

Daniel Linjama

AJOSEURANTAJÄRJESTELMÄN TOTEUTUS

Tieto- ja sähkötekniikan tiedekunta
Diplomityö
Toukokuu 2019

TIIVISTELMÄ

Daniel Linjama: Ajoseurantajärjestelmän toteutus
Diplomityö
Tampereen yliopisto
Tietotekniikan DI-tutkinto-ohjelma
Toukokuu 2019

Ajoseurantajärjestelmiä hyödynnetään monenlaisiin tarkoituksiin, kuten ajokilometrien seurantaan verotusta varten tai yrityksen kaluston seurantaan. Ajoseurantajärjestelmien hankinta- ja käyttökustannukset ovat kuitenkin korkeita eikä monissa järjestelmissä ole mahdollisuutta ajoseurantatietojen hyödyntämiseen erillisessä järjestelmässä tai tiedot ovat saatavilla viiveellä. Ajon päättymisen ja seurantatietojen saataville tulon välisen viiveen tulisi olla mahdollisimman pieni, jolloin käyttäjä voi heti ajon päätyttyä hyödyntää seurantatietoja esimerkiksi laskutukseen tai työaikojen kirjaamiseen. Tässä työssä perehdytään ajoseurantajärjestelmien vaihtoehtoihin tekniikoihin ja valmistetaan edullinen ajoseurantajärjestelmä valmiita komponentteja hyödyntäen. Seurantalaittekohtaisissa kustannuksissa pyritään alle 100 euron hankintakustannukseen ja alle 5 euron kuukausittaiseen käyttökustannukseen, mitkä ovat vertailtavia järjestelmiä edullisemmat. Ajoseurantajärjestelmä mahdollistaa ajoneuvojen reaaliaikaisen seurannan ja tietojen hakemisen erillisiin järjestelmiin rajapinnan kautta ilman viivettä.

Ajoseurantajärjestelmä koostuu ajoneuvoihin asennettavista seurantalaitteista ja palvelimesta, johon seurantalaitteiden tiedot tallennetaan. Seurantalaitteessa käytetään matkapuhelinverkkoa tiedonsiirtoon ja GPS satelliittipaikannusta paikannukseen. Tiedonsiirrossa käytetään WebSocket protokollaa ja sijaintitiedot toimitetaan salattuna palvelimelle tietoturvan varmistamiseksi. Palvelin tallentaa vastaanotetut sijaintitiedot paikkatietojärjestelmälaajennosta tukevaan tietokantaan, joka mahdollistaa sijaintitietojen monipuolisen käsittelyn tietokannassa. Palvelin tarjoaa reaaliaikaista seurantaa varten WebSocket rajapinnan ja sijaintitietojen hakuun REST rajapinnan.

Toteutettu ajoseurantajärjestelmä hyödyntää valmiita komponentteja sekä seurantalaitteessa että palvelimella, minkä ansiosta toteutukseen ei tarvittu suurta työmäärää ja laitteiden valmistaminen on edullista myös pienissä erissä. Seurantalaitteen ja palvelimen toteutus mahdollistaa yksittäisten komponenttien korvaamisen vastaavan toiminnallisuuden tarjoavalla komponentilla tarpeen vaatiessa ja seurantalaitteesta voidaan toteuttaa erilaisiin tarpeisiin soveltuvia versioita. Ajoseurantajärjestelmä toimii maailmanlaajuisesti, kunhan laitteessa on käyttöalueella toimiva matkapuhelinliittymä. Järjestelmä on vaihtoehtoihin ajoseurantajärjestelmiin verrattuna edullinen sekä hankinta- että käyttökustannuksiltaan, mutta seurantatietojen hyödyntämistä varten tarvitaan erillinen palvelu. Järjestelmän testaus suoritettiin prototyyppilaitteella, joka asennettiin ajoneuvoon ja suoritettiin ajoja erilaisissa ympäristöissä Uudenmaan ja Pohjois-Pohjanmaan välisellä alueella. Testaukseen sisältyi muun muassa erikokoisia teitä niin kaupungissa kuin maaseudulla, pysäköintialueita, maantietunneli sekä maanpäällinen ja maanalainen pysäköintihalli. Suoritettujen testien perusteella GPS satelliittipaikannuksen tarkkuus riittää seurantaan, kunhan suodatetaan heikolla signaalilla syntyvät virhemittaukset pois tuloksista. Matkapuhelinverkon tiedonsiirto on kattava ja luotettava, minkä lisäksi seurantalaitteessa on pysyvääismuistia mahdollisten katkokkien aikana syntyvien seurantatietojen tallentamista varten.

Avainsanat: ajonseuranta, paikannus, seuranta

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck -ohjelmalla.

ABSTRACT

Daniel Linjama: Implementation of trip tracking system
MSc thesis
Tampere University
Degree Programme in Information Technology
May 2019

Trip tracking systems are used for various purposes such as tracking mileage to taxation or to help fleet management. The acquisition costs and the operating costs of the trip tracking systems are often high. Many systems do not provide an interface for utilising collected trip tracking data on third party applications or data processing causes delay before data can be utilised. The delay before data can be utilised should be as short as possible, so the user can utilise the tracking data right after the trip. This work will take a look with alternative techniques for implementing the trip tracking system and target is to produce an inexpensive trip tracking system using available ready-made components. The target for acquisition costs are at most 100 euro and the monthly operating costs are at most 5 euro, which are cheaper than the costs of alternative systems. The trip tracking system allows a real-time tracking of vehicles and allows the retrieval of tracking data to third party applications.

The trip tracking system consists of an on-board tracking device and a server to which the tracking data is stored. The tracking device uses a cellular network for data transfer and the GPS navigation satellite system for positioning. The WebSocket protocol is used as data transfer protocol and tracking data is encrypted during the transfer to ensure security. The server stores received tracking data to a database supporting geographic information system extension which allows versatile processing of tracking data in the database. For third-party applications the server provides a WebSocket interface for real-time tracking and a REST interface for the retrieval of the tracking data.

The implemented system utilises available ready-made components for both the tracking device and the server, which makes an implementation of the system not to require a large amount of work and manufacturing of the devices is cheap also in smaller batches. The implementation of the system allows replacing individual components in both the tracking device and the server with a component that provides similar functionality if needed. Different components can be used for creating various versions of the tracking device for different needs. The trip tracking system works world wide if the tracking device is equipped with a cellular subscription working in the target area. The implemented system is advantageous in comparison with alternative systems for both acquisition and operating costs. Most alternative systems include a user interface for the analysis of the tracking data, which affects costs but do not benefit when using a third-party application for analysis. System testing was performed with a prototype device installed in a vehicle. The trip tracking device was tested in different environments, such as roads of different sizes in the city and the countryside, parking lots, road tunnel and parking garages. On the basis of the testing performed, the accuracy and performance of the GPS are enough for the tracking of the vehicles if sporadic erroneous measurements are filtered from the positioning results. The performance of the cellular networks is sufficient for transferring tracking data to the server and the tracking device is equipped with a non-volatile memory in case of communication failure.

Keywords: trip tracking, positioning, tracking

The originality of this thesis has been checked using the Turnitin OriginalityCheck service.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty opinnäytönä osana tietotekniikan diplomi-insinöörin tutkintoa Tampereen yliopistossa. Diplomityön ohjaajana ja toisena tarkastajana toimi Timo Hämäläinen. Haluan kiittää ohjaaja saamastani ohjauksesta sekä työntajaani, joka tarjosi diplomityölle mielenkiintoisen aiheen. Lisäksi haluan kiittää puolisoani Heliä samastani tuesta ja prototyypilaitteen testaamisesta.

Tampereella, 30. toukokuuta 2019

Daniel Linjama

SISÄLLYSLUETTELO

Kuvaluettelo	vi
Taulukkoluetelo	vii
Lyhenteet ja merkinnät	viii
1 Johdanto	1
2 Vaatimukset	3
2.1 Paikannuslaite	3
2.2 Palvelin	7
2.3 Tietoturva	8
2.4 Keskeisimmät käyttötapaukset	9
3 Saatavilla olevat vaihtoehdot ja tekniikat	10
3.1 Valmiit järjestelmät	10
3.2 Tekniikat	13
3.2.1 Paikannus	13
3.2.2 Tiedonsiirto	16
3.2.3 Tietovarastot	19
3.3 Komponentit	20
3.3.1 Paikannuslaite	20
3.3.2 Palvelin	21
4 Arkkitehtuuri	23
4.1 Paikannuslaite	25
4.2 Palvelin	25
4.3 Komponenttien sijoittelu	29
4.4 Käyttötapaukset	30
5 Toteutus	32
5.1 Paikannuslaite	32
5.1.1 Valitut komponentit	33
5.1.2 Ohjelma	34
5.2 Palvelin	36
6 Tulokset	40
6.1 Paikannuslaite	40
6.1.1 Tiedonsiirron suorituskyky	41
6.1.2 Helppokäyttöisyys	42
6.1.3 Kustannukset	43
6.2 Palvelin	44
6.3 Vertailu valmiisiin järjestelmiin	45
7 Yhteenveto	47

Lähdeluettelo 49

KUVALUETTELO

4.1	Ajoseurantajärjestelmän arkkitehtuuri	24
4.2	Paikannuslaitteen ohjelman tilat	24
4.3	Paikannuslaiterajapinnan toiminta	26
4.4	Hallintarajapinnan toiminta	27
4.5	Sijaintitietorajapinnan toiminta	28
4.6	Järjestelmän sijoittelukaavio	29
5.1	Tapahtumasilmukka	35
5.2	Kuvakaappaus asiakasohjelmistosta	38

TAULUKKOLUETTELO

3.1	Valmiiden ajoseurantajärjestelmien soveltuvuus	12
6.1	Paikannuslaitteen komponenttien hinnat	44

LYHENTEET JA MERKINNÄT

API	Sovellusohjelmointirajapinta (engl. Application Programming Interface)
EKF	Epälineaarinen laajennettu versio Kalman suodattimesta (engl. Extended Kalman Filter)
GNSS	Maailmanlaajuinen satelliittinavigaatiojärjestelmä (engl. Global Navigation Satellite System)
GPRS	Pakettikytkentäinen tiedonsiirtopalvelu (engl. General Packet Radio Service)
GPS	Yhdysvaltojen hallinnon omistama maailmanlaajuinen satelliittipaikannusjärjestelmä (engl. Global Positioning System)
HTTP	Hypertekstin siirtoprotokolla (engl. Hypertext Transfer Protocol)
IEC	Kansainvälinen sähköalan standardointiorganisaatio (engl. International Electrotechnical Commission)
INS	Inertiaalinavigointijärjestelmä (engl. Inertial Navigation System)
IoT	Esineiden internet (engl. Internet of Things)
IP	Internet protokolla (engl. Internet Protocol)
ISO	Kansainvälinen standardointiorganisaatio (engl. International Organization for Standardization)
LPWAN	Alhaisen virrankulutuksen laaja-alainen verkko (engl. Low-Power Wide-Area Network)
LTE	3 sukupolven matkapuhelinverkossa toimiva langaton laajakais-tayhteys (engl. Long Term Evolution)
MQTT	Julkaisija-tilaaja-tyyppinen viestintä protokolla (engl. Message Queuing Telemetry Transport)
NB-IoT	Kapeakaistaiseen radioteknologiaan perustuva alhaisen virrankulutuksen laaja-alainen verkko (LPWAN) (engl. Narrowband IoT)
NoSQL	Nimitys perinteisestä SQL-tietokantakyselykielestä poikkeaville tietokannoille (engl. Not Only SQL)
OBD	Ajoneuvojen diagnostiikka liityntä (engl. On-Board Diagnostics)
OSI-viitemalli	Avointen tietojärjestelmien yhteenliittämisen käsitteellinen malli (engl. Open Systems Interconnection model)
RDBMS	Relationaalinen tietokannanhallintajärjestelmä (engl. Relational Database Management System)
REST	Arkkitehtuurinen tyyppi hajautettujen järjestelmien väliseen kommunikointiin (engl. Representational State Transfer)
SQL	Tietokantojen käyttämä kyselykieli (engl. Structured Query Language)
TCP	Yhteydellinen tietoliikenneprotokolla (engl. Transmission Control Protocol)
TCP/IP-viitemalli	Internetin käyttämien tietoliikenneprotokollien käsitteellinen kerros-malli
UDP	Yhteydetön tietoliikenneprotokolla (engl. User Datagram Protocol)

1 JOHDANTO

Ajoneuvojen seurantaan on saatavilla erilaisia ajoseurantajärjestelmiä ja seurantatietoja hyödynnetään erilaisiin tarkoituksiin. Seurantatietojen avulla voidaan eritellä verovähennyksiin oikeuttavat ajot, seurata työntekijöiden työaikoja tai seurata yrityksen omistamien ajoneuvojen sijainteja. Saatavilla olevissa ajoseurantajärjestelmissä on kuitenkin monesti korkeat hankinta- ja kuukausimaksut. Lisäksi seurantatietojen hyödyntäminen erillisissä tietojärjestelmissä on monesti hankalaa rajapintojen puutteen tai pitkien viiveiden takia. Ajon päättymisen ja seurantatietojen saataville tulon välinen viive estää seurantatietojen hyödyntämisen mobiililaitteella heti ajon päätyttyä, jos viive on muutamia sekunteja pidempi.

Tämän työn tutkimuskysymyksenä on: "Miten toteuttaa edullinen ja reaaliaikainen ajoseurantajärjestelmä 50 ajoneuvolle ja käyttäjälle". Ajoseurantajärjestelmän ajoneuvokohteisissa kustannuksissa pyritään alle 100 euron hankintakustannukseen ja alle 5 euron kuukausittaiseen käyttökustannukseen, jolloin saavutetaan kustannussäästö vertailtaviin järjestelmiin verrattuna. Viive seurantatietojen syntymisen ja niiden saataville tulon välillä saa olla korkeintaan 5 sekuntia, jolloin käyttäjä voi hyödyntää seurantatietoja heti ajon päätyttyä. Ajoseurantajärjestelmän keräämistä tiedoista selvitetään ajoneuvoilla suoritettujen ajojen pituudet, kestot, kuljetut reitit sekä alku- ja päätepisteet. Toteutettava ajoseurantajärjestelmä tulee korvaamaan käytössä olevan ajoseurantajärjestelmän, mutta tässä työssä ei perehdytä tarkemmin nykyisen järjestelmän ominaisuuksiin. Toteutettavan järjestelmän tarkoituksena on vähentää paikannuslaitteiden hankinta- ja käyttökustannuksia sekä lyhentää tietojen viivettä tietojen keräämisen ja tietojen hyödyntämisen välillä. Lisäksi toteutettava järjestelmä mahdollistaa ajoneuvojen reaaliaikaisen seurannan. Hankinta- ja käyttökustannuksia alentamalla saavutetaan kustannussäästö vaihtoehtoisiin järjestelmiin verrattuna. Seurantalaitteen helppokäyttöisyys ja toimintavarmuus vähentävät tuen ja huollon kustannuksia. Lyhyellä viiveellä tietojen keräämisestä hyödyntämiseen, mahdollistetaan monipuolisempi seurantatietojen käyttö heti ajoneuvolla suoritettun ajon päätyttyä.

Työn aluksi määritetään ajoseurantajärjestelmän vaatimukset, jotka toteutettavan järjestelmän tulee toteuttaa. Toteutettavan järjestelmän vertailua varten valitaan muutama saatavilla oleva ajoseurantajärjestelmä, joiden soveltuvuutta verrataan asetettujen vaatimusten pohjalta. Toteutukseen käytettävien tekniikoiden valintaa varten perehdytään ajoseurantajärjestelmän toteutukseen soveltuviin tekniikoihin ja valitaan tekniikoista parhaiten toteutukseen soveltuvat. Ajoseurantajärjestelmän toteutuksessa hyödynnetään mahdol-

lisuoksien mukaan valmiita komponentteja, jolloin valmistuskustannukset pysyvät alhaisina myös pienissä valmistuserissä. Valmiiden komponenttien hyödyntäminen nopeuttaa myös järjestelmän toteutusta ja vähentää testauksen tarvetta.

Toteutukseen soveltuvien tekniikoiden ja komponenttien tarkastelun jälkeen suunnitellaan ajoseurantajärjestelmän arkkitehtuuri, joka mahdollistaa erilaisien tekniikoiden ja komponenttien hyödyntämisen ajoseurantajärjestelmän toteutuksessa. Arkkitehtuurin pohjalta valmistetaan prototyyppijärjestelmä, johon valitaan käytettävät tekniikat ja komponentit. Prototyyppijärjestelmällä suoritetaan järjestelmän testaus, jonka perusteella selvitetään toteutetun järjestelmän soveltuvuus asetettuihin vaatimuksiin, verrataan järjestelmää saatavilla oleviin järjestelmiin ja selvitetään järjestelmän mahdollisesti tarvitsemat parannukset.

2 VAATIMUKSET

Ajoseurantajärjestelmän tarkoituksena on kerätä ajoneuvojen sijaintitietoja palvelimelle, josta tallennettuja sijaintitietoja voidaan hakea käsittelyä ja raportointia varten. Sijaintitietojen keräämistä varten ajoneuvoihin asennetaan paikannuslaitteet. Sijaintitiedoista selvitetään ajoneuvolla suoritettavat ajot, ajojen alku- ja päätepisteet, kuljetut reitti, kuljettujen reittien pituudet, ajoihin kuluneet ajat sekä ajojen alku- ja loppuajat. Tietojen käsittely ja vaadittujen parametrien selvittäminen sijaintitiedoista suoritetaan erillisessä palvelussa, joka hakee sijaintitiedot ajoseurantajärjestelmän tarjoaman rajapinnan kautta.

Järjestelmän käyttäjiä ovat ajoneuvojen käyttäjät, palvelun ylläpitäjät ja paikannustiedon käyttäjät. Ajoneuvojen käyttäjät asentavat palvelun ylläpitäjän toimittaman paikannuslaitteen ajoneuvoon ja käyttävät ajoneuvoa ajoihin, joiden sijaintitietoa paikannuslaite kerää ja toimittaa ajoseurantajärjestelmän palvelimelle. Palvelun ylläpitäjä valmistelee paikannuslaitteet käyttöä varten, lisää laitteet järjestelmään ja toimittaa ne ajoneuvojen käyttäjille. Paikannustiedon käyttäjä käyttää paikannuslaitteiden keräämiä sijaintitietoja erillisessä palvelussa, joka hakee sijaintitiedot ajoseurantajärjestelmästä.

Vaatimuksien määrittely jaetaan paikannuslaitteen, palvelimen ja tietoturvan vaatimuksiin. Vaatimuksien lisäksi määritetään järjestelmän keskeisimmät käyttötapaukset. Työn tavoitteena on luoda toimiva prototyyppi järjestelmästä, joka täyttää tämän luvun vaatimukset ja on mahdollista tuotteistaa vaatimukset täyttäväksi ajoseurantajärjestelmäksi. Lopullinen ajoseurantajärjestelmä toteutetaan tässä työssä toteutetun prototyypin ja prototyypillä saatujen tuloksien pohjalta.

2.1 Paikannuslaite

Ajoneuvojen sijaintitietojen keräämisen suorittavat ajoneuvoihin asennettavat paikannuslaitteet, jotka mittaavat ajoneuvojen sijaintia ja lähettävät sijaintitiedot palvelimelle. Paikannuslaitteen vaatimukset koostuvat paikannuksen suorituskyvyn, tiedonsiirron suorituskyvyn, helppokäyttöisyyden ja kustannuksien vaatimuksista. Paikannuksen suorituskyvyn määrittelyssä hyödynnetään Gleason et al. [14, luku 1] ja Skog et al. [25] mukaisia paikannuksen suorituskyvyn parametreja. Tiedonsiirron suorituskyvyn määrittelyyn käytetään samantapaisia suorituskyvyn parametreja, joiden avulla vaatimukset saadaan jaettava selkeisiin ja mitattaviin osa-alueisiin. Helppokäyttöisyydelle määritetään reunaehdot ja kustannuksille määritetään ylärajat.

Paikannuksen suorituskyky

Gleason et al. [14, luku 1] esittelee paikannuksen suorituskyvyn mittaamiseen viisi parametria: tarkkuus, saatavuus, eheys, jatkuvuus ja kattavuus. Skog et al. [25] on koonnut läheteistään neljä suorituskykyparametria: tarkkuus, eheys, saatavuus ja jatkuvuus. Gleason et al. [14, luku 1] mittaavat saatavuutta ajan perusteella, kun Skog et al. [25] mittaavat saatavuutta toiminta-alueen osuutena ennalta määritetystä suunnitellusta toiminta-alueesta. Paikannuksen suorituskyvyn vaatimuksien määrittelyyn käytetään Gleason et al. [25, luku 1] suorituskykyparametreja, jotka erottavat kattavuuden saatavuudesta ja huomioivat vaihtuvista olosuhteista sekä liikkeestä johtuvien saatavuuden vaihtelut.

Paikannustarkkuus tarkoittaa, kuinka lähellä mitattu sijaintipiste on todellista paikantimen sijaintia. Paikannustuloksesta määritetään reitin alku- ja päätepisteiden katuosoitteet sekä kuljettu reitti ja reitin pituus. Ajoneuvoa ei kaikissa tilanteissa pysäköidä samaan osoitteeseen ajoneuvon kuljettajan todellisen määränpään kanssa, minkä takia ajoneuvon sijaintitiedoista ei pystytä selvittämään kuljettajan määränpäättä. Riittävällä tarkkuudella ja tiheydellä tapahtuvasta paikannuksesta pystytään selvittämään tarkasti paikantimen kuljema reitti ja reitin pituus. Huonommalla tarkkuudella tai tiheydellä tapahtuvan paikannuksen tuloksiin voidaan hyödyntää jälkikäsitteilyä, jonka avulla tuloksista pystytään muodostamaan riittävän tarkasti reitti ja reitin pituus.

Paikannuksen saatavuudella mitataan, kuinka suuren osan ajasta paikannusmenetelmä tuottaa paikannustuloksen vaaditulla tarkkuudella, eheydellä ja jatkuvuudella [14, luku 1]. Paikannuksen eheys mittaa havaitsemattomien paikannusvirheiden todennäköisyyttä. Eheyden varmistamiseksi suoritetaan eheyden seurantaa, jossa havaitaan paikannusvirheiden lähteet ja pyritään suodattamaan virheet pois tuloksesta. Paikannusvirheiden havaitsemisessa voidaan hyödyntää ylimääräisiä paikannuslähteitä, joiden avulla huomataan yksittäinen virheellinen lähde. [25] Paikannuksen jatkuvuus mittaa havaittujen paikannuksen keskeytyksien todennäköisyyttä paikannuksen aikana [14, luku 1][25]. Jatkuvuutta voivat heikentää katvealueet, paikannuksen alkamisen viive tai ulkoiset häiriöt, jotka keskeyttävät paikannuksen.

Paikannuksen kattavuus on alue, jolla paikannusmenetelmä toimii. Osa paikannusmenetelmistä eivät ole riippuvaisia sijainnista, osa toimii maailmanlaajuisesti ja osa toimii tietyllä maantieteellisellä alueella. Kattavuus ei ota kantaa paikannuksen laatuun toiminta-alueella.

Toteutettavassa järjestelmässä alku- ja päätepisteiden paikannustarkkuuden tulee olla alle 50 metriä, jolloin pystytään erottelemaan luotettavasti kohteet, joiden etäisyys toisistaan on yli 50 metriä. Reitin aikana paikannustarkkuuden tulee olla suurimman osan ajasta alle 10 metriä, jolloin kuljettu reitti ja reitin pituus pystytään määrittämään ilman paikannustiedolle suoritettavaa jälkikäsitteilyä. Paikannusmenetelmän eheyden tulee olla vähintään 90 prosenttia, jolloin yksittäiset virheelliset tulokset voidaan helposti suodattaa pois sijaintitiedoista. Paikannustuloksien tulee sisältää jokin tuloksen laatua mittaava

parametri, jonka perusteella voidaan suorittaa virheellisten mittauksien suodattaminen. Paikannusmenetelmän jatkuvuus ei saa haitata reitin laskentaa. Lyhyiden katkokkien aikana tapahtuneet siirtymät saadaan riittävällä tarkkuudella lineaarisella sovitteella, mutta pidemmät katkokset aiheuttavat suuria virheitä ja vaativat jälkikäsitteilyllä tapahtuvan korjauksen. Paikannuksen saatavuuden tulee olla vähintään 90 prosenttia ajoneuvon reitin pituudesta. Saatavuutta ei mitata ajan osuutena, koska ajoneuvon pysähtyminen saatavuuden ulkopuolella ei haittaa reitin mittaamista yhtä paljon, kuin saatavuuden ulkopuolella tapahtuva pitkä ajettu matka. Jos saatavuuden vaatimus voidaan täyttää myös jälkikäsitteilyn avulla. Valitun paikannusmenetelmän tulee kattaa koko Suomi.

Tiedonsiirron suorituskyky

Tiedonsiirron avulla toimitetaan paikannuslaitteen mittaamat sijaintitiedot palvelimelle myöhempää käyttöä varten. Tiedonsiirron suorituskykyä mittaavat tiedonsiirron kattavuus, viive, kapasiteetti ja luotettavuus. Kattavuus kuvaa tiedonsiirtoyhteyden toiminta-alueita. Tiedonsiirron viive on aika, joka kuluu sijaintitiedon mittauksesta palvelimelle tallentamiseen. Kapasiteetti mittaa tietyllä aikavälillä siirrettävän tiedon maksimimäärää. Luotettavuus kuvaa todennäköisyyttä, jolla tiedonsiirto onnistuu toiminta-alueen sisällä halutulla viiveellä ja kapasiteetilla.

Paikannuslaitteen tiedonsiirron tulee toimia koko Suomen alueella pieniä katvealueita lukuun ottamatta. Asutuilla alueilla tulee olla mahdollisimman vähän katvealueita, koska ajojen päätepisteet sijaitsevat yleensä asutuilla alueilla. Paikannustietojen toimitusviive kasvaa liian suureksi, jos ajon loppuosa toimitetaan palvelimelle vasta seuraavan ajon alkamisen jälkeen. Pieniä katvealueita varten paikannuslaitteessa tulee olla pysyväismuistia, jota käytetään sijaintitietojen väliaikaiseen säilömiseen, kunnes tiedonsiirto on käytettävissä uudelleen ja sijaintitiedot on toimitettu palvelimelle. Pysyväismuistia käytetään myös mahdollisten palvelimen käyttökatkojen aikana syntyneiden sijaintitietojen säilömiseen parantamaan järjestelmän vikasietoisuutta.

Paikannuslaitteen sijainnin reaaliaikaista seuranta varten tiedonsiirron viiveen tulee olla normaalissa toimintaympäristössä alle sekunnin. Tiedonsiirron kapasiteettia tarvitaan paikannuslaitteen mittaaman sijaintitiedon toimittamiseen palvelimelle. Kapasiteetin vaatimukseen vaikuttaa sijaintitiedon mittaustiheys ja yksittäisen sijaintitiedon sisältämän tiedon määrä. Tiedonsiirron kapasiteetin tulee olla sijaintitiedon tuottamaan tietoa suurempi, jolloin kapasiteetti riittää myös väliaikaisien tiedonsiirron häiriöiden aikana syntyneiden paikannustietojen toimittamiseen.

Tiedonsiirron tulee toimia ilman ongelmia vähintään 90 prosenttia ajasta. Tiedonsiirtoyhteyden täytyy sisältää lähetettyjen tietojen kuittaus, jolla varmistetaan tiedon perillemeno. Luotettavuuden parantamiseksi laitteessa on pysyväismuistia, jota käytetään sijaintitietojen tallentamiseen väliaikaisien tiedonsiirron ongelmien tai tiedonsiirron katvealueiden aikana. Pysyväismuistiin tallennetut sijaintitiedot lähetetään ylimääräistä tiedonsiirron ka-

pasiteettia hyödyntäen, kun tiedonsiirto on taas toiminnassa. Vaadittu pysyvämuistin määrä riippuu tiedonsiirron luotettavuudesta, katvealueiden määrästä sekä sijaintitiedon vaatimasta kapasiteetista.

Helppokäyttöisyys

Ajoneuvon asennetun paikannuslaitteen käyttäminen ei saa vaatia ajoneuvon käyttäjältä toimenpiteitä, normaalin ajoneuvon käyttämisen lisäksi. Helppokäyttöisyys on yksi keskeisimmistä vaatimuksista ja helppokäyttöisyyteen liittyy myös paikannuslaitteen asentaminen ajoneuvon. Paikannuslaitteen asentamisen tulee onnistua laitteen käyttäjältä ilman työkaluja mukana toimitettavilla kiinnitystarvikkeilla ja asennusohjeilla. Laitteen asennus ei saa kestää yli kymmentä minuuttia, sitä ensimmäistä kertaa suorittavalta käyttäjältä. Asennusaikaan sisältyy toimitettujen tarvikkeiden tarkastaminen, paikannuslaitteen asentaminen ajoneuvon asennusohjeen mukaisesti mukana toimitetuilla kiinnikkeillä ja laitteen virtalähteen kytkeminen ajoneuvon.

Helppokäyttöisyyden vuoksi paikannuslaitteen toimintojen tulee olla langattomia, virransyöttöä lukuun ottamatta. Paikannuslaitteen käyttäminen ei saa vaatia paikannus- eikä tiedonsiirtoinfrastruktuurin asentamista halutulle paikannusalueella, vaan tulee hyödyntää olemassa olevia infrastruktuureja.

Kustannukset

Paikannuslaitteen kustannukset syntyvät laitteen komponenttien hankintahinnasta, kokoonpanosta, asetusten määrittämisestä ja käyttökustannuksista. Laitteen komponenttien verollisen hankintahinnan ylärajaksi on asetettu 100 euroa, joka sisältää paikannuslaitteen komponentit, virtalähteen, koteloinnin ja kiinnitystarvikkeet. Laitteen komponentteja tulee olla saatavilla useilta toimittajilta, jolloin komponenttien saatavuus ei ole riippuvainen yksittäisestä toimittajasta. Lisäksi laitteeseen täytyy tarvittaessa pystyä korvaamaan yksittäisiä komponentteja muilla vastaavilla komponenteilla. Komponenttien korvaamisen syitä voivat olla esimerkiksi parempi saatavuus, paremmat ominaisuudet tai halvempi hinta.

Kokoonpanon tulee olla yksinkertainen operaatio, jossa laitteen komponentit kytketään toisiinsa ja asennetaan koteloon. Laitteen kokoonpano voi sisältää komponenttien toisiin liittämisen mahdollistavien liittimien asentamisen, mutta muuten komponenttien tulee olla valmiiksi kokoonpantuja ja yhteensopivia. Laitteen kokoonpanon tulee kestää, saman kokoonpanon aikaisemmin suorittaneelta, yksittäisen laitteen kokoonpanon osalta enintään puoli tuntia ja usean laitteen peräkkäisessä kokoonpanossa enintään 15 minuuttia laitetta kohden. Lyhyempi kokoonpano-aika vähentää kokoonpanokustannuksiin kuluva työntehtäjälle maksettavaa palkkaa, joka vaikuttaa suoraan laitteen hankintakustannukseen.

Asetusten määrittämisessä laite ohjelmoidaan tai määritetään laitteessa valmiina olevan ohjelman asetukset. Ohjelmointi voi sisältää laitekohtaisien määrittämisasetusten asettamisen, jolla mahdollistetaan saman ohjelman toimiminen useilla laitteilla. Laitteelle suoritetaan myös testit, jolla varmistetaan laitteen toiminta normaalissa tilanteessa sekä virhetilanteissa. Kun laite on valmis, lisätään palvelimelle tarvittavat tiedot tiedonsiirron mahdollistamiseksi. Asetusten määrittäminen ja laitteen toiminnan varmistaminen saa kestää työntekijältä, joka on aikaisemmin konfiguroinut samanlaisen laitteen, enintään 15 minuuttia. Yli 10 laitteen peräkkäisessä määrittämisessä aikaa saa kulua enintään 5 minuuttia laitetta kohden.

Laitteen käyttökustannukset koostuvat mahdollisista paikannuksen ja tiedonsiirron käyttömaksuista. Ulkopuolisen toimittajan laitetta käytettäessä käyttömaksu voi olla laitteen kuukausihinta, joka sisältää kaikki laitteen käyttökustannukset. Laitteen käyttökustannukset saavat olla korkeintaan 5 euroa kuukaudessa, jolloin saavutetulla kustannushyödyllä pystytään kohtuullisessa ajassa kattamaan järjestelmän kehityskustannukset.

2.2 Palvelin

Palvelimen keskeisimmät toiminnot ovat paikannuslaitteiden keräämien sijaintitietojen tallentaminen ja sijaintitietojen tarjoaminen käyttäjille rajapinnan kautta. Palvelimen ohjelmistoarkkitehtuurin tulee olla skaalattava, jolloin mahdollista paikannuslaitteiden tai sijaintitietojen hakujen määrien kasvamista varten ei tarvitse ylittää suorituskykyä, vaan suorituskykyä voidaan lisätä tarpeen mukaan. Paikannuslaitteiden keräämien yksittäisten sijaintitietojen tallentaminen saa kestää korkeintaan 500 millisekuntia sijaintitiedon vastaanottamisesta, kun järjestelmässä on yhtäaikaaisesti käytössä 50 paikannuslaitetta. Tässä ajassa vastaanotettu tieto muutetaan haluttuun muotoon tietovarastoon tallentamista varten ja tallennetaan tietovarastoon. Mahdollinen sijaintitiedon jälkikäsitteily ei sisälly tallentamiseen, vaan jälkikäsitteily suoritetaan myöhemmin pidemmän aikavälin sijaintitietojen perusteella.

Sijaintitiedon käyttäjä voi hakea yksittäisen paikannuslaitteen sijaintitietoja, yhteenvedon paikannuslaitteen reitistä sekä seurata paikannuslaitteen sijaintitietoa reaaliaikaisesti. Muita palveluita varten palvelin tarjoaa rajapinnan sijaintitietojen hakuun ja tilaamiseen. Käyttöliittymän toteutus jää erillisen palvelun vastuulle. Sijaintitietojen hakua varten käyttäjä valitsee halutun paikannuslaitteen sekä halutun aikavälin ja palvelin antaa vastauksena täydelliset paikannuslaitteelta kerätyt sijaintitiedot aikaväliltä. Paikannuslaitteen reitin yhteenvedosta selviää reitin alku- ja päätepisteet sekä kuljettu reitti ja reitin pituus. Palvelin tuottaa nämä tiedot paikannuslaitteen sijaintitiedon pohjalta valitulle paikannuslaitteelle ja aikavälille. Reitien yhteenvedon vastauksen viive saa olla korkeintaan sekunnin ja palvelimen on pystyttävä käsittelemään 100 erillistä pyyntöä 5 sekunnin aikana. Reitien pituuden laskentaa varten palvelimen on pystyttävä suorittamaan laskentaa paikkatietojen perusteella. Reaaliaikaisessa seurannassa palvelimen viive sijaintitiedon vastaanottamisen ja sijaintitiedon käyttäjälle toimittamisen välillä saa olla korkeintaan sekunnin.

Reaaliaikaista seuranta on pystyttävä tekemään samanaikaisesti kaikille palvelimen paikannuslaitteille ja yksittäisen paikannuslaitteen sijaintitietoja voi seurata samanaikaisesti vähintään 10 käyttäjää.

Palvelun ylläpitäjä voi lisätä, muokata ja poistaa palvelussa olevia paikannuslaitteita ja paikannustiedon käyttäjiä sekä hallita käyttäjien käyttöoikeuksia paikannuslaitteisiin ja niiden sijaintitietoihin. Ylläpitäjän toimenpiteitä varten palveluun täytyy olla erillinen ylläpitorajapinta, jonka kautta ylläpitäjä voi suorittaa toimet.

2.3 Tietoturva

Andress [3, luku 1] esittelee tietoturvan kolmeksi pääkäsitteeksi luotettavuuden (engl. confidentiality), eheyden (engl. integrity) ja saatavuuden (engl. availability), joista muodostuu CIA kolmikko. Luotettavuuden tarkoituksena on estää luvaton pääsy tietoon, eheyden tarkoituksena on estää luvaton tiedon muuttaminen ja saatavuuden tarkoituksena on luvallinen pääsy tietoon tarvittaessa. [3, luku 1]

Ajoseurantajärjestelmässä luotettavuus voidaan jakaa kahteen osaan: paikannuslaitteen mittaaman sijaintitiedon luotettavuus ja palvelimelle tallennettujen sijaintitietojen luotettavuus. Luvaton pääsy paikannuslaitteen mittaamaan sijaintitietoon estetään salaamalla tiedot ennen palvelimelle lähettämistä. Salausmenetelmän tulee olla jonkin yleisen standardin mukainen, jolle löytyy tuki useimmista ohjelmointikielistä tai on vaihtoehtoisesti helppo toteuttaa näille kielillä. Tällä vältetään valitun salausmenetelmän valinnan vaikutus järjestelmän muiden komponenttien toteuttamiseen valittaviin tekniikoihin. Luvaton pääsy palvelimelle tallennettuun paikannustietoon estetään käyttämällä salattuja rajapintoja, jotka vaativat autentikoimisen, ja rajoittamalla autentikoitujen käyttäjien käyttöoikeus haluttujen paikannuslaitteiden sijaintitietoihin käyttöoikeuksien hallinnalla. Lisäksi huolehditaan, etteivät ulkopuoliset tahot pääse lukemaan palvelimen tietovarastoja kuin salattuja ja käyttöoikeuksilla rajattuja rajapintoja käyttämällä.

Sijaintitietojen eheyden kannalta on tärkeää, etteivät ulkopuoliset tahot pysty luvattomasti lisäämään, muokkaamaan tai poistamaan paikannustietoja. Yksittäisen paikannuslaitteen salaustiedoilla ei saa pystyä purkamaan muiden paikannuslaitteiden lähettämien sijaintitietojen salausta, ettei yhden paikannuslaitteen salausavaimen päätyminen ulkopuoliselle taholle vaaranna koko ajoseurantajärjestelmän luotettavuutta ja eheyttä. Palvelimen täytyy myös tunnistaa yhteyden muodostanut paikannuslaite, etteivät muut pysty lisäämään paikannuslaitteelle sijaintitietoja. Palvelimelle tallennettujen sijaintitietojen eheys varmistetaan käyttöoikeuksien hallinnalla, jolla rajoitetaan jokaisen käyttäjän lukuja muokkaus-oikeudet niiden paikannuslaitteiden sijaintitietoihin, joihin ylläpitäjä on myöntänyt oikeudet kyseiselle käyttäjälle.

Tietojen saatavuus varmistetaan riittävällä suorituskyvyllä, varmuuskopioinnilla ja suojaamalla palvelimet palvelunestohyökkäyksiltä. Riittävällä suorituskyvyllä varmistetaan, että palvelin pystyy käsittelemään kaikki pyynnöt. Varmuuskopioinnin avulla varmistetaan tie-

tojen säilyminen, vaikka palvelimen tietovarastossa olevat tiedot jostain syystä katoaisivat. Palvelunestohyökkäyksiltä suojautumalla varmistetaan, etteivät ulkopuoliset tahot voi ylikuormittaa palvelinta ja estää käyttäjien pääsyä palvelimella oleviin tietoihin. Varmuuskopioiden osalta täytyy myös toteuttaa luotettavuuden ja eheyden vaatimukset.

2.4 Keskeisimmät käyttötapaukset

Ajoseurantajärjestelmän keskeisimmät käyttötapaukset, yksittäisen paikannuslaitteen elinkaaren mukaisessa järjestyksessä, ovat paikannuslaitteen lisääminen järjestelmään, paikannuslaitteen asentaminen ajoneuvoon, paikannuslaitteen käyttäminen, ajoneuvon reaaliaikainen seuranta ja ajoneuvon reittien haku. Käyttötapauksista paikannuslaitteen lisäämisen järjestelmään suorittaa palvelun ylläpitäjä, paikannuslaitteen asentamisen sekä käyttämisen suorittaa ajoneuvon käyttäjä ja ajoneuvon reaaliaikaisen seurannan sekä reittien haun suorittavat sijaintitiedon käyttäjät.

Paikannuslaitteen lisääminen järjestelmään suoritetaan määrittämällä paikannuslaitteen asetukset, testaamalla paikannuslaitteen keskeisimmät toiminnot ja lisäämällä palvelimelle tarvittavat tiedot paikannuslaitteesta tunnistamisen ja salauksen purkamisen mahdollistamiseksi.

Paikannuslaitteen asentaminen ajoneuvoon suoritetaan kiinnittämällä paikannuslaite ajoneuvoon ohjeiden mukaisesti mukana tulevilla kiinnikkeillä ja kytkemällä paikannuslaitteen virtalähde. Paikannuslaitteen mukana toimitettavat kiinnikkeet mahdollistavat erilaisia kiinnitystapoja, joista asentaja valitsee kyseiseen ajoneuvoon mieleisimmän kiinnitystavan. Paikannuslaitteen asentamista varten ajoneuvon rakenteita ei tarvitse purkaa eikä asentamiseen tarvita työkaluja.

Paikannuslaitteen käyttäminen ei vaadi ajoneuvon käyttäjältä erillisiä toimenpiteitä. Ajoneuvon sijainnin mittaaminen ja sijaintitietojen toimittaminen tapahtuu automaattisesti, kun ajoneuvoa käytetään.

Ajoneuvon reaaliaikaista seurantaa varten sijaintitiedon käyttäjä muodostaa yhteyden palvelimen rajapintaan. Yhteyden muodostamisessa määritetään, minkä paikannuslaitteen sijaintitietoja halutaan seurata. Palvelin toimittaa yhteyden kautta kaikki uudet paikannuslaitteen sijaintitiedot mahdollisimman lyhyellä viiveellä.

Ajoneuvon reittien hakua varten käyttäjä lähettää rajapintaan reitinhakupyynnön halutulla aikavälillä ja paikannuslaitteella. Palvelin antaa vastauksena reitin alku- ja päätepisteet sekä kuljetun reitin ja reitin pituuden.

3 SAATAVILLA OLEVAT VAIHTOEHDOT JA TEKNIIKAT

Tässä luvussa käsitellään saatavilla olevia valmiita ajoseurantajärjestelmiä, ajoseurantajärjestelmän toteutukseen soveltuvia tekniikoita sekä paikannusjärjestelmän toteuttamiseen soveltuvia komponentteja. Saatavilla olevia ajoseurantajärjestelmiä verrataan luvussa 2 asetettuihin vaatimuksiin sekä käydään läpi järjestelmissä käytetyt tekniikat ja ratkaisut. Soveltuvista tekniikoista käydään läpi tekniikoiden perusteet sekä erilaisia käytössä olevia soveltuvia ratkaisuja. Soveltuvista komponenteista käydään läpi esimerkkejä eri tekniikoiden hyödyntämiseen soveltuvista ja ajoseurantajärjestelmän vaatimukset täyttävistä valmiista komponenteista.

3.1 Valmiit järjestelmät

Erilaisia ajoseuranta- ja kalustonhallintajärjestelmiä on saatavilla eri toimittajilta erilaisilla ominaisuuksilla. Vertailuun otettiin Maxtech automaattinen ajopäiväkirja [21], Ajoseuranta.fi automaattinen ajopäiväkirja ja ajoneuvoaikannus [1], GSGroup Fleet management kalustonhallinta ja sähköinen ajopäiväkirja [16], Kiho Ajopäiväkirja [19] sekä Aplicom A9 Quick telematiikkalaite [4]. Vertailussa mukana oleva Aplicom A9 Quick ei ole ajoseurantajärjestelmä, mutta tarjoaa ajoneuvojen sijaintitietojen keräämisen ja tallentamisen palveluun. Järjestelmien ominaisuudet eroavat toisistaan, mutta toimintaperiaate on kaikissa samankaltainen: ajoneuvoon asennettava seurantalaitte kerää ajoneuvon sijaintitietoa maailmanlaajuisella satelliittipaikallistamisjärjestelmällä (engl. Global Navigation Satellite System, GNSS) sekä mahdollisia muita ajoneuvon parametreja ja toimittaa tiedot matkapuhelinverkon yli verkkopalveluun. Asiakas pääsee katsomaan tietoja verkkopalvelusta omilla käyttäjätunnuksilla ja voi luoda tiedoista erilaisia raportteja. Osa järjestelmistä tarjoaa rajapinnan, jonka avulla järjestelmä voidaan integroida muihin järjestelmiin.

Maxtech automaattisessa ajopäiväkirjassa paikannuslaite voi olla ajoneuvoon asennettava ajoneuvoaikannin tai älypuhelimien asennettava mobiilisovellus. Maxtech ajoneuvoaikannin on helppo asentaa sijoittamalla GPS-antenni näkyvälle paikalle ja kytkemällä virtajohto tupakansytyttimen liitäntään tai ajoneuvon diagnostiikka (engl. On-Board Diagnostics, OBD) liitäntään. Ajoneuvon sijaintitietojen kerääminen tapahtuu automaattisesti ilman käyttäjän toimia ja lisäksi laitteessa on kytkin, jolla voi valita ajon tyyppiä joko työ- tai yksityisajon. Ajoneuvon ajot tallentuvat verkkopalveluun, josta voi tarkastella ajo-

ja ja muodostaa erilaisia raportteja. Lisäksi on saatavilla tiedonsiirto muihin järjestelmiin. Maxtech ajoneuvopaikantimen verollinen hinta on 217 euroa ja paikannuslaitekohtainen kuukausimaksu on noin 15 euroa. [21]

Ajoseuranta.fi ajoseurantajärjestelmässä paikannuslaite on ajoneuvon OBD-liitäntään kytkettävä ajoseurantalaite. Ajoseurantalaiteesta on eri versioita, joissa on OBD-lukija, GPS-siru ja versiosta riippuen joko 2G tai 3G modeemi. Yhteen malleista on saatavilla erillinen radiotaajuuden etätunnistuksen lukija, jota voidaan hyödyntää kuljettajan tunnistuksessa. Sijaintitietojen kerääminen tapahtuu automaattisesti ja verkkopalvelussa on ajopäiväkirja, karttapalvelu ja autoeturaportointi. Ajoseuranta.fi paikannuslaitteen verollinen hinta asennettuna on 124 euroa ja paikannuslaitekohtainen kuukausimaksu on alkaen 25 euroa. [1]

GSGroup Fleet Management on järjestelmistä monipuolisin ja sen ominaisuuksia ovat kalustonhallinta, sähköinen ajopäiväkirja ja laitteistonhallinta. Kalustonhallinnan avulla pystyy seuraamaan reaaliaikaisesti ajoneuvojen sijainteja, luomaan raportteja, lähettämään ajomääräyksiä suoraan ajoneuvoihin sekä seuraamaan tunti-, kilometri- ja lämpötilojen lukemia. Kalustonhallinta on mahdollista integroida muihin järjestelmiin. Sähköinen ajopäiväkirja kytkeytyy ajoneuvon OBD-liitäntään ja tallentaa automaattisesti matkojen tiedot. Laitteistonhallinta on räätälöitävä palvelu, joka soveltuu erilaisien koneiden ja työkalujen seurantaan sensorien avulla. GSGroup:lla on myös suppeampi Recovery järjestelmä, joka on suunnattu ajoneuvojen reaaliaikaiseen GPS-seurantaan ja varastetun omaisuuden paikantamiseen, mutta ei tarjoa integraatiomahdollisuutta muihin järjestelmiin. GSGroup ei ilmoita paikannuslaitteille tai käyttömaksuille hinnastoa. [15, 16]

Kiho Ajopäiväkirja on samankaltainen Ajoseuranta.fi ja Maxtech järjestelmien kanssa. Kiho järjestelmään on saatavilla erilaisia paikannuslaitteita, joista osa asennetaan OBD-liitäntään ja osa kytketään ajoneuvoon erillisellä virtalähteellä. Verkkopalvelussa voi lisätä ajoihin selitteitä, erotella työajoja yksityisajoista ja luoda tiedosta PDF- tai CSV-muotoisia raportteja. Kiho tarjoaa myös monipuolisemman Telematiikka palvelun, joka sisältää lisäksi reaaliaikaisen ajoneuvojen sijainninseurannan, huollonseurannan, hälytykset ja ajoneuvon tapahtumien kirjaamisen mobiilisovelluksella. Kiho Ajopäiväkirjan paikannuslaitteiden verolliset hinnat ovat alkaen 186 euroa ja ajoneuvokohtainen kuukausimaksu on noin 12 euroa. Kiho Telematiikka järjestelmän verollinen ajoneuvokohtainen kuukausimaksu on noin 44 euroa, joka sisältää paikannuslaitteen. [19, 20]

Aplicom A9 Quick on siirrettävä ajoneuvon seurantalaite, joka kytketään tupakansytyttimen liittimeen ja seuranta tapahtuu automaattisesti. Aplicomin laitteelle voidaan käyttää Aplicomin valmiita ohjelmistoja, tilata räätälöity ohjelmisto tai toteuttaa oma sovellus Aplicomin kumppaneille tarjoamalla ohjelmistokehityspaketilla. Sijaintitiedot voidaan tallentaa joko omaan palveluun tai Aplicomin API palveluun. Aplicomin API palvelu tarjoaa rajapinnan tietojen hakua varten, jolloin ei tarvitse toteuttaa omaa rajapintaa asiakasohjelmistoa varten. [4, 5]

Taulukkoon 3.1 on koottu vertailu, miten valmiit järjestelmät toteuttavat luvussa 2 asete-

Taulukko 3.1. Valmiiden ajoseurantajärjestelmien soveltuvuus

	Maxtech	Ajoseuranta.fi	GSGGroup	Kiho	Aplicom
Helppokäyttöisyys	+	+/-	+/-	+	+
Hankintahinta	-	-	?	-	?
Käyttökustannus	-	-	?	-	?
Sijaintitietojen tallennus	+	+	+	+	+
Reitin yhteenveto	+	+	+	+	+
Reaaliaikainen seuranta	-	?	+	-	+
Rajapinta	+	-	+	-	+

tut vaatimukset. Valmiista järjestelmistä ainoastaan Maxtech, Kiho ja Aplicom paikannuslaitteet on mahdollista asentaa tupakansytyttimen liittimeen. Ajoseuranta.fi ja GSGGroup paikannuslaitteet vaativat asennuksen OBD-liittimeen, joka ei ole kaikissa ajoneuvoissa helposti saatavilla eikä sen takia täytä helpon asennettavuuden vaatimusta. Kaikki paikannuslaitteet suorittavat paikannuksen automaattisesti ilman kuljettajan toimenpiteitä ja toimittavat tiedot ajoseurantajärjestelmään. GSGGroup ja Aplicom eivät ilmoita verkkosivuillaan hinnastoa. Maxtech, Ajoseuranta.fi ja Kiho kertovat sekä hankinta- että käyttökustannukset, mutta ne ylittävät vaatimuksissa määritetyt rajat. Verollinen hankintahinta ylittää vaatimuksissa asetetun 100 euron rajan Ajoseuranta.fi paikannuslaitteessa 24 prosentilla, Kihon paikannuslaitteessa 86 prosentilla ja Maxtech paikannuslaitteessa hankintahinta on yli kaksinkertainen. Kiho ja Maxtech järjestelmien käyttökustannukset ovat pienemmät kuin Ajoseuranta.fi järjestelmän, mutta kaikkien käyttökustannukset ovat yli kaksinkertaiset vaatimuksissa asetetun 5 euron kuukausikustannukseen verrattuna. Kaikki ajoseurantajärjestelmät tallentavat sijaintitiedot ja tarjoavat reittien yhteenvetoja. Reaaliaikaisen seurannan mahdollistavat GSGGroup, Kiho ja Aplicom järjestelmät. Ajoseuranta.fi ilmoittaa, että kaikkien ajoneuvojen seurannan mahdollistava näkymä on tulossa pian. Maxtech ei ilmoita tarjoavansa mahdollisuutta reaaliaikaiseen seurantaan. Rajapinnan muiden palveluiden käyttöön tarjoavat Maxtech, GSGGroup ja Aplicom järjestelmät.

Vertailuun otetuista järjestelmistä Aplicom voi täyttää asetetut vaatimukset, jos sen hankinta- ja käyttökustannukset ovat riittävän alhaiset. Reaaliaikaisen seurannan tarjoavat ainoastaan mukautettavat järjestelmät, joiden toimittajilla ei ole saatavilla hinnastoa vertailua varten. Muiden järjestelmien osalta hinnat eivät täytä hankintahinnan eikä käyttökustannuksien asetettuja vaatimuksia. Ajoseuranta.fi ajoseurantajärjestelmään on tulossa kaikkien ajoneuvojen sijainnin seurannan mahdollistava näkymä. Muihin palveluihin integroinnin mahdollistavan rajapinnan tarjoavat Maxtech, GSGGroup ja Aplicom järjestelmät.

3.2 Tekniikat

Ajoseurantajärjestelmään tarvitaan tekniikoita eri osa-alueiden toteuttamiseen. Tässä osiossa käydään läpi ajoneuvojen paikannukseen, langattomaan tiedonsiirtoon, tiedonsiirron salaukseen ja seurantatietojen tietovarastoihin soveltuvia tekniikoita. Eri osa-alueista käydään läpi perusteet ja erilaisien vaihtoehtoisten tekniikoiden ominaisuuksia.

3.2.1 Paikannus

Paikannusmenetelmät voidaan jakaa kahteen ryhmään: absoluuttisiin ja suhteellisiin paikannusmenetelmiin. Absoluuttisilla paikannusmenetelmillä tulokseksi saadaan sijainti absoluuttisella asteikolla, kuten geokoordinaatteina, kun suhteellisilla paikannusmenetelmillä saadaan sijainnin muutos alkutilanteesta. Absoluuttiset paikannusmenetelmät voivat olla globaaleja tai paikallisia, kun suhteelliset menetelmien toiminta-alue ei ole sidottu paikkaan. Absoluuttisten ja suhteellisten paikannusmenetelmien lisäksi voidaan käyttää erilaisien paikannusmenetelmien yhdistelmää, joka hyödyntää eri menetelmien hyviä puolia paremman paikannustuloksen saavuttamiseksi. [25]

Eri paikannusmenetelmiä voidaan käyttää myös rinnakkain, jolloin tuloksista saadaan laskehtua yksittäisten paikannusmenetelmien tuloksia tarkemmat tulokset tai voidaan parantaa jatkuvuutta. Paikannusmenetelmien tuloksiin voidaan soveltaa myös erilaisia malleja, joilla saadaan suodatettua mittauksista parempia tuloksia. Esimerkiksi map matching -menetelmässä oletetaan ajoneuvon sijainnin kartalle merkityille teille, jolloin epätarkan mittauksen tulokset sijoitetaan lähimmälle tielle. [14, luku 6][25]

Absoluuttiset paikannusmenetelmät

Kaikki vertailuun otetut ajoseurantajärjestelmät ilmoittavat käyttävänsä ajoneuvon paikantamiseen GPS-järjestelmää, joka on Yhdysvaltojen hallinnon omistama [9] maailmanlaajuinen satelliittipaikallistamisjärjestelmä. Vaihtoehtoisia maailmanlaajuisia satelliittipaikannusjärjestelmiä ovat Venäjän GLONASS, Euroopan Galileo ja Kiinan Compass/Bei-Dou [28]. Nämä järjestelmät soveltuvat hyvin ajoseurantajärjestelmään, koska ne toimivat maailmanlaajuisesti, paikannustarkkuus on riittävä, ajoneuvoissa toteutuu satelliittipaikannuksen vaatima suora näköyhteys taivaalle ja satelliittijärjestelmät ovat maksutta vapaasti käytettävissä. Absoluuttinen paikannus voidaan suorittaa myös muiden radiotaajuussignaalien avulla, kuten matkapuhelinverkon tukiasemien signaalien. Saatavilla olevissa radiotaajuussignaaleissa eivät, satelliittipaikannusjärjestelmien signaalien tapaan, mahdollista tarkkaa paikannusta, jonka takia niiden paikannustarkkuus on parhaimmillaankin noin 50 metriä. [26]

Maailmanlaajuisien satelliittipaikallistamisjärjestelmien toiminta perustuu paikantimen ja satelliittien välisen etäisyyden mittaamiseen signaalin matkaan kuluneesta ajasta. Satelliit-

tien lähettämiin signaaleihin on moduloitu tieto niiden kiertoradasta, kellon parametreista, eheydestä ja tilasta. Signaalin matkaan kuluneen ajan mittaaminen vaatii vastaanottimen kellon synkronoinnin satelliittijärjestelmän aikaan. Etäisyysistä selvitettäviä parametreja ovat paikannuslaitteen x -, y - ja z -koordinaatit sekä satelliittijärjestelmän aika. Näiden parametrien selvittämiseksi tarvitaan tieto vähintään neljän satelliitin sijainnista kiertoradalla sekä paikantimen etäisyydestä niihin. Paikannin saa satelliitin sijainnin selville seuraamalla satelliitin lähettämää signaalia. Sijaintitieto on moduloitu signaaliin, joten sijaintitiedon selvittäminen vaatii signaalin katkeamattoman seuraamisen koko moduloinnin ajan. Vaihtoehtoisesti satelliittien kiertoratojen sijainnit voidaan hakea erillisen palvelun avulla, jolloin satelliittien sijaintien selvittäminen nopeutuu. [14, luvut 1-3]

Etäisyysmittaukseen aiheutuu virheitä paikantimen ja satelliittien kellojen poikkeamisesta sekä ionosfäärin ja troposfäärin signaaliin aiheuttamista viiveistä. Lisäksi signaalien monitie-eteneminen ja heijastukset aiheuttavat virheitä mittaukseen. Signaalin matkalla olevat esteet voivat aiheuttaa heijastumia tai voivat estää signaalin vastaanottamisen, jolloin etäisyysmittausta ei voida suorittaa signaalin lähettäneeseen satelliittiin. Paikannuksen tarkkuutta saadaan parannettua suorittamalla mittauksia useampiin satelliitteihin ja ionosfäärin aiheuttamaan virheeseen auttaa eri taajuusalueilla lähetettyjen satelliittien signaalien hyödyntäminen. Ilmakehän vaikutuksia voidaan kompensoida myös differentiaalisessa satelliittipaikannusjärjestelmässä (engl. Differential GNSS, DGNS), jossa sijainti lasketaan erotuksena läheiseen kiinteässä tunnetussa pisteessä sijaitsevan paikantimen sijaintiin. Samat ilmakehän aiheuttamat virheet näkyvät sekä kiinteässä paikantimessa että liikuteltavassa paikantimessa, jolloin saadaan tarkempi tulos vähentämällä kiinteässä sijainnissa olevan paikantimen havaitsema virhe mittaustuloksesta. [14, luku 3-4]

Vastaanottimella, joka kykenee vastaanottamaan useiden satelliittipaikannusjärjestelmien signaaleja, saavutetaan parempi paikannusnopeus, kattavuus, tarkkuus ja luotettavuus. Tämä johtuu suuremmasta satelliittien määrästä sekä erilaisien signaalien virheiden erilaisista piirteistä, jonka takia toisien järjestelmien mittaukset kompensoivat toisien virheitä. [14, luku 1]

Suhteelliset paikannusmenetelmät

Suhteellisten paikannusmenetelmien avulla saadaan selvitettyä paikantimen reitti tietystä alkusijainnista loppusijaintiin. Reitti selvitetään mittaamalla matkaa ja käännöksiä soveltuvilla antureilla, kuten inertiaalimittausyksiköllä (engl. Inertial Measurement Unit, IMU) tai ajoneuvon tapauksessa voidaan hyödyntää erilaisia ajoneuvoa mittaavia antureita. Inertiaalinnavigointijärjestelmässä (engl. Inertial Navigation System, INS) navigointi suoritetaan inertiaalimittausyksikön mittausten perusteella. Inertiaalimittausyksikkö sisältää kolmiulotteisella akselistolla kiihtyvyyssanturit ja gyroskoopit. Kiihtyvyyssanturit mittaavat anturiin vaikuttavaa voimaa (engl. specific force). Kolmiulotteisen akseliston kiihtyvyyssantureista saadaan voiman vektori, josta saadaan paikannuslaitteen kiihtyvyys vähentämällä sijain-

tikohtainen painovoiman vektori. Mittausyksikön asento täytyy tietää tarkasti, ettei painovoiman vähentäminen aiheuta virhettä kiihtyvyyssmittaukseen. Kiihtyvyydestä saadaan integroimalla nopeus ja uudelleen integroimalla matkan muutos. Gyroskoopit mittaavat kulmakihtyvyyttä, josta saadaan integroimalla kulmanopeus ja uudelleen integroimalla kulman muutos. Yhdistämällä kolmiulotteisen akseliston kulmien muutos ja matkan muutos, saadaan selville seuraava reittipiste. Inertiaalinavigoinnissa pienet virheet kumuloituvat ja aiheuttavat ajan kuluessa suuria virheitä, jonka takia halpojen inertiaalimittausyksiköiden tarkkuus ei riitä tarkkaan navigointiin. [14, luku 6]

Ajoneuvon navigoinnissa voidaan hyödyntää ohjauspyörän asennon mittausta, matkamittarin lukemaa tai renkaiden nopeusmittausta. Ohjauspyörän asennon ja eturenkaiden nopeuden mittauksen avulla saadaan selville ajoneuvon kääntymisnopeus. Matkamittarin lukemasta saadaan kuljettu matka alku- ja loppulukeman erotuksena. Renkaiden pyörimisnopeudesta saadaan kuljettu matka. Jos renkaiden pyörimisnopeuksia mitataan erikseen, saadaan ajoneuvon suunnan muutos renkaiden pyörimisnopeuksien eroista. Lukkiutumaton jarrujärjestelmä (engl. Antilocking Brake System, ABS) sisältää jokaiselle renkaalle oman pyörimisnopeuden anturin, joten renkaiden pyörimisnopeuden mittaamiseen ei tarvitse asentaa erillisiä antureita. Skog et al. [25] tutkielman mukaan antureiden mittauksiin aiheutuu virheitä renkaiden sutimisesta, liukumisesta, epätasaisesta tiestä, renkaiden halkaisijan muutoksista, renkaiden välisistä kokoeroista, akselivälin epävarmuustekijöistä ja anturien mittaustarkkuudesta. [25] Suomen olosuhteissa virheisiin vaikuttavat teiden liukkaus talvella, suuret lämpötilanvaihtelut sekä erillisten kesä- ja talvirenkaiden käyttö.

Paikannusmenetelmien yhdistäminen

Eri paikannusmenetelmien tulokset ovat erilaisia niin tarkkuuden, saatavien parametrien kuin virheidenkin osalta. Yhdistämällä paikannusmenetelmiä pystytään toisien menetelmien heikkouksia kompensoimaan toisien menetelmien tuloksilla. Paikannusmenetelmien yhdistämisessä hyödynnetään eri menetelmillä saatujen tuloksien virheiden malleja, jolloin saadaan suodatettu yksittäisten menetelmien tulosta parempi kokonaistulos. Monet virheistä ovat epälineaarisia ja tulokset ovat kolmiulotteisia, jonka takia epälineaarisen ongelman ratkaisuun vaaditaan paljon laskentatehoa. [14, luku 6][25]

Gleason et al. [14, luku 6] käyttävät extended Kalman filter (EKF) -menetelmää GNSS ja INS tuloksien yhdistämiseen. Skog et al. [25] esittelee EKF-menetelmän lisäksi uncentred Kalman filter ja particle filter -menetelmät. Menetelmissä on järjestelmän malli ja mittausmalli, jonka perusteella mitatut arvot vaikuttavat järjestelmän mallin tilaan. Yksinkertaisin tapa, yhdistää muita menetelmiä satelliittinavigoinnin kanssa, on olettaa satelliittinavigoinnista saadut tulokset tarkoiksi. Tällöin ei saavuteta satelliittinavigointijärjestelmää parempaa paikannustarkkuutta, mutta muiden menetelmien mittauksien avulla saadaan parannettua paikannustiheyttä ja pystytään laajentamaan navigointi satelliittinavigointijärjestelmän katvealueille. Toinen tapa on mallintaa myös satelliittinavigoinnin virheet, jolloin

saavutetaan parempi paikannustarkkuus ja paikannustiheys, mutta tarvitaan monimutkaisempi mittausmalli ja enemmän laskentatehoa navigointituloksen selvittämiseen. [14, luku 6][25]

Tuloksien suodattamisessa voidaan soveltaa myös rajoitteita, joilla suodatetaan tuloksia, jotka eivät täytä rajoitteiden ehtoja. Ajoneuvojen tapauksessa voidaan soveltaa pystysuuntaisten liikkeiden ja kiihtyvyyksien rajoitteita, koska nämä ovat yleensä pieniä. Lisäksi voidaan hyödyntää map matching -menetelmää, jossa paikantimen oletetaan olevan tiellä ja mittaustulokset sijoitetaan kartassa lähellä oleville teille. [14, luku 12]

3.2.2 Tiedonsiirto

Seurantalaitteen langattomaan tiedonsiirtoon voidaan käyttää internet yhteyden mahdollistavia yhteyttä tai yksinkertaisia esineiden internetiin (engl. Internet of Things, IoT) tarkoitettuja yhteyksiä. Palvelinympäristössä on valmiina internet yhteyden mahdollistava yhteys. Internet yhteyden mahdollistavissa menetelmissä voidaan hyödyntää monipuolisesti erilaisia protokollia ja niiden tarjoamia rajapintoja. IoT käyttöön tarkoitetuissa yhteyksissä on monesti valmiina yksinkertainen protokolla ja tiedot siirtyvät palveluntarjoajalle, joka välittää tiedot lopulliseen kohteeseen. IoT verkkojen hyötynä on pienempi virrankulutus ja yksinkertaisempi protokolla, kun internet yhteyden mahdollistavissa yhteyksissä on yleensä suurempi tiedonsiirron kapasiteetti ja monipuolisemmat protokollamahdollisuudet. [6, 22]

Internetin tietoverkot käyttävät erilaisien protokollien pinoaa tietojen siirtoon laitteiden välillä. Protokollien pinoa kuvaavat ISO/IEC 7498-1 standardin mukainen OSI-malli ja suppeampi TCP/IP kerrosmalli. TCP/IP kerrosmalli on yleisimmin käytetty malli ja siinä on 4 kerrosta OSI-mallin 7 kerroksen sijaan. OSI-mallin istunto-, esitystapa- ja sovelluskerroksia vastaa TCP/IP mallissa yksi sovelluskerros, joka toteuttaa tarvittaessa myös OSI-mallin istunto- ja esitystapakerroksien vaatimukset. Lisäksi OSI-mallin siirtoyhteyserros ja fyysinen kerros ovat yhdistetty yhdeksi linkkikerrokseksi. Linkkikerroksen ja sovelluskerroksen välissä ovat verkkokerros, jonka toteuttaa yleensä Internet-protokolla (IP), ja kuljetuskerros, jonka toteuttaa joko yhteydellinen TCP (Transmission Control Protocol) tai yhteydetön UDP (User Datagram Protocol). Protokollapinossa alimmainen kerros huolehtii fyysisestä tiedonsiirrosta. Ylemmät protokollat käyttävät alemman protokollan tarjoamaa palvelua ja tarjoavat omaa palveluaan ylemmälle protokollalle. Saman kerroksen protokollien välillä on looginen tiedonsiirronyhteys, joka tarjoaa yhteyden päätepisteiden välille. [2, 18]

Paikannuslaitteen ja palvelimen välisen tiedonsiirron toteutukseen käydään läpi kaksi erilaista vaihtoehtoa. Ensimmäinen vaihtoehto on hyödyntää TCP/IP kerrosmallin mukaista arkkitehtuuria, johon valitaan linkkikerroksen toteuttava tekniikka, kuljetuskerroksen protokolla ja sovelluskerrokselle tulevat protokolla. Toinen vaihtoehto on hyödyntää IoT-verkkoja, jotka eivät tue IP-protokollaa, vaan toimittavat lähetetyt tiedot palveluntar-

joajan palvelun kautta. Palvelimella käytetään TCP/IP kerrosmallin mukaista verkkoyhteyttä, joka on valmiiksi saatavilla erilaisissa palvelinympäristöissä. Paikannuslaitteessa käytetään, linkkikerroksen tekniikasta riippuen, joko TCP/IP kerrosmallin mukaista verkkoyhteyttä tai tiedot toimitetaan verkkoyhteyden palveluntarjoajan palvelun kautta. IP-protokollaa tukevia linkkikerroksen tekniikoista käydään läpi matkapuhelinverkkoyhteydet ja NB-IoT-verkko. IoT verkoista käydään läpi LoRaWAN-, Sigfox- ja NB-IoT-verkot. NB-IoT-verkko mahdollistaa sekä IP-protokollalla tapahtuvan tiedonsiirron että ilman IP-protokollaa tapahtuvan tiedonsiirron palveluntarjoajan kautta. Kuljetuskerrokselle voidaan valita joko TCP tai UDP. TCP huolehtii lähetetyn datan perillemenosta ja järjestyksen säilymisestä, jolloin lähettäjä saa tietää paketin perillemenosta. UDP ei huolehdi datapaketin järjestyksen säilymisestä eikä perillemenosta, vaan luotettavuus vaatimukset täytyy toteuttaa sovelluskerroksella. Sovelluskerrokselle tulee erilaisia protokollia, joilla suoritetaan tunnistautuminen, salaus ja viestin sisällön paketointi. Sovelluskerroksen protokollia tarvitaan myös IoT-verkkojen kautta tapahtuvalle tiedonsiirrolle.

Suomen alueella kattava langaton tiedonsiirtoyhteys saadaan käyttämällä matkapuhelinverkkoa. Eri matkapuhelinverkkojen sukupolvet tarjoavat erilaisia tekniikoita TCP/IP-protokollapinon mukaisen tiedonsiirtoyhteyden linkkikerrokselle. Toisen sukupolven (2G) verkossa toimivalla GPRS-tekniikalla (engl. General Packet Radio System) saavutetaan teoreettiseksi tiedonsiirron maksiminopeudeksi 172 kbps (kilobittiä sekunnissa), mutta käytännössä tiedonsiirtonopeudet jäävät noin 40 kbps, koska verkon kapasiteetti jaetaan kaikkien verkon käyttäjien kesken. Niin kutsutussa 2.5G verkossa toimivalla EDGE-tekniikalla (engl. Enhanced Data rates for GSM Evolution) saavutetaan jopa 384 kbps tiedonsiirtonopeus, kolmannen sukupolven (3G) verkossa toimivalla WCDMA-tekniikalla (engl. Wideband CDMA) jopa 384 kbps ja niin kutsutussa 3.5G verkossa toimivilla HSDPA- ja HSUPA-tekniikoilla (engl. High-Speed Downlink/Uplink Packet Access) saavutetaan 14.4 Mbps lataus- ja 5.76 Mbps lähetysnopeus. LTE-tekniikalla (engl. Long Term Evolution), joka määrittelystä riippuen lukeutuu joko kolmanteen tai neljännenteen sukupolveen, saavutetaan 100 Mbps lataus- ja 50 Mbps lähetysnopeus. [24]

Eri operaattorien toisen sukupolven (2G) matkapuhelinverkot kattavat lähes koko Suomen alueen lukuun ottamatta harvaan asutuilla alueilla ja Lapissa olevia katvealueita. Myös kolmannen ja neljännen sukupolven verkot, joilla saavutetaan parempi tiedonsiirron kapasiteetti, kattavat suurimman osa Suomen asutuista alueista. Toisen sukupolven verkko on kattavin eikä sen katvealueilla ole yleensä saatavilla myöskään kolmannen tai neljännen sukupolven verkkoja, minkä takia eri sukupolvien verkkoja tukevalla laitteella ei saavuteta merkittävästi parempaa kattavuutta toisen sukupolven verkkoon verrattuna. [11, 12, 27] Sijaintitietojen välitykseen tarvittavan suhteellisen vähäisen tiedonsiirtokapasiteetin takia kaikki matkapuhelinverkkoa käyttävät tiedonsiirto tekniikat soveltuvat paikannuslaitteen käyttöön.

Eryteisesti IoT-laitteita varten suunnitellut Suomessa toimivat tiedonsiirtoverkkoja ovat Digtan ylläpitämä LoRaWAN-verkko, Connected Finlandin ylläpitämä Sigfox-verkko ja matkapuhelinoperaattoreiden NB-IoT-verkot. IoT verkkojen kattavuus keskittyy asutuskes-

kuksiin eikä kattavuus vuoden 2019 alussa ole riittävä Suomen tieverkon alueella tapahtuvaan reaaliaikaiseen viestintään. [7, 10, 27] Mainitut IoT verkot ovat alhaisen virrankulutuksen laajan alueen verkkoja (engl. Low Power Wide Area Network, LPWAN), joista NB-IoT toimii lisensoituilla taajuuksilla ja LoRaWAN sekä Sigfox toimivat vapaassa käytössä olevilla sub-GHz taajuuskaistoilla. NB-IoT-verkossa voidaan käyttää myös IP-protokollalla tapahtuvaa TCP/IP-protokollapinon mukaista tiedonsiirtoa. IoT verkkojen tiedonsiirron viiveet ovat suurempia kuin matkapuhelinverkkojen. LoraWAN verkossa viestin koko sisältä on maksimissaan 243 tavua ja tiedonsiirron nopeus on vähintään 37 tavua sekunnissa. Sigfox verkossa lähetettävien viestien sisällön koko on maksimissaan 12 tavua ja lähetettävien viestien määrä on rajattu 140 viestiin päivässä. NB-IoT verkossa lähetettävien viestien sisältö on maksimissaan 1600 tavua ja tiedonsiirron lähetysnopeus on 20 kilotavua sekunnissa. [22]

Linkkikerroksen päällä toimivat TCP/IP-kerrokselliset verkkokerros, kuljetuskerros ja sovelluskerros. Verkkokerroksella toimiva IP huolehtii pakettien reitittämisestä ja toimittamisesta päätepisteiden välillä, mutta ei takaa pakettien perillepääsyä. Paketin otsikko sisältää tiedon lähettäjän ja kohteen IP-osoitteista, joiden perusteella paketit reititetään ja vastaukset osataan toimittaa takaisin lähettäjälle. Kuljetuskerroksella käytetään porttumeroita erottamaan samassa IP-osoitteessa toimivat eri ohjelmat toisistaan. Kuljetuskerroksella toimiva protokolla valitaan sen mukaan, kuinka luotettava tiedonsiirtoyhteys kuljetuskerrokselta halutaan. TCP muodostaa yhteyden kohteeseen ennen tiedon lähettämistä ja tieto jaetaan järjestysnumerolla varustettuihin paketteihin, joista vastaanottaja pystyy järjestysnumeroiden perusteella purkamaan tiedon alkuperäisessä järjestyksessä. TCP huolehtii myös pakettien kuitaamisen vastaanotetuiksi ja lähettää epäonnistuneet paketit uudelleen. UDP on yhteydetön protokolla, jossa paketti lähetetään kohteeseen, eikä paketista huolehdita lähetyksen jälkeen. Jos paketin perillemeno halutaan varmistaa, täytyy pakettien kuitaus ja uudelleenlähetykset toteuttaa sovelluskerroksella. [2]

Sovelluskerrokselle tulee valita salauksen protokolla ja sijaintitietojen esitysmuoto. IP-yhteyttä käyttävissä tiedonsiirroissa sovelluskerrokselle tulee valita lisäksi kuljetuskerroksen päällä toimiva protokolla. Palveluntarjoajien palvelujen kautta toimivissa IoT-verkoissa on valmiina sisällönvälityksen protokolla, jonka avulla pystytään välittämään halutun muotoista salattua sisältöä. Sovelluskerroksen tiedonsiirto voidaan toteuttaa standardinmukaisilla sovellusprotokollilla, jolloin voidaan hyödyntää protokollat tarjoavia ohjelmistoja ja kirjastoja, tai toteuttaa oma paketointi kuljetuskerroksen protokollan avulla. Valmiita protokollia ovat esimerkiksi HTTP, WebSocket ja MQTT. HTTP on internetissä paljon käytetty protokolla, mutta sen huonona puolena on suuresta otsikkotietojen koosta johtuva huono hyötykuorman osuus kokonaistiedonsiirrosta, varsinkin pienien pakettien lähetyksessä. HTTP tiedonsiirrossa voidaan käyttää lohkotettua tiedonsiirtoa (engl. chunked), joka mahdollistaa ennalta määräämättömän kokoisen sisällön lähettämisen [13]. Lohkotettua tiedonsiirtoa käyttämällä pystytään lähettämään useita sijaintitietoja peräkkäin samassa HTTP paketissa, mutta palvelin pystyy kuitaamaan vain HTTP paketin kokonaisuudessa vastaanotetuksi, ei yksittäisiä sijaintitietoja. WebSocket on HTTP yhteensopiva kaksisuuntaisen tiedonsiirron mahdollistava protokolla, jossa muodostetaan yhteys

HTTP muotoisella otsikolla ja yhteyden muodostamisen jälkeen käytetään avattua yhteyttä WebSocket-pakettien, joissa on vain lyhyt otsikkotieto, välittämiseen molempiin suuntiin. WebSocket-yhteydessä saavutetaan huomattavasti parempi hyötykuorman osuus, jos samaa yhteyttä käytetään useiden pakettien välittämiseen, koska HTTP yhteensopivat otsikot lähetetään vain kerran ja pakettien mukana lähetetään vain huomattavasti pienemmät WebSocket otsikkotiedot. MQTT on julkaisija-tilaaja-tyyppinen IoT käyttöön soveltuva kevyt protokolla. Julkaisija-tilaaja-mallissa tiedon tuottajat julkaisevat tiedon kanavalla ja tieto välitetään kaikille kanavan tilaajille. MQTT ei ole HTTP yhteensopiva, joka rajoittaa mahdolliset verkkopalvelun palveluntarjoajat niihin, jotka tarjoavat mahdollisuuden MQTT:n käyttöön. MQTT saavuttaa yksittäisiä paketteja käytettäessä parhaan tiedonsiirron hyötykuorman osuuden, mutta samalla yhteydellä tapahtuvassa useiden pakettien välityksessä WebSocket saavuttaa paremman tiedonsiirron hyötykuorman. [8, 17]

Salauksessa voidaan hyödyntää IoT-verkon mukaista salausta, internet yhteyksissä tavallisesti käytettävää tiedonsiirron TLS (engl. Transport Layer Security) salausta tai salata pelkästään lähetettävä tieto. IoT-verkkojen tarjoamat salaukset on suunniteltu käytettäväksi IoT-laitteissa, jonka takia niiden suorituskykyvaatimukset ovat alhaisia. Kaikki IoT-verkot eivät kuitenkaan tarjoa salausta, jolloin tiedon salaus täytyy toteuttaa erikseen. TLS salauksessa kuljetuskerroksen ja sovelluskerroksen välissä suoritetaan salaus symmetrisellä salauksella. TLS kättely vaatii suhteellisen paljon laskentatehoa ja vaatii palvelimen julkisen avaimen tuntemisen tai palvelimen varmenteen allekirjoittajan julkisen avaimen tuntemisen. TLS kättely ja varmenteiden varmistaminen ovat hankalia toteuttaa yksinkertaisilla alustoilla, jonka takia TLS salausta ei monesti käytetä IoT laitteiden kommunikoinnissa. Pelkän lähetettävän tiedon salaukseen voidaan hyödyntää erilaisia standardinmukaisia salauksia, kuten LoRaWAN-verkon käyttämää 128-bittistä AES (Advanced Encryption Standard) salausta [6] tai TLS salaus standardiin sisältyviä 128- ja 256-bittisiä AES salauksia CBC (Cipher Block Chain) tyyppisellä ketjutuksella. AES ja CBC ovat paljon käytettyjä menetelmiä, joille löytyy tuki tai valmiita kirjastoja useimmille ohjelmointikielille.

3.2.3 Tietovarastot

Ajoseurantajärjestelmässä tarvitaan tietovarastoja paikannustiedon väliaikaiseen säilömiseen paikannuslaitteessa tiedonsiirron epäonnistuessa, paikannuslaitteiden tunniste-, salaus- ja paikannustietojen sekä rajapinnan käyttäjätunnuksien ja käyttöoikeuksien tallentamiseen. Paikannuslaitteessa voidaan hyödyntää EEPROM- tai FLASH-muisteja, joista EEPROM-muisteja löytyy sisäänrakennettuina monista komponenteista ja suurempia FLASH-muisteja voi olla monipuolisemmissa komponenteissa tai voidaan käyttää ulkoisia FLASH-muisteja kuten muistikortteja.

Verkkopalvelimen tietovaraston täytyy mahdollistaa tietojen hakeminen määritettyjen ehtojen mukaan. Erilaiset tietokannat mahdollistavat tiedon jäsentämisen muotoon, jossa hakuehtojen mukaiset tietojen haut voidaan suorittaa nopeasti suurestakin tietomäärästä.

Tietovarastoksi soveltuvat hyvin erilaiset relaationaaliset tietokannanhallintajärjestelmät (engl. Relational Database Management System, RDBMS), joiden avulla pystytään hallitsemaan helposti eri tietojen välisiä riippuvuuksia. Toinen vaihtoehto on erilaiset NoSQL (engl. Not Only SQL) tietokannat, jotka voivat olla esimerkiksi avain-arvo- tai dokumentti-tietokantoja. Relationalisille tietokannanhallintajärjestelmille löytyy suoraan tuki monista verkko-ohjelmointikehyksistä, jonka takia niitä on helppo hyödyntää. NoSQL-tietokannat suoriutuvat tehokkaasti suurista määristä tietojen lisäyksiä ja hakuja. [29]

Monissa tietokannanhallintajärjestelmissä ja NoSQL tietokannoissa on tuki paikkatietojärjestelmälaajennoksille, tai on saatavilla paikkatietojärjestelmälaajennoksen toteuttava lisäosa. Paikkatietojärjestelmälaajennoksen avulla pystytään suorittamaan tietokannassa erilaisia paikkatieto-operaatioita, kuten paikkatietomuunnoksia, paikkatietojen yhdistämisiä tai hakuja paikkatietojen ominaisuuksien perusteella. Paikkatietojärjestelmälaajennoksen avulla paikkatietojen käsittely voidaan suorittaa tietokannassa, jolloin rajapinnan ei tarvitse nousta ja käsitellä suuria määriä tietokannasta haettua tietoa. Hajautetuissa järjestelmissä tietokannan ja rajapinnan välinen tiedonsiirron nopeus voi olla rajattua, jonka takia niiden välillä ei kannata siirtää ylimääräistä tietoa.

3.3 Komponentit

Ajoseurantajärjestelmän koostuu ajoneuvoihin tulevista paikannuslaitteista ja palvelimesta, joista molemmat koostuvat useammista komponenteista. Tässä luvussa käydään läpi erilaisia vaihtoehtoisia komponentteja, joita voidaan hyödyntää järjestelmän toteuttamisessa ja joista valitaan lopulliseen toteutukseen soveltuvat komponentit. Yksittäiset komponentit voivat toteuttaa yhden tai useamman paikannuslaitteen tarvitseman ominaisuuden ja komponentit toteuttavat yhdessä koko järjestelmän.

3.3.1 Paikannuslaite

Paikannuslaite koostuu paikannuksen vastaanottimesta, tiedonsiirtoyhteydestä ja tallennustilasta sekä kontrollerista, joka suorittaa paikannuslaitteen toimintalogiikan ja eri komponenttien välisen kommunikoinnin. Paikannuksen toteutuksessa vaaditaan absoluuttisen paikannuksen toteuttava GNSS-komponentti. Tässä vaiheessa ei käydä läpi relatiivisia paikannusmenetelmiä hyödyntäviä komponentteja, koska niiden käyttäminen GNSS kanssa lisää paikannuslaitteen kustannuksia eikä niille ole välttämättä tarvetta paikannuslaitteessa. Tiedonsiirron toteuttavista komponenteista käydään läpi matkapuhelinverkossa tapahtuvan tiedonsiirron mahdollistavia ja NB-IoT-tiedonsiirron mahdollistavia komponentteja. Sigfox- ja LoRaWAN-verkkojen tiedonsiirto ei ole riittävä paikannuslaitteen tarpeisiin. Tallennustilan osalta käydään läpi erilaisia EEPROM- ja FLASH-muisti-vaihtoehtoja.

Paikannuslaitteessa voidaan käyttää monenlaisia kontrollereita. Kontrollerilta vaaditaan

riittävä suorituskky eri komponenttien hallintaan ja kerättyjen sijaintitietojen käsittelyyn lähettämistä varten. Kontrollerille valmiiksi löytyvät kirjastot, eri komponenttien hallintaan, helpottavat ohjelmointia. Kontrollerin sisältävän komponentin täytyy mahdollistaa muiden komponenttien kytkeminen tai sisältää myös muut tarvittavat toiminnallisuudet samassa komponentissa. Tässä työssä vaihtoehdoiksi otetaan Arduino mikrokontrollerialusta ja Raspberry Pi yhden piirilevyn tietokone. Arduino alustaan löytyy paljon erilaisia lisälevyjä, jotka voidaan kytkeä suoraan Arduinon liitinrimoihin. Myös Raspberry Pi tietokoneen liitinrimoihin on saatavilla erilaisia lisälevyjä. Arduino alustassa on ohjelmoitava mikrokontrolleri, johon suoritettava ohjelma ohjelmoidaan. Raspberry Pi:ssä ohjelma ajetaan käyttöjärjestelmässä, joka mahdollistaa monipuoliset ohjelmointimahdollisuudet. Arduinon suorituskky on hyvin rajoitettu Raspberry Pi:n suorituskkyyn verrattuna, mutta Arduinon suorituskky on riittävä paikannuslaitteen toteutukseen ja virrankulutus on alhaisempi.

Paikannuksen toteuttamiseen on saatavilla monenlaisia globaalien satelliittinavigoinnin mahdollistavia komponentteja, joista osa tukee useita eri järjestelmiä ja osa ainoastaan GPS järjestelmää. Komponentteja on saatavilla sekä johdoilla kytkettävänä versioina että valmiina Arduinolle tai Raspberry Pi:lle sopivina lisälevyinä. Saatavilla on myös moduuleja, joissa on tuki sekä tiedonsiirrolle että satelliittipaikannukselle. Tällaisia ovat esimerkiksi SIMCom SIM808-, SIM908- ja SIM7000E-moduulit. Tuotetut tiedonsiirto ja satelliittipaikannusjärjestelmät vaihtelevat versioiden välillä, ja vastaavanlaisia moduuleita on saatavilla myös muilta valmistajilta.

Tiedonsiirron toteutukseen on saatavilla myös erilaisia komponentteja, joiden tuetut verkot vaihtelevat. Pelkän tiedonsiirtoyhteyden tarjoavia komponentteja ovat esimerkiksi Ai Thinker A6 ja SIMCom SIM800H. Saatavilla on myös kontrollerin sisältäviä Arduino yhteensopivia piirejä, kuten Adafruit Feather 32u4 FONA ja DFRobot SIM808 with Leonardo mainboard, joka sisältää myös satelliittipaikannuksen.

Paikannuslaitteen tallennustilaan voidaan käyttää EEPROM- tai FLASH-muistia. Monet komponentit sisältävät valmiiksi muistia, jonka takia ei välttämättä tarvita erillistä komponenttia muistia varten. Esimerkiksi Arduinoissa käytettävät mikrokontrollerit sisältävät pienen määrän EEPROM-muistia ja SIM808 sisältää FLASH-muistia. Raspberry Pi:ssä käyttöjärjestelmä asennetaan muistikortille, jonka ylimääräistä kapasiteettia käytetään tallennustilana. FLASH-muistia voidaan lisätä myös erillisillä muistikorteilla, joiden käyttäminen löytyy kirjasto Arduinolle.

3.3.2 Palvelin

Palvelimelle pitää valita palvelinalusta, jossa suoritetaan palvelimen tietovarastot ja rajapinnat toteuttavat komponentit. Palvelinalusta voi olla fyysinen tai virtuaalinen palvelinympäristö, sovelluspalvelualusta tai ulkopuolisen palveluntarjoajan ohjelmakokonaisuus. Palvelinympäristössä pystytään määrittämään monipuolisesti erilaisia palvelimien resursseja, mutta palvelujen sovellusalustojen pystyttäminen ja ylläpito jäävät käyttäjän

vastuulle. Sovelluspalvelualusta voi olla yksittäisten ohjelmistojen ajamisen mahdollista-va alusta tai mikropalvelualusta. Mikropalvelualustassa voidaan ajaa palvelun kompo-nentteja erillisinä mikropalveluina, jotka pystyvät kommunikoimaan keskenään. Ulkopuo-lisen palveluntarjoajan ohjelmakokonaisuutta käytettäessä ohjelman toteutuksesta ja yl-läpidosta huolehtii ulkopuolinen palveluntarjoaja, jolle maksetaan korvausta käytöstä. Eri-tasoisia palveluita on saatavilla useilta palveluntarjoajilta ja palvelukokonaisuus on mah-dollista hajauttaa myös usean palveluntarjoajan alustoille. Palvelinalustaksi valitaan käy-tettävien komponenttien, halutun palvelutason ja kustannuksien perusteella sopiva vaih-toehto eri palveluntarjoajien vaihtoehtoista.

Palvelimen tietovarastojen toteuttamisessa voidaan hyödyntää perinteisiä relaatiotieto-kantoja tai NoSQL tietokantoja. Tietovaraston paikkatietojärjestelmälaajennos helpot-taa paikkatietojen käsittelyä, eikä tietoja tarvitse hakea tietovarastosta käsittelyä var-ten. Relatiotietokannanhallintajärjestelmiä paikkatietolaajennoksella ovat esimerkiksi PostgreSQL PostGIS-lisäosalla, MariaDB ja SQLite SpatialLite-lisäosalla. Paikkatietolaa-jennosta tukeva NoSQL tietokanta on esimerkiksi MongoDB. Lisäksi on saatavilla myös monenlaisia maksullisia tietokantoja.

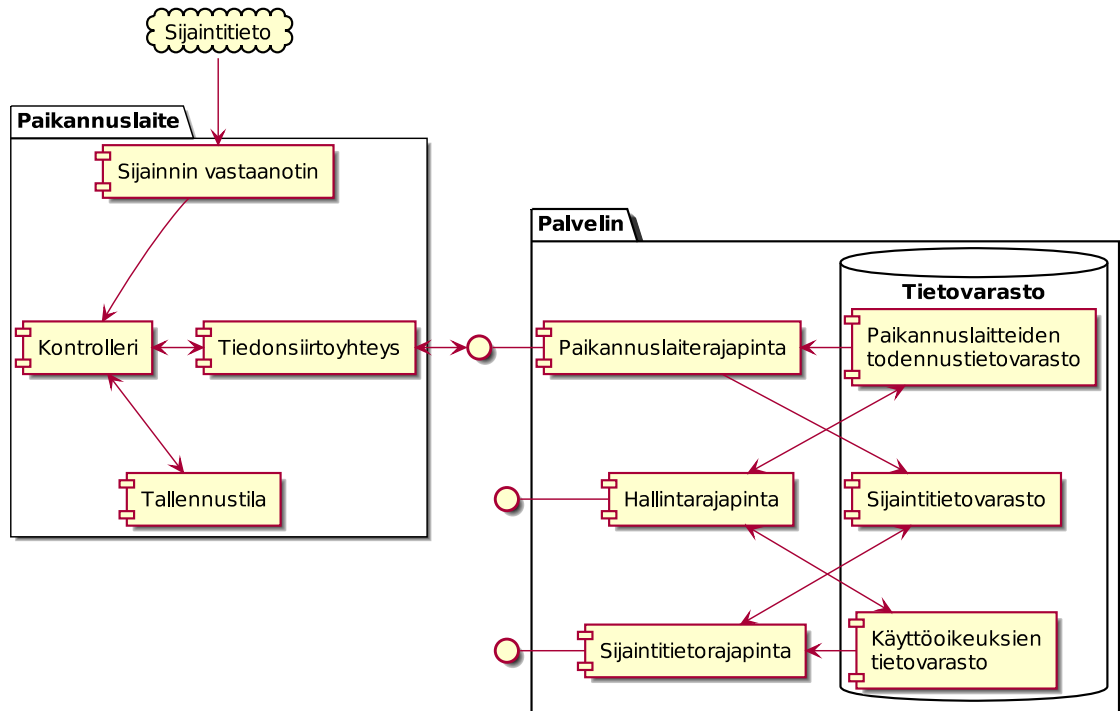
Palvelimen rajapintojen toteutuksessa voidaan hyödyntää erilaisia verkkosovelluskeh-yksiä (engl. web framwork), jotka sisältävät valmiiksi verkkoprotokollien toteutukset. Verk-kosovelluskehysiin on saatavilla monipuolisia lisäosia, joita voidaan hyödyntää suoraan, tai voidaan käyttää verkkosovelluskehysien tarjoamia perusominaisuuksia. Erilaisille ohjelmointikielille on saatavilla verkkosovelluskehysiä, esimerkiksi Node.js JavaScript-ohjelmointikielille, Django Python:lle, Symfony PHP:lle, Ruby on Rails Ruby:lle. Verkkosovelluskehysen valintaan vaikuttavat kehysen ja valmiiden lisäosien soveltuvuus kom-ponentin toteuttamiseen.

4 ARKKITEHTUURI

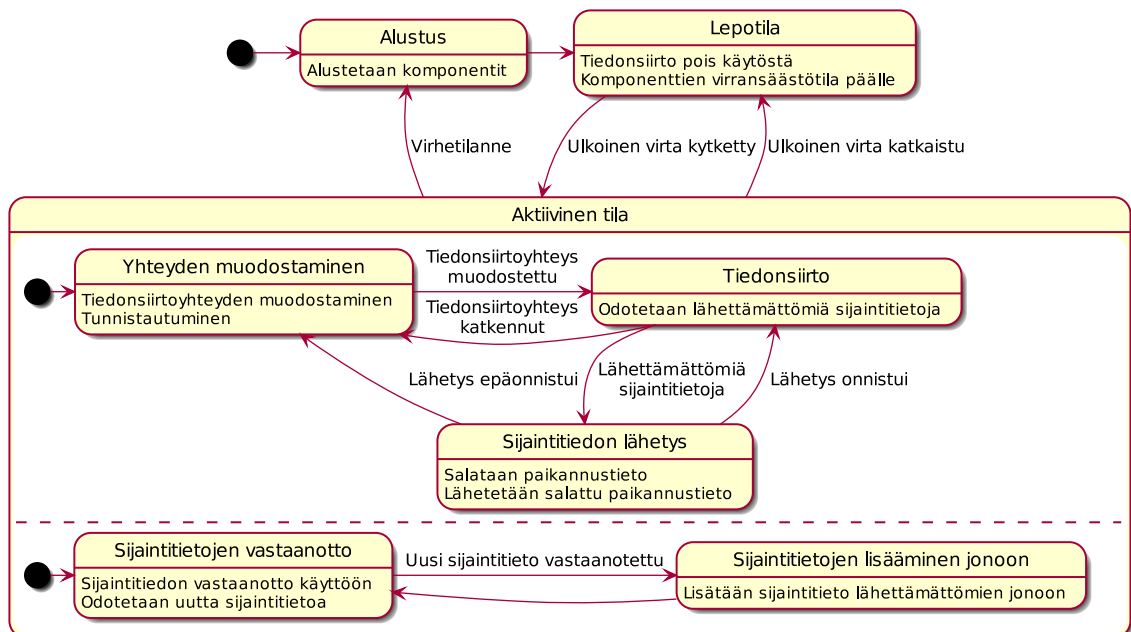
Ajoseurantajärjestelmän arkkitehtuuri toteutetaan yleiskäyttöiseksi, joka ei rajoita toteutusta tiettyihin komponentteihin, vaan toteutuksessa on mahdollista hyödyntää erilaisia komponentteja. Suunnitellun arkkitehtuurin mukainen toteutus antaa mahdollisuuden korvata komponentteja vastaavan toiminnallisuuden tarjoavilla komponenteilla. Komponenttien korvattavuuden ansiosta voidaan hyödyntää lopullisessa versiossa osia toteutuksesta, vaikka toteutettu kokonaisuus ei täyttäisikään järjestelmälle asetettuja vaatimuksia. Järjestelmä koostuu kahdesta pääkomponentista: paikannuslaitteesta ja palvelimesta. Paikannuslaite on fyysinen ajoneuvoon tuleva laite, joka suorittaa sijaintitietojen keräämisen ja toimittamisen palvelimelle. Palvelin on looginen kokonaisuus, joka huolehtii sijaintitietojen tallentamisesta ja tarjoamisesta rajapinnan kautta käyttäjille. Paikannuslaitteen komponentit sijaitsevat fyysisesti lähellä toisiaan. Palvelimen komponenttien fyysiselle sijoittelulle ei ole rajoitteita ja ne voivat olla hajautettuna fyysisesti eri sijainteihin. Ajoseurantajärjestelmän komponenttikaavio on esitetty kuvassa 4.1.

Paikannuslaite koostuu sijaintitiedon vastaanottimesta, tallennustilasta, tiedonsiirtoyhteydestä ja kontrollerista. Kontrolleri huolehtii paikannuslaitteen eri komponenttien ohjauksesta ja tiedon välittämisestä paikannuslaitteen komponenttien välillä. Sijainnin vastaanotin suorittaa sijaintitiedon vastaanottamisen ja paikannuslaite voi sisältää myös useita erilaisia sijainnin vastaanottimia, joiden tiedot kontrolleri kerää. Tallennustilaa käytetään sijainnin vastaanottimelta vastaanotettujen sijaintitietojen vastaanottamiseen, jos sijaintitietojen toimittaminen tiedonsiirtoyhteydellä ei jostain syystä onnistu heti sijaintitiedon vastaanottamisen jälkeen. Tiedonsiirtoyhteyttä käytetään sijaintitietojen toimittamiseen salattuna palvelimen tarjoaman rajapinnan kautta palvelimen tietovarastoon.

Palvelin koostuu rajapinnat toteuttavista komponenteista sekä kolmeen osaan jaetusta tietovarastosta. Komponenttijaossa on selkeät komponenttien väliset riippuvuudet ja komponenttijako mahdollistaa palvelimen hajauttamisen. Kaikki palvelimen tarjoamat rajapinnat ovat salattuja tietojen luotettavuuden ja eheyden varmistamiseksi. Paikannuslaiterajapinta suorittaa paikannuslaitteiden toimittamien sijaintitietojen käsittelyn ja tietovarastoon tallentamisen. Paikannuslaiterajapinta hakee paikannuslaitteiden todennustietovarastosta tarvittavat tiedot paikannuslaitteen tunnistamiseen ja sijaintitiedon salauksen purkamiseen. Hallintarajapintaa käytetään järjestelmän paikannuslaitteiden hallintaan päivittämällä paikannuslaitteiden todennustietovaraston tietoja ja sijaintitiedon rajapinnan käyttäjien hallintaan päivittämällä käyttöoikeuksien tietovaraston tietoja. Sijaintitiedon rajapintaa käytetään sijaintitietojen hakemiseen sijaintitietovarastosta käyttöoikeuksien tietova-



Kuva 4.1. Ajoseurantajärjestelmän arkkitehtuuri



Kuva 4.2. Paikannuslaitteen ohjelman tilat

rastossa asetettujen käyttötunnuksien ja käyttöoikeuksien perusteella.

4.1 Paikannuslaite

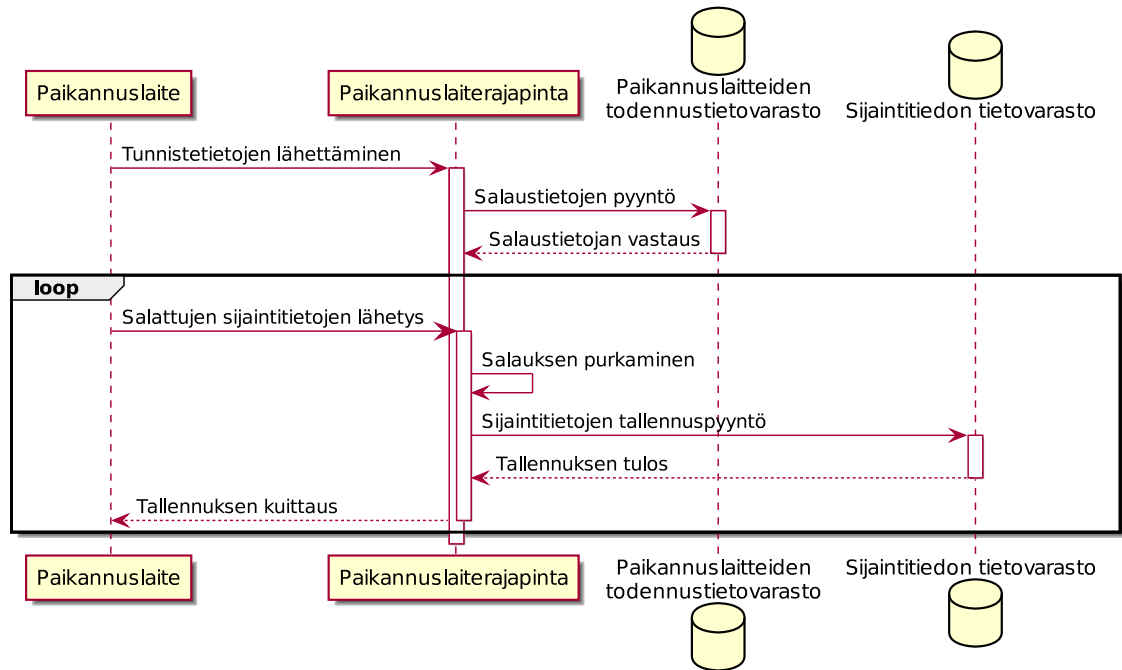
Paikannuslaitteen toiminta kuvataan kuvan 4.2 mukaiseksi tilakoneeksi. Tilakoneessa on mukana paikannuslaitteen oman varavirtalähteen avulla toimiva lepotila. Lepotilan ja aktiivisen tilan väliset siirtymät tehdään ulkoisen virtalähteen tilan perusteella. Jos paikannuslaitteessa ei ole omaa varavirtalähdettä, lepotila poistuu tilakoneesta ja alustuksen jälkeen siirrytään suoraan aktiiviseen tilaan. Aluksi suoritetaan laitteen ja komponenttien alustus toimintaa varten ja siirrytään lepotilaan. Lepotilassa paikannuslaitteen kontrolleri ja komponentit kytketään virransäästötilaan, välttämättömiä toimintoja lukuun ottamatta, virrankulutuksen minimoimiseksi. Välttämättömiä toimintoja voivat olla esimerkiksi ulkoisen virtalähteen tilan seuranta ja paikannuksen pitäminen päällä alkamisviiveen poistamiseksi. Lepotilan ansiosta alustusta ei tarvitse suorittaa ulkoisen virran kytkemisen jälkeen, jolloin paikannuksen alkamiseen ei synny viivettä.

Aktiivinen tila koostuu sijaintitietojen keräämisestä ja sijaintitietojen lähettämisestä, jotka suoritetaan rinnakkaisina toimintoja. Sijaintitietojen kerääminen vastaanottaa sijaintitietoja ja lisää sijaintitiedot lähettämättömien sijaintitietojen jonoon. Sijaintitietojen lähettäminen suorittaa tiedonsiirtoyhteyden muodostamisen ja sijaintitietojen lähettämisen lähettämättömien sijaintitietojen jonosta. Sijaintitietojen lähetyksen epäonnistumisen jälkeen muodostetaan uudelleen tiedonsiirtoyhteys. Jos tiedonsiirtoyhteys ei ole uudelleenkäytettävä, täytyy sijaintitiedon lähetyksen jälkeen siirtyä aina yhteyden muodostamiseen. Aktiivisessa tilassa seurataan mahdollisia virhetilanteita ja yritetään toipua virhetilanteista. Virhetilanteita voi olla esimerkiksi verkkoyhteyden epäonnistuminen tai paikannuksen kytkeytyminen pois käytöstä. Jos virhetilanteista ei pystytä toipumaan, siirrytään alustukseen alustamaan paikannuslaitteen komponentit uudestaan.

Paikannuslaitteen rajapinnan kautta tapahtuvan sijaintitietojen lähetyksen vaiheet näkyvät kuvan 4.3 sekvenssikaaviossa. Tiedonsiirtoyhteyden muodostamisessa suoritetaan tunnistetietojen lähettäminen, jonka perusteella palvelin tunnistaa paikannuslaitteen ja pystyy noutamaan sijaintitietojen salauksen purkamiseen tarvittavat tiedot. Yhteyden muodostamisen jälkeen paikannuslaite lähettää palvelimelle salattuja sijaintitietoja, jotka palvelin kuittaa vastaanotetuiksi.

4.2 Palvelin

Palvelimen toiminnallisuuden toteuttavat kolme rajapintakomponenttia ja kolme tietovarastokomponenttia. Rajapinnat on jaettu paikannuslaiterajapintaan, hallintarajapintaan ja sijaintitietorajapintaan. Tietovarasto on jaettu paikannuslaitteiden todennustietovarastoon, sijaintitietovarastoon ja käyttöoikeuksien tietovarastoon. Paikannuslaiterajapinta tarjoaa paikannuslaitteille rajapinnan, jonka kautta paikannuslaitteet voivat toimittaa sijaintitietoja palvelimelle kuvan 4.3 sekvenssikaavion mukaisesti. Sekvenssikaaviossa olevan silmukkarakenteen toteuttaminen ei ole pakollinen osa rajapintaa, vaan tunnistetietojen

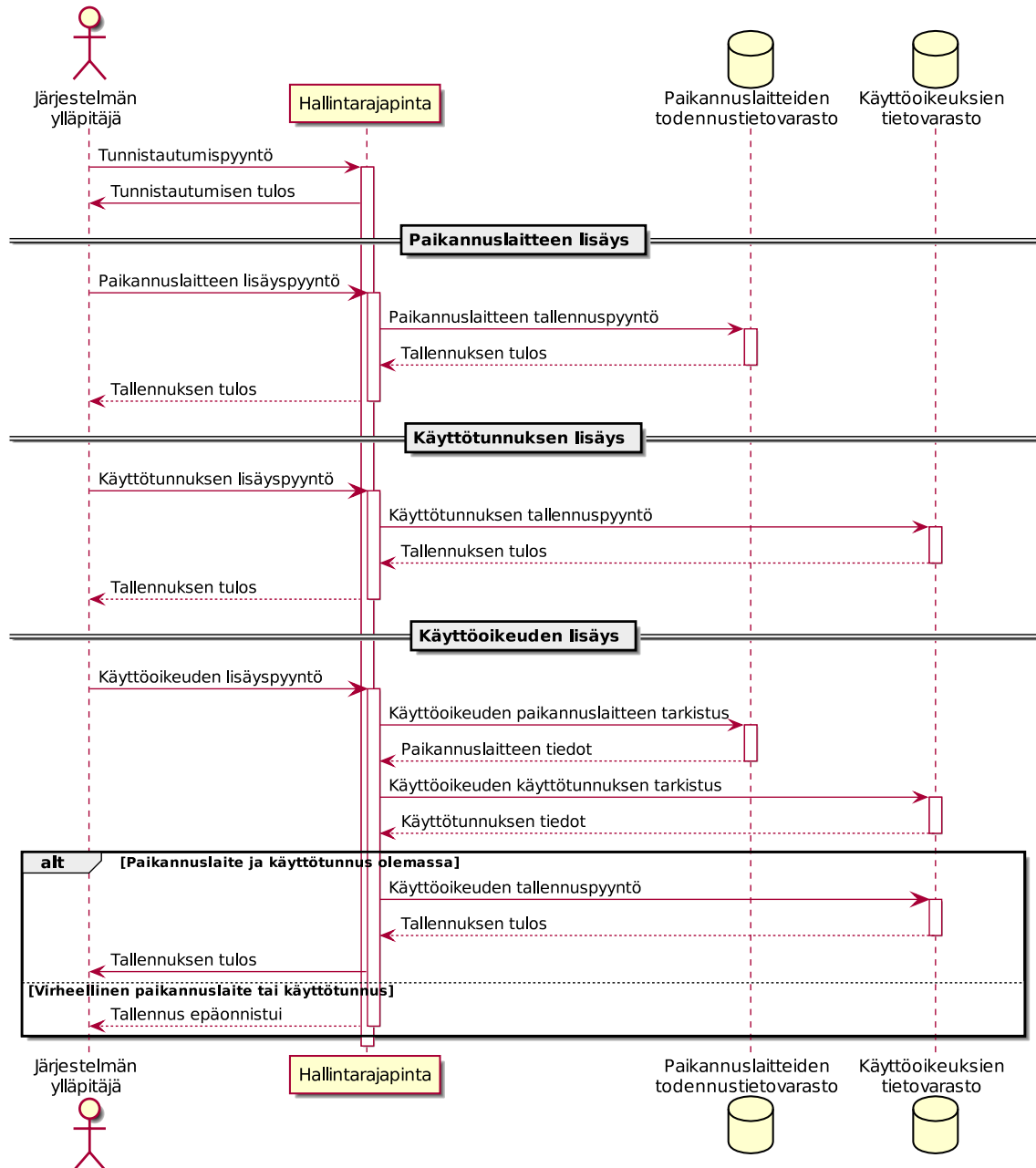


Kuva 4.3. Paikannuslaiterajapinnan toiminta

lähetyks voidaan suorittaa erikseen jokaisen sijaintitiedon lähetyksen yhteydessä. Silmukkarakenteen ansiosta tunnistetietojen lähettäminen täytyy suorittaa ainoastaan ensimmäisen sijaintitiedon lähetyksen yhteydessä ja muut sijaintitiedot voidaan lähettää samalla yhteydellä, minkä ansiosta saavutetaan parempi hyötykuorman osuus tiedonsiirrosta, pienempi sijaintitietojen toimituksen viive ja pienempi tiedonsiirron kapasiteetin tarve.

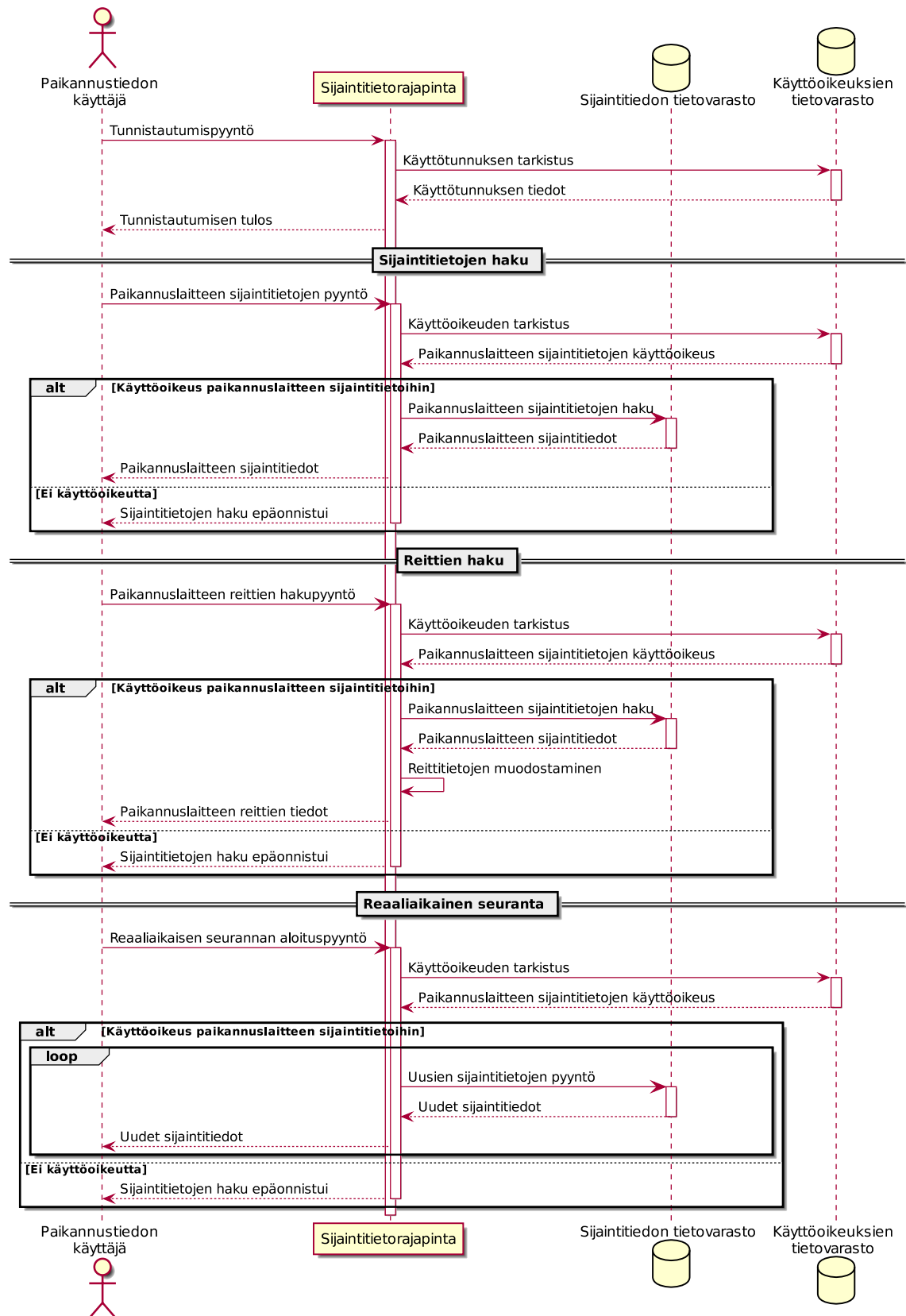
Hallintarajapinta tarjoaa järjestelmän ylläpitäjälle mahdollisuuden hallita järjestelmän paikannuslaitteita sekä sijaintitietorajapinnan käyttötunnuksia sekä käyttöoikeuksia. Järjestelmän ylläpitäjän ja hallintarajapinnan välinen yhteys on salattu siirrettävän tiedon luotettavuuden ja eheyden varmistamiseksi. Lisäksi rajapinta on suojattu palomuurilla palvelunestohyökkäyksiä varalta saatavuuden varmistamiseksi. Palomuurin avulla pystytään rajoittamaan suuren kuormituksen aiheuttavien asiakkaiden pyyntöjen määrää, jolloin palvelimen suorituskyky riittää paremmin muiden asiakkaiden pyynnöille. Ylläpitäjä aloittaa rajapinnan käyttämisen tunnistautumalla ylläpitäjän tunnuksilla järjestelmään, jonka jälkeen ylläpitäjä voi hallita paikannuslaitteita, käyttötunnuksia ja käyttöoikeuksia. Hallintarajapinnan toiminta on kuvattu kuvan 4.4 sekvenssikaaviossa, josta on selkeyden vuoksi jätetty pois muokkaus- ja poistopyynnöt, jotka toimivat samaan tapaan kuin lisäyspyynnöt. Paikannuslaitteiden hallinnassa ylläpitäjä lähettää lisä-, muokkaus- tai poistopyynnön rajapintaan, joka suorittaa toiminnon paikannuslaitteiden todennustietovarastoon ja palauttaa tuloksen. Käyttötunnuksien hallinta toimii muuten samaan tapaan paikannuslaitteiden hallinnan kanssa, mutta rajapinta suorittaa toiminnon käyttöoikeuksien tietovarastoon. Käyttöoikeuksien hallinnassa varmistetaan käyttöoikeuteen liittyvän paikannuslaitteen ja käyttötunnuksen olemassaolo ennen kuin toiminto suoritetaan käyttöoikeuksien tietovarastoon.

Sijaintitietorajapinta tarjoaa paikannustiedon käyttäjille rajapinnan paikannuslaitteiden si-

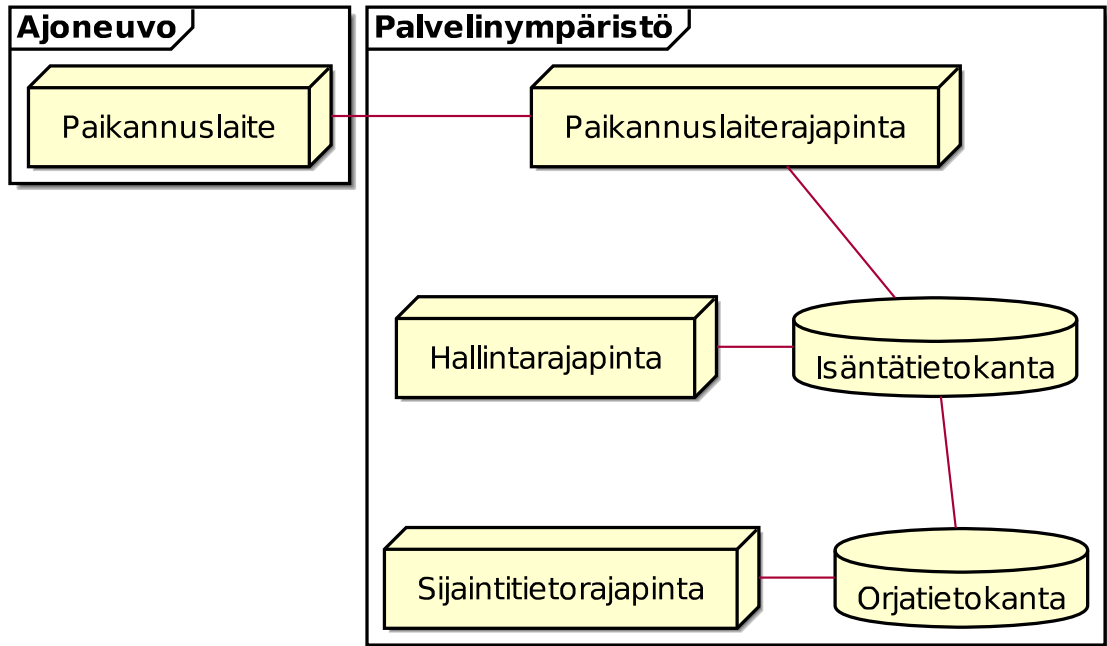


Kuva 4.4. Hallintarajapinnan toiminta

jaintitietojen ja reittien hakemiseen sekä sijaintitietojen reaaliaikaiseen seurantaan kuvan 4.5 mukaisesti. Paikannustiedon käyttäjä tunnistautuu järjestelmään käyttötunnuksilla. Sijaintitietorajapinta suorittaa käyttöoikeuden tarkistuksen käyttöoikeuksien tietovarastoon jokaisen käyttäjän pyynnön yhteydessä. Jos käyttäjällä ei ole käyttöoikeutta pyynnössä määritettyyn paikannuslaitteeseen, rajapinta palauttaa epäonnistumisen. Käyttöoikeuksien tarkistamisella estetään luvaton pääsy paikannuslaitteiden tietoihin, joihin käyttäjällä ei ole käyttöoikeutta. Sijaintitietojen haussa rajapinta palauttaa tietovarastosta paikannuslaitteen sijaintitiedot, jotka vastaavat pyynnössä annettuja rajoituksia. Reittien haussa rajapinta palauttaa sijaintitiedoista muodostetut reittitiedot. Reittien haku vähentää siirrettävän tiedon määrää ja sijaintitietojen käyttäjän ei tarvitse huolehtia reittien muodostamisesta eikä reitin pituuden laskemisesta. Jos sijaintitietojen tietovarasto tukee tietojen



Kuva 4.5. Sijaintitietorajapinnan toiminta



Kuva 4.6. Järjestelmän sijoittelukaavio

yhdistämistä paikkatietolaajennoksella, voidaan reittien muodostaminen suorittaa myös tietovarastossa, jolloin rajapinta palauttaa suoraan tietovaraston palauttamat reittitiedot. Reaaliaikaisessa seurannassa rajapinta odottaa tietovarastosta uusia paikannuslaitteen sijaintitietoja ja palauttaa ne käyttäjälle mahdollisimman pian tietovarastoon tallentamisen jälkeen. Uusien sijaintitietojen odottamista jatketaan silmukassa, kunnes käyttäjä lopettaa reaaliaikaisen seurannan.

4.3 Komponenttien sijoittelu

Kuvassa 4.6 on järjestelmän sijoittelukaavio. Paikannuslaite sijoittuu ajoneuvoon ja on jokaisessa ajoneuvossa yksi fyysinen laite. Palvelinympäristö voi olla fyysinen tai looginen kokonaisuus, jossa komponentit voivat olla hajautettuna ja monistettuna eri palveluntarjoajien alustoilla. palvelimen rajapintakomponentteja voidaan monistaa, mutta saatetaan tarvita erilliset kuormantasaajat jakamaan kuorma monistettujen instanssien kesken. Järjestelmä voi täyttää suorituskykyvaatimukset ilman hajauttamista, mutta vaatimuksien mukaisesti järjestelmää on pystyttävä skaalaamaan tarpeen mukaan.

Tietokanta on jaettu isäntä- ja orjatietokantaan, joissa kirjoitusoperaatiot voivat kohdistua ainoastaan isäntätietokantaan ja orjatietokantaan voi kohdistua ainoastaan lukuoperaatioita. Jaottelun avulla pystytään monistamaan orjatietokantoja tarpeen mukaan vaadittavan kyselykapasiteetin saavuttamiseksi. Tietokannassa voidaan hyödyntää myös muunlaisia menetelmiä riittävän kapasiteetin saavuttamiseksi, kuten tietokannan osiointia tai kuvan 4.1 mukaisien tietovarastojen jakamista erillisiin tietokantoihin.

Järjestelmä voidaan monistaa myös kokonaisuutena rinnakkaisiin järjestelmiin, jolloin tietyt paikannuslaitteet kuuluvat tiettyihin palvelinympäristöihin. Paikannuslaitteiden määrä jokaisessa rinnakkaisessa järjestelmässä voidaan määrittää suorituskyvyn mukaan ja sijaintitietorajapintaan lisätään kuormantasaaja, joka jakaa pyynnöt oikeaan rinnakkaisjärjestelmään paikannuslaitteen mukaan.

4.4 Käyttötapaukset

Järjestelmän käyttötapaukset jaetaan paikannuslaitteen suorittamiin käyttötapauksiin ja järjestelmän käyttäjien suorittamiin käyttötapauksiin. Paikannuslaitteen suorittamia käyttötapauksia ovat tiedonsiirtoyhteyden muodostaminen ja sijaintitietojen lähettäminen. Järjestelmän käyttäjien suorittamia käyttötapauksia ovat paikannuslaitteen käyttöönotto, käyttäminen ja käytöstä poisto, paikannustiedon käyttöoikeuksien lisääminen ja poistaminen sekä paikannustiedon hakeminen palvelimelta.

Tiedonsiirtoyhteyden muodostaminen

Paikannuslaite muodostaa tiedonsiirtoyhteyden paikannuslaiterajapintaan ennen kuin paikannuslaite voi toimittaa sijaintitietojen palvelimelle. Tiedonsiirtoyhteyden muodostamisessa suoritetaan tunnistaminen, jonka perusteella rajapinta pystyy varmistamaan paikannuslaitteen oikeellisuuden ja hakemaan tarvittavat tiedot salauksen purkamiseen todennustietovarastosta. Tiedonsiirtoyhteyden muodostamisen jälkeen paikannuslaite voi toimittaa salattuja sijaintitietoja palvelimelle.

Sijaintitietojen lähettäminen

Kun paikannuslaite on muodostanut tiedonsiirtoyhteyden ja paikannuslaitteella on lähettämättömiä sijaintitietoja, voi paikannuslaite lähettää lähettämättömät sijaintitiedot palvelimelle. Paikannuslaite suorittaa sijaintitietojen salaamisen palvelimelle lähettämisen yhteydessä. Palvelimen rajapinta purkaa salauksen, tallentaa sijaintitiedot tietovarastoon ja kuittaa sijaintitiedot tallennetuiksi.

Paikannuslaitteen käyttöönotto

Järjestelmän ylläpitäjä ohjelmoi paikannuslaitteen ja varmistaa laitteen toiminnan testausympäristössä erilaisilla testeillä. Kun paikannuslaitteen toiminta on varmistettu, ylläpitäjä ohjelmoi tunnistetiedot laitteelle ja lisää tunnistetiedot hallintarajapinnan kautta palvelimen todennustietokantaan, jonka jälkeen laite toimitetaan tarvittavien lisävarusteiden

ja kiinnitysvälineiden kanssa käyttäjälle. Käyttäjä asentaa laitteen ajoneuvoon ohjeiden mukaisesti ja laite on valmis käytettäväksi.

Paikannuslaitteen käyttäminen

Paikannuslaitteen käyttäjä ajaa ajoneuvolla, johon paikannuslaite on asennettu, haluttua reittiä pitkin matkan alkupisteestä matkan päätepisteeseen ja paikannuslaite lähettää automaattisesti paikannustiedot palvelimelle.

Paikannuslaitteen käytöstä poisto

Järjestelmän ylläpitäjä poistaa paikannuslaitteen tunnistetiedot hallintarajapinnan kautta todennustietokannasta, jonka jälkeen paikannuslaitetta ei voi käyttää ajoneuvon paikantamiseen. Paikannuslaitteen käyttäjä voi palauttaa laitteen, jolloin laite voidaan ohjelmoida uudelleen toisen käyttäjän käyttöön.

Paikannustiedon käyttöoikeuksien myöntäminen

Jos paikannustiedon käyttäjällä ei ole tunnuksia paikannustiedon rajapintaan, luo ylläpitäjä uuden tunnuksen hallintarajapinnan kautta ja toimittaa tunnuksen kirjautumistiedot paikannustiedon käyttäjälle. Ylläpitäjä lisää hallintarajapinnan kautta käyttöoikeuksien tietokantaan paikannustiedon käyttäjän tunnukselle käyttöoikeuden tiettyjen paikannuslaitteiden paikannustietoihin.

Paikannustiedon käyttöoikeuksien poistaminen

Ylläpitäjä voi poistaa paikannustiedon käyttäjältä kaikki paikannustiedon käyttöoikeudet poistamalla käyttäjän tunnuksen hallintarajapinnan kautta. Yksittäisten paikannuslaitteiden käyttöoikeuden poisto onnistuu hallintarajapinnan kautta poistamalla käyttäjän tunnukselta käyttöoikeuden kyseisen paikannuslaitteen paikannustietoihin.

Paikannustiedon hakeminen palvelimelta

Paikannustiedon käyttäjä pääsee paikannustiedon rajapinnan kautta omilla tunnuksilla käsiksi niiden paikannuslaitteiden paikannustietoihin, joihin käyttäjälle on annettu käyttöoikeus. Paikannustiedon käyttäjä pystyy rajapinnan kautta hakemaan paikannuslaitteiden tiedot, paikannuslaitteiden paikannustietoja sekä uusimmat paikannustiedot reaaliaikaisesta seurantaan varten.

5 TOTEUTUS

Tässä työssä toteutetaan prototyyppi ajoseurantajärjestelmästä, jonka pohjalta voidaan toteuttaa lopullinen ajoseurantajärjestelmä. Ajoseurantajärjestelmän toteutukseen valitaan ensin käytettävät tekniikat osan 3.2 perusteella ja käytettävät komponentit osan 3.3 perusteella. Toteutus noudattaa luvun 4 mukaista arkkitehtuuria. Toteutus on jaettu erikseen paikannuslaitteen ja palvelimen toteutuksiin.

Prototyypiversion toteutuksessa mahdollistetaan toteutuksessa käytettyjen komponenttien korvaaminen toisilla, jolloin pystytään hyödyntämään mahdollisimman paljon toteutettuja osia, vaikka prototyyppi ei täyttäisi annettuja vaatimuksia. Prototyypijärjestelmällä suoritetaan järjestelmän testaus, jonka perusteella tarkastellaan järjestelmän suoriutumista annettujen vaatimusten perusteella ja kartoitetaan lopulliseen versioon tarvittavat parannukset.

5.1 Paikannuslaite

Paikannukseen käytetään maailmanlaajuisia satelliittipaikannusjärjestelmiä, jotka tarjoavat paikannuksen riittävällä tarkkuudella. Muut paikannusjärjestelmät eivät ole riittävän tarkkoja tai eivät tarjoa absoluuttista paikannusta, minkä takia ne eivät sovellu yksinään paikannuksen toteuttavaksi tekniikaksi. Satelliittipaikannusjärjestelmät ovat maksuttomia käyttää, niiden käyttämisen mahdollistavia komponentteja on hyvin saatavilla ja kaikki vertailuun otetut valmiit ajoseurantajärjestelmät hyödyntävät myös satelliittipaikannusjärjestelmiä.

Tiedonsiirron verkkotekniikkana käytetään matkapuhelinverkossa toimivaa GPRS tiedonsiirtoyhteyttä. GPRS tarjoaa hyvän kattavuuden, halvat käyttökustannukset ja sijaintitietojen välittämiseen riittävän kapasiteetin. Suomessa saatavilla olevien IoT-verkkojen kattavuus ei ole riittävä ajoseurantajärjestelmää varten sekä tiedonsiirron viiveet ovat suurempia ja kapasiteetti pienempi verrattuna GPRS tiedonsiirtoon. GPRS tarjoaa TCP/IP mallin mukaisen linkkikerroksen, jolloin voidaan suorittaa paljon monipuolisempia toimintoja kuin IoT-verkoissa. IoT-verkoissa käytettävät protokollat ovat valmiina, kun GPRS verkkoa käytettäessä joudutaan valitsemaan käytettävät kuljetuskerroksen ja sovelluskerroksen protokollat.

Pysyvämuistin toteutukseen käytetään Flash-muistia, jolla saadaan edullisesti riittävä kapasiteetti sijaintitietojen väliaikaiseen tallentamiseen. Monet komponenteista sisältävät

Flash-muistia, jolloin laitteeseen ei välttämättä tarvita erillistä Flash-muistia. Flash-muistikortteja voidaan myös hyödyntää pysyväismuistin toteutuksessa.

Tiedonsiirron sovelluskerroksella käytetään kaksisuuntaisen tiedonsiirron mahdollistavaa HTTP yhteensopivaa WebSocket protokollaa [23]. WebSocket käyttää kuljetuskerroksella luotettavan tiedonsiirron tarjoavaa TCP-protokollaa. HTTP yhteensopivuuden ansiosta WebSocket protokollaa voidaan hyödyntää myös verkkopalveluissa, jotka eivät salli muita kuin HTTP ja HTTPS yhteyksiä. WebSocket protokollalle löytyy tuki useista verkkosovelluskehysistä, joten valinta ei rajoita palvelimen toteutustekniikan valintaa. Tiedonsiirrossa yksittäisten sijaintitietojen lähettämiseen käytetään samaa yhteyttä, jolloin WebSocket yhteydellä saavutetaan parempi hyötykuorman osuus kokonaistiedonsiirrosta kuin MQTT tai HTTP menetelmillä.

Sijaintitietojen salaukseen käytetään symmetristä AES (Advanced Encryption Standard) mukaista lohkosalausta CBC (Cipher Block Chaining) ketjutuksella. AES-CBC salaukseen löytyy toteutus useille ohjelmointikielille ja salaus vaatii vähän laskentatehoa, jonka ansiosta salausta voidaan hyödyntää myös yksinkertaisilla laitteilla. Jokaisella paikannuslaitteella käytetään eri salausavainta, jotka ovat paikannuslaitteen lisäksi palvelimen tiedossa. Eri salausavaimien avulla pystytään tunnistamaan laite, kun salauksen purkaminen onnistuu vain, jos tiedot on salattu samalla salausavaimella.

5.1.1 Valitut komponentit

Paikannuslaitteen alustaksi valittiin Arduino mikrokontrollerialusta hyvän saatavuuden, riittävän suorituskyvyn, pienen virrankulutuksen, hyvien virransyöttömahdollisuuksien, monipuolisien kehitysoskalujen ja valmiiden kirjastojen takia. Arduino kehitysalustoista on saatavilla erilaisia versioita ja erilaisia Arduino yhteensopivia alustoja. Arduinolle on saatavilla erilaisia lisälevyjä, jotka voivat sisältää esimerkiksi sijaintitietojen vastaanoton tai langattoman tiedonsiirtoyhteyden. Lisälevyt asennetaan Arduino-alustan päälle liitinriimoihin, joiden kautta virransyöttö ja kommunikointi lisälevyn kanssa tapahtuvat. Arduino sovelluskehitykseen on saatavilla myös monipuolisia kehitysympäristöjä ja erilaisia valmiita kirjastoja, joita voidaan hyödyntää ohjelman toteutuksessa. Kirjastoja on saatavilla esimerkiksi SIM808-moduulille ja AES-CBC salauksessa.

Vaihtoehtoisina alustoina valinnassa olivat Texas Instruments MSP430 ja Raspberry Pi Zero ja TinyFPGA. Texas Instruments MSP430 kehitysalustat ovat samankaltaisia kuin Arduino alustat, mutta niille ei ole saatavilla yhtä paljon valmiita kirjastoja ja lisälevyjä kuin Arduinolle. Raspberry Pi Zero alustassa on paljon parempi suorituskyky, mutta virrankulutus on suurempi, SIM808-piirilevyt eivät sovi suoraan Raspberry Pi:n liitäntöihin ja saatavuus on heikompi.

SIM808-moduuli valittiin tiedonsiirtoyhteyden, sijaintitietojen vastaanoton ja tallennustilan toteuttavaksi komponentiksi. Arduinolle on saatavilla SIM808-moduulilla varustettuja lisälevyjä ja lisäksi on saatavilla Arduino yhteensopivia alustoja, jotka sisältävät SIM808-

moduulin. Valintaan vaikuttivat monipuoliset käyttötarkoitukseen soveltuvat ominaisuudet ja hyvä saatavuus. Myös hinnat sopivat vaatimuksien asetettuun hankintakustannukseen. Lisäksi SIM808-moduuli sisältää Flash-pysyväismuistia ja litium-akkujen latauspiirin, joita voidaan hyödyntää paikannuslaitteessa.

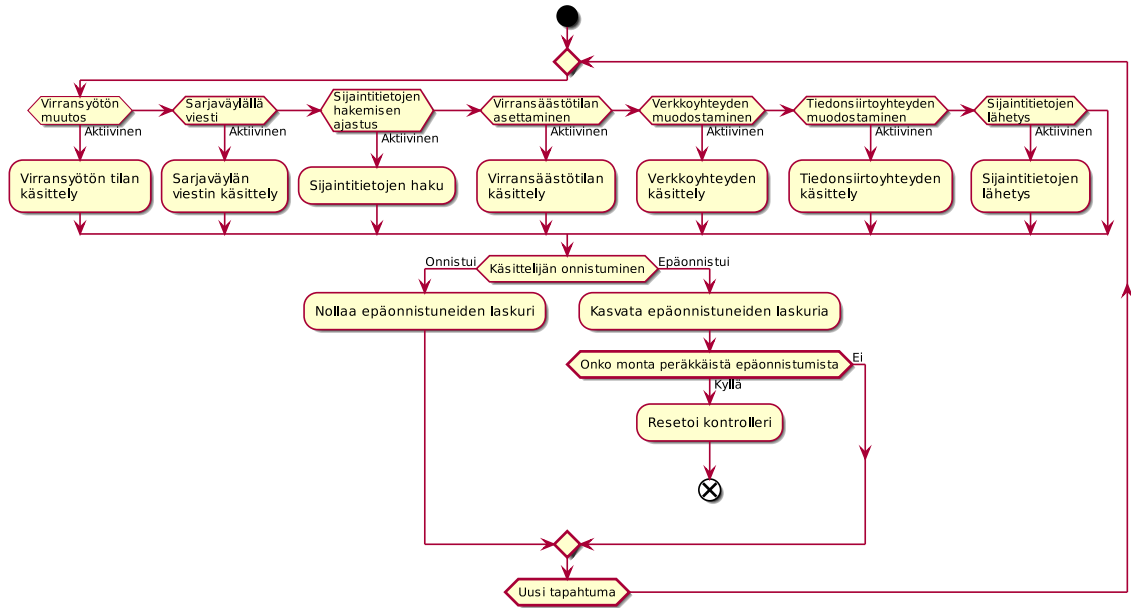
Vaihtoehtoisina, vastaavat ominaisuudet, sisältäviä moduuleina olivat SIMCom SIM908 ja SIM7000E. Valittu SIM808-moduuli tukee vain GPRS-tiedonsiirtoa ja GPS-satelliittipaikannusjärjestelmää, kun SIM7000E tukee lisäksi EDGE- ja NB-IoT-tiedonsiirtomenetelmiä sekä GLONASS-, BeiDou-, Compass-, Galileo- ja QZSS-satelliittipaikannusjärjestelmiä. SIM808-moduulin saatavuus on muita parempi ja lisäksi on saatavilla Arduino yhteensopiva alusta, joka sisältää SIM808-moduulin. GPRS-tiedonsiirron ja GPRS-satelliittipaikannuksen suorituskyky ovat riittäviä paikannuslaitteen tarpeisiin.

Paikannuslaitteesta toteutettiin kaksi prototyyppiversiota, joista toinen koostuu Arduino Uno R3 -alustasta sekä Elecrow SIM808 GPRS/GSM+GPS -lisälevystä ja toinen versio koostuu DFRobot SIM808 with Leonardo mainboard -alustasta, joka sisältää Arduino Leonardo yhteensopivan kontrollerin ja SIM808-moduulin samalla piirilevyllä. DFRobot versio ei vaadi lainkaan kokoonpanoa ja Elecrow-lisälevyllinen versio vaatii lisälevyn asentamisen Arduinon liitinrimoihin. DFRobot versio mahdollistaa SIM808-moduulin sisältämien litium-akkujen latauspiirin ja erillisen litium-akun hyödyntämisen varavirtalähteenä. Varavirtalähteen avulla selvitetään GPS kylmäkäynnistysviiveen poistomahdollisuutta pitämällä GPS seuranta käytössä myös ulkoisen virtalähteen ollessa katkaistuna.

Elecrow SIM808-lisäkortti toimii 5-12 voltin tasavirralla ja maksimi virrankulutus on 500 mA. Lisäkortti saa virtansa Arduinosta, johon lisäkortti on kytketty. Arduino Uno R3 toimii USB-portista 5 voltin tasavirralla tai DC-portista 9-12 voltin tasavirralla. DFRobot SIM808 with Leonardo mainboard toimii 3.7 voltin litium-akulla, USB-portista 5 voltin tasavirralla tai DC-portista 7-23 voltin tasavirralla. Jos laiteeseen on kytketty akku ja SIM808-moduulin akun lataus on otettu käyttöön, latautuu akku USB- tai DC-porttiin kytketyllä tasavirtalähteellä. Ajoneuvossa paikannuslaitteiden virransyöttö voidaan toteuttaa tupakansytyttimen liittimestä joko USB-adapterilla tai 12 voltin DC-johdolla.

5.1.2 Ohjelma

Paikannuslaitteen ohjelma koostuu alustuksesta ja tapahtumasilmukasta. Alustuksessa suoritetaan kontrollerin, kirjastojen ja komponenttien vaatimat alustukset. Alustus suoritetaan ohjelman aluksi ja alustuksen päätyttyä siirrytään tapahtumasilmukkaan. Tapahtumasilmukka suorittaa tapahtumarekisterissä aktiiviseksi merkittyjen tapahtumien käsittelijöitä tapahtumien prioriteetin mukaisessa järjestyksessä. Tapahtumia syntyy erilaisista kontrollerin keskeytyksistä ja muiden tapahtumankäsittelijöiden havaitsemista tapahtumista. Tapahtumasilmukka tarkkailee tapahtumakäsittelijöiden palauttamia virheitä ja huolehtii laitteen virhetilanteista palautumisen. Liian monen peräkkäisen virhetilanteen jälkeen laite käynnistetään uudelleen.



Kuva 5.1. Tapahtumasilmukka

Alustus

Alustuksessa alustetaan SIM808-moduulin kanssa kommunikointiin käytettävä sarjaväylä ja kytketään moduuliin virta. Kun virta on kytketty, suoritetaan mahdolliset kirjastojen vaatimat alustukset, kuten SIM808-kirjaston alustaminen sarjaväylälle ja salauskirjaston salausavaimen alustaminen. Viimeiseksi asetetaan SIM808-moduulin asetukset halutuiksi, kytketään paikannus käyttöön ja tarkistetaan, onko tallennustilassa odottamassa lähettämättömiä sijaintitietoja.

Tapahtumasilmukka

Tapahtumasilmukan tapahtumia on ulkoisista muutoksista johtuvia, ajastettuja sekä muiden tapahtumien pyytämiä ja havaitsemia tapahtumia. Ulkoisen virransyötön tilan muutos ja sarjaväylällä tulevat viestit ovat ulkoisista muutoksista johtuvia tapahtumia. Sijaintitietojen hakeminen suoritetaan ajastetulla tapahtumalla määritetyllä tiheydellä. Muiden tapahtumien pyytämiä tapahtumia ovat virransäästötilan hallinta, verkkoyhteyden muodostaminen, tiedonsiirtoyhteyden muodostaminen ja sijaintitietojen lähettäminen. Muiden tapahtumien havaitsemia tapahtumia ovat sarjaväylältä tulevien viestien käsittelijän havaitsemat tiedonsiirtoyhteydellä saapuneet viestit, tiedonsiirtoyhteyden odottamaton katkeaminen, verkkoyhteyden odottamaton katkeaminen sekä odottamaton SIM808-moduulin virran katkeaminen. Tapahtumasilmukan tapahtumien käsittely on kuvattu kuvan 5.1 aktiveettikaavioon.

Jokainen tapahtumasilmukan tapahtumankäsittelijä palauttaa joko onnistumisen, epäonnistumisen tai ei-toimintatuloksen, joiden perusteella seurataan peräkkäisiä epäonnistu-

misiä. Jos tapahtumankäsittelijä palauttaa onnistumisen, nollataan epäonnistuneiden tapahtumien laskuri. Epäonnistuminen kasvattaa epäonnistuneiden tapahtumien laskuria ja ei toimintoa ei vaikuta epäonnistuneiden tapahtumien laskuriin. Jos epäonnistuneiden tapahtumien laskuri kasvaa yli asetetun raja-arvon, käynnistetään kontrolleri uudelleen.

Tapahtumankäsittelijät suoritetaan prioriteettijärjestyksessä ja jokainen tapahtumankäsittelijä huolehtii oman tapahtuman poistamisesta tapahtumarekisteristä. Tämä mahdollistaa tapahtumankäsittelijän jättämään oman tapahtuman aktiiviseksi ja asettamaan suuremmalla prioriteetilla olevan tapahtuman aktiiviseksi, jolloin suoritus palautuu tapahtumankäsittelijään, kun suuremmalla prioriteetilla oleva tapahtumankäsittelijä on suoritettu.

Ulkoisen virransyötön katkeaminen aiheuttaa tiedonsiirtoyhteyden katkaisun, virransäätötilan kytkemisen käyttöön ja sijaintitietojen hakemisen ajastuksen lopettamisen. Virransäätötilassa SIM808-moduuli asetetaan vähimmäistoiminnallisuuden tilaan, jolloin matkapuhelinverkkotoiminnallisuudet ovat pois käytöstä. GPS signaalien seuranta jatkuu virransäätötilassa, mutta sijaintitietoja ei tallenneta eikä lähetetä eteenpäin. Ulkoisen virransyötön kytkeytymisen jälkeen sijaintitietojen hakemisen ajastus käynnistetään ja SIM808-moduuli asetetaan normaalin toiminnan tilaan, jolloin matkapuhelinverkkotoiminnallisuudet tulevat takaisin käyttöön.

Sijaintitietojen hakemisen ajastettu käsittelijä pyytää SIM808-moduulilta sijaintitiedot ja sijaintitietojen lähetys tapahtuman aktiiviseksi. Sijaintitietojen lähetyksen käsittelijä yrittää lähettää sijaintitiedot tiedonsiirtoyhteydellä. Jos sijaintitietojen lähetys epäonnistuu, asetetaan tiedonsiirtoyhteyden muodostamisen tapahtuma aktiiviseksi ja tallennetaan sijaintitiedot tallennustilaan. Tiedonsiirtoyhteyden muodostamisen käsittelijä yrittää muodostaa tiedonsiirtoyhteyden. Tiedonsiirtoyhteyden muodostamisen onnistuessa lähetetään tallennustilassa olevat sijaintitiedot palvelimelle, ja epäonnistuessa asetetaan verkkoyhteyden muodostamisen tapahtuma aktiiviseksi.

5.2 Palvelin

Ajoseurantajärjestelmän palvelin sisältää kuvan 4.1 mukaiset komponentit. Komponentit toteutetaan aluksi modulaarisina suurempina kokonaisuuksina, jotka voidaan myöhemmin jakaa erikseen hajauttamista tai suorituskyvyn skaalaamista varten. Palvelimen komponentit ajetaan Docker mikropalvelualustalla, joka mahdollistaa palvelinkokonaisuuden ajamisen erilaisilla palvelinalustoilla, jotka tarjoavat suoraan mikropalveluiden ajamisen tai mahdollistavat mikropalvelualustan ajamisen. Docker-machine -työkalun avulla Docker mikropalvelukokonaisuus voidaan ajaa helposti eri mikropalvelualustoissa. Mikropalvelun komponenteissa hyödynnetään mahdollisimman paljon virallisia levykuvia, jotka tarjoavat valmiita palvelukomponentteja suosittujen ohjelmointikielien, tietovarastojen ja muiden suosittujen palveluiden käyttöön. Virallisissa levykuvissa on myös monipuoliset konfigurointimahdollisuudet ja levykuviin tulevat turvallisuuspäivitykset ajallaan. [] Palvelinkokonaisuuden määrittämisessä hyödynnetään docker-compose määrittystiedostoa,

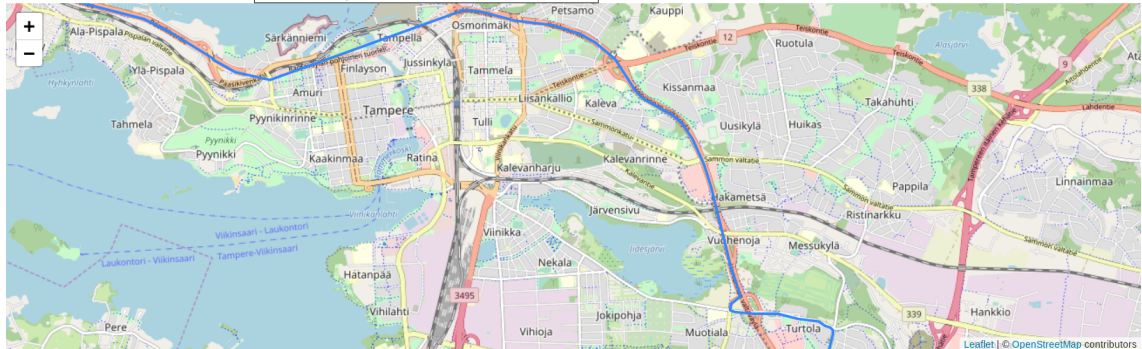
jonka avulla pystytään määrittämään palvelinkokonaisuuden palvelut, niiden väliset liitynnät sekä mikropalveluympäristön ulkopuolelle julkaistavat palvelujen liitynnät. Docker-compose määrittelyn avulla voidaan myös määrittellä erikseen tuotanto- ja kehitysympäristöjen konfiguraatiot, jolloin palvelun kehitys onnistuu tuotantoympäristön kaltaisessa ympäristössä. Pienillä muutoksilla määrittelytiedosto saadaan Docker Swarm yhteensopivaksi, mikä mahdollistaa palveluiden suorittamisen hajautetussa ja klusteroidussa Docker Swarm ympäristössä.

Rajapintojen toteutukseen käytetään Django verkkosovelluskehystä, joka tukee monia eri tietokannanhallintajärjestelmiä ja valmiita lisäosia hyödyntämällä pystytään toteuttamaan eri rajapinnat yksinkertaisilla määrittelyillä. Djangossa käytetään tietokantojen rakenteen ja kyselyiden määrittämisessä tietokantamalleja, joiden avulla tietokannan rakenteen luominen ja päivittäminen tapahtuvat automaattisesti. Samat tietokantamallit toimivat tuetuilla tietokannanhallintajärjestelmillä ja hallintajärjestelmää voidaan helposti vaihtaa tarpeen mukaan. Django sisältää myös todennuksen, hallintakäyttöliittymän ja GeoDjango-moduulin tietokantojen paikkatietojärjestelmälaajennoksien hyödyntämiseen. Todennuksessa voidaan hyödyntää mukana tulevaa salasana todennusta tai voidaan toteuttaa oma todennustapa. Hallintakäyttöliittymän avulla pystytään hallitsemaan järjestelmän käyttäjiä ja käyttöoikeuksia sekä voidaan lisätä hallintaliittymät omiin tietokantamalleihin. Hallintakäyttöliittymä toteuttaa palvelimen hallintarajapinnan. GeoDjangon avulla pystytään hyödyntämään eri tietokantojen paikkatietojärjestelmälaajennoksia suoraan tietokantamallien avulla. Mikropalvelussa rajapintojen ajamiseen käytetään virallisen python-levykuvan pohjalta luotavaa levykuvaa, johon lisätään rajapinnat toteuttava ohjelma ja lisäosien vaatimat python-kirjaston.

Tietovarastojen toteutukseen käytetään PostgreSQL oliorelaatiotietokannanhallintajärjestelmää (engl. object-relational database management system, ORDBMS) PostGIS paikkatietojärjestelmälaajennoksen kanssa. PostgreSQL hallintajärjestelmän PostGIS-laajennokselle löytyy tuki GeoDjango-moduulista ja se tukee suurinta osaa GeoDjangon paikkatieto-operaatioista. Toinen kattavasti tuettu paikkatietojärjestelmälaajennos on SQLite tietokannanhallintajärjestelmän SpatialLite laajennos. PostgreSQL hallintajärjestelmän kanssa voidaan hyödyntää virallista Docker-levykuvaa, johon voidaan lisätä PostGIS-laajennos. PostgreSQL tukee myös osiointia ja replikointia, joiden avulla pystytään tarvittaessa kasvattamaan tietokantojen suorituskykyä jakamalla tietokanta useaan osaan tai jakamalla lukuoperaatiot usean identtisen tietokannan kesken. Tietovarastojen toteutuksessa voidaan hyödyntää myös muita tietokannanhallintajärjestelmiä tai NoSQL tietokantoja, mutta tällöin ei saada yhtä hyvää yhteensopivuutta Django ja GeoDjangon kanssa.

Paikannuslaiterajapinnan toteutukseen hyödynnetään django-websocket-redis -lisäosaa, joka mahdollistaa WebSocket-yhteyksien ja -viestien käsittelyn. Lisäosa on suunnattu julkaisija-tilaaja -mallin mukaiseen viestien välittämiseen. Viestit julkaistaan Redis avain-arvo -tietokantaan, jossa avaimina ovat paikannuslaitteiden tunnisteet ja arvoina viimeisin sijaintitieto. Tilaajat kuuntelevat avaimen arvoja ja saavat uusimmat sijaintitiedot heti jul-

Käyttäjä: daniel	Parametri: Arvo	Reittipisteiden asetukset:
	Yhdistetty: <input checked="" type="checkbox"/>	Alku aika: 07.03.2019 13.58
Kirjautu ulos	Viimeisin viesti: 2019-03-11T19:32:41.110	Loppu aika: 07.03.2019 16.00
Valitse laite:	GPS käytössä: <input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> Nykyisen päivän loppuun?
	GPS fix status: <input checked="" type="checkbox"/>	Reitin pituus: 20,56 km
	Sijainnin aikaleima: 2019-03-11T18:25:37.000	
	Viimeisin sijainti:	



Kuva 5.2. Kuvakaappaus asiakasohjelmistosta

kaisun jälkeen. Viestien vastaanottajaan lisätään paikannuslaitteiden toimittamien sijaintitietojen käsittelijä, joka suorittaa paikannuslaitteiden todentamisen, sijaintitietojen salauksen purkamisen, sijaintitietojen julkaisun reaaliaikaiseen seurantaan ja sijaintitietojen tallentamisen tietokantaan. Salauksen purkamiseen käytetään PyCrypto-moduulia, joka sisältää tuen monille tiiviste- ja salausalgoritmeille. Redis lisätään mikropalveluun virallisella levykuvalla.

Sijaintitietorajapinnan toteutukseen hyödynnetään Django REST framework ja django-websocket-redis lisäosia. Django REST framework lisäosan avulla pystytään helposti määrittelemään REST rajapinta sijaintitietojen hakuja varten. Django-websocket-redis lisäosaa käytetään reaaliaikaisen seurannan toteuttamiseen WebSocket yhteyden avulla. Lisäksi käytetään django-guardian lisäosaa, jonka avulla pystytään määrittämään käyttäjille paikannuslaittekohtaisesti käyttöoikeuksia sijaintitietoihin. Rajapintaan toteutetaan kolme toiminnallisuutta: sijaintitietojen haku, reittien yhteenvetojen haku ja reaaliaikainen seuranta. Sijaintitietojen haussa haetaan tietyn paikannuslaitteen sijaintitietoja ja haussa voidaan käyttää aikarajausta. Reittien haussa haetaan tietyn paikannuslaitteen tietyllä aikavälillä syntyneistä sijaintitiedoista muodostuva reitti ja reitin pituus. Reitti ja reitin pituus muodostetaan tietokannan paikkatietojärjestelmälaajennoksen avulla ja reitti palautetaan GeoJSON muodossa, jota monet karttajärjestelmät tukevat. Reaaliaikaisessa seurannassa muodostetaan WebSocket-yhteys, josta vastaanotetaan halutun paikannuslaitteen sijaintitiedot heti, kun ne on toimitettu palvelimelle. Sijaintitietorajapinnassa käytetään standardin mukaista TLS salausta ja Django REST frameworkin token-todennusta.

Järjestelmän lopullisen asiakasohjelmiston toteuttaminen ei sisälly työhön, mutta rajapinnan toiminnan testaamista ja sijaintitietojen tarkastelua varten toteutetaan yksinkertainen asiakasohjelmisto JavaScriptilla React-kirjaston avulla. Asiakasohjelmistossa pystyy kirjautumaan käyttötunnuksilla, valitsemaan paikannuslaitteen, seuraamaan paikannuslaitteen sijaintia reaaliaikaisesti kartalla ja hakemaan paikannuslaitteen reitin tietyllä aikavälillä kartalle. Asiakasohjelmistossa käytetään avoimen lähdekoodin Leaflet-kirjastoa inte-

raktiivisen kartan näyttämiseen ja avoimen lähdekoodin OpenStreetMap-karttoja. React-Leaflet mahdollistaa merkkien ja reittien lisäämisen karttapohjalle. OpenStreetMap-karttojen renderöintikuvat haetaan ulkopuolisesta palvelusta.

6 TULOKSET

Tässä luvussa käydään läpi toteutetulla prototyypiversiolla saavutetut tulokset sekä verrataan tuloksia järjestelmälle asetettuihin vaatimuksiin. Paikannuslaitteen osalta käydään läpi paikannuksen suorituskyky, tiedonsiirron suorituskyky, helppokäyttöisyys sekä kustannukset. palvelimen osalta käydään läpi halutun suorituskyvyn saavuttamiseen tarvittavat resurssit ja niiden hinta sekä palvelimen tietoturva.

6.1 Paikannuslaite

Sijaintitietojen mittaamiseen valittu GPS satelliittipaikannus toimii maailmanlaajuisesti ja vaatii toimiakseen hyvän näköyhteyden taivaalle. Tunnelit ovat paikannusmenetelmän katvealueita, mutta niiden vaikutus mitattuun reittiin on yleensä vähäinen. Myös muut maanalaiset sijainnit, kuten maanalaiset pysäköintitilat, ovat paikannuksen katvealueita ja katvealueelta poistuminen tapahtuu monesti samassa sijainnissa kuin katvealueelle siirryttiin, jolloin maanalla kuljettu reitti jää kokonaan pois tuloksista. Myös maanpäälliset pysäköintihallit aiheuttavat suuria häiriöitä paikannustulokseen, eikä pysäköintihallissa kuljettua reittiä pystytä päättämään saaduista reittipisteistä. Kuljetun reitin pituudelle pystytään laskemaan kuitenkin parempi arvio kuin maanalaisissa pysäköintihalleissa, koska ei olla kokonaan GPS signaalin katvealueella.

Normaaleissa tieolosuhteissa, joissa ei ole paikannusta häiritseviä korkeita rakennuksia vieressä eikä olla paikannuksen katvealueella, saavutettiin alle 5 metrin paikannustarkkuus. Paikannuksen jatkuvuus on hyvä, eikä paikannuksen alettua tule katkoksia kuin paikannuksen katvealueilla. Paikannustarkkuuden virhe ei vaihtelee nopeasti, jonka takia reittipisteistä mitatut reittien pituudet eroavat keskimäärin alle prosentin todellisesta reitin pituudesta, vaikka sijaintipisteet eivät sijaitse tarkasti kuljetulla reitillä. Testauksen aikana havaittiin muutaman kerran virheellisiä sijaintimittauksia, joiden takia paikannuksen eheys ei ole halutulla tasolla. Yksittäiset virheelliset sijaintimittaukset saadaan helposti suodatettua tuloksista, jolloin ajoneuvon kuljettu reitti ja reitin pituus saadaan sijainnin mittaustuloksista riittävällä tarkkuudella. Heikolla GPS-signaalilla paikannuksen virhe vaihtelee ja ajoneuvon paikallaollessa saattaa syntyä paljon vaeltamista, jonka suodattamisella saadaan helposti parannettua reittien mittauksien tarkkuutta. Suodattamisessa voidaan hyödyntää GPS-moduulin antamia signaalin vahvuuden, nopeuden ja suunnan arvoja.

Varavirtalähteellä varustettu paikannuslaitteen prototyypiversio pystyy aloittamaan paikannuksen välittömästi, kun ulkoinen virtalähde kytketään ja varavirtalähteen varaus ei ole purkautunut kokonaan edellisen ajon päättymisen jälkeen. Ilman varavirtalähdettä olevalla versiolla paikannuksen alkaminen kestää keskimäärin noin 2 minuuttia ja huonoimmissakin tapauksissa alle 5 minuuttia, jos ajoneuvo ei ole katvealueella ajon alkaessa. Aloitusviive ei estä reitin alkupisteen määrittämistä, jos alkupiste on sama kuin edellisen ajon päätepiste. Aloitusviive estää kuljetun reitin alun tallentamisen, mikä aiheuttaa virheen tallennettuun reittiin ja reitin pituuteen. Monissa tilanteissa suora reitti edellisen reitin päätepiesteestä paikannuksen alkupisteeseen on lähellä todellista reittiä, eikä aiheuta suurta virhettä tallennettuun reittiin. Toteutettu rajapinta mahdollistaa edellisen reitin päätepiesteen sisällyttämisen reittiin, mutta reitti on mahdollista hakea myös ilman edellisen reitin päätepiestettä.

6.1.1 Tiedonsiirron suorituskyky

Paikannuslaitteen käyttämä matkapuhelinverkon GPRS tiedonsiirtoyhteys on saatavilla lähes koko Suomen alueella joitakin harvaanasutuilla alueilla olevia katvealueita lukuun ottamatta. Tiedonsiirtoyhteyttä voidaan hyödyntää myös monissa muissa maissa, mutta tiedonsiirron käyttömaksu on yleensä kalliimpi ulkomailla käytettäessä. Matkapuhelinverkko toimii myös maantietunneleissa ja pysäköintihalleissa, joissa GPS paikannus ei välttämättä toimi. GPRS tiedonsiirtoyhteyden kapasiteetti on riittävä sijaintitietojen toimitamiseen ja viive on riittävän pieni reaaliaikaisen seurannan vaatimuksiin. Sijaintitiedon mittaaminen suoritetaan kerran sekunnissa ja jokaisen mittaustuloksen lähettämisen välissä pystytään toimittamaan yksi pysyväismuistiin tallennettu mittaustulos. Mitatun sijaintitiedon salaaminen ja lähettäminen kestää prototyypilaitteella keskimäärin 200 millisekuntia ja pysyväismuistiin tallennetun sijaintitiedon keskimäärin 600 millisekuntia, jossa on mukana sijaintitiedon lukeminen pysyväismuistista. Yhteydellinen TCP tiedonsiirto-protokolla takaa, että sijaintitieto on toimitettu palvelimelle, kun sovellus saa tiedon lähettämisen onnistumisesta. Paikannuslaitteen ohjelman hitaus, ja erityisesti pysyväismuistin käyttötapa, rajoittavat sijaintitietojen lähetysnopeutta ja ohjelmaa optimoimalla pystytään saavuttamaan parempi lähetystiheys.

Prototyypiversiossa mitattuja sijaintitietoja ei optimoida lainkaan, vaan sijaintitiedot toimitetaan palvelimelle GPS moduulin antamassa tekstimuodossa. Yksittäisen sijainnin mittauksen tuloksen koko on enintään 115 tavua. Käytetyssä salausmenetelmässä tiedon pituus täytetään 16 tavun lohkoihin, jonka seurauksena salattua sijaintitietoa voi syntyä enintään 128 tavua sekunnissa ja koko on aina 16 tavun monikerta. Yksittäisen WebSocket paketin lähettämisen otsikkotiedot ovat 42 tavua ja palvelimen lähettämän kuitauksen koko on 40 tavua, eli yksittäisen sijaintitiedon toimittamiseen tarvitaan enintään 210 tavua tiedonsiirtoa. WebSocket yhteyden muodostamiseen, joka suoritetaan kerran paikannuksen alettua, vaaditaan noin 1000 tavua tiedonsiirtoa, joka vastaa noin 5 sijaintitiedon tiedonsiirtoa. Prototyypiversiossa laskutettavaa tiedonsiirtoa syntyi keskimäärin

hieman alle 1 megatavua (miljoonaa tavua) tunnissa. Prototyypilaitteella saatiin vuorokausikohtaiseksi maksimi tiedonsiirron kulutukseksi noin 30 megatavua, joka on suurempi kuin laskennallinen noin 18 megatavun vuorokausikohtainen maksimi tiedonsiirron tarve. Laskutettavan tiedonsiirron kapasiteetin tarpeeseen vaikuttavat siirrettävien pakettien lisäksi palvelimen IP osoitteen selvittämiseen tarvittavat kyselyt sekä mahdollisesti operaattorin laskuttamat linkkikerroksen otsikkotietojen koko. Kuukaudessa tiedonsiirtoa voi syntyä paikannuslaitetta kohden enintään noin gigatavu (miljardi tavua). Jos paikannusta suoritetaan keskimäärin 8 tuntia päivässä 5 vuorokautena viikossa, syntyy tiedonsiirtoa kuukaudessa noin 220 megatavua. Monessa tilanteessa ajoneuvoa käytetään huomattavasti vähemmän, jolloin paikannuslaitteen tuottama tiedonsiirron määrä on myös huomattavasti pienempi. Matkapuhelinverkon palveluntarjoajien liittymien hinnoittelu vaikuttaa edullisimman liittymän valintaan. Edullisin liittymä voi olla esimerkiksi rajattoman tiedonsiirron sisältävä, tiedonsiirron paketin sisältävä tai tiedonsiirron käytön mukaan laskutettava liittymä. Lisäksi on saatavilla jaetulla datapakettilla olevia liittymiä, jolloin maksetaan kaikkien paikannuslaitteiden yhteensä tarvitsema tiedonsiirron määrä eikä tarvitse varata ylimääräistä tiedonsiirtoa paikannuslaitteille, joita käytetään vähemmän. Muuntamalla sijaintitietojen mittaukset binäärimuotoon pystytään helposti vähentämään puolet lähetettävästä hyötykuormasta, jolloin saadaan vähennettyä noin kolmasosa tarvittavasta tiedonsiirron määrästä. Harventamalla sijaintitietojen mittaussväliä tai lähettämällä useampia mittaustietoja kerralla pystytään edelleen vähentämään tarvittava tiedonsiirron määrä puoleen.

Prototyypiversiossa sijaintimittaukset tallennetaan SIM808-moduulin Flash-muistiin, jos tiedonsiirtoyhteys ei ole saatavilla. Flash muistiin mahtuu yli 10 minuutin mittaustulokset, jotka toimitetaan tiedonsiirtoyhteyden palattua uusien sijaintimittauksien välillä. Mittaustuloksien optimoinnin avulla saadaan kasvatettua tallennustilaan mahtuvien mittaustuloksien määrää. Optimointi myös nopeuttaa mittauksien toimittamista tiedonsiirtoyhteyden palattua, kun voidaan toimittaa useampia tallennettuja sijaintitietoja kerralla. Prototyypiversion toteutus vaatii 50 prosentin saatavuuden tiedonsiirtoyhteydelle ja katkokset saavat olla korkeintaan 10 minuuttia. Kahdella prototyypilaitteella suoritettujen 20 tunnin testiajojen aikana ei syntynyt yhtään yli 3 minuutin tiedonsiirron katkosta, minkä perusteella tallennustila ja tiedonsiirron kapasiteetti mahdollistavat riittävän tiedonsiirron luotettavuuden.

6.1.2 Helppokäyttöisyys

Toteutettu paikannuslaite on helppo asentaa ja käyttää. Paikannuslaite toimitetaan käyttäjälle valmiiksi ohjelmoituna, testattuna ja koteloituna. Käyttäjä suorittaa paikannuslaitteen asennuksen kytkemällä paikannuslaitteen virtalähteen tupakansytyttimen pistokkeeseen ja sijoittamalla paikannuslaitteen ajoneuvoon haluamalleen paikalle, jossa laite pysyy vastaanottamaan GPS-signaaleja. Kun paikannuslaite on asennettu, laitteen käyttö ei tarvitse käyttäjän toimia, vaan ajoneuvon sijainnin seuranta tapahtuu automaattisesti au-

toa käytettäessä. Asennuksen helppokäyttöisyyttä ei testattu prototyypiversiolla, mutta asennettuna prototyypilaitte suoritti sijaintitietojen keräämisen ilman käyttäjän toimenpiteitä.

Prototyypiversiossa ei ole laitteen asentamiseen soveltuvia kiinnikkeitä eikä asennusohjetta, jotka täytyy lisätä lopulliseen versioon. Asennusohjeessa kerrotaan asennus vaihe vaiheelta kuvien kanssa, helpottamaan käyttäjän asennusta. Lisäksi asennusta pystyy helpottamaan käyttämällä pitkällä johdolla varustettua koteloitua GPS-antennia, jolloin itse paikannuslaite voi sijoitella vapaammin ja ainoastaan GPS-antennin sijoittelu vaikuttaa GPS-signaalien vastaanottamiseen.

6.1.3 Kustannukset

Paikannuslaitteen kustannukset koostuvat hankintakustannuksista ja käyttökustannuksista. Hankintakustannukset koostuvat paikannuslaitteen komponenttien hankintahinnoista ja laitteen kokoonpanosta. Käyttökustannukset koostuvat tiedonsiirron vaatiman liittymän kuukausimaksusta.

Paikannuslaite koostuu virtalähteestä, Arduino alustasta, SIM808-moduulista, kotelosta sekä mahdollisesta akusta. Virtalähde koostuu tupakansytytinpistokkeesta, johdosta ja 2,1 mm DC-liittimestä. Esimerkiksi Elgood Oy:n Partco verkkokaupasta ostettuna tupakansytytinpistoke sulakkeella ja DC-liitin 1,8 metrin johdolla maksavat noin 5 euroa. Paikannuslaitteelle soveltuvia eri kokoisia muovikoteloita on Partco-verkkokaupassa noin 10 euron hintaan.

Paikannuslaite voidaan koostaa Arduino yhteensopivasta alustasta, joka sisältää SIM808-moduulin, tai Arduino yhteensopivasta alustasta ja SIM808-lisäkortista. Virallisia Arduino Uno R3 ja Arduino Leonardo alustoja on saatavilla suomalaisista elektroniikka verkkokaupoista noin 30 euron hintaan ja alustojen klooneja noin 15 euron hintaan. SIM808-moduulin sisältäviä Arduino-alustoja ei ole saatavilla suomalaisista verkkokaupoista, mutta toisen prototyypiversiosta käyttämä DFRobot SIM808 with Leonardo mainboard -alusta on saatavilla esimerkiksi Iso-Britannialaisesta The Pi Hut -verkkokaupasta noin 95 euron verolliseen hintaan ja Yhdysvaltalaisesta DFRobot-verkkokaupasta noin 65 euron verottomaan hintaan, josta tulee arvonlisäveron kanssa noin 80 euroa.

Suomalaisesta Partco-verkkokaupasta löytyy Elecrow SIM808 -lisäkortti noin 50 euron hintaan. DFRobot SIM808-lisäkortti on saatavilla The Pi Hut -verkkokaupasta noin 50 euron hintaan ja Yhdysvaltalaisesta DFRobot-verkkokaupasta arvonlisäveron kanssa noin 45 eurolla. The Pi Hut -verkkokaupassa on saatavilla myös Adafruit FONA SIM808 -lisäkortti, joka maksaa tarvittavien antennien kanssa noin 65 euroa.

Adafruit FONA SIM808 -lisäkortti vaatii toimiakseen litium-akun ja SIM808 with Leonardo -alustaa on mahdollista käyttää litium-akkujen kanssa. Muut alustat ja lisäkortit eivät tue litium-akkujen latausta eivätkä sisällä liittimiä akkukäyttöä varten. Jos näiden alustojen

Taulukko 6.1. Paikannuslaitteen komponenttien hinnat

Alusta	Arduino Uno R3/Leonardo kloonit			DFRobot SIM808 with Leonardo
GPRS&GPS	Elecrow SIM808	DFRobot SIM808	Adafruit FONA SIM808	
Virtalähde	Tupakansytytinpistoke			
Kotelo	Muovikotelo			
Akku	(LiPo akku, latauspiiri ja DC-DC muunnin)		LiPo akku	(LiPo akku)
Hinta	80 € (110 €)	85 € (115 €)	115 €	95 € (105 €)

kanssa halutaan käyttää akkua, tarvitaan litium-akun lisäksi sopiva DC-DC muunnin ja akulle sopiva latauspiiri, joiden hinta on yhteensä noin 20 euroa. Litium-akkuja on saatavilla eri kapasiteeteilla 5-20 euron hintaan.

Taulukkoon 6.1 on listattu eri komponenttivalintoista koostuvien paikannuslaitteiden hankintahinnat. Akullisten versioiden hinnat ylittävät vaatimuksissa asetetun 100 euron rajan, mutta mahdollisesti saatavilla alennuksilla tai halvemmilla komponenteilla voidaan päästä alle 100 euron. DFRobot SIM808 with Leonardo version ei vaadi kokoonpanoa, koska kaikki tarvittavat komponentit ovat valmiina samalla piirilevyllä, ja on lisäksi fyysisiltä mitoiltaan pienin sekä akullisista versioista halvin.

Paikannuslaitteiden kokoonpanon kustannukset riippuvat valituista komponenteista ja esitetyistä vaihtoehdoista vähiten kokoonpanoa tarvitsee DFRobot SIM808 with Leonardo, joka sisältää kaiken tarvittavan elektroniikan samalla piirilevyllä ja on myös akullisista versioista halvin. Kokoonpanon kustannuksiin vaikuttavat lopullisen version kokoonpanon kesto ja useampien laitteiden samanaikainen kokoonpano voi vähentää merkittävästi paikannuslaittekohtaista kokoonpanon vaatimaa työaika.

Paikannuslaitteen käyttökustannukset koostuvat tiedonsiirron kustannuksista. Paikannuslaite on huoltovapaa eikä vaadi ylläpitoa, jonka takia mahdollisia ylläpitokustannuksia ei lasketa. Rajattomalla tiedonsiirron määrällä varustettuja matkapuhelinverkon dataliittymiä on saatavilla alle 4 euron kuukausihinnalla ja optimoimalla tiedonsiirron käyttöä, pystytään mahdollisesti hyödyntämään halvempia rajoitetulla tiedonsiirrolla varustettuja liittymiä.

6.2 Palvelin

Palvelinohjelmisto toteutettiin Docker mikropalvelualustalle. Toteutettu ohjelmisto on skaalattavissa yksittäisiä komponentteja monistamalla tai hajauttamalla komponentteja erillisille, vaaditun kapasiteetin omaavilla, palvelualustoille. Komponenttien monistaminen ja siirtäminen palvelualustojen välillä onnistuu ilman suuria käyttökatsoksia. Suorituskykytestejä varten palvelimen suorituskyky rajattiin yhteen suoritusyksikköön ja 500 me-

gatavuun keskusmuistia, mikä vastaa halvimpien saatavilla olevien virtuaalipalvelimien suorituskykyä ja mahdollistaa palvelun ajamisen olemassa olevien verkkopalveluiden rinnalla ilman merkittävää lisäresurssien tarvetta. Sijaintitietojen vastaanotto pystyy käsittelymään yli 500 peräkkäistä sijaintitietojen tallennusta sekunnissa ilman palvelun skaalaamista. Sijaintitietojen käsittelyssä puretaan sijaintitiedon salaus, muutetaan tieto halettuun muotoon, suoritetaan tiedon tallennus tietokantaan ja julkaistaan tieto sijaintitietoja kuunteleville käyttäjille. Palvelimella pystytään suorittamaan alle 3 sekunnissa 100 reittitietojen hakua, jossa muodostetaan sijaintitiedoista reitti ja lasketaan reitin pituus. Rinnakkain suoritettuna pystytään palvelussa noin 5 sekunnissa suorittamaan 100 reittitietojen hakua ja lisäämään 250 sijaintitietoa. Jos palvelun suorituskykyä kasvatetaan 2 suoritinsäikeeseen ja gigatavuun keskusmuistia, nopeutuu reittitietojen haku merkittävästi ja pystytään suorittamaan 100 reittitietojen hakua alle 2 sekunnissa ja alle 2 sekunnissa pystytään suorittamaan sekä 250 sijaintitietojen tallennusta että 100 reittitietojen hakua. Peräkkäiseen sijaintitietojen tallennuksen nopeuteen suorituskyvyn kasvattamisella ei ole vaikutusta, mutta samanaikaisesti tapahtuvan eri paikannuslaitteiden sijaintitietojen tallennus nopeutuu. Halvimmat saatavilla olevat virtuaalipalvelimet maksavat alle 10 euroa kuukaudessa. Tällaisen palvelimien suorituskyky riittää käsittelemään samanaikaisesti 50 paikannuslaitteen sijaintitietojen vastaanoton ja 20 reittitietojen hakua sekunnissa

Palvelimen saatavuus varmistetaan riittävällä suorituskyvyllä, suojaumisella palvelunestohyökkäyksiltä ja säännöllisillä varmuuskopioilla. Kaikki palvelimen tiedonsiirto salataan turvallisilla ja standardien mukaisilla menetelmillä salakuuntelun estämiseksi. Salaukseen käytettäviä menetelmiä voidaan päivittää tarpeen mukaan, mutta menetelmien päivittäminen vaatii myös yhteyden muodostavien laitteiden ja palveluiden tuen päivitetuille salausmenetelmille. Paikannuslaitteisiin ja paikannuslaitteiden sijaintitietoihin pääsyä hallitaan käyttöoikeuksilla, jotka estävät luvattoman pääsyn muiden sijaintitietoihin. Palvelimelle tulevista yhteyksistä suoritetaan toisen osapuolen tunnistaminen, jonka avulla pystytään määrittämään yhteydelle oikeat käyttöoikeudet ja estetään luvaton tietojen muuttaminen palvelimella. Prototyypiversion palvelimen tiedoille ei ole varmuuskopiointia, joka tulee toteuttaa lopulliseen versioon ja varmuuskopioiden tulee täyttää tietoturvan vaatimukset.

6.3 Vertailu valmiisiin järjestelmiin

Vertailtavien ajoseurantajärjestelmien hankintakustannuksissa on suurta vaihtelua ja toteutetun järjestelmän kustannukset ovat samaa luokkaa halvimpien vertailtavien paikannuslaitteiden kanssa. Osassa vertailtavista järjestelmistä ei ole hankintakustannuksia, mutta näiden käyttökustannukset ovat merkittävästi muita kalliimmat. Käyttökustannuksien osalta toteutettu ajoseurantajärjestelmä on merkittävästi vertailtavia järjestelmiä halvempi. Kaikissa vertailtavissa järjestelmissä paikannuslaite ei täytä asennuksen helppoudelle asetettuja vaatimuksia. Toteutettu järjestelmä täyttää asennuksen helppouden ja helppokäyttöisyyden vaatimukset, kuten suurin osa vertailtavista järjestelmistäkin. Kaikki

ajoseurantajärjestelmät suorittavat sijaintitietojen tallentamisen verkkopalveluun ja mahdollistavat reittien yhteenvetojen hakemisen. Kaikki vertailtavista järjestelmistä eivät tarjoa mahdollisuutta ajoneuvojen reaaliaikaiseen seurantaan eivätkä rajapintaa erillisten palveluiden käytettäväksi.

Vertailtavien ajoseurantajärjestelmien osalta ei ole saatavilla suorituskykytietoja, minkä takia ei pystytä vertailemaan järjestelmien suorituskykyä. Toteutettu ajoseurantajärjestelmä täyttää asetetut paikannuksen suorituskyvyn vaatimukset, kun sijaintitiedoille suoritetaan yksinkertainen jälkikäsitteily, jossa poistetaan yksittäisen seurantalaitteen toimittamat virheelliset mittaustulokset. Osa vertailtavista ajoseurantajärjestelmistä sisältää kiihtyvyyssanturin, joka mahdollistaa paremman virheellisten mittausten suodatuksen. Tiedonsiirtoon kaikki järjestelmät käyttävät matkapuhelinverkkojen tiedonsiirtoa, mutta osa vertailtavista järjestelmistä tukee uudemman sukupolven matkapuhelinverkkoja, jotka mahdollistavat suuremman tiedonsiirron kapasiteetin.

7 YHTEENVETO

Työssä toteutettiin ajoseurantajärjestelmä valmiita komponentteja hyödyntämällä. Järjestelmän paikannuslaite koottiin Arduino-alustasta ja SIM808-moduulista, joka sisältää GPS-paikannuksen ja GPRS-tiedonsiirron. Paikannuslaitteen arkkitehtuuri ja ohjelman toteutus mahdollistavat yksittäisten komponenttien korvaamisen muilla, samat ominaisuudet tarjoavilla komponenteilla. Järjestelmän palvelin toteutettiin mikropalveluarkkitehtuurille. Palvelimen rajapinnat toteutettiin modulaarisella Django-ohjelmalla, jossa hyödynnettiin valmiita lisäosia. Palvelimen tietovarastojen toteuttamiseen käytettiin PostgreSQL tietokantaan PostGIS paikkatietojärjestelmä laajennoksella ja Redis avainarvo -tietokantaa sijaintitietojen reaaliaikaiseen välittämiseen. Palvelimen kapasiteettia on mahdollista skaalata ja hajauttaa tarvittaessa.

Toteutettu ajoseurantajärjestelmän paikannuslaite täyttää pääpiirteissään järjestelmälle asetetut vaatimukset. Lopullisessa järjestelmässä tulee hyödyntää varavirtalähteellä varustettua paikannuslaitetta, jossa GPS-paikannus pidetään käytössä varavirtalähteen avulla myös ajoneuvon ollessa sammutettuna. Ilman varavirtalähdettä olevalla paikannuslaitteen prototyyppiversiolla syntyi liian suuri viive ajoneuvon käynnistämisestä paikannuksen alkamiseen. GPS-paikannuksella saavutettujen tuloksien tarkkuus on riittävän tarkka ajoneuvolla suoritettujen ajojen alku- ja päätepisteiden sekä kuljetun reitin ja reitin pituuden selvittämiseen. Yksittäisten virheellisten GPS-mittauksien aiheuttamien suurien virheiden poistamiseksi sijaintitiedoille suoritetaan yksinkertainen virheellisten mittauksien suodattaminen. Paikannuslaitteen asentaminen ajoneuvoon on helppoa ja käyttäminen ei vaadi käyttäjän toimenpiteitä. Laitteen asennuksen helppoutta voidaan parantaa pidemmällä GPS-antennin johdolla, jolloin antennin sijoittelu helpottuu eikä antennin sijoittelu rajoita paikannuslaitteen asennuksen sijaintia lähelle GPS-antennia. Hankintakustannuksien osalta paikannuslaite ylittää asetetun 100 euron verollisen hankintakustannuksen, jonka takia lopulliseen versioon tulee selvittää mahdollisuuksia halvempiin komponentteihin.

Toteutettu palvelin täyttää asetetut vaatimukset. Vaaditut sijaintitietojen tallennusviiveet ja samanaikaisien paikannuslaitteiden määrät saavutetaan pienillä palvelinresursseilla, joka mahdollistaa palvelun käyttämisen suuremmilla paikannuslaitteiden määrillä palvelinresursseja kasvattamalla. Palvelinohjelmiston komponentteja voidaan skaalata yksittäin ja komponentteja voidaan jakaa pienempiin kokonaisuuksiin, jolloin voidaan hyödyntää suuremman kapasiteetin mahdollistavaa hajautettua palvelinympäristöä. Palvelimen rajapinnoissa käytetään salausta, joka täyttää tietoturvalle asetetut vaatimukset, ja tietova-

raston sisältö varmuuskopioidaan säännöllisesti tietojen katoamisen suojaamiseksi.

Ajoseurantajärjestelmän paikannuslaitteelle voidaan suunnitella oma yhden piirilevyn toteutus, jolloin laitteen kokoa saadaan pienennettyä ja hankintakustannuksia saadaan pienemmiksi suurissa valmistuserissä. Pienissä valmistuserissä valmiista komponenteista koostuva paikannuslaite tulee edullisemmaksi, koska suunnittelu ja kokoonpano eivät vaadi paljoa työtä. Omassa toteutuksessa pystytään valitsemaan komponenttien halutut toiminnallisuudet, eikä valmiiden komponenttien kytkemättä jätetyt toiminnallisuudet haittaa laitteen toteutusta. Paikannukseen voitaisiin soveltaa avustettua GPS-paikannusta, jolloin saadaan vähennettyä paikannuksen aloitusviivettä. Avustetun GPS-paikannuksen aloitusviive saattaisi poistaa varavirtalähteen tarpeen, jolloin paikannuslaite ei tarvitsisi varavirtalähdettä riittävän pienen aloitusviiveen saavuttamiseksi.

Satelliittipaikannuksen katvealueilla tapahtuvien ajojen seuranta voidaan parantaa lisäämällä paikannuslaitteeseen inertiaalinavigointijärjestelmä. Inertiaalinavigointijärjestelmän ja satelliittipaikannuksen yhdistelmällä saavutetaan parempi paikannustiheys ja pystytään suorittamaan paikannus myös satelliittipaikannuksen katvealueilla. Inertiaalinavigointijärjestelmä lisää paikannuslaitteen hankintakustannuksia ja edullisten inertiaalinavigointijärjestelmien virheet kasvavat nopeasti suuriksi, jolloin paikannusta ei pystytä toteuttamaan pitkällä satelliittipaikannuksen katvealueilla. Seurantatuloksia voidaan parantaa myös map matching -menetelmällä, jossa paikannustulokset sijoitetaan kartalle merkityille teille. Map matching voidaan suorittaa paikannustuloksille palvelimella tapahtuvana jälkikäsitteilynä, jolloin paikannuslaitteeseen ei tarvitse tehdä muutoksia. Map matching -menetelmä soveltuu hyvin esimerkiksi tunneleissa tapahtuvan paikannuksen katkoksen parantamiseen tai epätarkkojen paikannustuloksien parantamiseen, jos paikannustulokset ovat riittävän lähellä todellista käytettyä tietä.

Toteutetun ajoseurantajärjestelmän suorituskykyä ei tarvitse parantaa tässä työssä esitettyyn käyttötarkoitukseen, mutta suorituskykyä parantamalla ajoseurantajärjestelmää voidaan soveltaa myös paremman suorituskyvyn vaativissa kohteissa. Parannuksilla, jotka alentavat kustannuksia suorituskykyä laskematta, saavutetaan edullisempi ajoseurantajärjestelmä.

LÄHDELUETTELO

- [1] *Ajoseuranta - seuraa ajoa - automaattinen ajopäiväkirja - ajoneuvopaikannus*. URL: <http://ajoseuranta.fi/ominaisuudet.php> (viitattu 22. 03. 2019).
- [2] M. M. Alani. *Guide to OSI and TCP/IP Models*. English. 2014. painos. Cham: Springer, 2014. ISBN: 3319051512;9783319051512;9783319051529;3319051520;
- [3] J. Andress. *The Basics of Information Security: Understanding the Fundamentals of InfoSec in Theory and Practice*. English. Second. USA: Syngress Media Incorporated, 2014, pp. 1-22.
- [4] Aplicom Oy. *A9 QUICK*. URL: <https://www.aplicom.com/products/telematics-units/a9-quick/> (viitattu 22. 03. 2019).
- [5] Aplicom Oy. *APLICOM A9 QUICK TE - PLUG & PLAY TELEMATICS UNIT FOR TRACKING AND TRACING*. URL: <https://www.aplicom.com/download/aplicom-a9-quick-datasheet/> (viitattu 30. 01. 2019).
- [6] W. Ayoub, A. E. Samhat, F. Nouvel, M. Mroue ja J.-c. Prevotet. Internet of Mobile Things: Overview of LoRaWAN, DASH7, and NB-IoT in LPWANs standards and Supported Mobility. English. *IEEE Communications Surveys & Tutorials* (2018), 1–1.
- [7] Connected Finland. *Peittoalue - Connected Finland*. URL: <http://www.connectedfinland.fi/peittoalue/> (viitattu 19. 02. 2019).
- [8] M. A. A. da Cruz, J. J. P. C. Rodrigues, P. Lorenz, P. Solic, J. Al-Muhtadi ja V. H. C. Albuquerque. A proposal for bridging application layer protocols to HTTP on IoT solutions. English. *Future Generation Computer Systems* 97 (2019), 145–152.
- [9] Department of Defense, USA. *Global Positioning System Standard Positioning Service Performance Standard*. 4th. 2008. URL: <https://www.gps.gov/technical/ps/2008-SPS-performance-standard.pdf>.
- [10] Digita. *IoT LoRaWAN-verkon peittokartta - Digita*. URL: https://www.digita.fi/yrityksille/iot/iot_lorawan-verkon_peittokartta (viitattu 19. 02. 2019).
- [11] *DNA kuuluvuuskartta*. URL: <http://kartat.dna.fi/Peittokartta/> (viitattu 19. 02. 2019).
- [12] Elisa Oyj. *Elisa kuuluvuus*. URL: <https://elisa.fi/kuuluvuus/> (viitattu 19. 02. 2019).
- [13] R. Fielding ja J. Reschke. *Hypertext Transfer Protocol (HTTP/1.1): Message Syntax and Routing*. RFC 7230. Kesäkuu 2014. DOI: 10.17487/RFC7230. URL: <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc7230.txt> (viitattu 08. 03. 2019).
- [14] S. Gleason, D. Gebre-Egziabher ja I. Books24x7. *GNSS applications and methods*. English. Boston, Mass: Artech House, 2009, p. 508.

- [15] GSGroup Finland Oy. *GSGroup - ajoneuvon seurantajärjestelmä - kaluston seuranta*. URL: <https://gsgroupfinland.fi/digitaaliset-ratkaisut/recovery/> (viitattu 22.03.2019).
- [16] GSGroup Finland Oy. *GSGroup - Kalustonhallinta - sähköinen ajopäiväkirja*. URL: <https://gsgroupfinland.fi/digitaaliset-ratkaisut/fleet-management/> (viitattu 20.01.2019).
- [17] G. C. Hillar. *MQTT Essentials - A Lightweight IoT Protocol*. English. 1. painos. GB: Packt Publishing, 2017, pp. 8-56. ISBN: 9781787287815;1787287815;
- [18] ISO/IEC. *Information technology – Open Systems Interconnection – Basic Reference Model: The Basic Model*. 1994. URL: <https://www.iso.org/standard/20269.html>.
- [19] Mastercom Oy. *Kiho Ajopäiväkirja*. URL: <https://www.kiho.fi/ajopaivakirja/> (viitattu 22.03.2019).
- [20] Mastercom Oy. *Kiho Telematiikka*. URL: <https://www.kiho.fi/telematiikka/> (viitattu 22.03.2019).
- [21] Max Technologies Oy. *Maxtech automaattinen ajopäiväkirja - Säästää ja helppoutta*. URL: <https://www.maxtech.fi/ajopaivakirja/> (viitattu 22.03.2019).
- [22] K. Mekki, E. Bajic, F. Chaxel ja F. Meyer. Overview of Cellular LPWAN Technologies for IoT Deployment: Sigfox, LoRaWAN, and NB-IoT. English. Teoksessa: IEEE, 2018, 197–202.
- [23] A. Melnikov ja I. Fette. *The WebSocket Protocol*. RFC 6455. Joulukuu 2011. DOI: 10.17487/RFC6455. URL: <https://rfc-editor.org/rfc/rfc6455.txt> (viitattu 08.03.2019).
- [24] K. B. Moses. Mobile Communication Evolution. English. *International Journal of Modern Education and Computer Science* 6.1 (2014), 25–33.
- [25] I. Skog, P. Handel, Centra, Signalbehandling, S. för elektro- och systemteknik (EES), KTH ja A. L. Centre. In-Car Positioning and Navigation Technologies-A Survey. English. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 10.1 (2009), 4–21.
- [26] G. Sun, J. Chen, W. Guo ja K. J. R. Liu. Signal processing techniques in network-aided positioning: a survey of state-of-the-art positioning designs. English. *IEEE Signal Processing Magazine* 22.4 (2005), 12–23.
- [27] Telia Company. *Telian verkkokartta - kuuluvuus ja tiedonsiirtoyhteyden nopeus*. URL: <https://www.telia.fi/asiakastuki/verkko/verkko/verkkokartta> (viitattu 19.02.2019).
- [28] United Nations Office for Outer Space Affairs. *Current and Planned Global and Regional Navigation Satellite Systems and Satellite-based Augmentations Systems*. 2010. URL: http://www.unoosa.org/pdf/publications/icg_ebook.pdf (viitattu 19.02.2019).
- [29] R. Zafar, E. Yafi, M. F. Zuhairi ja H. Dao. Big Data: The NoSQL and RDBMS review. Teoksessa: *2016 International Conference on Information and Communica-*

tion Technology (ICICTM). Toukokuu 2016, 120–126. DOI: 10.1109/ICICTM.2016.7890788.