannasta löydetyn aineiston karsintaprosessi.	2
2.1	EKG-käyrän muoto, jako osiin ja intervallien normaalit kestot sekunteina. Muokattu lähteestä [2].	7
2.2	FPG-signaalin muoto sekä systole ja diastole. Aallon systolinen ja diastolinen huippukohta on merkitty kuvaan (P1 ja P2). Sykeväli (t_1) on aaltojen systolisten huippukohtien (P1) välinen aika. Muokattu lähteestä [7].	9
2.3	Liikkeen (a), käden tai sormen tärinän (b), yskimisen (c) ja haukottemisen tai hengen haukkomisen (d) aiheuttamat artefaktit sormenpäämittarilla tallennetussa FPG-signaalissa. [5].	11

Taulukot

3.1 Tutkimusten tulokset koostettuna	20
--	----

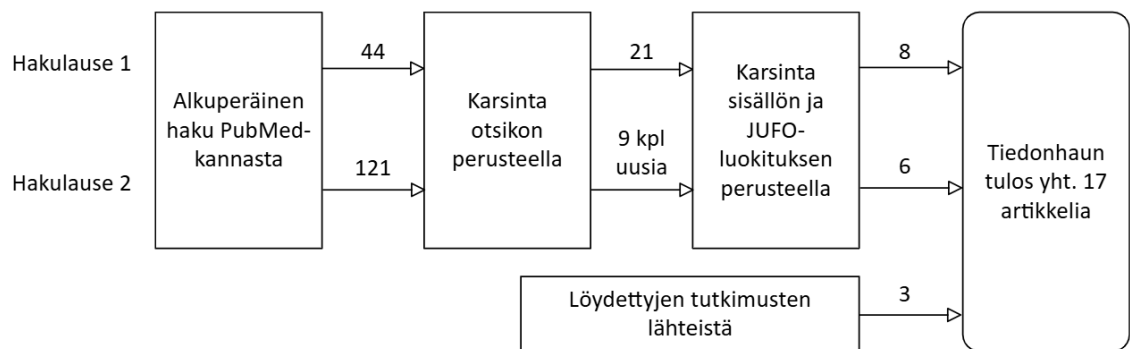
1 Johdanto

Eteisvärinä on yleisin hoitoa vaativa rytmihäiriö [1]. Yli 75-vuotiaassa väestössä sen esiintyvyys on jopa yli 10 prosenttia. [2] Eteisvärinän havaitseminen ja mahdollisen hoidon aloittaminen ajoissa on tärkeää, koska toistuvan tai jatkuvan eteisvärinän seurauksena voi sydämen eteiseen muodostua verihyytymä, joka joutuessaan aivojen verenkiertoon voi aiheuttaa aivoinfarktin. Suuri haaste eteisvärinän havaitsemisessa on kuitenkin taudin kohtauksittaisuus, jonka seurauksena rytmihäiriön aikaista tutkimusta on vaikea suorittaa. Eteisvärinä voi olla myös täysin oireeton, jolloin pahimmillaan se havaitaan vasta aivoinfarktin yhteydessä. [1], [2] Nykyaikaiset älylaitteet, jotka hyödyntävät fotopletysmografiaa tarjoavat yhden vaihtoehdon sydämen toiminnan pitkäaikaiseen seurantaan. Laitteet, jotka usein ovat jo osa ihmisten tavallista elämää voisivat toimiessaan luotettavasti mahdollistaa varsinkin kohtauksittaisen ja oireettoman eteisvärinän aikaisen havaitsemisen.

Tämän työn tarkoituksena on selvittää, millaisia tuloksia erilaisilla fotopletysmografiaan perustuvilla älylaitteilla on saatu eteisvärinän havaitsemisessa, ja millaisia rajoitteita menetelmällä on. Tätä varten muodostettiin seuraavat tutkimuskysymykset: **TK1:** Millainen on erilaisten fotopletysmografiaa käyttävien älylaitteiden tarkkuus eteisvärinän tunnistuksessa? **TK2:** Mitä haasteita fotopletysmografian käytössä eteisvärinän diagnostiikassa on?

Tähän tutkielmaan etsittiin lähdeaineistoa PubMed-tietokannasta. Hakulauseita olivat **1.** *"(early detection) AND (atrial fibrillation) AND (ppg OR photoplet-*

hysmography" ja **2.** *"detect* AND "atrial fibrillation"AND (mobile OR wearable*) AND (ppg OR photoplethysmography)"*. Hakutuloksista karsittiin pois aluksi artikkelit, joiden otsikko ei liittynyt tutkielman aiheeseen. Tämän jälkeen pois karsiutui artikkeleja, joissa tutkimuksen fokus ei vastannut tämän tutkielman tarkoituksia, tai joissa ei oltu saavutettu mitään tunnuslukuja, joilla älylaitteiden ja algoritmien toimivuutta oltaisiin voitu arvioida. Lisäksi valintakriteerinä oli vähintään JUFO-luokitus 1. Aineiston karsintaprosessi on nähtävillä kuvassa 1.1.



Kuva 1.1: PubMed-tietokannasta löydetyn aineiston karsintaprosessi.

Hakulauseita kokeiltiin myös IEEE:n kantaan, mutta uutta aineistoa jo kerätyn lisäksi ei löytynyt. Tutkielman taustalukuja varten on myös etsitty lisää tietoa eteisvärinästä Duodecim Terveyskirjastosta, sekä fotoplethysmografiasta menetelmänä.

Luvussa 2 käsitellään tutkielman kannalta olennaista taustatietoa eteisvärinästä sairautena sekä perehdytään fotoplethysmografiaan menetelmänä. Luvussa käsitellään myös elektrokardiografiaa, sillä se on tällä hetkellä sydänsairauksien diagnostiikan tärkein menetelmä, ja tähän tutkielmaan valituissa tutkimuksissa sitä on käytetty vertauskohtana fotoplethysmografialle. Luvussa 3 käydään läpi tutkimusaineisto ja tehdään siitä yhteenveto. Luvussa 4 on pohdintaa tutkielmaa kirjoittaessa tehtyjen havaintojen pohjalta. Luku 5 on koko tutkielman yhteenveto, ja siinä vastataan tutkimuskysymyksiin.

2 Tausta

2.1 Sydämen rakenne ja toiminta

Sydän on nelilokeroinen pumppu, jossa on kaksi eteistä ja niiden alapuolella kaksi kammiota. Veri saapuu sydämeen eteisten kautta ja kammiot työntävät supistumalla veren pois sydäimestä. Vähähappinen veri saapuu oikeaan eteiseen systeemisestä verenkierrosta ylä- ja alaonttolaskimoiden kautta, sekä sydämen omasta sepelvaltimokierrosta. Vasempaan eteiseen saapuu happipitoista verta keuhkolaskimoista. Oikean eteisen ja kammion välissä veren takaisinvirtausta estää eteis-kammionläppä eli kolmiliuskaläppä. Oikean kammion ja keuhkovaltimon välissä takaisinvirtausta estää keuhkovaltimoläppä. Vastaavasti, sydämen vasemman eteisen ja kammion välissä on hiippaläppä ja kammion ja aortan välissä aorttaläppä. Sydämen oikea puoli pumpkaa verta keuhkoverenkiertoon ja vasen aortan kautta systeemiseen verenkiertoon ja sepelvaltimoihin. [2], [3]

Sydämen toimintasykli voidaan jakaa eteisten ja kammion systoleen (aktiivinen vaihe) ja diastoleen (rentoutumisvaihe). Toimintasykli alkaa siitä, kun sähköinen impulssi lähtee liikkeelle sinussolmukkeesta oikean eteisen seinämästä ja aloittaa eteisten systolen. Impulssi leviää molempiin eteisiin aiheuttaen sydänlihassolujen depolarisaation, jolloin eteiset supistuvat ja työntävät verta kammioihin. Kammion systolen aikana kammiot supistuvat niihin edenneen depolarisaation seurauksena. Nousseen kammionpaineen myötä veri virtaa keuhkovaltimoläpän ja aorttaläpän lä-

pi ulos sydäimestä verenkiertoon. Samanaikaisesti tapahtuu eteisten diastole, jossa eteiset rentoutuvat ja alkavat ottaa verta passiivisesti sisäänsä. Toimintasyklin viimeisenä vaiheena tapahtuu kammioden diastole, jossa kammion seinämien repolarisaation seurauksena kammiot rentoutuvat. Tällöin koko sydänlihas on pienen hetken rentona, ja myös kammiot alkavat täyttyä passiivisesti verellä eteisten kautta. Kammiot täyttyvät, kunnes seuraava sykli alkaa.[3] Normaalialue sydämen rytmiä kutsutaan sinusrytmiksi.

2.2 Eteisvärinä

Eteisvärinä on yleisin pitkäkestoinen rytmihäiriö [2]. Eteisvärinän laukaisevat suurimmassa osassa tapauksista keuhkolaskimoiden tyvialueelta lähtevät eteislisälyönnit. Seurauksena sydämen eteiset alkavat supistua nopeasti ja järjestymättömästi. Epäsäännölliset sähköiset impulssit kulkevat eteisistä vaihtelevasti kammioden puolelle, jolloin sydämen sykkeestä tulee epäsäännöllinen. Hoitamaton eteisvärinä voi vakavimmillaan aiheuttaa sydämen eteiseen verihyytymän, joka liikkeelle lähdettyään voi aiheuttaa aivoinfarktint. Eteisvärinä voi myös heikentää suorituskykyä, aiheuttaa epämiellyttäviä rytmihäiriötuntemuksia ja huonontaa elämänlaatua. Toisaalta varsinkin iäkkäillä ihmisillä eteisvärinä voi myös olla täysin oireeton ja löytyä sattumalta esimerkiksi verenpaineen mittauksen tai rutiinitarkastuksen yhteydessä. Joskus eteisvärinä havaitaan vasta aivohalvauksen yhteydessä. [1], [2]

Suurin eteisvärinälle altistava tekijä on korkea ikä – yli 75-vuotiailla esiintyvyys on jopa yli 10 prosenttia väestöstä [2]. Muita altistavia tekijöitä eteisvärinälle ovat ylipaino, diabetes, muu sydän- tai verenkiertoelimistön sairaus, kilpirauhasen liikatoiminta, krooniset keuhkosairaudet, runsas alkoholin käyttö ja äärimmäinen fyysinen rasitus. [1], [2], [4]

Eteisvärinä voidaan jakaa neljään päätyyppiin: kohtauksittaiseen (engl. paroxysmal), jatkuvaan, pitkään jatkuneeseen ja pysyvään. Kohtauksittaisessa eteisvärinä-

sä sinusrytmi palautuu itsestään tai se palautetaan (sähköisesti tai lääkkeellisesti) 7 vuorokauden kuluessa. Jatkuvassa eteisvärinässä sinusrytmi ei palaudu itsestään 7 vuorokauden kuluessa, tai rytmi palautetaan 7 vuorokauden jälkeen. Pitkään jatkuneessa eteisvärinässä rytmihäiriö on jatkunut yli vuoden ja hoidoksi valitaan rytmihallinta, yleensä katetriablaatio, jossa pyritään estämään rytmihäiriön syntymekanismi. Pysyväksi eteisvärinäksi sanotaan tilannetta, jossa rytmin palautusyrityksille ei ole vastetta tai rytmin palautusta ei pidetä aiheellisena, ja eteisvärinä hyväksytään pysyvänä tilana. [2]

Kohtauksittaisella eteisvärinällä on taipumus uusiutua ja muuttua pysyvämmäksi, koska eteisten sähköinen toiminta ja rakenne muovautuvat rytmihäiriötä suosivaksi. Sähköisen toiminnan muutokset, kuten eteisessä kiertävät depolarisaatorintamat ilmenevät nopeasti, mutta voivat myös rytmin normalisoitumisen jälkeen palautua. Rakenteelliset muutokset, kuten sidekudoksen kertyminen ja sydänlihassolujen koon kasvu ilmenevät hitaammin, mutta ovat yleensä palautumattomia. Eteisvärinä on sitä vaikeahoitaisempi, mitä enemmän muutoksia on havaittavissa. [2]

Eteisvärinädiagnosi perustuu rytmihäiriön aikana otettuun EKG-signaaliin [2], [4]. Tämän takia etenkin kohtauksittaisen ja oireettoman eteisvärinän havaitseminen ja diagnosointi voi olla haastavaa. Rytmihäiriödiagnoosin varmistaminen on kuitenkin tärkeää, jotta tilanteen vaarallisuus ja hoidontarve voidaan arvioida. Diagnosi voidaan tehdä 12-kytkentäisen EKG:n perusteella terveyskeskuksessa tai sairaalassa, tai jonkin muun laitteen (esim. Holter-tutkimus, sydämentahdistin) tekemän EKG-tallenteen perusteella. Ainakaan toistaiseksi eteisvärinää ei voida diagnosoida muilla kuin EKG-pohjaisilla menetelmillä. [2]

2.3 Elektrokardiografia

Elektrokardiografia (EKG) perustuu sydämen sähköisen toiminnan mittaamiseen kehon pinnalta. EKG-käyrä muodostuu kaikkien sydämen aktiopotentiaalien sum-

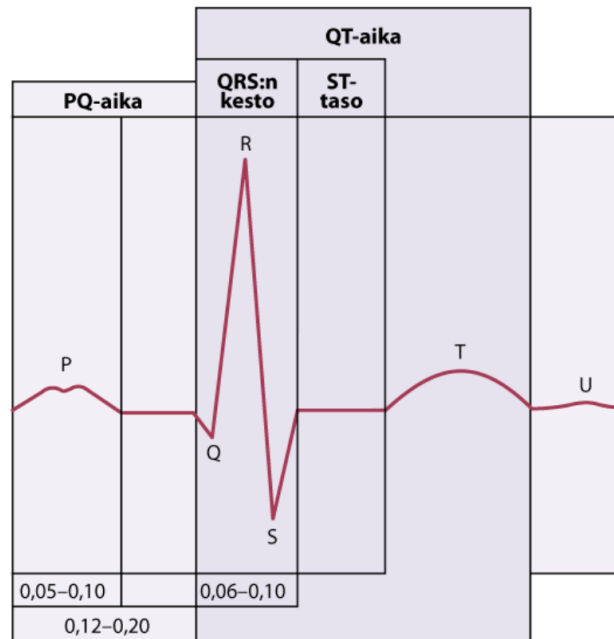
mana. [3] Elektrokardiografia kuuluu sydän- ja verisuonitautipotilaiden perustutkimuksiin, ja on keskeisessä asemassa sydänsairauksien diagnosoinnissa [2].

Kliinisessä käytössä olevassa 12-kytkentäisessä EKG:ssä on kuusi rintakytkenettä ja niiden lisäksi kytkennät ranteissa ja nilkoissa. Näistä kytkennöistä muodostetaan 12 yhdistelmää. Sijainti sydämeen nähden vaikuttaa sähköisten impulssien välittymiseen eri elektrodeihin, eli jokainen yhdistelmä tuottaa erilaista tietoa. [3]

EKG:n pitkäaikaisrekisteröintiä varten on saatavilla useita laitteita, mutta suurimmassa osassa näistä kytkentämäärä on pienempi kuin 12. Holter-laitteella voidaan tallentaa yleensä kolmekanavaista EKG:tä 1-2 vuorokauden ajan rintaan kiinnitettävillä elektrodeilla. Tapahtuma-EKG-laite on pieni kannettava laite, jolla potilas tallentaa yksikanavaisen EKG:n sydäntuntemusten aikana joko sormenpäistä tai rinnasta. Markkinoilla on saatavilla myös älykelloja, jotka rekisteröivät yksikanavaisen EKG:n. 1-3-kytkentäinen EKG on informaatioisällöltään suppeampi kuin 12-kytkentäinen. Sen avulla voidaan usein selvittää, onko kyse rytmihäiriöstä, mutta parhaiten tarkka diagnoosi selviää 12-kytkentäisen EKG:n avulla. [2]

Normaalin EKG-käyrän muoto voidaan jaotella osiin P-U. Käyrän muoto, sekä eri osuuksien normaalit kestoajat ovat nähtävillä kuvassa 2.1. Sydämen sinussolmukkeen käynnistämä eteisten depolarisaatio aiheuttaa P-aallon, jonka normaali kesto on 50-100 ms. Kun depolarisaatio leviää nopeasti kammioihin, muodostuu voimakkaasti erottuva QRS-heilahdus, joka alkaa alaspäin kulkevana (negatiivisena), sen jälkeen kulkee voimakkaasti ylös (positiivinen) ja palaa vielä takaisin alas. QRS-heilahduksen normaali kesto on 60-100 ms. Sydämen toimintasyklin viimeisenä vaiheena tapahtuu kammioiden rentoutuminen ja repolarisaatio. Tämä tapahtuu muita vaiheita hitaammin, ja muodostaa käyrään loivan T-aallon.[2], [3] T-aallon jälkeen voi joskus löytyä hyvin heikko U-aalto, mutta tämä on harvinainen löydös ja sen merkitystä ei vielä täysin tunneta [2].

Sydämen eteisten ja kammioiden toiminnan EKG:hen aiheuttamien heilahduk-



Kuva 2.1: EKG-käyrän muoto, jako osiin ja intervallien normaalit kestot sekunteina. Muokattu lähteestä [2].

sien ajoituksen, keston ja muodon tarkastelu kuuluu parhaimpiin keinoihin analysoida sydämen sairauksia, kuten johtumishäiriöitä, rytmihäiriöitä ja rakenteellisia muutoksia [2]. Esimerkiksi, normaalia voimakkaampi P-aalto voi viitata jommankumman eteisen tai T-aalto jommankumman kammion laajentumiseen. Aikaintervallien, PQ-ajan ja QT-ajan piteneminen viittaa mm. sydämen sähköisen johtumisen ongelmiin ja sydänekudoksen vaurioitumiseen. [3] Sydämen syketaajuus saadaan mitattua peräkkäisten QRS-kompleksien R-aaltojen välisestä ajasta. Eteisvärinä muuttaa EKG:n perusviivan epätasaiseksi, eikä normaali eteisten depolarisaation aiheuttama P-aalto erotu. Syketaajuus on epäsäännöllinen, koska sähköiset impulssit välittyvät eteisistä kammioihin vaihtelevalla nopeudella [2].

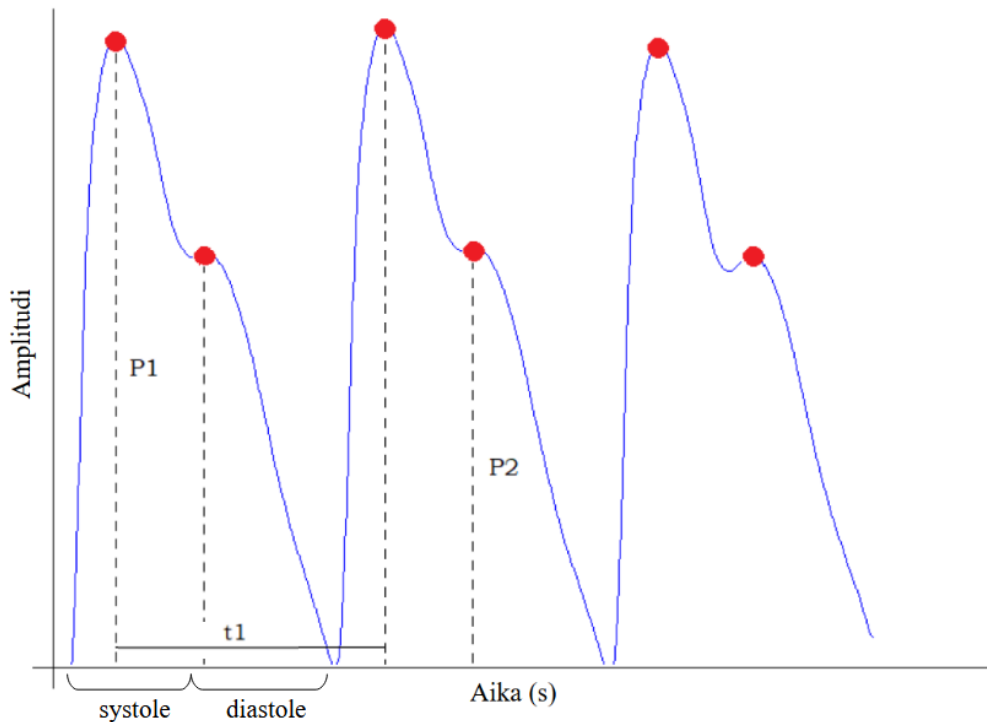
2.4 Fotopletysmografia

Fotopletysmografia (FPG) on noninvasiivinen, optinen mittaustekniikka, jolla voidaan havaita sydämen toimintasyklin aikaisia veren tilavuudenvaihteluita kudok-

sessä. FPG perustuu ihon valaisemiseen punaisella valolla tai infrapunavalolla, [5]–[7] tai vihreällä valolla [8]. Osa valosta absorboituu kudokseen, ja jäljelle jäävän kudoksesta heijastuvan tai kudoksen läpi kulkevan valon intensiteetti mitataan fotodetektorilla. Tämän jälkeen signaalia vielä vahvistetaan ja suodatetaan. Fotodetektorin havaitsemaan valomäärään vaikuttaa veren vuorovaikutus sydän- ja verenkiertoelimistön, hengityselimistön ja autonomisen hermoston kanssa. Esimerkkejä yksittäisistä tekijöistä ovat hengityksen tiheys, veren tilavuus suonissa, verisuonien seinämien liike (vasodilaatio ja vasokonstriktio) ja punasolujen orientaatio. Yleensä FPG-mittaus tehdään kehon ääriosista, kuten sormista, varpaista tai korvaledestä. [5], [6], [9]

FPG-signaalin aaltomuoto voidaan jakaa kahteen vaiheeseen. Ensimmäinen vaihe liittyy sydämen systoleen. Sydämen vasemman kammion supistuessa veri virtaa aortan kautta kohti kehon ääreisosia ja paine verisuonissa kasvaa. Aalto nousee nopeasti ylöspäin. Usein aallon huipun jälkeen on näkyvissä pieni notko (engl. dicrotic notch). Se syntyy aorttaläpän sulkeutumisesta. Tässä kohtaa systole loppuu. Signaalin aaltomuodon toinen vaihe on diastolinen osa, jossa aalto palaa takaisin alaspäin. [5]–[7] Kuvassa 2.2 on esitettyä FPG-signaalin muoto ja vaiheet. FPG-signaalin huippukohtat on merkitty punaisilla pisteillä. Ensimmäinen huippukohta, systolinen huippu (P1), syntyy systolen verisuonistoon aiheuttaman paineenmuutoksen seurauksena. Toinen huippukohta, diastolinen huippu (P2), on aallolla notkon jälkeen. Yleisin menetelmä FPG-signaalin analysoimiseksi on sen huippuarvojen tunnistus, ja niiden välisen ajan vertailu. Sykeväli (t_1) on aaltojen systolisten huippukohtien (P1) välinen aika. [7]

Yleisin FPG:n sovellus on happisaturaation ja sykkeen mittaaminen pulssioksimetrillä. Muita käyttökohteita ovat verenpaineen, sydämen minuuttitilavuuden ja kehon ääreisosien verisuonien sairauksien havainnointi. [5], [6] Happisaturaatio voidaan mitata lähettämällä sekä punaista valoa että infrapunavaloa kudokseen. Hap-



Kuva 2.2: FPG-signaalin muoto sekä systole ja diastole. Aallon systolinen ja diastolinen huippukohta on merkitty kuvaan (P1 ja P2). Sykeväli (t_1) on aaltojen systolisten huippukohtien (P1) välinen aika. Muokattu lähteestä [7].

peen sitoutunut hemoglobiini (HbO_2) ja sitoutumaton hemoglobiini (Hb) absorboivat näitä valon aallonpituuksia eri määrän, ja veren happipitoisuus voidaan laskea kudoksesta fotodetektoriin kulkevien signaalien amplitudien eroista. [5]

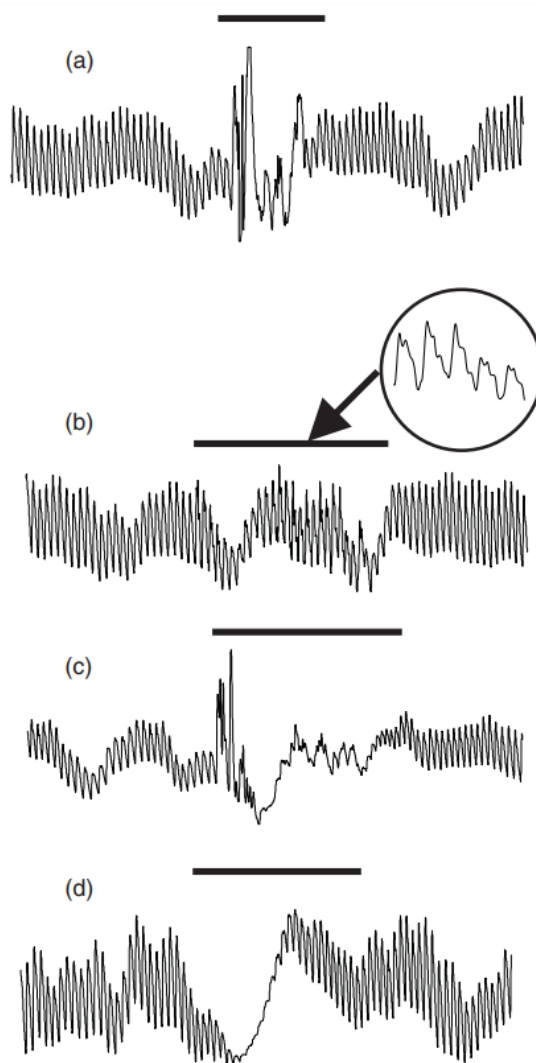
FPG antaa arvokasta tietoa useasta elinjärjestelmästä, mutta vielä ei ole olemassa metodia FPG-mittausten kalibrointiin. Tämä tarkoittaa, että eri ihmisten FPG-mittausten absoluuttisia lukuarvoja ei voida suoraan verrata toisiinsa. Mittaukseen vaikuttavia tekijöitä eri ihmisillä ovat esimerkiksi ihonväri ja kudoksen koostumus. FPG-mittaus soveltuu kuitenkin muutoksien havaitsemiseen yhdellä ihmisellä. [9]

FPG on laajasti hyödynnetty teknologia potilaan tilan seuraamiseen sairaalaympäristössä [9], mutta myös sairaalan ulkopuolella. Kuluttajille tarjottavien puettavien, terveyden ja kunnon seurantaan tarkoitettujen laitteiden määrä on kasvanut voimakkaasti viimeisen 15 vuoden aikana. Suurin osa nykyaikaisista puettavista

laitteista, kuten älykelloista, kerää FPG-signaalia [10], [11]. Kaupallisten laitteiden FPG-sensorit tarjoavat suurelle väestölle mahdollisuuden sydämen toiminnan pitkäaikaiseen seurantaan.

FPG havaitsee herkästi sykkeen epäsäännöllisyyden, mikä tekee siitä hyvän työkalun rytmihäiriöiden havaitsemiseen [9]. Eteisvärinä ilmenee FPG-signaalissa signaalin vaihtelevana muotona ja sykevälien epäsäännöllisenä vaihteluna [6]. Eteisvärinän havaitsemista FPG-signaalista voivat kuitenkin häiritä moninaisista syistä signaalissa esiintyvät artefaktit eli epätarkoituksenmukaiset häiriöt. Häiriöitä FPG-signaaliin voivat aiheuttaa kehon liikkeet, kuten tärinä, ympäristön valo, voimakkaat hengityksen muutokset kuten yskiminen tai hengen haukkominen, FPG-sensorin huono kontakti ihoa vasten sekä sensorin ja kudoksen välinen vaihteleva paine [5], [6]. Kuvassa 2.3 on esimerkit sormenpäämittarilla tallennetun FPG-signaalin artefaktoista: liike (a), käden tai sormen tärinä (b), potilaan yskiminen (c) ja muutos hengityksen rytmisissä kuten haukotteleminen tai hengen haukkominen (d) [5].

FPG-signaalin amplitudit ovat matalia, ja siksi artefaktit vaikuttavat voimakkaasti signaalin laatuun ja hyödynnettävyyteen. Eri häiriötyyppien taajuusalueet osuvat myös päällekkäin FPG-signaalin sykevälivaihtelun taajuusalueen kanssa: sykevälivaihtelun taajuusalue on 0,5–4,0 Hz, ja esimerkiksi potilaan liikkeen aiheuttaman artefaktin taajuusalue on 0,1 Hz ja hengitystiheyden taajuusalue on 0,04–1,6 Hz. Tämä hankaloittaa artefaktien erottamista FPG-signaalista. [7] Viallinen data jätetään tavallisesti huomiotta, mutta joskus häiriöt voidaan tulkita väärin joksikin elimistön toiminnan häiriöksi. Vioittuneiden osuuksien tunnistamiseen FPG-signaalista on kehitetty monia keinoja. Kehon liikkeestä johtuvia häiriöitä voidaan tunnistaa käyttämällä apuna kiihtyvyyssanturia [6]. Koska FPG-signaalia on halutun hyödyn, kuten rytmihäiriöjakson tallentamisen, saavuttamiseksi tarpeellista kerätä pitkiä aikoja, on signaalia myös tarpeellista suodattaa ja vahvistaa sen laadun parantamiseksi [7].



Kuva 2.3: Liikkeen (a), käden tai sormen tärinän (b), yskimisen (c) ja haukottele-
misen tai hengen haukkomisen (d) aiheuttamat artefaktit sormenpäämittarilla tal-
lennetussa FPG-signaalisissa. [5].

3 Eteisvärinän havainnointi FPG-laitteilla

Tähän tutkielmaan valituista tutkimuksista 12:ssa tarkasteltiin eri älylaitteilla ja algoritmeilla saavutettuja tuloksia. Pääosa näistä tutkimuksista keskittyi yhteen laite-tyyppiin, mutta kolmessa niistä käsiteltiin useaa. Yhteensä kuudessa tutkimuksessa tarkasteltiin ranneketyyppisten laitteiden toimivuutta eteisvärinän havaitsemisessa. Älykelloihin keskittyi viisi tutkimusta. Älypuhelimien avulla tehtävään eteisvärinän havaitsemiseen perehdyttiin neljässä tutkimuksessa.

Tutkimusten tuloksia voidaan arvioida mm. niissä saavutettujen tunnuslukujen avulla:

- *Herkkyyys* (engl. sensitivity) tarkoittaa testin kykyä antaa oikeita positiivisia tuloksia eli sen kykyä tunnistaa kaikki sairaat henkilöt sairaiksi [12].
- *Spesifisyys* (engl. specificity) kuvaa testin kykyä antaa oikeita negatiivisia tuloksia eli sen kykyä tunnistaa kaikki terveet henkilöt terveiksi [12].
- *Tarkkuus* (engl. accuracy) kuvaa testin kykyä erottaa sairaat ja terveet henkilöt oikein toisistaan. Tämä tarkoittaa oikeiden tulosten (positiivisten tai negatiivisten) osuutta kaikista tuloksista. [13]
- *Positiivinen ennustearvo* (engl. positive predictive value, PPV) on todennäköisyys sille, että testin sairaaksi määrittelemä henkilö on oikeasti sairas [12].

- *Negatiivinen ennustearvo* (engl. negative predictive value, NPV) on todennäköisyys sille, että testin terveeksi määrittelemä henkilö on oikeasti terve [12].

Tämän tutkielman kontekstissa testillä tarkoitetaan laitetta ja siihen liittyvää algoritmia. Tunnusluvut on ilmoitettu tutkimuksissa yleensä prosenttilukuna siten, että 100 % on täydellinen lukema.

3.1 Rannekkeet ja älykellot

Fan ryhmineen [14] on tutkinut ranneketyyppisen FPG-laitteen (Huawei Band 2) toimivuutta eteisvärinän ja normaalin sinusrytmin erottamisessa toisistaan. Tutkimukseen osallistuneet henkilöt olivat sairaalapotilaita, joista noin puolella oli todettu eteisvärinä. Dataa kerättiin rannekkeella kolmen minuutin ajan potilaiden ollessa makuuasennossa. Kerätty data käsiteltiin Preventicuksen kehittämällä algoritmilla. Vertailukohtana FPG-signaalin pohjalta tehdyille eteisvärinän tunnistamiselle käytettiin standardinmukaista 12-kanavaista EKG-tutkimusta. Fan saavutti tutkimusryhmineen kaikkien tunnuslukujen suhteen yli 95 % tuloksia. Tutkimuksessa todettiin käytetyn algoritmin ja älylaitteen olevan lupaavia eteisvärinän tunnistamiseen, ja että rannekkeella saadut tulokset eivät eronneet EKG:llä saavutetuista tuloksista merkitsevästi.

Väliaho ryhmineen on tehnyt kaksi tutkimusta rannelaitteen (Empatica E4) toimivuudesta eteisvärinän havaitsemisessa vuosina 2019 [15] ja 2022 [16]. Ensimmäisessä tutkimuksessa (2019) koeasetelma oli samankaltainen kuin Fanilla [14] ryhmineen - sairaalaympäristössä vuodepotilailla, ja FPG-dataa kerättiin 5 minuutin ajan. Vertailukohtana käytettiin samanaikaisesti tehtyä 3-kanavaista Holter-tutkimusta. Myös tässä tutkimuksessa noin puolella potilaista oli ennestään todettu eteisvärinä. Väliahon tutkimuksessa käytettiin kahta eri algoritmia. Kummallakin näistä saatiin herkkyydeksi ja spesifisyydeksi yli 95 %. Tutkimus siis tukee Fanin tutkimuksessa

saatuja tuloksia - ranneketyyppiset FPG-laitteet ovat luotettavia eteisvärinän tunnistamisessa melko lyhytaikaisessakin käytössä ainakin levossa olevilla potilailla.

Kuten Fan [14] ja Väliäho (2019) [15], myös Dörr ryhmineen [17] tutki eteisvärinän havaitsemista sairaalaolosuhteissa, mutta älykellolla (Samsung Gear Fit 2). Mittaukset suoritettiin istuen viiden minuutin ajan. Hänen ryhmänsä saavuttamat tulokset ovat linjassa Fanin ja Väliähön saavuttamien tulosten kanssa, kaikki tunnusluvut olivat yli 90 %. Dörr nosti esille FPG-signaalin huonon laadun aiheuttamat haasteet.

Myöhemmässä tutkimuksessaan vuonna 2022 [16] Väliäho tutki Empatica E4 -rannekkeen soveltuvuutta myös pidempiaikaiseen ja vapaampaan eteisvärinän monitorointiin. Tutkimuksessa potilaat pitivät ranneketta ja 3-kanavaista Holter-monitoria 24 tunnin ajan ja saivat liikkua vapaammin, toki yhä sairaalaympäristössä. Tutkimuksen keskeisiä löytöjä oli, että FPG-data oli huomattavasti laadukkaampaa öisin. Päiväsaikaan kerätystä raakadatasta vain keskimäärin 30,5 % oli hyödynnettävissä, kun taas öisin kerätystä datasta voitiin hyödyntää keskimäärin 67,3 %. Datan käytökelvottomuuden ajateltiin johtuvan käden liikkeen ja sensorin puutteellisen iho-kontaktin aiheuttamista merkittävistä artefakteista. Ranneke kuitenkin mahdollisti luotettavan eteisvärinän tunnistamisen ympäri vuorokauden - analysoimalla dataa 30 min aikajaksoissa herkkyydeksi saatiin 94,7 % ja spesifisyydeksi 96,9 %. Väliäho nosti vielä tutkimuksessaan esille siihen osallistuneiden henkilöiden positiivisen kokemuksen FPG-seurannan helppoudesta ja mukavuudesta rannekeella tai älykellolla. Tutkimuksen kaikista potilaista 82,2 % oli valmiita käyttämään ranneketta kotona sydämen rytmin seurantaan. Yli 65-vuotiaista potilaista vastaava osuus oli 77,6 %. Lisäksi potilaat kokivat rannekkeen avulla tapahtuvan sydämen seurannan miellyttävämmäksi kuin samanaikaisen Holter-tutkimuksen.

Bonomi ryhmineen [8] tutki useiden eri algoritmien ja rannekelaitteen (CM3 Generation-3) toimivuutta eteisvärinän havaitsemisessa kahdentyyppisillä eteisväri-

näpotilaille: ryhmän 1 potilaille suoritettiin sähköinen rytminkorjaus ja heiltä kerättiin FPG-dataa ja 1-kanavaista EKG-dataa noin tunnin verran ennen ja jälkeen toimenpiteen. Ryhmän 2 potilaille oli kohtauksittaisen eteisvärinän takia määrätty 24–48 tunnin 12-kanavainen Holter-seuranta, ja heiltä kerättiin FPG-dataa samanaikaisesti. Kuten Väliähon vuoden 2022 tutkimuksessa [16], vapaasti liikkuvilta (ryhmän 2) henkilöiltä kerätyn FPG-datan laatu kärsi huomattavasti liikkeestä, ja vain noin 56 % kerätystä datasta oli puhdasta artefakteista. Molempien Bonomin tutkimuksen potilasryhmien kohdalla saavutettiin silti hyvät tunnusluvut: Ryhmän 1 potilailla kaikki tunnusluvut olivat vähintään 97 % ja ryhmän 2 potilailla saavutettiin datan häiriöistä huolimatta 93 % herkkyys, 100 % spesifisyys ja 97 % tarkkuus.

Hochstadin ryhmän tutkimukseen [18] valittiin eteisvärinää sairastavia ihmisiä, joista osa oli Bonomin [8] tutkimuksen tavoin joutumassa sähköiseen rytminkorjaukseen. Hochstadin ryhmä tutki CardiacSensen älykelloa ja algoritmia eteisvärinän havaitsemisessa. Tutkimuksen keskeisiä löytöjä oli, että älykellon tallentama FPG-signaali korreloi hyvin EKG-signaalin kanssa sydämen sykevälien osalta sekä sinusrytmin että eteisvärinän aikana. Älykello ja algoritmi tunnistivat eteisvärinän 100 % herkkyydellä.

Chang ryhmineen [19] seurasi älykellon (Garmin Forerunner 945) toimivuutta eteisvärinän tunnistamisessa Holter-tutkimuksen aikana. Potilaita seurattiin 18–24 tunnin ajan. Mahdollinen vahingoittunut FPG-data karsittiin pois tunnistamalla käden liikkeet älykellon kiihtyvyyssmittarin signaalin avulla, jolloin analysoitavaa dataa jäi keskimäärin vain 7,7 tuntia per mittaus. Tässäkin tutkimuksessa käyttökelpoisen datan määrä oli siis prosentuaalisesti pieni kuten Väliähon (2022) [16] ja Bonomin [8] tutkimuksissa, ja myös tutkimuksen tulokset olivat näiden tutkimusten kanssa samansuuntaisia. Chang ryhmineen saavutti herkkyydeksi 97,3 %, spesifisyydeksi 88,6 % ja tarkkuudeksi 93,5 %. Positiivinen ennustearvo oli 91,6 % ja negatiivinen ennustearvo 96,3 %.

Eteisvärinän seulonnasta rannekeilla ja älykelloilla on tehty sairaalaympäristössä suoritettujen tutkimusten lisäksi kaksi laajaa väestötason tutkimusta: Lubitzin ryhmineen [20] ja Guon ryhmineen [21] tutkimuksissa oli molemmissa yli 100 000 osallistujaa. Lubitzin tutkimukseen osallistuneet olivat tavallisia Fitbit-aktiivisuusrannekkeen omistavia kansalaisia Yhdysvalloissa ja Guon tutkimukseen osallistuneet Huaweiin rannekkeen tai älykellojen omistajia Kiinassa. Kummassakin tutkimuksessa saavutettiin hyvä positiivinen ennustearvo, Lubitzin tutkimuksessa 98,2 % ja Guon tutkimuksessa 91,6 %, eli FPG-laitteiden ja algoritmien sairaaksi määrittelemät ihmiset olivat hyvin suurella todennäköisyydellä oikeasti sairaita. Sekä Guo että Lubitz totesivat tutkimustensa osoittavan, että puettavilla laitteilla voisi olla suuri potentiaali diagnosoimattomien eteisvärinätapauksen havaitsemisessa tai seulonnassa. Tutkimusten haasteena oli, että eteisvärinätapaukset pystyttiin tarkastamaan EKG-tutkimuksella vasta useiden päivien viiveellä, eli joidenkin osallistujien kohdalla kohtauksittainen eteisvärinä saattoi jäädä varmistamatta.

3.2 Älypuhelimien kamera

Eteisvärinän havaitsemista varten on kehitetty myös menetelmiä, jotka hyödyntävät älypuhelimien kameraa. Seuraavaksi käsiteltävissä tutkimuksissa kaikissa pohjimmainen menetelmä oli sama: potilas asettaa sormensa älypuhelimien kameran ja salaman päälle, ja FPG-signaali muodostuu kudoksen läpi kameraan kulkeutuvan salaman valon määrästä verivolyymien vaihtelun mukaan. Tämän jälkeen FPG-signaali vielä käsitellään jonkin algoritmin avulla.

McManus ryhmineen julkaisi vuonna 2015 tutkimuksen [22], jossa sähköiseen rytminkorjaukseen meneviltä potilailta otettiin ennen ja jälkeen toimenpiteen kahden minuutin tallenteet sydämen rytmistä käyttäen älypuhelinia (iPhone 4S) ja 12-kanavaista EKG:tä tai potilasmonitoria. Tallenteet käsiteltiin tutkimusryhmän kehittämällä älypuhelinsovelluksella. Sovellus käytti algoritmia, jolla tunnistettiin

FPG-signaalin huiput, korjattiin signaalin melua, suodatettiin signaalia, ja joka sisälsi statistisia metodeja ja päätöslogiikkaa tapausten lajitteluun. Laite ja algoritmi tunnistivat eteisvärinän 97,0 % herkkyydellä, 93,5 % spesifisyydellä ja 95,1 % tarkkuudella. Tutkimusryhmän kehittämä algoritmi myös tunnisti hyvällä spesifisyydellä ja tarkkuudella (>95 %) eteis- ja kammiolisälyönnit, jotka usein tulkitaan väärin eteisvärinäksi. Herkkyys näiden rytmihäiriöiden kohdalla jäi kuitenkin maltilliseksi, eteislisälyönneillä 66,7 % ja kammiolisälyönneillä 73,3 %.

McManuksen tutkimuksen päätteeksi suoritettussa käytettävyysskartoituksessa havaittiin, että enemmistö (63 %) tutkimukseen osallistuneista henkilöistä koki älypuhelinsovelluksen käytön helpoksi tai hyvin helpoksi. McManus nostaa esille, että enemmistö Yhdysvaltain aikuisesta väestöstä omistaa älypuhelimien, joten suurella osalla kansaa olisi jo käytettävissä tarvittava laitteisto sydämen toiminnan seuraamiseen tutkitun kaltaisella sovelluksella. Tutkitun kaltainen älypuhelinsovellus voisi tarjota siis uuden tavan järjestää eteisvärinän seulontaa väestössä.

Fanin ryhmän tutkimuksessa [14] käsiteltiin älyrannekkeiden lisäksi älypuhelimella (Huawei Mate 9, Huawei Honor 7X) tapahtuvaa eteisvärinän havaitsemista. Tutkimukseen osallistuneet henkilöt olivat sairaalapotilaita, joista noin puolella oli todettu eteisvärinä. Dataa kerättiin kolmen minuutin ajan makuuasennossa. Fanin tutkimuksessa käytettiin Preventicus Heartbeats -sovellusta ja -algoritmia. Älypuhelimella saavutettiin kaikkien tunnuslukujen osalta yli 94 % taso. Käytettyjen kahden puhelinmallin välillä ei ollut huomattavaa eroa mittausten tarkkuudessa. Kuten Fanin ryhmän [14], myös Brasierin ryhmän tutkimuksessa [23] käytettiin Preventicus Heartbeats -sovellusta ja algoritmia. Algoritmin toiminnasta kerrottiin hieman: Heartbeats-algoritmi sisältää sydämen lyöntien välisen ajan muutosten sekä signaalin aaltomuotojen analyysia. Jo ennen tätä algoritmi hylkää mittauksen, jos siitä yli 10 % on kiihtyvyyssmittaritietojen tai signaalin muodon perusteella meluisaa tai vahingoittunutta. Tutkittava puhelin oli iPhone 4S. Brasierin ryhmän saavuttamat

hyvät tulokset (herkkyys 91,5 % ja spesifisyys 99,6 %) ja Fanin ryhmän tulokset viittaavat siihen, että Preventicus Heartbeats -sovellus ja algoritmi ovat toimivia älypuhelimien mallista riippumatta.

Proesmansin tutkimus [24] pyrki selvittämään toisen sydämen rytmin seurantaan tarkoitettun sovelluksen ja algoritmin (FibriCheck) tarkkuuden eteisvärinän havaitsemisessa perusterveydenhuollossa. Tutkimuksessa käytettiin iPhone 5S -puhelinta. Pelkän puhelimen kameran avulla sormenpästä otetun FPG-signaalin lisäksi sovellukseen syötettiin 1-kanavaisella EKG:llä kerättyä signaalia, ja näillä menetelmillä havaittuja eteisvärinätapauksia verrattiin 12-kanavaisella EKG:llä varmistettuihin diagnooseihin sekä toisiinsa. Pelkällä FPG:llä saavutettiin kaikissa tunnusluvuissa yli 95 % tulokset. Tutkimuksen keskeinen lopputulos oli, että FibriCheck-algoritmi pystyy diagnosoimaan eteisvärinän tarkasti sekä FPG-datan että 1-kanavaisen EKG-datan pohjalta.

3.3 Tutkimusaineiston yhteenveto

Tässä luvussa käsitellyistä tutkimuksista löytyi monia yhdistäviä tekijöitä. Pääosa tutkimuksista oli suoritettu sairaalaympäristössä [8], [14]–[19], [22]–[24]. Näihin tutkimuksiin osallistuneilla ihmisillä oli usein jo valmiiksi sydänsairauksia, ja he olivat suhteellisen iäkkäitä. Poikkeuksena löytyi kaksi laajaa väestötason tutkimusta [20], [21], joihin osallistuneet ihmiset elivät normaalia arkielämäänsä. Näistä tutkimuksista osallistujia löytyi myös laajemmalla ikähaarukalla.

Tutkimuksissa, jotka toteutettiin sairaalaympäristössä, FPG-dataa kerättiin pääosin makuulla olevilta tai istuvilta henkilöiltä. Tällä tapaa saadut tulokset eivät kuitenkaan anna täysin todenmukaista kuvaa menetelmän toimivuudesta. Useissa tutkimuksissa mittauksia myös uusittiin, jos kerätyn datan laatu ei ollut tarpeeksi hyvä. Tutkimuksissa, joissa FPG-datan kerääminen toteutettiin vapaammin ja osallistujat saivat liikkua normaalisti, keskeiseksi haasteeksi nousi laadukkaasti kerätty FPG-signaalin

keräämisen vaikeus. Käyttökelvottoman datan osuus vaihteli 32,7–69,5 % välillä [8], [16], [19] ja signaalin laadun havaittiin heikkenevän erityisesti päiväsaikaan [16]. Heikon FPG-datan laadun uskottiin näissä tutkimuksissa johtuvan liikkeen signaaliin aiheuttamista artefaktoista, sekä FPG-sensorien puutteellisesta kontaktista ihon kanssa.

Useassa tutkimuksessa käytettiin johonkin kaupalliseen laitteeseen liittyviä valmiita algoritmeja [14], [15], [17]–[21], [23], [24]. Kahdessa tutkimuksessa tutkimusryhmä oli kehittänyt algoritmin itse tai aiemman tutkimuksen pohjalta [8], [22]. Kolmessa tutkimuksessa oli käytetty samaa Preventicus Heartbeats -algoritmia [14], [17], [23]. Kaupallisista tai laitteisiin liittyvistä algoritmeista (mm. Huawei, Fitbit) ei kerrottu missään tutkimuksessa kovin tarkkoja tietoja.

Kolmessa tutkimuksessa kokeiltiin useita analysoitavan FPG-signaalijakson pituuksia. Väliaho ryhmineen (2022) [16] saavutti parhaat tulokset 30 minuutin jaksolla, kun vaihtoehtoisia aikavälejä olivat 10, 20, 30 ja 60 minuuttia. Dörr [17] ja Brasier [23] ryhmineen kokeilivat 1, 3 ja 5 minuutin jaksoja, eivätkä löytäneet näiden välillä suuria eroja.

Suurin ero tutkimusten välillä oli erilaisten FPG- ja EKG-laitteiden sekä algoritmien käyttö. Myös mittaustavoissa löytyi eroja: yhdessä tutkimuksista dataa kerättiin vain minuutin ajan [24], kun taas pisimmillään seuranta tehtiin useita kuukausia [20]. Loput tutkimuksista sijoittuivat johonkin näiden välille. Tutkimustulokset eivät siis menetelmien erojen takia ole täysin vertailtavissa keskenään.

Taulukossa 3.1 on kaikkien tässä luvussa käsiteltyjen tutkimusten tulokset tiivistettynä. Liitteessä A (Tutkimusten tuloksia) on laajempi taulukko, johon on kerätty tietoa myös tutkimuksissa käytetyistä algoritmeista, epäillyn eteisvärinän varmistamistavoista, tutkimukseen osallistuneista ihmisistä ja tutkimusten mittaustavoista. Kaikkien tutkimusten saavuttama herkkyys, spesifisyys, tarkkuus, positiivinen ennustearvo ja negatiivinen ennustearvo olivat lähes poikkeuksetta yli 90 %.

Taulukko 3.1: Tutkimusten tulokset koostettuna

Tutkimus	Laite/Laitteet	Herkkyys	Spesifisyys	Tarkkuus	PPV	NPV
Fan ym. (2019) [14]	Ranneke (Huawei Band 2)	95,36 %	99,70 %	97,72 %	99,63 %	96,24 %
	Älypuhelin (Huawei Mate 9 tai Honor 7X)	94,96 %	99,70 %	97,55 %	99,62 %	95,95 %
Väliaho ym. (2019) [15]	Ranneke (Empatica 4)	96,2 % / 95,3 %	98,1 %	-	-	-
Dörr ym. (2019) [17]	Älykello (Samsung Gear Fit 2)	93,7 %	98,2 %	96,1 %	97,8 %	94,7 %
Väliaho ym. (2022) [16]	Ranneke (Empatica 4)	94,7 %	96,9 %	-	97,2 %	-
Bonomi ym. (2018) [8]	Ranneke (CM3 Generation-3)	97 % / 93 %	100 %	98 % / 97 %	99 %	98 %
Hochstadt ym. (2019) [18]	Älykello (CardiacSense)	100 %	-	-	-	-
Chang ym. (2022) [19]	Älykello (Garmin Forerunner 945)	97,3 %	88,6 %	93,5 %	91,6 %	96,3 %
Lubitz ym. (2022) [20]	Ranneke tai älykello (Fitbit, useita)	-	-	-	98,2 %	-
Guo ym. (2019) [21]	Ranneke tai älykello (Huawei ja Honor, useita)	-	-	-	91,6 %	-
McManus ym. (2015) [22]	Älypuhelin (iPhone 4S)	97 %	93,5 %	95,1 %	-	-
Brasier ym. (2019) [23]	Älypuhelin (iPhone 4S)	91,5 %	99,6 %	-	-	-
Proesmans ym. (2019) [24]	Älypuhelin (iPhone 5S)	95,6 %	96,9 %	96,1 %	95,6 %	96,6 %

Lähes kaikissa tutkimuksissa ainakin osa saavutetuista arvoista oli jopa yli 95 %. Huolimatta erilaisista laitteista, algoritmeista ja tulosten varmistamiseen käytetyistä EKG-laitteista, tutkimusten tulokset olivat siis hyvin yhteneviä: fotopletysmografiaan perustuvilla älylaitteilla voidaan havaita eteisvärinä hyvällä tarkkuudella. Tutkimukset olivat myös erittäin yksimielisiä siitä, että fotopletysmografiaa hyödyntävillä älylaitteilla on suuri potentiaali tulevaisuuden menetelmänä eteisvärinän havaitsemisessa ja seulonnassa.

4 Pohdinta

Kuten aiemmassa luvussa havaittiin, fotopletysmografiaan perustuvilla älylaitteilla on saavutettu erittäin hyviä tuloksia, ja älylaitteet voisivat soveltua hyvin uusien eteisvärinätapauksen löytämiseen. Erityisesti älykellojen ja rannekkeiden jatkuva käyttö voisi auttaa kohtauksittaisen tai oireettoman eteisvärinän havaitsemisessa. Saatuaan mittaustuloksen, joka viittaa eteisvärinään, laitteiden käyttäjät voisivat olla yhteydessä terveydenhuoltoon, jossa tapaus voidaan varmistaa ja arvioida hoidontarve. Koska eteisvärinä voi altistaa vakavillekin seuraamuksille kuten aivoinfarkteille, voisi sen aikaisella havaitsemisella olla suuri merkitys erityisesti yksilöiden elämässä, mutta laajemmassa kuvassa myös väestötasolla. Älylaitteet ja erityisesti älypuhelimet ovat nykyään hyvin yleisiä, joten niiden hyödyntäminen sairauksien havaitsemisessa ja diagnostiikassa on merkittävä tutkimuskohde. Älypuhelimet voisivat yleisyytensä vuoksi tarjota tavan toteuttaa osallistujamäärältään erityisen laajoja tutkimuksia.

Keskeinen haaste FPG-laitteiden käytössä osana eteisvärinän diagnostiikkaa on nykyinen terveydenhuollon käytäntö, jonka mukaan eteisvärinätapaukset tulee varmistaa rytmihäiriön aikaisella EKG-tutkimuksella tai EKG-tallenteella. Esimerkiksi useissa älykelloissa on kuitenkin sensorit sekä FPG- että EKG-mittauksia varten, jolloin FPG:lla voitaisiin havaita mahdollinen eteisvärinä, ja sen jälkeen käynnistää EKG-tallenne. Eteisvärinähavainto voisi myös perustua molemmilla sensoreilla tallennettuun signaaliin, ja olla kenties vielä varmempi. Kahden sensoryyppin laitteet

voisivat siis olla erityisen toimivia. Myös laitteet, jotka mahdollistavat pelkän FPG-mittauksen, vaikuttavat kuitenkin potentiaalisilta erityisesti seulontatarkoitukseen. FPG-laitteiden toimivuutta on kuitenkin vaikea tutkia erityisesti liikkuvilla potilaila sen takia, että tällöin tarvitaan liikuteltava EKG-laite. Kaikista monipuolisinta tietoa sydämen toiminnasta on saatavilla kuitenkin vain terveydenhuollon toimipisteissä olevilla 12-kytkentäisillä elektrokardiogrammeilla. Tarkasti määritellyn vertauskohteen puuttuminen voi vaikuttaa tutkimuksissa saavutettuihin tuloksiin, ja ne eivät siten ole täysin vertailtavissa keskenään.

Eteisvärinän havaitsemista erilaisilla älylaitteilla on tutkinut monta tutkimusryhmää viime vuosien aikana. Eniten tutkimusaineistoa oli saatavilla älykelloista ja rannekkeista, mutta tarkoitukseen on myös kehitetty useita älypuhelinsovelluksia. Yksi tulevaisuuden laitesuunta voisi olla älysormukset – näistä löytyi tämän tutkielman tiedonhaussa vain yksi tutkimus [25]. Markkinoilla on kuitenkin saatavilla myös sormusmallisia laitteita, kenties Suomessa tunnetuimpana Ouran älysormus, jota ei ainakaan toistaiseksi ole tutkittu eteisvärinän havaitsemisessa. Käytännössä kuitenkin mikä tahansa laite, jossa on FPG-sensori ja jonka tallentama signaali voidaan analysoida jollain algoritmilla, voisi toimia tähän käyttötarkoitukseen. Keskeisiin tässä tutkielmassa havaittuihin FPG:n haasteisiin kuuluivat signaalin häiriöt liikkeen tai puutteellisen ihokontaktin takia, ja voisi olla hyödyllistä tutkia, voisiko käyttäjälleen sopivan kokoinen, tiiviisti paikallaan istuva sormus tarjota näihin ongelmiin mahdollisen ratkaisun. Jatkossa eteisvärinän havaitsemiseen liittyen voisi siis olla tarpeen tutkia myös älysormuksia.

Tässä tutkielmassa käsiteltyjen tutkimusten tulokset eivät olleet täysin sovellettavissa kaikkiin tilanteisiin. Suurimmassa osassa tutkimuksia FPG-dataa kerättiin istuma-asennossa tai makuulla olevilta henkilöiltä. Normaalista elämänsä elävillä ihmisillä toteutetut väestötutkimukset taas eivät tarjonneet kovin tarkkaa tietoa signaalin kärsimisestä arkielämässä tai esimerkiksi herkkyydestä ja spesifisyydes-

tä, koska tarkemmin tutkittavaksi valikoituivat vain ne ihmiset, joilla eteisvärinää havaittiin.

Suurimmassa osassa sairaalaympäristössä toteutettuja tutkimuksia osallistujiksi valittiin joko sydämen osalta pelkkää eteisvärinää sairastavia, tai sydämen rytmiltään terveitä henkilöitä. Pois tutkimuksista suljettiin muita rytmihäiriöitä sairastavat ihmiset. Tähän tutkielmaan valittujen tutkimusten perusteella ei siis voida tietää, miten algoritmit olisivat reagoineet muihin rytmihäiriöihin – olisiko esimerkiksi väärin positiivisten tulosten osuus kasvanut, vai olisivatko algoritmit toimineet halutulla tavalla tunnistuen tiukasti eteisvärinään viittaavat signaalimuutokset?

Sairaalaolosuhteissa FPG:n voidaan tässä tutkielmassa käsitellyn aineiston perusteella todeta toimivan hyvin, mutta jatkossa tarvitaan enemmän tutkimusta siitä, kuinka tarkkoja FPG-laitteet olisivat osana ihmisten normaalia elämää. Lisäksi olisi tarpeen tutkia menetelmää suuremmilla henkilömäärillä – suuressa osassa käsiteltyjä tutkimuksia otoskoko oli suhteellisen pieni, vain joitain kymmeniä tai vähän yli sata ihmistä.

5 Yhteenveto

Tässä tutkielmassa käsiteltiin eteisvärinän havaitsemista fotopletysmografiaan perustuvilla älylaitteilla. Tutkielman lähdeaineistoon kuului 12 tutkimusta, joissa oli saavutettu laitteiden ja niihin liittyvien algoritmien toimivuudesta erilaisia tunnuslukuja. Lähdeaineistossa oli myös havaittu menetelmän rajoitteita.

Tutkimuskysymyksiin saatiin seuraavanlaiset vastaukset:

TK1: Millainen on erilaisten fotopletysmografiaa käyttävien älylaitteiden tarkkuus eteisvärinän tunnistuksessa? Aineiston tutkimuksissa saavutettu herkkyys, spesifisyys, tarkkuus, sekä positiivinen ja negatiivinen ennustearvo olivat lähes poikkeuksetta yli 90 %. Lähes kaikissa tutkimuksissa ainakin osa saavutetuista arvoista oli jopa yli 95 %. FPG-pohjaiset älylaitteet tunnistavat eteisvärinän lähes kaikissa tapauksissa ja menetelmän voidaan katsoa olevan verrattain luotettava.

TK2: Mitä haasteita fotopletysmografian käytössä eteisvärinän diagnostiikassa on? Suurin rajoite FPG:n käytölle ainakin vielä on, että EKG-tutkimus tai -tallenne on eteisvärinädiagnoosin kriteeri. Pelkkään FPG:aan perustuvat laitteet voisivat kuitenkin soveltua erityisesti seulontatarkoituksiin. Toinen suuri, menetelmään itsessään liittyvä haaste on vahingoittuneen signaalin suuri osuus, päiväsaikaan jopa lähes 70 % signaalista oli käyttökelvotonta. Signaaliin artefakteja aiheuttavat erityisesti kehon liikkeet ja sensorin puutteellinen kontakti ihoa vasten. Normaalisti liikkuvilla henkilöillä laadukkaiden mittaustulosten saaminen voi siis olla vaikeampaa. Myös menetelmän laadukas tutkiminen normaalielämässä on haastavaa, koska tällöin tar-

vitaan myös liikuteltava EKG-laite tulosten varmistamiseen reaaliaikaisesti.

Esille nousi osassa aineistoa myös menetelmän mukavuus potilaille. Monelle ennestään tutut laitteet, jotka eivät ole invasiivisia tai rajoita elämistä, olivat hyvin siedettyjä ja jopa mieluisempia potilaille kuin nykyiset EKG-pohjaiset menetelmät. Kokonaisuudessaan FPG-pohjaiset älylaitteet tarjoavat lupaavia vaihtoehtoja sydämen toiminnan pitkäaikaiseen seurantaan sekä erityisesti kohtauksittaisen ja oireetoman eteisvärinän havaitsemiseen ja seulontaan.

Lähdeluettelo

- [1] R. Kettunen, ”Eteisvärinä (flimmeri) ja eteislepatus (flutteri)”, *Duodecim Terveyskirjasto*, 17.10.2023.
- [2] J. Airaksinen, K. Aalto-Setälä, J. Hartikainen et al., *Kardiologia*. Duodecim, 2016, päivitetty 2024.
- [3] G. J. Tortora ja B. H. Derrickson, *Tortora’s principles of anatomy and physiology 15th edition*. Wiley, 2017.
- [4] R. Kettunen, ”Sydämen rytmihäiriöt”, *Duodecim Terveyskirjasto*, 20.11.2023.
- [5] J. Allen, ”Photoplethysmography and its application in clinical physiological measurement”, *Physiological Measurement*, vol. 28, nro 3, R1–R39, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1088/0967-3334/28/3/R01>.
- [6] T. Pereira, N. Tran, K. Gadhomi et al., ”Photoplethysmography based atrial fibrillation detection: a review”, *NPJ Digital Medicine*, vol. 3, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41746-019-0207-9>.
- [7] J. L. Moraes, M. X. Rocha, G. G. Vasconcelos, J. E. V. Filho, V. H. C. D. Albuquerque ja A. R. Alexandria, ”Advances in Photoplethysmography Signal Analysis for Biomedical Applications”, *Sensors*, vol. 18, nro 6, 1894, 2018. DOI: <https://doi.org/10.3390/s18061894>.
- [8] A. G. Bonomi, F. Schipper, L. M. Eerikäinen et al., ”Atrial Fibrillation Detection Using a Novel Cardiac Ambulatory Monitor Based on Photo-Plethysmography

- at the Wrist”, *Journal of the American Heart Association*, 2018. DOI: [10.1161/JAHA.118.009351](https://doi.org/10.1161/JAHA.118.009351).
- [9] A. A. Alian ja K. H. Shelley, ”Photoplethysmography”, *Best Practice & Research: Clinical Anaesthesiology*, vol. 28, nro 4, s. 395–406, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bpa.2014.08.006>.
- [10] C. C. Cheung, A. D. Krahn ja J. G. Andrade, ”The Emerging Role of Wearable Technologies in Detection of Arrhythmia”, *Canadian Journal of Cardiology*, vol. 34, nro 8, s. 1083–1087, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cjca.2018.05.003>.
- [11] S. Nemati, M. M. Ghassemi, V. Ambai, N. Isakadze, O. Levantsevych ja A. Shah, ”Monitoring and detecting atrial fibrillation using wearable technology”, *2016 38th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)*, s. 3394–3397, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1109/embc.2016.7591456>.
- [12] R. Trevethan, ”Sensitivity, Specificity, and Predictive Values: Foundations, Pliabilities, and Pitfalls in Research and Practice”, *Frontiers in Public Health*, vol. 5, 2017. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpubh.2017.00307>.
- [13] A. Baratloo, M. Hosseini, A. Negida ja G. E. Ashal, ”Simple Definition and Calculation of Accuracy, Sensitivity and Specificity”, *Emergency*, vol. 3, nro 2, s. 48–49, 2015.
- [14] Y.-Y. Fan, Y.-G. Li, J. Li et al., ”Diagnostic Performance of a Smart Device With Photoplethysmography Technology for Atrial Fibrillation Detection: Pilot Study (Pre-mAFA II Registry)”, *JMIR mHealth and uHealth*, vol. 7, nro 3, 2019. DOI: [10.2196/11437](https://doi.org/10.2196/11437).
- [15] E.-S. Väliäho, P. Kuoppa, J. A. Lipponen et al., ”Wrist band photoplethysmography in detection of individual pulses in atrial fibrillation and algorithm-

- based detection of atrial fibrillation”, *Europace*, vol. 21, nro 7, s. 1031–1038, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1093/europace/euz060>.
- [16] E.-S. Väliäho, J. A. Lipponen, P. Kuoppa et al., ”Continuous 24-h Photoplethysmogram Monitoring Enables Detection of Atrial Fibrillation”, *Frontiers in Physiology*, vol. 12, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3389/fphys.2021.778775>.
- [17] M. Dörr, V. Nohturfft, N. Brasier et al., ”The WATCH AF Trial: SmartWATCHes for Detection of Atrial Fibrillation”, *JACC: Clinical electrophysiology*, vol. 5, nro 2, s. 199–208, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jacep.2018.10.006>.
- [18] A. Hochstadt, E. Chorin, S. Viskin, A. L. Schwartz, N. Lubman ja R. Rosso, ”Continuous heart rate monitoring for automatic detection of atrial fibrillation with novel bio-sensing technology”, *Journal of Electrocardiology*, vol. 52, s. 23–27, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jelectrocard.2018.10.096>.
- [19] P.-C. Chang, M.-S. Wen, C.-C. Chou, C.-C. Wang ja K.-C. Hung, ”Atrial fibrillation detection using ambulatory smartwatch photoplethysmography and validation with simultaneous holter recording”, *American Heart Journal*, vol. 247, s. 55–62, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ahj.2022.02.002>.
- [20] S. A. Lubitz, A. Z. Faranesh, C. Selvaggi et al., ”Detection of Atrial Fibrillation in a Large Population Using Wearable Devices: The Fitbit Heart Study”, *Circulation*, vol. 146, nro 19, s. 1415–1424, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1161/CIRCULATIONAHA.122.060291>.
- [21] Y. Guo, H. Wang, H. Zhang et al., ”Mobile Photoplethysmographic Technology to Detect Atrial Fibrillation”, *Journal of the American College of Cardiology*, vol. 74, nro 19, s. 2365–2375, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jacc.2019.08.019>.

-
- [22] D. D. McManus, J. W. Chong, A. Soni et al., "PULSE-SMART: Pulse-Based Arrhythmia Discrimination Using a Novel Smartphone Application", *Journal of Cardiovascular Electrophysiology*, vol. 27, nro 1, s. 51–57, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1111/jce.12842>.
- [23] N. Brasier, C. J. Raichle, M. Dörr et al., "Detection of atrial fibrillation with a smartphone camera: first prospective, international, two-centre, clinical validation study (DETECT AF PRO)", *Europace*, vol. 21, nro 1, s. 41–47, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1093/europace/euy176>.
- [24] T. Proesmans, C. Mortelmans, R. V. Haelst, F. Verbrugge, P. Vandervoort ja B. Vaes, "Mobile Phone-Based Use of the Photoplethysmography Technique to Detect Atrial Fibrillation in Primary Care: Diagnostic Accuracy Study of the FibriCheck App", *JMIR mHealth and uHealth*, vol. 27, nro 7, 2019. DOI: <https://doi.org/10.2196/12284>.
- [25] S. Kwon, J. Hong, E.-K. Choi et al., "Detection of Atrial Fibrillation Using a Ring-Type Wearable Device (CardioTracker) and Deep Learning Analysis of Photoplethysmography Signals: Prospective Observational Proof-of-Concept Study", *Journal of Medical Internet Research*, vol. 22, nro 5, 2020. DOI: <https://doi.org/10.2196/16443>.

Liite A Tutkimusten tuloksia

Tutkimus	Laite / laitteet	Algoritmi	Epäillyn eteisvärinän varmistamistapa	Osallistujamääriä, alkutilanne jos tiedossa (eteisvärinää, sinusrytmi)		Mittauksen tapa ja kesto	Herkkyyks (sensitivity)	Spesifisyys (specificity)	Tarkkuus (accuracy)	PPV	NPV
Dörr et al. (2019)	Älykello (Samsung Gear Fit 2)	Preventicus Heartbeats	1-kanavainen EKG (AliveCor Kardia)	508 (237, 271)	Istuen, 5 min	93,7 %	98,2 %	96,1 %	97,8 %	94,7 %	
Guo et al. (2019)	Ranneke (Honor Band 4), Älykello (Huawei Watch GT tai Honor Watch)	Huaweiin kehittämä	terveydenhuollossa tai 24 tunnin Holter-EKG (kanavamääriä ei mainittu)	187912	Jatkuvaa, 2 viikkoa	-	-	-	91,6 %	-	
Lubitz et al. (2022)	Rannekkeet ja älykellot (Fitbit, useita versioita)	Fitbitin kehittämä	1-kanavainen EKG (ePatch, BioTelometry)	455699	Jatkuvaa paikallaan ollessa	-	-	-	98,2 %	-	
Bonomi et al. (2018)	Ranneke (CM3 Generation-3)	Tutkimusryhmän kehittämä	1-kanavainen EKG (ActiveWave Cardio)	18 (18, -)	Makuulla, 2 tuntia	97 %	100 %	98 %	99 %	98 %	
Hochstadt et al. (2019)	Älykello (CardiacSense)	CardiacSensen kehittämä	12-kanavainen Holter-EKG (kanavamääriä ei mainittu)	34 (34, -)	Vapaa, 24 - 48 tuntia	93 %	100 %	97 %	-	-	
Fan et al. (2019)	Ranneke (Huawei Band 2), Älypuhelin (Huawei Mate 9 tai Honor 7X)	Preventicus Heartbeats	12-kanavainen EKG	108 (52, 56)	Makuulla, n. 30 min	100 %	-	-	-	-	
Väliläho et al. (2022)	Ranneke (Empatica E4)	ei tiedossa	3-kanavainen Holter-EKG	173 (76, 97)	Vapaa, 24 tuntia	94,7 %	96,9 %	-	97,2 %	-	
Chang et al. (2022)	Älykello (Garmin Forerunner 945)	Garminin kehittämä	3-kanavainen Holter-EKG	200	Vapaa, 18-24 tuntia	97,3 %	88,6 %	93,5 %	91,6 %	96,3 %	
Väliläho et al. (2019)	Ranneke (Empatica E4)	AFFEvidence / COSEN	3-kanavainen Holter-EKG	213 (106, 107)	Makuulla, 5 min	96,2 % / 95,3 %	98,1 %	-	-	-	
Brasler et al. (2019)	Älypuhelin (iPhone 4S)	Preventicus Heartbeats	1-kanavainen EKG (AliveCor Kardia)	592 (248, 344)	Istuen, 5 min	91,5 %	99,6 %	-	-	-	
McManus et al. (2015)	Älypuhelin (iPhone 4S)	Tutkimusryhmän kehittämä	12-kanavainen EKG	121	Makuulla, 2 min	97 %	93,5 %	95,1 %	-	-	
Proesmans et al. (2019)	Älypuhelin (iPhone 5S)	FibrinCheck AF	12-kanavainen EKG	223	Istuen, 1 min	95,6 %	96,6 %	96,1 %	95,6 %	96,6 %	