

Lasten sydämen rytmihäiriöiden seuraaminen puettavilla EKG-laitteilla

TURUN YLIOPISTO
Tietotekniikan laitos
TkK-tutkielma
Lääketieteellinen tekniikka ja terveysteknologia
Tammikuu 2026
Roosa Hörkkö

TURUN YLIOPISTO

Tietotekniikan laitos

ROOSA HÖRKKÖ: Lasten sydämen rytmihäiriöiden seuraaminen puettavilla EKG-laitteilla

TkK-tutkielma, 34 s.

Lääketieteellinen tekniikka ja terveysteknologia

Tammikuu 2026

Tässä tutkielmassa tarkastellaan puettavien EKG-laitteiden hyödyntämistä lasten rytmihäiriöiden seurannassa. Puettavat EKG-laitteet tarjoavat uusia innovatiivisia ratkaisuja perinteisten mittaustekniikoiden ohelle rytmihäiriöiden seurannassa. EKG on pitkään lääketieteessä hyödynnetty tutkimusmenetelmä, joka perustuu iholle asennettujen elektrodien kykyyn havaita sydämen sähköisen toiminnan muutoksia. Tätä menetelmää hyödynnetään 12-kytkentäisissä EKG-tutkimuksissa, 2-3 kanavan Holter-monitoroinnissa ja puettavissa EKG-laitteissa kompaktimmassa mitataavassa. Tutkimuksessa keskitytään älykellojen ja EKG-laastareiden kykyyn havaita rytmihäiriöitä lapsilla. Näiden laitteiden käyttöä ja diagnostista luotettavuutta verrataan lääketieteessä vakiintuneisiin laitteisiin. Kirjallisuuskatsauksen perusteella todettiin, että EKG-laastari on tarkkuudeltaan ja luotettavuudeltaan vähintään Holter-monitorin kanssa yhdenvertainen. EKG-laastari tarjoaa pidemmän seurantaajan ja paremman käyttökokemuksen. EKG-laastarin kustannustehokkuudesta ei kuitenkaan ole varmuutta. Lisäksi tutkimukset osoittivat, että kuluttajille suunnitellut älykellot kykenevät tuottamaan lapsilla laadukasta EKG-dataa, joka on verrattavissa 12-kytkentäisen EKG:n raajakytkentä I:een. Älykellon algoritmit eivät kuitenkaan ole ideaaleja lasten sykemallille. Yhteenvedona voidaan todeta, että lasten sydämen rytmihäiriöiden seuranta puettavilla EKG-laitteilla on nouseva ja nopeasti kehittyvä tutkimusalue. Nykyisen näytön perusteella nämä laitteet ovat varteenotettavia vaihtoehtoja, joita voidaan harkita täydentämään perinteisiä mittausmenetelmiä lasten rytmihäiriöiden tallentamisessa.

Asiasanat: Rytmihäiriöt, lapset, puettavat EKG-laitteet, älykello, EKG-laastari, Holter-monitorointi

Sisällys

1	Johdanto	1
2	Tausta	4
2.1	Sydämen anatomia ja fysiologia	4
2.2	Elektrokardiografia (EKG)	7
2.3	Perinteiset tutkimusmenetelmät ja puettavat EKG-laitteet	10
2.4	Lasten sydämen rytmihäiriöt	12
3	Puettavien EKG-laitteiden käyttö lasten rytmihäiriöiden seurannassa	15
3.1	Älykellot osana lasten pitkäaikaissurantaa	16
3.2	EKG-laastarit osana lasten pitkäaikaissurantaa	19
3.3	Puettavien EKG-laitteiden ja perinteisten tutkimusmenetelmien vertailu	22
4	Pohdinta	26
4.1	Älykellot lasten rytmihäiriöiden seurannan tukena	26
4.2	EKG-laastarit varteenotettava vaihtoehto lasten pitkäaikaissurantaan	28
5	Yhteenveto	32
	Lähdeluettelo	35

Kuvat

1.1	Tiedonhaun vaiheet esitettynä.	3
2.1	Sydämen sähköinen johtoratajärjestelmä. Muokattu lähteestä [7] . . .	6
2.2	12-kytkentäisen EKG-järjestelmän elektrodien sijainnit. Raajakytken- nät (RA, LA, RL, LL) muodostavat Einthovenin kolmion ja sen augmentoidut johdot (aVR, aVL, aVF). Rintakytkenät (V1-V6) sijoitetaan rintakehälle sydämen sähköisen toiminnan rekisteröimisek- si eri suunnista. Kuva koottu lähteistä [3] ja [13].	8
2.3	Kuva 2.3 esittää elektrokardiogrammin päävaiheet ja aikavälit: P- aallon, QRS-kompleksin, T- ja U-aallot sekä niihin liittyvät PQ-, QRS-, ST- ja QT-ajat. Kuvassa on esitetty myös normaalit aikavä- liarvot. Kuva lähteestä [14].	9
2.4	Kolmekanavaisessa Holter-tutkimuksessa elektrodien sijoitus jäljitte- lee kolmea peruskytkentää. A+ ja A- vastaavat V5-kytkentää, B+ ja B- V1-kytkentää sekä C+ ja C- aVF-kytkentää. G toimii maadoituse- lektrodina. Kuva lähteestä [14].	11
3.1	Puettavat EKG-laitteet rinnakkain. Vasemmalla WebCardio EKG- laastari. Keskellä Zio Patch EKG-laastari, jossa nuoli osoittaa liipai- sinpainiketta. Oikealla esitetty Holter-monitorointikokonaisuus lap- sen päällä. Kuvat koottu lähteistä: [24],[34],[36].	21

Taulukot

2.1	Lasten rytmihäiriöt	14
3.1	Tutkimukset koostettuna	25

1 Johdanto

Rytmihäiriö (engl. arrhythmia) käsittää kaikki sydämen normaalista rytmistä esiintyvät poikkeamat. Lähes kaikilla ihmisillä esiintyy jonkinlaisia rytmihäiriöitä jossakin elämän vaiheissa. Suurin osa näistä sykepoikkeavuuksista on hyvälaatuisia. [1] Lasten sydämen rytmihäiriöiden diagnosointi voi olla haastavaa, sillä lapsen käytöksestä saattaa olla vaikeaa tunnistaa oireita ja arvioida rytmihäiriön vakavuutta. Epäsäännöllinen syke ei useimmiten aiheuta huolta lastenlääkäreissä tai kardiologeissa, sillä suurin osa lapsilla esiintyvistä rytmihäiriöistä on vaarattomia. Osa rytmihäiriöistä saattaa kuitenkin jäädä havaitsematta tai esiintyä ajoittain ja oireettomasti. Näiden rytmihäiriöiden tunnistaminen vaatii ajallisesti pidempää seurantaa. [2] Rytmihäiriöiden tunnistamiseen käytetään elektrokardiografiaa (EKG), joka on sydämen sähköistä toimintaa rekisteröivä tutkimusmenetelmä [3]. Puettavat EKG-laitteet ovat non-invasiivisia mittauslaitteita, joiden avulla sydämen sähköistä toimintaa voidaan seurata jatkuvasti potilaan normaalin arjen aikana [4]. Lapsipotilaat eroavat kohderyhmänä aikuisista, joten mukavien sekä huomaamattomien mittauslaitteiden rooli korostuu pitkäaikaisseurannassa.

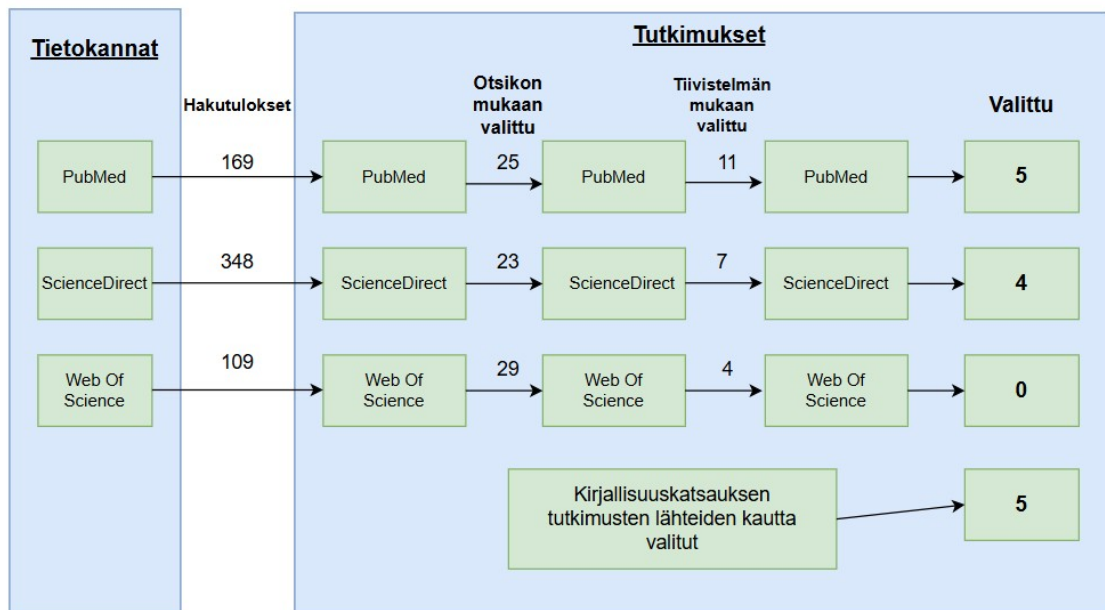
Tämä kandidaatintutkielma on toteutettu kirjallisuuskatsauksena. Tutkielman tavoite on selvittää, miten puettavia EKG-laitteita voidaan hyödyntää lasten sydämen rytmihäiriöiden havaitsemisessa ja seurannassa. Lisäksi tarkoituksena on tarkastella, miten puettavien EKG-laitteiden tarkkuus ja käytettävyys vertautuu perinteisiin kliinisiin menetelmiin, kuten Holter-tutkimukseen ja sairaalassa tehtävään

EKG-tutkimukseen. Tämän perusteella tutkimuskysymyksiksi on muotoutunut seuraavat kysymykset:

Tutkimuskysymys 1: Miten puettavia EKG-laitteita voidaan hyödyntää lasten sydämen rytmihäiriöiden havaitsemisessa ja seurannassa?

Tutkimuskysymys 2: Miten puettavien EKG-laitteiden tarkkuus ja käytettävyys eroavat perinteisistä EKG-tutkimusmenetelmistä?

Vuokaaviossa (1.1) on esitetty prosessi, jonka mukaisesti tiedonhaku toteutettiin. Tutkielmaa varten on haettu lähdeaineistoa kolmesta eri tietokannasta: PubMed, ScienceDirect sekä Web of Science. Tutkielman aihetta käsitteleviä artikkeleja haettiin hakulauseilla: Arrhythmia AND (Child* OR Pediatric*) AND (Smartwatch OR "ECG patch" OR "wearable ECG") sekä (Child* OR Pediatric*) AND (Smartwatch OR "ECG patch" OR "wearable ECG"). Hakulauseilla löytyi PubMedistä 169 artikkelia tai muuta tulosta, ScienceDirectistä 348 artikkelia tai muuta tulosta sekä Web of Sciencessä 109 artikkelia tai muuta tulosta. Tutkimusaineiston karsinta suoritettiin otsikkojen ja tiivistelmien perusteella. Duplikaattien poiston myötä tutkielman lopullinen aineisto muodostui vain PubMed- ja ScienceDirect -tietokannoista. Valitut aineistot koostuivat siten viidestä PubMed artikkelista ja neljästä ScienceDirect artikkelista. Lisäksi kirjallisuuskatsaukseen valittujen tutkimusten lähdeluetteloiden tarkastelun kautta löydettiin viisi tähän tutkielmaan valittua artikkelia. Täten kirjallisuuskatsaus on toteutettu yhteensä neljästätoista tutkimusartikkelista.



Kuva 1.1: Tiedonhaun vaiheet esitettynä.

Tutkielmassa tarkasteltiin puettavia EKG-laitteita, joista älykellot ja EKG-laastarit valittiin keskeisiksi tarkastelukohteiksi. Tutkimusnäyttö muista puettavista EKG-seurantamenetelmistä, kuten älyvaatteista, on toistaiseksi vähäistä. Hakua ei rajattu vuositason, sillä valtaosa julkaistuista artikkeleista oli melko uusia. Aiheesta oli lopulta saatavilla suhteellisen rajallinen määrä tutkimuksia.

Tutkielman luvussa kaksi esitellään aiheeseen liittyvää taustatietoa, kuten sydämen rakennetta ja fysiologiaa, elektrokardiografiaa (EKG) sekä lasten rytmihäiriöitä. Lisäksi luvussa käsitellään puettavia EKG-laitteita ja perinteisimpiä tutkimusmenetelmiä. Luvussa kolme tarkastellaan kirjallisuuskatsauksen tuloksia ja analysoidaan, miten puettavia EKG-laitteita voidaan hyödyntää lasten sydämen rytmihäiriöiden seurannassa. Luvussa neljä pohditaan tutkielman havaintoja ja niiden merkitystä suhteessa tutkimuskysymyksiin. Luku viisi kokoaa työn keskeiset tulokset ja esittää yhteenvedon, jossa vastataan tutkimuskysymyksiin.

2 Tausta

Sydämen anatomian ja fysiologian avulla on mahdollista selittää tarkemmin rytmihäiriöiden syntymekanismeja sekä niistä aiheutuvia riskejä ja seuraamuksia. Elektrokardiografian (EKG) teoria puolestaan kuvaa, miksi se on sopiva menetelmä sydämen toiminnan mittaamiseen ja rytmihäiriöiden diagnosointiin. Perinteiset tutkimusmenetelmät ja uudemmat puettavat EKG-laitteet perustuvat samaan elektrofysiologiseen periaatteeseen, mutta eroavat toteutustavaltaan ja käyttötarkoitukseltaan. Näitä menetelmiä hyödynnetään lasten rytmihäiriöiden tunnistamisessa ja seurannassa. Tässä luvussa käsitellään sydämen anatomiaa ja fysiologiaa, elektrokardiografiaa, lasten rytmihäiriöitä sekä perinteisiä ja puettavia EKG-laitteita.

2.1 Sydämen anatomia ja fysiologia

Sydän on kehon koviten työskentelevä lihas, joka sijaitsee lähes keskellä rintakehää (engl. thorax) [3]. Sydän on rakenteeltaan ontto, nelilokeroinen elin, joka koostuu oikeasta ja vasemmasta puoliskosta. Molemmissa puoliskoissa on eteinen ja sen alapuolella kammio. Vasen puoli pumpkaa verta koko kehoon systeemiseen verenkiertoon ja oikea puoli keuhkoihin, niin sanottuun pieneen verenkiertoon. [3]

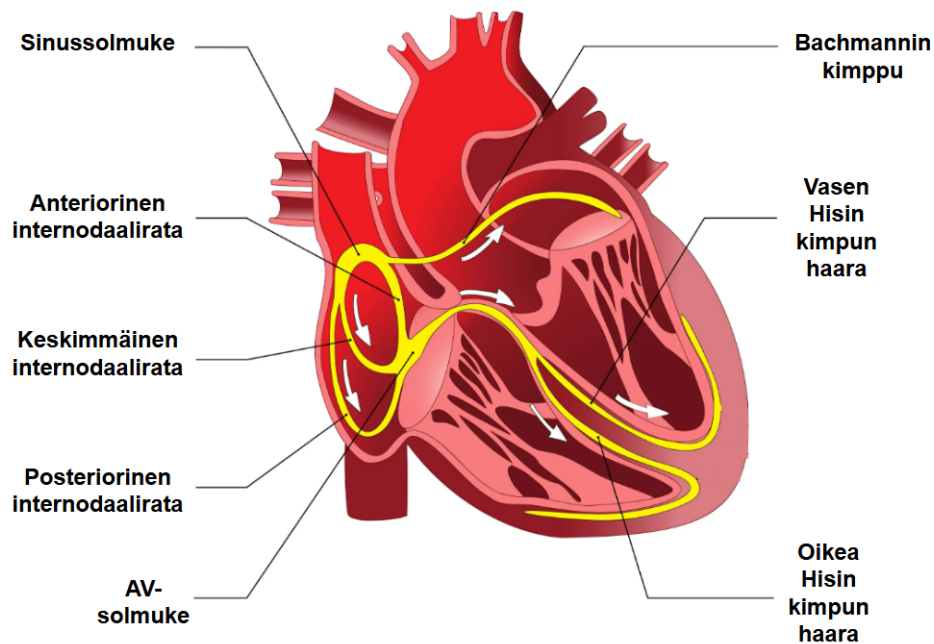
Sydämessä on neljä sydänlappää, jotka estävät veren takaisinvirtauksen väärään suuntaan. Kaksi lappää sijaitsee vasemmalla puolella ja kaksi oikealla puolella. Vasemmalla eteisen ja kammion välillä on hiippa- eli mitraalilappä sekä kammion ja siitä lähtevän aortan välillä aorttalappä. Oikealla eteisen ja kammion välillä puo-

lestaan on kolmiliuska- eli trikuspidaaliläppä sekä kammion ja keuhkovaltimon välillä keuhkovaltimo- eli pulmonaaliläppä. Sydänlihaksen pinnalla on aortan tyvestä lähteviä sepelvaltimoita, joiden tehtävänä on huolehtia sydämen aineenvaihdunnan tarpeista. [3], [5]

Oikea eteinen vastaanottaa vähähappisemman veren, joka tulee onttolaskimoa pitkin systeemisestä verenkierrosta sekä sydämen omasta sepelkierrosta. Vasempaan eteiseen saapuu happirikkaampi veri keuhkolaskimoista pienestä verenkierrosta. Supistumalla sydänlihas työntää verta eteisistä läppien läpi kammioihin ja kammioista edelleen verenkiertoon. Sydämen toiminta on jaksotettu systoleen (supistumisvaihe) ja diastoleen (lepovaihe). Nämä jaksot vuorottelevat ja muodostavat sydämen syklin (engl. cardiac cycle), jota tahdittaa sydämen oikean eteisen takaseinämässä sijaitseva sinussolmuke (engl. sinoatrial node, SA node). Sähköimpulssi leviää sydämen sähköisiä johtoratoja pitkin sinussolmukkeesta eteisen seinämiin, jolloin molemmat eteiset supistuvat ja täyttävät kammiot. Tätä vaihetta kutsutaan eteissystoleksi. Eteisistä etenevä sähköinen aktivaatio käynnistää tapahtumaketjun, joka johtaa kammioiden depolarisaatioon ja valmistaa ne supistumaan seuraavassa vaiheessa kammiosystollessa. Kammiopaineen (engl. ventricular pressure) nousu sulkee eteis-kammioläpät ja estää veren virtauksen takaisin eteisiin. Samaan aikaan eteisissä alkaa diastolevaihe, jolloin veri valuu eteisiin täyttäen ne. Kammiopaineen yhä noustessa aortta- ja keuhkovaltimoläpät avautuvat ja kammioiden tyhjentymisen käynnistyy. Kammiosystole tulee päätökseen ja paineen laskiessa kammioissa seinämät rentoutuvat ja siirtyvät diastoleen. Koko sydän on hetken rentoutuneena ja kammiot täyttyvät verellä uudelleen passiivisesti eteissupistukseen saakka. Näin sykli toistuu ja muodostaa sykkeen, tarkemmin sinusrytmin (engl. sinus rhythm). [3]

Sydämen sähköinen johtumisjärjestelmä (engl. cardiac conduction system, CCS) mahdollistaa depolarisaation virtaamisen sydämen läpi. Sähköinen aktivaatio etenee aaltorintamana sydämentahdistinsolujen ja erikoistuneiden johtavien kudosten

kautta (Kuva 2.1). Sinussolmuke depolarisoituu suurimmalla nopeudella ja muodostaa siten johtavan sydämentahdistimen. Aaltorintama leviää sinussolmukkeesta oikeaan eteiseen kolmen internodaaliradan kautta ja Bachmannin kimppua pitkin vasempaan eteiseen. Eteisaktivaatio laukaisee eteisten supistumisen, jolloin veri työntyy eteis-kammioiläppien läpi kammioihin. Internodaaliradat johtavat oikean eteisen eteis-kammiosolmukkeeseen eli AV-solmukkeeseen (engl. atrioventricular node, AV node), joka on ainoa sähköinen yhteys eteisten ja kammioiden välillä. Depolarisaatio etenee solmukkeesta seuraavaksi Hisin kimppuun (engl. Bundle of His), joka jakautuu vasempaan ja oikeaan päähaaraan. Vasen päähaara jakautuu edelleen etu-, keski- ja takahaarakkeeseen. Näitä haaroja ja niiden pienempiä johtoratoja kutsutaan Purkinjen säikeiksi (eng. Purkinje fibers). Eteisten tapaan, kammioissakin depolarisaatio saa kammiot supistumaan ja veri työntyy läppien kautta pieneen- ja systeemiseen verenkiertoon. Sähköisen depolarisaation jälkeen sydänlihas tarvitsee palautumisjakson, eli repolarisaation, ennen seuraavaa alkavaa depolarisaatiota. [3], [6]



Kuva 2.1: Sydämen sähköinen johtoratajärjestelmä. Muokattu lähteestä [7]

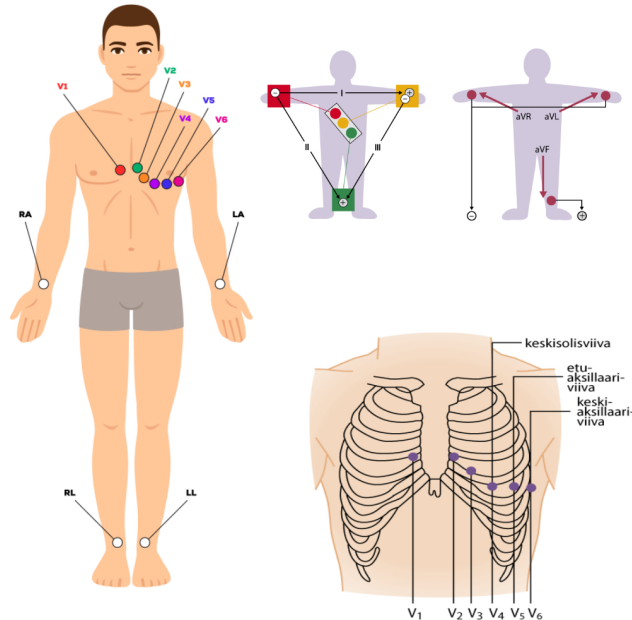
2.2 Elektrokardiografia (EKG)

Elektrokardiografia (EKG) on mittausmenetelmä, jolla rekisteröidään sydämen toimintaa. Mittauksen tuloksena syntyy elektrokardiogrammi, eli sydänfilmi, joka on sydämen eri vaiheiden sähköisiä muutoksia kuvaava käyrä. EKG on yksi yleisimmistä potilaille tehtävistä tutkimuksista. Sillä saadaan paljon tietoa sydämen toiminnasta ja erilaisista sydänsairauksista. Tutkimusmenetelmä on non-invasiivinen ja potilaalle vaaraton. [8][9] Sydämen syklin aikana toistuvat depolarisaatio- ja repolarisaatiotapahtumat tuottavat ionivirtoja, jotka elektrokardiografia pystyy havaitsemaan. Ihon pinnalle asetetut elektrodit muuntavat nämä ionivirrat jännite-eroiksi eli mittaavat elektrodien välisiä potentiaalieroja. Menetelmä pystyy siten tallentamaan, mistä sähköimpulssit alkavat ja miten ne virtaavat sydämen läpi. [10]

EKG-kytkennässä käytetään yleisesti 12-kytkentäjärjestelmää, joka muodostuu kymmenestä elektrodista [3]. Yleisimmin käytetty metalli elektrodeissa on hopea-hopeakloridi (Ag-AgCl). Näiden elektrodien kanssa käytetään elektrolyyttigeeliä, joka johtaa sähköä ja mahdollistaa paremman kontaktin metallielektrodin ja ihon välillä. [10] Ihon puhdistus ennen elektrodin kiinnitystä voi vähentää signaalin kohinaa ja siten parantaa tallennetun EKG:n laatua. [11] Kytkennät jaetaan edelleen kuuteen raajakytkentään ja kuuteen prekordiaaliseen kytkentään eli rintakytkentään. Kolme bipolaarista raajakytkentää (I, II ja III) muodostavat Einthovenin kolmion, jonka avulla voidaan tarkastella sydämen sähköisen vektorin suuntaa frontaalitasossa. Kehon epähomogeenisuutta pyritään minimoimaan augmentoiduilla eli vahvistetuilla unipolaarisilla V-kytkennöillä (aVR, aVL ja aVF), joiden toiminta perustuu keskustermiiniin. [3]

Kaikki EKG-kytkennät mittaavat aina kahden pisteen välistä potentiaalieroja, jolloin ne ovat käytännössä bipolaarisia eli kaksisuuntaisia. Näin ollen termi unipolaarinen kytkentä on hieman epätarkka ja tästä syystä poistumassa käytöstä. [12], [3] Kymmenen elektrodia on jaettu siten, että jokaiseen raajaan on kiinnitetty yksi

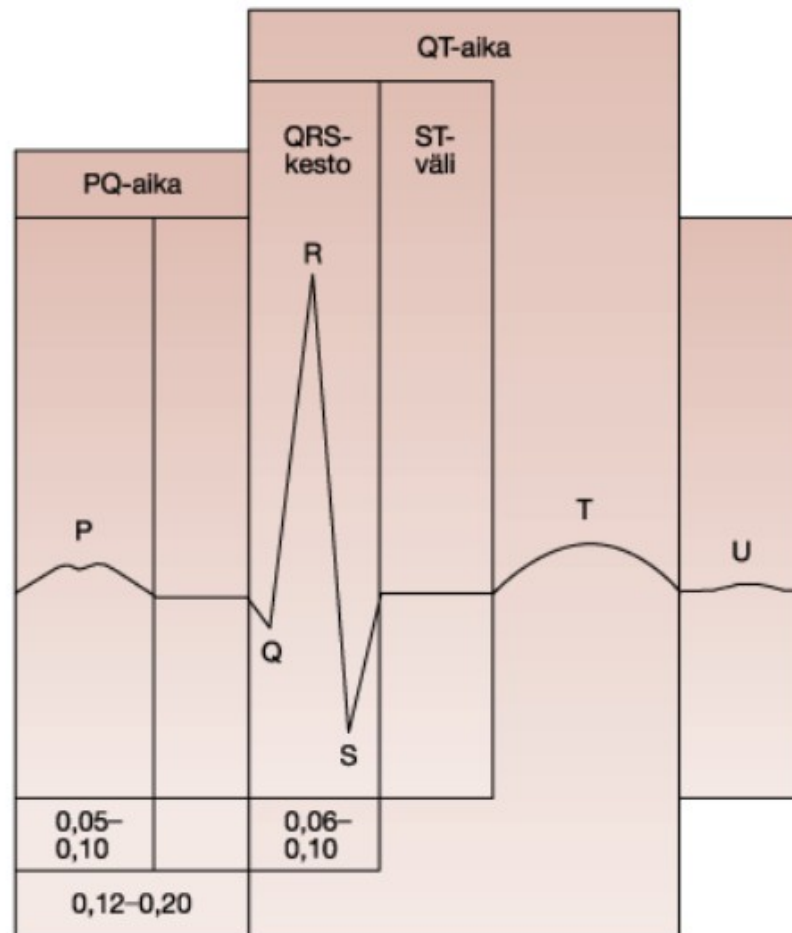
elektrodi ja loput kuusi on sijoitettu rintaan [3]. Kuvasta 2.2 hahmottuvat kytkennät ja elektrodien tarkemmat sijainnit.



Kuva 2.2: 12-kytkentäisen EKG-järjestelmän elektrodien sijainnit. Raajakytkenät (RA, LA, RL, LL) muodostavat Einthovenin kolmion ja sen augmentoidut johdotukset (aVR, aVL, aVF). Rintakytkenät (V1-V6) sijoitetaan rintakehälle sydämen sähköisen toiminnan rekisteröimiseksi eri suunnista. Kuva koottu lähteistä [3] ja [13].

EKG:ssä esiintyvät elektrokardiografiset aallot mallintavat luvussa 2.1 kuvattuja sähköisiä tapahtumia sydämessä. EKG-käyrän eri osat nimetään kirjaimilla (P, Q, R, S, T, U), mutta niiden muodot ovat aaltoja, jotka kuvastavat sydämen sähköisiä tapahtumia (kuva 2.3). Ensimmäinen EKG:ssä näkyvä heilahdus viittaa P-aaltoon, joka syntyy eteisten depolarisaatiosta. P-aaltoa seuraa QRS-kompleksi, joka edustaa kammion lihasten depolarisaatiota. Kompleksi on jännitteeltään ja siten amplitudiltaan huomattavasti suurempi kuin P-aalto. Mikäli heilahduksen alkuosa on negatiivinen, se merkitään Q-kirjaimella. Seuraava positiivinen heilahdus nimetään R-aaltona ja siitä seuraava negatiivinen heilahdus kirjataan S-kirjaimella. P-aallon ja QRS-kompleksin välistä jaksoa kutsutaan PQ-aikaväliksi ja se edustaa viivettä eteisten ja kammioden depolarisaation välillä. Kammioden depolarisaatiota seu-

raa palautuminen eli repolarisaatio, joka muodostaa EKG:ssä T-aallon. Joissakin EKG-käyrissä T-aallon perässä voidaan havaita ylimääräinen U-aalto, jonka syntymekanismi on epävarma. Normaalin sinusrytmin aikana EKG:ssä ei erotu eteisten repolarisaatio, sillä se hautautuu QRS-kompleksin alle. PQ-aikavälin lisäksi EKG:ssä on ST-aikaväli sekä QT-aikaväli. ST-aikaväli kuvaa aikaa kammioiden depolarisaation päättymisestä niiden repolarisaation alkuun ja QT-aikaväli puolestaan kattaa koko kammion sähköisen aktiviteetin eli depolarisaation ja repolarisaation yhteensä. [11], [3]



Kuva 2.3: Kuva 2.3 esittää elektrokardiogrammin päävaiheet ja aikavälit: P-aallon, QRS-kompleksin, T- ja U-aallot sekä niihin liittyvät PQ-, QRS-, ST- ja QT-ajat. Kuvassa on esitetty myös normaalit aikaväliarvot. Kuva lähteestä [14].

Seuraavassa luvussa tarkastellaan menetelmän soveltuvuutta sydämen toiminnan mittaamiseen erilaisissa käyttöympäristöissä.

2.3 Perinteiset tutkimusmenetelmät ja puettavat EKG-laitteet

Sairaalassa EKG-tutkimukset toteutetaan kliinisen tarpeen mukaan. Lepo-EKG voidaan ottaa akuuteissa tilanteissa, Holter-tutkimus pitkäaikaisseurannassa ja rasitus-testi, kun halutaan arvioida sydämen kuormitukseen liittyviä muutoksia.

Perinteinen sairaalan vastaanotolla toteutettava EKG-tutkimus perustuu 12-kytkentäiseen elektrokardiogrammiin, jota käsiteltiin luvussa 2.2. Tutkimuksen valmistelun ja mittauksen suorittaa yleensä hoitohenkilökunta, kuten sairaanhoitaja, kun taas tulkinta ja diagnoosi kuuluvat lääkärin vastuulle. Lepo-EKG toteutetaan makuuasennossa ja rekisteröitävän nauhan pituus on noin 10 sekuntia. Sydämen sähköisen aktiivisuuden muutokset tallennetaan piirtämällä käyrä liikkuvalla EKG-paperille nopeudella 25 mm/s, jossa aika esitetään x-akselilla ja jännite y-akselilla. [12], [9]

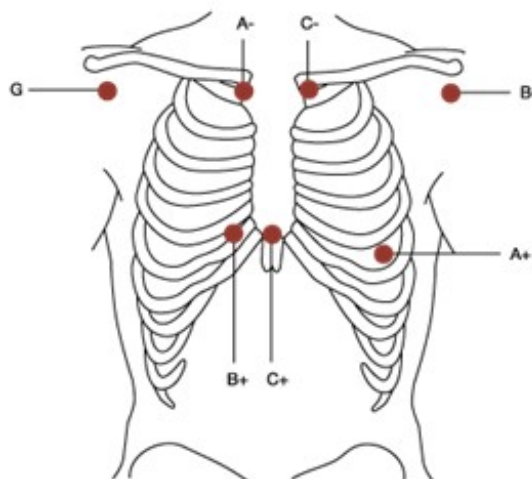
Pitkäaikaisseurannassa käytetään yleisimmin Holter-tutkimusta. Seuranta suoritetaan yhden tai kahden vuorokauden aikana kertakäyttöelektrodeilla. Tutkimus ei vaadi käyttäjältä aktiivisuutta vaan seuranta on jatkuvaa. Yleisimmin käytetään kuvassa 2.4 näkyvää kolmikanavaseurantaa, jonka tarkoitus on rekisteröidä EKG-signaalin poikkeamien toistuvuutta. EKG-signaali rekisteröidään potilaan kanssa kulkevaan laitteeseen ja analysoidaan myöhemmin tietokoneohjelman avulla. [14], [15]

Pitkäaikaisseurantaan on kehitetty myös tallentimia, joilla voidaan toteuttaa pidempiaikaista seurantaa kuin Holter-tutkimuksessa. Useimmat näistä laitteista vaa-

tivat käyttäjältä aktiivisuutta ja ne voidaan luokitella rekisteröintitavan ja käyttöajan perusteella. [16], [17]

Tapahtuma-aktivoituvia tallentimia (engl. event recorders) on useita eri tyyppiä. Silmukkamuistillinen tallennin (engl. looping memory monitor) tallentaa EKG-signaalia jatkuvasti lyhyessä, kiertävässä muistissa. Signaali tallennetaan pienikokoiseen paristokäyttöiseen rekisteröintilaitteeseen, jonka muistiin mahtuu noin 30 minuutin edestä tietoa. Potilas painaa laitteen painiketta tuntiessaan tyypillisen oireensa. Tällöin tallennin säilyttää muistissaan olleen edeltävän datan, muuten signaali pyyhkiytyy pois uuden signaalin tieltä. Joissakin malleissa on myös automaattisia liipaisimia, jotka tunnistavat epäsäännöllisen sykkeen ja käynnistävät tallennuksen automaattisesti. [14], [16], [17]

Oireaktivoitava tallennin (engl. symptom event monitor) on käsi­käyttöinen tai ranteessa pidettävä laite, joka asetetaan rintakehälle ja aktivoidaan painikkeella oireen ilmaantuessa. Toisin kuin silmukkamuistillinen tallennin, se ei tallenna EKG-signaalia ennen aktivointia. Sydäntapahtumien tallentimia kutsutaan myös ambulatorisiksi EKG-monitoreiksi eli AEKG-monitoreiksi. [14], [16], [17]



Kuva 2.4: Kolmekanavaisessa Holter-tutkimuksessa elektrodien sijoitus jäljittelee kolmea peruskytkentää. A+ ja A- vastaavat V5-kytkentää, B+ ja B- V1-kytkentää sekä C+ ja C- aVF-kytkentää. G toimii maadoituselektrodina. Kuva lähteestä [14].

Teknologian kehitys näkyy EKG-seurannassa. Perinteisimpien seurantalaitteiden rinnalle on tullut uudempia puettavia laitteita, kuten EKG-laastareita, älykelloja ja -rannekkeita. Laitteet ovat rakenteeltaan kevyitä ja kompakteja, eikä niiden käyttöön tarvita erillisiä johtoja tai monimutkaista laitteistoa. Puettavat langattomat EKG-laitteet koostuvat elektrodeista, signaalin vahvistus- ja suodatusyksiköstä, tiedonkeruusta sekä digitaalisesta signaalinkäsittelystä. Mittaustiedot siirretään langattomasti esimerkiksi Bluetooth- tai WiFi-yhteyden kautta mobiililaitteeseen tai pilvipalveluun. Anturityypistä riippumatta järjestelmä rekisteröi sydämen sähköisen toiminnan, käsittelee signaalin ja esittää tulokset. [17], [4] Esimerkiksi älykello Apple Watch mittaa yksittäisen EKG-signaalin kahden elektrodin avulla. Toinen elektrodi sijaitsee kellon takaosassa ja toinen digitaalisessa kruunussa. Kun käyttäjä asettaa sormensa kruunulle, laite mittaa käsien välisen jännite-eron. [18]

Tällaisia laitteita voidaan hyödyntää sydämen rytmihäiriöiden seurannassa, joita käsitellään tarkemmin seuraavassa luvussa.

2.4 Lasten sydämen rytmihäiriöt

Kun sydän on sairas tai fyysiset olosuhteet muuttuvat, sydämen sähköinen toiminta voi häiriintyä, mikä saattaa johtaa rytmihäiriöihin ja muutoksiin sydämen supistuvuudessa. Rytmihäiriö on yleisnimitys sydämen tahdin ja rytmin poikkeavuuksille, jotka voivat ilmetä sydämen epätavallisena nopeutena (takykardia), hidastumisena (bradykardia) tai epäsäännöllisyytenä. Nopeat rytmihäiriöt aiheuttavat usein voimakasta sydämen tykytyksen tunnetta ja muljahtelua. Oireina voi esiintyä hengenahdistusta, rintakipua ja ahdistuneisuutta. Hitaat rytmihäiriöt eivät sen sijaan välttämättä aiheuta tykytyksen tunnetta, vaan ne ilmenevät useammin yleisoireina, kuten uupumuksena, huimauksena ja suorituskyvyn laskuna. [3], [19] Lisäksi rytmihäiriöt voivat esiintyä yksittäisten lyöntien väliin jäämisinä tai lisälyönteinä sekä rytmihäiriöt voivat olla oireettomia. [2], [19]. Synnynnäiset sydänviat, sydänlihassai-

raudet, infektiot, kuume, lääkkeet, liikunta sekä voimakkaat tunteet voivat toimia altistavina tekijöinä.[20], [21]

Rytmihäiriötä on lukuisia erilaisia ja niiden kliininen merkitys vaihtelee hyvänlaatuisista löydöksistä henkeä uhkaaviin tiloihin. Potilaan oirekuva ja kardiologin anamneesi antavat usein viitteitä rytmihäiriön luonteesta, mutta varma diagnoosi edellyttää rytmihäiriökohtauksen rekisteröintiä EKG-tutkimuksella.[19]

Lasten EKG:n tulkintaa vaikeuttaa se, että sydämen sähköinen toiminta muuttuu iän ja kasvun myötä [14]. Normaaliin syketaajuuteen vaikuttavat useat tekijät, joista ikä on merkittävämpiä. Esimerkiksi vauvojen syke on tyypillisesti 100–150 lyöntiä minuutissa, kun taas noin 12-vuotiailla se on 55–85 lyöntiä minuutissa, eli ero voi olla lähes 100 lyöntiä minuutissa. [21] Lasten EKG alkaa muistuttaa rakenteellisesti aikuisen EKG:tä noin kolmen vuoden iässä ja syke tasaantuu aikuisen tasolle noin kymmenen vuoden iässä [14]. Mikäli pienen lapsen syketaajuus ylittää 220/min tai teini-ikäisen leposyke on yli 100/min, tulee epäillä rytmihäiriötä ja ohjata lapsi jatkotutkimuksiin [14].

Eteisperäiset ja eteis-kammiorajan alueelta lähtöisin olevat nopearytmiset rytmihäiriöt ryhmitellään supraventrikulaarisiksi takykardioiksi (SVT). SVT on yksi yleisimmistä lasten rytmihäiriöistä, joka usein vaatii hoitoa. Vastakohtana supraventrikulaarisille rytmihäiriöille ovat kammioperäiset rytmihäiriöt, kuten kammiotakykardia (VT) ja kammiovärinä, jotka ovat harvinaisia lapsilla, mutta liittyvät usein taustalla olevaan sydänsairauteen ja voivat olla henkeä uhkaavia. [19], [20]

Taulukossa 2.1 on listattuna lasten mahdollisia rytmihäiriöitä. Taulukko koottu lähteistä: [2], [9], [20], [21].

Taulukko 2.1: Lasten rytmihäiriöt

Luokka	Rytmihäiriö	Kuvaus
Yleiset, usein ei vaadi hoitoa	PAC	Ennenaikainen eteissupistuminen. Yleinen, useimmiten vaaraton. Ei vaadi hoitoa.
	PVC	Ennenaikainen kammiosupistuminen. Yleinen, usein oireeton ja vaaraton. Ei vaadi hoitoa.
	Sinustakykardia	Nopea syke, jota pidetään normaalina. Esiintyy usein kuumeen, jännityksen ja liikunnan yhteydessä. Ei vaadi hoitoa.
Yleiset, usein vaatii hoitoa	Supraventrikulaarinen takykardia (SVT)	Eteisperäinen nopealyöntisyyskohtaus. Voi ilmetä äkillisesti kohtauksena tai pitkittyneenä, jolloin voi johtaa sydämen vajaatoimintaan. Vaatii usein hoitoa.
Harvinaiset	Kammiotakykardia (VT)	Kammioperäinen nopealyöntisyyskohtaus. Hengenvaarallinen, mutta harvinainen lapsilla. Vaatii hoitoa.
	Sairas sinusoireyhtymä (SSS)	Sinussolmukkeen toimintahäiriö, joka aiheuttaa hitaan tai epäsäännöllisen sykkeen. Voi esiintyä lapsilla, joille on tehty avosydänleikkaus. Hoidetaan oireiden mukaan.
Synnynnäiset / perinnölliset	Wolff–Parkinson–White-oireyhtymä (WPW)	Synnynnäinen ylimääräinen sähköinen yhteys eteisten ja kammioiden välillä. Ei varsinainen rytmihäiriö, mutta altistaa SVT:lle. Vaatii hoitoa.
	Pitkä QT -oireyhtymä	Perinnöllinen sydänsairaus, jossa sähköjärjestelmän latautuminen kestää liian kauan. Sydän ei pysty pumppaamaan verta tehokkaasti. Ei varsinainen rytmihäiriö, mutta hengenvaarallisia rytmihäiriökohtauksia aiheuttava sairaus. Vaatii hoitoa.

Seuraavassa luvussa perehdytään tutkimusaineistoon, jossa tarkastellaan puettavien EKG-laitteiden käytettävyyttä lasten rytmihäiriöiden seurannassa.

3 Puettavien EKG-laitteiden käyttö lasten rytmihäiriöiden seurannassa

Sydämen rytmihäiriöiden varhainen tunnistaminen lapsilla on kliinisesti merkittävää, koska rytmihäiriöiden oirekuva on usein epäspesifi ja ajoittainen. Erityisesti pienen lapsen on usein vaikea sanallistaa tunteuksiaan tarkasti, jolloin rytmihäiriöihin viittaavat oireet voivat näyttäytyä epämääräisesti ärtyneisyytenä, levottomuutena tai muuna tilannesidonnaisena reagoitina.

Viime vuosina puettavat EKG-laitteet ovat yleistyneet [22]. Sekä kuluttajille suunnattujen puettavien EKG-laitteiden, että kliiniseen käyttöön tarkoitettujen ambulatooristen EKG-antureiden määrä ja tekninen kyvykkyys ovat kasvaneet nopeasti. Näiden laitteiden avulla on mahdollista seurata sydämen sähköistä toimintaa pitkillä aikaväleillä arjen ympäristöissä, jolloin rytmihäiriöiden ilmeneminen tallentuu todennäköisemmin. Pidempiaikainen seuranta voi tarjota tietoa hoitopäätösten tueksi, sekä auttaa kohdentamaan myöhemmät tarkemmat diagnostiset tutkimukset oikeaan aikaan ja tilanteeseen. [22][23]

Tulevissa luvuissa tarkastellaan, millaisia mahdollisuuksia puettavat EKG-laitteet tuovat lasten rytmihäiriöiden pitkäaikaisseurantaan sekä millaisia rajoitteita mahdollisesti ilmeni. Lisäksi kuvataan, miten perinteiset EKG-menetelmät eroavat uudemmissa puettavista EKG-laitteista.

3.1 Älykellot osana lasten pitkäaikaisseurantaa

Ambulatorista EKG-seurantaa hyödynnetään rytmihäiriötyypin ja kuormituksen arviointiin [24]. Pitkäkestoinen seuranta toteutetaan AECG-monitoreilla (engl. ambulatory electrocardiogram monitors), joita käsiteltiin tarkemmin luvussa 2.3. [24]

Älykellolla voidaan tallentaa yhden kanavan EKG-signaali. Tästä signaalista on mahdollista saada kliinisesti merkittävää informaatiota, kuten sydämen syke, rytmi ja johtumisen ominaisuudet. Älykellon EKG tallennetaan pääasiassa vain käyttäjän itse käynnistämänä. [23] Älykellot eivät ole varsinaisesti AECG-monitoreita, koska ne on suunniteltu ensisijaisesti kuluttajalaitteiksi [17]. Applen käyttöehtojen mukaan suurin osan terveystmittauksista on tarkoitettu vain hyvinvoinnin seurantaan eikä lääkkinnälliseen käyttöön [25]. Apple Watchin EKG-aplikaatio on kuitenkin saanut FDA:lta (Food and Drug Administration) luokan II lääkkinnällisen laitteen luokituksen [26].

Zahedivash ja muut [27] suorittivat yhden keskuksen sisäisen analyysin lasten sydämen sähkötallenteista. He [27] listasivat lasten rytmihäiriödiagnostiikassa käytettyjä laitteita, kuten tapahtuma-aktivoitavia monitoreita ja Holter-monitoreita. Heidän [27] mukaansa näiden laitteiden seuranta-aika oli usein liian lyhyt ja käyttöä rajoittivat ihoärsytys, lyhyempi siedettävyyys sekä oireiden satunnaisuus. [27]

Zahedivash ja muut [27] analysoivat 145 Apple Watchin sähköistä tietuetta. Nämä eivät olleet yksilöllisiä potilaita, vaan dokumentoituja tapahtumia. Näiden merkintöjen joukosta tunnistettiin 41 potilasta, jotka täyttivät tutkimuksen kriteerit: Apple Watch -havainto ja myöhemmin diagnosoitu rytmihäiriö. Älykellon rytmihäiriöiden havaitseminen perustui kahteen mekanismiin: potilaan itse aktivoimiin EKG-tallenteisiin ja älykellon automaattisiin korkean sykkeen ilmoituksiin. Tutkimuksen 41 potilaasta kaikilla todettiin rytmihäiriö, mutta Zahedivashin ja muiden [27] mukaan 29 potilaalle tämä oli täysin uusi löydös, joka paljastui Apple Watchin hälytyksen ja siitä seuranneiden jatkotutkimusten myötä. Lopuilla 12 potilaalla

oli jo ennestään tunnettu rytmihäiriö ja Apple Watch ainoastaan dokumentoi tiedetyn häiriön ja sen uusiutumisen. Lisäksi Zahedivashin ja muut [27] raportoivat, että poisrajatuista tietueista suurin osa (73/104) potilasta seurasi sykkeen muutoksia Apple Watchilla omaehtoisesti. Heistä 18 hakeutui myöhemmin hoitoon laitteen löydösten perusteella, mutta heillä ei kuitenkaan todettu rytmihäiriötä. [27]

Tutkimusryhmä [27] raportoi, että älykellon tuottamat EKG-löydökset nopeuttivat kliinistä työtä tarjoamalla objektiivista näyttöä potilailla, joille olisi muutoin tehty muita ambulatoarisia seurantatutkimuksia. Zahedivashin ja muiden [27] mukaan Apple Watchin rytmihäiriöalgoritmi on kehitetty aikuisväestön sykealueille ja rytmihäiriöprofiileille. Apple Watch pystyi siis tallentamaan rytmihäiriötapahtumia, mutta sen algoritmi ei luokitellut rytmin tyyppiä. Lopullinen lapsen rytmihäiriödiagnoosi perustui lasten kardiologin tekemään EKG-signaalin tulkintaan. Yleisin havaittu rytmihäiriö oli SVT (36/41). Tutkimuksessa esitettiin tarve lasten pidempiaikaiselle non-invasiiviselle sydämen seurannalle ja älykellot mainittiin potentiaalisena vaihtoehtona. [27]

Älykellojen käyttö on yleistynyt nuorten lasten keskuudessa arvioi Leroux ja muut [28]. He tutkivat vastasyntyneiden ja lasten älykellolla tallennettuja EKG-signaaleja. Tutkimuksessa kartoitettiin Apple Watchin yhden johdon EKG:n tarkkuutta vertaamalla sitä samalla käynnillä otettuun 12-kytkentäiseen EKG:hen, joka toimii kultaisena standardina. Aineistoon kuului 110 lasta, joista 75:llä oli normaali EKG-käyrä entuudestaan ja 35:llä oli todettu kliininen poikkeavuus. Älykellon tallentama EKG oli tulkittavissa 109 tapauksessa 110:stä. Rytmihäiriöiden poikkeavuuksien tunnistamisessa älykellon herkkyyks oli 84 % sekä spesifisyys oli 100 %. Leroux ja muut [28] mukaan tutkimusryhmien välillä ei ollut eroja iässä, pituudessa tai painossa. Apple Watch -mittausten tekeminen tapahtui tutkimuksessa vertailukelpoisissa lähtötilanteissa. Vastasyntyneet sisältyivät tutkimukseen vain teknisen toteutettavuuden arvioimiseksi, eikä tästä ikäryhmästä rekisteröity rytmihäiriötä.

Vanhemmilla lapsilla älykello rekisteröi useimmiten SVT:n, AV-katkoksen ja haarakatkokset (johtumishäiriö Hisin kimpun haaroissa). WPW ja pitkä QT jäivät osalla lapsista havaitsematta. [28]

Apple Watchin EKG:n tarkkuutta tarkasteltiin myös Kobelin ja muiden [29] tutkimuksessa, jossa arvioitiin älykellon EKG ominaisuuden yhdenmukaisuutta 12-kytkentäisen EKG:n kanssa. Tutkimusotannassa osalla potilaista oli synnynnäinen sydänsairaus. Kobelin ja muiden [29] mukaan älykellon yhden kanavan EKG:n ja 12-kytkentäisen EKG:n signaalit vastasivat hyvin toisiaan riippumatta sydämen rakenteellisesta poikkeavuudesta. Kobel ja muut [29] väittävät, että Apple Watchin EKG toimii vain manuaalisena tapahtumamonitorina, sillä sen algoritmi ei soveltunut havaitsemaan rytmihäiriöitä luotettavasti lapsilla. Tämä havainto on sama kuin Zahedivasin ja muiden [27] tutkimuksessa.

Vastasyntyneiden osalta Lerouxin ja muiden [28] tulokset osoittivat, että Apple Watch tuotti tulkittavaa EKG-dataa myös tässä ikäryhmässä. Signaalissa näkyivät ikään liittyvät fysiologiset piirteet kuten nopea syke. Oikean akselin poikkeama, joka kertoo oikean ja vasemman kammion lihassarjojen käänteisestä suhteesta syntymän jälkeen, näkyi myös signaalissa. [28] Paech ja muut [30] tutkivat ennenaikaisesti syntyneitä vauvoja eli keskosia (engl. premature), joilla EKG-mittaus suoritettiin Apple Watchilla. Tutkimus toteutettiin 50 keskosvauvalla. EKG tallennettiin kahdesta sijainnista: ranteesta ja olkapäästä. Mittaus suoritettiin siten, että Apple Watch kiinnitettiin ranteeseen tai olkapäähän ja vastakkaisen käden sormi asetettiin kellon kruunulle. Tämä asettelu tuotti Einthoven I -johtoa vastaavan yhden kanavan EKG-signaalin. Paech ja muut [30] arvioivat ranteesta tallennetun EKG:n olleen luotettavampi, sillä se aiheutti signaaliin vähemmän artefakteja. Ranteesta mitatun datan tulkittavuus oli 100 % ja olkapäästä otetun 96 %. Paech ja muut [30] havaitsivat, ettei laitteen algoritmi tunnistanut keskosille tyypillistä yli 120 lyönnin leposykettä normaaliksi. Tästä syystä Apple Watchin automaattinen rytmiluokitus

epäonnistui keskosilla ja EKG luokiteltiin joko epävarmaksi tai takykardiaksi. Paec-hin ja muiden [30] mukaan Apple Watch voi tarjota lääkäreille työkalun, jonka avulla he voivat lähettää EKG:n lasten kardiologeille tulkittavaksi.

Samanaikaisesti tutkimusasetelmaa on hyödynnetty myös muiden älykellojen EKG-ominaisuuksien arviointiin. Ernstsson ja muut [31] validoivat älykello Withings ScanWatchin EKG-intervallien tarkkuutta lapsilla. Älykellon EKG ja 12-kytkentäinen EKG tallennettiin samanaikaisesti samalta potilaalta. Withings ScanWatchin EKG-signaali ja 12-kytkentäisen EKG:n yhteneväisyys ICC (engl. intraclass correlation coefficient) oli erinomainen sykkeelle (ICC 0,97) ja hyvä PR- ja QT-intervallien osalta. Yhteneväisyys oli heikkoa QRS:n ja QTc-välien osalta. Ernstsson tutkimusryhmineen [31] raportoivat lisäksi, että yli 6-vuotiaat pystyvät suorittamaan EKG-mittauksen itsenäisesti vähäisellä ohjauksella.

Tutkimuksissa tuodaan esiin, että tutkimusnäyttö kuluttajapohjaisten puettavien EKG-laitteiden käytöstä lapsilla on toistaiseksi vähäistä verrattuna aikuisten selvästi laajempaan tutkimusnäyttöön. [27], [28], [29], [30], [31]

3.2 EKG-laastarit osana lasten pitkäaikaissuranta-

taa

EKG-laastareilla (engl. ECG patch) toteutetaan ambulatorista EKG-seuranta arkiympäristöissä ja ne voidaan luokitella AECG-monitoreiksi [32]. EKG-laastarit luokitellaan virallisesti lääkinnällisiksi laitteiksi [17]. Laastari kiinnitetään iholle päiviksi tai viikoiksi, jolloin se tallentaa EKG-signaalia jatkuvasti ilman käyttäjän aktiivista osallistumista [33].

EKG-laastari Zio Patchin diagnostista tuottoa lapsipotilailla tutkivat Bolourchi ja muut [33]. Zio Patch sai FDA:lta hyväksynnän vuonna 2011. Laastari on kooltaan pieni ($123 \times 53 \times 10,7$ mm) ja kevyt (34 g), sekä sen keskellä on liipaisinpainike,

jota potilas voi painaa oireen ilmetessä (Kuva 3.1). Zio Patch kiinnitettiin iholle ja se tallensi yhden kanavan EKG-signaalia, joka myöhemmin analysoitiin FDA:n hyväksymällä Zeus-algoritmillä. Keskimääräinen rekisteröintiaika oli noin kahdeksan vuorokautta, mutta 34,5 % potilaista laite pysyi käytössä 10–14 vuorokautta. Zio Patch havaitsi rytmihäiriöitä 390 potilaalla, joista SVT:tä ilmeni 227 lapsella ja VT:tä 122 lapsella. Tutkimuksessa sekä SVT että VT takykardiat luokiteltiin jaksoson pituuden perusteella. Alle kahdeksan peräkkäisen lyönnin episodit määritettiin lyhyiksi, kun taas vähintään kahdeksan lyönnin mittaiset katsottiin pitkittyneiksi takykardiajakoiksi. Luvut sisälsivät sekä lyhyet että pitkittyneet jaksot.

Bolourchi ja muut [33] tarkistivat laastarien raportit ja totesivat 97,4 %:n olevan yhdenmukaisia heidän omien arvioidensa kanssa. Bolourchin ja muiden [33] mukaan 44,1 % havaituista rytmihäiriöistä ilmeni vasta yli 48 tunnin kuluttua seurannan aloittamisesta. Tutkimuksessa 79 % kaikista 3 209 lapsesta painoi laastarin liipaisinta koetun oireen hetkellä, mutta vain 3,9 % näistä painalluksista osoittautui todellisiksi rytmihäiriöiksi. Toisaalta jatkuva tallennus tuotti 8,3 % potilaista rytmihäiriödiagnoosin, vaikka potilaat eivät olleet kokeneet tai raportoineet oireitaan.

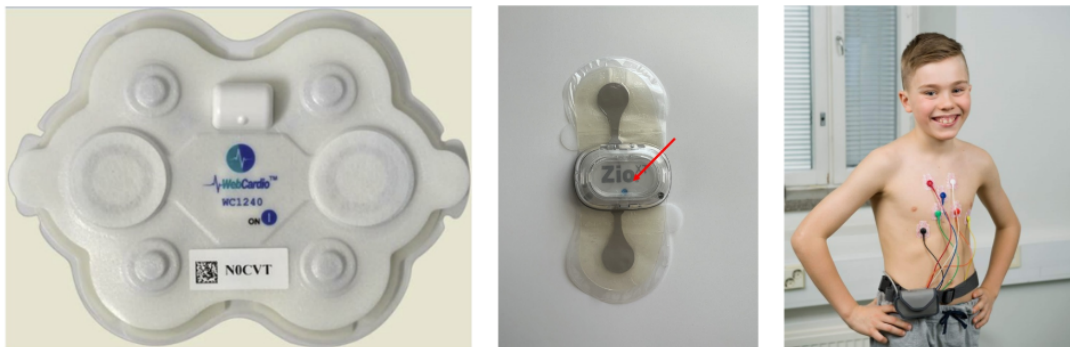
Bolourchin ja muiden [33] mukaan kustannusten vertailu eri monitorointilaitteiden välillä oli haastavaa, koska ei ollut tietoa siitä, kuinka monta käyttökertaa kutakin laitetta tarvittiin diagnoosin tekemiseen.

Zio Patchin käyttöä lapsipotilailla tutkivat myös Pradhan ja muut [32]. Tutkimus toteutettiin kahdessa erillisessä potilasryhmässä siten, että osa lapsista sai Zio Patchin ja osa Holter-monitorin (Kuva 3.1). Heidän [32] tutkimuksessaan laastarin seurannan kesto jäi selvästi lyhyemmäksi verrattuna Bolourchin ja muiden [33] tutkimukseen. Yhteensä 406 Zio Patchia määrättiin 363 potilaalle, mikä tarkoittaa, että osa lapsista joutui vaihtamaan laastaria tutkimusjakson aikana. Pradhan ja muut [32] osoittivat, että laastariseurannan keston mediaani pidentyi merkittävästi lapsen iän kasvun myötä. Heidän [32] mukaansa 363 potilaan joukosta 42 potilaalla

havaittiin Zio Patchilla rytmihäiriöitä, joista 35 oli SVT:tä ja 7 oli VT:tä. Näistä ensimmäiset Zio Patchilla havaitut rytmihäiriöt ilmenivät alle 24 tunnin seurannan aikana 42 % potilaista, 24-71 tunnin aikana 24 % ja yli 72 tunnin aikana 33 %. Pradhanin ja muiden [32] mukaan Zio Patchia ja Holter-monitoria käyttäneissä tutkimusryhmissä mediaani-ikä erosi merkittävästi.

Myös COVID-19-pandemian aikana EKG-laastareita hyödynnettiin lasten etämonitoroinnissa. Khan ja muut [34] mukaan kotiin postitetun ja potilaan itse kiinnittämän Zio Patchin signaalin laatu oli yhtä hyvä kuin klinikalla asetetun laastarin. Häiriöisen signaalin osuus tallenteesta oli klinikalla asetetussa laastarissa 7,1 % ja kotona asetetussa 8,3 %. [34]

Krishna ja muut [35] tutkivat tapausarjaa kahdesta vastasyntyneestä vauvasta, joilla oli tunnettu rytmihäiriö. Vauvoille oli kiinnitetty iholle liimattava WebCardio EKG-laastari (Kuva 3.1). Molemmilla vastasyntyneillä tallennus onnistui 72–92 tunnin ajan ja laastarin EKG-signaali oli hyvälaatuista. Krishna ja muut [35] tutkivat laastarin voimakkaan liiman soveltumista vastasyntyneen herkästi vaurioituvalla iholle. Tuloksissa liima ei aiheuttanut reaktiota. [35]



Kuva 3.1: Puettavat EKG-laitteet rinnakkain. Vasemmalla WebCardio EKG-laastari. Keskellä Zio Patch EKG-laastari, jossa nuoli osoittaa liipaisinpainiketta. Oikealla esitetty Holter-monitorointikonaisuus lapsen päällä. Kuvat koottu lähteistä: [24],[34],[36].

3.3 Puettavien EKG-laitteiden ja perinteisten tutkimusmenetelmien vertailu

Lasten rytmihäiriöiden perinteisissä ambulatorisissa menetelmissä on rajoitteita. Standardimenetelmä on yhä 24–48 tunnin Holter-monitorointi, mutta rajoitetun seuranta-ajan vuoksi se ei ole aina paras vaihtoehto satunnaisesti esiintyvien tai harvinaisten rytmihäiriöiden seurantaan. Lisäksi rintakehään kiinnitettävät johdot voivat olla hankalia käytössä. Tapahtuma-aktivoituvat monitorit taas edellyttävät kognitiivista kapasiteettia painaa liipaisinpainiketta ja potilaiden hoitomyöntyvyys on usein haasteellista lapsiväestössä. Tämän vuoksi tapahtuma-aktivoituvat monitorit eivät ole keskeisessä roolissa lasten pitkäaikaisessa rytmihäiriöseurannassa. [33], [37] Myöskään 12-kytkentäinen EKG ei sovellu oireiden aikana spontaanisti tehtävään rekisteröintiin, koska menetelmä vaatii asianmukaisen laitteiston ja henkilökunnan. [28].

Pradhanin ja muiden [32] tutkimuksessa vertailtiin Holter-monitorin ja Zio Patchin eroja lasten rytmihäiriöiden havaitsemisessa. Holter-monitoria käyttävää potilasryhmää seurattiin 24 tunnin ajan, kun taas Zio Patchia käyttävä ryhmä piti laastaria 5,5 päivää. Ensimmäisen vuorokauden aikana Zio Patch rekisteröi 19 rytmihäiriötä ja Holter-monitori 45 rytmihäiriötä. Zio Patchilla 57 % eli 26 rytmihäiriötä ilmaantui vasta 24 tunnin jälkeen ja merkittävä osa vaati yli 3 päivän jatkuvaa seurantaa rytmihäiriön dokumentoimiseksi. Zio Patchin keskimääräinen käyttöaika oli 130,7 tuntia. [32]

Luvussa 3.2 käsitelty Bolourchin ja muiden [33] vuoden 2015 tutkimus sai jatkoa vertailevan tutkimuksen muodossa vuonna 2020. Tutkimuksessa Bolourchi ja muut [37] vertasivat Zio Patchia Holter-monitoriin. Tutkimusasetelmassa molempia laitteita pidettiin potilaan päällä yhtä aikaa 48 tuntia. Uudempi tutkimus osoitti, että Zio Patch rekisteröi seurannan aikana 30 rytmihäiriötä ja Holter-monitori 25 ryt-

mihäiriötä. Laitteet olivat diagnostiselta tasoltaan vähintään yhtä hyviä. Signaalin laatu oli Zio Patchilla parempi, sillä tallenteesta vain 2,8 % oli artefaktia, kun Holterissa artefaktia oli 5,6 %. Tutkimuksen keskeisin havainto koski lasten käyttökokemusta. 75 % piti Zio Patchia parempana vaihtoehtona kuin Holteria, mikä johtui johtojen puuttumisesta sekä mahdollisuudesta käydä suihkussa. [37]

Hitt ja muut [38] tekivät analyysin yhden keskuksen kahden vuoden mittaisesta siirtymästä, jolloin Holter-monitorit korvattiin Zio Patcheilla. Tutkimuksessa ei ollut yhtä standardoitua seurantajaksoa, koska kyseessä oli vertailu kahden eri ajanjakson välillä. Tutkimusryhmä analysoi yhteensä 483 EKG-seurantaa, joista 143 kappaletta oli Holter-monitorilla toteutettuja seurantoja ja 340 kappaletta oli Zio Patchilla. Analyysin ydin oli kliininen vaikutus hoidonkulussa. Hitt ja muut [38] eivät arvioineet rytmihäiriöiden lukumääriä, vaan keskittyivät siihen, kuinka moni löydös johti muutokseen potilaan hoidossa. Potilasotannassa oli terveitä sekä sydänsairautta sairastavia lapsia, ja kliininen vaikutus tarkoitti näissä ryhmissä eri asioita. Sydänsairailta se saattoi olla uuden lääkkeen aloitus tai toimenpide, kun taas terveillä se tarkoitti yleensä lisäseurantaa. Kummassakin ryhmässä monitorointi saattoi myös mahdollistaa kotiuttamisen, jos merkittävää löydöstä ei havaittu. Tutkimusryhmän [38] mukaan Zio Patch lisäsi merkittävästi todennäköisyyttä, että lapsi voitiin kotiuttaa kardiologisesta jatkoseurannasta. Zio Patchin vesitiiveys ja parempi puettavuus mahdollisti paremman rekisteröinnin arjessa. Pidempi ja katkeamaton seurantajakso mahdollisti useiden oirejaksojen tallentamisen ja auttoi osoittamaan niiden ei-sydänperäisen luonteen. Tämä helpotti kardiologin päätöstä lopettaa seuranta. Ennen Zio Patchin käyttöönottoa ambulatoorinen seuranta kohdistui pääosin lapsiin, joilla oli aiemmin todettu rytmihäiriö. Käyttöönoton jälkeen laastareita määrättiin useammin potilaiden raportoitujen oireiden perusteella. Zio Patchilla noin 47 % lapsista pystyttiin kotiuttamaan seurannasta, kun Holterin kohdalla vastaava osuus oli noin 37 %:a. [37], [38]

Perinteiset Holter-monitorit soveltuivat huonosti vastasyntyneille. Krishnan ja muiden [35] mukaan Holter-monitorit ovat usein pienille lapsille suhteellisen kookkaita ja tarjoavat vain lyhyen EKG-rekisteröintiajan. Vanhemmatkin imeväiset ja lapset saattavat vierastaa johtoja ja näkyvää laitekokonaisuutta. [35]

Älykellot mahdollistivat rytmihäiriöiden seurannan sairaalaympäristön ulkopuolella [27]. Leroux ja muut [28] osoittivat, että älykellon yksijohtimiset tallenteet olivat riittävän laadukkaita diagnostiikkaan suurimmassa osassa tapauksista. Zahedivashin ja muiden [27] mukaan EKG voidaan tallentaa välittömästi oireen aikana, kun älykello on käyttäjän mukana. Näin tallenne ei ole sidottu tutkimuspaikkaan, vaan se voidaan ottaa potilaan olinpaikasta riippumatta. Zahedivashin ja muiden [27] tutkimus ei ollut varsinainen laitevertailu, mutta siinä nousi esiin taustahavain- toja. 41 potilaan otannassa 35 potilasta oli käyttänyt myös perinteistä ambulatoris- ta monitoria, joista 10 tapauksessa (29 %) nämä monitorit eivät olleet havainneet rytmihäiriötä, jonka Apple Watch sen sijaan tallensi.

Taulukossa 3.1 on kaikkien aiemmissa luvuissa käsiteltyjen tutkimusten tutki- musasetelmat tiivistettynä.

Taulukko 3.1: Tutkimukset koostettuna

Tutkimus ja julkaisuvuosi	Tutkimus-asetelma	Otanta (n)	Ikäkauma	Laitte	Seuranta-aika	Rytmi-häiriöt
Zahedivash ja muut, 2020	Yhden keskuksen retrospektiivinen analyysi	145	Ka. 13,8 ± 3,2 v	Apple Watch	Vaihteleva	36 SVT ja 3 VT
Ernstsson ja muut, 2023	Prospektiivinen vertailututkimus	100	5–17 v, ka. 12,9 v	Withings ScanWatch	Tallenne, 30 s	EKG-parametrien validointi
Leroux ja muut, 2023	Prospektiivinen, yhden keskuksen tutkimus	110	1 vko – 16 v	Apple Watch	Tallenne, 30 s	7 AV-kaatos ja 5 SVT
Kobel ja muut, 2023	Prospektiivinen vertailu	215	0–16 v	Apple Watch	Tallenne, 10 s	EKG-parametrien vertailu
Paech ja muut, 2022	Prospektiivinen tutkimus	50	Keskoset, 23–36 raskausviikkoa	Apple Watch	Tallenne, 30 s	EKG-parametrien vertailu
Bolourchi ja muut, 2015	Poikkileikkaus, kansallinen rekisteritutkimus	3209	1 kk – 17 v	Zio XT Patch	~7,8 vrk	227 SVT ja 122 VT
Pradhan ja muut, 2019	Retrospektiivinen yhden keskuksen vertailututkimus	406 (Zio) ja 499 (Holter)	<18 v	Zio XT Patch ja Holter	Zio 14 vrk; Holter 24 h	ZIO: 35 SVT ja 7 VT Holter: 34 SVT ja 11 VT
Khan ja muut, 2025	Retrospektiivinen yhden keskuksen tutkimus	284	0–21 v	Zio XT Patch	~4–5 vrk	Tutkimus keskittyi laatuun
Krishna ja muut, 2021	Tapausselostus	2	Vastasyntyneet, 25 vrk ja 39 vk raskausikä	WebCardio Patch	72–92 h	Kahden tapauksen sarja
Bolourchi ja muut, 2020	Prospektiivinen rinnakkaiskoe	200	0–22 v	Zio XT Patch ja Holter	48 h	10 SVT ja 7 VT
Hitt ja muut, 2021	Retrospektiivinen kohorttitutkimus	483	0–18 v	Zio Patch ja Holter	Zio 14 vrk; Holter 24 h	Tutkimus keskittyi kliiniseen vaikutukseen

4 Pohdinta

Yleisesti voidaan todeta, että on olemassa vähän tutkimusaineistoa, joissa verrataan AECG-laitteita lapsiväestössä [32]. Tässä tutkielmassa havaittiin, että laastari- ja älykellopohjaiset menetelmät tarjoavat uusia mahdollisuuksia lasten rytmihäiriöiden pitkäaikaiseurantaan. Puettavien laitteiden käyttöä ja rytmihäiriöiden seurantaan tutkittiin laajalla ikäjakaumalla vastasyntyneistä aina nuoriin aikuisiin asti [28], [29], [32], [33], [34], [37], [38]. Tutkimus huomioi terveet sekä rytmihäiriödiagnoosin saaneet lapset otannassa [27], [28], [29], [33], [37], [38]. Eri ikäryhmien ja terveydentilojen huomioiminen tekee tutkimusten tuloksista luotettavia ja yleistettäviä lapsiväestössä. Tutkimustulosten luotettavuutta lisäsi myös samansuuntaiset havainnot niin prospektiivisessä [27] kuin retrospektiivisessä [31] asetelmassa. Tämä osoittaa tulosten riippumattomuuden tutkimusmenetelmästä. Tutkimuksien perusteella sekä älykellot että EKG-laastarit tunnistivat useimmiten supraventrikulaarisen takykardian (SVT), joka oli selvästi yleisin merkityksellinen rytmihäiriötyyppi lapsilla.

4.1 Älykellot lasten rytmihäiriöiden seurannan tukena

Älykellot osoittautuivat teknisesti kykeneviksi tallentamaan laadukasta EKG-signaalia lapsilla [27], [28], [29], [30], [31]. Tutkimukset osoittavat, että älykellojen

tuottama yksikytkentäinen EKG-signaali vastaa laadultaan 12-kytkentäisen EKG:n raajakytkentä I -kytkentää [29], [30]. Zahedivashin ja muiden [27] tutkimuksessa todettiin, että Apple Watch pystyi tallentamaan rytmihäiriöitä, jotka johtivat 71 % lapsipotilaista rytmihäiriödiagnosiin. Lisäksi älykello tallensi rytmihäiriöitä tilanteissa, joissa perinteiset monitorit eivät [27] rytmihäiriöitä havainneet. Rytmihäiriötyypin tunnistaminen älykellon EKG-signaalista edellyttää yhä lasten kardiologin manuaalista tulkintaa. Älykellojen diagnostinen tuotto helpottaa silti lääkärin työtä ja saattaa siten vähentää tarvetta jatkotutkimuksille. Tämä lisäisi terveydenhuollon resurssitehokkuutta.

EKG-signaali on mitattavissa myös vastasyntyneiltä ja ennenaikaisesti syntyneiltä [28], [30]. Älykello soveltuu kooltaan paremmin pienten potilaiden käyttöön kuin kookkaampi Holter-monitori, mutta kuten luvussa 3.1 todettiin, nykyiset algoritmit tunnistavat pienten lasten sykkeet usein virheellisesti takykardiaksi. Tällä hetkellä Applen iECG-toiminto on FDA-hyväksytty vain 22-vuotta täyttäneillä käyttäjillä [29]. Olisi perusteltua kehittää pienikokoinen älykello lapsille, jonka algoritmi olisi ohjelmoitu korkeammille sykkeille. Tämä vähentäisi todennäköisesti Zahedivashin ja muiden [27] raportoimia vääriä positiivisia ilmoituksia, jotka johtivat tarpeettomiin kardiologin konsultaatioihin. Lisäksi virheelliset positiiviset ilmoitukset aiheuttavat myös tarpeetonta huolta potilaille ja perheille.

Älykelloilla on kuitenkin merkittävä potentiaali lasten pitkäaikaisten rytmihäiriöiden seurannassa, mikäli laitteiden kokoa ja algoritmeja kohdennetaan paremmin vastaamaan lapsiväestön fysiologiaa. Älykellot ovat yleistymässä yhä nuoremmilla lapsilla [28] ja yli 6-vuotiaat pystyvät suorittamaan EKG-mittauksen itsenäisesti vähäisellä ohjauksella [31]. Älykellot tarjoavat potentiaalisen, helppokäyttöisen ja skaalautuvan ratkaisun lasten pitkäaikaiseen rytmihäiriöseurantaan.

4.2 EKG-laastarit varteenotettava vaihtoehto lasten pitkäaikaisseurantaan

Vaikka 24 tunnin Holter-monitorointia on pidetty kultaisena standardina lasten rytmihäiriöiden seurannassa [32], tietyt käytännön ominaisuudet rajoittavat sen käyttöä joillakin lapsipotilailla. Zio Patch ja Holter-monitori havaitsivat rytmihäiriöitä määrällisesti saman verran [32], mutta tutkimuksien perusteella merkittävä osa Zio Patchilla havaituista rytmihäiriöistä ilmeni vasta yli vuorokauden seurannan kuluttua [32], [33]. Bolourchin ja muiden [33] tutkimuksen mukaan 390 havaitusta rytmihäiriöstä, jopa 44,1 % dokumentoitui vasta 48 tunnin seurannan jälkeen. Pradhan ja muut [32] mukaan merkittävä osa Zio Patchilla havaituista rytmihäiriöistä edellytti yli 3 päivän jatkuvaa seurantaa. Tämä osoittaa, että lyhytkestoinen Holter-monitorointi ei useinkaan riitä harvemmin esiintyvien rytmihäiriöiden havaitsemiseen. Pidempää aikoja kestävä laastariseuranta on tarpeen näitä rytmihäiriöitä havaittaessa.

Zio Patchilla ja Holter-monitorilla oli samankaltaiset tunnistusasteet [32]. Tämä käytännössä tarkoitti sitä, että ne olivat yhtä tehokkaita siinä, miten ne pystyivät löytämään rytmihäiriön, joka johti diagnoosiin. Tämä aiheuttaa hämmennystä, sillä 24 tunnin kohdalla Zio Patchilla havaittuja rytmihäiriöitä oli 19 kappaletta ja Holter-monitorilla 45 kappaletta. Tutkimuksen tulosten tulkinnassa isoin kysymys on se, onko rytmihäiriöiden tunnistamisen ero laitteistossa vai kohderyhmissä. Pradhanin ja muiden [32] tutkimuksessa havaitaan ristiriitainen asetelma vertailussa. Laitteistoja verrataan kahdella eri ryhmällä, jolloin samoilla potilailla ei tehdä laitteiden välistä vertailua. Tämän lisäksi laitteiden seurantaryhmien mediaani-ikä erosivat merkittävästi toisistaan. Zio Patchia käyttäneiden mediaani-ikä oli 12,7 vuotta ja Holter-monitoria käyttäneiden 4,9 vuotta. Eri ikäryhmillä on luontaisesti erilainen rytmihäiriöiden esiintyvyys ja syyt. Pradhan ja muut [32] väittävät kuitenkin, että

ikäerolla ei ollut suurta merkitystä, sillä löydösten määrä molemmilla monitoreilla olivat samaa luokkaa ja siten tunnistusasteet samankaltaiset. Vaikka Pradhanin ja muiden [32] tutkimuksen vertailuasetelma ei ollut tasavertainen, heidän keskeinen johtopäätöksensä on kuitenkin linjassa uudemman Bolourchin ja muiden [37] tutkimuksen kanssa. Tässä tutkimuksessa [37] tutkimusasetelma oli laitteiston vertailun kannalta tasavertaisempi.

Bolourchin ja muiden [37] tutkimuksessa Zio Patch sekä Holter-monitori asetettiin samanaikaisesti samoille potilaille ja mediaani-iat olivat tasavertaiset. Tutkimusryhmä [37] totesi Zio Patchin ja Holter-monitorin olevan kliinisesti merkittävien rytmihäiriöiden diagnosoinnin suhteen vähintään samanarvoisia. 48 tunnin seuranta-aikana Zio Patchilla havaittiin 30 rytmihäiriötä ja Holter-monitorilla 25 rytmihäiriötä. Zio Patch havaitsi jopa 5 kappaletta sellaisia rytmihäiriötä, joita Holter-monitori ei havainnut. Lisäksi Bolourchin ja muiden [33] vuoden 2015 tutkimuksessa Holter-monitorin artefaktin esiintymisen määrä (1,3 %) oli raportoitu paremmaksi kuin Zio Patchilla (7,4 %) [33]. Uudemmassa vuoden 2020 tutkimuksessa Bolourchi ja muut [37] osoittivat tuloksen kääntyneen päinvastaseksi, jolloin Zio Patchilla havaittiin merkittävästi vähemmän artefaktia (2,8 %) kuin Holter-monitorilla (5,6 %) [37].

Potilaat ja potilaiden vanhemmat suosivat useammin Zio Patchia Holter-monitorin sijaan. Bolourchin ja muiden [37] mukaan 75 % potilaista piti Zio Patchia parempana vaihtoehtona kuin Holter-monitoria. Laastari mahdollisti suihkussa käynnin, myöskään johtoja ei ollut ja lapsilla oli vain yksi tarra kiinnitettynä rintakehälle [37]. Myös Hitt ja muut [38] osoittivat tutkimuksessaan Zio Patchin paremman puettavuuden johtuvan samoista syistä. Tämä mahdollistaa lapsen vapaamman liikkumisen arjessa, jolloin saadaan todenmukaisempaa diagnostista tulosta. Fyysisen rasituksen aikana syke nousee, mikä lisää rytmihäiriöiden todennäköisyyttä. Tämän vuoksi liikuntasuorituksen aikainen seuranta parantaa mahdollisuutta tallentaa poikkeavat rytmit. Zio Patch antaa tässä suhteessa edun Holter-monitoriin nähden,

koska se on langaton, vesitiivis ja kevyt [38],[33]. Koska Bolourchin ja muiden [37] uudempi ja vertailun kannalta tasa-arvoisempi tutkimus päättyi samankaltaisiin johtopäätöksiin, Pradhanin ja muiden [32] tutkimuksen tulokset voidaan katsoa saavan lisävahvistusta tutkimusasetelman puutteista huolimatta.

Molempien tutkimuksien johtopäätökset [32],[37] osoittavat Zio Patchin olevan Holter-monitorille luotettava vaihtoehto lasten rytmihäiriöiden seurannassa. Laitteiden diagnostiikkatasot ovat vähintään samanarvoisia, sillä kliinisesti merkittävien rytmihäiriöiden havaitsemisessa ei havaittu tilastollista eroa kokeen aikana. Zio Patchin keskeinen etu on sen tarjoama pidempi seuranta-aika, mikä on ratkaisevaa harvoin ilmenevien oireiden havaitsemisessa. Lisäksi Zio Patchin puettavuus parantaa potilaan hoitomyöntyvyyttä, joka on lapsipotilailla oleellinen tekijä. Parempi puettavuus ja suihkussa käynti Zio Patchin kanssa mahdollisti paremman käytettävyyden arjessa. Tämä puolestaan tekee datasta todenmukaisemman, sillä laite tallentaa rytmihäiriöt luotettavammin myös fyysisen rasituksen ja liikunnan aikana.

Lasten EKG-laastari seurannan rytmihäiriöiden diagnostisen tuoton todettiin olevan alhaisempi kuin aikuisilla [33]. Aikuisilla tuotto vaihteli 15%: - 86% välillä. Bolourchin ja muiden [33] tutkimuksessa lasten diagnostinen tuotto oli 12,2%. Lisäksi aikuisilla Zio Patch pysyi keskimäärin 11,1 päivää, kun lapsilla pysyvyys oli 7,1 päivää. Bolourchin ja muiden [33] mukaan diagnostinen saanto oli aikuisilla todennäköisesti korkeampi, sillä aikuisväestössä rytmihäiriöiden esiintyvyys lisääntyy iän myötä. Tämä on hyvä havainto, koska esimerkiksi eteisvärinää havaitaan aikuisilla enemmän kuin lapsilla.

Merkittävä muutos artefaktin määrässä kertoo huomattavasta kehityksestä laastariteknologiassa. Bolourchin ja muiden vuosien 2015 [33] ja 2020 [37] tutkimusten välillä oli noin viiden vuoden ero, jonka aikana artefaktin määrä signaalissa kääntyi pääläelleen. Vuoden 2015 tutkimuksessa Holter-monitorin artefaktin esiintyminen oli parempi (1,3 %) kuin Zio Patchilla (7,4 %), mutta uudemmassa 2020 tutki-

muksessa Zio Patchilla havaittiin merkittävästi vähemmän artefaktia (2,8 %) kuin Holter-monitorilla (5,6 %). Tämä havainto viittaa selvästi siihen, että laastaritek-
nologia on kehittynyt huomattavasti lyhyessä ajassa. Kehityksen jatkuessa laastarit
voivat tulevaisuudessa tarjota yhä luotettavamman ja käytännöllisemmän vaihtoeh-
don pitkäaikaiseen EKG-seurantaan.

EKG-laastarin liima-aineen ei todettu aiheuttavan vastasyntyneille rajoitteita
[35]. Mahdollinen ihoärsytys voisi aiheuttaa käyttökatkoksen EKG-signaalin seuran-
nassa. Liima-aineen vaikutusta tulisi silti jatkossa tutkia laajemmalla otannalla, sil-
lä Krishnan ja muiden [35] tutkimus kattoi vain kahden vastasyntyneen potilaan
seurannan.

Eri laitteiden kustannusten vertailu oli vaikeaa Bolourchin ja muiden [33] mu-
kaan. Ei ole suoraa näyttöä siitä, kuinka monta kertaa kutakin laitetta tarvitaan
diagnoosin tekemiseksi. Lisäksi Hitt ja muut [38] mukaan Zio Patchin kanssa tehdyt
tutkimukset ovat kalliimpia kuin perinteiset johdolliset teknologiat. He [38] kuiten-
kin huomauttavat, että Zio Patchin parempi kyky poissulkea rytmihäiriöoireiden
aiheuttajana, mahdollistaa potilaan siirtämisen pois jatkoseurannasta, mikä voi pit-
källä aikavälillä vähentää tarpeettomia kardiologisia tutkimuksia ja keventää ter-
veydenhuollon kuormitusta. EKG-laastareiden kustannustehokkuutta pitäisi tämän
perusteella tutkia jatkossa tarkemmin.

5 Yhteenveto

Tässä tutkielmassa tarkasteltiin puettavien EKG-laitteiden hyödyntämistä lasten sydämen rytmihäiriöiden seurannassa. Lisäksi tarkasteltiin näiden laitteiden tarkkuutta ja luotettavuutta verrattuna perinteisiin EKG-mittausmenetelmiin. Tutkielma käsitteli älykelloja ja EKG-laastareita, sillä niistä löytyi eniten tutkimusartikkeleita. Keskeisin havainto oli, että aihetta käsittelevää tutkimusta on vielä vähän saatavilla.

Saatujen tulosten perusteella puettavat EKG-laitteet tarjoavat lupaavia mahdollisuuksia lasten pitkäaikaiseen rytmihäiriöseurantaan. Tällä hetkellä aihetta koskeva tutkimus keskittyy pääasiassa puettavien EKG-laitteiden tekniseen validointiin, erityisesti mitatun signaalin tarkkuuteen ja luotettavuuteen. Tutkielman perusteella voidaan vastata alussa esitettyihin tutkimuskysymyksiin seuraavasti:

TK1: Miten puettavia EKG-laitteita voidaan hyödyntää lasten sydämen rytmihäiriöiden havaitsemisessa ja seurannassa?

Puettavat EKG-laitteet mahdollistavat pitkäaikaisen rytmihäiriöseurannan lapsilla normaalin arjen olosuhteissa. EKG-laastarit soveltuvat erityisen hyvin pitkäkestoiseen ambulatoriseen seurantaan, sillä ne pystyvät tallentamaan EKG-signaalia useiden päivien jopa viikkojen ajan. Älykellot tuottivat laadukasta yhden kanavan EKG-dataa sekä kouluikäisillä että vastasyntyneillä, mutta niiden käytössä on rajoitteita algoritmeissa ja laitteen istuvuudessa. Älykellot voisivat toimia täydentävinä

itsehavainnointivälineinä kliinisen arvioinnin tueksi, mutta itsenäisiksi diagnostiikan välineiksi ne eivät vielä sovellu.

TK2: Miten puettavien EKG-laitteiden tarkkuus ja käytettävyys eroavat perinteisistä EKG-tutkimusmenetelmistä?

Puettavien laitteiden tarkkuus on tutkimusten perusteella vähintäänkin samalla tasolla kuin perinteisillä menetelmillä. Signaalin laatu oli EKG-laastareilla parempi ja artefaktien määrä pienempi verrattaessa Holter-monitorointiin. Älykelloilla saatu yhden kanavan EKG oli vertailukelpoinen 12-kytkentäisen EKG:n kanssa, mutta yksityiskohtaisempien intervallien mittauksissa esiintyi pieniä eroja. Käytettävyyden osalta puettavat EKG-laitteet ovat merkittävästi mukavampia ja vähemmän rajoitettavia, kuten luvussa neljä esitettiin. EKG-laastareiden etuina ovat langattomuus, keveys, vesitiiviys ja huomaamattomuus. Laastarit mahdollistavat vapaamman liikunnan ja peseytymisen, mikä lisää hoitomyöntyvyyttä lapsiväestössä. Älykellot olivat helppokäyttöisiä, mutta pienemmällä lapsilla mittaukset vaativat aikuisen tukea ja laitteen sopivaa istuvuutta.

EKG-laastareilla pidemmän seuranta-ajan ansiosta havaittiin enemmän satunnaisia rytmihäiriöitä ja se korosti pidemmän pitkäaikaisrekisteröinnin merkitystä. Lisäksi signaalin laatu ja artefaktien määrä olivat kehittyneet huomattavasti viime vuosien aikana. EKG-laastareiden kustannustehokkuuden selvittämiseen tulisi keskittyä tulevaisuudessa.

Lasten fysiologiaan mukautetut algoritmit sekä pienikokoisempi laiterakenne voisivat parantaa älykellon analytiikan tarkkuutta ja vähentää virheellisiä ilmoituksia. Älykello on huomaamaton monitorointimenetelmä ja lapset käyttävät niitä yhä enemmän. Älykellot voisivat toimia työkaluna määrittämättömän sydämen työkykyksen seulonnassa.

Lopulta voidaan todeta, että lasten sydämen rytmihäiriöiden seuranta puettavilla EKG-laitteilla on nouseva ja kehittyvä tutkimusalue. Tutkimusnäyttöä on tois-

taiseksi selvästi vähemmän lapsiväestöstä kuin aikuisväestöstä. Tilanteen voidaan odottaa kehittyvän tulevien tutkimusten myötä.

Lähdeluettelo

- [1] Terveystalo, *Rytmihäiriö – sydämen rytmihäiriön oireet*. <https://www.terveystalo.com/fi/tietopakettit/rytmihairio>. (viitattu 11.11.2025).
- [2] GE Healthcare, *Arrhythmias in Pediatrics: How To Diagnose and Treat Young Patients*, 2022. <https://www.gehealthcare.co.uk/insights/article/arrhythmias-in-pediatrics-how-to-diagnose-and-treat-your-youngest-patients>. (viitattu 3.11.2025).
- [3] Oppiportti Duodecim, *Kardiologia*. <https://www.oppiportti.fi/opk04502>. (viitattu 3.11.2025).
- [4] E. S. Dahiya, A. M. Kalra, A. Lowe ja G. Anand, ”Wearable Technology for Monitoring Electrocardiograms (ECGs) in Adults: A Scoping Review”, *Sensors (Basel, Switzerland)*, vol. 24, nro 4, s. 1318, helmikuu 2024, ISSN: 1424-8220. DOI: 10.3390/s24041318.
- [5] Terveyskylä, *Sydämen rakenne*. <https://www.terveyskyla.fi/sydansairaudet/tietoa/sydamen-rakenne-ja-toiminta/sydamen-rakenne>. (viitattu 3.11.2025).
- [6] ClinicalKey Student, *Electrocardiography Medicine*. <https://www.clinicalkey.com/student/content/book/3-s2.0-B9780323930383000423>. (viitattu 3.11.2025).

- [7] H. S. Team, *Electrical activity of the heart*, syyskuu 2014. <https://heartse.nse.in/electrical-activity-heart/>. (viitattu 26.11.2025).
- [8] Duodecim Terveyskirjasto, *EKG (sydänfilmi)*, lokakuu 2025. <https://www.terveyskirjasto.fi/snk03210>. (viitattu 3.11.2025).
- [9] Y. Sattar ja L. Chhabra, ”Electrocardiogram”, teoksessa *StatPearls*, Treasure Island (FL): StatPearls Publishing, 2025. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK549803/>. (viitattu 3.11.2025).
- [10] A. G. Webb, *Principles of Biomedical Instrumentation* (Cambridge Texts in Biomedical Engineering). Cambridge University Press, 2018, ISBN: 978-1-316-28621-0. DOI: 10.1017/9781316286210.
- [11] ClinicalKey Student, *Mistä EKG:ssä on kyse - EKG on tehty helpoksi*. <https://www.clinicalkey.com/student/content/book/3-s2.0-B9780323937665000117>. (viitattu 11.11.2025).
- [12] P. Kligfield et al., ”Recommendations for the Standardization and Interpretation of the Electrocardiogram”, *Circulation*, vol. 115, nro 10, s. 1306–1324, maaliskuu 2007, Publisher: American Heart Association. DOI: 10.1161/CIRCULATIONAHA.106.180200.
- [13] CardiacDirect, *12-Lead ECG Placement Guide*, helmikuu 2023. <https://www.cardiacdirect.com/12-lead-ecg-placement-guide/>. (viitattu 3.11.2025).
- [14] Oppiportti Duodecim, *EKG*. <https://www.oppoportti.fi/opk04500>. (viitattu 3.11.2025).
- [15] A. Mubarik ja A. M. Iqbal, ”Holter Monitor”, teoksessa *StatPearls*, Treasure Island (FL): StatPearls Publishing, 2025. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK538203/>. (viitattu 11.11.2025).

- [16] P. Zimetbaum ja A. Goldman, ”Ambulatory Arrhythmia Monitoring”, *Circulation*, vol. 122, nro 16, s. 1629–1636, lokakuu 2010. DOI: 10.1161/CIRCULATIONAHA.109.925610.
- [17] American Heart Association, *Cardiac Event Recorder*. <https://www.heart.org/en/health-topics/arrhythmia/symptoms-diagnosis--monitoring-of-arrhythmia/cardiac-event-recorder>. (viitattu 11.11.2025).
- [18] M. Sadrawi et al., ”Arrhythmia Evaluation in Wearable ECG Devices”, *Sensors*, vol. 17, nro 11, s. 2445, marraskuu 2017, ISSN: 1424-8220. DOI: 10.3390/s17112445.
- [19] Sydänliitto, *Sydämen rytmihäiriöt*. <https://sydan.fi/fakta/sydamen-rytmihairiot/>. (viitattu 20.1.2026).
- [20] Cleveland Clinic. ”Arrhythmias in Children: Causes, Symptoms & Management”, <https://my.clevelandclinic.org/health/diseases/14788-arrhythmias-in-children>. (viitattu 3.11.2025).
- [21] S. M. Weinberger ja MD, *Arrhythmia (Abnormal Heartbeat)*. <https://kidshealth.org/en/parents/arrhythmias.html>. (viitattu 3.11.2025).
- [22] C.-M. Liu et al., ”Enhanced detection of cardiac arrhythmias utilizing 14-day continuous ECG patch monitoring”, *International Journal of Cardiology*, vol. 332, s. 78–84, kesäkuu 2021, ISSN: 0167-5273. DOI: 10.1016/j.ijcard.2021.03.015.
- [23] M. Strik et al., ”The use of smartwatch electrocardiogram beyond arrhythmia detection”, *Trends in Cardiovascular Medicine*, vol. 34, nro 3, s. 174–180, huhtikuu 2024, ISSN: 1050-1738. DOI: 10.1016/j.tcm.2022.12.006.
- [24] C. P. Karunadas ja C. Mathew, ”Comparison of arrhythmia detection by conventional Holter and a novel ambulatory ECG system using patch and Android App, over 24 h period”, *Indian Pacing and Electrophysiology Journal*, vol. 20,

- nro 2, s. 49–53, maaliskuu 2020, ISSN: 0972-6292. DOI: 10.1016/j.ipej.2019.12.013.
- [25] Apple, *Apple Watch Series 11*. <https://www.apple.com/apple-watch-series-11/>. (viitattu 1.12.2025).
- [26] U.S. Food and Drug Administration (FDA), *510(k) Premarket Notification*. <https://www.accessdata.fda.gov/scripts/cdrh/cfdocs/cfpmn/pmn.cfm?ID=K201525>. (viitattu 1.12.2025).
- [27] A. Zahedivash et al., ”Utility of smart watches for identifying arrhythmias in children”, *Communications Medicine*, vol. 3, s. 167, joulukuu 2023, ISSN: 2730-664X. DOI: 10.1038/s43856-023-00392-9.
- [28] J. Leroux et al., ”Feasibility and Diagnostic Value of Recording Smartwatch Electrocardiograms in Neonates and Children”, *The Journal of Pediatrics*, vol. 253, 40–45.e1, helmikuu 2023, ISSN: 0022-3476, 1090-123X. DOI: 10.1016/j.jpeds.2022.09.010.
- [29] M. Kobel et al., ”Accuracy of the Apple Watch iECG in Children With and Without Congenital Heart Disease”, *Pediatric Cardiology*, vol. 43, nro 1, s. 191–196, tammikuu 2022, ISSN: 1432-1971. DOI: 10.1007/s00246-021-02715-w.
- [30] C. Paech et al., ”Accuracy of the Apple Watch single-lead ECG recordings in pre-term neonates”, *Cardiology in the Young*, vol. 32, nro 10, s. 1633–1637, lokakuu 2022, ISSN: 1467-1107. DOI: 10.1017/S1047951121004765.
- [31] J. Ernstsson, B. Svensson, P. Liuba ja C. G. Weismann, ”Validation of smartwatch electrocardiogram intervals in children compared to standard 12 lead electrocardiograms”, *European Journal of Pediatrics*, vol. 183, nro 9, s. 3915–3923, syyskuu 2024, ISSN: 1432-1076. DOI: 10.1007/s00431-024-05648-7.

- [32] S. Pradhan, J. A. Robinson, J. K. Shivapour ja C. S. Snyder, "Ambulatory Arrhythmia Detection with ZIO® XT Patch in Pediatric Patients: A Comparison of Devices", *Pediatric Cardiology*, vol. 40, nro 5, s. 921–924, kesäkuu 2019, ISSN: 1432-1971. DOI: 10.1007/s00246-019-02089-0.
- [33] M. Bolourchi ja A. S. Batra, "Diagnostic Yield of Patch Ambulatory Electrocardiogram Monitoring in Children (from a National Registry)", *The American Journal of Cardiology*, vol. 115, nro 5, s. 630–634, maaliskuu 2015, ISSN: 0002-9149. DOI: 10.1016/j.amjcard.2014.12.014.
- [34] M. S. Khan, A. Y. Dawson ja C. Snyder, "Zio® XT Patches in Pediatrics During the COVID-19 Pandemic: Comparisons Between In-Person and Mail-Home Application", *Pediatric Cardiology*, vol. 46, nro 1, s. 159–162, tammikuu 2025, ISSN: 1432-1971. DOI: 10.1007/s00246-023-03354-z.
- [35] M. R. Krishna, U. N. Sennaiyan ja K. Ramanathan, "The utility of patch recorders in neonatal ambulatory electrocardiogram recording", *Indian Pacing and Electrophysiology Journal*, vol. 21, nro 2, s. 128–131, maaliskuu 2021, ISSN: 0972-6292. DOI: 10.1016/j.ipej.2020.12.001.
- [36] Terveyskylä, *Lapsen sydänsairauden tutkimukset ja toimenpiteet*. <https://www.terveyskyla.fi/lastentalo/tietoa-lasten-sairauksista/sydansairaudet-lapsella/lapsen-sydansairauden-tutkimukset-ja-toimenpiteet>. (viitattu 8.12.2025).
- [37] M. Bolourchi, E. S. Silver, D. Muwanga, E. Mendez ja L. Liberman, "Comparison of Holter With Zio Patch Electrocardiography Monitoring in Children", *The American Journal of Cardiology*, vol. 125, nro 5, s. 767–771, maaliskuu 2020, ISSN: 0002-9149. DOI: 10.1016/j.amjcard.2019.11.028.

-
- [38] J. R. Hitt, E. Carter ja J. May, "Patch versus traditional ambulatory ECG monitoring in children", *Progress in Pediatric Cardiology*, vol. 63, s. 101-108, joulukuu 2021, ISSN: 1058-9813. DOI: 10.1016/j.ppedcard.2021.101408.