



SEINÄJOEN AMMATTIKORKEAKOULU
SEINÄJOKI UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Pekka Raisio

Ohjelmistokeskeinen automaatio peltojen vesitalouden hallinnassa

Opinnäytetyö

Kevät 2023

Insinööri (ylempi AMK), Automaatiotekniikka



SEINÄJOEN AMMATTIKORKEAKOULU

Opinnäytetyön tiivistelmä

Tutkinto-ohjelma: Insinööri (ylempi AMK), Automaatiotekniikka

Tekijä: Pekka Raisio

Työn nimi: Ohjelmistokeskeinen automaatio peltojen vesitalouden hallinnassa

Ohjaaja: Niko Ristimäki

Vuosi: 2023

Sivumäärä: 70

Liitteiden lukumäärä: 3

Suomen ilmasto mahdollistaa kasvintuotannolle kohtuulliset olosuhteet. Ilmastomuutoksen yhteydessä ovat sääolojen ääri-ilmiöt lisääntyneet ja merkittävät kuivuusjaksot kasvukauden aikana pitkittyneet. Muutoksien vaikutukset Suomen peltojen tuotantokykyyn ja satovarmuuteen on tunnistettu ruokahuollon ja huoltovarmuuden kannalta merkittäviksi.

Peltojen tuotantokykyä voidaan vaikeissa sääolosuhteissa parantaa peltojen vesitalouden hallintajärjestelmillä, joita toteutetaan mm. säätösalaajituksella ja salaojakastelujärjestelmillä, joilla parannetaan kasvien kasvuolosuhteita. Kyseisten järjestelmien hallinnassa sovelletaan nykyään pääosin kokemuseräistä tietoa sekä etäohjausta ja -valvontaa.

Peltojen vesitalouden hallinnan automatisoinnilla voidaan parantaa säätösalaajakastelun toimintaa vaihtelevissa sääolosuhteissa sekä vähentää järjestelmän ylläpitoon ja valvontaan käytettävää työpanosta. Teollisuus 4.0, johon liittyvät muun muassa esineiden internet (IoT), teollinen esineiden internet (IIoT), pilvilaskenta ja koneoppiminen, mahdollistaa automaation tarvitseman tiedon reaaliaikaisen saatavuuden ja käsittelyn. Ohjelmistokeskeinen automaatio tuo IT-teknologian mahdollisuudet automaatiojärjestelmissä olevan tiedon käsittelyyn ja automaatiojärjestelmien ohjaukseen.

IT-teknologian avulla voidaan mallintaa moniulotteisia kokonaisuuksia, joiden mallintaminen laiteläheisellä automaatiolla on ollut haastavaa tai jopa mahdotonta. Koneoppimisen ja tekoälyn hyödyntäminen tulee olemaan mukana myös vesitalouden hallinnassa, kun riittävän laadukasta tietoa aineistosta on saatavilla esim. digitaalisen kaksosen mallintamiseksi. Tiedon keräämisen sekä tiedonsiirron ja -käsittelyn tehtäviin tarjoaa ohjelmistokeskeinen automaatio tehokkaita menetelmiä IT-teknologian avulla.

Automaatiojärjestelmän ylläpito toimintaympäristössä, jossa sähkön saannin ja tietoliikenteen häiriöihin tulee varautua, on haasteellista. Pellojen vesitalouden hallinnan automatisoinnilla saavutettavat hyödyt järjestelmän toimivuuden sekä ylläpito- että valvontatyön osalta ovat kuitenkin merkittävästi automaatiojärjestelmän kehitystyötä ja käyttöönottoa suurempia.

¹ Asiasanat: Ohjelmistokeskeinen automaatio, IEC 61499, MQTT, Sparkplug

SEINÄJOKI UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Thesis abstract

Degree programme: Master of Engineering, Automation

Author/s: Pekka Raisio

Title of thesis: Software centered automation in controlling field water management

Supervisor(s): Niko Ristimäki

Year: 2023

Number of pages: 70

Number of appendices: 3

The Finnish climate has generally been amiable enough to ensure adequate yearly plant production levels despite the country's latitude in the northern hemisphere. Due to the ongoing climate change and intensifying extreme weather conditions, droughts during the growth season have become longer and more common. The resilience in production capacity and crop reliability has been recognized as a critical factor in Finland's emergency food supply management.

Even in difficult conditions crop production can be enhanced with automated water management systems, such as drainage and irrigation. This has a direct effect on harvest success and amount. Nowadays drainage utilizes both experience-based knowledge and remote-controlled automation.

Using automation in water management can increase the precision of drainage and irrigation in rapidly changing weather conditions, thus decreasing the need for manual human-driven supervision and maintenance. The Internet of Things (IoT), Industrial Internet of Things (IIoT), cloud computing and machine learning are all critical components in enabling real-time data management in automation. Combined with software centered automation all the benefits from IT can also be implemented in automated water management systems.

New technologies enable the modelling of multidimensional, complex systems, that have previously been challenging or nearly impossible with earlier automation systems. Implementing machine learning and artificial intelligence in water management systems becomes possible after certain levels of data quality is attained. Software centered automation technologies offer efficient methods for collecting, transferring, and processing huge amounts of data.

The maintenance of automated systems can be challenging, due to possible electricity shortages and disruptions in telecommunication networks. Despite of this, the benefits of developing and implementing an automated water management system can outweigh the cons significantly by reducing the amount of manual labour needed in running the system.

¹ Keywords: Software-oriented automation, IEC 61499, MQTT, Sparkplug

SISÄLTÖ

| | |
|---|----|
| Opinnäytetyön tiivistelmä | 2 |
| Thesis abstract | 3 |
| SISÄLTÖ | 4 |
| Kuva-, kuvio- ja taulukkoluetelo | 7 |
| 1 JOHDANTO | 10 |
| 1.1 Tutkimuksen lähtökohta | 10 |
| 1.2 Tutkimuksen tavoite | 12 |
| 1.3 Tutkimuksen rakenne | 13 |
| 1.4 Yritysesittely | 13 |
| 2 TUTKIMUKSEN TEOREETTINEN TAUSTA | 14 |
| 2.1 Käytetyt tutkimusmenetelmät | 14 |
| 2.2 Tutkimusongelman määrittely | 14 |
| 2.3 Kehittämistyön tavoite ja hyödyt | 15 |
| 2.4 Kehittämistyön valinta ja aiheen rajausta | 15 |
| 2.5 Tutkimusraportin rakenne | 16 |
| 3 Peltojen vesitalouden hallinnan nykytilan kuvaus | 18 |
| 3.1 Peltojen vesitalouden hallinnan tavoitteet | 18 |
| 3.2 Peltojen vesitalouden hallinnan teoreettinen tausta | 19 |
| 3.3 Peltojen luokittelu automatisoinnin näkökulmasta | 20 |
| 3.4 Peltojen vesitalouden hallinta | 21 |
| 3.4.1 Automaatio vesitalouden hallinnassa | 22 |
| 3.4.2 Vesitalouden automaatiojärjestelyjen tavoitteet | 23 |
| 3.5 Tulevaisuuden näkymät ja kehityssuunnat | 24 |
| 3.5.1 Tutkimustarpeet peltojen vesitalouden hallinnassa | 24 |
| 3.5.2 CAP27-ohjelmakauden tavoitteet peltojen vesitalouden hallintaan | 25 |
| 4 PELTOJEN VESITALOUDEN AUTOMAATIOTEKNOLOGIAT | 26 |
| 4.1 Ohjelmistokeskeinen automaatio | 26 |
| 4.1.1 Ohjelmistokeskeisen automaation määrittely | 26 |
| 4.1.2 Ohjelmistokeskeisen automaation referenssiarkkitehtuurimallit | 27 |

| | | |
|-------|---|----|
| 4.1.3 | Digitaalinen kaksonen..... | 29 |
| 4.1.4 | Yhtenäinen nimiavaruus | 30 |
| 4.1.5 | Älykkäät anturit | 31 |
| 4.1.6 | Tapahtumapohjainen automaatio..... | 32 |
| 4.1.7 | Matalakoodi -kehitysvälineet | 33 |
| 4.2 | Tiedonhallinta | 34 |
| 4.2.1 | Avoimen tiedon saatavuus ja käytettävyys | 34 |
| 4.2.2 | Automaatiojärjestelmän tiedonhallinta | 34 |
| 4.3 | Arkkitehtuuri | 35 |
| 4.3.1 | Arkkitehtuurin yleiskuvaus..... | 35 |
| 4.3.2 | Pilvipalvelut..... | 36 |
| 4.3.3 | Reuna- ja usvalaskenta | 37 |
| 4.3.4 | Automaation arkkitehtuurit | 38 |
| 4.3.5 | Automaation tiedonvälitysprotokollat..... | 38 |
| 4.4 | Tietojärjestelmät..... | 39 |
| 4.4.1 | Peltoviljelyohjelmistot..... | 39 |
| 4.4.2 | Mobiilisovellukset..... | 40 |
| 4.5 | Tietoturva | 40 |
| 4.5.1 | Tietoturva internetin näkökulmasta | 40 |
| 4.5.2 | Tietoturva automaatio-ohjelmistojen näkökulmasta | 41 |
| 5 | SUUNNITTELU JA KEHITTÄMINEN..... | 43 |
| 5.1 | Suunnittelun lähtökohdat..... | 43 |
| 5.2 | Kehittämiskohteiden tunnistaminen..... | 44 |
| 5.3 | Automaatiojärjestelmän suunnittelu..... | 45 |
| 5.3.1 | IEC 61499 | 45 |
| 5.3.2 | Hajautettu automaatio..... | 46 |
| 5.3.3 | Tapahtumapohjainen automaatio..... | 46 |
| 5.3.4 | Toteutuksiin liittyvän automaation haasteet | 47 |
| 5.4 | Salaojakasteluautomaation toteutus..... | 48 |
| 5.5 | Ohjelmistokehitys | 49 |
| 5.5.1 | Ohjelmistokeskeisen automaation ohjelmistotuotanto | 49 |
| 5.5.2 | Ohjelmointikielten vaikutus automaatiojärjestelmän toimintaan | 50 |

| | | |
|-------|--|----|
| 5.6 | Palvelumuotoilu | 51 |
| 5.6.1 | Johdanto palvelumuotoiluun | 51 |
| 5.6.2 | Salaojakastelun asiakasymmärryksen kartoitus..... | 52 |
| 5.6.3 | Asiakasymmärryksen tulkinta..... | 52 |
| 5.6.4 | Automaatio-ohjauksen ydinongelmat ja mahdollisuudet | 53 |
| 5.6.5 | Ratkaisujen ideointi | 54 |
| 5.6.6 | Prototyyppien rakentaminen ja testaus | 55 |
| 5.6.7 | Prototyyppi-1: Anturitiedon siirto Sparkplug-yhteydellä..... | 55 |
| 5.6.8 | Prototyyppi-2: Säättösalojakaivon automaatio-ohjaus | 58 |
| 5.6.9 | Mallin tuotteistus ja johtopäätökset | 60 |
| 6 | YHTEENVETO | 61 |
| 6.1 | Peltojen vesitalouden hallinnan automatisoinnin haasteteet | 61 |
| 6.2 | Reunalaskenta, pilvipalvelut, tiedon hyödyntäminen säättömalleissa | 62 |
| 6.3 | Tietoliikenteen erityispiirteet | 63 |
| 7 | JOHTOPÄÄTÖKSET | 64 |
| 7.1 | Ohjelmistokeskeisen automaation mahdollisuudet..... | 64 |
| 7.2 | Peltojen vesitalouden hallinta | 64 |
| | LÄHTEET | 65 |
| | LIITTEET | 70 |

Kuva-, kuvio- ja taulukkoluettelo

| | |
|--|----|
| Kuva 1. Säättösalaajakaivon toimilaite (Kolehmainen Jari Tmi) ja ohjausyksikkö..... | 48 |
| Kuva 2. Puhelimen käyttöliittymä ja säättösalaajakaivot kartalla | 58 |
| Kuva 3. Ilmanpaineanturit ja vedenpinnan vaihtelu ilmanpaineen muuttuessa | 59 |
| Kuvio 1. Ilmastovyöhykkeet | 11 |
| Kuvio 2. Vedenpidätyskäyrien esimerkkejä..... | 19 |
| Kuvio 3. Pellon luokittelu vesitalouden hallinnan automatisoinnin näkökulmasta | 20 |
| Kuvio 4. Säättösalaajitus ja salaajakastelu | 23 |
| Kuvio 5. Automaatiopyramidi | 27 |
| Kuvio 6. Referenssiarkkitehtuurimalli, RAMI 4.0 | 28 |
| Kuvio 7. IIRA-näkökulmien, sovellusalueen ja elinkaaren välinen suhde..... | 28 |
| Kuvio 8. Digitaalinen kaksonen automaation ja IT-tekniikan leikkauksessa..... | 29 |
| Kuvio 9. Salaajakastelujärjestelmän havainnekuva | 36 |
| Kuvio 10. Laitteistoon pääsy rajoitettu VPN-yhteydellä..... | 41 |
| Kuvio 11. Laitteistoon pääsy rajoitettu palomuurilla | 41 |
| Kuvio 12. Microsoftin tietoturvaavoittuvuudet..... | 42 |
| Kuvio 13. Go ja Rust ohjelmointikielten vertailu | 50 |
| Kuvio 14. Palvelumuotoilun kaksoistimantti | 51 |

Käytetyt termit ja lyhenteet

| | |
|---------------------------|--|
| Anonymisointi | Henkilötietojen käsittelyä niin, ettei henkilöä voida tunnistaa |
| CAP | EU:n yhteinen maatalouspolitiikka (Common Agricultural Policy) |
| CPS | Kyberfyysinen järjestelmä (Cyber-Physical Systems) |
| Datasuvereniteetti | Itsemääräämisoikeus omistamaansa tietoon - omaan dataan |
| DDoS | Palvelunestohyökkäys (Distributed Denial of Service) |
| DevEUI | LoRaWAN-laitteen globaalisti uniikki tunniste |
| Edge TPU | Reunalaskennan tekoälykiihdytinpiiri (Tensor Processing Unit) |
| ERP | Toiminnanohjausjärjestelmä (Enterprise Resource Planning) |
| GW | Yhdyskäytävä (Gateway) |
| IEC 61499 | Ohjausjärjestelmän toimintalohkojen kansainvälinen standardi, jossa kolme osaa: Osa 1: Arkkitehtuuri Osa 2: Ohjelmistotyökaluvaatimukset Osa 4: Vaatimustenmukaisuusprofiileja koskevat säännöt |
| LoRa | Pitkän kantaman (Long Range) langaton verkkoteknologia |
| LoRaWAN | Langaton LPWAN, jota hallinnoi LoRa Alliance -järjestö |
| LPWAN | Vähän virtaa kuluttava (Low Power) WAN-verkkoteknologia |
| MES | Tuotannonohjaus (Manufacturing Execution System) |
| Modbus | Asiakas-palvelin-pohjainen automaation tietoliikenneprotokolla |
| NDMI | Kasvuston vesirasitus (Normalized Difference Moisture Index) |
| NDVI | Kasvuston terveys (Normalized Difference Vegetation Index) |
| NDWI | Maan vesipitoisuus (Normalized Difference Water Index) |

| | |
|----------------------------|--|
| OPC UA | Alustariippumaton palvelukeskeinen arkkitehtuuri, joka yhdistää PLC-spesifiset protokollat (mm. Modbus) standardoiduksi rajapinnaksi (Open Platform Communications - Unified Architecture) |
| PLC/HMI | Ohjelmoitava ohjainyksikkö ja käyttöliittymä |
| Pohjavesiputki | Pohjaveden syvyyden ilmaiseva havaintoputki |
| RBE | Raportointi muutoksen yhteydessä (Report By Exception) |
| Reunalaskenta | Datan analysointi tehdään lähellä keräyspistettä (edge computing) |
| Säätösalaojakastelu | Säätösalaojituksen hyödyntäminen kasteluun johtamalla kasteluvettä salaojitukseen, joko pumppaamalla tai yläpuolelta valuttamalla. |
| SCADA | Automaatiojärjestelmän valvonta-, ohjaus- ja tiedonkeruujärjestelmä (Supervisory Control And Data Acquisition) |
| Sigfox | Erittäin pienen kaistan (alle 2 Mb päivässä) langaton LPWAN. |
| Sparkplug | MQTT-protokollan päällä toimiva yhteentoimivuusprotokolla. |
| Säätösalaojitus | Salaojitus, jossa pohjaveden korkeus voidaan padota optimaaliseksi. |
| TCK | Teknologian yhteensopivuuspaketti (Technology Compatibility Kit) |
| Teollisuus 4.0 | Neljäs teollinen vallankumous, johon kuuluvia teknologioita ovat mm. digitaalisuus, tekoäly, robotiikka, teollinen esineiden Internet |
| UNS | Yhtenäinen nimiavaruus (Unified NameSpace) |
| WAN | Laaja-alainen ulkoverkko (Wide-Area Network) |
| Vesiköyhyysindeksi | Vesiköyhyysindeksissä huomioidaan vesivarojen määrän ja laadun lisäksi pääsy vesiresursseihin, vesihuollon kattavuus ja veden käyttö teollisuudessa ja maataloudessa |
| ZigBee | IEEE 802.15.4-standardin mukainen langaton tietoliikenneprotokolla |

1 JOHDANTO

1.1 Tutkimuksen lähtökohta

Maatalouden kannattavuuden lasku on viime vuosien aikana johtunut osittain heikoista kasvuolosuhteista. Kesän kuivuus on aiheuttanut huomattavaa vahinkoa kasvustolle, ja syksyn sateet ovat huonontaneet sadonkorjuun edellytyksiä, jos peltöjen vesitalous ei ole ollut hallinnassa. Salaojayhdistys ja muut alan toimijat ovat tutkineet mm. säätäsalaojituksen ja salaojakastelun mahdollisuuksia peltöjen vesitalouden hallinnassa. Automaation soveltaminen saatujen tutkimustulosten hyödyntämisessä ja uusien näkökulmien, mm. ilmastomuutoksen, huomioiminen peltöjen vesitalouden tutkimuksissa, ovat aktivoituneet viime vuosina.

Peltöjen vesitaloudella on huomattava vaikutus sadon määrään ja laatuun sekä satovarmuuteen. Kylvön ja sadonkorjuun onnistuminen sekä käytettyjen tuotantopanosten kate riippuu suurelta osin peltöjen vesitaloudesta. Huoltovarmuuden näkökulmasta katsottuna varautuminen myös hyvin haastaviin sääolosuhteisiin on mahdollisesti tulevaisuudessa kannattavaa. Huoltovarmuus on yhä tärkeämpi osa yhteiskunnan toimintakykyä. Ruokahuollon mahdolliseksi häiriöiksi on tunnistettu mm. kaupan elintarvikejakeluun liittyvät häiriöt, koska elintarvikkeiden nopean toimitusrytmin takia terminaaleissa tai myymälöissä ei ole varsinaisia varastoja (Holopainen, 2017, s. 56). Myös alkutuotannossa on tapahtunut suuria rakenteellisia muutoksia Suomen EU-jäsenyyden aikana, ja niillä saattaa olla merkitystä ruokahuoltoon.

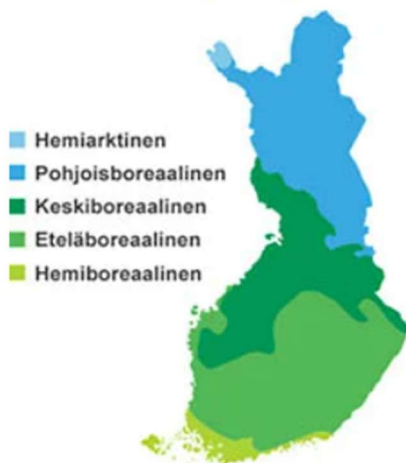
Maatilojen lukumäärä on vähentynyt vuoden 1994 reilusta 100 000 maatilasta puoleen vuoteen 2016 mennessä (Holopainen, 2017, s. 53). Maatilojen toiminta on muuttunut jo lähelle teollisia toimintarakenteita, mikä on lisännyt riippuvuutta tilan ulkopuolisten järjestelmien toimivuudesta. Koneiden teknistymien ja automatisointi ovat lisänneet mm. sähkö- ja IT-riippuvuutta, joka aiheuttaa toiminnalle riippuvuuden häiriöttömään sähkönsaantiin (mts. 54). Vuoden 2016 jälkeen maatilojen määrä on vähentynyt alle 45 000 tilaan vuoteen 2021 mennessä (Luke, 2021). Alkutuotannon automatisoitumista on pidetty uhkana häiriöttömälle tuotannolle, mutta toisaalta maatilojen vähenemisen ja tilakoon kasvun sekä työvoiman heikon saatavuuden takia maatilojen automatisoituminen on tosiasiaassa välttämätöntä alkutuotannon kannattavuudelle ja huoltovarmuudelle. Elintarvikehuollon raaka-aineiden kotimaisuusaste on ollut normaalioloissa noin 80 prosenttia, mitä on pidetty riittävänä (Huoltovarmuuskeskus, 2022). Raaka-aineiden kotimaisuusasteen pieneneminen ruokaketjussa olisi merkittävä riski.

Talouteen ja huoltovarmuuteen liittyvien asioiden lisäksi peltojen vesitaloudella on huomattava merkitys turvemaiden kasvihuonekaasujen päästöjen hallinnassa ja kuormituksessa, joka aiheutuu happamista sulfiittimaista vesistöille. Ympäristöasioiden tutkimus on ollut hyvin esillä, mutta ilmastomuutoksen asettamien uusien haasteiden selvittäminen kannattavan ja tehokkaan alkutuotannon ylläpitämiseksi esim. kuivuuden aiheuttamien haasteiden vuoksi on jäänyt vähemmälle huomiolle.

Viime vuosien aikana ovat useat tutkimuslaitokset raportoineet ilmastomuutoksen aiheuttamista ääri-ilmiöistä. Esim. Pohjois-Amerikan lounaisosat ovat 2000-luvulla kärsineet pahimmasta kuivuusjaksosta yli tuhanteen vuoteen (Tolsa, 2022). Kalifornian helteet, vesipula ja maastopalot ovat olleet laajasti otsikoissa, eikä näköpiirissä ole muutosta parempaan. Nykyisen ennustettavissa olevan tulevaisuuden osalta kyky tuottaa riittävästi ruokaa on maailmanlaajuisesti kasvava huolenaihe. Ruoan käyttäminen sodan välineenä on jo nyt toteutunut (Leiponen-Syyrakki, 2022). Ruoantuotantokyvyn heikentyessä maailmanlaajuisesti tulee alkutuotannosta huolehtia myös Suomessa aikaisempaa paremmin.

Suomen ilmasto jaetaan viiteen ilmastovyöhykkeeseen (kuvio 1). Eteläisten vyöhykkeiden pellot soveltuvat hyvin viljanviljelyyn. Kokonaisvaltainen vesitalouden hallinta huomioi koko valuma-alueen ja siellä tehdyt toimenpiteet, myös metsäojitukset. Suomen pinta-alasta noin kymmenesosa on vesistöjä, ja vesiköyhyysindeksin mukaisesti Suomi on hyvässä asemassa. Suomen sademäärät pystyvät ylläpitämään vesivarantoja viileän ilmaston ansiosta (Reinikainen & Kurppa, 2018).

Ilmastovyöhykkeet



Kuvio 1. Ilmastovyöhykkeet (Ilmatieteen laitos, i.a.).

1.2 Tutkimuksen tavoite

EU:n yhteinen maatalouspolitiikka (Common Agricultural Policy, CAP) pyrkii edesauttamaan ruokaketjun toimivuutta yli 500 miljoonan eurooppalaisen tarpeisiin. Suomen CAP-suunnitelmassa rahoituskaudelle 2023–2027 (Maa- ja metsätalousministeriö (MMM), 2022, s. 82–83) todetaan ilmastomuutosten aiheuttamien ääri-ilmiöiden, kuten lisääntyneen sademäärän ja kuivuuden, aiheuttavan uhan alkutuotannolle. Vanhentuneen maankuivatusinfrastruktuurin takia on olemassa uhka peltojen vedenhallinnan epäonnistumiselle ja tuotantokyvyn laskulle.

Suomen CAP-suunnitelmaan annetussa komission vastineessa todetaan vesitalouden hallinnan, kuten salaoituksen ja kastelun, olevan merkittävä ja välttämätön osa ympäristöälykästä maataloutta (Euroopan komissio, 2022, s. 10). Euroopan komissio kehottaa vastineessaan Suomea parantamaan vesitalouden hallintainfrastruktuurin tasoa.

Tämän opinnäytetyön keskeisin tavoite on selvittää ohjelmistokeskeisen automaation soveltamista peltojen vesitalouden hallintaan ja peltojen älykkään maankuivatusinfrastruktuurin parantamiseen. Tutkimuksen lähtökohtana on määritellä osa-alueita, joissa automaatiolla voidaan vaikuttaa vesitalouden hallinnan parantamiseen. Automaation hankintaan ja automatisoitujen toimenpiteiden kohdentamiseen liittyvät asiat ovat maatiloilla vahvasti osaamiseen, tuotantosuuntaan ja volyyymiin liittyviä. Peltojen vesitalouden hallintaan liittyvät automaatoratkaisut ovat maatilakohtaisia, ja ne liittyvät peltojen maalajien, muotojen ja muiden maaperän vesitalouteen vaikuttavien ominaisuuksien lisäksi kasteluveden saatavuuteen sekä myös viljelijän kyvykkyyteen toteuttaa ja ylläpitää toimivia automaatiojärjestelmiä.

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on myös parantaa ymmärrystä maatilojen mahdollisuuksista vaikuttaa peltojen vesitalouden hallintaan automaatiolla, joka perustuu maatilojen oman toimintaympäristön erityispiirteiden tuntemiseen. Ohjelmistokeskeinen automaatio saattaa tarjota uusia automaatoratkaisuja maatiloille, mikä pyritään tässä opinnäytetyössä huomioimaan. Ohjelmistokeskeisten automaatoratkaisujen soveltaminen maatilojen toimintaympäristön erityispiirteet huomiovaksi vaatii vankkaa osaamista alalta. Tässä opinnäytetyössä pyritään tunnistamaan vaikutusmahdollisuuksia, joilla ohjelmistopohjaisen automaation käyttöön soveltamista voidaan maatiloilla edistää. Merkittävänä mahdollistajana automaation soveltamisen edistämisessä on esimerkiksi käytännönläheisten tietoturvaratkaisujen kuvaaminen ja ohjeistus.

1.3 Tutkimuksen rakenne

Tutkimuksessa haastatellaan keskeisiä peltojen vesitalouden hallinnan asiantuntijoita. Haastattelujen perusteella muodostetaan tilannekuva peltojen vesitalouden hallinnan haasteista.

Muodostetun tilannekuvan pohjalta arvioidaan peltojen vesitaloudessa käytettävän automaation nykytila ja tavoitteet sekä mahdollisuudet, joita ohjelmistokeskeinen automaation soveltaminen voisi tukea. Työssä käytetään menetelmänä palvelumuotoilua, jolla saadun tilannekuvan pohjalta tunnistetaan peltojen vesitalouden hallinnan automatisoinnin ongelmia. Näille ongelmille pyritään löytämään ratkaisuja ohjelmistokeskeisen automaation tarjoamilla mahdollisuuksilla.

1.4 Yritysesittely

Opinnäytetyö tehdään Galileo Oy:lle. Galileo Oy on toiminut yli 30 vuotta peltojen numeeristen tilakarttojen ja vesitalouteen liittyvien ohjelmistojen tuotekehityksen parissa. Galileo Oy:n 1980-luvulla kehittämä maastomalli on ollut käytössä Salaojakeskuksen KAMA-ohjelmassa (Aarrevaara, 2014, s. 237). Monipuolinen kartoitus- ja massalaskentaohjelmisto oli käytössä myös 1990-luvun salaojasuunnittelussa. Galileo Oy on kehittänyt maatalojen numeerista tilakarttaohjelmistoa vuodesta 1993 alkaen. Ohjelmiston nykyinen Nutikka Pro -versio on laajasti käytössä maataloilla.

2 TUTKIMUKSEN TEOREETTINEN TAUSTA

Tässä työssä tavoitteena on kuvata ja ymmärtää peltojen vesitalouteen liittyvät asiakokonaisuudet automaation näkökulmasta ja kehittää ohjelmistokeskeisen automaation hyödyntämistä peltojen vesitalouden hallinnassa taloudellisesti ja teknisesti kannattavilla ratkaisuilla. Työn lähtökohtana on tunnistaa ongelmat, joiden ratkaisuun ohjelmistokeskeinen automaatio soveltuu. Tutkimustehtävien ja ongelmien asettamisessa on tunnistettu ongelmien määrittämisen olevan usein haasteellisempaa kuin niiden ratkaisu (Hirsjärvi ym., 2007, s. 121). Tämän takia ongelmien asettamisessa hyödynnetään mm. palvelumuotoiluprosessia sidosryhmien vaatimusten määrittämisessä ja ratkaisuvaihtoehtojen tunnistamisessa. Tavoitteena on tunnistaa ongelmat, joiden ratkaisut vastaavat työlle asetettuun tutkimuskysymykseen.

2.1 Käytetyt tutkimusmenetelmät

Tutkimusmenetelmänä käytetään mm. asiantuntijoiden haastatteluja, joiden tavoitteena on tilannekuvan muodostaminen ja saatujen tutkimuksessa kehitettyjen ratkaisujen arviointi. Peltöjen vesitalouden hallintaan liittyvää tutkimusta on tehty laaja-alaisesti, ja näiden tutkimusten hyödyntäminen luo hyvän pohjan vesitalouden hallinnassa käytettävien automaatiojärjestelmien vaatimuksille. Tässä opinnäytetyössä kohteena ovat automaatiojärjestelmät, joiden avulla peltojen vesitalouden tutkimuksista saatuja tuloksia voidaan hyödyntää peltoviljelyssä.

Työssä yhdistyvät peltojen vesitalouden tutkimustulokset ja ohjelmistokeskeinen automaatio: IoT-ohjelmistot ja -tietoliikenne, pilvipalvelut sekä niihin liittyvät protokollat, määrittelyt ja standardit. Vesitalouteen ja automaatioon kohdistuvien tutkimustulosten kautta muodostuu työssä arvioitava kokonaisuus, jonka pohjalta vastataan opinnäytetyön tutkimuskysymyksiin.

2.2 Tutkimusongelman määrittely

Opinnäytetyön tavoitteena on määrittää peltojen vesitalouden hallinnan automaatio ohjelmistokeskeisyyden näkökulmasta. Ohjelmistokeskeinen teollisuusautomaatio pohjautuu IEC 61499 -standardiin, joka on hajautettu teollisuusprosessien mittaus- ja ohjausjärjestelmä (Suomen Standardisoimisliitto (SFS), 2013, s. 8). Ohjelmistokeskeinen automaatio sisältää tässä opinnäytetyössä automaatiolaitteiden ohjelmistojen ja arkkitehtuurien lisäksi automaatiojärjestelmään liittyvät pilvipalvelut ja reunalaskenta- sekä ohjelmistotuotantomenetelmät automaatiojärjestelmien kehittämisessä, käyttöönotossa ja ylläpidossa.

Peltojen tarkoituksenmukainen ja kestävä hyödyntäminen kasvinviljelyssä on tutkimuksen lähtökohtana. Tästä näkökulmasta automaation hyödyntäminen vaatii peltojen vesitalouden ymmärtämistä sekä siihen liittyvien seurannaisvaikutusten huomioimista. Peltojen vesitalouden hallinta on tämän työn näkökulmasta osa suurempaa kokonaisuutta, jonka tuloksena saavutetaan myös huoltovarmuuteen ja ympäristöön liittyviä tavoitteita.

Tutkimuksen pääkysymyksenä on: Mitä ohjelmistokeskeinen automaatio mahdollistaa peltojen vesitalouden hallinnassa? Pääkysymyksen selvittämiseksi tarvittavia apukysymyksiä tutkimuksessa ovat: Mitä peltojen vesitalouden hallinnalla tarkoitetaan? Mitä lisäarvoa automaatio tuo peltojen vesitalouden hallintaan? Mitä lisäarvoa ohjelmistokeskeinen automaatio mahdollistaa?

2.3 Kehittämistyön tavoite ja hyödyt

Opinnäytetyön tavoitteena on parantaa ymmärrystä maatilojen mahdollisuuksista hallita peltojen vesitaloutta automaatiolla, joka perustuu maatilojen oman toimintaympäristön erityispiirteiden tuntemiseen. Opinnäytetyöhön sisältyy kehitystyö, jonka avulla saatua tietoa voidaan soveltaa käytäntöön peltojen vesitalouden hallinnassa.

Kehitystyössä tunnistetaan peltojen vesitalouden hallinnan haasteita, joiden ratkaisemisen ohjelmistokeskeinen automaatio mahdollistaa. Kehitystyössä tavoitellaan käytännönläheisiä ratkaisuja automaation hyödyntämiseen. Ratkaisuilla pyritään parantamaan mahdollisuuksia ratkaista huoltovarmuuteen ja ympäristöön liittyviä kysymyksiä.

2.4 Kehittämistyön valinta ja aiheen rajaus

Kehittämistyössä tunnistetaan palvelumuotoilun periaatteiden mukaisesti peltojen vesitalouden hallinnan haasteita. Kehitystyössä hyödynnetään laajasti sidosryhmien osaamista ja tietoja. Taustatietojen kerääminen tehdään haastattelemalla asiantuntijoita ja havainnoimalla toimintaa. Ongelman ymmärtämiseen tähtäävä työ tehdään vertailemalla ja analysoimalla toimintatapoja ja -menettelyjä, joita vesitalouden hallinnassa käytetään. Saatavilla olevaa tutkimusmateriaalia ja -aineistoja hyödynnetään taustatietojen selvittämisessä ja kiteyttämisessä vaatimuksiksi palvelumuotoilun prototyypeille, joiden toteutus rajataan tutkimustavoitteiden mukaisesti ohjelmistokeskeiseen automaatioon.

2.5 Tutkimusraportin rakenne

Tämä opinnäytetyö koostuu johdannosta, opinnäytetyön teoreettisesta taustasta, nykytilan kuvaamisesta, vesitalouden hallinnan teoriasta sekä vesitalouden hallinnan suunnittelusta että kehittämisestä. Näistä viimeinen osio kiteytyy palvelumuotoilun menettelytavoilla toteutettuun peltojen vesitalouden hallinnan prototyyppiin ja malliin. Yhteenveto ja johtopäätökset luvuissa tarkastellaan opinnäytetyön tuloksia ja esitetään mahdollisia jatkotoimenpiteitä.

Johdannossa kuvataan tutkimuksen taustalla olevia ilmiöitä ja haasteita. Luvun tarkoituksena on antaa lukijalle riittävät tiedot tavoitteista, joiden vuoksi tutkimus on tehty. Tutkimuksen kohde rajataan yleisellä tasolla tavoitteeksi löytää ohjelmistokeskeisen automaation mahdollisuuksia hallita peltojen vesitaloutta. Erillistä hypoteesia ei aseteta.

Tutkimuksen teoreettinen tausta -luvussa (luku 2) kuvataan opinnäytetyössä käytettävien menetelmin valintaa ja perusteluja, joiden perusteella valintaan on päädytty. Opinnäytetyön tavoitteena on tunnistaa taustatietojen ja tutkimustulosten perusteella automaatiolle soveltuvia kehityskohteita, joihin kehitystyössä etsitään ohjelmistokeskeisen automaation tarjoamia ratkaisuja.

Peltojen vesitalouden hallinnan nykytilan kuvaus luvussa tunnistetaan tehtyjen toimenpiteiden tavoitteita ja avataan vesitalouden hallinnan teoriaa, joka vaikuttaa näköpiirissä olevien kehityssuuntien toteutumiseen. Peltöjen vesitalouden hallinnan tavoitteet nähdään usein ristiriitaisina kasvintuotannon ja ympäristökysymysten näkökulmista. Tavoitteiden taustalla olevien huolenaiheiden tunnistaminen on edellytys tavoitteiden yhteensovittamiselle ja vaikuttavien toimenpiteiden kohdentamiselle kategoristen ohjeiden ja kieltojen sijasta. Ohjeiden ja kieltojen muodossa ympäristön ja peltojen vesitalouden hallinnan monimuotoisuus ja erityispiirteet helposti unohtuvat.

Peltojen vesitalouden automaatioteknologiat luvussa selvitetään automaatioteknologioita, joita voidaan soveltaa peltojen vesitalouden hallintaan. Keskeisenä lähtökohtana on ohjelmistokeskeinen automaatio ja siihen liittyvät erityispiirteet, jotka mahdollistavat IoT:n tarjoamien mahdollisuuksien vaikuttavan hyödyntämisen. Automaation viitearkkitehtuurien avulla peltojen vesitalouden hallinnan automaatiosta tunnistetaan samoja elementtejä kuin Teollisuus 4.0 -kokonaisuudesta ja hyödynnetään teollisuuden viitearkkitehtuureja vesitalouden hallinnan automaation referenssiarkkitehtuurimalleina.

Suunnittelu ja kehittäminen luvussa kuvataan opinnäytetyön päättelyketjuja, joissa teoriatietojen ja tehtyjen havaintojen avulla rajataan pois toteutusvaihtoehdot peltojen vesitalouden hallinnan automaatiosta. Keskeisenä automaation teoriatiedon taustamateriaalina suunnittelussa on Teollisuus 4.0 mallin mukaisten automaatoratkaisujen soveltaminen. Suunnittelun aikana tehdyt havainnot automaation soveltamisen haasteista perustuvat asiantuntijoiden kanssa käytyjen keskustelujen lisäksi webinaarien, messujen sekä tutustumiskäyntien aikana tehtyihin havaintoihin.

Suunnittelu ja kehittäminen luvun keskeisenä sisältönä on palvelumuotoiluprosessilla toteutettu kehittämistyö, jonka avulla tunnistetaan niitä toimintoja, joita ohjelmistokeskeinen automaatio mahdollistaa. Kehittämistyössä viedään vesitalouden hallinta teoreettiselta tasolta käytäntöön ja tunnistetaan palveluja, laitteita ja toimintoja, joiden pohjalta ohjelmistokeskeinen automaatio voidaan toteuttaa. Kehittämistyön aikana tunnistetut puutteet ja mahdollisuudet ohjelmistokeskeisen automaation soveltuvuudesta peltojen vesitalouden hallintaan sekä niiden pohjalta tehdyt johtopäätökset antavat vastauksen tutkimuskysymykseen: ”Mitä ohjelmistokeskeinen automaatio mahdollistaa peltojen vesitalouden hallinnassa?”

Yhteenveto tiivistää ohjelmistokeskeisen automaation näkökulman vesitalouden hallintaan ja johtopäätökset-luvussa vastataan esitettyyn tutkimuskysymykseen sekä tehdään tutkimukseen pohjautuvat johtopäätökset. Ohjelmistokeskeisten automaatiojärjestelmien ohjelmistotuotannossa mm. konttiteknologiat mahdollistavat toimintoja, joiden hyödyntäminen saattaa muuttaa merkittävästi toimintaprosesseja.

3 Peltojen vesitalouden hallinnan nykytilan kuvaus

Tärkeimmät elementit peltojen vesitalouden hallinnassa ovat maaperän ominaisuudet ja sääolosuhteet, jotka molemmat vaihtelevat Suomessa huomattavasti. Peltojen vesitalouden hallintaan liittyvät sidosryhmien vaatimukset, kuten poliittiset päätökset peltojen vesitalouden tavoitteissa, tulevat kasvamaan (MTK, 2022). Ennallistamiseen liittyvät vaatimukset tulevat esim. turvepeltojen osalta vaikuttamaan toimenpiteisiin, toisaalta huoltovarmuus ja kriisitilanteisiin varautuminen tulevat olemaan merkittäviä asioita.

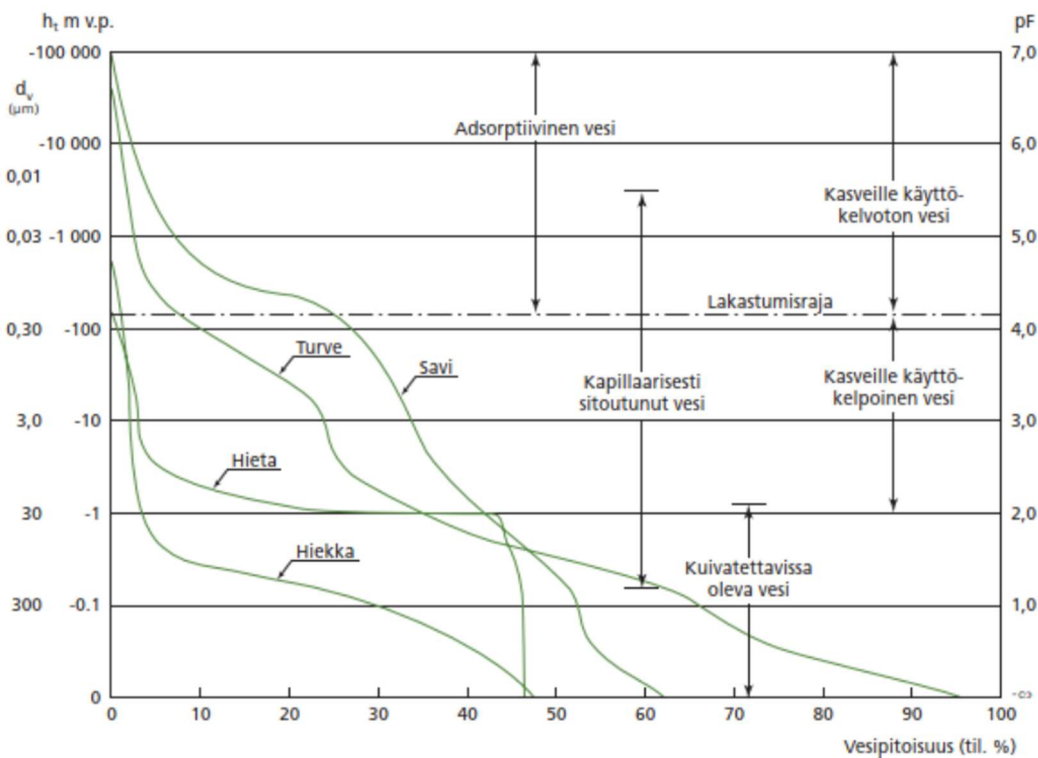
3.1 Peltojen vesitalouden hallinnan tavoitteet

Lähtökohtaisesti peltojen vesitalouden hallinnan pyrkimyksenä on mahdollistaa sadon tehokas tuottaminen tarjoamalla kasveille optimaaliset kosteusolosuhteet itämisen, kasvun ja sadonmuodostuksen aikana. Liiallinen kosteus hidastaa maan lämpenemistä keväällä, ja keuhalla lammikoituva vesi saattaa puolestaan tukehduttaa kasvuston. Nykyaikaisessa peltoviljelyssä käytettävien koneiden ja menetelmien takia yhä tärkeämmäksi tavoitteeksi on muodostunut pellon koko, kantavuus ja esteettömyys. Salaojituksella tehostetaan kasvuolosuhteiden lisäksi myös viljelytoimenpiteiden suorittamista, sillä märkä pelto ei kanna työkoneita, ja kylvön ja sadonkorjuun suorittamiseen tulee haasteita. Vesitaloudella on merkittävä vaikutus pellon maaperän rakenteen säilymiseen kasveille ja vesitaloudelle optimaalisena, erityisesti käytettäessä raskaita työkoneita (Maanmittauslaitos (MML), i.a.).

Peltojen vesitalouden hallinta on ollut Suomessa vuosisatoja kuivatusta, toisin sanoen kasveille haitallisen veden poistamista pelloilta sekä kasvuolosuhteiden parantamista hallanaroilla pelloilla. Kastelun merkitys on ollut kasvien kasvuolosuhteille kuivatusta vähäisempi, ja kastelulla saavutettavat hyödyt ovat liittyneet aikaisemmin lähinnä erikoiskasvien viljelyyn. Kuivatus on edelleen laajamittaisin toimenpide peltojen vesitalouden hallinnassa. Sään ääri-ilmiöiden yleistyessä ja ympäristökysymysten vaikutuksien lisääntyessä peltojen vesitalouden hallinnan tavoitteet ja niiden edellyttämät toimenpiteet muuttuvat haastavimmiksi. Sääätösala-
ojituksen tavoitteena on mm. kasveille käyttökelpoisen veden pidättäminen maaperään koko kasvukauden alaksi (Salo ym., 2021, s. 33). Sääätösala-
ojitus on yleistynyt viime vuosina ympäristökorvausjärjestelmän ansiosta. Vuonna 2017 maksettiin sääätösala-
ojituksesta korvausta 42 000 hehtaarin alalle, mutta salaojakastelusta vasta alle 11 hehtaarille.

3.2 Peltöjen vesitalouden hallinnan teoreettinen tausta

Peltöjen vesitalouden hallintaan liittyy keskeisesti maan rakenne, josta riippuu veden riittävä liikkuvuus, kapilaarinen nousu ja pidätyskyky (Salo ym., 2021, s. 33). Pellon optimaaliset ominaisuudet varmistavat kasveille käyttökelpoisen veden saatavuuden ja liiallisen veden poistamisen – myös sääolojen ääri-ilmiöiden aikana. Pellon maaperän vedenpidätyskyvyllä on merkittävä vaikutus pellon tuottokykyyn. Keväällä peltoon sitoutunut vesi on kasvien käytettävissä kuivan alkukesän, mikäli maaperän rakenne mahdollistaa riittävän vedenpidätyskyvyn. Kuivuus on ollut viime vuosina merkittävä kasvien kasvuolosuhteita rajoittava tekijä, ja kuivuuden ennustetaan olevan myös tulevaisuudessa paheneva ongelma peltoviljelyssä (Maa- ja metsätalousministeriö, 2022, s. 81).



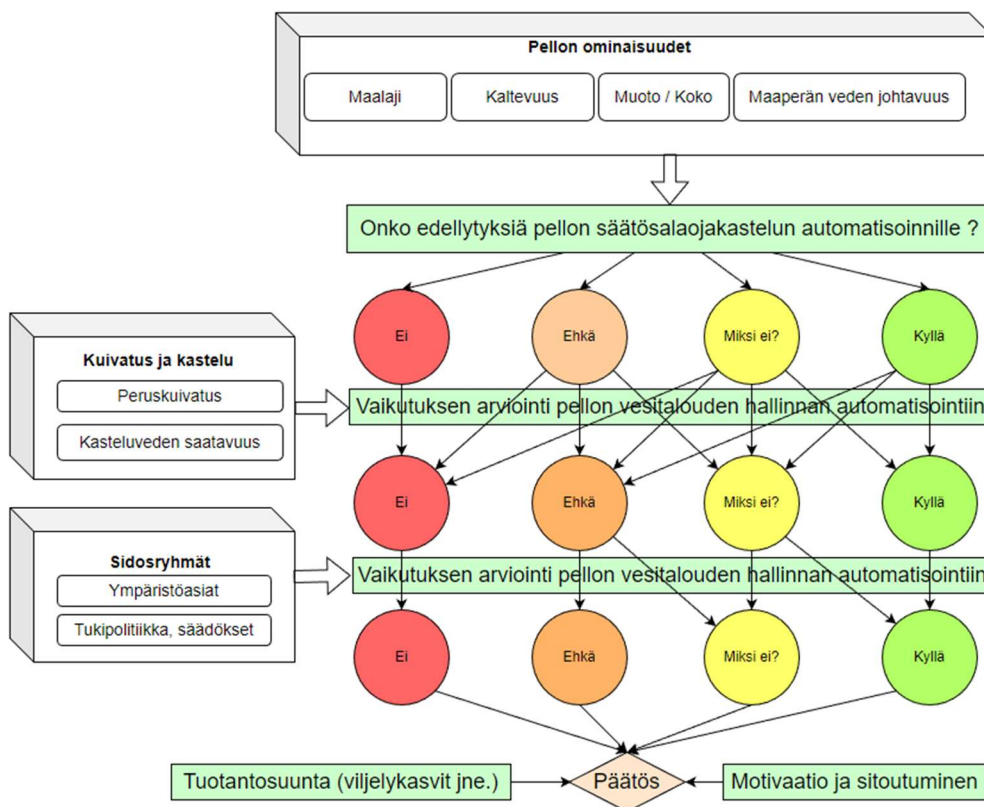
Kuvio 2. Vedenpidätyskäyrien esimerkkejä (Vakkilainen, 2016, s. 95)

Kuvio 2:n mukaan turpeella on huomattavan suuri kasveille käyttökelpoisen veden pidätyskyky. Turvemaiden satovarmuus on parempi kuivuuden mahdollisesti haitatessa muita maa-lajeja. Turve pidättää lähes 30 til.-%, kun savella ja hiekalla pidätyskyky on alle 20 til.-% ja hiekan osalta pidätyskykyä on vain noin 2 til.-% (Vakkilainen, 2016, s. 95).

3.3 Peltojen luokittelu automatisoinnin näkökulmasta

Pellon vesitalouden hallintaan liittyvien säätösalaojitusten ja salaojakasteluiden toimenpiteet tulee kohdentaa pelloille, joilla saatava hyöty on suurin sekä yksittäisen viljelijän, että Suomen huoltovarmuuden näkökulmasta. Salaojakastelujärjestelmän automatisoinnin edellytyksenä on toimintakykyinen järjestelmä, jonka suunnittelussa on huomioitu pellon erityispiirteet. Peltoalueen tasaisuus on tunnistettu tärkeimmäksi edellytykseksi taloudellisesti kannattavalle toteutukselle. Säättöjitettavan kohteen suositusarvo on alle 0.5 %, ja 2 %:n kaltevuutta pidetään ehdottomana maksimina (Paasonen-Kivekäs, 2016, s. 341). Salaojakastelujärjestelmä toimivuudelle on kuitenkin useita muitakin edellytyksiä, kuin pellon kaltevuus.

Kuviossa 3 on kuvattu peltojen vesitalouden hallinnan automatisoinnissa huomioitavia asioita. Pellon ominaisuudet, kasteluveden saatavuus, ympäristöasiat ja tuotantosuunta ovat luonnollisesti tärkeitä asioita toteutuksen kannalta. Salaojakastelulla ei voi parantaa vesitaloutta, jos pohjavesi nousee vain satunnaisesti salaojasyvyyteen ja huonosti vettä johtava maakerros on syvällä (Järvenpää & Savolainen, 2015, s. 155). Automaation toimivuuden kannalta tärkeimmät asiat ovat viljelijän motivaatio ja sitoutuminen järjestelmän ylläpitoon.



Kuvio 3. Pellon luokittelu vesitalouden hallinnan automatisoinnin näkökulmasta

3.4 Peltöjen vesitalouden hallinta

Peltöjen vesitalouden hallintaa on tehty aikaisemmin pääsääntöisesti sellaisilla kuivatusjärjestelmillä, joiden ylläpitotehtävät ovat järjestelmän toimintakykyyn liittyviä. Näitä ovat esimerkiksi avo-ojien perkaus ja salaojien huuhtelu. Säätösalojituksessa järjestelmän ylläpitoon liittyvät myös säätöjärjestelmän toimenpiteet, jotka sisältävät järjestelmän seurannan ja säädöt. Säätösalojituksen aiheuttama työmäärä saattaa olla huomattava, mikäli säädettäviä kohteita on laajalla alueella. Esimerkiksi Tyrnävän perunaviljelyalueen tuhat säätösalojakaivoa aiheuttavat huomattavan suuren ylläpitotarpeen (Kaleva, 2019).

Salaojakastelussa kasteluveden pumppaaminen kasvattaa järjestelmän ylläpitoon tarvittavaa työmäärä huomattavasti, jolloin automatisoinnilla saavutettavat hyödyt saattavat olla merkittäviä. Salaojakastelusta kiinnostuneet viljelijät ovat tehneet pelloilleen salaojakastelutoteutuksia, joiden avulla on saavutettu merkittäviä satomäärien lisäyksiä. Toteutuksissa on käytetty kasteluveden pumppaukseen mm. polttomoottorikäyttöisiä pumppausjärjestelmiä. Aurinkopaneelijärjestelmien yleistyessä on riittävä sähkön saanti kastelupumpuille tullut helpommin toteutettavaksi ja aurinkosähköjärjestelmään perustuvat pumput ovat yleistyneet.

Salaojakastelutoteutuksissa järjestelmän etävalvontaan käytetään matkapuhelinverkkojen lisäksi mm. Sigfox- ja LoRaWAN-yhteyksiä. Sigfox-tekniikalla saavutetaan teoriassa jopa 15 vuoden paristoiden kesto, joka käytännön sovelluksissa tarkoittaa 1-5 vuoden toiminta-aikaa (Isohanni, 2017). Pitkä toiminta-aika on mahdollista, koska siirrettävä tietomäärä SigFox-yhteydellä on vähäinen. Sigfox-laite voi lähettää vain 140 viestiä 24 tunnin aikana.

Salaojakastelujärjestelmän automatisointia on toteutettu lähinnä etäohjaukseen ja pumppujen toiminnan optimointiin. Tavoiteltavan pohjaveden pinnan korkeuden säätämisessä käytetään pohjavesiputkia, joiden paikat on valittu aikaisempien vuosien kokemusten perusteella parhaiten pellon pohjaveden korkeutta edustavaksi (Paasonen-Kivekäs, 2016, s. 346). Vedenpinnan korkeutta mitataan normaalisti käsin. Pohjavesiputkien lukeminen tulee tehdä sateisina aikoina usein, jonka takia mittauksia on myös automatisoitu, jolloin saadaan selville lyhytaikaisetkin vaihtelut vedenpinnan korkeudessa (mt.). Pohjavesiputkien vedenpinnan korkeuden, sääennusteiden ja kokemuspohjaisen tiedon perusteella tehdään tarvittavat säätötoimenpiteet säätösalojakaivojen padotuskorkeuksiin.

3.4.1 Automaatio vesitalouden hallinnassa

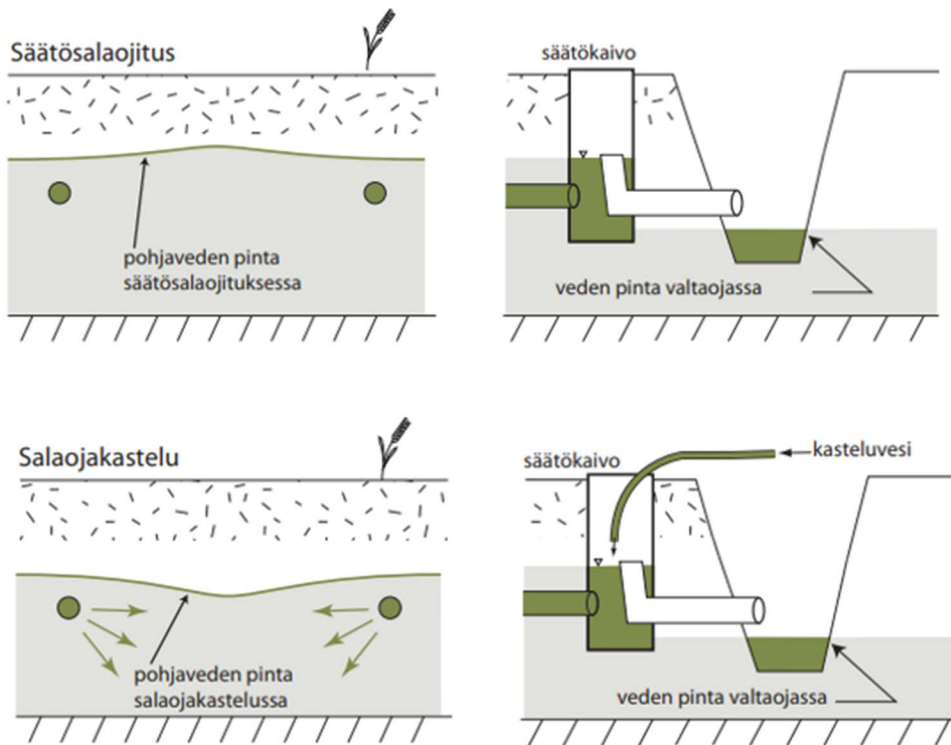
Salaojituksen suunnittelussa mitoittaminen esimerkiksi viiden vuoden välein toistuvan keskimääräisen sadannan mukaisesti, tarkoittaa käytännössä neljän vuoden osalta ylitehokasta kuivatusta. Tämän takia saatetaan menettää kasvin kannalta mahdollisuudet kasvun optimolosuhteisiin kuivana kasvukausina. Säätösalojituksen säädettävällä kuivatussyvyydellä voidaan mahdollisesti vähentää tehokkaasta kuivatuksesta aiheutuvia haittoja.

Salaojakastelussa voidaan tehostaa kuivatussyvyyden säätöä pumpppaamalla vettä tarvittaessa salaojaputkistoon ja estää näin pohjaveden lasku kasvien kannalta liian alas. Vesitalouden muutosten huomioiminen säätötoimenpiteissä sekä toiminnan valvonta voidaan automatisoinnin avulla tehdä vähemmän työllistäväksi, jolloin saavutetaan merkittävää työajan säästöä. Lisäksi voidaan automatisoida säännöllisiä toimenpiteitä, kuten putkiston huuhtelu, jonka suorittaminen ilman automatisointia vaatisi käynnin säätösalojakaivolla.

Tutkimuspelloilla voidaan kerätä yksityiskohtaista tietoa peltomaan kosteustilanteesta sijoittamalla esim. langattomia Soil Scout -antureita maahan eri syvyyksille. Lisäksi pohjavesiputkien avulla saadaan kerättyä tietoa pohjaveden korkeudesta peltolohkon eri alueilla. Erikoiskasvien tehoviljelyssä on perusteltua mallintaa pellon vesitalouden tilanne tarkasti. Peltujen sadetuskastelussa, joissa automaatiota ei käytetä ohjaukseen, riittää usein kokemusperäinen tieto tarvittavasta kastelusta, mutta tilanne on aina tapauskohtainen.

Salaojakastelussa pohjaveden pinnan korkeus peltolohkolla vaikuttaa kasvuolosuhteisiin. Kastelu- ja kuivatustarve on haastava määritellä ilman mittaustietoa. Pohjaveden pinnan korkeustieto pellolla voidaan arvioida säätösalojakaivojen padotuskorkeuden perusteella. Kasvukauden aikana pohjaveden optimaaliseen padotuskorkeuteen vaikuttaa kasvuston lisäksi viljelytoimenpiteet ja odotettavissa olevat sademäärät (Paasonen-Kivekäs, 2016, s. 345).

Säätösalojakastelussa pohjaveden korkeustiedon avulla määritellään säätökaivojen asetukset. Säätökaivon padotuskorkeuden pysyessä samana pohjaveden pinnan korkeudessa tapahtuu huomattava muutos, kun siirrytään kuivatuksesta kasteluun (ks. kuvio 4). Salaojakasteluun siirryttäessä säätökaivon padotuskorkeutta tulee nostaa, että pohjaveden pinta pellolla säilyy tavoitekorkeudessa. Ohjaustieto säätösalojakaivon padotuskorkeudeksi saadaan pellolla olevien pohjavesiputkien mittaustietoa ja kokemusperäistä tietoa soveltamalla.



Kuvio 4. Säättösalaajitus ja salaojakastelu (Paasonen-Kivekäs, 2016, s. 338)

3.4.2 Vesitalouden automaatiojärjestelyjen tavoitteet

Säättösalaajituksen ja salaojakastelun automaatiojärjestelyillä tavoitellaan yleensä valvontai ohjaustyön vähentämistä. Etäohjauksella ja valvonnalla on suuri merkitys mm. työmäärän vähentämisessä ja toimenpiteiden oikea-aikaisessa toteutuksessa. Jos säättösalaajakaivojen ylläpitoon liittyvät tehtävät vaativat merkittävän työmäärän, saattavat säätötoimenpiteet kiireisinä aikoina jäädä tekemättä tai toimenpiteiden ajankohta ei ole optimaalinen.

Salaojakastelussa automaatio saattaa merkitä työmäärän vähenemisen lisäksi tarkempaa ohjausta ja mahdollisuutta estää vahingollisia muutoksia. Lisäksi sen avulla voidaan hyödyntää aikaisemmin ulottumattomissa olevia uusia teknologisia mahdollisuuksia. Automaation hyödyntäminen edellyttää tarkan ohjaustiedon saamista, joka salaojakastelussa liittyy pääsääntöisesti pohjaveden korkeuteen. Liian korkealle nouseva pohjavesi on vahingollinen kasveille ja se tulee havaita ennen kasveissa tunnistettavia muutoksia (Linnér, 2016, s. 354). Pohjaveden pinnan automaattinen säätely mahdollistaa myös sääennusteisiin pohjautuvan kasteluveden käytön reaaliaikaisen optimoinnin, mikäli kasteluveden saatavuus on rajoitettua.

Automaatiolaitteiden käytön yhteydessä tulee turvallisuuskohdat huomioida huolellisesti. Salaojakastelun automaattisesti käynnistyvät pumput ja säätökaivojen ohjaukset saattavat ovat turvallisuusriskejä työntekijöille, mikäli mahdollisia uhkia ei ole tunnistettu ja arvioitu. Henkilöriskien lisäksi tulee automaatiojärjestelmissä huomioida tietoturvaan ja kyberturvallisuuden liittyvät riskit. Tietojen saatavuuden ja eheyden varmistaminen varmuuskopioinnilla ei yksinään ole riittävä toimenpide. Riskien arviointi ja mahdollisten uhkien ja heikkouksien kartoittaminen on tärkeä osa automaatio suunnittelua, ja sen lisäksi on tehtävä päätökset riskienhallintatoimenpiteistä. Kun päätettyjen toimenpiteiden vaikuttavasta suorittamisesta on huolehdittu, tulee jäännösriski olla hyväksyttävissä ennen järjestelmän käyttöönottoa.

3.5 Tulevaisuuden näkymät ja kehityssuunnat

Peltojen kuivatukseen liittyviä lukuisia tutkimustuloksia on julkaistu vuosikymmenien aikana mm. Salaojayhdistys ry:n toimesta. Tutkimukset keskittyivät 1980-luvun loppupuolelle asti peltojen kuivatukseen, mutta jo 1990-luvun alussa Salaojituksen tutkimusyhdistys käynnisti myös säätösalaoituksen tutkimuksen (Aarrevaara, 2014, s. 241). Salaojakastelun kiinnostus heräsi 1990-luvulla erityisesti perunanviljelijöiden keskuudessa (mts. 262).

Peltojen kuivatuksen ja kastelun tutkimukset ovat viime vuosina kohdistuneet usein ympäristökysymyksiin. Kasvihuonepäästöt ovat uusia tutkimuskohteita, jotka lisäävät ravinnepäästöjen ja happamien sulfaattimaiden tutkimuksella saatua tietoa vesitalouden hallinnan ympäristökysymyksiin. Säätösalaoituksen ja salaojakastelun ympäristökysymyksiin liittyvät tutkimukset saattavat olla hyödynnettävissä myös sään ääri-ilmiöiden viljely- ja huoltovarmuudelle aiheuttamien ongelmien ratkaisussa.

3.5.1 Tutkimustarpeet peltojen vesitalouden hallinnassa

Ilmastomuutoksen vaikutukset ovat olleet tunnistettavissa myös Suomen ilmastossa, vaikkakin tosin toistaiseksi lievinä ja osin uusia mahdollisuuksia antavina mm. kasvukauden lämpösumman osalta. Kuivuuteen liittyvät haasteet ovat olleet Suomessa ilmastomuutoksen ääri-ilmiöistä eniten haittaavia, koska vesitalouden hallinnassa on vuosikymmeniä keskitytty pääasiassa tehokkaisiin kuivatusjärjestelmiin (Kauppinen ym., 2017, s. 8-11).

Suomi on ollut kuivuusindeksillä mitattuna maailman parhaita maita vesivarojen määrässä, vesihuollossa ja veden käytössä kotitalouksissa, maataloudessa ja teollisuudessa sekä ympäristöasioissa (Opetushallitus, 2022). Kuivuuden hallintaan liittyviä keinoja on käytettävissä, mikäli asia nähdään huoltovarmuuden kannalta olennaiseksi. Huoltovarmuus ei ole ollut viime vuosina keskeinen tavoite poliittisessa päätöksenteossa, mutta toimintaympäristön muutoksen takia on ruokahuolto noussut uudelleen huolenaiheeksi (Humalamäki, 2022).

Suomen huoltovarmuus on ollut energian ja ruuan osalta osittain tuonnin varassa, mikä on osoittautunut esimerkiksi sähkön osalta erittäin riskialttiiksi. Sähkön varmuusvarastointi ei ole mahdollista, minkä takia valtion tasolla olisi pikaisesti ryhdyttävä vahvistamaan sähkön omavaraisuutta ja tuottokykyä. Elintarvikkeiden varmuusvarastointi ei myöskään ole mahdollista, koska sen toteuttaminen olisi liian kallista (Sokala, 2021).

3.5.2 CAP27-ohjelmakauden tavoitteet peltöjen vesitalouden hallintaan

Suomen CAP -suunnitelma vuosille 2023–2027 toteaa kattavasti maatalousmaan kasvukuntoon liittyviä ongelmia, joihin kuuluu mm. maatalouden kuivatusjärjestelmien kunnan heikkous (Maa- ja metsätalousministeriö (MMM), 2022, s. 81). Maankuivatuksen infrastruktuuri tulisi uudistaa vastaamaan ilmastomuutoksen aiheuttamia muutoksia, kuten sadannan intensiteetin ja ajallisen jakautumisen aiheuttamia haasteita. Maa- ja metsätalousministeriön CAP27-suunnitelmassa todetaan, että kuivuushaittoja voidaan vähentää sääätösaloituksella ja lisäksi sääätösaloitus mahdollistaa myös altakastelun. Suunnitelmassa todetaan kastelun tarvitsevan isoja investointeja, jonka vuoksi kastelu on ollut aikaisemmin käytössä lähinnä erikoiskasveilla.

Maa- ja metsätalousministeriön suunnitelmassa todetaan, ettei olemassa olevien kuivatusjärjestelmien kunnostus perinteisin menetelmin riitä, vaan tarvitaan kokonaisvaltaisempaa vesienhallintaa (MMM, 2022, s. 81). Tällainen vesienhallinta pitää toteuttaa poikkialaisesti huomioiden myös metsäalueilta tuleva valunta. Kuivuuskaudet tulevat yleistymään kasvukauden aikana, jolloin käytettävissä olevat vesivarat voivat muodostua paikoin ongelmaksi.

4 PELTOJEN VESITALOUDEN AUTOMAATIOTEKNOLOGIAT

4.1 Ohjelmistokeskeinen automaatio

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on ohjelmistokeskeisen automaation mahdollisuuksien tunnistaminen peltojen vesitalouden hallinnassa. Ohjelmistokeskeinen automaatio tuo laitteistoriippumattomuuden lisäksi useita muita etuja. Keskeisimmiksi on teollisuudessa tunnistettu tuotannon tehokkuus ja joustavuus sekä tiedon liikkuvuus eri järjestelmien välillä ja mm. tietojen siirtäminen pilveen analysoitavaksi (SIL, 2021). Maatalouden toimintaympäristössä voidaan tunnistaa samoja haasteita kuin teollisuudessakin, mutta myös eroja esimerkiksi ohjauksen reaali-aikavaatimuksissa. Ohjelmistokeskeisen automaation tärkeimmät asiat peltojen vesitalouden hallinnassa ovat samat kuin teollisuudessa: IT-teknologioiden mahdollistama joustavuus ja laskentateho sekä tiedonsiirto eri järjestelmien ja pilvipalveluiden välillä.

Peltojen vesitalouden hallinnassa automaation referenssimallit (ks. luku 4.1.2) ovat tarpeellisia kokonaiskuvan havainnollistamiseksi. Ohjelmistokeskeisen automaation suunnittelussa on tarpeellista tunnistaa sellaiset keskeiset elementit, jotka tukevat ja mahdollistavat referenssimallien mukaista toteutusta. Näitä elementtejä ovat mm. digitaalinen kaksonen, yhtenäinen nimiavaruus, älykkäät anturit, tapahtumapohjainen automaatio ja pilvipalvelut, joita käsitellään seuraavissa luvuissa.

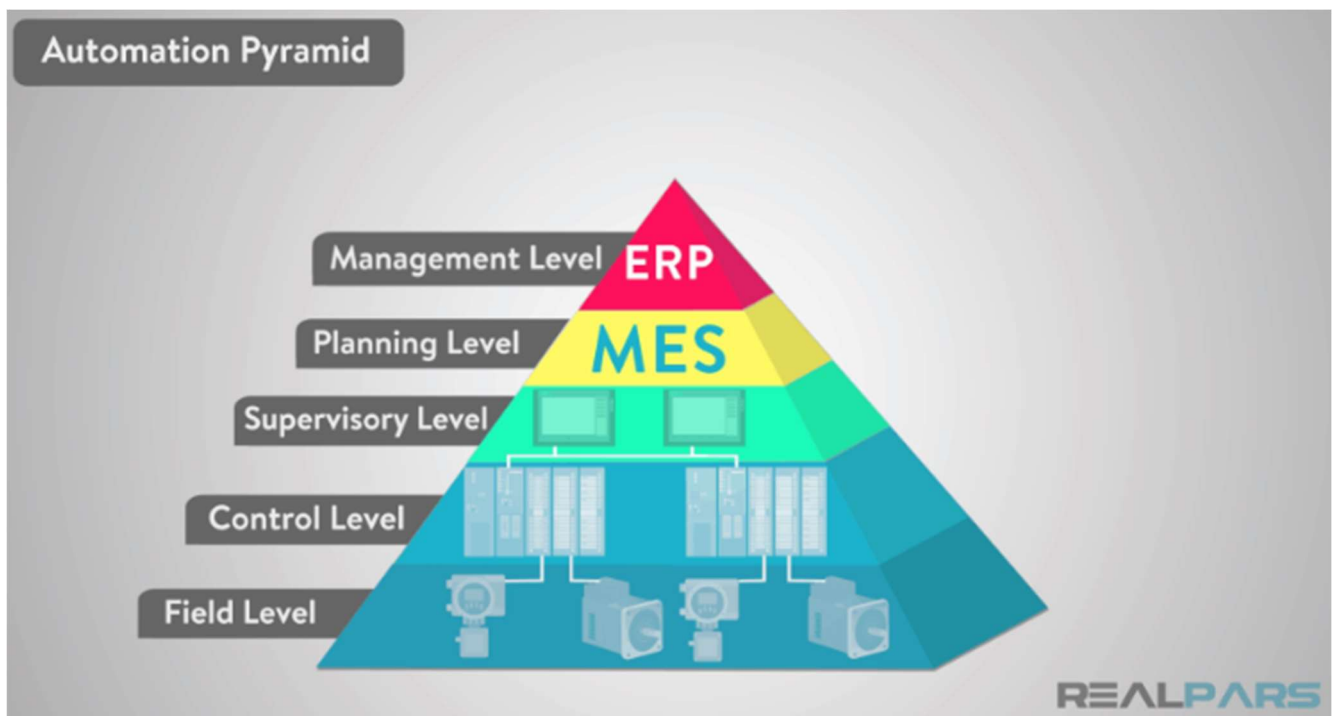
4.1.1 Ohjelmistokeskeisen automaation määrittely

Automaation ohjelmistokeskeisyys voidaan tunnistaa useista ominaisuuksista, joista selkein jakolinja muodostuu laite- ja ohjelmistokeskeisyyden välille. Automaatio on ollut ja on edelleen hyvin laitekeskeistä ohjelmistojen suunnittelussa ja toteutuksessa. Laitekeskeisyys mahdollistaa ohjelmistojen toteutuksessa laitteiden ominaisuuksien täysimääräisen hyödyntämisen, koska yhteensopivuusvaatimukset laitteiden välillä eivät rajoita ohjelmistojen toteutusta. Ohjelmistokeskeisyyden eduksi automaatiojärjestelmissä on tunnistettu ylläpidon ja uudelleenkäytettävyyden tehostuminen mm. konttitekologioiden avulla. Hyvin merkittävänä mahdollisuutena tulevaisuudessa nähdään ohjelmistokeskeisen automaatiojärjestelmien joustavuus yhä nopeammin muuttuvissa toimintaympäristöissä.

Teollisuudessa automaation ohjelmistokeskeisyys on usein yhdistetty IEC 61499 -standardiin, joka määrittelee hajautetun automaation toteutuksen tapahtumapohjaisesti ohjattavilla toimintalohkolla. Tapahtumapohjaisuus on automaatioissa edelleen uusi malli, vaikkakin IEC 61499 -standardi julkaistiin jo vuonna 2005. IEC 61499 -standardiin pohjautuva automaatio mahdollistaa laiteriippumattoman toteutuksen, jolla nähdään olevan suuri merkitys esim. komponenttipulan aiheuttamien toimitusvaikeuksien hallinnassa. Suurin merkitys ohjelmistokeskeisyydellä teollisuusautomaatioissa on kuitenkin ketteryys ja tehokkuus, joka näkyy mm. automaatio-ohjelmoinnin nopeutumisena (SIL, 2021).

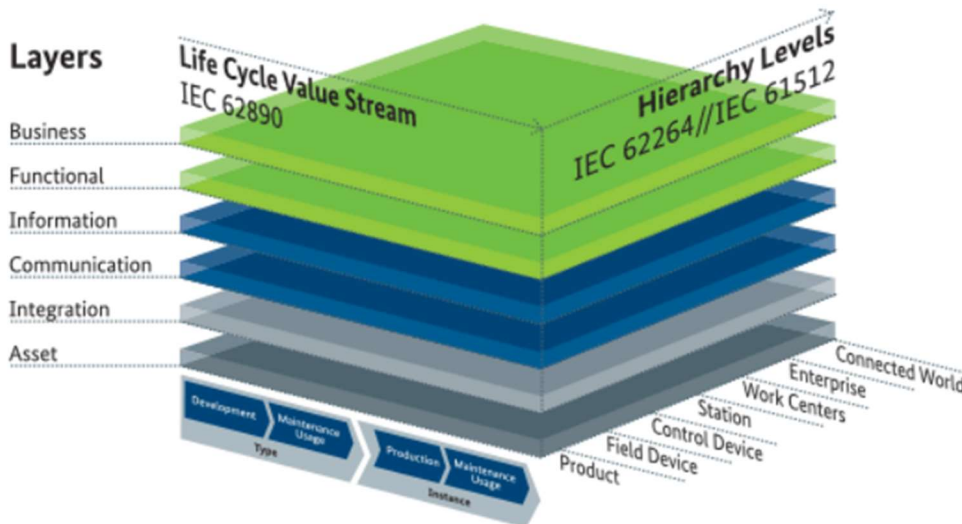
4.1.2 Ohjelmistokeskeisen automaation referenssiarkkitehtuurimallit

Automaation arkkitehtuuria kuvataan kuvion 5 mukaisella automaatiopyramidilla, joka kuvaa toimintakerrokset teollisuuden automatisoinnissa (Cope, 2018).



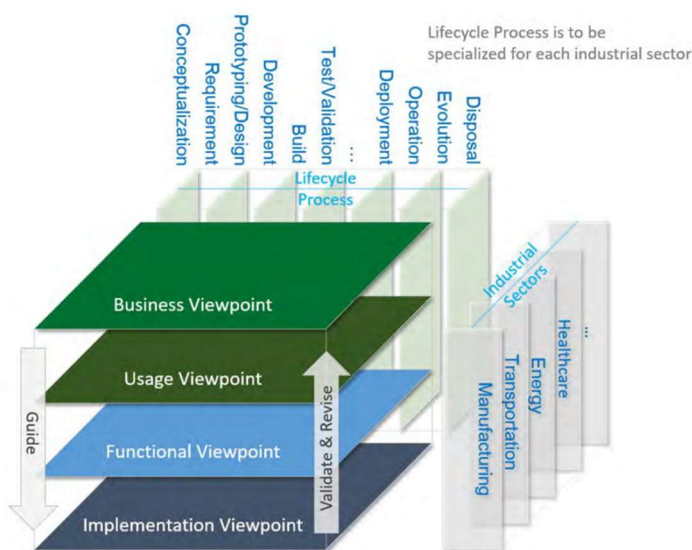
Kuvio 5. Automaatiopyramidi (Cope, 2018)

Ohjelmistokeskeisen automaation näkökulmasta automaatiopyramidin rakenne on vanhentunut, koska automatisoinnissa on laitteistojen kaapeloinnin sijaista noussut keskeiseksi osioksi tietojen väliset yhteydet sekä tiedon saatavuuteen ja hallintaan liittyvät asiat esim. pilvipalvelujen ja IIoT:n näkökulmasta. Referenssiarkkitehtuurimalli (RAMI) kuviossa 6 on nykyaikainen kuvaus arkkitehtuuripyramidista.



Kuvio 6. Referenssiarkkitehtuurimalli, RAMI 4.0 (Lydon, i.a.)

Ohjelmistokeskeisen automaation referenssiarkkitehtuurimalleilla tavoitellaan fyysisen ja digitaalisen maailman yhdistämistä eli kyberfyysisen järjestelmän (cyber-physical systems, CPS) kuvaamista. RAMI -mallin lisäksi IIRA-referenssiarkkitehtuuri (Industrial Internet Reference Architecture, IIRA), kuviossa 7, tarjoaa viitekehysten ohjelmistokeskeisen automaation suunnittelulle ja toteutukselle. IIRA-viitekehys kattaa teknologisen arkkitehtuurin lisäksi liiketoiminnan (Collin & Saarelainen, 2016, s. 268–270). Tekninen sisältö referenssiarkkitehtuureissa on hyvin geneerinen, joten IIRA ja RAMI sopivat myös peltojen vesitalouden hallinnan viitearkkitehtuuriksi.



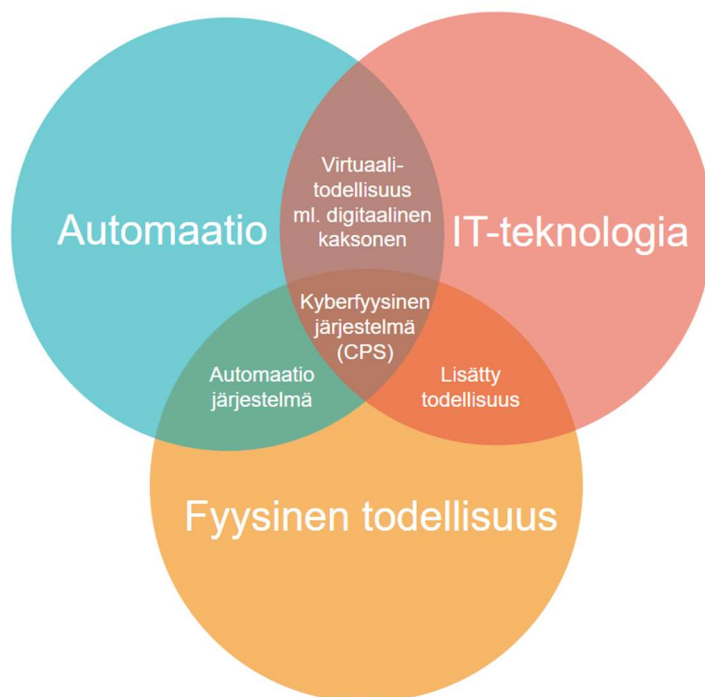
Kuvio 7. IIRA-näkökulmien, sovellusalueen ja elinkaaren välinen suhde (Hallsten, 2017)

4.1.3 Digitaalinen kaksonen

Säätösalaojitukseen ja salaojakasteluun liittyvät automaatoratkaisut ovat riippuvaisia pellon ja maaperän ominaisuuksista. Maaston kaltevuuteen, peruskuivatukseen ja kasteluveden saantiin liittyvät haasteet vaikuttavat säätösalaojakastelun toteutukseen eri peltolohkolla, mikä tulee huomioida myös automaatiojärjestelmän suunnittelussa. Ohjelmistokeskeinen automaatio mahdollistaa digitaalisen kaksosen hyödyntämisen suunnittelussa, toteutuksessa sekä mahdollisissa muutoksissa järjestelmän ylläpidon aikana.

Digitaalinen kaksonen tarkoittaa käytännössä virtuaalista mallia toteutuksesta, ja se mahdollistaa mm. automaatiojärjestelmän ohjelmiston testaamisen simuloimalla järjestelmän fyysistä toteutusta. Digitaalinen kaksonen mm. helpottaa testaamista, joten muutokset automaatioympäristössä voidaan testata laajasti ennen niiden fyysistä toteutusta. Digitaalisen kaksosen ja fyysisen toteutuksen välillä tulisi olla kaksisuuntainen yhteys, jolloin digitaalinen kaksosen pysy ajantasaisena ja automaatiojärjestelmän kehittäminen on mahdollista.

Kuviossa 8 on havainnollistettu digitaalisen kaksosen sijainti automaation, IT-teknologian ja fyysisen todellisuuden näkökulmasta. Digitaalisen kaksosen sijoittuu automaation ja IT-teknologian leikkaavalle alueelle, pois lukien fyysisen todellisuuden leikkaava alue.



Kuvio 8. Digitaalinen kaksonen automaation ja IT-teknologian leikkauksessa

4.1.4 Yhtenäinen nimiavaruus

Yksi tärkeimmistä automaatiojärjestelmän tietoon liittyviä ominaisuuksia on saavutettavuus, joka mahdollistaa tiedon käsittelyn automaatiolaitteilla. Tiedon saavutettavuuden eri valmistajien laitteiden välillä voi toteuttaa täsmällisellä määrittelyllä, jota mm. OPC UA -standardissa tuotetaan tietomallien avulla (OPC-Foundation, 2022). Lisättäessä OPC UA -pohjaiseen automaatiojärjestelmään uusia antureita tai tehtäessä järjestelmään muutoksia, tulee järjestelmän tietomalliin päivittää standardin määrittämät ominaisuustiedot. Tietomallissa on laitteen tietosisällön lisäksi kuvattuna toiminnallisuutta. Tähän sisältyy esimerkiksi laitteelta määrävälein haettavien tietojen määrittely, minkä takia tietomallilla on merkittävä vaikutus koko järjestelmän toimivuuteen ja skaalautuvuuteen. OPC UA -pohjaisten tietomallien avulla eri valmistajien laitteet voidaan yhdistää samaan automaatiojärjestelmään, joka on Teollisuus 4.0:n mukaisten automaatiojärjestelmien keskeinen vaatimus.

MQTT-protokollan lähtökohtana on tarjota skaalautuva viestintäratkaisu laitteiden väliseen tiedonsiirtoon. MQTT-protokolla on julkaise/tilaa -malliin pohjautuva, ja se onkin hyvin joustava erilaisiin käyttötapoihin ja tilanteisiin. Uuden anturin lisääminen automaatiojärjestelmään ei vaadi muutoksia automaatiojärjestelmän asetuksiin. Anturi kirjautuu MQTT-viestien välittäjään (MQTT- Broker) ja julkaisee mittaustiedon vain muutosten yhteydessä, joten automaatiojärjestelmän ei tarvitse määrävälein tarkistaa anturin mittaustietoa. Joustavuus viestien määrittelyssä tekee MQTT-protokollan toteutuksista helposti tapauskohtaisia ja uudelleenkäytettävyydeltään heikkoja, minkä takia protokollaa käytettäessä onkin tunnistettu tarve yhtenäiselle nimiavaruudelle.

Yhtenäinen nimiavaruus (UNS) on työkalu, joka mahdollistaa mm. Teollisuus 4.0 -viitearkkitehtuurin mukaisten mallien joustavan toteutuksen. Yhtenäisen nimiavaruuden mukaiselle toteutuksella on neljä tunnusomaista piirrettä (Patrus, 2022):

1. **Reunakeskeisyys:** Tieto jalostetaan mahdollisimman lähellä kohdetta. Esimerkiksi älykkäiden antureiden usvalaskenta ja yhdyskäytävien reunalaskenta.
2. **Muutoksista raportointi:** Tieto välitetään eteenpäin vain oleellisen muutoksen tapahtuttua. Esim. jos 10 % tiedoista muuttuu sekunnin aikana, muodostuu kymmenkertainen verkkoliikenne ilman lisäarvoa, mikäli kaikki tiedot raportoidaan sekunneittain.

3. **Keveys:** Tiedonsiirto tulee olla toteutettavissa pienillä laitteistovaatimuksilla, mikä mahdollistaa reunakeskisyyden sekä skaalautuvuuden laajoihin toteutuksiin.
4. **Avoimuus:** Digitalisaation toteutus ei ole mahdollista suljetuilla järjestelmillä.

Yhtenäinen nimiavaruus mahdollistaa välittäjän (broker) tehokkaan käyttämisen automaatiolaitteiden välisessä viestinnässä, mikä vähentää laitteiden välisiä yhteyksiä, joiden hallinta on automaatiojärjestelmän toteutuksen ja ylläpidon näkökulmasta haasteellista. Automaatiojärjestelmän tulisi mahdollistaa IoT-laitteiden tietojen saatavuus kaikille niille käyttäjille ja automaatiojärjestelmille, jotka kyseisiä tietoja tarvitsevat.

MQTT-protokollan yhtenäisen nimiavaruuden muodostamiseksi Cirrus Link Solution esitteli vuonna 2016 Sparkplug-määrittelyn. Sparkplug 3.0.0 julkaistiin 16.11.2022 (Eclipse, 2022, s. 1). Uuden version tavoitteena on poistaa edellisen 2.2 version epäselvyydet ja selvittää, miksi tietyt spesifikaation näkökohdat ovat olemassa. Versio 3.0.0:n tavoitteena oli määrittellä selkeät ohjeet siitä, mitä täytyy tehdä, ei saa tehdä ja voi tehdä toteutuksessa. Versio 3.0.0:n sisältyvällä teknologian yhteensopivuustyökalulla (TCK, Technology Compatibility Kit) voidaan Sparkplug-toteutus nyt myös validoida. Sparkplug ei muuta alustana käytettävää MQTT toteutusta vaan ainoastaan tarjoaa yhtenäisen nimiavaruuden MQTT toteutuksen päälle.

4.1.5 Älykkäät anturit

Älykkäiden antureiden kehittämisen taustalla on tavoite laitteistoriippumattomuudesta (Mark & Hafnagel, i.a., s. 1). Älykkäiden antureiden IEEE 1451-standardiperheen määrittely aloitettiin 1990-luvulla, ja älykkään anturin fyysisen rajapinnan määrittävä IEEE 1451.4-standardi sai hyväksynnän 14.6.2004 (mts. 2). MQTT-protokollan kautta tapahtuvan viestinnän määrittävä IEEE 1451.1.6-standardit hyväksyttiin IEEE-kokouksessa 18.-20.7.2022 (Carratú ym., 2022). Älykkäät anturit ovat läpikäymässä merkittäviä muutoksia viestintäprotokollien kehittyessä, ne siirtyvät käyttämään tuottaja–kuluttaja -mallia aikaisemman palvelin–asiakas–arkkitehtuurin pyyntö–vastaus -mallin sijaan.

Testattaessa IEEE 1451 - ja IEC 61499 -standardien toimivuutta automaatiojärjestelmän ja älykkään anturin välisessä viestinnässä MQTT (tuottaja–kuluttaja) ja HTTP (pyyntö–vastaus) protokollilla, todettiin MQTT-protokollalla olevan parempi suorituskyky, kun viestien koko ja latenssi ovat arvioinnin kohteena (Rocha ym., 2022, s. 16). Testauksessa havaittiin HTTP-

protokollan toimivan paremmin viestinnässä, kun arvioinnin kohteena on luotettavuus. Tulee kuitenkin huomioida, että testauksessa käytetty 4diac FORTE tukee vain QoS 0 määritystä. Testattava IEEE 1451.1.6 -standardi tukee MQTT-viestien kaikkia laatuluokkia, joten 4diac FORTE:n käytöllä saattoi olla vaikutusta viestien läpimenoon. Testauksen perusteella voidaan tunnistaa MQTT-protokollan soveltuvan hyvin IEEE 1451-standardien mukaisten älykkäiden antureiden viestintään (mts. 16).

Tässä opinnäytetyössä älykkäillä antureilla tavoitellaan laitteistoriippumattomuuden lisäksi ohjelmistokeskeisyydellä saavutettavia mahdollisuuksia. Tavoitteena on ominaisuudet, jotka luvussa 4.1.2 tunnistettiin yhtenäisen nimiavaruuden tunnusomaisiksi piirteiksi MQTT-protokollan toteutuksessa. Älykkään anturin viestinnän toteutus MQTT:n Sparkplug-määrittäjä hyödyntäen tarjoaa hyvän kokonaisuuden ohjelmistokeskeisen automaation toteutukselle.

Peltojen vesitalouden hallinnassa käytetään antureiden mittaustietojen lähettämiseen mm. SigFox- ja LoRaWAN-yhteyksiä, jotka mahdollistavat laitteistoriippumattoman toteutuksen ja antureiden pitkän toiminta-ajan ilman ulkopuolista virtalähdettä. Nämä anturit toimivat hyvin tiedon keräämiseen liittyvissä tehtävissä, kuten paikallisen sääasemaan tai maanpinnan kosteuteen liittyvien aikasarjatietojen tallennuksessa pilvipalveluun.

4.1.6 Tapahtumapohjainen automaatio

Ohjelmistokeskeisen automaation ja älykkäiden antureiden keskeisiä tavoiteltavia piirteitä ovat laitteistoriippumattomuus ja tapahtumapohjaisuus. Tapahtumapohjaisuus mahdollistaa toiminnan pienellä kaistanleveydellä ja kevyttä viestintäprotokollaa käyttämällä saadaan aikaan hyvä skaalautuminen myös suuriin automaatiojärjestelmiin.

IEC 61499 -standardi määrittelee hajautettujen automaatiojärjestelmien arkkitehtuurin, joka perustuu tapahtumapohjaiseen ohjelmiston suoritukseen, jossa toimintalohkot ovat ohjelmiston kapseloinnin, integroinnin, käyttöönoton ja uudelleenikäytön perusyksiköitä (Christensen, 2021, s. 12). IEC 61499 -ohjelmistoa ajetaan tapahtumalähtöisesti kutsumalla, joten se eroaa IEC 61131-3:n syklisestä suoritussmallissa.

IEC 61499 -standardi herätti 2000-luvun alussa toiveita automaatiojärjestelmien merkittävästä kehitysaskelista. IEC 61499 -standardin tutkimusympäristöksi kehitettiin mm. FBDK- ja Eclipse 4diac -ohjelmistot. FBDK-ohjelmistolla tehdyt toimintalohkot ovat siirrettävissä

Eclipse 4diac -ympäristöön 90 % yhteensopivuudella (Hopsu, 2019, s. 63). FSDK- ja Eclipse 4diac -ohjelmistojen yhteensopivuus NxtStudios kanssa on vain 45–50 %, joten IEC 61499 -standardin pohjautuvissa toteutuksissa on tunnistettavissa haasteita.

Eclipse 4diac 2.0 -ohjelmisto julkaistiin 14.10.2021. Kyseinen 4diac-ympäristö osoittautui toimivaksi, mutta hyvin puutteelliseksi mm. MQTT-protokollan toteutuksen osalta. Ohjelmistoon tutustumista ja käyttöönottoa vaikeutti ohjemateriaali, jota ei ollut päivitetty Eclipse 4diac 2.0 version mukaiseksi. Eclipse 4diac on yli 15 vuoden aikana kehittynyt vakaaksi järjestelmäksi, mutta 2.0 version julkaisun jälkeen ohjelmiston tulevaisuus näyttää epävarmalta. IEC 61499 -standardin vakauspäivämäärä (Stability date) on 2023, mikä tarkoittaa julkaisun vahvistamista uudelleen tai peruuttamista (IEC Webstore, i.a.). IEC 61499 -standardin kehittämiseksi ei ole meneillään projektia, joten tulevaisuus on epävarma.

4diac toteuttaa MQTT-protokollan vain laatutasolla 0 (QoS 0), joka tarkoittaa viestin lähettämistä vain kerran. Lisäksi kirjautumisen toteutus MQTT-välittäjälle on puutteellinen, joten automaatiojärjestelmän suojaus tulee tehdä verkkokerroksella käyttämällä esim. VPN-yhteyttä. Puutteistaan huolimatta 4diac on laadukas ohjelma ja Eclipse 4diac IDE on käyttökelpoinen IEC 61499 -standardin opiskeluun ja tapahtumapohjaisen automaatio-ohjelmiston testaamiseen.

4.1.7 Matalakoodi -kehitysvälineet

Ohjelmistokeskeisen automaation matalakoodi (low-code) -kehitysvälineet mahdollistavat graafisten käyttöliittymien käyttämistä koodirivien kirjoittamisen sijasta. Matalakoodauksen avulla onnistuu ohjelmistokeskeisten automaatio-sovellusten tekeminen ja ylläpitäminen ilman laajaa osaamista ja ymmärrystä ohjelmistojen koodaamisesta. Esimerkiksi Node-RED on tehokas matalakoodiohjelmointityökalu, jonka IBM on rakentanut Node.js:lle ja on nykyään osa OpenJS Foundationia (Aberasturi, 2022).

4.2 Tiedonhallinta

4.2.1 Avoimen tiedon saatavuus ja käytettävyys

Digitalisaatio mahdollistaa tiedon reaaliaikaisen jakamisen vähäisillä kustannuksilla. Avoimen tiedon jakamisen automatisointi on toteutettavissa tehokkaasti, koska tiedon käyttämiseen liittyviä laskutustietoa ei tarvitse kerätä ja käsitellä. Peltöjen vesitalouden hallintaan liittyviä koko maan kattavia tietolähteitä ovat mm. kartat, satelliitti- ja ilmakuvat, satelliittidata (Sentinel-2), säätieto (mm. Ilmatieteen laitos) sekä pellon kaltevuudet ja maaperätieto (GTK). Lisäksi saatavilla on paikallista maksutonta aineistoa mm. säätietojen osalta tiestön kelikameröiden ja yksityisten sääasemien kautta. On kuitenkin muistettava, että tiedon jakaminen edellyttää aina tiedon omistajuuden ja henkilötietoluonteen tunnistamista. Jos julkaistava tieto on yhdistettävissä henkilöön, tulee tieto anonymisoida ennen julkaisua (Tietosuojavaltuutetun toimisto, i.a.).

Avointen tietolähteiden data on hyödynnettävissä salaojakastelun suunnittelussa esim. käytettävissä olevan kasteluveden arvioinnissa, peltöjen ongelmakohtia tunnistettaessa ja luokiteltaessa peltöjä salaojakastelun kannattavuuden näkökulmasta. Avoimen tiedon hyödyntäminen salaojakastelun ohjauksessa on haastavaa ohjaustiedon viiveen ja luotettavuuden takia. Esimerkiksi Sentinel-2 satelliitin indeksikarttojen avulla havaittu maaperän kosteustieto on liian vanhaa kastelutoimenpiteiden ohjaukseen. Kastelun aloittaminen on liian myöhäistä, kun kasvista on havaittavissa vedenpuutteen oireita (Linnér, 2016, s. 354). Avoin data saattaa kuitenkin olla hyvin merkittävässä roolissa mallinnettaessa maaperän mittaustuloksia ja avoimista tietolähteistä saatavaa dataa esim. tekoälyn tai matemaattisten algoritmien avulla. Mallien hyödynnettävyys esimerkiksi kasvuolosuhteiden muutoksien ennakkoinnissa saattaa luoda uusia mahdollisuuksia salaojakastelun automaattiseen ohjaukseen.

4.2.2 Automaatiojärjestelmän tiedonhallinta

Digitaalinen suvereniteetti yhdistetään usein oman datan itsemääräämisoikeuteen, josta käytetään termiä datasuvereniteetti. Maatalouden järjestelmistä tietojen vuotaminen ulkopuolisten toimijoiden käsiin voisi aiheuttaa mm. taloudellista vahinkoa. Kyberfyysisessä järjestelmässä (CPS) digitaalinen suvereniteetti on tiedon omistamista laajempi käsite. Huoltovarmuuden ja siihen liittyvän varautumisen näkökulmasta alkutuotannon automaatiojärjestelmissä

olevan tiedon saatavuus ja eheys ovat merkittäviä. Digitaalisen suvereniteetin takaava aidosti suvereeni pilvi tarjoaa pilvipalveluiden keskeiset hyödyt kuten ketteryuden, turvallisuuden ja automaation sekä takaa tietojen pysyvän suojassa kyberhyökkäyksiltä (Karlstad, 2023).

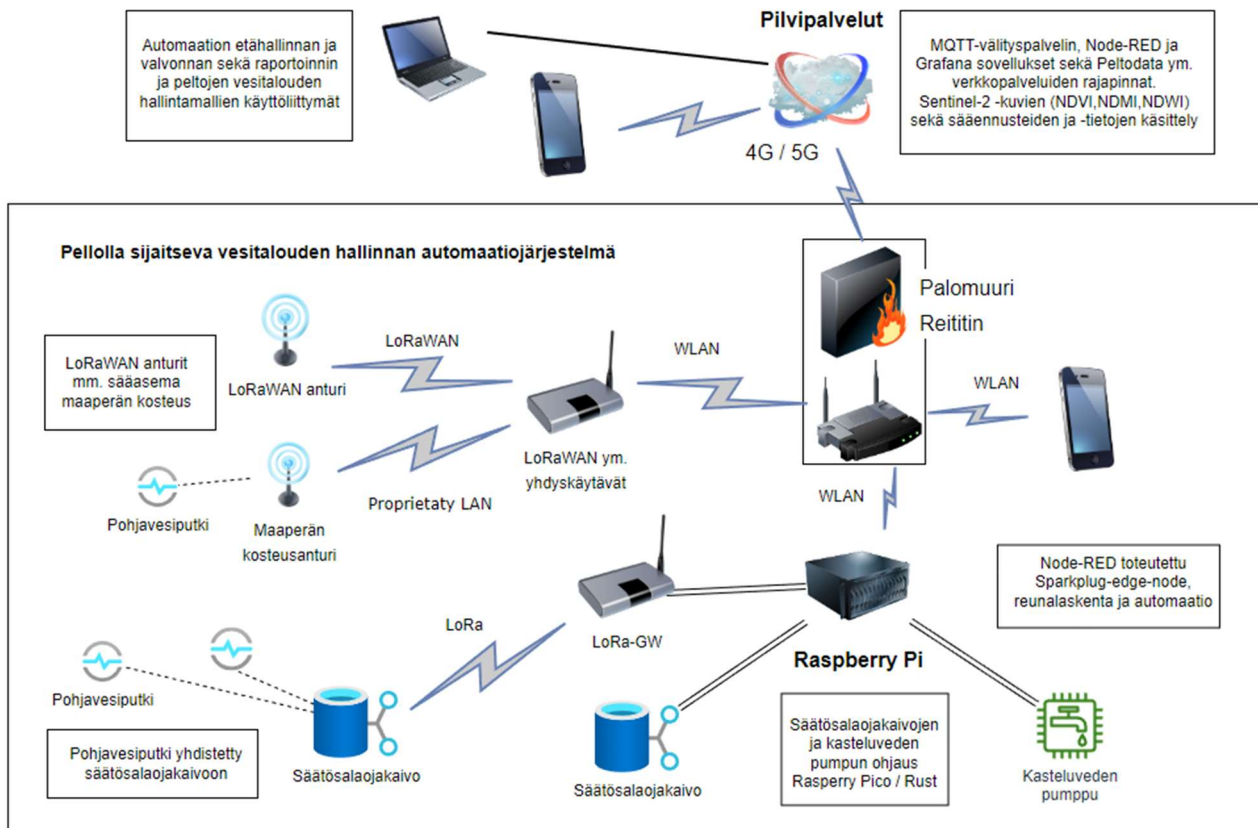
Datasuvereniteetti on huomioitava peltojen vesitalouden hallinnassa, kun mittaustietoa siirretään antureista pilvipalveluun. Tiedon omistajuus on määriteltävä kaikissa sopimuksissa, jotka liittyvät IoT-laitteista pilvipalveluun talletettuun tietoon. Automaatiojärjestelmien pilvipalveluissa tulee varautua mahdollisuuteen siirtää tallennettu tieto pois pilvipalvelusta, mikäli palvelun laatu ei vastaa automaatiojärjestelmän vaatimuksia. Mikäli sopimuksella ei ole vahvistettu mahdollisuutta tiedon siirtämiseen tai tarvittavia rajapintoja, voi tiedon alkuperäinen tuottaja mahdollisesti käyttää omaa mittaus- ja laitetietoa vain lisämaksusta.

Peltojen vesitalouden hallinnan ohjelmistokeskeisen automaation toteutus lisää kohteena oleviin peltoihin kyberfyysisenjärjestelmän ulottuvuuden, jonka digitaalinen suvereniteetti on huomioitava suunnittelun ja toteutuksen lisäksi myös ylläpidossa. Maataloudessa CPS-ulottuvuus on ollut pitkään todellisuutta, ja se tulee huomioida myös peltojen vesitalouden hallinnassa. Suojaamattomana CPS mahdollistaa vihamieliselle taholle laajan hyökkäysrajapinnan maataloustuotantoon. Esimerkkinä mahdollisesta haitasta on mm. traktorien huolto ja ylläpito palveluihin tehdyt palvelunestohyökkäykset (DDoS). Maatilan toimintaan voidaan aiheuttaa vakavaa haittaa esimerkiksi tuhoamalla tai salaamalla tietoja sekä häiritsemällä maatilan laitteita tai tuotantoprosesseja (Laajalahti & Nikander, 2017, s. 25–26). Esimerkiksi kiristyshaittaohjelman aktivoituminen voi olla maatilan automaatiojärjestelmille erittäin vahingollista.

4.3 Arkkitehtuuri

4.3.1 Arkkitehtuurin yleiskuvaus

Opinnäytetyössä kehitettävän peltojen vesitalouden automatisoinnin arkkitehtuuri pohjautuu älykkäiden antureiden, reunalaskennan ja pilvipalveluiden muodostamaan kokonaisuuteen. Kuviossa 9 on salaojakastelujärjestelmän automaatiojärjestelmän havainnekuva, jossa keskeisiä komponentteja ovat pilvipalveluina toteutetut hallinta- ja raportointityökalut, Raspberry Pi reunalaskentapalvelin, säätösalaojakaivo, kastelupumppu ja anturit sekä langattomasti toteutettu tietoliikenne pellolla olevien komponenttien ja pilvipalvelun välillä.



Kuvio 9. Salaojakastelujärjestelmän havainnekuva

Pellon vesitalouden hallintajärjestelmän arkkitehtuuri muodostuu pilvipalvelusta ja reunalaskennasta, joilla toteutetaan automaatiojärjestelmän etähallinta, ohjaus ja anturitiedon kerääminen sekä analysointi. Antureiden mittaustiedot siirretään automaatiojärjestelmästä pilvipalveluun tallennettavaksi ja analysoitavaksi digitaalista kaksosta hyödyntämällä. Automaatiojärjestelmän sensori- ja ohjaustietojen siirtäminen automaatiojärjestelmään ja pilvipalvelun välillä ovat järjestelmän toiminnan kannalta keskeisiä haasteita. Peltojen vesitalouden hallinnan automaation häiriöttömän toiminnan reaaliaikavaatimukset mahdollistavat kuitenkin reunalaskennan hyödyntämisen mm. tietojen väliaikaiseen puskurointiin ja lähettämisen myöhemmin. Haastaviin tietoliikenneyhteyksiin tulee varautua peltojen vesitalouden automaatiojärjestelmän arkkitehtuuriin suunnittelussa.

4.3.2 Pilvipalvelut

Pilvipalvelu tarkoittaa palvelumallia, jossa koneet, sovellukset tai palvelut tarjotaan skaalautuvilta pilvipalvelimilla asiakkaille ja pilvipalvelun toimittajan vastatessa alustan toimivuudesta. Pilvipalvelumallin merkittävimpiä muutoksia perinteiseen konesalitekniikoihin verrattuna on

käytettävä liiketoimintamalli, jossa asiakas saa käyttöön vaatimuksensa mukaisen ympäristön nopeasti ja käyttöönotto on yleensä vaivatonta. Kiinteät kustannukset ovat alhaiset ja laskutusperusteet määräytyvät läpinäkyvästi sopimuksen ja käytön perusteella (Wallenius, 2022).

Peltojen vesitalouden hallinnassa pilvipalvelut tarjoavat skaalautuvan ympäristön automaation mittaustietojen pitkäaikaiseen säilytykseen ja raportointiin. Vuosittain tallentuvat aikasarjatiedot pellon vesitalouden muutoksista, sääolosuhteiden ja salaajajärjestelmän ohjaustoimenpiteiden vaikutuksista, mahdollistavat digitaalisen kaksosen käyttämisen kohteena olevan pellon vesitalouden mallintamisen ja ohjaustoimenpiteiden ennakkoinnin kehittämisen.

4.3.3 Reuna- ja usvalaskenta

Reunalaskennalla tarkoitetaan mm. IoT-laitteiden tuottaman tiedon käsittelyä ennen tiedon lähettämistä pilvipalveluun. Tällöin sensoreiden tuottamaa tietoa voidaan yhdistellä jatkokäsittelyn tarvitsemaan muotoon, mikä vähentää pilvipalveluun lähetettävän tiedon määrää. Reunalaskentaa voidaan toteuttaa mm. IoT-verkon yhdyskäytävien yhteydessä. Usvalaskenta tehdään vastaavasti IoT-laitteissa (Pasanen, 2021, s. 13–14). Reunalaskennan määritelmä on sidoksissa käytetyn arkkitehtuuriratkaisun kerroksellisuuteen. Reunalaskenta määritellään esimerkiksi eri tavalla tietoliikenne- ja IoT-ympäristöissä (mts. 13). Reunalaskennalla tavoitellaan mm. toiminnan nopeutta, tietoliikenteen kustannussäästöjä ja toimintavarmuutta. Reunalaskenta ei tee perinteisiä pilvipalveluratkaisuja tarpeettomaksi. Käytännössä kyse on esimerkiksi yhteistyöstä, jossa reunalaskennalla tuotetaan laadukasta tietoa pilvipalveluun.

Reuna- ja usvalaskennassa keskeisiä haasteita ovat ympäristöolosuhteiden lisäksi käytettävän virran saatavuus ja ylläpidon haasteet, jolloin laskennan toteutuksessa tulee huomioida laitteistojen fyysisen suojauksen lisäksi myös tietojärjestelmän tehokkuus ja virransäästöominaisuudet sekä toimintavarmuus. Reuna- ja usvalaskennan tarvitsemaa prosessoritehoa voidaan vähentää huomattavasti käyttämällä energiatehokkaita ohjelmointikieliä (Miller & Lerche, 2022). Ylläpidon näkökulmasta reuna- ja usvalaskennan keskeisin vaatimus on toimintavarmuus, koska laitteistojen hajautettu sijainti tekee huoltotoimenpiteistä haastavia.

4.3.4 Automaation arkkitehtuurit

Automaation arkkitehtuuri voidaan kuvata useista eri näkökulmista, joita hyödyntämällä saadaan tunnistettua automaatiojärjestelmän kokonaisuus. Automaatiokerrokset operatiivisesta toiminnasta tiedolla johtamisen strategiatasoon kuvataan seuraavilla tasoilla (Cope, 2018):

- Anturit, toimilaitteet
- Ohjainyksiköt (PLC/HMI)
- Valvomot (SCADA)
- Tuotannonohjaus (MES)
- Toiminnanohjaus (ERP)

Teollisuus 4.0 ja digitalisaatio (Digital transformaatio) ovat tuoneet uusia näkökulmia automaatioarkkitehtuuriin. Erityisenä muutoksena on ollut IoT:n tarjoaman ajantasaisen tiedon merkityksen tiedostaminen sekä käyttäminen toiminnan kehittämisessä ja ohjauksessa. Automaatioarkkitehtuurin kerrosten välisen tiedonsiirron digitalisoiminen mm. tuotannon- ja toiminnanohjaukseen välillä tukee Teollisuus 4.0:n viitekehyksen mukaista toimintaa. Peltöjen vesitalouden hallinnan automaatiossa voidaan tunnistaa vastaavia asioita automaatiojärjestelmän sisältämän sensori- ja laitetiedon merkityksessä ohjausmallien kehittämiseen.

4.3.5 Automaation tiedonvälitysprotokollat

Automaatiojärjestelmissä käytetään usein suljettuja tietoliikenneprotokollia, joiden toiminnallisuus on suojattu. Laitekeskeisessä automaatiossa suljettujen tietoliikenneprotokollien käyttö rajaa laiteiden valikoimaa. Ohjelmistokeskeisessä automaatiossa eri suljettujen tietoliikenneprotokollien välinen tiedonsiirto voidaan toteuttaa yhdyskäytävillä, jotka tekevät tarvittavat protokollamuunnokset. Teollisuus 4.0 -viitearkkitehtuurin mukainen toiminta edellyttää automaatiojärjestelmässä olevan tiedon hyvää saatavuutta, minkä toteuttaminen on erittäin haastavaa suljettujen tietoliikenneprotokollien yhteensovittamisella.

Laitekeskeisten automaatiojärjestelmien välisen tiedonsiirron mahdollistava OPC UA -standardi määrittelee tietomallien avulla laitevalmistajien välisen tiedonsiirron. OPC UA -standardien dokumentaatio on saatavilla ja laitevalmistajat voivat niiden pohjalta toteuttaa Teollisuus 4.0:n mukaisia automaatiojärjestelmiä. OPC UA on laaja tietomallinnus- ja tiedonsiirtotyökalu, jonka tarkoituksena on tarjota automaatiojärjestelmän laitteille pääsy tarvittaviin tietoihin

(Peltokangas & Käsäkoski, 2017, s. 10). OPC UA FX (OPC UA Field eXchange) tarjoaa tulevaisuudessa OPC UA -laitteille julkaise/tilaa -malliin mukaisen viestinnän. OPC UA FX -laitteet parantavat suunnitelmien mukaan OPC UA -laitteiden konfigurointia ja järjestelmien käyttöönottoa (TTTech, i.a.). Tämän opinnäytetyön prototyyppien kehitystyön yhteydessä OPC UA FX -viestintää ei käsitelty.

Luvussa 4.3.1 korostettiin automaatiojärjestelmän saatavuuden huomioimista suunnittelussa. MQTT-tietoliikenneprotokolla toteuttaa useita vaatimuksia, jotka ovat automaatiojärjestelmän tiedonvälityksessä keskeisiä akkukäyttöisillä laitteilla maasto-olosuhteissa. Näitä vaatimuksia ovat mm. pieni tietoliikenteen kaistavaatimus, häiriöiden sietokyky ja vähäiset tiedonkäsittelyn tehovaatimukset. MQTT-tietoliikenneprotokollan käyttö on erittäin joustavaa, koska se ei sisällä vaatimuksia siirrettävän tietosisällön tai nimiavaruuden suhteen, mikä on toisaalta MQTT-protokollan heikkous ja aiheuttaa haittaa yhdistettäessä automaatiojärjestelmien tuottamaa tietoa yhteisiin palveluihin.

Sparkplug-protokolla toteuttaa MQTT-yhteydellä siirrettävälle tiedolle yhtenäisen määrittelyn, joten eri toimijoiden välisessä tietojenvaihdossa voidaan tukeutua yhteisiin pelisääntöihin. Näin vältetään yksittäiset ratkaisut tiedonsiirrossa. Sparkplugin versio 3.0 sisältää protokollan yhteensopivuuden testaustyökalun, mikä mahdollistaa eri toimijoiden laitteiden validoinnin, joka helpottaa laitteiden välisen tietoliikenteen yhteensovittamista, toteutusta ja ylläpitoa.

4.4 Tietojärjestelmät

4.4.1 Peltoviljelyohjelmistot

Maatalouden tuotannonohjauksen ja maataloustukien hallintaan liittyvät ohjelmistot ovat olleet laajassa käytössä maataloilla 1990-luvulta lähtien. Peltoviljelyohjelmistoihin on sisältynyt myös karttaohjelmia, jotka ovat mahdollistaneet mm. viljelysuunnitelmien sekä maaperän analyysitietojen ja muun paikkatietoaineiston havainnollisen esittämisen. Peltojen vesitalouden hallintajärjestelmät sisältävät paikkatietoa, joka voidaan yhdistää ko. karttaohjelmistoihin ja ottaa huomioon myös viljelysuunnitelmissa ja kasvinsuojelun matemaattisissa malleissa.

4.4.2 Mobiilisovellukset

Puhelin on ollut maatalojen tärkein työväline jo vuosikymmeniä. Yhteydenpito urakoitsijoiden ja muiden sidosryhmien kanssa perustui aikaisemmin puhelimella soittamiseen, mutta nykyisin tämä on korvattu verkon välityksellä tapahtuvalla viestinnällä. Tämän varsin nopean muutoksen on mahdollistanut tekninen kehitys ja innovatiiviset mobiilisovellukset, jotka tarjoavat nopean ja tehokkaan tiedon hakemisen ja käsittelyn sekä viestinnän.

Peltojen vesitalouden hallintajärjestelmän ohjaaminen ja valvonta mobiilisovelluksella mahdollistaa tehokkaan tiedon saatavuuden sekä myös muiden maatalouden laitetietojen yhdistämisen esimerkiksi Sparkplug-protokollan avulla. Selainpohjaisilla sovelluksilla on mahdollista ohjata ja valvoa peltojen vesitalouden hallintajärjestelmän toimivuutta, mutta toiminnalliset mahdollisuudet ja innovatiiviset ominaisuudet eri tietolähteiden hyödyntämisessä eivät ole samalla tasolla toteutettavissa.

4.5 Tietoturva

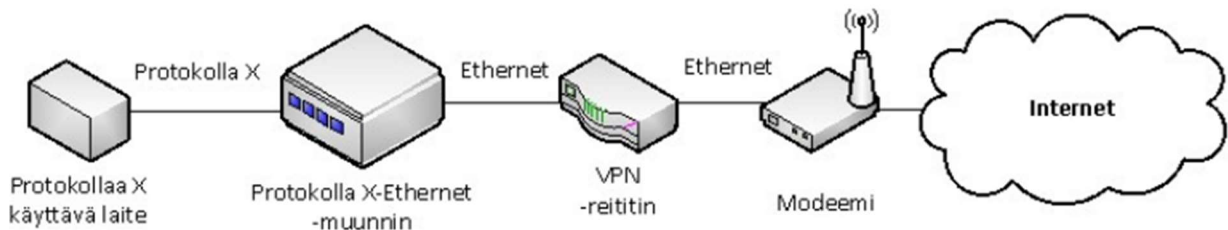
4.5.1 Tietoturva internetin näkökulmasta

Suomalaisten automaatiolaitteiden tietoturvan tilannekuvan arvioinnissa havaittiin teollisuuden ohjausjärjestelmien sekä rakennusautomaatiojärjestelmien suojaamattomien automaatiolaitteiden määrän vähentyneen vuodesta 2019 vuoteen 2020 (Traficom, 2021a). Kartoituksessa tunnistettiin myös yksittäisten suojaamattomien automaatiolaitteiden määrän lisääntyneen (mt.). IIoT laitteiden kasvun voimakas jatkuminen viime vuosien aikana on saattanut vaikuttaa myös yksittäisten suojaamattomien automaatiolaitteiden kasvuun.

Automaattilaitteiden ohjelmistojen päivitykset ovat yhä tärkeämpiä hyökkääjien murtautuessa automatisoidusti automaatiojärjestelmiin. Ohjelmistojen päivitykset eivät kuitenkaan poista kaikkia haavoittuvuuksia, eivätkä ne myöskään takaa tietoturvan riittävää toteutumista, mikäli tietoverkosta ei rajoiteta laitteistoon pääsyä (Traficom, 2021b, s. 8).

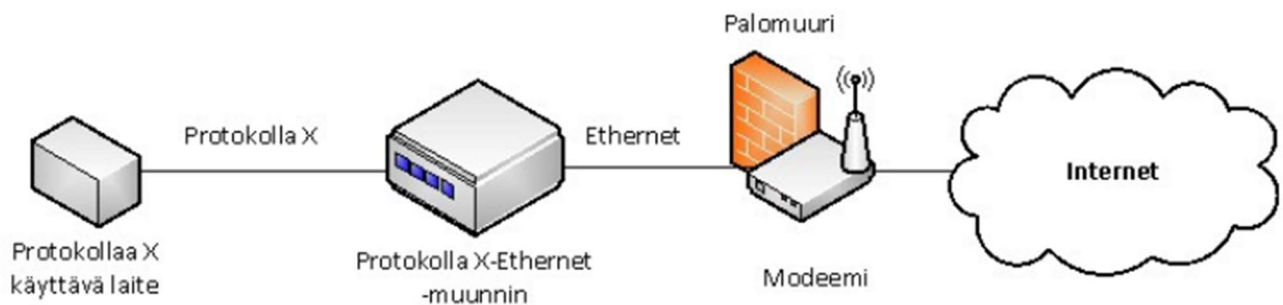
Peltojen vesitalouden hallintaan liittyvien automaattilaitteiden yhteys verkkoon tulee olla rajattu mahdollisten haavoittuvuuksien hyväksikäytön estämiseksi. Kuviossa 10 on kuvattuna VPN-yhteyden käyttäminen, jossa virtuaaliverkko suojaa automaattilaita ulkopuolisilta yhteyksiltä. VPN-yhteyksien käyttäminen on hyvin tehokas suojaus internetin kautta tulevaan

uhkaan. Heikkoutena on yhteyden ottavan laitteen VPN-kirjautumisen vaatimus, jolloin esim. automaattilaitteen web-palvelimeen saa yhteyden vain sisäverkkoon kirjautumalla. Saman sisäverkon käyttäminen maatilán kaikissa tietojärjestelmässä ei ole suositeltavaa. Esimerkiksi salaajakastelujärjestelmän kautta voidaan tunkeutua maatilán muihin tietojärjestelmiin, mikäli käytetään samaa sisäverkkoa maatilán kaikissa tietojärjestelmissä. Suojautuminen verkosta tulevaan uhkaan ei takaa riittävää suojaa paikalliseen uhkaan tai vahinkoon, mikä tulee myös huomioida tietoturvariskien arvioinnissa ja toimenpiteissä.



Kuvio 10. Laitteistoon pääsy rajoitettu VPN-yhteydellä (Traficom, 2021b, s. 11)

Kuviossa 11 on kuvattuna palomuuriratkaisu, jota käytetään mm. 4G-reitittimissä. Palomuuriratkaisulla saadaan aikaan riittävä suojaus, mikäli palomuurin asetukset tehdään huolellisesti ja huolehditaan niiden ylläpidosta. Esimerkiksi 4G-reitittimen tunnus/salasana kirjautuminen saattaa jäädä tehdasasetuksille, jolloin palomuurin suojaus voidaan ohittaa.

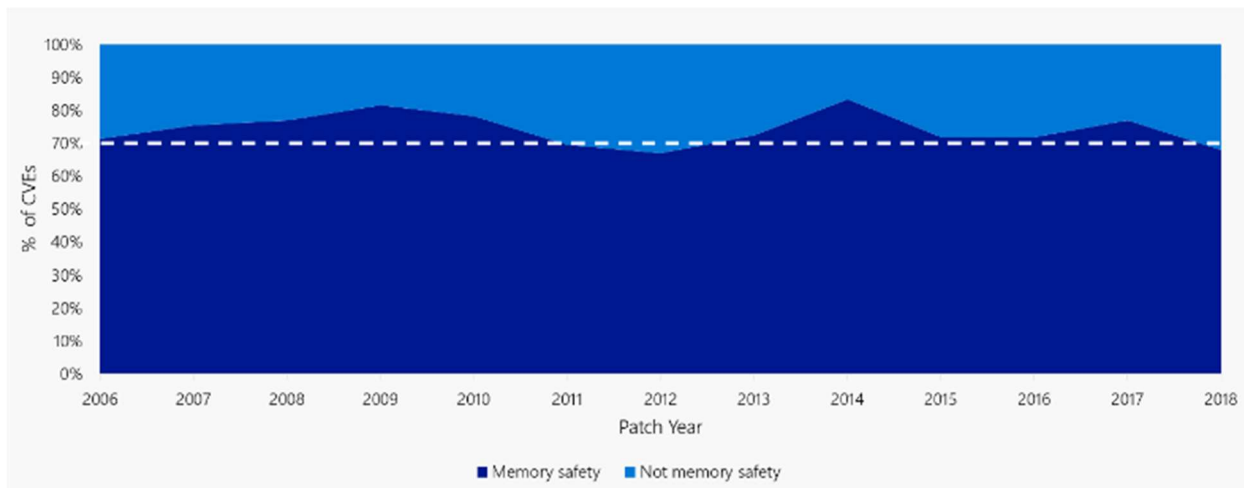


Kuvio 11. Laitteistoon pääsy rajoitettu palomuurilla (Traficom, 2021b, s. 12)

4.5.2 Tietoturva automaatio-ohjelmistojen näkökulmasta

Tietoturvalla pyritään varmistamaan suojattavan automaatiojärjestelmän tietojen luottamuksellisuus, eheys ja saatavuus. Säättösalaajitukseen ja salaajakasteluun liittyvien laitetietojen saatavuus ja eheys on helposti tunnistettavissa suojattavaksi kohteeksi. Mikäli tietojen saatavuus tai eheys menetetään, ei automaatiolla ole toimintaedellytyksiä.

Automaatiolaitteistojen tietoturvaavaoittuvuudet ovat ohjelmistokeskeisessä automaatiossa verrattavissa toimistojärjestelmien haavoittuvuuksiin. Kuviossa 12 on kuvattu Microsoftin julkaisema tilasto, joka osoittaa 70 % osuuden Microsoftin ohjelmistojen tietoturvaavaoittuvuuksista johtuvan muistin hallinnan turvallisuusheikkouksista.



Kuvio 12. Microsoftin tietoturvaavaoittuvuudet (Thomas, 2019)

Ohjelmistokeskeisten automaatiolaitteiden muistinhallinnan haasteet ovat tietoturvan lisäksi myös hyvin merkittävä osa automaatiolaitteiden toiminnallisia haasteita. Vesitalouden hallintajärjestelmän automaation tulee toimia vähintään yhden kasvukauden ilman huoltotoimenpiteitä, kuten järjestelmän uudelleenkäynnistystä tai virtalähteen vaihtamista. Järjestelmän kehittämisessä ja testaamisessa tulee huomioida ohjelmistokeskeisen automaation tietoturvan osalta mm. saatavuuden erityisvaatimukset toimintaympäristön näkökulmasta.

Digitalisaatio on mahdollistanut uusien palveluiden ja liiketoimintamallien kehittymisen viime vuosien aikana. Keskeinen digitalisaation aiheuttama muutos on ollut tiedon merkityksen kasvaminen tiedon muuttuessa historiatiedosta reaaliaikaiseksi toimintaa ohjaavaksi informaatioksi. Samalla tietoturvan merkitys on kasvanut sen vaikuttaessa sekä fyysisten laitteiden toimintaan että kyberturvallisuuden kautta koko verkostoituneen yhteiskunnan kokonaisturvallisuuteen. Digitaalinen turvallisuus on hyvin laaja asia, johon sisältyy mm. jatkuvuudenhallinnan ja varautumisen lisäksi riskienhallintaan, kyberturvallisuuteen, tietoturvallisuuteen ja tietosuojan liittyviä asioita (Valtiovarainministeriön (VM), 2020, s. 16).

5 SUUNNITTELU JA KEHITTÄMINEN

5.1 Suunnittelun lähtökohdat

Peltojen vesitalouden hallinnan automaation nykytilan selvityksessä tunnistettiin salaojakastelun ylläpito- ja valvontatyön merkitys, minkä takia mm. säätösalaajakaivon etäkäyttö ja etävalvonta ovat tärkeitä kehityskohteita. Automaattinen säätösalaajakaivojen ohjaus on kuitenkin edelleen harvinaista, koska peltojen vesitalouden ohjaukseen sovellettavat mallit ovat haasteellisia toteuttaa käytännössä. Peltojen vesitalouden ohjauksesta säätösalaajituksella ja salaojakastelulla on olemassa paikallisesti kattavaa kokemusperäistä tietoa, mutta yleisesti sovellettavia valmiita malleja ei ole saatavilla. Säätösalaajakaivon padotuskorkeuden säätötoimenpiteiden vaikutukset pellon pohjaveden pintaan ovat maaperästä riippuvia ja pääsääntöisesti hyvin hitaita, joten säätötoimenpiteiden reaaliaikavaatimukset ovat hyvin vähäisiä.

Tämän opinnäytetyön kehittämiskohteena on ohjelmistokeskeisen automaation mahdollisuuksien hyödyntäminen vesitalouden hallinnassa. Sekä ylläpitoon ja valvontaan että automaatio-ohjaukseen liittyvät asiat ovat mukana hallinnan suunnittelussa ja kehittämisessä. Lähtökohtana kehitystyölle on tilannekuvan muodostaminen peltojen vesitalouden hallinnasta ja siihen sovelletusta automaatiosta, joita tämän työn luvussa 3 esiteltiin. Kehitystyössä on huomioitu myös Teollisuus 4.0 viitearkkitehtuurien (RAMI 4.0 ja IIRA) mukaiset näkökulmat, joita selvitettiin tarkemmin luvussa 4.1.2. Keskeisimpänä tavoitteena on käytännönläheisyys ja automaatiolla saavutettavien tulosten mahdollisimman tehokas hyödyntäminen peltojen tuottavuuden ja kasvukyvyn säilyttämisessä vaikeissa olosuhteissa. Tavoitteena ei ollut älymaatalouden kehittäminen vaan peltojen kasvuolosuhteiden parantaminen, johon esimerkiksi Linna (2022) kehottaa Koneviestin pääkirjoituksessa muistuttamalla, että perusasiat on saatava kuntoon ennen älymaataloutta.

Käytännönläheisyys on huomioitu kehittämistyössä asettamalla tavoitteet tunnistettujen automaatiohaasteiden ja mahdollisuuksien näkökulmasta sekä rajaamalla pois suljettujen automaatoratkaisujen vaihtoehdot. Opinnäytetyön kehittämistyössä käytetään avointa lähdekoodia ja hyödynnetään palvelumuotoilun menetelmiä ongelmanratkaisuun automaatiojärjestelmän suunnittelussa ja prototyypin kehitystyössä.

5.2 Kehittämiskohteiden tunnistaminen

Automaation toteutus on teollisuudessa ollut perinteisesti laitekeskeistä ja suljettua, mikä on osaltaan tuonut järjestelmien välistä kaupallista kilpailua ja merkittävää panostusta tuotekehitykseen. Teollisuudelle suljetuista automaatiojärjestelmistä aiheutuu riippuvuus automaatiojärjestelmän toimittajiin, mikä vaikuttaa merkittävästi liiketoiminnan kehittämiseen ja viime vuosina myös saatavuusongelmiin automaatiolaitteiden ylläpitoon ja toteuttamiseen liittyvissä hankinnoissa.

Maatalouden automaatiojärjestelmissä on nähtävillä samansuuntainen kehityskulku, joka on johtanut markkinavetoiseen älymaatalousliiketoiminnan edistämiseen, eikä peltojen kasvuolosuhteiden parantamiseen (Linna, 2022). Tavoitteena älymaatalouden automaatiojärjestelmissä on pääsääntöisesti automaation käyttämän tiedon saaminen suljettuun ympäristöön ja tietoa käyttävien järjestelmien saaminen riippuvaksi laite- ja järjestelmätoimittajasta. Ohjelmistokeskeinen automaatio vähentää laiteriippuvuutta, mikäli ohjelmistot toteutetaan standardien asettaminen vaatimusten mukaisesti. Esimerkiksi IEC 61499 -standardi määrittelee hajautetun ja laiteriippumattoman automaation, jonka mukainen järjestelmä on ajettavissa eri toimittajien laitteissa. IEC 61499 -standardin tarjoamien mahdollisuuksien selvittäminen on ollut keskeinen tavoite tässä opinnäytetyössä.

Ohjelmistokeskeinen automaatio mahdollistaa laiteriippumattomuuden lisäksi automaatioon liittyvän tiedon hallinnan ja IIoT:n täysimääräisen hyödyntämisen. Teollisuus 4.0:n referenssiarkkitehtuurimallit ovat viitekehyksiä fyysisen ja digitaalisen maailman yhdistävälle ohjelmistokeskeiselle automaatiolle. Arkkitehtuurimallit helpottavat digitalisaation tarjoamien mahdollisuuksien yhteensovittamista automaatiojärjestelmien toimintaan. Automaatiojärjestelmässä olevan tiedon hallinta esimerkiksi laitekeskeiseen automaatioon pohjautuvissa suljetuissa järjestelmissä on toteutettavissa OPC UA -protokollan avulla, jolloin saavutetaan laitteiden välisessä viestinnässä Teollisuus 4.0 vaatimustenmukaisuus. OPC UA -viestintäprotokollasta on mm. tietoturvan laaja-alaisen toteutuksen takia muodostunut monimutkainen, joten sen käyttöönoton haasteita ei kuitenkaan tule väheksyä (Sipilä, 2019, s. 30).

5.3 Automaatiojärjestelmän suunnittelu

5.3.1 IEC 61499

Luvussa 4.1.6, todettiin IEC 61499 -standardin aiheuttaneen 2000-luvun alussa toiveita hajautetun automaation läpimurrosta. Myös tämän opinnäytetyön suunnittelussa standardin tarjoamia mahdollisuuksia pidettiin lupaavina. Standardiin tutustuminen onnistui avoimen lähdekoodin ohjelmistoilla.

IEC 61499 -standardin tutustumisessa hyödynnettiin FBDK 11.0 (The Function Block Development Kit) -ohjelmistoa, jonka avulla voidaan toteuttaa automaatiohjelmiston suunnittelu ja testaus virtuaalisesti ilman fyysisiä automaatiolaitteita. FBDK-ohjelmiston kehittäjä James H. Christensen (2021, s. 12) toteaa IEC 61499 -standardin olevan avoin ja tapahtumalähtöinen hajautettu järjestelmäarkkitehtuuri. Hänen mukaansa IEC 61499 -standardin toimintalohkot (FB, Function Block) mahdollistavat automaatio-ohjelmistojen kapseloinnin, uudelleenikäytön ja integroinnin. FBDK-ohjelmisto soveltuu testaukseen ja saatavilla olevan ajantasaisen koulutusmateriaalin avulla IEC 61499 -standardin sisältö avautuu hyvin. Automaatiojärjestelmän toteutuksen siirtäminen FBDK-ohjelmistosta automaatiolaitteelle ei kuitenkaan onnistu ja ohjelman siirtäminen toiseen kehitysympäristön kautta on haasteellista, kuten luvussa 4.1.6 todetaan. Näiden puutteiden takia päätettiin salaojakastelun automaatiojärjestelmä hajautetun automaation kehitystyössä luopua FBDK 11.0 -ohjelmiston käyttämisestä.

Opinnäytetyössä selvitettiin avoimen lähdekoodin 4diac käyttöä IEC 61499 -standardiin pohjautuvien automaatio-ohjelmiston toteutuksessa. 4diac sisältää kehitysympäristön 4diac IDE sekä 4diac FORTE-ohjelmiston. IDE on toteutettu Eclipse-kehitysympäristöön ja FORTE on vastaavasti toteutettu C-kielellä. IDE mahdollistaa automaatio-ohjelmiston suunnittelun, toteutuksen ja testauksen ennen ohjelmiston asettamista kohdealustalle, joka voi olla esim. Raspberry Pi. Käytettävälle alustalle käännetään FORTE-ohjelma erikseen määriteltävillä asetuksilla. Käännettäessä MQTT-protokollan kirjasto mukaan FORTE ohjelmaan voidaan automaatio-ohjelman toteutuksessa hyödyntää MQTT-protokollaa, joko ohjelman sisäisessä tapahtumalähtöisessä ohjelmoinnissa tai tarvittavan ohjaustiedon välittämisessä automaatio-ohjelmaan tai -ohjelmasta ulos.

5.3.2 Hajautettu automaatio

Luvussa 4.1.6 esiteltiin Eclipse 4diac-ohjelmistoa, jolla voi toteuttaa myös hajautettuja automaatiojärjestelmiä. Peltöjen vesitalouden automaatiassa tunnistettiin säätösalaojakaivon ja kasteluveden pumpun ohjaus mahdolliseksi hajautetun automaation kohteeksi. Kasteluveden pumppauksen ohjaaminen edellyttää säätösalaojakaivon vesipinnan korkeuden huomioimista pumpun ohjauksessa. Suunnittelun lähtökohtana oli kaksi Raspberry-alustaa, joiden 4diac FORTE-ohjelmistoissa ajettaisiin IEC 61499 -toimintalohkoja, jotka viestivät keskenään WLAN-verkon yli MQTT-protokollalla.

Kehitystyön aikana tunnistettiin kuitenkin haasteita IEC 61499 -standardin mukaisen järjestelmän kehittämisessä Eclipse 4diac -ohjelmistolla. Esimerkiksi MQTT-protokollatoteutus osoittautui hyvin puutteelliseksi, kuten luvussa 4.1.6 todetaan. Salaojakasteluun liittyvän automaatio-ohjelmiston vaatimusmäärittelyssä tunnistettiin IEC 61499 -standardin mukaisen ohjelmiston vahvuuksien soveltuvan heikosti peltöjen vesitalouden hallinnan tarpeisiin. IEC 61499 -standardin vahvuudet ovat useiden ohjaustietojen reaaliaikainen käsittely, jonka mukaisia tarpeita peltöjen vesitalouden hallinnassa ei tunnistettu. Tiedonhallinta ja IoT-tiedon käsittely ovat puolestaan hyvin keskeisessä roolissa, ja nämä ominaisuudet osoittautuivat kehitystyön aikana Eclipse 4diac -ohjelmiston heikkouksiksi. Tämän takia hajautetun automaation toteutuksesta säätösalaojakaivon ja kastelupumpun ohjauksessa päätettiin luopua.

5.3.3 Tapahtumapohjainen automaatio

Hajautetun automaation selvityksessä tunnistettiin peltöjen vesitalouden automaatiojärjestelmien välinen viestintä keskeiseksi tekijäksi. Järjestelmien välistä viestintää selvitettiin tapahtumapohjaisen automaation näkökulmasta, mikä oli ollut myös IEC 61499 -standardiin selvitystyön taustalla.

Automaatiojärjestelmän tiedonvälityksen tehokas virransäästö onnistuu tapahtumapohjaisella automaatiolla, joka on akkukäyttöisille ja langattomille laitteille hyvin keskeinen viestintätapa. Tapahtumapohjaisessa automaattijärjestelmässä välitetään vain muuttavaa tilatietoa, kun perinteisessä automaatiassa tilatieto kysytään määrävälein, mikä aiheuttaa merkittävää tehontarvetta langattomia yhteyksiä käytettäessä.

Tapahtumapohjaisen automaation testausta tehtiin Eclipse 4diac -ohjelmistolla. 4diac toteuttaa MQTT-protokollan vain laatutasolla 0 (QoS 0), mikä tarkoittaa viestin lähettämistä vain kerran. Lisäksi toteutuksessa ei ole huomioitu lainkaan käyttäjätunnus/salasana-kirjautumista MQTT-välittäjälle, joten automaatiojärjestelmän suojaus voidaan tehdä vain verkkokerroksella esim. VPN-yhteydellä. Puutteistaan huolimatta 4diac on laadukas ohjelma ja Eclipse 4diac IDE käyttökelpoinen IEC 61499 -standardin opiskeluun ja tapahtumapohjaisen automaatio-ohjelmiston testaukseen.

Opinnäytetyön yhteydessä selvitettiin Eclipse 4diac -ohjelmiston käyttämistä säätösalaojakäivon padotuskorkeuden säätöön. Alkuperäisestä tavoitteesta, hyödyntää ISO 61499 -standardin mukaista automaatio-ohjelmistoa toteutettavissa prototyypissä, kuitenkin päätettiin luopua, koska käytettävissä olevat ohjelmistot eivät soveltuneet prototyyppien toteutukseen.

5.3.4 Toteutuksiin liittyvän automaation haasteet

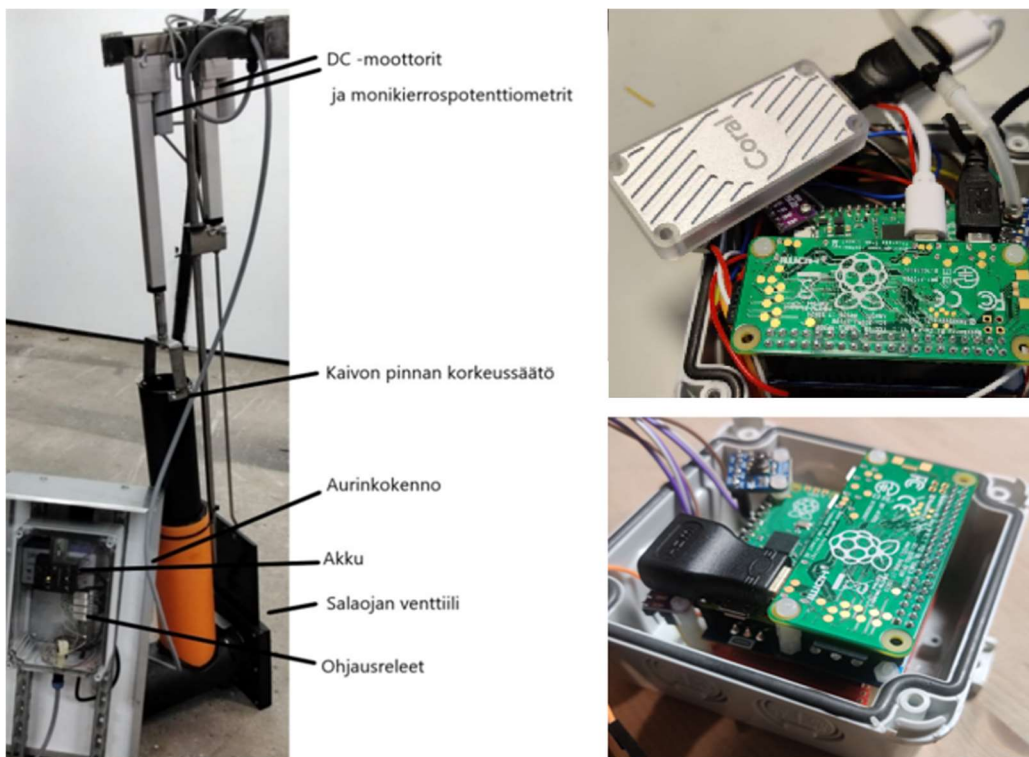
Automaation käyttäminen peltoviljelyn salaojakastelussa edellyttää takaisinkytkentää pellon vesitalouden tilanteesta automaation ohjaukseen. Salaojakastelussa säädettävä kohde on pellon pohjaveden pinta, minkä tilaa seurataan. Pohjaveden pinta vaihtelee salaojien välissä riippuen veden liikkuvuudesta, salaojituksen tiheydestä ja siitä ollaanko peltoa kuivaamassa vai kastelemassa, kuten luvun 3.4.1 kuvioista 4 voidaan havaita. Mikäli pellon pohjavesiputkien antamaa aikasarjatietoa on saatavilla vaihtelevissa sääolosuhteissa sekä säätösalaojajärjestelmän toimenpiteiden ajalta (kuivatus/kastelu), voidaan maaperän toimintaa mallintaa ja hyödyntää tulevien toimenpiteiden, suunnittelussa ja ennakkoinnissa.

Maalajit ja maaperän kerrokset vaikuttavat veden liikkuvuuteen maaperässä ja pellon vedenpidätyskykyyn. Peltujen ominaisuuksista saadaan vuosittain tietoa erilaisissa sääolosuhteissa, mutta ilman numeerista mittaustietoa eri kasvukausien vertailu on haastavaa. Sademäärät ovat pääsääntöisesti hyvin alueellisia, ja kastelumäärän ja ajankohdan optimointi aikaisempien vuosien tiedoilla on epävarmaa ja sattumanvaraista. Peltujen vesitalouden toiminta tulee olla mitattavissa, jotta automaation soveltaminen vesitalouden hallintaan on toteutettavissa.

5.4 Salaojakasteluautomaation toteutus

Säätösalaojituksen padotuskorkeutta säädetään säätösalaojakaivolla, jossa vedenpinnan korkeutta säädetään esim. teleskooppiputken avulla. Kuvassa 1 on säätösalaojakaivon toimilaitte, Coral USB -tekoälykiihdytin (Edge TPU) sekä järjestelmän ohjausyksikkö. Automaatiojärjestelmän voimanlähteenä toimii akku, jota varataan aurinkosähköjärjestelmällä. Toimilaitteessa on mm. DC-moottorit padotuskorkeuden ja venttiilin ohjaukseen. Säätösalaojakai-
von padotuskorkeus ja venttiilin asento mitataan DC-moottoriin liitetyn monikierrospotenttiometrin vastusarvosta.

Coral USB -tekoälykiihdytintä (kuva 1) voidaan käyttää reunalaskennassa mm. analysoimaan mittaustietoa. Yhteensopivista TensorFlow Lite -malleista voidaan tehdä Coral USB -kiihdyttimelle soveltuva malli. Coral USB-kiihdytin nopeuttaa esim. Raspberry Pi -alustan päättelynopeutta huomattavasti, jopa 10–30 kertaiseksi (Coral, i.a.). Tekoälykiihdytintä voidaan hyödyntää mittaustiedon analysoinnin lisäksi automaatiojärjestelmien, ml. säätösalaojakastelujärjestelmän, ohjaukseen.



Kuva 1. Säätösalaojakaivon toimilaitte (Kolehmainen Jari Tmi) ja ohjausyksikkö

5.5 Ohjelmistokehitys

5.5.1 Ohjelmistokeskeisen automaation ohjelmistotuotanto

Ohjelmistokeskeisen automaatiojärjestelmän suunnittelu muistuttaa suurelta osin perinteistä IT-teknologian ohjelmistokehitystä. Samat teknologiat, joita on käytetty pitkään IT-ohjelmistotuotannossa ovat tulleet tai ovat tulossa mukaan OT-ohjelmistotuotantoon. Esimerkiksi IP-verkot, olio-ohjelmointi, tapahtumapohjaisuus sekä konttitekniikat ovat jo tulleet IT-ympäristöistä automaatiojärjestelmiin.

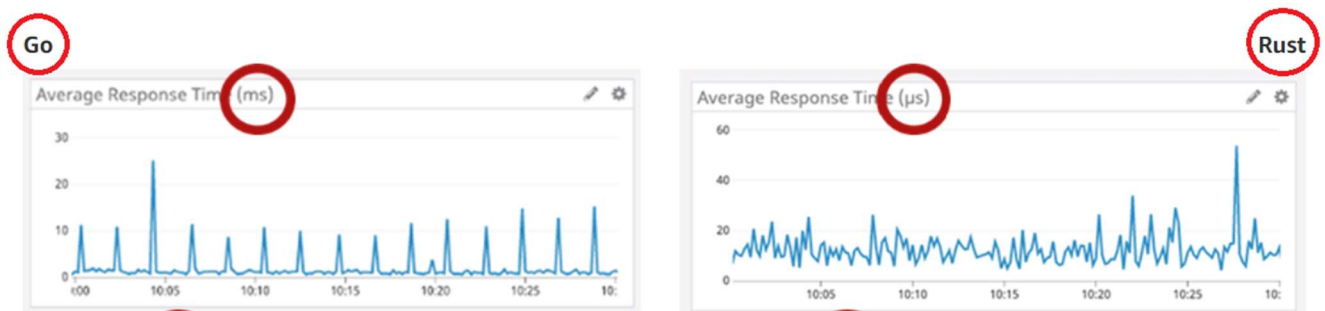
Automaatiojärjestelmien toimintaympäristö asettaa ohjelmistokeskeisen automaation ohjelmistoille vaatimuksia, joiden huomioiminen normaalissa IT-järjestelmien toimintaympäristössä ei ole erityisen tärkeää. Peltöjen vesitalouden hallintajärjestelmän reunalaskennan tehoa rajoittaa lähinnä virrankulutus. Aurinkokennolla ladattavien akkujen käyttäminen edellyttää ohjausjärjestelmien virransäästön huomioimista ohjelmiston suunnittelussa ja toteutuksessa. Automaatio-ohjelmiston virrankulutusta voidaan pienentää huomattavasti, mikäli on mahdollista pitää järjestelmä syvässä lepotilassa (Deep sleep mode) ja suorittaa ohjelmistoa vain tietyin väliajoin. Maaperän ominaisuuksia mittaavilla akkukäyttöisillä antureilla lepotilan hyödyntäminen pidentää toiminta-ajan vuosiin. Vastaaville ohjelmistoteknisille ratkaisuille ei IT-järjestelmissä yleensä ole merkittävää tarvetta, joten soveltuvia ohjelmistotuotannon menetelmiä ei ole kopioitavissa IT-järjestelmien kehitysympäristöistä.

Automaatiojärjestelmien virrankulutus verrattuna laitteiston tehoon on akkukäyttöisillä järjestelmillä parantunut prosessoreiden kehittyessä mm. suorittimien arkkitehtuurien ja valmistusprosessien ansiosta. Kehittyneet valmistusprosessit tuovat uusia käyttökohteita tehokkaalle reunalaskennalle myös akkukäyttöisillä laitteilla. Esimerkiksi 4 nanometrin viivanleveydellä valmistetuilla Ryzen 7040 suorittimilla, jotka sisältävät mm. AI-kiihdyttimen (Phoenix APU), voidaan päästä kymmenien tuntien akunkestoon. Tämä kuvaa akkukäyttöisen reunalaskennan mahdollisuuksia ohjelmistokeskeiselle automaatiolle ja tekoälylle (Scannell, 2023). AMD:n toimitusjohtaja Lisa Su kertoi CES-puheenvuorossaan uuden aikakauden alkaneen. Akkukäyttöisten tietokoneiden tekoälysovelluksille AI-sirut tuovat pilvipalveluiden laskentatehot. Tulevaisuudessa tekoälyn hyödyntäminen tulee siis vaikuttamaan merkittävästi myös akkukäyttöisten automaatiojärjestelmien ohjelmistotuotantoon.

5.5.2 Ohjelmointikielten vaikutus automaatiojärjestelmän toimintaan

Automaatiojärjestelmien ohjelmistotuotannon keskeisenä tavoitteena on häiriöttömyys. Luvussa 4.5.2 esitettiin automaatiojärjestelmiä tietoturvallisuuden näkökulmasta, ja kuviosta 12 tunnistettiin ohjelmistojen muistinhallinnan keskeinen merkitys tietoturvalle. Tässä opinnäytetyössä käytetyllä Rust-kielillä on tehokas ja turvallinen muistinhallinta.

Muistinhallinta on ohjelmistojen häiriöttömyyden lisäksi keskeinen myös ohjelmistojen toiminnalle automaatioympäristöissä. Kuviossa 13 verrataan Go- ja Rust-kielillä tehtyjen sovellusten viiveitä. Säännöllisesti toistuvat viiveet Go-sovelluksissa johtuvat muistinhallinnan automaattisesta roskienkeräämisestä, joka automaatiojärjestelmissä saattaa olla vahingollista.



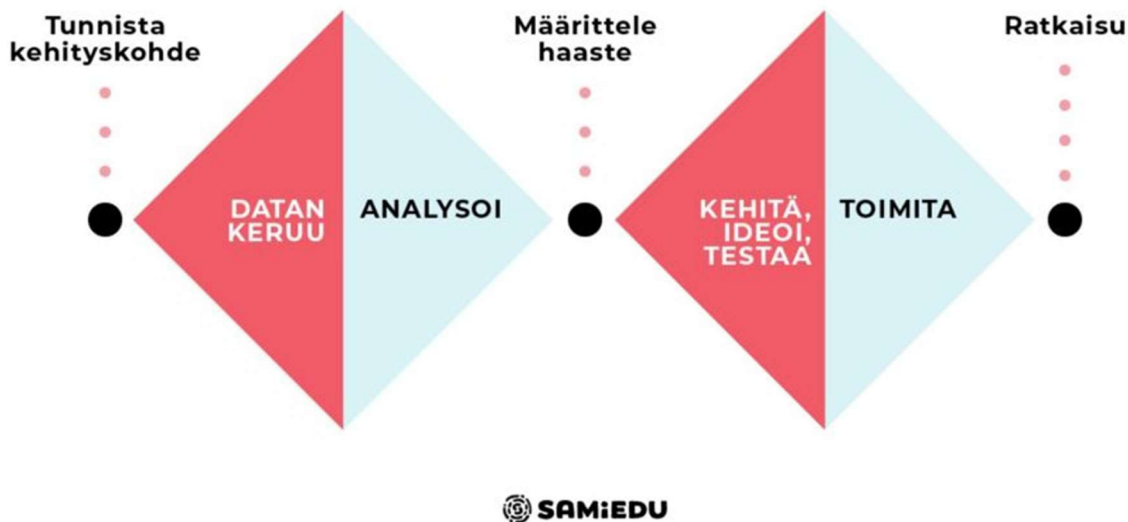
Kuvio 13. Go ja Rust ohjelmointikielten vertailu (Miller & Lerche, 2022)

Automaatiojärjestelmässä ohjelmointikielellä on huomattava vaikutus järjestelmän energiatehokkuuteen. Akkukäyttöisessä automaatiojärjestelmässä ohjelmiston energiatehokkuus vaikuttaa osaltaan järjestelmän tehokkuuteen ja tarvittaviin akkujärjestelmiin sekä ylläpito- tehtäviin. Vertailtaessa ohjelmointikielten ominaisuuksia voidaan havaita merkittävä ero esimerkiksi Rust- ja Python-kielten energiatehokkuudessa (Miller & Lerche, 2022). Käytännössä kielen merkitys näkyy erityisesti akkukäyttöisissä automaatiojärjestelmän toiminta- ajassa. Energiatehokkuuden ja muistin turvallisen käytön takia Rust-kieli soveltuu hyvin akkukäyttöisten automaatiojärjestelmien ohjelmointikieleksi ml. säätösalaajakastelun automaatiojärjestelmät.

5.6 Palvelumuotoilu

5.6.1 Johdanto palvelumuotoiluun

Palvelumuotoilu laajentaa tuotekehitystä tuotokeskeisyydestä järjestelmän ja prosessien kehittämiseen. Prosessissa kerätään tietoja sidosryhmien tarpeista ja tavoitteista mm. haastatteleamalla, havainnoimalla (Piirainen ym., 2022). Asiakaskeskeisyys on palvelumuotoilussa hyvin vahva teema, minkä takia asiakkaiden ja muiden sidosryhmien tunnistaminen on keskeinen onnistumisen edellytys. Palveluun tai tuotteeseen kohdistuvien toiveiden ja vaatimuskäytäntöiden tunnistaminen on tärkeä osa palvelumuotoilua. Erityisen tärkeää on ymmärtää käyttäjien toiveet ja vaatimukset sekä niihin liittyvät huolenaiheet sidosryhmien näkökulmasta.



Kuvio 14. Palvelumuotoilun kaksoistimantti (Samiedu, i.a.)

Palvelumuotoilu tarjoaa työkaluja kehittämisprosessin eri vaiheisiin. Salaojakastelun kehitystyössä käytetään kaksoistimanttimallia (kuviokuva 14), jossa ensimmäisen timantin tavoitteena on tunnistaa haasteet, joihin kehitetään ratkaisut toisen timantin prosessissa. Pyrkimyksenä on ongelmien ymmärtäminen ja ratkaisujen ideointi, sekä prototyyppien avulla havainnollistaa kehitetyt ideat. Prototyyppien rakentaminen helpottaa suunnitteluvirheiden löytämistä ja palautteen keräämisen sidosryhmiltä. Prototyyppien suunnittelu ja toteuttaminen auttaa virheiden nopeaa havaitsemista, joka nopeuttaa toimivan ratkaisun löytämistä (Samiedu, i.a.).

5.6.2 Salaojakastelun asiakasymmärryksen kartoitus

Salaojakastelun haasteiden kartoitus tehtiin asiantuntijoiden haastattelujen ja tapaamisien lisäksi tutustumalla käytössä oleviin ratkaisuihin esittelyissä, messuilla ja salaojakastelun tutkimuskentillä. Käytyjen keskustelujen ja havaintojen lisäksi tutustuttiin tutkimustulosten ja -havaintojen raportointiin. Automaatiojärjestelmien ohjaukseen liittyvien haasteiden selvittämisessä sovellettiin Teollisuus 4.0 mukaista IIoT toimintaympäristöä.

5.6.3 Asiakasymmärryksen tulkinta

Salaojakastelun tutkimusta on tehty peltojen tuotantokyvyn parantamiseksi ja ympäristövaikutusten selvittämiseksi. Tutkimus on suuntautumassa yhä enemmän ympäristöasioihin mm. turvemaiden kasvihuonepäästöjen hallintaan. Salaojakastelun toteutukseen liittyvää tutkimustietoa tai ohjeistusta on vähän saatavilla. Säätosalaojakaivoihin liittyvää teknistä tutkimusta ja tuotekehitystä tehdään automaation osalta lähinnä etäohjaukseen ja valvontaan.

Salaojakastelun ohjauksessa käytetään lähtökohtana aikaisempia kokemuksia ja havaintoja sääolosuhteiden vaikutuksesta maaperän vesitalouteen (Paasonen-Kivekäs, 2016, s. 346). Maaperän pohjaveden korkeuden selvittäminen pohjavesiputkilla on työllistävää, ja niiden käyttö pelloilla haittaa viljelytoimenpiteitä, minkä takia pohjavesiputkien rakennetta ja toimintaa on pyritty kehittämään. Jotkut viljelijät jopa poistavat pohjavesiputket muokkaustöiden ja sadonkorjuun ajaksi (mts. 346). Pohjavesiputkien toiminta on salaojakastelussa keskeinen, koska automaation edellyttämä takaisinkytkentä säätötoimenpiteiden vaikutuksesta on haastava muuten toteuttaa. Kokemuspohjaisen tiedon täysimääräinen hyödyntäminen automaatioissa edellyttää mittaustietoa, jolla aikaisemmat havainnot ja kokemukset voidaan hyödyntää.

Ohjelmistokeskeisen automaation ongelmana salaojakastelun toteutuksessa on ajantasaisen ja luotettavan ohjaustiedon määrittäminen. Avoimien tietolähteiden pohjalta saadaan tietoa sadannasta ja kertyneestä lämpösummasta sekä satelliittikuvien indeksikuvien (NDVI, NDMI, NDWI) avulla kasvuston kosteuteen ja terveyteen liittyvästä tiedosta (EOS, i.a.). Satelliittikuvista havaitaan kuitenkin vain niitä muutoksia kasvustossa, joihin olisi pitänyt reagoida ennen muutoksien ilmaantumista, joten havainnot eivät ole käyttökelpoisia automaatiojärjestelmän välittämään ohjaukseen, mutta auttavat tunnistamaan vesitalouden puutteita.

5.6.4 Automaatio-ohjauksen ydinongelmat ja mahdollisuudet

Haitallisen kosteuden ennaltaehkäisy ja ulkopuolisen kasteluveden tarpeen minimointi ovat keskeisiä elementtejä pellon vesitalouden hallinnan automaatiassa. Jokainen pelto on erilainen maaperän ominaisuuksilta, kuten veden liikkuvuus ja kyky sitoa kasveille käyttökelpoista vettä. Lisäksi nämä maaperän ominaisuudet yleensä vaihtelevat yksittäisillä pelloilla.

Haitallisen kosteuden ennaltaehkäisyyn vaikuttavia tekijöitä ovat maaperän ominaisuuksien lisäksi merkittävän sateen todennäköisyys sekä haihdunta, jotka tulee määrittää riittävällä tarkkuudella. Sateen todennäköisyyden indeksi (RPI, rain probability index) kuvaa tarkasteltavan ajankohdan sadetodennäköisyyksien summaa sekä tarkisteltavan ajanjakson sadetapahtumien summaa (Ahonen, 1991, s.13). Sateen todennäköisyysindeksin käyttäminen kasteluveden pumppaamisen ohjauksessa vähentää vuosittain pumpattavan kasteluveden tarvetta yli 10 % ilman merkittävää lisäystä kasvuolosuhteiden kuivuuteen (Ahonen, 1991, s.14).

Lyhytaikainenkin liiallinen kosteus saattaa olla kasveille vaikeampi kuin pitkäaikainen kuivuus. Esimerkiksi peruna saattaa kuolla jo 2–3 vuorokauden kuluessa liiallisen kosteuden takia (Ahonen, 1991, s.11). Hyvin vettä läpäisevillä maalajeilla liiallisen kosteuden todennäköisyys on pienempi kuin heikommin läpäisevillä maalajeilla. Maalajit tulee huomioida ulkopuolisen kasteluveden tarpeen minimoinnissa. Sateen todennäköisyyden kasvaessa lisätään kuivatusta enemmän pellon heikosti vettä läpäisevissä kohdissa.

Pellon vesitalouden hallinnan automaatio-ohjauksella toteutetun ratkaisun keskeinen vaatimus on toimintavarmuus. Sen lisäksi järjestelmän tulee olla säädeltävissä pellon olosuhteisiin myös peltolohkon sisällä maaperän ominaisuuksien mukaisesti. Ohjelmistokeskeinen automaatio mahdollistaa tarvittavien ohjaustietojen käsittelyn sekä tiedon keräämisen toimenpiteiden aiheuttamista muutoksista pilvipalveluun ja reunalaskennan anturitietojen analysointiin. Automaatio-ohjauksen toteutuksen reaaliaikavaatimukset ovat vähäisiä, mikä helpottaa osallista automaatoratkaisujen ideointia ja kehittämistä.

Palvelumuotoilun periaatteiden mukaisesti määrittelyn tuloksena tulisi saada syvälinen ymmärrys vaatimuksista. Tavoitteena on myös tunnistaa ongelman lisäksi esiin nousevat mahdollisuudet. Tämän opinnäytetyön tavoitteena on selvittää, mitä ohjelmistokeskeinen automaatio mahdollistaa peltolohkon vesitalouden hallinnassa, ja sen takia palvelumuotoilussa pyrittiin erityisesti tunnistamaan ohjelmistokeskeisen automaation mahdollisuuksia.

5.6.5 Ratkaisujen ideointi

Palvelumuotoilun kaksoistimanttimalin ensimmäisen timantin mukaisesti tunnistettu ongelma vesitalouden hallinnan automaatio-ohjauksessa on tarvittavan säätömallin rakentaminen niin, että soveltaminen erilaisiin toimintaympäristöihin on mahdollista. Ohjelmistokeskeisen automaation ohjelmistojen avulla mallien virtuaalinen kehittäminen ja joustavat kytkennät verkkojen tarjoamiin palveluihin tulevat mahdollisiksi. Ohjelmistokeskeinen automaatio mahdollistaa reunalaskennalla esimerkiksi pilvipalveluihin tallennettavien tietojen esikäsittelyn sekä tiedonsiirtoon liittyvien ratkaisujen kehittämisen.

Peltojen vesitalouden automaatiojärjestelmän tulee pystyä toimimaan hitailla ja häiriöherkillä verkkoyhteyksillä pilvipalveluihin, joten tiedonsiirto kapasiteetti ei riitä raskaiden käyttöliittymien toteutukseen. Tiedon kerääminen pellolta tietovarastoon analysoitavaksi on keskeinen vaatimus säätömallien rakentamiseksi. Tiedonsiirrossa antureilta tietovarastoon ei ole merkittäviä reaaliaikavaatimuksia. Siirrettävät tietomäärät saattavat kuitenkin kasvaa suuriksi mitattaessa vedenpinnan muutosnopeuksia säätömallien toteutukseen vaadittavalla tarkkuudella, mikäli kaikki saatavilla oleva sensoritieto välitetään pilvipalvelun tietovarastoon.

MQTT-protokolla on kehitetty alun perin öljyputkien komponenttien etähallintaan ja tiedon välittämiseen häiriöherkkien yhteyksien läpi valvonta- ja hallintajärjestelmille (Behrens, 2019). Vastaavat toimintaympäristövaatimukset voidaan tunnistaa peltojen vesitalouden valvonta- ja hallintajärjestelmällä. MQTT julkaisee laitetietoja vain tietojen muuttuessa. Kyseistä tekniikkaa kutsutaan nimellä Report by Exception (RBE), joka eroaa useiden IoT-arkkitehtuurien kysely/vastaus-mekanismista, jossa sovellukset kyselevät tietyin väliajoin eli pollaavat (engl. poll) laitetietoja IoT-laitteelta käyttämällä esim. Modbus tai OPC UA-protokollaa.

Kysely/vastaus-menettelytapa on toimiva, mutta arkkitehtuurin ylläpito vaikeutuu, kun IoT-laitteiden määrä kasvaa. Mikäli ajantasaiset laitetiedot tulee olla saatavilla 0-20 sekunnin kuluessa muutoksesta tulee IoT-laitetieto pollata vähintään 20 sekunnin välein, vaikka laitetieto muuttuisi keskimäärin kerran päivässä. Tiedon tuottajan ja käyttäjän yhdistäminen MQTT-protokollalla säästää tiedonsiirrossa tarvittavaa kaistaa sekä laskentatehoa, koska tietoa käsitellään vain tiedon muuttuessa. Tiedon tuottaja lähettää tiedon kertaalleen, ja useat voivat vastaanottaa tiedon ilman tiedon lähettäjän toimenpiteitä. Laitetietojen käyttäjien lisääminen ja poistaminen on vaivatonta.

5.6.6 Prototyyppien rakentaminen ja testaus

Pellon vesitalouden hallinnan automaatio-ongelmien ratkaisujen ideoinnista nousi useita mahdollisia ohjelmistokeskeiseen automaatioon liittyviä prototyyppiaihiota, joista valittiin toteutettavaksi pellon vesitalouden hallinnan automaation kytkeytyminen pilvipalveluihin ja säätösalaajakaivon ohjaus. Prototyypeissä automaation kytkeminen pilvipalveluihin toteutettiin Sparkplug-protokollalla ja säätösalaajakaivon ohjaus Raspberry Pi / Pico -toteutuksella, jossa hyödynnettiin myös Sparkplug-protokollan tarjoamia mahdollisuuksia.

Ratkaisun ideoinnissa todettiin MQTT-protokollan sopivan automaatiojärjestelmän ja pilvipalvelun yhdistämiseen peltojen vesitalouden hallintajärjestelmässä, koska se mahdollistaa ajantasaisen laitetiedon välittämisen pienellä tietoliikennekapasiteetilla. Laitetietojen väittäminen MQTT-protokollalla ei määrittele laitetietojen tietorakennetta eikä nimiavaruutta, mikä vaikeuttaa järjestelmien yhteentoimivuutta eri toimijoiden ja ympäristöjen välillä. Sparkplug, joka toimii MQTT-protokollan päällä, tarjoaa ratkaisun näihin haasteisiin.

Alkuperäisen suunnitelman tavoitteena oli toteuttaa säätösalaajakaivon automaatio-ohjaus IEC 61499 -standardin mukaisella ohjelmistolla. Tutkittu avoimen lähdekoodin Eclipse 4diac ei osoittautunut tehtävään soveltuvaksi, minkä takia päädyttiin soveltamaan Node-RED ympäristöä. Node-RED ympäristössä on tuki Sparkplug-protokollalle, jota hyödynnettiin automaatio-ohjaukseen toteutuksessa.

5.6.7 Prototyyppi-1: Anturitiedon siirto Sparkplug-yhteydellä

Sparkplug-arkkitehtuuri tarjoaa MQTT-yhteyksille hyötykuorman määrittelyn ja nimiavaruuden MQTT-viesteille. Sparkplug-arkkitehtuuri hyödyntää MQTT:n julkaisu- ja tilausarkkitehtuuria, jossa tietoja päivitetään vain muutoksien yhteydessä. MQTT-yhteydet ovat tietoisia istunnoista, mikä mahdollistaa yhteyden katkeamisen takia tehtävät toimenpiteet. Sparkplug määrittää kuolintodistuksen (Death Certificate), joka käyttää MQTT:n testamentin mekanismia (LWT, Last Will and Testament), MQTT-yhteyden katkeamisen viestimisessä IoT-laitetta seuraaville sovelluksille. Sparkplug-syntymätodistusta (Birth Certificate) käytetään MQTT-yhteyden uudelleen kytkeytyessä viestimään sitä seuraaville sovelluksille IoT-laitteen kaikki laitetiedot, jotka ovat saattaneet muuttua yhteyden ollessa pois päältä.

Sparkplug-arkkitehtuuri koostuu MQTT-välittäjästä (MQTT-broker) ja Sparkplug-solmuista (Sparkplug edge node). Sparkplug-solmut toimivat antureilta saatavan laitetiedon yhdyskäytävänä (GW) anturin ja MQTT-välittäjän välissä. Sparkplug-arkkitehtuurin mukaisessa järjestelmän kaikkien komponenttien tulee olla yhteensopivia MQTT 3.1.1 -protokollan kanssa.

Sparkplug-viestin osoite alkaa nimiavaruuden määrittävällä etuliitteellä, joka Sparkplug 3.0 -versiolla on "spBv1.0" (Sparkplug B versio 1.0). Seuraavana osoitteessa on group_id tunnus, jota seuraa viestin tyyppi elementti ja edge_node_id sekä device_id elementit. Esim. viesti: "spBv1.0/<tilatunnus>/DDATA/<GW_id>/<anturi_id>" on Sparkplug-standardin mukainen, kun <tilatunnus>, <GW_id> ja <anturi_id> korvataan kyseisen viestin tiedoilla.

Anturitiedon Sparkplug-prototyyppi toteutettiin maanperän kosteutta, lämpöä ja suolapitoisuutta mittaavan anturin yhdistämisellä pilvipalveluun. Prototyypissä käytettiin Dragino LoRaWAN -anturia, joka kytkettiin LoRaWAN-yhdyskäytävään, mikä toteutettiin Raspberry Pi 3 -alustaan kytketyllä SX1302 LoRaWAN Gateway HAT -moduulilla. Prototyypissä käytetyllä LoRaWAN-yhdyskäytävällä on oma paikallinen MQTT-palvelin, jolle Dragino-anturin LoRaWAN-yhteydellä lähettämät tiedot julkaistaan. LoRaWAN-yhdyskäytävän Node-RED ympäristöön toteutettiin julkaistujen MQTT-sanomien tilaus sekä Sparkplug-viestin muodostaminen ja lähettäminen julkisessa verkossa olevalle MQTT-välittäjälle. Pilvipalvelu, esimerkiksi Peltodata, tilaa MQTT-välittäjältä ko. LoRaWAN-yhdyskäytävän lähettämät viestit, jolloin Draginon lähettämä syntymätodistus (DBIRTH) ja mittaustieto (DDATA) saadaan pilvipalveluun:

- group_id = <tilatunnus> = "1234567890"
- edge_node_id = <GW_id> = "LoRaWAN_GW1"
- device_id = <devEui> = "a84041da1182c937"

Sparkplug-syntymätodistus (Birth Certificate) DBIRTH-viestin tietosisältö, esimerkiksi:

spBv1.0/1234567890/DBIRTH/LoRaWAN-GW1/a84041da1182c937

1. name: Dragino-1
2. type: LSE01
3. water_SOIL: 6.309
4. temp_SOIL: 18.92
5. conduct_SOIL: 47.55
6. latitude: 62.71 70

7. longitude: 23.08 30
8. timestamp: 1676185919375

Sparkplug DDATA-viesti sisältää vain anturin muuttuneet tiedot, esimerkiksi:

spBv1.0/1234567890/DDATA/LoRaWAN-GW1/a84041da1182c937

1. water_SOIL: 6.403
2. temp_SOIL: 19.94
3. timestamp: 1676185929375

Esimerkiksi yhden muuttuneen sensoritiedon Sparkplug DDATA-viestistä:

spBv1.0/1234567890/DDATA/LoRaWAN-GW1/a84041da1182c937

1. water_SOIL: 6.511
2. timestamp: 1676185929375

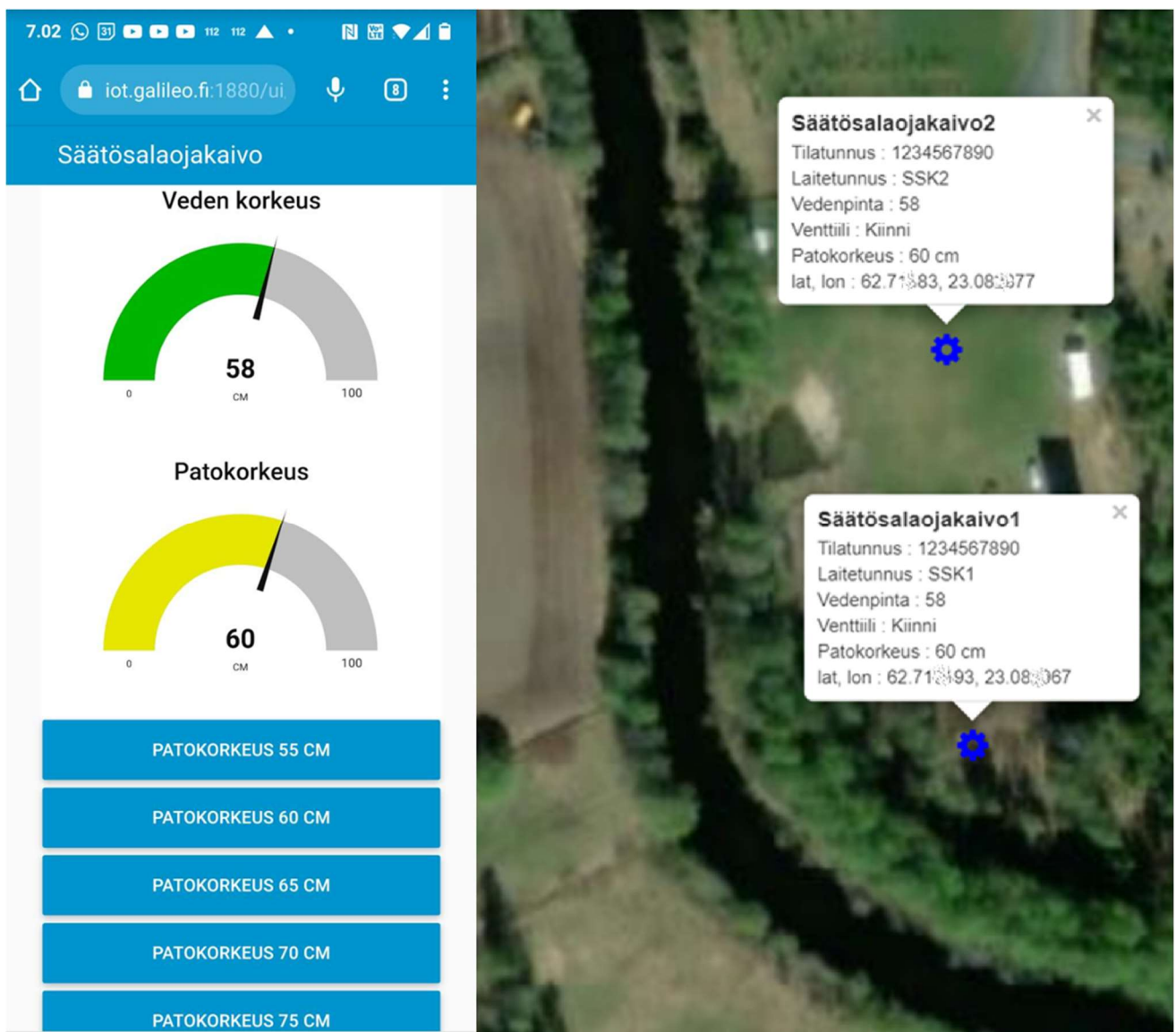
Sparkplug-protokolla mahdollistaa ko. laitetiedon tilaamisen MQTT-välittäjältä myös muille pilvipalveluille, sovelluksille tai palveluille. Esimerkissä käytetyn Dragino-1 laitetiedon tallentaminen esim. aikasarjatietokantaan on mahdollista ilman muutoksia tiedon julkaisuun LoRaWAN-GW1 Sparkplug-solmulla (edge-node). Aikasarjatietokantaan talletettua laitetietoa voidaan hyödyntää salaojakastelun ohjauksessa käytettävän mallin kehittämisessä sekä esimerkiksi Grafana-työkaluilla mittaustiedon muutosten tarkasteluun. Kuvassa 3 on Grafana-ohjelmalla muodostettu kaavio aikasarjatietokannasta, josta voidaan havaita säävaihtelun vaikutus kaivon vedenpinnan mittaustuloksiin, mikäli säävaihtelua ei huomioida.

Anturitiedon siirto Sparkplug-yhteydellä -prototyypin kehitystyön aikana tunnistettiin Sparkplug-yhteysprotokollan erittäin hyvä soveltuvuus peltojen vesitalouden hallinnan automatisointiin. Käytännön toteutuksessa yksi Sparkplug-solmu automaatiojärjestelmää kohti on riittävä ohjaukseen ja laitetiedon siirtoon. Ongelmaksi muodostuu yhden Sparkplug-solmun toteutuksissa antureiden ja toimilaitteiden tiedonsiirtoyhteydet, jotka on haastavaa toteuttaa laajoilla peltoalueilla.

5.6.8 Prototyyppi-2: Säättösalaajakaivon automaatio-ohjaus

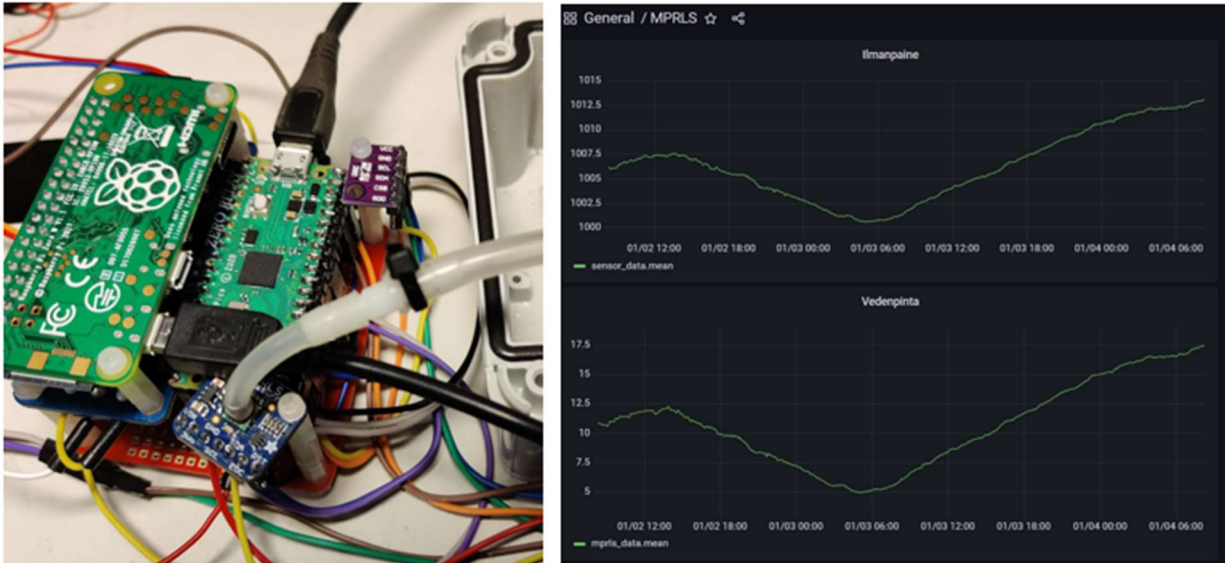
Säättösalaajakaivon ohjaukseen liittyvän prototyypin toteutuksessa hyödynnettiin MQTT- ja Sparkplug-viestintäprotokollia, jotka mahdollistavat automaatio-ohjauksen parametrien välittämisen säättösalaajakaivolle ilman kohteen julkista IP-osoitetta.

Kuvassa 2 on puhelimen käyttöliittymä, jolla asetetaan säättösalaajakaivon padotuskorkeus Sparkplug-protokollan avulla. Käyttöliittymä ja kartta on toteutettu Node-RED-ohjelmalla, jonka ohjelmakomponentit hyödyntävät Sparkplug-protokollaa.



Kuva 2. Puhelimen käyttöliittymä ja säättösalaajakaivot kartalla

Prototyyppi kuvassa 3 sisältää Raspberry Zero W:n ja Picon lisäksi ilmanpaineanturin. Säättösalojakaivon vedenpinnan mittaaminen MPRLS -ilmanpaineanturilla toteutetaan johtamalla anturiin kaivon pohjalla oleva ilmanpaine, jonka erotus maanpinnan ilmanpaineesta antaa kaivossa olevan vedenpinnan korkeuden. Säätilan aiheuttamalla ilmanpaineen vaihtelulla on huomattava merkitys vedenpinnan korkeuteen (kuva 3), minkä vuoksi tarvitaan myös BMP-280 -ilmanpaineanturi. Tällä kumotaan säätilan vaikutus mittaukseen.



Kuva 3. Ilmanpaineanturit ja vedenpinnan vaihtelu ilmanpaineen muuttuessa

Säättösalojakaivon vedenpinnan voi määrittää myös ultraääniantureilla, mutta niiden asennus on haastavaa ja ultraääniantureiden toimintavarmuus salaojakaivon olosuhteissa on kokemusten perusteella heikko (Koivusalo & Hyvönen, 1994, s. 3).

Säättösalojakaivon venttiilin ja patokorkeutta säättävän teleskooppiputken asento saadaan DC-moottorin yhteyteen sijoitetun monikierrospotenttiometrin antamasta vastusarvosta. Arvot luetaan Raspberry Picolla ja mittaustiedot lähetetään Raspberry Zero W:lle, jossa Node-RED ohjelmistolla laitetiedot välitetään Sparkplug-protokollalla julkisessa verkossa olevalle MQTT-välittäjälle.

Sparkplug -komentoina saadut ohjaustiedot välitetään säättösalojakaivon DC-moottoreille releiden välityksellä. Picossa on toteutettu patokorkeuden säätö ja Raspberry Zero W:ssa säättösalojakaivon venttiilin ohjauksen lisäksi ulkopuolisen kastelupumpun ohjaus. Kuvaus säättösalojakaivon ohjauksen toteutuksesta on tämän opinnäytetyön liitteessä 2.

5.6.9 Mallin tuotteistus ja johtopäätökset

Tehtyjen säätilahavaintojen, pohjavesihavaintojen ja indeksikuvakarttojen hyödyntäminen aikaisempien kasvukausien tiedoista luo pohjan peltojen vesitalouden hallintamalleille. Automaattinen ohjaus tehdään kaivon pohjaveden pinnan korkeuden pohjalta hyödyntäen sadantaa ja sääennusteita ohjauksen ennakkoinnissa toteutetun mallin mukaisesti.

Pohjaveden pinnan käyttäminen automaatiojärjestelmän ohjaamiseen sovellettavan mallin lähtötietona edellyttää ajantasaisen tiedon keräämistä peltoalueelta, minkä takia pohjavesiputkien toimintaa tulisi kehittää, kuten luvussa 5.6.3 tunnistettiin. Vastaavaa toteutusta, jolla mitataan esimerkiksi säätösalaojakaivon vedenpinnankorkeutta, voidaan käyttää myös pohjavesiputkien vedenpinnan mittaamisen. Pohjavesiputken sijoittaminen riittävän etäälle salaojakaivosta ja ilmanpaineen johtaminen säätösalaojakaivossa olevaan ilmanpaineanturiin, antaa käyttökelpoisen ohjaustiedon automaatiojärjestelmälle. Käytännöllisin menetelmä olisi käyttää langattomia antureita pohjavesiputkien tiedonsiirrossa. Tämän opinnäytetyön haastattelujen yhteydessä todettiin mahdolliseksi Soil Scout -tekniikan (langaton maaperän kosteusanturi) hyödyntäminen pohjaveden mittauksessa. Kyseinen tekniikka mahdollistaisi maanpinnan alaisen pohjavesiputken, joka ei häiritse viljelytoimenpiteitä kasvukauden aikana.

Liitteessä 1 on havaintokuvaus pellon vesitalouden hallinnan toteutuksesta säätösalaojakaivoilla. Tarkoituksenmukaista on toteuttaa keskitetty säätösalaojakaivojen ohjaus pellolla, jolloin mahdollistettaisiin tehokas reunalaskenta, mikäli tehokas virransaanti on järjestettävissä esim. kasteluvesipumpun yhteydessä. Haasteena liitteen mukaisessa tilanteessa on salaojakaivojen väliset etäisyydet langattoman tiedonsiirron kannalta. WLAN-yhteyden kantama ei ole riittävä käytännön toteutukseen eivätkä myöskään Bluetooth tai ZigBee kykene riittävään kantamaan. Langaton LoRa tiedonsiirto esim. 433 MHz taajuudella olisi edullinen ja toimiva ratkaisu, jonka esteenä on kuitenkin käytettävissä olevan lähetystehon rajoitus enintään 25 mW:iin (n. 14 dBm) kymmenen prosentin toimintasuhteella. Jatkuvalla yhteydellä LoRa 433 MHz:n tehorajoitus on ainoastaan 1 mW (Traficom, 2023, s. 13).

Prototyyppeillä osoitettiin, että sensori-, laite- ja ohjaustietojen välittäminen onnistuu ilman julkista IP -osoitetta Sparkplug-protokollalla. Tietojen lähettäminen pellolta analysoitavaksi ja ohjaustietojen saaminen säätösalaojakaivoille toteutettavaksi ovat keskeisiä ohjelmistokeskeisen automaation toteutuksessa. Merkittävänä haasteena on pellolla tapahtuva tiedonsiirron käyttökelpoinen toteutus langattomasti.

6 YHTEENVETO

6.1 Peltöjen vesitalouden hallinnan automatisoinnin haasteteet

Peltöjen vesitalouden hallinnan toimintaympäristövaihtelu on monitahoista. Pellon sijainti, pinnanmuoto, kaltevuus ja maaperän ominaisuudet ja erityispiirteet tekevät jokaisesta pellosta oman kokonaisuuden, jonka vesitalouden hallinta vaatii kyseisen pellolle soveltuvan toteutuksen. Tämän opinnäytetyön yhteydessä perehdyttiin IEC 61499 -standardin hyödyntämiseen peltöjen vesitalouden hallinnassa, koska standardin määrittämä hajautettu ja tapahtumapohjainen automaatio katsottiin ko. käyttöön soveltuvaksi. Toteutuksissa tunnistettiin kuitenkin puutteita, joiden takia IEC 61499 -standardin hyödyntämisestä luovuttiin (ks. luku 5.3.2).

Säätösalaajakaivon toimintojen automatisointi mahdollistaa automaatio-ohjelmistojen ja säätömallien käyttämisen peltöjen vesitalouden hallinnassa. Tässä opinnäytetyössä toteutettiin Kolehmainen Jari Tmi:n valmistaman säätösalaajakaivon ohjausyksikkö (kuva 1), jonka toimintoja voidaan etäohjata ja -valvoa kuvassa 2 esitetyillä käyttöliittymillä. Ohjausyksikkö sisältää liitteessä 2 kuvatut komponentit, joita ovat mm. anturit, releet ja Raspberry Zero W sekä Raspberry Pico. Ohjaus- ja valvontajärjestelmän prototyypin toiminta testattiin ja päätettiin aloittaa valmistelut kesällä 2023 tehtäviin ohjausyksikön säätösalaajajärjestelmän testaukseen.

Ohjauksen toteutus säätömallien avulla vaatii ajantasaista tietoa ohjausmallin lähtötiedoiksi esim. pohjaveden tasosta ja merkittävien sateiden todennäköisyyksistä. Kuuroluonteiset rankkasateet ovat pellon vesitalouden kannalta usein kaikkein merkittävimpiä, mutta niiden ennustaminen peltokohtaisesti on mahdotonta. Rankkasateiden vaikutus ei vaihtelee ainoastaan peltöjen välillä vaan on merkittävä myös yksittäisen peltolohkon sisällä.

Peltöjen vesitalouden hallinnan automatisoinnissa on lukuisia haasteita, joista edellä tunnistettiin muutamia. Automatisoinnin avulla voidaan silti toteuttaa vaikuttavia toimenpiteitä pellon vesitalouden parantamiseksi, mikäli säätösalaajajärjestelmä, pellon muotoilu, maan rakenne ja kunto mahdollistavat tehokkaan kuivatuksen ja kastelun. Automaatiojärjestelmän käyttäminen peltöjen vesitalouden hallinnassa ei ole ainoastaan sääolosuhteiden vaihtelun mukaisten toimenpiteiden toteuttamista. Mittaustiedon kerääminen pellon vesitalouden tilanteesta antaa suunnittelutietoa maaperän rakenteen ja maanpinnan muotoilun parantamiselle sekä säätösalaajakastelun kehittämiselle pellon erityispiirteitä vastaaviksi.

6.2 Reunalaskenta, pilvipalvelut, tiedon hyödyntäminen säätömalleissa

Peltojen vesitalouden hallinnan automaatio on jatkuvaa oppimista pellon ominaisuuksista ja sääolosuhteiden vaikutuksista vesitalouteen. Jokaisen vuoden aikana saadaan uutta tietoa kaikista niistä toimintaympäristön vaikutuksista, joita tulisi hyödyntää tulevilla säätömalleilla. Tässä opinnäytetyössä toteutettiin LoRaWAN-anturin kytkeminen LoRaWAN-yhdyskäytävän (SX1302 868M) kautta Sparkplug-solmuun (edge-node) ja sensoritiedon lähetys Sparkplug-viesteinä InfluxDB-aikasarjatietokantaan sekä Grafana-visualisointisovellukseen (ks. kuvio 9 ja liite 2). Palvelut toteutettiin opinnäytetyössä Docker-kontteina, joten niiden siirtäminen pilvipalveluun tai viljelijän omaan automaatioympäristöön on helposti toteutettavissa.

Reunalaskennan hyödyntäminen antureilla kerättävän tiedon jalostamisessa ennen tallennusta pilvipalveluun analysoitavaksi helpottaa mm. tiedon eheyden varmistamista. Reunalaskennalla tehtävän tiedon käsittelyn yhteydessä voidaan mm. poistaa virheellistä tietoa ennen sen mahdollista vaikutusta automaatiojärjestelmän toimintaan. Käytettäessä tekoälyä reunalaskennan apuna voidaan sensoritiedosta tunnistaa lähellä kohdetta ominaisuuksia, joiden tunnistaminen pilvipalvelussa vaatisi hyvin laajan mittausaineiston siirtämistä pilvipalveluun.

Tämän opinnäytetyön yhteydessä testattiin tekoälykiihdytintä (Edge TPU). Testiohjelmia käyttämällä saatiin hyviä tuloksia Raspberry Pi -alustaan kytketyn Coral USB -kiihdyttimen kyvyistä reunalaskennassa. Opinnäytetyön prototyyppeihin soveltuvia avoimia ja käyttökelpoisia TensorFlow Lite -malleja ei ollut saatavilla, minkä takia Coral USB -kiihdytintä ei otettu käyttöön opinnäytetyön prototyypeissä.

Ohjelmistokeskeisen automaation keskeiset edut ovat teho suurien tietomäärien käsittelyssä. IT-järjestelmien prosessoritehot ovat ohjelmistokeskeisessä automaatiossa merkittävä tekijä, joka mahdollistaa säätömallien rakentamisen koneoppimisen avulla ilman säätöalgoritmin ehtojen yksityiskohtaista mallintamista. Koneoppimisen merkitys tulee olemaan suuri peltojen vesitalouden hallinnan säätömallien kehitystyössä. Koneoppiminen mahdollistaa yksittäiseltä pellolta saatavan tiedon soveltamisen olemassa oleviin malleihin, mikä mahdollistaa tulevien mallien jatkuvan kehittämisen ja yksittäisen pellon erityispiirteiden huomioimisen.

6.3 Tietoliikenteen erityispiirteet

Peltojen vesitalouden hallinnan automaation toteutukseen vaikuttavat merkittävästi toimilaitteiden väliset etäisyydet, minkä takia kaapeloitu sähkönsyöttö ja tietoliikenneyhteydet ovat mahdollisia vain poikkeustapauksissa. IoT-laitteiden langattomat yhteydet mahdollistavat anturitiedon siirron SigFox, LoRaWAN tai muiden LPWAN -verkkojen välityksellä mutta ne eivät ole ratkaisu automaatiojärjestelmien etäkäytölle. WPAN-tietoliikenneverkot, kuten Zigbee, WLAN ja Bluetooth ovat käyttökelpoisia vain osaan automaatiojärjestelmien toiminnoista niiden lyhyen toimintaetäisyyden takia. Automaatiojärjestelmän langaton tietoliikenneverkko on avaintekijä tehokkaan, toimintavarman ja skaalautuvan automaatiojärjestelmän toiminnalle.

LoRaWAN -radiomoduulit mahdollistavat usean kilometrin tiedonsiirtoetäisyydet, mikä on pääsääntöisesti riittävä pellon vesitalouden automaatiojärjestelmän toteutukseen: LoRaWAN-verkossa voidaan käyttää 27 dBm (500 mW) lähetystehoa. LoRa-radiomoduulien lähetysteho 433 MHz taajuudella saa olla 25 mW (n. 14 dBm) kymmenen prosentin toimintasuhteella ja 1 mW (0 dBm) jatkuvassa käytössä, mikä luonnollisesti heikentää 433 MHz taajuuden käytettävyyttä pitkillä etäisyyksillä (Traficom, 2023, s. 13). Yksittäisen säätösalaojajärjestelmän paikallinen LoRaWAN-verkko toteutettiin opinnäytetyön prototyypissä verkkoon kytketyn LoRaWAN-yhdyskäytävän kautta kuviossa 9 esitetyn havainnekuvan mukaisesti.

Tiedonsiirto pellolta pilvipalveluun on toteutettavissa ilman julkista IP-osoitetta käyttämällä Sparkplug-protokollaa laitetiedon siirtämisen, ja tällä on merkitystä verkkoliittymän hinnan lisäksi myös tietoturvaohjelmien hallintaan. Kustannus- ja tietoturvaikutusten lisäksi julkisen IP-osoitteen käyttäminen IoT-laitteissa edellyttää pilvipalveluun tehtäviä IP-asetuksia, jotka aiheuttavat mm. ylläpitotyötä ja vaikeuttavat järjestelmän skaalautumista.

Verkkoyhteyden muodostaminen peltoalueen jokaiselta säätösalaojakaivolta 4G-reitittimellä lisää kustannusten ja ylläpitotyön lisäksi tietoliikennehäiriöiden todennäköisyyttä ja vaikeutta säätösalaojituksen toiminnan automatisointia. Tärkeä kehityskohde säätösalaojituksen automatisoinnin kehittämisessä on peltoalueella tapahtuva tiedonsiirron käyttökelpoinen toteutus langattomasti, jolloin myös usva- ja reunalaskennalla saavutettavissa olevat hyödyt voidaan toteuttaa. Peltoalueella langattomasti toisiinsa kytkeytyvät automaatiolaitteet mahdollistavat usvalaskennan avulla salaojakastelujärjestelmän toiminnan ilman jatkuvaa verkkoyhteyttä.

7 JOHTOPÄÄTÖKSET

7.1 Ohjelmistokeskeisen automaation mahdollisuudet

Ohjelmistokeskeinen automaatio tuo IT-ympäristöjen teknologiaratkaisut automaatiojärjestelmiin. Tehokkaiden prosessorien tuottama laskentateho mahdollistaa tekoälyratkaisuihin perustuvien mallien tuotantokäytön. Tämän merkitys tulee kasvamaan IT-järjestelmien lisäksi myös automaatiojärjestelmien toteutuksessa tiedon määrän kasvaessa eksponentiaalisesti.

Perinteinen automaatio pyrkii ratkaisemaan ongelmat etukäteen päätettyjen toimintamallien mukaisilla toimenpiteillä. Mikäli toimintaympäristö on stabiili ja muutokset ovat toimintaympäristössä ennalta määriteltäviä ja suunnitelmallisia, kuten perinteisessä teollisuusympäristössä on pyritty toimimaan, voidaan automaatiojärjestelmä toteuttaa laitekeskeisellä ennalta määritellyllä automaatoratkaisulla. Teollisuus 4.0 evoluutio muuttaa käsitystä mahdollisuudesta ennakoita ja päättää ennalta automaatiojärjestelmään toteutettavat toimenpiteet. Asiakkaiden ja sidosryhmien vaatimukset muuttuvat nopeasti ja verkostoitunut tuotanto edellyttää tiedon saatavuuden reaaliaikaisuutta. Nopeasti muuttuva toimintaympäristö ei ole ennalta päätettyjen toimenpiteiden mukaisesti ohjattavissa. Myös peltojen vesitalouden hallinnassa, ohjelmistokeskeinen automaatio mahdollistaa mm. sääolosuhteiden ja maaperän erityispiirteiden aiheuttamista muutoksista saatavan tiedon hyödyntämisen. Tällöin voidaan toteuttaa oikea-aikaisia ja vaikuttavia ohjaustoimenpiteitä.

7.2 Peltojen vesitalouden hallinta

Tutkimuksen pääkysymykseen ”*Mitä ohjelmistokeskeinen automaatio mahdollistaa peltojen vesitalouden hallinnassa?*” voidaan edellisen luvun perusteella vastata samalla tavoin kuin, mitä Teollisuus 4.0 mahdollistaa teollisessa tuotannossa. Ohjelmistokeskeisen automaation näkökulmasta ennalta arvaamattomat sääolosuhteet ovat peltojen vesitalouden hallinnalle samankaltaisia kuin nopeasti muuttuvat asiakasvaatimukset teollisuustuotannolle.

Ohjelmistokeskeinen automaatio mahdollistaa kaiken saatavilla olevan tiedon käyttämisen peltojen vesitalouden hallinnassa, mikä ei ole mahdollista manuaalisesti tai laitekeskeisellä automaatiolla. Tieto voittaa aina – nyt ja tulevaisuudessa – myös pelloilla.

LÄHTEET

- Aarrevaara, H. (2014). *Suomen salaojituksen historia* (3. uud. painos). Salaojituksen Tukisäätiö. https://www.salaojayhdistys.fi/wp-content/uploads/2022/05/Historia-0291_001.pdf
- Aberasturi, A. (2022). *Open Source Low-Code with Node-RED*. Parser. <https://parserdigital.com/open-source-low-code-with-node-red/>
- Ahonen, J. (1991). *Säätösalojituksen ja pohjavesikastelun käyttö ja soveltuvuus Suomessa* [Diplomityö, Teknillinen korkeakoulu, Maanmittaus ja rakennustekniikan osasto]. https://www.tukisaatio.fi/tietopankki/wp-content/uploads/2018/03/Ahonen_J_1991.pdf
- Behrens, S. (2019). From Oil Pipelines to the IoT: A Brief History of MQTT. *Paessler*. <https://blog.paessler.com/a-brief-history-of-mqtt>
- Carratú, M., Gallo, V., & Paciello V. (2022). *IEEE 1451: Communication among smart sensors using MQTT protocol*. IEEE. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9887708>
- Christensen, J. H. (2021). *New Developments in the IEC 61131-3 and 61499 Standards for Industry 4.0*. Researchgate. https://www.researchgate.net/profile/James-Christensen-3/publication/352573102_New_Developments_in_the_IEC_61131-3_and_61499_Standards_for_Industry_40/links/60d2278da6fdcce58baa946e/New-Developments-in-the-IEC-61131-3-and-61499-Standards-for-Industry-40.pdf
- Collin, J., & Saarelainen, A. (2016). *Teollinen internet*. Talentum Media.
- Cope, K. (2018). *What is the automation pyramid?* Realparts. <https://realpars.com/automation-pyramid>
- Coral. (i.a.). *Edge TPU performance benchmarks*. <https://coral.ai/docs/edgetpu/benchmarks>
- Eclipse. (2022). Sparkplug 3.0.0. https://www.eclipse.org/tahu/spec/sparkplug_spec.pdf
- EOS. (i.a.). *Index Stack (NDVI, NDWI, NDSI)*. <https://eos.com/make-an-analysis/index-stack/>
- Euroopan komissio. (2022). *Observations on the CAP Strategic Plan submitted by Finland*. https://mmm.fi/documents/1410837/12210688/FI+CSP_List+of+Observations.docx.pdf/b5cf4d8b-89a5-6534-29c1-dba82e6f2ae5/FI+CSP_List+of+Observations.docx.pdf?t=1649072223929
- Hallsten, J. (2017). *The industrial internet of things reference architecture, from the IIC*. *Hallsten Innovations*. https://www.hallsteninnovations.com/industrial-internet-things-reference-architecture-iic/?utm_source=IIoT-World.com.com&utm_medium=iiot-world.com/news/
- Hirsjärvi, S., Remes, P., & Sajavaara, P. (2007). *Tutki ja kirjoita* (13. osin uud. laitos). Tammi.

- Holopainen, V. (2017). *Ruokapalvelut osana päivittäistavarahuoltoa. Varautumisopas kun- nille*. Huoltovarmuuskeskus. https://www.huoltovarmuuskeskus.fi/fi-les/41cbbb6534c3c855a162f16cc712b32d14fa4dbf/ruokapalvelut_opas.pdf
- Hopsu, A. (2019). *Portability of IEC 61499 compliant software*. Aalto-yliopisto. https://aalto-doc.aalto.fi/bitstream/handle/123456789/37120/master_Hopsu_Alexander_2019.pdf?sequence=1
- Humalamäki, A. (2022). *Miten ruuan huoltovarmuutta parannetaan? Näin tutkimus auttaa*. Helsingin yliopisto. <https://www.helsinki.fi/fi/uutiset/ruoka-ja-ravitsemus/miten-ruuan-huoltovarmuutta-parannetaan-nain-tutkimus-auttaa>
- Huoltovarmuuskeskus. (2022). *Ajankohtaisia kysymyksiä ja vastauksia huoltovarmuudesta*, <https://www.huoltovarmuuskeskus.fi/a/ajankohtaisia-kysymyksiä-ja-vastauksia-huoltovar- muudesta>
- IEC Webstore. (i.a.). *IEC 61499-1:2012*. IEC. <https://webstore.iec.ch/publication/5506>
- Ilmatieteen laitos. (i.a.). *Suomen ilmastovyöhykkeet*. <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/suomen-ilmastovyohykkeet>
- Isohanni, J. (2017). *Sigfox – maailmanlaajuinen IoT-verkkoliittymä*. Centria. <https://centriabul- letin.fi/sigfox-maailmanlaajuinen-iot-verkkoliittyma>
- Järvenpää, L., & Savolainen, M. (toim.). (2015). *Maankuivatuksen ja kastelun suunnittelu* (Ympäristöhallinnon ohjeita 4/2015, 2. päivitetty painos). Suomen ympäristökeskus. <http://hdl.handle.net/10138/156521>
- Kaleva. (2019). *Tyrnävän perunapelloille kehitetään automaattista kosteudenhallintajärjestel- mää – tavoitteena suuremmat ja laadukkaammat perunasadot*. <https://www.kaleva.fi/tyr- navan-perunapelloille-kehitetaan-automaattista/1684797>
- Karlstad, W. (2023). *Kohti digitaalisesti suvereenia tulevaisuutta*. Tietoevry. <https://www.tie- toevry.com/fi/blogi/2023/01/kohti-digitaalisesti-suvereenia-tulevaisuutta/>
- Kauppinen, E., Puustinen, M., Triipponen J.-P., Sallmén, A., & Leppiniemi, O. (2017). *Ilmas- tokestävien valuma-alueiden työkalut. Biotalouskeinoin kohti ilmastokestävyttä II (BILKE II) - hankkeen loppuraportti*. https://www.ely-keskus.fi/documents/10191/46504153/Loppuraportti_BILKE+II+-+Ilmastokest%C3%A4vien+valuma-alueiden+ ty%C3%B6kalut.pdf/46ecc0b5-58c7-9f1f-65cb-da3532695612?t=1649159382756
- Koivusalo, H., & Hyvönen, P. (1994). *Säätösalaojitus- ja padotuskastelututkimusten koekent- tien mittausjärjestelyt ja tiedonkeruu- ja siirto-ohjelma*. (Vesitalouden laboratorion moniste- sarja 1994:6). Teknillinen korkeakoulu, Otaniemi. https://www.tukisaatio.fi/tietopankki/wp- content/uploads/2019/04/Koivusalo_H_S%C3%A4t%C3%B6salaojitus-ja-pado- tuskastelututkimusten_1994.pdf

- Laajalahti, M., & Nikander, J. (2017). *Alkutuotannon kyberuhat*. Luke. https://juri.luke.fi/bitstream/handle/10024/539088/luke-luobio_32_2017.pdf
- Leiponen-Syyrakki, H. (2022). *Ukrainan sota jatkuu – globaali ruokaturva heikentyy*. MTK. <https://www.mtk.fi/-/ukrainanruokaturva052022>
- Linna, E. (23.6.2022). *Keskustelu älymaataloudesta ei kosketa käytäntöä — perusasiat, tuotavuus ja kasvukyky on ensin saatava kuntoon*. Koneviesti. <https://www.koneviesti.fi/paajirjoitus/a44e2894-e443-48a4-8c19-9405485fc1af>
- Linnér, H. (2016). Maatalousmaan kastelu. Teoksessa M. Paasonen-Kivekäs, R. Peltomaa, P. Vakkilainen, & H. Äijö. (toim.), *Maan vesi- ja ravinnetalous: Ojitus, kastelu ja ympäristö* (2. täydennetty painos, s. 351–372). Salaojayhdistys.
- Luke. (2021). *Maatilojen lukumäärä vähenee, mutta maatalousmaa säilyy käytössä*. <https://www.luke.fi/fi/uutiset/maatilojen-lukumaara-vahenee-mutta-maatalousmaa-sailyy-kaytossa>
- Lydon, B. (i.a.). *RAMI 4.0 Reference Architectural Model for Industrie 4.0*. ISA. <https://www.isa.org/intech-home/2019/march-april/features/rami-4-0-reference-architectural-model-for-industr>
- Mark, J., & Hafnagel, P. (i.a.). *The IEEE 1451.4 Standard for Smart Transducers*. IEEE. <https://standards.ieee.org/wp-content/uploads/import/documents/tutorials/1451d4.pdf>
- Maa- ja metsätalousministeriö (MMM). (2022). *FI – Suomen CAP-suunnitelma 2023–2027*. <https://mmm.fi/documents/1410837/12210688/Suomen+viimeistelty+CAP-suunnitelma+2023-2027.pdf/667bf7ab-8af6-0afa-8c8e-ef5022178292/Suomen+viimeistelty+CAP-suunnitelma+2023-2027.pdf?t=1658396108940>
- Maanmittauslaitos (MML). (i.a.). *Pellon tiivistymishaitta*. <https://ak.maanmittauslaitos.fi/2022/maatalous/pellon-tiivistymishaitta>
- Miller, S., & Lerche, C. (2022). Sustainability with Rust. Amazon. <https://aws.amazon.com/blogs/opensource/sustainability-with-rust>
- MTK. (2022). *EU aikoo ulottaa sitovan ennallistamislainsäädännön kaikkiin metsiin ja maatalousympäristöihin ja siirtää turvepellot pois viljelykäytöstä*. <https://www.mtk.fi/-/eu-ennallistaminen>
- OPC-Foundation. (2022). *Unified Architecture*. OPC-Foundation. <https://opcfoundation.org/about/opc-technologies/opc-ua/>
- Opetushallitus. (2022). *Vesi*. <https://www.oph.fi/fi/oppimateriaali/luovasti-luonnonvaroista/suomen-luonnonvarat/vesi>

- Paasonen-Kivekäs, M. (2016). Säättösalaojitus. Teoksessa M. Paasonen-Kivekäs, R. Peltomaa, P. Vakkilainen, & H. Äijö (toim.), *Maan vesi- ja ravinnetalous: Ojitus, kastelu ja ympäristö* (2. täydennetty painos, s. 337–350). Salaojayhdistys.
- Pasanen, M. (2021). *Sumulaskennan hyödyntäminen esineiden internetissä*. [Tietotekniikan kandidaatintutkielma, Jyväskylän yliopisto]. <https://jyx.jyu.fi/bitstream/handle/123456789/78981/URN%3ANBN%3Afi%3Aju-202112155968.pdf>
- Patrus, A. (16.3.2022). *What is Unified Namespace and why you need to implement it to experience Industry 4.0*. PackIoT. <https://packiot.com/what-is-the-unified-namespace-and-why-you-need-to-implement-it-to-experience-industry-40>
- Peltokangas, T., & Käsäkoski, J. (2017). *OPC UA -arkkitehtuurin toteutus ja testaus teollisuusautomaatiossa*. Centria. <https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/140754/ISBN%20978-952-7173-31-2.pdf?sequence=1>
- Piirainen, N., Koskinen, A., & Satama, J. (2022). *Palvelumuotoilun ydin on asiakas*. Proakatemia essee pankki. <https://essee pankki.proakatemia.fi/palvelumuotoilun-ydin-on-asiakas>
- Reinikainen, A., & Kurppa, S. (2018). *VESI - Käsitteet, vesivarannot, veden laatu ja käyttö & luonnonolosuhteiden vaikutus*. Luke. https://www.arcticfoodfromfinland.fi/sites/arcticfood/files/Etusivu/vesimatriisi_sirpa_kurppa_08062018.pdf
- Rocha, H., Abrishambaf, R., Pereira, J., & Santo, A. (2022). *Integrating the IEEE 1451 and IEC 61499 Standards with the Industrial Internet Reference Architecture*. MDPI. <https://www.mdpi.com/1424-8220/22/4/1495/pdf?version=1645185832>
- Salo, T., Mylly, M., & Parkkila P. (2021). *Maatalouden ja vesihuollon sopeutumistoimet liisääntyviin kuivuusjaksoihin*. Luke. https://jukuri.luke.fi/bitstream/handle/10024/551257/luke-luobio_87_2021.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Samiedu. (i.a.). *Palvelumuotoilun prosessi noudattaa tuplatimanttia*. <https://pamu.samiedu.fi/menetelmat/prosessi>
- Scannell, E. (2023). AMD doubles down on AI with new Ryzen 7000 chips. TechTarget. <https://www.techtarget.com/searchenterpriseai/news/252528954/AMD-doubles-down-on-AI-with-new-Ryzen-7000-chips>
- SIL. (2021). *Schneider Electric investoi miljoona euroa Aalto-yliopiston ohjelmistokeskeisen automaation opetukseen*. Sähköinsinöörit – SIL. <https://www.sil.fi/uutiset/schneider-electric-investoi-miljoona-euroa-aalto-yliopiston-ohjelmistokeskeisen-automaation-opetukseen/>
- Sipilä, K. (2019). *Tulevaisuuden automaatiojärjestelmät OPC UA:n tietoturva ja pilvipalvelut*. [Opinnäytetyö, Centria-ammattikorkeakoulu, Sähkö- ja automaatiotekniikan koulutusohjelma]. https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/166396/kari_sipila.pdf?sequence=2

- Sokala, H. (2021). *Ruoka puuttuu valtion varmuusvarastoista – viranomaiset olettavat kansalaisten hankkivan itse elintarvikkeita häiriötilanteita varten*. Ylen MOT-toimitus. <https://yle.fi/a/3-11822490>
- Suomen Standardisoimisliitto (SFS). (2013). *Function Blocks – Part 1: Architecture (IEC 61499-1:2012)*.
- Tietosuojavaltuutetun toimisto. (i.a.). *Pseudonymisoidut ja anonymisoidut tiedot*. Tietosuojavaltuutetun toimisto. <https://tietosuoja.fi/pseudonymisointi-anonymisointi>
- Thomas, G. (2019). *A proactive approach to more secure code*. Microsoft. https://msrc-blog.microsoft.com/2019/07/16/a-proactive-approach-to-more-secure-code/?utm_source=thenewstack&utm_medium=website&utm_content=inline-mention&utm_campaign=platform
- Tolsa, M. (2022). *Yhdysvaltain länttä piinaa pahin kuivuuskausi yli tuhanteen vuoteen, kertoo uusi tutkimus*. Yle. <https://yle.fi/a/3-12319990>
- Traficom. (2021a). *Noin 1000 automaatiolaitetta on yhä suojaamatta suomalaisissa verkoissa*. Traficom. <https://www.kyberturvallisuuskeskus.fi/fi/ajankohtaista/noin-1000-automatiolaitetta-yha-suojaamatta-suomalaisissa-verkoissa>
- Traficom. (2021b). *Suojaamattomia automaatiojärjestelmiä suomalaisissa verkoissa 2020*. https://www.kyberturvallisuuskeskus.fi/sites/default/files/media/file/Automaatiolaitetekartointus_2020.pdf
- Traficom. (2023). *Luvasta vapaiden radiolähettimien yhteistajuuudet ja käyttö*. <https://www.traficom.fi/sites/default/files/media/regulation/M%C3%A4%C3%A4r%C3%A4ys%2015AT.pdf>
- TTTech. (i.a.). *Time Sensitive Networking ja OPC UA FX*. <https://www.tttech-industrial.com/resource-library/blog-posts/opc-ua-fx>
- Vakkilainen, P. (2016). Hydrologian perusteita. Teoksessa M. Paasonen-Kivekäs, R. Peltomaa, P. Vakkilainen, & H. Äijö (toim.), *Maan vesi- ja ravinnetalous: Ojitus, kastelu ja ympäristö* (2. täydennetty painos, s. 73–128). Salaojayhdistys.
- Valtiovarainministeriön (VM). (2020). *Julkisen hallinnon digitaalinen turvallisuus*. https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/162169/VM_2020_23.pdf?sequence=2&isAllowed=y
- Wallenius, N. (2022). *7 syytä miksi pilvipalvelu voisi olla parempi kuin ulkoistettu konesali*. Wallenius consulting. <https://niklaswallenius.fi/7-syyta-miksi-pilvipalvelu-voisi-olla-parempi-kuin-ulkoistettu-konesali/>

LIITTEET

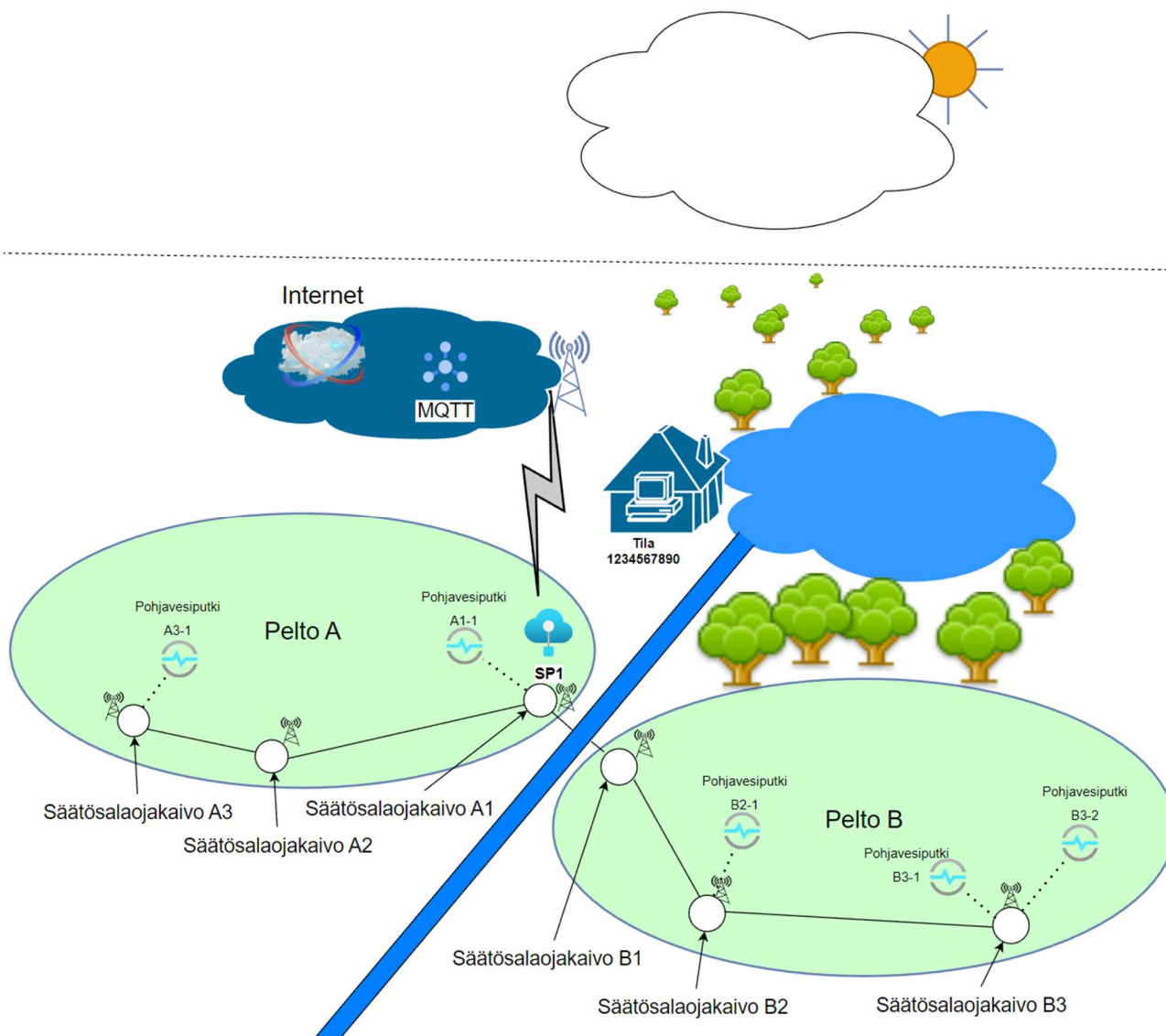
Liite 1. Pellon vesitalouden hallinnan Sparkplug-nimiavaruuden yleiskuvaus

Liite 2. Säättösalaajakaivon ohjauksen ja pilvipalvelun arkkitehtuuri

Liite 3. Raspberry Pico kontrollerilla toteutettu säättösalaajakaivon ohjaus

Liite 1. Pellon vesitalouden hallinnan Sparkplug-nimiavaruuden yleiskuvaus

- Pelloilla A ja B on yhteensä kuusi säätösalaojakaivoa A1, A2, A3, B1, B2 ja B3
- Säätösalaojakaivot liitetty yhdyskäytävän kautta langattomasti pilvipalveluun
- Sensoreiden laitetiedot tallennetaan pilvipalveluun
- Säätösalaojakaivojen automaation asetusarvot määritellään pilvipalvelussa
- Säätösalaojakaivon ohjaus ja laitetietojen siirto Sparkplug-protokollalla
- Pilvipalvelussa MQTT-välityspalvelin, joka välittää Sparkplug-viestit
- Pellot A ja B, voivat olla samassa "SP1" Sparkplug-reuna-solmussa (edge-node)
- Osoite säätösalaojakaivolle B3: **spBv1.0/<tilanumero>/<komento>/SP1/B3**
- Sparkplug-komento kaivolle B3: **spBv1.0/1234567890/DCMD/SP1/B3**



Liite 3. Raspberry Pico kontrollerilla toteutettu säätösalaojakaivon ohjaus

Raspberry Zero W:n komennot patokorkeuden säätämiseen sarjaportin välityksellä:

- Rele0: "R00" = kiinni ja "R01" = auki, Rele1: "R10" = kiinni ja "R11" = auki.
- Lukuarvo väliltä 0 – 4000 asettaa säätösalaojakaivon patokorkeuden.

```

130 while let Ok(byte: usize) = uart.read_raw(buffer: &mut buff) {
131     rel7_pin.set_low().unwrap();
132     suunta = Suunta::Vapaa;
133     if buff[0] == b'R' {
134         if buff[1] == b'0' {
135             if buff[2] == b'1' {
136                 rel6_pin.set_high().unwrap();
137             } else {
138                 rel6_pin.set_low().unwrap();
139             }
140         } else if buff[1] == b'1' {
141             if buff[2] == b'1' {
142                 rel7_pin.set_high().unwrap();
143             } else {
144                 rel7_pin.set_low().unwrap();
145             }
146         } else {}
147     } else {
148         let mut arvo: u16 = 0;
149         for x: u8 in buff {
150             if x.is_ascii_digit() {
151                 arvo = 10*arvo + ((x-b'0') as u16);
152             }
153         }
154         if (arvo > 0u16) & (arvo < 4000u16) {
155             tavoite_korkeus = arvo;
156             if tavoite_korkeus > pin_adc2 {
157                 rel6_pin.set_high().unwrap();
158                 suunta = Suunta::Ylos;
159             } else {
160                 rel6_pin.set_low().unwrap();
161                 suunta = Suunta::Alas;
162             }
163             rel7_pin.set_high().unwrap();
164         }
165     };
166 }

167
168 match suunta {
169     Suunta::Ylos => {
170         if tavoite_korkeus < pin_adc2 {
171             rel7_pin.set_low().unwrap();
172             suunta = Suunta::Vapaa
173         }
174     },
175     Suunta::Alas => {
176         if tavoite_korkeus > pin_adc2 {
177             rel7_pin.set_low().unwrap();
178             suunta = Suunta::Vapaa
179         }
180     },
181     _ => {},
182 }

```